République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique
Ecole Nationale Polytechnique

Département Maitrise Des Risques Industriels et Environnementaux
Groupement Sonatrach-Eni & SERH

Mémoire de Projet de fin d'Etudes pour l'obtention du Diplôme d'Ingénieur d'Etat en : Qualité, Hygiène, Sécurité, Environnement et Gestion des Risques Industriels (**QHSE-GRI**)

Thème

Développement d'un système intelligent à capteur connecté pour la gestion d'urgence industrielle suite à une perte de confinement

Cas : unité de compression GSE algérie

Ichrak BELGUENDOUZ

Sous la Direction de : M. Amine BENMOKHTAR — Maitre conférence A, ENP

M. Hadj BOUDALIA — Ingénieur HSE, SERH

Présenté et soutenue publiquement le (01/07/2025)

Composition du jury :

Président	M. Abdelmalek CHERGUI	Professeur, ENP
Examinateur	M. M'hamed BOUSBAI	Maitre conférence B, ENP
	M. Mohamed BOUBAKEUR	Maitre conférence A, ENP

ENP 2025

République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique
Ecole Nationale Polytechnique

Département Maitrise Des Risques Industriels et Environnementaux
Groupement Sonatrach-Eni & SERH

Mémoire de Projet de fin d'Etudes pour l'obtention du Diplôme d'Ingénieur d'Etat en : Qualité, Hygiène, Sécurité, Environnement et Gestion des Risques Industriels (**QHSE-GRI**)

Thème

Développement d'un système intelligent à capteur connecté pour la gestion d'urgence industrielle suite à une perte de confinement

Cas : unité de compression GSE algérie

Ichrak BELGUENDOUZ

Sous la Direction de : M. Amine BENMOKHTAR — Maitre conférence A, ENP

M. Hadj BOUDALIA — Ingénieur HSE, SERH

Présenté et soutenue publiquement le (01/07/2025)

Composition du jury :

Président	M. Abdelmalek CHERGUI	Professeur, ENP
Examinateur	M. M'hamed BOUSBAI	Maitre conférence B, ENP
	M. Mohamed BOUBAKEUR	Maitre conférence A, ENP

ENP 2025

ملخص

تمثل إدارة حالات الطوارئ الصناعية تحديًا كبيرًا في المواقع النفطية والغازية، نظرًا لخطورة احتمالية فقدان الاحتواء. يقترح هذا المشروع حلاً تقنيًا يعتمد على مستشعرات متصلة، مصمم خصيصًا لوحدة الضغط. تعتمد المنهجية على تحليل المخاطر، وتقسيم الوظائف بشكل منهجي، والنمذجة بواسطة مخطط العقدة الفراشية لمعالجة ثلاثة سيناريوهات حرجة: تسرب غاز يتبعه حريق، انفجار ناجم عن تراكم الغاز، وحريق ناتج عن انتشار غاز قابل للاشتعال. تم إجراء تحديد دقيق لأبعاد المستشعرات، تلاه تصميم ثلاث هياكل لإنترنت الأشياء. يضمن النظام الكشف التلقائي عن الشذوذ، والإرسال الفوري للبيانات، وتفعيل إجراءات الأمان بشكل مستقل. أظهرت النتائج انخفاضًا ملحوظًا في زمن الاستجابة وتحسنًا في التنسيق. يشكل هذا الحل أداة موثوقة وقابلة للتطوير لإدارة حالات الطوارئ، ومتوافقة مع المعايير الدولية للسلامة.

كلمات مفتاحية: الحوسبة السحابية، منهجية التحليل والتصميم المنظم، مخطط العقدة الفراشية، سرعة الاستجابة، السلامة الصناعية.

Abstract

The management of industrial emergencies represents a major challenge in oil and gas sites due to the potential severity of containment loss. This project proposes a technological solution based on connected sensors, specifically designed for the compression unit. The methodology relies on risk analysis, functional decomposition using SADT, and bow-tie modeling to address three critical scenarios : gas leak followed by fire, explosion caused by gas accumulation, and fire caused by the dispersion of a flammable gas. A precise sizing of the sensors was carried out, followed by the design of three IoT architectures. The system ensures automatic anomaly detection, real-time data transmission, and autonomous triggering of safety actions. The results show a significant reduction in response time and improved coordination. This solution constitutes a reliable and scalable tool for emergency management, compliant with international safety standards.

Keywords : *Cloud architecture, structured analysis and design technique, bow-tie, responsiveness, industrial safety.*

Résumé

La gestion des urgences industrielles représente un enjeu majeur dans les sites pétroliers et gaziers, en raison de la gravité potentielle des pertes de confinement. Ce projet propose une solution technologique à capteurs connectés, conçue spécifiquement pour lunité de compression. La méthodologie repose sur lanalyse de risques, la décomposition fonctionnelle *SADT*, et la modélisation par le nud papillon pour traiter trois scénarios critiques : fuite de gaz suivie dun incendie, explosion due à laccumulation de gaz, et incendie causé parla dispersion dun gaz inflammable . Un dimensionnement des capteurs a été effectué, suivi de la conception de trois architectures *IoT*. Le système assure la détection automatique des anomalies, la transmission en temps réel et le déclenchement autonome dactions de sécurité. Les résultats montrent une réduction significative du temps de réponse et une meilleure coordination. Cette solution constitue un outil fiable et évolutif pour la gestion des situations durgence, conforme aux normes de sécurité internationales.

Mots clés : Architecture en nuage, méthode danalyse et de conception structurée, nud papillon, réactivité, sécurité industrielle.

Remerciements

Je tiens à adresser mes remerciements les plus sincères à toutes les personnes qui m'ont accompagnée et soutenue tout au long de la réalisation de ce mémoire.

Je souhaite exprimer ma profonde gratitude à **M. Amine BENMOKHTAR**, pour son encadrement rigoureux, sa disponibilité, ses conseils avisés et son soutien constant. Son accompagnement a été fondamental pour mener à bien ce travail.

Je remercie également **M. Hadj BOUDALIA**, pour ses orientations techniques, sa disponibilité et son implication précieuse tout au long de ma mission.

Je remercie **M. Abdelmalek CHERGUI**, pour lhonneur quil ma fait en présidant ma soutenance.

Ma reconnaissance va également à **M. Mohamed BOUBAKEUR** et **M. Mhamed BOUSBAI**, qui ont accepté de faire partie de mon jury, pour lattention quils ont portée à mon travail et la richesse de leurs remarques.

Je tiens aussi à exprimer toute ma reconnaissance à lensemble du personnel du **département HSE** de GSE Algérie, pour leur accueil, leur accompagnement et pour mavoir offert un environnement de travail propice à lapprentissage et à lévolution.

Je remercie également tous les enseignants du **département QHSE-GRI** de lÉcole Nationale Polytechnique, pour la qualité de lenseignement quils mont transmis tout au long de mon parcours.

Dédicace

À ma mère, pour son amour infini.
À mon père, pour sa force, son soutien et sa confiance en moi.
À mes surs chéries : Habiba, Fatima et Nadjat, pour leur présence, leurs mots et leur tendresse.
À Adam, mon neveu, petit trésor de notre famille, source de lumière dans mes journées.
Et à moi-même, pour avoir tenu bon, cru en mes rêves, et donné le meilleur jusquau bout.

Ichrak

Table des matières

Table des figures

Liste des tableaux

Acronymes

AES	*Advanced Encryption Standard*
AMQP	*Advanced Message Queuing Protocol*
API	*American Petroleum Institute*
ATEX	Atmosphères Explosibles
BD	*Big Data*
BLE	*Bluetooth Low Energy*
CAFC	*Central Area Field Complex*
CCS	Centre de Coordination des Secours
$\mathbf{CGI_{IoT}}$	Capteurs de Gaz Inflammables de type IoT
ChV	*Choke Valve*
CoAP	*Constrained Application Protocol*
$\mathbf{CP_{IoT}}$	Capteurs de Pression de type IoT
$\mathbf{CF_{IoT}}$	Capteurs de Flamme de type IoT
$\mathbf{CT_{IoT}}$	Capteurs de Température de type IoT
$\mathbf{CV_{IoT}}$	Capteurs de Vibration de type IoT
CPF	*Central Processing Facility*
EDD	Étude De Danger
ENG	*Engineering*
ER	Événement Redouté
ESD	*Emergency ShutDown*
FDS	Fiches de Données de Sécurité
FCPL	*First Calgary Petroleum Ltd*
GRI	Gestion des Risques Industrielles

GPL	Gaz de Pétrole Liquéfié
GSU	Gestion des Situations dUrgences
GUI	Gestion des Urgences Industrielles
HPCR	*High Pressure Choke Regulator*
HSE	*Health, Safety and Environment*
HTTP	*Hypertext Transfer Protocol*
IA	Intelligence Artificielle
IEC	*International Electrotechnical Commission*
INRS	Institut National de Recherche et de Sécurité
IP	*Internet Protocol*
IPv6	*Internet Protocol version 6*
IoT	*Internet of Things*
IR	*Infrared*
ISO	*International Organization for Standardization*
LoRa	*Long Range*
LoRaWAN	*Long Range Wide Area Network*
LoWPAN	*Low Power Wireless Personal Area Network*
MLE	Menzel Ledjmet East
MQTT	*Message Queuing Telemetry Transport*
MV	*Master Valve*
NB-IoT	*Narrowband Internet of Things*
NFC	*Near Field Communication*
NFPA	*National Fire Protection Association*
ORSEC	ORganisation des SECour
OSI	*Open Systems Interconnection*
PID	*Piping and Instrumentation Diagram*
PFD	*Process Flow Diagram*
PII	Plan dIntervention Interne
POE	Plan dOpération Externe

PORE	Plan dOrganisation de la Réponse Externe
PPI	Plan Particulier dIntervention
PU	Plan dUrgence
REST	*Representational State Transfer*
RETEX	Retour dExpérience
RIA	Robinet dIncendie Armé
RPL	*Routing Protocol for Low Power and Lossy Networks*
SADT	*Structured Analysis and Design Technique*
SCADA	*Supervisory Control and Data Acquisition*
SGU	Système de Gestion dUrgence
SSSV	*Surface-controlled Subsurface Safety Valve*
ST	Solution Technologique
TCDD	2,3,7,8-Tetrachlorodibenzo-p-dioxin
TAGI	Trias Argilo-Gréseux Inférieur
TCP	*Transmission Control Protocol*
TEG	Triéthylène Glycol
UDP	*User Datagram Protocol*
UC	Unité de Compression
UV	Ultraviolet
VCE	*Vapor Cloud Explosion*
WHCP	*Wellhead Control Panel*
WV	*Wing Valve*

Introduction générale

La sécurité industrielle représente aujourdhui un pilier fondamental dans la gestion des installations à haut risque, notamment dans le secteur de lénergie, du gaz et du pétrole. Lévolution des technologies, la complexité croissante des équipements et les exigences réglementaires imposent aux exploitants de renforcer en permanence leurs dispositifs de prévention et de réaction face aux incidents et aux accidents industriels. Dans ce contexte, la gestion des situations durgence (GSU) repose de plus en plus sur la capacité des systèmes à détecter rapidement les dysfonctionnements, à transmettre linformation de manière fiable et à déclencher automatiquement des mesures adéquates, sans dépendre exclusivement de lintervention humaine . [1]

Le présent travail sinscrit dans cette dynamique. Il a pour objectif de concevoir une solution technologique (ST) basée sur l*Internet of Things* (*IoT*) et adaptée aux besoins spécifiques dune unité de compression (UC). Lobjectif est de proposer un système capable de surveiller en continu les paramètres critiques, de transmettre les données à distance en toute sécurité et dactiver automatiquement les actions dintervention dès les premiers signes dun événement redouté (ER).
Pour atteindre cet objectif, une démarche méthodologique a été mise en place. Elle a commencé par une analyse des scénarios d'accidents retenues par l'étude de danger (EDD), à partir de laquelle trois scénarios critiques ont été identifiés. Ils ont ensuite été modélisés à laide de la méthode du nud papillon et de lapproche *Structured Analysis and Design Technique* (*SADT*), ce qui a permis didentifier les paramètres physiques clés à surveiller, tels que les fuites de gaz, les hausses de température, les pressions anormales ou les vibrations inhabituelles.
Sur la base de ces paramètres, des capteurs *IoT* adaptés ont été sélectionnés, puis dimensionnés selon une méthode conforme à la norme IEC 60079-29-2, afin dassurer une implantation efficace dans les zones critiques. Ensuite, plusieurs architectures *IoT* ont été conçues, tenant compte des exigences de communication, et le protocole *Long Range* (*LoRa*) a été retenu pour relier les capteurs au système central.

Notre travail est structuré en quatre chapitres, permettant de suivre une progression logique depuis le cadre général du projet jusquà la proposition de la ST.

Chapitre 1 : Le premier chapitre présente le contexte industriel dans lequel sinscrit ce travail, en mettant en lumière les enjeux actuels de la sécurité dans les installations à haut risque. Il introduit également la problématique liée aux limites des systèmes classiques de détection et de gestion durgences industrielles (GUI), et justifie le recours à des STs plus avancées.

Chapitre 2 : Dans ce chapitre, nous serons amenés à présenter les concepts fondamentaux de la gestion des risques industriels (GRI) et de la GUI. Ces notions théoriques sont essentielles pour comprendre les bases sur lesquelles reposera la solution *IoT* développée. Nous commencerons par définir la GRI, en précisant ses objectifs et ses étapes. Ensuite, nous aborderons la GUI en décrivant ses différentes phases et les plans durgence (PUs) mis

en place. Nous mettrons en évidence la relation entre ces plans et les phases de la GUI. Ce chapitre introduit également le cadre théorique dans lequel sinscrivent certaines notions telles que le SADT , le nud papillon et les généralités sur les capteurs IoT,architecture du système IoT et le protocole de communicationqui seront approfondies ultérieurement.

Chapitre 3 : Le troisième chapitre est consacré à lanalyse des scénarios d'accidents pour lUC ciblée. Trois scénarios critiques sont identifiés et modélisés à laide dapproches méthodiques, permettant de définir les paramètres physiques essentiels à surveiller et de comprendre la dynamique des ERs.

Chapitre 4 : Le quatrième chapitre décrit la démarche de conception de la ST. Il aborde le choix des capteurs IoT adaptés, le dimensionnement de leur déploiement selon les normes en vigueur, lélaboration des différentes architectures de communication possibles, ainsi que la logique de fonctionnement du système en cas de détection danomalie.

Notre travail sinscrit dans une vision globale damélioration continue des dispositifs de sécurité, en tirant partie des outils technologiques pour répondre à des problématiques industrielles majeures.
Il vise à démontrer la faisabilité dune solution connectée, réactive et adaptable, capable denrichir les stratégies dintervention dans un secteur où la réactivité peut faire toute la différence.

Chapitre 1

Contexte général, problématique et méthodologie

Dans ce chapitre, nous allons contextualiser notre problématique et présenter la méthodologie adoptée pour atteindre les objectifs de cette étude. Nous débuterons par une introduction à limportance de la GUI, en soulignant son rôle central dans la GRI. Ensuite, nous exposerons une liste daccidents industriels majeurs survenus dans le monde et en Algérie, en mettant laccent sur les défaillances organisationnelles, techniques ou humaines en matière de GUI. Cela nous permettra didentifier les enseignements clés et de justifier lintérêt dune nouvelle ST moderne fondée sur lIoT. Puis, nous présenterons les objectifs et la méthodologie suivie dans le cadre de ce travail.

1.1 Importance de la gestion durgence industriel [1]

Le traitement et la GUI sont une étape de la GRI. Elle consiste en tout un ensemble de dispositions prises pour prévoir, détecter, réagir et contrôler les situations accidentelles ou catastrophiques. Une GUI optimale repose sur la détection rapide des dysfonctionnements, la transmission instantanée des alertes, la prise de décision coordonnée et la mobilisation immédiate des ressources.

Dans lindustrie, voire même dans les UCs de gaz, un simple retard dans la détection dune fuite ou une mauvaise coordination des réponses peut transformer un incident mineur en catastrophe majeure. Malheureusement, lhistoire industrielle regorge dexemples où la défaillance de la GUI a été un facteur aggravant, voire déclencheur de tragédies humaines, environnementales et économiques.

1.1.1 Accidents industriels suite à un échec de la GUI [1]

De nombreux accidents industriels à travers le monde ont été aggravés, voire causés, par labsence dun système de gestion durgence (SGU) efficace. Dans la majorité de ces cas, linsuffisance de la détection précoce, labsence dalerte automatisée ou le retard dans les prises de décision ont empêché une réaction rapide et maîtrisée face à lévénement.

Ces situations ont mis en évidence les limites des approches traditionnelles et renforcé le besoin dintégrer des STs modernes.

Dans ce qui suit, nous allons présenter 17 accidents, survenus entre 2024 et 1976, répertoriés dans le tableau 1.1 ci-dessous.

Tableau 1.1 : Accidents industriels (1976--2024) [1]

Date	**Lieu**	**Type dinstallation**	**Description**	**Défaillance liée à la GUI**
10 juillet 1976	Seveso	Industrie chimique	Fuite de dioxine(TCDD)	Alerte tardive, absence de plan dévacuation
28 mars 1979	Three Mile Island	Centrale nucléaire	Fusion partielle du cur dun réacteur nucléaire	Mauvaise interprétation des alarmes
3 décembre 1984	Bhopal	Pesticides (Union Carbide)	Fuite massive disocyanate de méthyle	Absence dalerte
26 avril 1986	Tchernobyl	Centrale nucléaire	Explosion du réacteur nř4	Gestion durgence opaque
30 septembre 1992	Sidi Bel Abbès	Transport dhydrocarbures	Camion-citerne en feu	Absence dévacuation rapide
30 juillet 2004	Ghislenghien	Gazoduc	Explosion après fuite	Signalement ignoré,évacuation tardive
23 mars 2005	Texas City	Raffinerie BP	Explosion dans une colonne de distillation	Alarmes ignorées, absence darrêt automatique
19 janvier 2008	Skikda	Complexe gazier	Explosion dun turbocompresseur	Mauvaise communication durgence
25 août 2012	Amuay	Raffinerie	Explosion due à une fuite de gaz	Défaillance des détecteurs de gaz
6 juillet 2013	Lac-Mégantic	Transport ferroviaire	Déraillement et explosion	Aucune surveillance pendant le stationnement
12 août 2015	Tianjin	Dépôt de produits chimiques	Explosions successives	Pompiers non informés

Date	Lieu	Type dinstallation	Description	Défaillance liée à la GUI
4 septembre 2017	Arkema	Produits chimiques	Incendie suite à une inondation	Pas de système de secours efficace
27 février 2019	Ain Salah	Pipeline gazier	Fuite de gaz à haute pression	Défaillance des capteurs de pression
4 août 2020	Beyrouth	Dépôt de nitrate dammonium	Explosion meurtrière	Aucune alerte
18 octobre 2022	Hassi R'Mel	Unité de compression	Départ de feu	Absence de détection automatique du gaz
14 mars 2023	Gassi Touil	Compresseur de gaz	Fuite de condensat suivie dexplosion	Pas dalerte instantanée
9 mai 2024	Msila	Réservoirs pétroliers	Incendie lors dun transfert	Défaillance des capteurs de température

Le tableau 1.1 présente la gravité des accidents industriels majeurs. Selon les sites, ils ont des causes très variées, mais également une multitude de défaillances qui font que la présence de plans durgence (PU) dans beaucoup dinstallations ne suffit pas à assurer la réactivité nécessaire pour gérer les situations durgence.

La détection non automatisée est un handicap majeur : lhumain intervient trop souvent et trop tard dans les décisions. Les données sont éparpillées dans de multiples systèmes, compliquant la montée en puissance de lanalyse alors que chaque seconde est comptée. De même, la non-connectivité entre capteurs, alarmes et équipes génère un retard logistique à laction. Le non-respect de normes comme l*ISO* 22320: 2018 par une grande partie des sites constitue une entrave à la coordination et à la consolidation du retour dexpérience (RETEX).

1.2 Problématique

Malgré les efforts importants déployés par de nombreuses organisations pour mettre en place des procédures *Health, Safety and Environment (HSE)* et des systèmes de sécurité dans le cadre de la GRI, ces dernières peinent encore à faire face à des enjeux critiques en matière de GUI. Les défaillances répertoriées sont en fait multiples et désignent des défaillances multi-causales.

Les plus probables sont : une désynchronisation entre la rapidité de la détection des anomalies et la réactivité des acteurs de la GUI, une insuffisance dans la transmission de linformation vers les opérateurs, une centralisation mal adaptée des différents systèmes de GUI, ce qui augmente le degré de complexité, favorisant des situations aggravées avec des risques daccidents graves, la multiplication des pertes humaines et la survenance de dommages matériels significatifs. Plusieurs enjeux majeurs influent également sur l'efficacité de la GUI dans les installations industrielles.

Cest dans ce cadre que se manifestent plusieurs défis techniques et organisationnels, affectant directement la réactivité, la coordination et l'efficacité des réponses durgence. Leur identification et leur compréhension sont indispensables pour envisager des STs innovantes et durables. Doù la problématique centrale de ce travail : comment concevoir et mettre en uvre un système de GUI intelligent, capable de détecter les dysfonctionnements en temps réel, de centraliser les données critiques, de coordonner efficacement les interventions et dassurer la conformité aux normes internationales ?

Dans ce qui suit, nous allons traiter cette problématique au sein du champ Menzel Ledjmet Est (MLE), que nous présenterons dans la prochaine section.

1.3 Présentation du champ MLE

Dans cette partie, nous allons présenter le champ MLE à travers son historique, son organigramme, sa localisation géographique par rapport au bassin de Berkine ainsi que le procédé de traitement du gaz brut.

1.3.1 Historique du champ MLE [2]

Le champ gazier MLE est situé dans le bloc 405b du bassin de Berkine, une zone riche en hydrocarbures se trouvant dans le sud-est algérien. Il se situe à environ 220 kilomètres au sud-est de Hassi Messaoud, dans la wilaya dOuargla. Ce champ fait partie des projets stratégiques de développement gazier en Algérie, ayant pour objectif principal de renforcer la production nationale de gaz naturel tout en valorisant les ressources disponibles dans le bassin de Berkine.

La découverte du champ MLE remonte aux années 2000, lorsquune campagne dexploration a été menée par la compagnie nationale Sonatrach, en partenariat avec la société canadienne *First Calgary Petroleum Ltd* (*FCPL*).

Les premières phases du développement ont inclus des forages exploratoires, des études de caractérisation du réservoir, ainsi que linstallation dinfrastructures de surface nécessaires pour la production, le traitement et le transport du gaz et des condensats. En 2008, la compagnie

italienne Eni a procédé à lacquisition de *FCPL*, intégrant ainsi les droits et les actifs relatifs au champ MLE. Dès lors, Eni est devenue lopérateur principal du champ, en collaboration avec Sonatrach, avec pour ambition de renforcer la coopération bilatérale dans le secteur énergétique et de développer lexpertise locale.

Le projet de développement du champ MLE comprend la mise en place de puits de production, dune unité centrale de traitement du gaz, ainsi quun pipeline pour lexportation du gaz vers le réseau de transport national. La mise en production commerciale a été lancée en 2013, marquant une étape importante dans la stratégie de diversification de lapprovisionnement énergétique du pays

La figure 1.1 suivante présente la localisation géographique du champ MLE, permettant de situer précisément son emplacement au bloc 405b du bassin de Berkine.

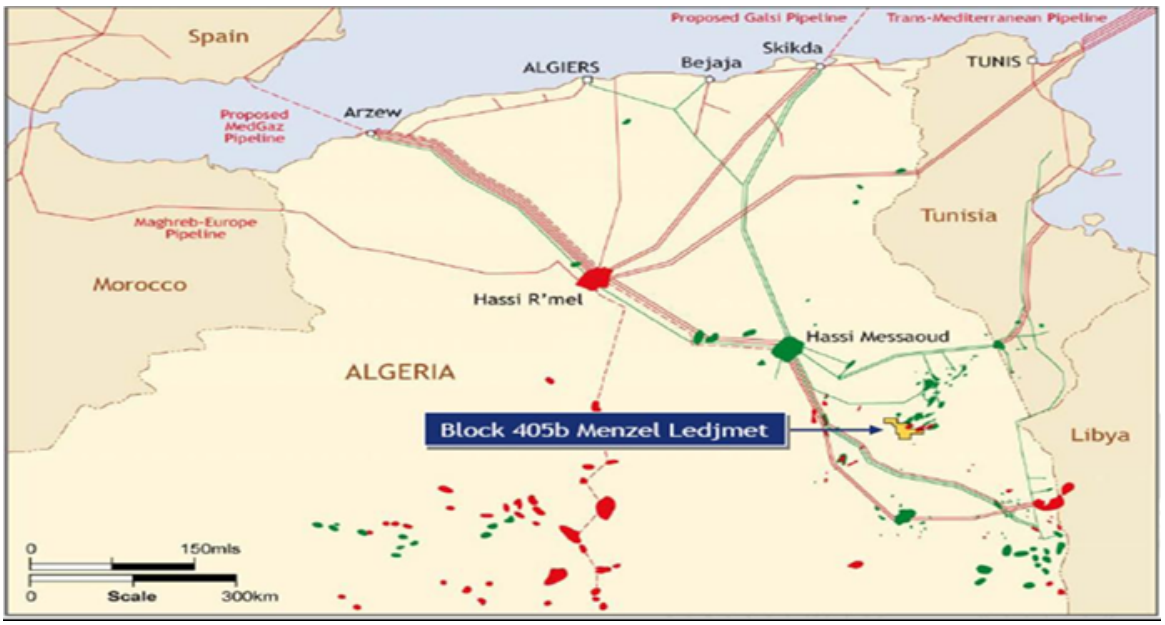


Figure 1.1 : Localisation géographique du champ MLE [2]

Dans le champ MLE, on trouve que lorganigramme est composé de plusieurs départements clés, chacun jouant un rôle spécifique dans le fonctionnement global du site. Parmi eux, on distingue le département *Engineering (ENG)* , Production, le département dexploitation, de maintenance, de logistique, de finance, ressources humaines (RHU),*HSE*, ainsi que le département technique.

Chaque département est structuré en plusieurs services spécialisés, assurant la coordination des activités et la gestion efficace des opérations du champ.

La figure 1.2 suivante illustre cette organisation à travers lorganigramme du champ MLE.

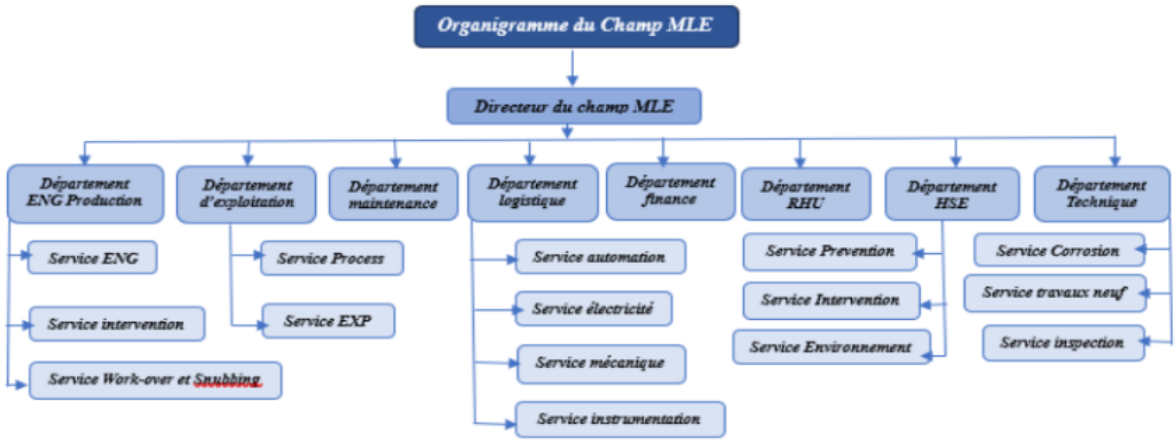


Figure 1.2 : Organigramme du champ MLE [2]

1.3.2 Processus de traitement du gaz brut [2]

Le processus de traitement du champ gazier MLE sappuie sur une architecture de production intégrée, combinant un réseau de collecte de haute performance et une *Central Processing Facility (CPF)* , conforme aux standards industriels internationaux.

Lobjectif principal de ce dispositif est dassurer le conditionnement optimal des hydrocarbures produits (gaz, GPL, condensat et pétrole), conformément aux spécifications commerciales et environnementales exigées, tout en garantissant lintégrité des équipements et la sécurité du personnel.

1.3.2.1 Description du processus de traitement du gaz [2]

Le réseau de collecte de gaz constitue la première étape de cette chaîne de traitement. Il assure lacheminement sécurisé et continu des fluides multiphasiques (gaz, liquides) extraits de 24 puits de production, chacun étant équipé dune tête de puits standardisée. Ces têtes sont dotées dun ensemble de vannes de contrôle, dont la *Master Valve (MV)* , *Wing Valve (WV)* , *Choke Valve (ChV)* , et *Surface-controlled Subsurface Safety Valve (SSSV)* .

Ces dispositifs sont commandés à distance par *Wellhead Control Panel (WHCP)* , ce qui permet une réactivité élevée en cas de dysfonctionnement ou durgence opérationnelle. Chaque tête de puits est connectée à une fosse de brûlage et à une ligne de manifold de collecte, permettant une évacuation contrôlée des gaz dangereux en cas de situation anormale.

Dans un souci de prévention des risques de corrosion interne, un second sous-système a été mis en place : il sagit du Système 15, destiné à linjection dinhibiteurs de corrosion. Cette injection est calibrée selon des paramètres physico-chimiques continuellement mesurés (pression, tempé-

rature, composition des fluides), de manière à préserver lintégrité des conduites et à réduire la fréquence des maintenances correctives.

Ces inhibiteurs chimiques, souvent à base damines organiques, agissent par adsorption à la surface des tuyauteries, formant un film protecteur contre les attaques acides, très courantes dans ce type de production.

Les fluides collectés sont ensuite regroupés par le biais du Système 18, constitué de six collecteurs intermédiaires. Chaque collecteur reçoit le débit provenant de quatre à cinq puits, ce qui permet une régulation progressive des flux et une réduction des variations de pression. Ce maillage de collecte favorise une meilleure homogénéisation des phases et garantit une alimentation stable de la *CPF*.

À ce stade, les fluides conservent leur nature multiphasique, ce qui nécessite une séparation séquentielle en plusieurs étapes dans lunité de traitement centrale.

Larrivée à la *CPF* marque le début du traitement physico-chimique proprement dit. Le premier équipement rencontré est le séparateur primaire, appelé *Slugcatcher* (Système 20). Ce dispositif est conçu pour absorber les à-coups liquides et pour effectuer une séparation gravitaire initiale entre la phase gazeuse et les phases liquides lourdes (eau, condensats).

Cette séparation primaire est essentielle pour protéger les équipements critiques en aval, notamment les échangeurs, les colonnes de traitement et les unités de compression, contre les dommages mécaniques ou thermiques liés aux fluctuations brutales de débit.

Le gaz ainsi pré-séparé est ensuite dirigé vers le Système 30, dédié à lélimination des contaminants critiques tels que le mercure et le sulfure dhydrogène (H_2S). Ce système repose sur des lits fixes dadsorbants solides, dont la composition est adaptée à chaque polluant cible : du charbon activé imprégné est utilisé pour la capture du mercure, tandis que des lits à base doxyde de fer ou de zinc sont utilisés pour neutraliser le H_2S. Cette étape permet de réduire considérablement les risques de corrosion, dempoisonnement catalytique et de formation de composés instables en aval du procédé.

La dernière étape majeure de traitement du gaz consiste à réduire la teneur en dioxyde de carbone (CO_2), afin datteindre une pureté conforme aux normes commerciales (moins de 2 % de CO_2 en volume).

Ce traitement est réalisé dans le Système 28, basé sur un procédé dabsorption chimique utilisant des solutions damines. Le CO_2 est capté par contact contre-courant dans une colonne dabsorption, puis libéré par réchauffage dans une colonne de régénération. Cette opération permet de produire un gaz prêt pour la compression et lexportation.

Nous allons présenter par la suite la figure 1.3, qui illustre les étapes de traitement du gaz brut extrait du champ MLE, depuis la séparation initiale jusquà la valorisation du gaz et des condensats.

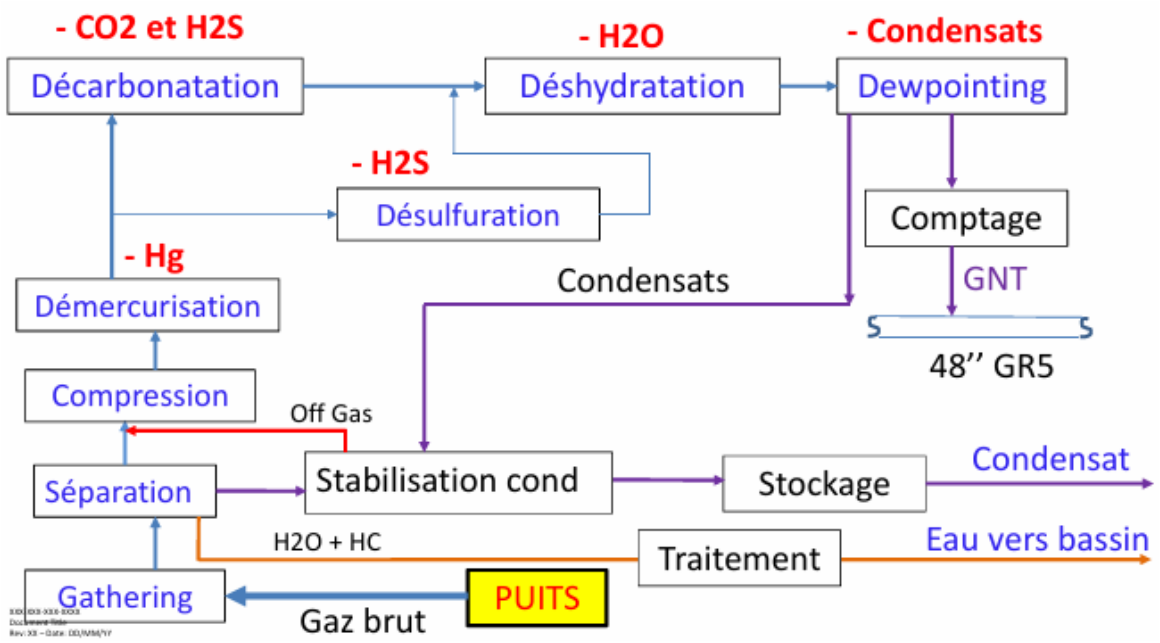


Figure 1.3 : Étapes de traitement du gaz brut [2]

1.4 Objectifs et Méthodologie

Ce travail vise à apporter une solution aux dysfonctionnements constatés dans la GUI, en concevant un système intelligent de gestion durgence basé sur de nouvelles STs les mieux adaptées,comme lIoT, dont le principal but est dopérer une surveillance permanente du site afin de repérer, analyser et réagir au plus vite à tout dysfonctionnement, limitant ainsi les risques dincidents.

En effet, le choix de cette ST est motivé par la disponibilité des capteurs pouvant être utilisés dans les installations industrielles, comme les capteurs pour les fuites de gaz, les variations de température ou de pression, les défaillances dappareillage, etc.
Ces derniers seront immédiatement connectés à une plateforme centralisée de collecte de façon continue.

1.4.1 Démarche méthodologique

La démarche repose sur une approche systématique, subdivisée en cinq étapes successives qui permettent d'aborder la problématique posée, allant de lanalyse des scénarios daccidents à la conception dun système intelligent. Chaque étape a été conçue pour fournir une réponse adaptée aux spécificités de linstallation et aux enjeux liés à la sécurité industrielle dans le secteur pétrolier.

La figure 1.4 décrit les cinq étapes de la démarche méthodologique adoptée dans le cadre de notre travail.

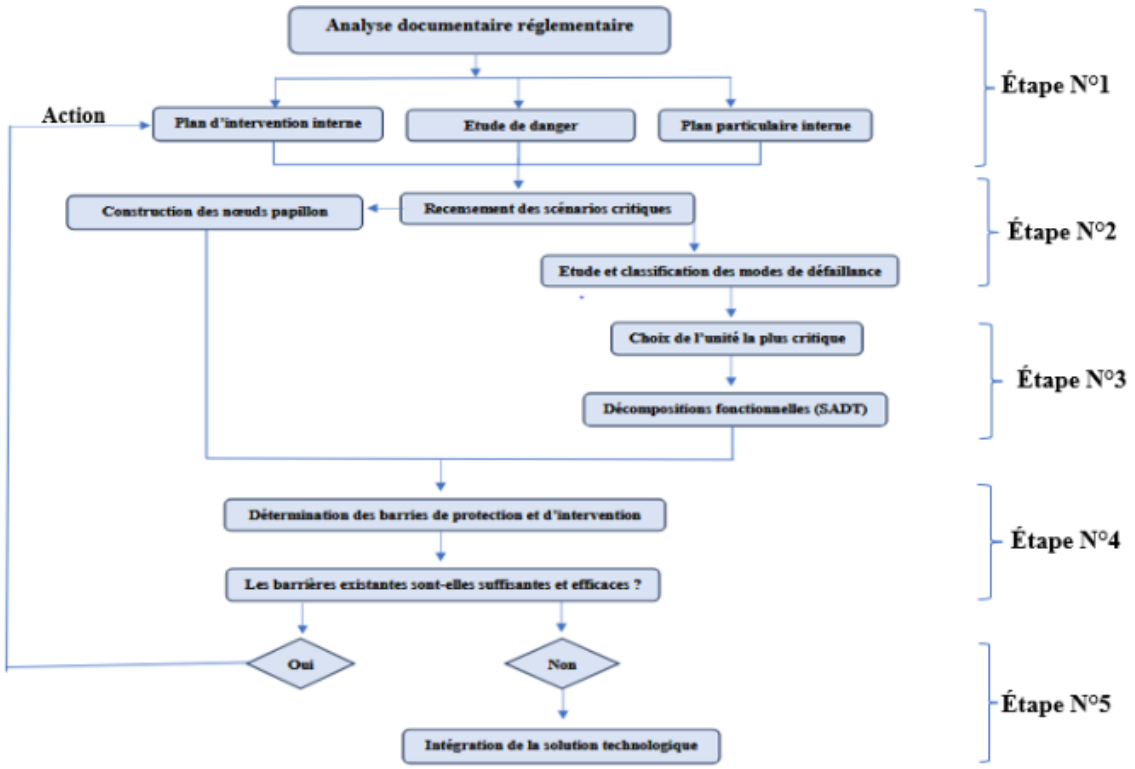


Figure 1.4 : Démarche méthodologique

1.4.1.1 Étape Nř1 : Analyse des scénarios critiques issus des documents réglementaires

La première étape dans la conception de notre système intelligent repose sur lanalyse approfondie des scénarios critiques identifiés à travers les documents réglementaires, tels que lEDD , le Plan dIntervention Interne (PII) et le Plan Particulier d'Intervention (PPI).

Ces études réglementaires, imposées par la législation dans le cadre de la GRI, constituent une méthode systématique permettant didentifier, dévaluer et de hiérarchiser les dangers inhérents à une installation industrielle. Elles reposent sur une analyse rigoureuse des procédés, des substances utilisées, des équipements, des conditions dexploitation ainsi que des éventuelles défaillances humaines, techniques ou organisationnelles pouvant conduire à des accidents majeurs.

Lobjectif principal de cette étape est de faire émerger les ERs de chaque scénario daccident, décrit en détail, en prenant en compte la sévérité de ses conséquences potentielles sur les personnes, lenvironnement, les biens.

Lexploitation des résultats de lEDD nous permet de cibler de manière rationnelle les zones critiques de linstallation et de prioriser les phénomènes physiques à surveiller.

Cette priorisation est indispensable pour garantir que le futur système intelligent sera dimensionné et configuré de manière optimale, en mobilisant les technologies adaptées aux risques

spécifiques identifiés.

1.4.1.2 Étape Nř2 : Construction des scénarios à partir du nud papillon

Après avoir identifié les scénarios daccidents, nous les avons modélisés en utilisant la méthode du nud papillon. Cette approche permet de visualiser à la fois les causes et les conséquences dun ER, représenté au centre du nud. Aussi, la méthode du nud papillon offre une vue claire et complète des défaillances possibles, et dans notre cas, elle nous aide à identifier les paramètres critiques à surveiller en temps réel.

1.4.1.3 Étape Nř3 : Décomposition fonctionnelle par la *SADT*

Cette étape consiste en la décomposition fonctionnelle selon la méthode *SADT*, une méthode danalyse descendante largement utilisée dans le domaine de lingénierie des systèmes complexes.

Cette approche permet de représenter de manière hiérarchique les différentes fonctions du système sous forme de blocs interconnectés, en précisant pour chacun deux les entrées nécessaires à son fonctionnement, les sorties quil produit, les contraintes qui sy appliquent, ainsi que les ressources mobilisées pour lexécuter.

Dans le cadre de notre travail, cette décomposition nous permettra de segmenter le système en modules fonctionnels cohérents, répondant chacun à une mission et une fonction précise.

1.4.1.4 Étape Nř4 : Identification des barrières de protection et dintervention

La quatrième étape de notre méthodologie porte sur lidentification des moyens de protection et dintervention présents sur le site. Elle vise à recenser les dispositifs techniques déployés contre les situations durgence (incendie, explosion, etc.).

Les équipements sont identifiés, tels que les extincteurs, les robinets dincendie armés (RIA), les détecteurs, le système *Supervisory Control and Data Acquisition (SCADA)* et le système *Emergency Shutdown (ESD)*, puis leurs performances sont comparées aux normes internationales telles que la *NFPA* 30, l*API* 521 et l*ISO* 23251:2006.

Leur efficacité est évaluée selon leur capacité à maîtriser des scénarios accidentels, leur temps de réponse, leur couverture et leur résilience. Lobjectif est didentifier les insuffisances éventuelles du système de GUI actuel.

1.4.1.5 Étape Nř5 : Implémentation de la ST

L'étape 5 de notre démarche méthodologique consiste en lintégration du ST , et elle repose également sur plusieurs sous-étapes. Chaque sous-étape a été conçue pour répondre à des objectifs spécifiques liés à la GUI, depuis lidentification des paramètres critiques jusquà la structuration du système *IoT* final.
Les différentes sous-étapes dimplémentation de cette ST sont illustrées dans la figure 1.5 .

-Étape nř5.1 : Identification des paramètres critiques et le nombres des capteurs adaptés

Après lidentification et lanalyse des scénarios, nous déterminons les paramètres les plus représentatifs de chaque scénario daccident critique retenu.

Cette identification a constitué la base pour définir les types de capteurs IoT nécessaires.

-Étape nř5.2 : Sécurisation de la transmission des données

Une fois les paramètres définis, laccent a été mis sur la sécurisation de la transmission. Celle-ci permet dassurer une communication sans fil à longue portée, avec une faible consommation énergétique, ce qui est adapté à un environnement industriel critique.

-Étape nř5.3 : Dimensionnement et positionnement des capteurs *IoT*

Le but de cette étape est de dimensionner le système intelligent en déterminant le nombre et la position des capteurs IoT , afin d'assurer une couverture optimale et une surveillance efficace de la zone ciblée.

-Étape nř5.4 : Conception de larchitecture du système *IoT*

Le système va être conçu selon une architecture IoT, combinant un traitement local des données et une possibilité de transmission vers une plateforme distante.

Cette configuration garantit à la fois lautonomie du système et sa connectivité en temps réel, en fonction de létat du réseau.

-Étape nř5.5 : Fonctionnement du système *IoT* en situation durgence

Cette étape permet de décrire le comportement du système lors dune apparition de la situation durgence. Une fois une anomalie détectée par les capteurs, le système réagit automatiquement selon un enchaînement prédéfini dactions.

Ce fonctionnement en chaîne vise à réduire considérablement le temps de réaction, tout en limitant les erreurs humaines dans les premières secondes dun incident.

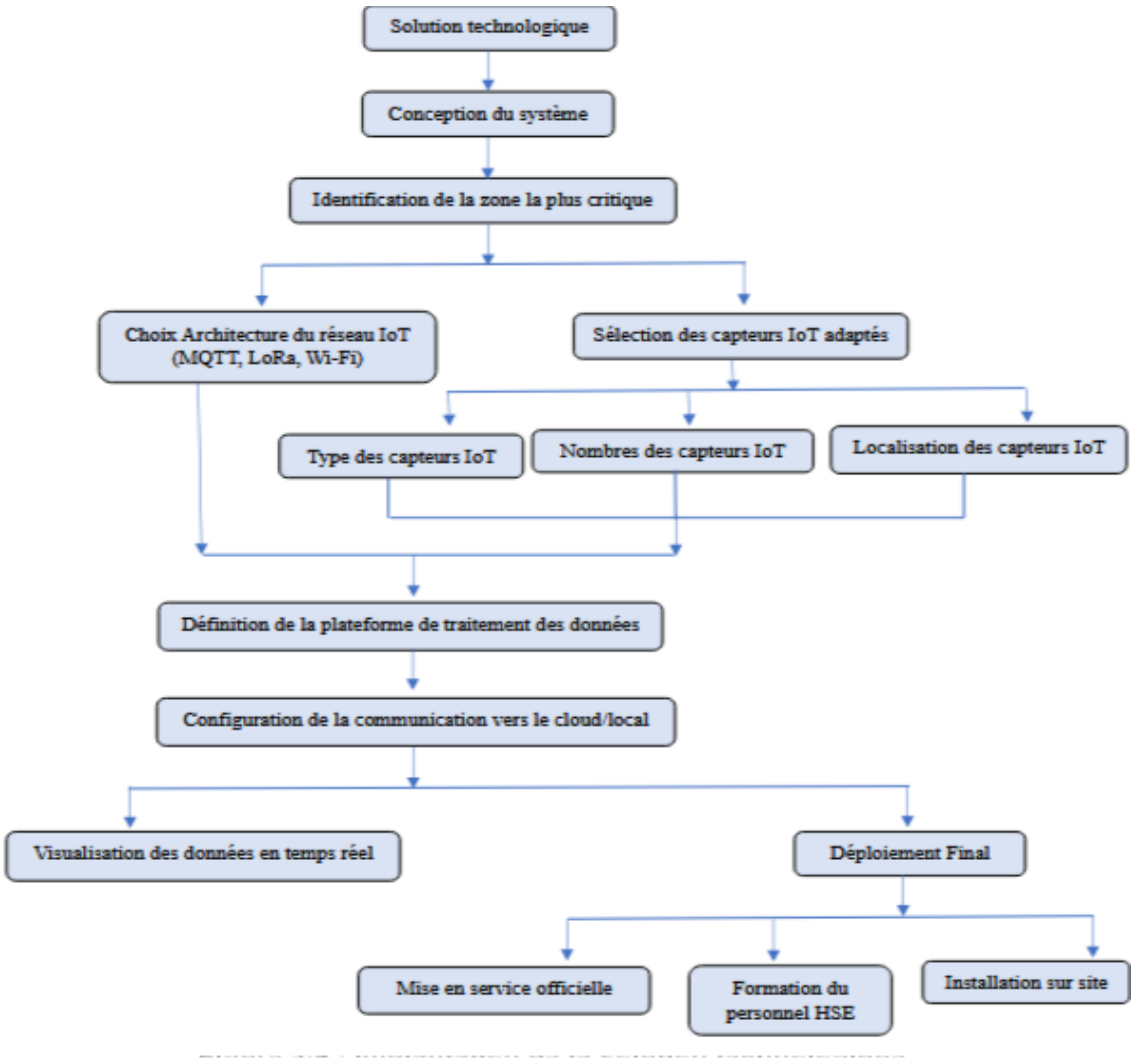


Figure 1.5 : Implémentation de la ST

Ce chapitre nous a permis de mettre en lumière notre problématique ainsi que les démarches que nous avons suivies pour y répondre. Il a posé les bases nécessaires à la compréhension des enjeux liés à la GUI.

Le chapitre suivant sera consacré aux concepts clés utilisés dans cette étude, qui serviront de fondement théorique pour le développement de notre ST.

Chapitre 2

Définitions et concepts

Dans ce chapitre, nous serons amenés à présenter les concepts fondamentaux de la GRI et de la GUI. Ces notions théoriques sont essentielles pour comprendre les bases sur lesquelles reposera la ST développée. Nous commencerons par définir la GRI, en précisant ses objectifs et ses étapes. Ensuite, nous aborderons la GUI en décrivant ses différentes phases et les plans durgence (PUs) mis en place. Nous mettrons en évidence la relation entre ces plans et les phases de la GUI. Ce chapitre contient également lensemble des notions théoriques nécessaires à notre travail, telles que les notions relatives au $SADT$,nud papillon et généralités sur les capteurs connectés , ainsi que larchitecture des systèmes IoT et les protocoles de communication adaptés. Ces éléments permettront de mieux situer la solution dans son contexte technique et organisationnel.

2.1 Gestion des risques industrielles (GRI) [3]

On commence par explorer les bases de la GRI, en la définissant, en précisant ses objectifs principaux, ainsi quen décrivant les étapes essentielles qui la structurent. Cette introduction vise à fournir une compréhension globale des mécanismes de prévention et dintervention, en lien avec la GUI, qui sera abordée dans les parties suivantes.

2.1.1 Définition de la GRI [3]

La GRI est une démarche structurée visant à identifier, évaluer, réduire et maîtriser les risques liés aux activités industrielles, afin de protéger la santé et la sécurité des travailleurs, de prévenir les accidents majeurs et de limiter leurs conséquences sur lhomme, lenvironnement et les biens.

2.1.2 Objectif [3]

La GRI vise à protéger la santé et la sécurité des travailleurs en identifiant et en maîtrisant les dangers liés aux activités industrielles. Elle cherche à prévenir les accidents du travail, et les accidents et les incidents majeurs.

Elle permet aussi d'assurer la sécurité des installations, de limiter les impacts sur lenvironnement et de garantir la continuité des opérations. Cest une démarche essentielle pour respecter la réglementation et renforcer la culture de prévention dans lentreprise.

2.1.3 Étapes de la GRI [3]

La GRI suit quatre grandes étapes, appliquées de manière rigoureuse et continue, pour garantir un haut niveau de sécurité.

2.1.3.1 Identification des dangers [3]

Cette première étape consiste à repérer toutes les situations, substances, équipements ou méthodes de travail pouvant provoquer un dommage. Il peut sagir dagents chimiques, de machines, dambiances physiques ou encore de postures de travail.

Lidentification repose sur lobservation du terrain, lanalyse des documents comme : fiches de données de sécurité (FDS), rapports daccidents. et les échanges avec les opérateurs.

2.1.3.2 Évaluation des risques [3]

Une fois les dangers identifiés, il faut estimer le niveau de risque en croisant deux critères : la probabilité que le dommage survienne et la gravité de ses conséquences. Cette évaluation permet de classer les risques, du plus critique au moins prioritaire, et de cibler les actions de prévention les plus urgentes.

Elle permet également de déterminer si un risque est acceptable, tolérable sous conditions ou non tolérable. Un risque non tolérable doit faire lobjet dune action immédiate.

2.1.3.3 Mise en place des mesures de prévention [3]

Cette étape vise à supprimer ou à réduire les risques identifiés. On applique en priorité les principes généraux de prévention : suppression du danger, substitution, mise en place de protections collectives, formation du personnel, amélioration des conditions de travail, etc.

2.1.3.4 Suivi et réévaluation des risques [3]

La GRI ne sarrête pas après la mise en uvre des actions. Il faut contrôler régulièrement leur efficacité, suivre lévolution des postes de travail, des équipements ou de lorganisation, et réévaluer les risques si nécessaire. Ce suivi permet une amélioration continue de la prévention et garantit ladaptation aux changements.

La figure 2.1 suivante illustre les étapes principales de la démarche de GRI. Elle présente de façon structurée le processus permettant didentifier, dévaluer et de suivre les risques.

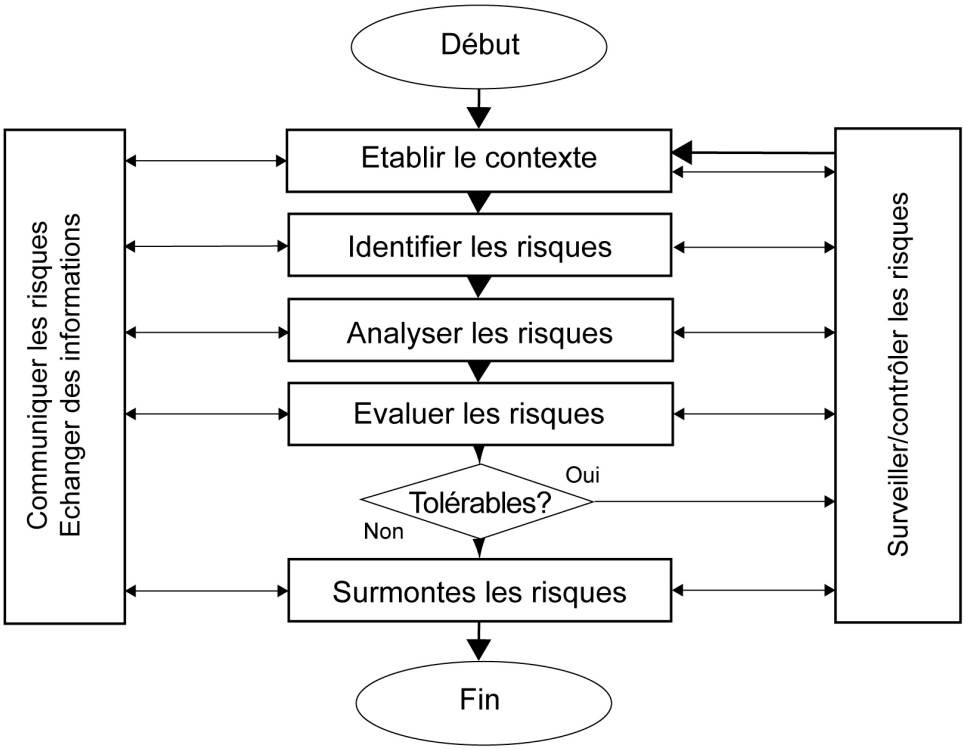


Figure 2.1 : Étapes de la gestion des risques industriels [3]

La GRI ne se limite pas à lanalyse des dangers ni à la mise en place de mesures de prévention. Elle contribue aussi à renforcer la préparation de lentreprise face aux ERs imprévus. En identifiant les points critiques et en structurant les réponses possibles, elle permet dagir plus rapidement et plus efficacement en cas de problème réel.

Dans ce sens, la GRI forme une base essentielle pour organiser le SGU. Elle aide à prévoir les moyens nécessaires, les rôles de chacun et les procédures à suivre. Cela montre limportance dintroduire la démarche dédiée à la GUI, qui fera lobjet de la partie suivante.

2.2 Gestion des urgences industrielles (GUI)

Dans cette section, nous allons définir les concepts en lien avec la GUI et nous allons aborder les PUs imposés par la réglementation algérienne.

2.2.1 Définition dune situation durgence [4]

Une situation durgence est un événement imprévu, de nature accidentelle ou dangereuse, qui nécessite une réaction immédiate pour protéger la santé et la sécurité des personnes, limiter les dégâts matériels et éviter des conséquences graves sur lenvironnement ou lactivité de lentreprise.

Cela peut concerner un incendie, une explosion, un rejet de produit dangereux ou tout autre

événement menaçant les personnes ou les installations et nécessitant une organisation rapide et efficace pour y faire face.

2.2.2 Définition de la gestion durgence [5]

La gestion durgence regroupe lensemble des dispositions mises en place pour faire face à une situation accidentelle, soudaine ou imprévue, afin de limiter ses conséquences sur les personnes, les installations et lenvironnement. Elle vise à organiser une réponse rapide et coordonnée en cas dER.

Elle repose sur lanticipation des scénarios daccidents possibles, lélaboration de PU, la formation du personnel, la réalisation dexercices et la mise en place de procédures précises permettant dassurer une intervention efficace et sécurisée.

2.2.3 Phases de la GUI [5]

Après la réalisation de la GRI, qui permet didentifier et dévaluer les dangers potentiels, la GUI intervient pour organiser la réponse en cas dER. Elle se structure en plusieurs phases successives et complémentaires, prévues dans le cadre des PUs. Chacune delles vise à limiter les conséquences dun accident ou incident majeur sur les personnes, les biens et lenvironnement.

La figure 2.2 illustre les différentes phases de la GUI, depuis la préparation jusquau retour à la normale, en passant par lalerte et lintervention. Elle permet de visualiser lenchaînement logique des actions à mener face à une situation critique.

Figure 2.2 : Différentes phases de la gestion des urgences industriels [5]

2.2.3.1 Phase de préparation [5]

Cette phase comprend lélaboration du Plan dOpération Interne (POI), la désignation des rôles et responsabilités, la formation des équipes dintervention, léquipement du site en moyens de secours (extincteurs, alarmes, trousses de premiers soins, etc.), ainsi que la réalisation dexercices réguliers pour tester lefficacité et la réactivité des procédures établies.

2.2.3.2 Phases dalerte [5]

Elle débute dès quun danger est détecté ou quun incident ou accident survient. Elle consiste à déclencher les alarmes, à prévenir immédiatement les secours internes et externes, et à diffuser les consignes de sécurité aux personnes exposées.

Cette phase vise à mobiliser rapidement les ressources nécessaires pour limiter les conséquences de lER.

2.2.3.3 Réponse [5]

Elle regroupe lensemble des actions durgence mises en uvre pour maîtriser la situation : mise en sécurité des personnes, évacuation, extinction dun incendie, confinement dune fuite, arrêt des installations, etc.

Ces actions sont réalisées selon les scénarios daccidents prévus dans le PU.

2.2.3.4 Récupération et retour à la normale [5]

Une fois lER maîtrisée, il sagit de rétablir progressivement lactivité, dévaluer les dégâts, de tirer les enseignements de lincident et de mettre à jour les dispositifs et PU en conséquence.

Cette phase permet daméliorer la préparation future et de renforcer la prévention.

Les quatre phases de la GUI permettent dorganiser une réponse efficace face à un ER majeur. Elles complètent la démarche de GRI en assurant la maîtrise des situations imprévues et en facilitant le retour rapide à des conditions normales de sécurité.

Cependant, lapplication de ces phases repose sur un cadre réglementaire précis. En effet, elles sont encadrées par trois PUs imposés par la réglementation : le PII, le PPI et le plan dORganisation des SECours (ORSEC). Ces dispositifs seront présentés dans la partie suivante.

2.2.4 Cadre réglementaire de la GUI [6]

La GUI dans les installations à risques majeurs repose sur un cadre réglementaire structuré, visant à prévenir les accidents, protéger les personnes et lenvironnement, et assurer une réponse rapide et coordonnée en cas dincident. En Algérie, trois dispositifs fondamentaux encadrent les différentes phases de la GUI :

- Plan d'Intervention Interne (PII)
- Plan Particulier d'Intervention (PPI)

- Plan d'ORganisation de SECours (ORSEC)

Ces trois outils seront présentés dans la suite, afin de clarifier leur rôle dans le dispositif national de GUI.

2.2.4.1 Plan d'Intervention Interne (PII) [6]

Le PII est un dispositif clé de la GUI dans les installations classées. Il est élaboré par lexploitant, conformément aux décrets exécutifs nř 05-378 du 5 octobre 2005 et nř 25-63 du 28 janvier 2025, à partir de lEDD et dune étude de vulnérabilité.

Son objectif principal est dorganiser les secours internes en cas daccident majeur, avant larrivée des secours externes. Il vise à protéger les personnes présentes sur le site, préserver les installations et limiter les impacts environnementaux.

Le PII définit les scénarios daccidents possibles, les rôles des intervenants internes, les procédures dalerte, de mise en sécurité et dévacuation, ainsi que les moyens techniques disponibles sur site. Il doit être régulièrement actualisé, testé par des exercices, et intégré dans la coordination avec les secours externes via le Plan dOrganisation de la Réponse Externe (PORE).

2.2.4.2 Plan Particulier d'Intervention (PPI) [6]

Le PPI est aussi un dispositif essentiel de la GUI, élaboré par les autorités publiques sous la responsabilité du wali, conformément au décret exécutif nř 25-63 du 28 janvier 2025.

Il vise à protéger les populations, les infrastructures hors site et lenvironnement en cas daccident majeur dont les effets dépassent les limites de linstallation. Il sappuie sur lEDD pour anticiper les scénarios daccidents susceptibles dimpacter lextérieur.

Le PPI précise les rôles des différents services (protection civile, gendarmerie, police, santé, environnement), les procédures dalerte, dévacuation, de confinement et dintervention. Il prévoit aussi un dispositif de communication pour informer les riverains et coordonner les secours.

Des exercices réguliers permettent de tester son efficacité et dassurer une bonne coordination entre tous les acteurs concernés.

2.2.4.3 Plan d'ORganisation de SECours (ORSEC) [6]

Le plan ORSEC est un dispositif essentiel qui encadre lintervention des secours externes en cas daccident industriel majeur. Il est déclenché par le wali lorsque les effets de laccident dépassent les capacités de réponse du site.

Son objectif est de coordonner laction des différents services publics : protection civile, gendarmerie, police, santé et autres intervenants. Il organise larrivée des secours, la répartition des missions, la gestion des flux (personnes, véhicules, informations) et la communication entre les acteurs.

Le plan ORSEC précise les zones dintervention, les points de regroupement, les moyens logistiques à mobiliser et les procédures dévacuation ou de confinement. Il doit être compatible avec le PII mis en place par lexploitant, afin dassurer une continuité entre les secours internes et externes.

2.2.5 Corrélation entre les phases de la GUI et les PUs [7]

Les phases de la GUI ne peuvent être appliquées efficacement sans un cadre organisationnel clair. Ce rôle est assuré par les plans réglementaires, qui traduisent chaque phase en actions concrètes, selon le niveau de gravité et dimpact de lER. Ainsi, la stratégie opérationnelle dépend de la combinaison intelligente entre la progression des phases et lactivation du PU le plus adapté.

La relation entre les deux repose sur un principe descalade : plus la situation évolue, plus lorganisation change déchelle. Dans un premier temps, lexploitant applique ses propres mesures internes. si lER dépasse les capacités du site, les autorités prennent le relais en mobilisant les secours externes à travers des dispositifs préétablis. Cette transition entre niveaux dintervention est fluide grâce à la complémentarité des PUs.

Ce lien dynamique permet dassurer une continuité entre les actions internes et externes, évitant les ruptures de coordination. Chaque plan soutient la mise en uvre des phases à son niveau de responsabilité, garantissant ainsi une réponse progressive, cohérente et proportionnée à la situation.

2.3 *Structured Analysis and Design Technique (SADT)*

Dans cette section, nous allons poser les bases de la méthode *SADT*, en présentant sa définition, ses principes, ses fondements et son approche de modélisation.

2.3.1 Définition [8]

La *SADT* est une méthode danalyse fonctionnelle utilisée pour modéliser le fonctionnement dun système. Elle permet de représenter de manière hiérarchique les activités ou fonctions du

système, leurs enchaînements, ainsi que les flux dinformations ou de ressources nécessaires.

2.3.2 Principes de la méthode *SADT* [8]

La méthode *SADT* repose sur une approche de modélisation hiérarchique et graphique, permettant de structurer et analyser un système complexe en le décomposant en sous-systèmes plus simples.

Cette décomposition progressive facilite la compréhension et létude du fonctionnement du système dans son ensemble.

Lun des éléments clés de *SADT* est lutilisation de boîtes fonctionnelles reliées par des liaisons spécifiques. Ces éléments sont organisés de manière à représenter les différentes interactions au sein du système, tout en respectant une logique de structuration modulaire et hiérarchique.

La Figure 2.3 suivante présente la décomposition *SADT* au niveau A0 du système, offrant une vue globale des principales fonctions assurées par le processus étudié.

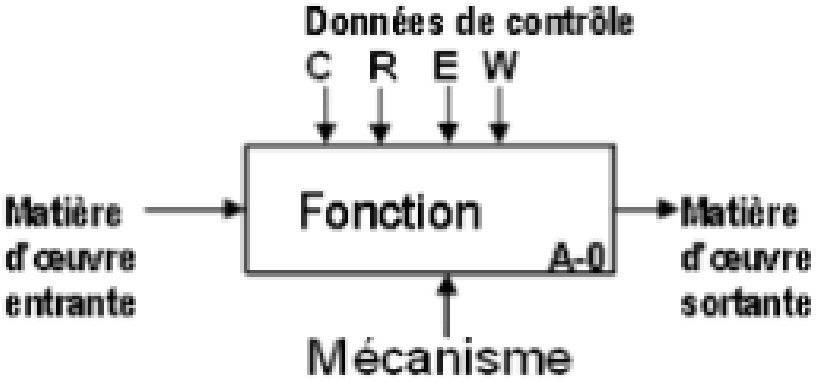


Figure 2.3 : Décomposition *SADT* niveau A0 du système [8]

2.3.3 Objectifs de la méthode *SADT* [8]

La méthode *SADT* vise à mieux comprendre et gérer les systèmes complexes. Elle offre une vision claire du fonctionnement global, en représentant les flux dinformation et les interactions entre composantes. Cette structuration facilite la compréhension et la maîtrise du système.

SADT améliore aussi la communication entre les acteurs dun projet grâce à un langage graphique standardisé, accessible à tous et elle sert à analyser, concevoir et optimiser les systèmes en identifiant les entrées, les sorties, contrôles et mécanismes.

2.3.4 Formalisme *SADT*[8]

La méthode *SADT* repose sur une représentation graphique basée sur lutilisation de boîtes et de flèches, permettant de modéliser les fonctions dun système ainsi que leurs interactions et chaque activité est représentée selon quatre éléments fondamentaux :

- **Entrées :** informations ou matières nécessaires pour l'activité.
- **Sorties :** résultats produits par l'activité.
- **Contrôles :** conditions et règles influençant le fonctionnement.
- **Mécanismes :** ressources ou acteurs qui réalisent l'activité.

2.3.5 Différents niveaux de modélisation *SADT* [8]

La modélisation *SADT* est organisée en plusieurs niveaux hiérarchiques :

- **Diagramme A-0:** Représente la vision globale du système et son interaction avec son environnement.
- **Diagrammes A1, A2, ... An :** Correspondent à une décomposition progressive des activités du système.

2.4 Nud Papillon [8]

Dans cette section , nous allons présenter la méthode du nud papillon, son principe de schématisation et son importance, qui nous aideront par la suite dans notre travail.

2.4.1 Définition [8]

La méthode du nud papillon est une technique utilisée pour analyser les risques. Elle aide à comprendre ce qui peut causer un accident , ce qui peut arriver après , et quelles barrières on peut mettre en place pour léviter ou en limiter les conséquences.

2.4.2 Principe de schématisation [8]

La méthode du nud papillon se présente sous forme dun diagramme centré sur un ER. Les causes et leurs barrières de prévention sont situées à gauche, tandis que les conséquences et leurs barrières de protection et d'intervention sont à droite. Cette représentation visuelle permet de mieux comprendre les scénarios daccidents et didentifier les points faibles du système de sécurité.

2.4.3 Importance de la méthode du nud papillon [8]

Cette méthode est largement reconnue dans lanalyse des risques pour sa clarté et son efficacité. Elle offre une vue densemble structurée et facilement compréhensible des scénarios accidentels, aussi :

- Aide à positionner et évaluer les barrières de sécurité existantes.
- Renforce la prise de décision en gestion des risques.
- Adaptée à lanalyse post-incident et à la prévention proactive.

2.5 Généralités sur les Capteurs *IoT* [9]

Dans cette partie , nous allons poser les bases liées aux capteurs IoT, en abordant leur définition, leur principe de fonctionnement, quelques types couramment utilisés, ainsi que les aspects liés à la transmission des données, la connectivité, le traitement et lanalyse des informations. Nous évoquerons également les avantages offerts par ces capteurs dans un contexte industriel.

2.5.1 Définition [9]

Les capteurs IoT sont des dispositifs électroniques capables de collecter des données physiques, comme :

- Température,
- Pression,
- Vibration,
- Présence de gaz,

et de les transmettre automatiquement via un réseau (Wi-Fi, Bluetooth, réseau cellulaire, etc.) à un système central ou à un cloud pour une analyse en temps réel.

2.5.2 Principe de fonctionnement des capteurs *IoT* [9]

Le fonctionnement dun capteur *IoT* repose sur une suite détapes permettant de passer de la détection dun phénomène physique à son exploitation à distance. Le capteur commence par percevoir une donnée physique, comme : la température, la pression ou la présence dun gaz. Cette information est immédiatement transformée en signal électrique, puis traitée par un microcontrôleur intégré.

Une fois la donnée convertie, elle est transmise automatiquement via un réseau sans fil vers une plateforme centralisée ou un système *cloud*.

Ces données peuvent alors être consultées en temps réel, analysées et archivées et si une anomalie est détectée, le système déclenche une alerte, permettant une réaction rapide et ciblée.

La figure 2.4 suivantes illustre le principe de fonctionnement des capteurs *IoT*, en mettant en évidence les différentes étapes de collecte, de traitement et de transmission des données vers une plateforme de supervision.

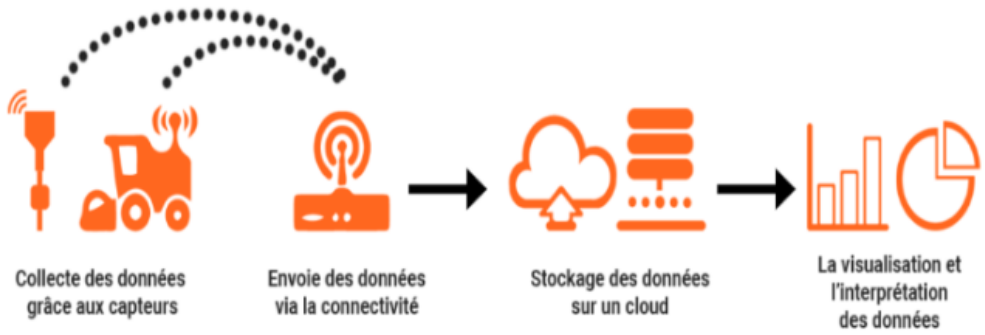


Figure 2.4 : Fonctionnement des capteurs *IoT* [9]

2.5.3 Types de capteurs *IoT* [9]

Il existe plusieurs types de capteurs *IoT*, chacun conçu pour mesurer un ou plusieurs paramètres comme :

2.5.3.1 Capteurs *IoT* de température et de pression [9]

Ces capteurs utilisés pour surveiller les conditions de fonctionnement des équipements et des systèmes, en particulier dans les industries où les variations de température et de pression

peuvent entraîner des risques importants, tels que dans : la compression de gaz ou la gestion de réacteurs chimiques.

2.5.3.2 Capteurs *IoT* de gaz inflammable [9]

Ces capteurs mesurent la concentration de gaz spécifiques dans l'air, comme : le méthane, le dioxyde de carbone (CO_2), ou les gaz toxiques tels que le monoxyde de carbone (CO), l'ammoniac (NH_3) et d'autres.

2.5.3.3 Capteurs *IoT* de vibrations [9]

Ils sont utilisés pour détecter les vibrations anormales ou les mouvements mécaniques inhabituels dans une zone donnée. Ils sont essentiels dans les environnements industriels pour prévenir les défaillances mécaniques, optimiser la maintenance et renforcer la sécurité des installations.

2.5.3.4 Capteurs *IoT* de flammes [9]

les capteurs *IoT* de flammes jouant un rôle essentiel dans la détection précoce des incendies, ils permettent de réagir rapidement avant la propagation des flammes. Ils détectent les rayonnements ultraviolet (UV) ou *infrared (IR)* émis par le feu pour identifier sa présence avec précision. Une fois la flamme repérée, les données sont transmises en temps réel à une plateforme *IoT*. Cela permet de déclencher immédiatement des alarmes ou des systèmes dextinction automatiques pour limiter les dégâts.

2.5.4 Transmission des données et connectivité [10]

Lune des caractéristiques essentielles des capteurs *IoT* est leur capacité à communiquer en temps réel avec des systèmes centralisés via des réseaux sans fil.

La transmission des données se fait par le biais de réseaux tels que : Wi-Fi, *LoRa, NB-IoT*, ou 5G.

2.5.4.1 Wi-Fi [10]

le protocole Wi-Fi utilisé dans des environnements avec une couverture réseau solide, permettant une transmission rapide et fiable des données.

2.5.4.2 *LoRa* [10]

Un protocole de communication à longue portée et faible consommation d'énergie, adapté aux environnements industriels où les capteurs doivent couvrir de grandes distances ou être installés dans des zones difficiles d'accès.

2.5.4.3 5G [10]

La technologie 5G, prochainement en Algérie, permet des vitesses de transmission de données ultra-rapides et une connectivité à faible latence, idéale pour les applications *IoT* nécessitant une communication quasi instantanée, notamment pour des alertes en temps réel dans des environnements à haut risque.

2.5.5 Traitement et analyse des données [10]

Les données recueillies par les capteurs *IoT* sont envoyées à une plateforme d'analyse centralisée où elles peuvent être stockées, traitées et visualisées en temps réel.

Ces systèmes peuvent être basés sur des technologies de *cloud computing*, qui offrent des capacités de stockage et de traitement massives, permettant d'analyser les données de manière approfondie et de générer des rapports ou des alertes automatiques.

2.5.6 Avantages de l'utilisation des capteurs *IoT* [11]

L'utilisation des capteurs *IoT* offre plusieurs avantages clés dans la GUI.

- Premièrement, ils améliorent considérablement la sécurité en permettant une surveillance continue des installations, réduisant ainsi le temps de réponse.
- Ensuite, ils contribuent à une réduction significative des coûts de maintenance en détectant précocement les dysfonctionnements et en facilitant l'analyse prédictive, ce qui permet d'optimiser les interventions et de prolonger la durée de vie des équipements tout en diminuant les coûts liés aux pannes imprévues.
- Aussi, les capteurs *IoT* facilitent la conformité aux normes de sécurité et environnementales en fournissant des données précises et en temps réel, permettant ainsi de prouver la conformité lors des audits réglementaires et d'assurer une gestion transparente et efficace des risques.

2.6 Les protocoles de communication dans l'*IoT* [12]

Dans cette section, nous allons étudier les différents protocoles de communication utilisés dans les systèmes IoT . Ces protocoles sont essentiels pour permettre léchange de données entre les objets connectés, les passerelles et les serveurs distants. Leur sélection dépend des contraintes spécifiques des environnements IoT, tels que :

- Portée et type de réseau
- Débit de données
- Niveau de sécurité

Nous allons commencer par définir ce quest un protocole de communication dans le contexte de lIoT, avant dexaminer les différentes catégories existantes et leurs caractéristiques principales.

2.6.1 Définition [12]

Un protocole de communication dans lIoT désigne un ensemble de règles, de normes et de formats qui régissent léchange de données entre les dispositifs connectés. Il permet dassurer la transmission, la réception et linterprétation correcte des informations, tout en garantissant la compatibilité entre différents équipements, même sils proviennent de fabricants variés.

2.6.2 Classification des protocoles IoT [12]

Les protocoles de communication dans lIoT peuvent être classés en plusieurs catégories, selon le niveau du modèle OSI auquel ils appartiennent. Cette classification permet de mieux comprendre leur rôle, leur portée et leur interaction dans larchitecture globale dun système IoT. On distingue principalement trois niveaux : la couche de liaison, la couche réseau, et la couche applicative.

2.6.2.1 Protocoles de liaison [12]

Les protocoles de la couche liaison sont responsables de létablissement et du maintien de la connexion physique entre les objets connectés (capteurs, actionneurs) et les passerelles locales. Ils gèrent également la détection des erreurs de transmission et parfois le contrôle daccès au média. Ces protocoles sont essentiels dans les environnements à faible portée, où la consommation énergétique et la robustesse du signal sont des critères majeurs.

Parmi les protocoles les plus utilisés dans cette catégorie, on retrouve :

- Zigbee
- *Bluetooth Low Energy (BLE)*
- Wi-Fi
- *LoRa* et *LoRaWAN*
- Z-Wave
- *Near Field Communication (NFC)*

2.6.2.2 Protocoles réseau [12]

Les protocoles de la couche réseau assurent ladressage, le routage et la transmission des paquets de données entre les objets connectés et les différents nuds du réseau (passerelles, serveurs, autres objets). Leur fonction principale est d'assurer que les données atteignent leur destination, même dans des architectures complexes ou distribuées.

Dans le contexte de lIoT, certains protocoles ont été spécifiquement développés pour répondre aux contraintes des objets à faible consommation :

- *Low Power Wireless Personal Area Network (LoWPAN)* : permet ladaptation du *Internet Protocol version 6 (IPv6)* sur des réseaux à faible débit comme IEEE 802.15.4.
- *Routing Protocol for Low Power and Lossy Networks (RPL)* : protocole de routage conçu pour les réseaux instables et contraints.
- *Internet Protocol (IP)* : parfois utilisé dans les solutions IoT industrielles ou hybrides.

2.6.2.3 Protocoles applicatifs [12]

Les protocoles applicatifs sont situés au sommet du modèle OSI et permettent léchange de données entre les objets connectés et les serveurs dapplication, souvent hébergés dans *cloud*. Ils facilitent linteropérabilité, la normalisation des échanges et la structuration des messages, tout en respectant les contraintes de bande passante et de consommation.

Les protocoles applicatifs les plus courants dans lIoT sont :

- *Message Queuing Telemetry Transport (MQTT)* : protocole léger basé sur *Transmission Control Protocol (TCP)*, très utilisé dans les applications IoT pour son efficacité et sa fiabilité.

- *Constrained Application Protocol (CoAP)* : conçu pour les objets contraints, fonctionne sur *user Datagram Protocol (UDP)*, et est basé sur un modèle *REpresentational State Transfer (REST).*

- *HyperText Transfer Protocol (HTTP)* : bien que plus lourd, il est encore utilisé pour les objets capables de supporter une charge réseau plus importante.

- *Advanced Message Queuing Protocol (AMQP)* :utilisé dans des environnements plus complexes, avec de fortes exigences en fiabilité.

Cette classification permet ainsi de choisir le protocole adapté à chaque niveau dune architecture *IoT* , en fonction des objectifs de performance, defficacité énergétique et de sécurité.

2.6.3 Critères de choix dun protocole de communication *IoT* [13]

Le choix dun protocole de communication adapté est une étape essentielle lors de la conception dune solution *IoT* . Ce choix doit prendre en compte les besoins techniques du projet, les contraintes du terrain et les caractéristiques des équipements utilisés. Plusieurs critères influencent cette décision, notamment :

2.6.3.1 Portée et le type de réseau [13]

Il est important de déterminer la distance que doivent parcourir les données.

- Pour une communication de **courte portée** (quelques mètres), des protocoles comme *BLE* ou *NFC* peuvent suffire.

- Pour une **portée moyenne**, des protocoles comme *Zigbee* ou *Wi-Fi* sont adaptés.

- Pour une **longue portée**, par exemple dans un réseau urbain ou agricole, des protocoles comme *LoRa* ou *Sigfox* sont plus appropriés.

2.6.3.2 Débit de données requis [13]

Certains cas dusage nécessitent un transfert rapide et volumineux de données (vidéosurveillance, mises à jour logicielles), alors que dautres se contentent de petits paquets transmis à intervalles réguliers (mesure de température, niveau dhumidité).

- **Débit élevé** : Wi-Fi, 5G

- **Débit faible à moyen** : *LoRa*, Zigbee, Sigfox,*BLE*

2.6.3.3 Consommation énergétique [13]

Dans les systèmes *IoT* alimentés par batterie, il est très importante dutiliser des protocoles peu énergivores pour prolonger lautonomie des dispositifs.

- Protocoles **très économes** : *LoRa, Sigfox, BLE*
- Protocoles **plus énergivores** : Wi-Fi, 3G/4G

2.6.3.4 Niveau de sécurité requis [13]

La sécurité des données est primordiale, surtout dans les domaines critiques comme la santé, lindustrie ou les infrastructures. Le protocole choisi doit permettre :

- Le chiffrement des données
- Lauthentification des appareils
- Lintégrité des messages

2.6.3.5 Tolérance aux pertes et la qualité de service [13]

Certains systèmes ne peuvent tolérer aucune perte de données (télémédecine, systèmes dalerte), tandis que dautres peuvent fonctionner avec un taux de perte faible (capteurs environnementaux).

2.7 Architecture dun système *IoT* [14]

Dans cette section, nous allons explorer la structure de larchitecture dun système *IoT*. Sa compréhension est essentielle pour assurer une conception et un déploiement efficaces. Chaque composant y joue un rôle précis, depuis la collecte des données jusquà leur traitement, que ce soit dans le cloud ou en périphérie.

2.7.1 Définition [14]

Larchitecture dun système *IoT* désigne lensemble des couches, des composants matériels et logiciels qui permettent aux objets connectés de capter, transmettre, traiter et exploiter des données. Cette architecture est conçue pour fonctionner dans des environnements distribués, souvent contraints, tout en assurant la connectivité, la sécurité et linteropérabilité des dispositifs.

2.7.2 Les principales couches dun système IoT [14]

Larchitecture *IoT* est généralement structurée en plusieurs couches, chacune remplissant un rôle spécifique.

2.7.2.1 Couche de perception [14]

Cest la couche la plus proche du terrain. Elle comprend tous les dispositifs chargés de détecter ou dagir sur lenvironnement physique.

- Capteurs (température, pression, gaz, mouvement)
- Actionneurs (moteurs, relais, vannes)
- caméras, etc.

Son rôle est de collecter les données physiques ou de provoquer des actions dans le monde réel.

2.7.2.2 Couche de transmission [14]

Cette couche permet la transmission des données depuis les objets vers les centres de traitement via différents types de connexions.

Elle assure aussi le routage, ladressage et la gestion des flux de données.

2.7.2.3 Couche de traitement [14]

Cest la couche intermédiaire qui effectue une pré-analyse, un filtrage ou un stockage temporaire des données. Elle peut être localisée dans une passerelle *edge computing* ou dans *cloud*.

2.7.2.4 Couche applicative [14]

Cest la couche visible par lutilisateur final. Elle présente les résultats sous forme dinterfaces graphiques, tableaux de bord ou alertes.

- Applications web ou mobiles
- Systèmes *SCADA*

- Interfaces de contrôle ou de visualisation

Dans ce deuxième chapitre, nous avons clarifié les fondements théoriques liés à la GRI et à la GUI ainsi que leurs procédures, en mettant en lumière leurs étapes et le cadre réglementaire. Nous avons également introduit les notions liées à la méthode *SADT*, au nud papillon, ainsi que les généralités sur les capteurs *IoT* et larchitecture des leur systèmes, éléments essentiels à la structuration et à la mise en uvre du ST proposé. Forts de cette base théorique, nous allons désormais, dans le chapitre suivant, appliquer ces notions à notre UC en analysant les scénarios daccidents et les défaillances à laide doutils méthodologiques.

Chapitre 3

Application à lunité de compression KB-23-C01A/B

Dans la continuité de la démarche méthodologique adoptée, ce chapitre applique concrètement les quatre premières étapes définies précédemment à lUC (KB-23-C01A/B). Il sagit dabord dexploiter les résultats de lEDD pour identifier les scénarios accidentels critiques, puis de les modéliser à laide de la méthode du nud papillon afin de visualiser les causes, les conséquences et les barrières de protection et dintervention associées. Et une classification des défaillances est ensuite réalisée, permettant didentifier les types de défaillances rencontrées au sein de lUC. À partir de ce diagnostic, une décomposition fonctionnelle de lunité est effectuée selon la méthode *SADT*, afin de structurer les fonctions opérationnelles critiques.

Ce travail vise à mettre en évidence les insuffisances des dispositifs actuels de détection et dintervention, et à poser les bases techniques nécessaires pour le dimensionnement et le déploiement dune ST, qui sera développée dans le chapitre suivant.

Nous déroulons notre approche méthodologique comme suit :

3.1 Étape Nř1

Dans cette première étape méthodologique, il est essentiel dexploiter rigoureusement les résultats issus de lEDD menée sur lUC (KB-23-C01A/B). Cette étude constitue une source précieuse pour identifier les scénarios daccidents susceptibles daffecter lunité, et surtout pour prioriser les phénomènes physiques à surveiller.

Lobjectif est de mettre en évidence les ERs les plus critiques, en sappuyant sur les types de défaillances identifiés. Ce diagnostic initial joue un rôle très important , car il oriente la configuration du futur ST intelligent de détection et dalerte que nous chercherons à proposer.

3.1.1 Analyse des scénarios daccidents au sein du MLE

Au sein de MLE, on trouve plusieurs scénarios daccidents pouvant conduire à des pertes de confinement dhydrocarbures, sous forme liquide ou gazeuse. Ces incidents peuvent donner lieu à des manifestations dangereuses telles que des explosions de vapeur confinée (VCE), des feux de jet, des feux de nappe et des feux flash, nuisant ainsi à la sécurité des installations et du personnel.

Le tableau tableau 3.1 ci-dessous présente une synthèse des scénarios daccidents retenus dans le cadre de lEDD, en complément des éléments figurant en Annexe 1.

Tableau 3.1 : Répartition des scénarios générés selon la taille, le produit et le phénomène [15]

Scénarios	Description (Taille / Produit / Phénomène)	Nombre
Générés en fonction de la taille de la fuite	**Grande**	**113**
	Rupture	64
	Moyenne	02
Générés en fonction du produit	**Gaz**	**101**
	Liquide	78
Générés en fonction du phénomène	**VCE**	**52**
	Jet flamme	42
	Feu de nappe	47
	Feu flash	38
Total	**179**	

Lanalyse des scénarios d'accidents retenus par lEDD met en évidence une corrélation significative entre lampleur de la fuite et la nature des phénomènes dangereux observés.

La majorité des scénarios recensés résultent de fuites importantes de gaz, entraînant principalement des VCEs, tandis que les scénarios impliquant des fuites de liquide sont davantage associés aux feux de nappe et aux feux de jet.

La prépondérance des VCEs souligne le rôle critique des conditions de dispersion et daccumulation des gaz dans les environnements confinés, tandis que lapparition récurrente de feux de nappe et de feux de jet met en évidence la nécessité dévaluer les paramètres de volatilité et dinflammabilité des hydrocarbures impliqués.

3.2 Étape Nř2

Dans un deuxième temps, après avoir identifié les scénarios d'accidents critiques à laide de lexploitation de lEDD, une analyse des défaillances a été réalisée à partir des données disponibles. Cette analyse a permis de recenser les types d'accidents et dincidents les plus fréquents, en mettant en évidence les défaillances techniques ou humaines ou organisationnelles susceptibles dengendrer des pertes de confinement.

3.2.1 Classification et analyse des catégories de défaillances [16]

Les défaillances au sein des systèmes industriels peuvent être classées selon plusieurs critères, notamment leur :

- Origine
- Impact
- Mode de manifestation

Lorigine permet didentifier si la défaillance provient dune cause technique, humaine ou organisationnelle. Limpact se réfère aux conséquences possibles sur la sécurité, lenvironnement ou la continuité des opérations. Et le mode de manifestation décrit la manière dont la défaillance se traduit concrètement, que ce soit par une panne, une perte de confinement, un dysfonctionnement ou un comportement anormal du système.

Le tableau 3.2 suivant présente la classification des différentes catégories de défaillances identifiées au sein de lusine complète

Tableau 3.2 : Classification des différentes catégories de défaillances au sein de MLE [16]

Nř	Catégorie de Défaillance	Sous-catégorie	Description	Conséquences
01	Mécaniques	Rupture de structure	Perte dintégrité mécanique des équipements sous pression comme : Rupture des lignes de transport, rupture du scrubber dentrée VD-20-01.	Fuite massive, risque dexplosion, incendie.
02		Défaillance des équipements sous pression	Dépassement des limites de pression, fissures comme : Défaillance du slug catcher VL-20-06, rupture des réservoirs	Perte de confinement.

03		Défaillance des soupapes de sécurité	Mauvais fonctionnement des dispositifs de surpression comme : Soupapes bloquées ou mal réglées.	Rejet incontrôlé dhydrocarbures
04	Organisationnelles	Erreur dexploitation (erreur humaine)	Mauvaise manipulation ou non-respect des consignes comme : Ouverture incorrecte dune vanne, mauvaise gestion des débits	Risque de surpression ou de fuite incontrôlée.
05		Erreur de maintenance	Intervention incorrecte sur des équipements critiques comme : Mauvais réglage des vannes de sécurité, oubli de remise en service de capteurs.	Dysfonctionnement des systèmes de protection, aggravation des défaillances.
06	Instrumentales	Capteurs défaillants	Informations erronées transmises aux systèmes de contrôle comme : Défaillance des capteurs de pression et température.	Mauvaise détection des anomalies, retard dans la réponse aux incidents.
07		Défaillance des actionneurs	Mauvais fonctionnement des vannes ou soupapes automatiques comme : Actionneur bloqué, réponse retardée dune soupape.	Incapacité à isoler une fuite, aggravation des incidents.
08		Panne des systèmes dalarme	Non-détection des situations dangereuses	Aucune alerte en cas de fuite ou de dépassement de seuil critique

09	Opérationnelles	Surcharge des équipements	Débit ou pression excédant les capacités des installations comme : Débit excessif dans un séparateur, surcharge des compresseurs.	Dégradation prématurée des équipements, perte de confinement
10		Mauvaise régulation des flux	Dysfonctionnement dans la gestion des fluides process comme : Pression trop élevée en amont dun équipement sensible.	Rupture de lignes, propagation de lincident.
11		Variation brutale des conditions	Changements soudains de pression ou température non anticipés comme : Arrêt brutal dune pompe entraînant un choc hydraulique	Dommages mécaniques, fuites potentielles.
12	Environnementales et externes	Conditions climatiques extrêmes	Effet des hautes ou basses températures sur les matériaux comme : Dilatation thermique excessive, givrage des équipements.	Fragilisation des structures, perte dintégrité.
13		Vibrations et chocs externes	Facteurs mécaniques externes influant sur linstallation comme : Vibrations excessives, instabilité des structures.	Fissuration progressive, perte de confinement

14		Corrosion accéléré	Dégradation due à des conditions physico-chimiques agressives comme : Corrosion interne des tuyauteries transportant des fluides corrosifs.	Affaiblissement des parois, risque de rupture soudaine.

Le tableau 3.2 regroupe 14 défaillances en cinq grandes familles. Les plus dangereuses sont celles liées aux équipements et aux capteurs, car elles peuvent causer des fuites ou empêcher une alerte rapide. Les erreurs humaines et les conditions extérieures peuvent aussi aggraver les incidents.

Par la suite, une analyse quantitative des défaillances sera effectuée afin de déterminer la répartition de chaque type de défaillance parmi lensemble des scénarios daccidentes identifiés. En calculons le pourcentage, il sera possible dévaluer la contribution relative des défaillances mécaniques, opérationnelles, environnementales et externes et organisationnelles, instrumentales permettant ainsi didentifier les catégories prédominantes .

La formule (3.1) suivante permet de calculer le pourcentage de scénarios daccidents associés à une défaillance donnée, par rapport au nombre total de scénarios identifiés. Elle est donnée par [17] :

$$\text{Pourcentage } (\%) = \left(\frac{\text{Nombre de scénarios qui correspondent à la défaillance}}{\text{Nombre total de scénarios}} \right) \times 100 \quad (3.1)$$

Le nombre total de scénarios, ainsi que le nombre de scénarios associés à chaque type de défaillance, ont été calculés et analysés à laide de lEDD et dun document fourni par le département mécanique. Les résultats obtenus après lapplication numérique de la formule (3.1) sont présentés dans le tableau 3.3 ci-dessous.

Tableau 3.3 : Répartition des types de défaillances en fonction de leur pourcentage [17]

Type de Défaillance	**Pourcentage (%)**
Mécaniques	**46.15**
Organisationnelles	19.23
Instrumentales	15.38
Opérationnelles	11.54
Environnementales et externes	7.69

L'analyse des pourcentages montre que les défaillances mécaniques représentent la part la plus élevée (46,15 %), soulignant leur impact critique sur la sûreté des installations. Cela peut être dû à :

- Usure des équipements ,
- Défauts de conception ,
- Manque de maintenance préventive.

Les défaillances organisationnelles (19,23 %) et instrumentales (15,38 %) indiquent également des vulnérabilités significatives, notamment en matière de procédures de gestion des risques et de fiabilité des capteurs et systèmes de contrôle.

Les défaillances opérationnelles (11,54 %) traduisent des erreurs humaines ou des pratiques non conformes aux standards de sécurité, tandis que les défaillances environnementales et externes (7,69 %) montrent que des facteurs externes comme :

- Les conditions climatiques
- Les interférences extérieures

peuvent également contribuer aux scénarios de perte de confinement.

3.2.2 Schématisations des nuds de papillon

Avant de procéder à la schématisation par la méthode du nud papillon, il est nécessaire de sélectionner les scénarios daccidents les plus pertinents à analyser. Ce choix repose sur une lecture approfondie des résultats de lEDD.

Trois critères principaux ont guidé cette sélection :

- Diversité des phénomènes dangereux impliqués (VCE, feu de nappe, feu de jet ..).
- Représentativité des familles de défaillances dominantes (mécaniques, organisationnelles, instrumentales).
- Clarté et la précision des informations fournies dans lEDD, PPI ,PII pour chacun des scénarios.

Le scénario nř8, nř 23, nř24 vérifient ces trois critères selon une évaluation réalisée à laide dune checklist présentée dans lannexe 2, ce qui justifie pleinement leur sélection pour la phase de schématisation.

Pour chaque scénario sélectionné,un nud papillon a été construit et un codage sera mis en place afin danalyser lefficacité des mesures de protection et dintervention existantes.

Cette modélisation permettra dévaluer les tendances des paramètres de fonctionnement et didentifier les éventuelles failles dans le système de sécurité.

3.2.2.1 Schématisation de lincendie suite à une fuite de gaz (scénario nř8)

Selon le scénario nř8 présenté dans le tableau en annexe 1, une défaillance mécanique du 2 étage du compresseur KA-27-02A ou du ballon daspiration associé est susceptible dentraîner une perte de confinement brutale dhydrocarbures gazeux sous haute pression.

Cette émission soudaine et massive de substances inflammables dans latmosphère, en présence dune source dignition, peut provoquer un ou plusieurs phénomènes dangereux majeurs comme : *VCE, Flash Fire* ou *Jet Fire*.

La figure 3.1 suivante illustre la schématisation du nud papillon relatif au scénario nř1.

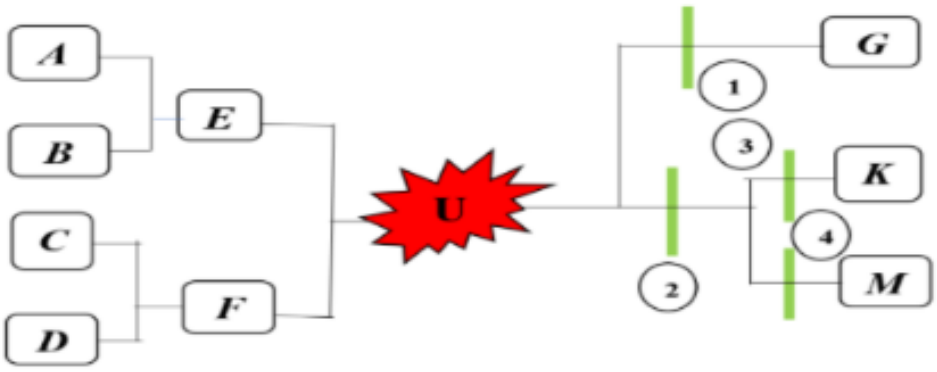


Figure 3.1 : Nud papillon-scénario nř1 [18]

En complément, les tableaux suivants présentent de manière progressive les éléments clés de ce scénario : lER (tableau 3.4), les causes identifiées (tableau 3.5), les conséquences (tableau 3.6), ainsi que les barrières dintervention mises en place (tableau 3.7).

Tableau 3.4 : ER-scénario nř1 [18]

ER	U	Perte de confinement d'une quantité importante dhydrocarbures gazeux suite à la défaillance du 2 étage du compresseur KA-27-02A ou du ballon daspiration associé.

Tableau 3.5 : Causes-scénario nř1 [18]

Cause	A	Surpression interne due à une défaillance du système de protection contre les surpressions
	B	Rupture par corrosion interne et fissuration induite par fatigue
	C	Usure excessive des composants internes (paliers, pistons, segments)
	D	Défaillance du système de lubrification (manque ou contamination de l'huile)
	E	Défaillance mécanique du 2 étage du compresseur KA-27-02A
	F	Rupture du ballon daspiration

Tableau 3.6 : Conséquences-scénario nř1 [18]

Conséquences	G	Jet enflammé
	K	Flash Fire
	M	VCE

Tableau 3.7 : Barrières dintervention-scénario nř1 [18]

Barrières dintervention	1	Système d'arrêt d'urgence automatique (ESD)
	2	Intervention manuelle de léquipe de sécurité (équipe dintervention sur site)
	3	Déploiement dun système de confinement mobile
	4	Activation de la ventilation durgence et dilution des gaz

3.2.2.2 Schématisation de lexplosion suite à une accumulation de gaz (scénario nř23)

Conformément au scénario nř23 présenté dans le tableau en annexe 1, la perte de confinement d'une quantité significative d'hydrocarbures gazeux constitue un ER majeur.

Ce scénario peut être déclenché par une défaillance du 2 étage du compresseur KB23-C02A ou par la rupture du ballon daspiration associé. Ces deux équipements jouent un rôle clé dans le processus de compression et de transport des fluides au sein du système de production. Leur défaillance, quelle soit dorigine mécanique ou opérationnelle, peut provoquer une libération incontrôlée de produits inflammables sous pression.

En présence d'une source dignition, cette fuite massive peut entraîner des conséquences graves telles que :

- Jet enflammé
- Feu de nappe
- Flash fire
- VCE

La figure 3.2 suivante illustre la schématisation du nud papillon relatif au scénario nř2.

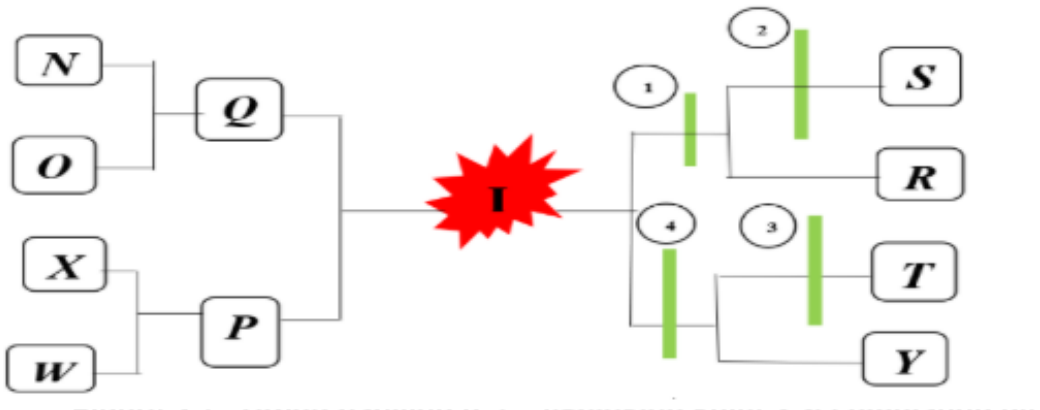


Figure 3.2 : Nud papillon-scénario nř2 [18]

En complément, les tableaux suivants présentent de manière progressive les éléments clés de ce scénario : lER (tableau 3.8), les causes identifiées (tableau 3.9), les conséquences (tableau 3.10), ainsi que les barrières dintervention mises en place (tableau 3.11).

Tableau 3.8 : ER-scénario nř2 [18]

ER	I	Perte de confinement dune quantité importante dhydrocarbures gazeux ou liquides, due à la défaillance du 2 étage du compresseur KB23-C02A ou du ballon daspiration associé.

Tableau 3.9 : Causes-scénario nř2 [18]

Cause	N	Défaillance observée au niveau du système de lubrification du compresseur KB23-C02A
	O	Fuite interne du compresseur due à un mauvais montage
	X	Défaut de fabrication des pièces critiques (soupapes, segments)
	W	Dégradation des joints et des raccords dans le ballon daspiration
	Q	Défaillance mécanique du compresseur KB23-C02A
	P	Rupture du ballon daspiration

Tableau 3.10 : Conséquences-scénario nř2 [18]

Conséquences	S	Jet enflammé
	R	Feu de Nappe
	T	VCE
	Y	Feu Flash

Tableau 3.11 : Barrières dintervention-scénario nř2 [18]

Barrières dintervention	1	Système d'arrêt d'urgence automatique (EUS)
	2	Intervention manuelle de léquipe de sécurité (équipe dintervention sur site)
	3	Déploiement dun système de confinement mobile
	4	Activation de la ventilation durgence et dilution des gaz

3.2.2.3 Schématisation de lincendie suite à une dispersion de gaz inflammable (scénario nř24)

Conformément au scénario Nř24 présenté dans le tableau en annexe 1, une perte de confinement dune quantité importante de gaz peut résulter dune défaillance du 2^e étage du compresseur KA-26-C02A ou du ballon daspiration associé.

Une perte dintégrité due à une fatigue mécanique, une usure accélérée des composants internes, ou encore un défaut de fonctionnement des dispositifs de sécurité peut entraîner une libération soudaine et massive de gaz inflammables dans latmosphère environnante.

En présence dune source dignition, cette fuite peut conduire à des scénarios accidentels graves tels que :

- Feu de nappe
- Flash fire
- Jet fire
- VCE

La figure 3.3 suivante illustre la schématisation du nud papillon relatif au scénario nř3.

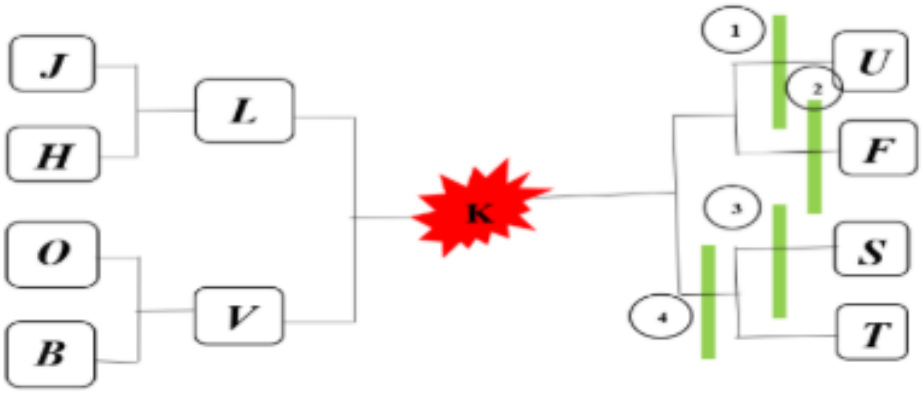


Figure 3.3 : Nud papillon-scénario nř3 [18]

En complément, les tableaux suivants présentent de manière progressive les éléments clés de ce scénario : lER (tableau 3.12), les causes identifiées (tableau 3.13), les conséquences (tableau 3.14), ainsi que les barrières dintervention mises en place (tableau 3.15).

Tableau 3.12 : ER-scénario nř3 [18]

ER	K	Perte de confinement dune quantité importante de gaz due à la défaillance du 2 étage du compresseur KA26-C02A ou de son ballon daspiration associé, provoquant une libération brutale de gaz inflammables sous pression.

Tableau 3.13 : Causes-scénario nř3 [18]

Cause	J	Vibration excessive non maîtrisée
	H	Défaut de conception ou dimensionnement inadéquat du ballon daspiration.
	O	Erreur humaine lors des opérations de redémarrage
	B	Défaillance du système de régulation de pression (PSV mal calibrée ou bloquée)
	L	Fatigue du matériau du ballon daspiration
	V	Rupture interne des ailettes + rotor du compresseur

Tableau 3.14 : Conséquences-scénario nř3 [18]

Conséquences	T	Jet enflammé
	U	Feu de Nappe
	S	VCE
	F	Feu Flash

Tableau 3.15 : Barrières dintervention-scénario nř3 [18]

Barrières dintervention	1	Système d'arrêt d'urgence automatique (ESD)
	2	Intervention manuelle de léquipe de sécurité (équipe dintervention sur site
	3	Déploiement dun système de confinement mobile
	4	Activation de la ventilation durgence et dilution des gaz

3.3 Étape Nř3

Après avoir identifié les scénarios daccident, analysé les défaillances et sélectionné les trois scénarios critiques. dans la troisième étape, elle se concentre sur la détermination et le choix

de lunité la plus critique, suivis de leur décomposition fonctionnelle selon la méthode *SADT*.

3.3.1 Justification du choix de lunité la plus critique

Afin de poursuivre notre démarche, cette étape est dédiée au choix de lunité la plus critique.

Lanalyse des scénarios met en évidence que lUC présente le plus grand nombre de scénarios daccidentes critiques (28 scénarios).Cette constatation repose sur plusieurs facteurs clés, notamment :

- Répartition des défaillances ;
- Nature des phénomènes accidentels ;
- Ampleur des conséquences associées.

LUC est au cur de nombreux scénarios critiques, notamment ceux liés aux défaillances mécaniques, instrumentales et opérationnelles. Parmi les défaillances mécaniques, on trouve des incidents tels que la rupture de canalisation, la surpression. En ce qui concerne les défaillances instrumentales, des dysfonctionnements des capteurs de pression et de température peuvent perturber le bon fonctionnement de lUC. Les défaillances opérationnelles, quant à elles, surviennent généralement en raison derreurs humaines lors des opérations de démarrage et darrêt. La combinaison de ces éléments augmente la probabilité d'événements accidentels graves, comme VCE, le feu de jet, ainsi que la surpression pouvant entraîner des dommages structurels importants.

Aussi, pour lUC, on a constaté que les conditions de fonctionnement extrêmes, avec des pressions et des températures élevées, augmentent le risque de défaillances mécaniques et instrumentales. De plus, les phénomènes accidentels tels que les explosions et les incendies peuvent se propager et affecter plusieurs équipements adjacents, amplifiant ainsi les dégâts. La faible tolérance aux erreurs humaines dans les opérations de maintenance et de manipulation rend cette unité encore plus dangereuse, car toute erreur peut entraîner une perte de confinement immédiate, ce qui la rend extrêmement vulnérable [19].

3.3.2 Présentation de lUC [19]

l'UC est une installation industrielle utilisée pour augmenter la pression dun gaz, généralement du gaz naturel, afin de le transporter plus facilement à travers les pipelines ou vers dautres unités de traitement. Elle comprend principalement des compresseurs, mais aussi des

séparateurs, refroidisseurs, filtres et instruments de contrôle qui assurent le bon fonctionnement du processus.

Cette unité joue un rôle essentiel dans la chaîne de production, car elle permet de maintenir un débit constant et de répondre aux exigences de pression en sortie.

Cependant, en raison des conditions de fonctionnement sévères (haute pression, température élevée, gaz inflammables), elle présente des risques importants, notamment en cas de défaillance mécanique ou derreur humaine.

3.3.3 Principe de fonctionnement de lUC [19]

LUC (KB-23-C01A/B) repose sur un ensemble de composants interconnectés qui assurent le bon déroulement du processus de compression, lesquels sont les suivants :

- Compresseur, qui constitue le cur du système et augmente la pression du gaz en réduisant son volume.
- Refroidisseurs, qui dissipent la chaleur générée lors de la compression.
- Régulateurs de pression, qui ajustent la pression du gaz selon les besoins.
- Capteurs de surveillance, qui mesurent en temps réel la température et la pression.

Ces éléments fonctionnent en synergie pour garantir une compression efficace et sécurisée du gaz avant son acheminement vers les autres unités. Lensemble du processus est contrôlé par des systèmes automatisés de type *SCADA*, qui assurent une gestion précise des paramètres clés tels que la pression et la température.

Grâce à ces technologies, les UCs peuvent fonctionner en continu avec une supervision à distance, réduisant ainsi le besoin dinterventions humaines et minimisant les risques daccidents industriels.

Le schéma présenté dans lannexe 3 offre une vue densemble du processus de lUC, en mettant en évidence les différentes étapes clés du traitement du gaz ainsi que les équipements essentiels impliqués.

3.3.4 Décomposition fonctionnelle de lUC (KB-23-C01A/B) }

Nous avons choisi dadopter cette approche dans le cadre de notre travail, en raison de sa capacité à offrir une vue globale, logique et hiérarchisée du système à analyser.

En effet, la clarté des représentations fonctionnelles quelle permet constitue un atout majeur pour lanalyse préliminaire de systèmes industriels. Cest pourquoi nous avons structuré notre démarche autour des différents niveaux de modélisation *SADT*.

Les schémas présentés dans lannexe 4 illustrent successivement le système. Le premier schéma A0 donne une vue globale du système, tandis que le deuxième A0 en propose une représentation éclatée, mettant en évidence les fonctions principales de manière plus détaillée. Cette décomposition progressive se poursuit avec les niveaux A1, A2, A3 et A4, permettant dexplorer en profondeur les sous-fonctions et leurs interactions. Une attention particulière est portée aux niveaux A2 et A3, considérés comme les unités les plus critiques et potentiellement les plus dangereuses du système.

3.4 Étape Nř4

La quatrième étape de notre démarche consiste à identifie les moyens de protection et dintervention existants dans lUC. Cette approche vise à déterminer leur capacité à faire face aux scénarios critiques identifiés, en particulier VCE.

LUC contient plusieurs éléments et dispositifs dintervention et de protection, tels que :

- Détecteurs de fuites de gaz ,
- Soupapes de sécurité ,
- Systèmes dextinction automatique ,
- Procédures durgence , etc

l'annexe 5 répertorie tous les éléments et les dispositifs, leurs fonctions, leurs limites, ainsi que les pistes damélioration.

Suite au RETEX ainsi quà une comparaison entre les exigences des normes IEC 61511 et ISO 31010:2019 et les dispositifs dintervention et de protection actuellement en place au sein de lUC, plusieurs constats ont été établis.

-Il ressort que la majorité des dispositifs tels que *ESD*, les dispositifs de dépressurisation, de confinement, les rideaux deau, les vannes coupe-feu, ou encore les systèmes dalarme agissent principalement de manière réactive, ne se déclenchant quaprès la détection dun incident.

-En outre, plusieurs limitations ont été relevées : déclenchement tardif, forte dépendance à lopérateur, manque de précision ou de couverture, et faible adaptabilité aux conditions dex-

ploitation.et selon la norme ISO 31010:2019, une barrière dintervention ou de protection doit pouvoir agir rapidement, de manière autonome et proportionnée au niveau de danger.

À la lumière de ces constats, lintroduction dune ST intelligente simpose, afin doptimiser la réactivité et la fiabilité des dispositifs de protection et dintervention .

Ce chapitre a permis de mettre en pratique les concepts de la GRI au sein de lunité KB-23-C01A/B, notamment à travers lexploitation de lEDD, la classification des défaillances, ainsi que lutilisation de la méthode du nud papillon et de *SADT*. Après une comparaison des barrières de sécurité existantes avec les exigences des normes internationales, il a été révélé que les dispositifs actuels de détection et dintervention sont insuffisants. Lintégration dun système *IoT* intelligent permettra non seulement dassurer une alerte précoce, mais aussi doptimiser les prises de décision grâce à lanalyse des données en temps réel, et potentiellement à lintelligence artificielle (IA). Cette démarche technologique fera lobjet du chapitre suivant, consacré au dimensionnement et au déploiement du système *IoT* adapté à cette unité stratégique.

Chapitre 4

Solution technologique

Dans ce chapitre, nous appliquons la méthodologie dimplémentation de la ST au sein de lUC (KB-23-C01A/B). Nous explorons les aspects techniques liés au choix et au positionnement des capteurs *IoT*, en fonction des paramètres critiques identifiés, tels que la pression, la température, les gaz et les vibrations. Le dimensionnement de ces capteurs est réalisé en tenant compte des spécificités du site ainsi que des recommandations des normes internationales.

Lobjectif ici est dassurer une surveillance fiable et réactive face à des scénarios daccidents potentiellement dangereux.

4.1 Application au sein de lunité de compression KB-23-C01A/B

Cette partie est consacrée à lapplication de la cinquième étape de notre méthodologie. Elle fait suite à lidentification de trois scénarios critiques, à leur modélisation à laide du nud papillon, ainsi quà la sélection de lunité de compression comme étant la plus critique. Cette unité a ensuite été décomposée fonctionnellement, ce qui a permis didentifier les barrières de protection et dintervention actuellement en place. Constatant leur insuffisance, nous entamons à présent les étapes de conception de la ST proposée.

4.1.1 Étape nř5.1 : Identification des paramètres critiques et des capteurs adaptés

Dans lUC (KB-23-C01A/B), lintégration de capteurs *IoT* constitue une avancée majeure en matière de surveillance industrielle en temps réel. Ces capteurs intelligents permettent de mesurer en continu les variables de processus critiques, définies à partir de la méthode *SADT*, et qui sont les suivantes :

- Pression
- Température
- Niveaux de gaz
- Vibrations mécaniques

En plus de fournir des données précises et instantanées, ils permettent la détection précoce danomalies précédemment identifiées à laide du nud papillon, telles que :

- Une fuite
- Une surchauffe
- Un déséquilibre mécanique
- Un comportement anormal du compresseur

Les capteurs IoT sélectionnés doivent répondre à des exigences strictes en matière de résistance aux environnements explosifs (ATEX / IECEx), de précision de mesure, de temps de réponse rapide et de connectivité sécurisée. Le choix de ces capteurs a été effectué sur la base des résultats du chapitre 3.

Le tableau 4.1 suivant présente les types de capteurs IoT nécessaires pour lUC (KB-23-C01A/B), ainsi que le rôle et la fonction de chacun.

Tableau 4.1 : Classification des capteurs IoT en fonction de leur rôle [20]

Type de capteur *IoT* à utiliser	**Rôle**
Pression	Mesurent la pression dans l'unité pour éviter les risques de surpression ou de sous-pression, garantissant ainsi un fonctionnement optimal du compresseur.
Température	Surveillent la température des gaz comprimés et des composants internes du compresseur pour éviter les échauffements excessifs et assurer une compression efficace.
Vibration	Surveillent les vibrations du compresseur, détectant toute anomalie qui pourrait indiquer des problèmes mécaniques tels que des déséquilibres ou des roulements usés.
Gaz inflammables	Détectent la présence de gaz inflammables ou toxiques dans l'unité de compression pour prévenir les risques d'explosion ou de fuites dangereuses.
Flamme	Détectent la présence dune flamme ou dun début dincendie dans lunité, permettant une réaction rapide pour éviter la propagation du feu et assurer la sécurité des équipements et du personnel.

4.1.1.1 Détermination du nombre et du positionnement des capteurs *IoT*

La détermination du nombre optimal de capteurs constitue une étape clé dans la conception dun système de détection intelligent basé sur lIoT. Elle vise à garantir une couverture efficace de lUC (KB-23-C01A/B), tout en assurant une réactivité maximale en cas de perte de confinement. Différentes lois et méthodes existent dans la littérature et dans les référentiels industriels pour guider ce dimensionnement.

La figure 4.1 suivante présente les méthodes utilisées pour le dimensionnement des capteurs IoT, en tenant compte des paramètres physiques à surveiller, des contraintes techniques du site et des exigences de sécurité.

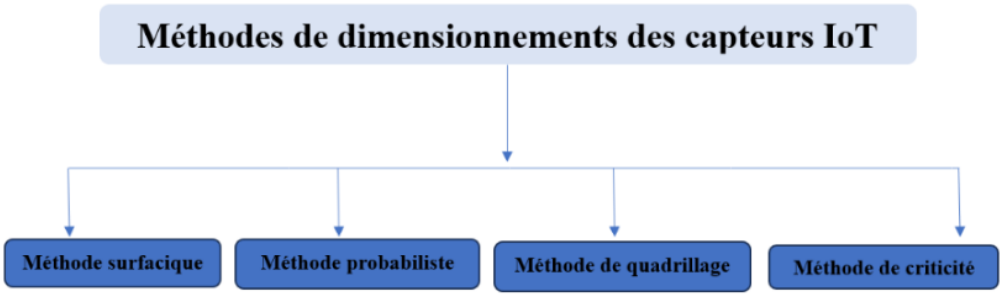


Figure 4.1 : Méthodes de dimensionnements des capteurs IoT [21]

-Méthode surfacique [21]

La première méthode, retenue dans notre travail, repose sur une approche semi-quantitative largement recommandée dans les environnements industriels à risques, notamment par la norme internationale IEC 60079-29-2 relative à la détection de gaz inflammables dans les atmosphères explosives.

Cette méthode permet de déterminer le nombre optimal de capteurs IoT à installer en fonction de la surface à couvrir et des caractéristiques du site, tout en intégrant une marge de sécurité. La formule utilisée est la suivante :

$$N = \left(\frac{S \times K}{A_{eff}} \right) \tag{4.1}$$

Où :

- **N :** Nombre total de capteurs à installer dans la zone étudiée.
- **S :** Surface physique de la zone à surveiller (m^2).
- A_{eff} **:** Surface efficace que peut couvrir un seul capteur.
- **K :** Coefficient de complexité

La méthode surfacique repose sur la connaissance quantitative de la surface à couvrir par les capteurs. Elle est particulièrement utilisée lorsque lobjectif est dassurer une couverture homogène dune zone donnée.

-Méthode probabiliste [21]

La seconde méthode repose sur un modèle probabiliste, utilisé pour calculer le nombre de capteurs nécessaires afin datteindre une probabilité maximale de détection de lER.

Cette approche sappuie sur la formule suivante :

$$P = 1 - (1 - p)^n \tag{4.2}$$

Où :

- **P :** Probabilité globale de détection souhaitée.
- **p :** Probabilité individuelle du capteur.
- **n :** Nombre total de capteurs à installer.

Cette méthode permet de :

- Évite le surdimensionnement des capteurs en se basant sur des risques calculés.
- Réduit les coûts dachat et dénergie des capteurs.
- Offre une meilleure estimation des performances des capteurs.

-Méthode de quadrillage [21]

La troisième méthode, dite méthode de quadrillage, consiste à diviser la zone à surveiller en cellules régulières (carrées ou hexagonales), chacune étant couverte par un capteur situé en son centre. Elle repose sur un principe géométrique simple :

$$N = \frac{S}{A_c} \tag{4.3}$$

Où :

- **S :** Surface totale de la zone.
- A_c **:** Surface individuelle couverte par un capteur.

Cette méthode permet une couverture complète et structurée de la zone, tout en assurant une répartition régulière des capteurs. Elle est facile à appliquer dans des espaces plans et dégagés, ce qui simplifie leur positionnement et leur déploiement.

-Méthode de criticité [21]

La dernière méthode étudiée repose sur une approche qualitative basée sur lanalyse de criticité. Elle consiste à répartir les capteurs en fonction des scénarios daccidents identifiés dans les études de dangers ou par des outils comme la méthode nud papillon.

Les capteurs sont alors installés prioritairement dans les zones à fort risque. Cette méthode est très efficace en matière de ciblage, car elle permet dallouer les ressources là où elles sont réellement nécessaires.

La formule utilisée est la suivante :

$$N = \sum_{i=1}^{m} (C_i \times R_i) \tag{4.4}$$

Avec :

- C_i **:** Coefficient de criticité de la zone i.
- R_i **:** Facteur de redondance.
- **m :** Nombre de zones identifiées.

Le nombre de capteurs est déterminé en fonction du :

- Nombre de scénarios critiques identifiés.
- Gravité des ERs.

-Calcul par la méthode surfacique

Dans le cadre de notre travail, la méthode surfacique a été sélectionnée pour déterminer le nombre optimal de capteurs à installer dans lUC (KB-23-C01A/B).

Cette approche repose sur une base semi-quantitative conforme à la norme internationale IEC 60079-29-2, qui encadre le dimensionnement des dispositifs de détection de gaz en ATEX.

Contrairement aux autres méthodes, elle tient compte de la surface réelle à couvrir tout en

introduisant des facteurs dajustement liés à la configuration physique et fonctionnelle de linstallation.

Le choix de cette méthode se justifie également par sa capacité à intégrer des marges de sécurité tout en évitant un déploiement excessif de capteurs.

Comme mentionné précédemment, cinq types de capteurs ont été adoptés pour notre UC.

Dans la section suivante, nous appliquerons la méthode surfacique afin de déterminer le nombre optimal de capteurs IoT pour chaque type.

- Capteurs *IoT* de gaz inflammables

On commence par les capteurs IoT de gaz inflammables, car ces derniers jouent un rôle essentiel dans les UCs. Étant donné que les gaz traités sont souvent inflammables et sous pression, il est donc très important dinstaller ces capteurs dans les zones où des fuites pourraient se produire.

Après lapplication numérique, on trouve :

$$N_{gaz} = \left(\frac{600 \times 2}{20}\right) + 5 = 65 \text{ capteurs de gaz de type } IoT \tag{4.5}$$

Les capteurs IoT de gaz inflammables doivent être installés dans des zones identifiées comme critiques à partir de la $SADT$, notamment au niveau A2.1, qui inclut plusieurs éléments sensibles. Les emplacements recommandés, tels que présentés dans lannexe 6, sont les suivants ::

- Autour des compresseurs (1er et 2^{e} étage).
- À proximité des joints de bride et des soupapes de sécurité.

-Capteurs *IoT* de pression

Les capteurs IoT de pression jouent aussi un rôle important dans la surveillance de l'équilibre du processus. Toute variation inhabituelle peut signaler une fuite, une surpression ou une obstruction.

Après lapplication numérique on trouve :

$$N_{pression} = \left(\frac{400 \times 1.5}{25}\right) + 3 = 27 \text{ capteurs de pression de type } IoT \tag{4.6}$$

Daprès la $SADT$, notamment au niveau A2.1 et A2.2, Les emplacements optimaux sont les suivants (également illustrés dans lannexe 6) :

- À lentrée et à la sortie de chaque étage de compression.
- Au niveau des collecteurs de gaz interconnectés.
- À proximité des vannes de régulation.

-Capteurs *IoT* de température

Ces capteurs aident à anticiper les échauffements qui pourraient entraîner des fuites ou des pannes mécaniques.

Après lapplication numérique on trouve :

$$N_{temprature} = \left(\frac{350 \times 1.5}{30}\right) + 2 = 20 \text{ capteurs de température de type } IoT \tag{4.7}$$

Pour assurer une surveillance thermique efficace, les capteurs IoT de température doivent être installés dans plusieurs zones sensibles (présentées en annexe 6) identifiées à partir de la SADT .

- Au niveau A2.1, qui concerne laspiration du gaz, une mesure précise de la température en entrée permet de détecter déventuelles anomalies de processus en amont.
- Le niveau A2.2, lié à la compression, nécessite un suivi constant de la température à la sortie de chaque étage, car une surchauffe peut endommager les composants internes.
- À létape A3.1, dédiée au refroidissement et au transfert du gaz, le contrôle de la température garantit que les gaz atteignent les conditions requises avant dêtre redirigés.

-Capteurs *IoT* de vibrations

Les capteurs IoT de vibrations sont essentiels pour :

- Détecter des déséquilibres mécaniques,
- Lusure des roulements,
- Les micro-fuites qui ne sont pas visibles à l'il nu.

Après lapplication numérique on trouve :

$$N_{vibration} = \left(\frac{300 \times 1.8}{15}\right) + 4 = 40 \text{ capteurs de vibration de type } IoT \tag{4.8}$$

Les capteurs IoT de vibration doivent être positionnés dans les zones où des sollicitations mécaniques sont fréquentes (présentées en annexe 6), telles que identifiées dans les blocs

fonctionnels du *SADT*.

- Dans la phase daspiration du gaz (niveau A2.1), les supports déquipements et de tuyauterie peuvent être soumis à des vibrations dues à des variations de débit ou de pression.
- Au niveau des fonctions de transfert et de régulation (A3), les lignes de refoulement et les collecteurs peuvent transmettre des vibrations générées par les machines en amont.

-Capteurs *IoT* de flamme

Les capteurs *IoT* de flamme permettent de détecter rapidement tout début dincendie et de sécuriser les zones à risque en réagissant automatiquement en cas de combustion non contrôlée.

Après lapplication numérique, on trouve :

$$N_{\text{flamme}} = \left(\frac{300 \times 1.5}{15}\right) + 2 = 32 \text{ capteurs de flamme de type } IoT \tag{4.9}$$

Les détecteurs de flamme doivent être placés dans les zones identifiées comme critiques (présentées en annexe 6), à travers la *SADT*, telles que :

- Autour des compresseurs principaux, où les risques thermiques sont les plus élevés (bloc A2.2).
- À proximité des soupapes de sécurité et des joints de bride, zones susceptibles de provoquer des fuites inflammables.
- À la sortie des lignes de refoulement et près des collecteurs de gaz (A3), où un dégagement de gaz enflammé peut survenir.

-Récapitulatif des calculs réalisés pour estimer le nombre de capteurs *IoT* nécessaires pour chaque type

Le tableau 4.2 suivant présente un récapitulatif des calculs réalisés pour estimer le nombre de capteurs *IoT* nécessaires pour chaque type, en se basant sur les caractéristiques techniques de lunité et les critères de dimensionnement exposés précédemment.

Tableau 4.2 : Résultat du calcul du nombre de capteurs *IoT* nécessaires par type [21]

Type de capteurs IoT	**S (mš)**	**K**	**A_{eff} (mš)**	**Z**	**N**
Gaz inflammables	600	2.0	20	5	65
Vibration	300	1.8	15	4	40
Pression	400	1.5	25	3	27
Température	350	1.5	30	2	20
Flamme	350	1.5	15	2	32

4.1.2 Étapes nř5.2 Sécurisation des transmissions *IoT* à laide du protocole *LoRa*

Dans un environnement industriel sensible comme lUC (KB-23-C01A/B), la fiabilité de la transmission des données des capteurs *IoT* est essentielle pour assurer une surveillance efficace en temps réel.

Une défaillance de communication, notamment lors dune fuite de gaz ou d'une variation de pression, peut avoir de graves conséquences. Le protocole *LoRa*, grâce à sa robustesse, sa sécurité et sa faible consommation, savère bien adapté aux contraintes des environnements industriels.

4.1.3 Étape nř5.3 : Structure du système *IoT*

Dans cette section, nous présentons les composants nécessaires à la construction de larchitecture du système *IoT*, en détaillant ses couches ainsi que les équipements utilisés.

4.1.3.1 Composition du système

Pour répondre efficacement aux trois scénarios identifiés, nous proposons la mise en uvre de trois systèmes *IoT* spécifiques :

- Système de surveillance conditionnelle et dintervention automatisée
- Système intégré de détection multisensorielle et extinction automatisée
- Système de détection multimodale et coupure automatique anti-jet enflammé

- Système de surveillance conditionnelle et dintervention automatisée

Nous commençons par le système de surveillance conditionnelle et dintervention automatisée.

Afin de faire face au risque de défaillance mécanique soudaine sur le deuxième étage du compresseur KA-27-02A, un système *IoT* avancé de surveillance et d'intervention automatisée est déployé.

Ce dispositif intelligent est conçu pour détecter toute chute anormale de pression, signalant une rupture mécanique grave dans un circuit de gaz sous très haute pression. Grâce à des capteurs de pression *IoT* placés stratégiquement, des passerelles *LoRa* robustes, et des actionneurs durgence, ce système permet une :

- Réaction automatique ;
- Arrêt du compresseur ;
- lIsolement du segment affecté ;
- Notification immédiate via un réseau satellite sécurisé.

L'objectif est d'assurer un temps de réponse minimal en cas de scénario explosif potentiel, en garantissant à la fois l'intégrité de linstallation, la sécurité du personnel et la continuité du système dalerte.

Dans le tableau 4.3 suivant, nous présentons les différentes phases du fonctionnement en situation durgence ainsi que les couches du système *IoT* associé, en précisant pour chacune leur composition technique et leur rôle opérationnel.

Tableau 4.3 : Architecture IoT pour le système nř1 [21]

Couche *IoT*	**Composants**	**Fonction**
Perception	◦ CP_{IoT} ◦ CT_{IoT} ◦ Accéléromètre industriel	◦ Mesurer en temps réel la pression en sortie du compresseur. ◦ Détecter les anomalies thermiques.
Réseau	◦ Passerelle *LoRa* ◦ Répéteurs *LoRa*	Transmettre les données capteurs via le protocole *LoRa*
Traitement	◦ Microcontrôleur ◦ Analyseur de seuil critique	Traiter localement les signaux pour un temps de réaction rapide
Action	◦ Contrôleur *ESD* ◦ Actionneur pneumatique	◦ Couper instantanément le compresseur. ◦ Isoler le tronçon de tuyauterie en amont et en aval.
Application	◦ Interface $SCADA$ + dashboard sécurisé ◦ Réseau satellite de notification	◦ Affichage en temps réel dans la salle de supervision. ◦ Notification immédiate au personnel concerné.
Coordination	◦ Centre de supervision ◦ Activation du PII	Assurer le déclenchement humain et lévacuation du personnel si nécessaire

- Système intégré de détection multisensorielle et extinction automatisée

On poursuit avec le système de détection multisensorielle et dextinction automatisée.

Afin de faire face au risque dincendie de nappe provoqué par une fuite de condensats dans la ligne de refoulement, un système IoT intelligent a été mis en place.

Ce dispositif vise à détecter rapidement la présence de liquides inflammables, identifier tout point chaud susceptible denclencher un feu, et déclencher automatiquement des actions dextinction ciblées.

Il repose sur lintégration de capteurs de température, de gaz et de flamme, combinés à un réseau *LoRa*, un microcontrôleur local, et une pompe mousse connectée pour une intervention rapide et autonome.

Le tableau 4.4 ci-après présente les différentes phases du fonctionnement du système *IoT* dans le cadre du scénario de feu de nappe, en détaillant pour chaque couche sa composition technique ainsi que sa fonction dans la gestion dune situation durgence.

Tableau 4.4 : Architecture IoT pour le système nř2 [21]

Couche *IoT*	**Composants**	**Fonction**
Perception	◦ CT_{IoT} ◦ CGI_{IoT}	◦ Identifier tout échauffement localisé ou point chaud. ◦ Détecter la présence de vapeurs inflammables. ◦ Confirmer visuellement lamorçage dun feu de nappe.
Réseau	◦ Passerelle *LoRa*	Transmettre les données vers le microcontrôleur via *LoRa*
Traitement	◦ Microcontrôleur ◦ Algorithme de fusion des données capteurs	◦ Analyser localement les données multicapteurs. ◦ Déclencher automatiquement le scénario dextinction.
Action	◦ Pompe mousse connectée ◦ Ventilation durgence motorisée	◦ Activer immédiatement lextinction par mousse dans la zone concernée. ◦ Assurer la dilution thermique pour éviter la propagation.
Application	◦ *SCADA* + Dashboard HSE ◦ Alerte satellite cryptée	◦ Afficher les alarmes en temps réel dans la salle de supervision. ◦ Alerter le personnel même si le réseau principal est hors service.
Coordination	◦ Interface HSE centrale ◦ Déclenchement du PII	Organiser les interventions, alerter le personnel et superviser lopération

- Système de détection multimodale et coupure automatique anti-jet enflammé

On termine avec le système de détection multicritère et dintervention thermique automatisée.

Afin de faire face au risque extrême de jet enflammé provoqué par une rupture soudaine sur le collecteur principal, un système IoT autonome a été déployé autour de cette zone stratégique. Ce dispositif intelligent a pour objectif de détecter les signes précurseurs dinstabilité mécanique, confirmer la présence de gaz à haute pression et valider lapparition dune flamme, afin de déclencher sans délai une réponse coordonnée.

Le système repose sur lintégration de capteurs de vibration, de gaz et de flamme, combinés à un réseau de transmission *LoRa*, un microcontrôleur et des équipements daction immédiate tels que les vannes haute pression motorisées et le rideau deau.

Le tableau 4.5 suivant décrit les différentes phases du fonctionnement du système IoT mis en place dans le cadre du scénario de jet enflammé. Il précise, pour chaque couche technologique, les composants mobilisés ainsi que leur rôle dans la gestion rapide et automatisée de cet événement critique.

Tableau 4.5 : Architecture IoT pour le système nř3 [21]

Couche *IoT*	**Composants**	**Fonction**
Perception	◦ CV_{IoT} ◦ CGI_{IoT} ◦ CF_{IoT}	◦ Détecter les micro-vibrations signalant une fissure. ◦ Détecter la présence de gaz à haute pression. ◦ Confirmer lamorçage du jet enflammé.
Réseau	◦ Passerelle *LoRa* ◦ Répéteurs *LoRa*	Transmettre les signaux sans fil
Traitement	◦ Microcontrôleur	Recouper les trois signaux (vibration, gaz, flamme)
Action	◦ Vannes motorisées HP ◦ Rideau deau	◦ Isoler le collecteur en coupant lalimentation. ◦ Réduire leffet thermique par pulvérisation deau.
Application	◦ Liaison satellite ◦ Plateforme *SCADA*	◦ Transmettre lalerte au centre de supervision. ◦ Permettre la gestion et le suivi de lintervention.
Coordination	◦ PII	◦ Superviser les événements en temps réel. ◦ Activer les procédures de réponse humaine et dévacuation.

4.1.4 Fonctionnement du système en situation durgence

Dans cette partie, nous allons présenter le fonctionnement du système en situation durgence afin détudier sa réaction face aux trois scénarios critiques identifiés dans létude de

danger.

Pour cela, nous commencerons par expliquer le mode de fonctionnement des trois systèmes proposés, en mettant en lumière la manière dont ils interviennent pour détecter, alerter et maîtriser les risques.

Cette démarche permet dévaluer précisément la capacité du système à gérer efficacement les situations à haut risque, garantissant ainsi une meilleure sécurité et une meilleure protection de lunité de compression.

4.1.4.1 Fonctionnement du système de surveillance conditionnelle et dintervention automatisée

Ce système *IoT* a été conçu pour répondre à un scénario critique de type VCE, provoqué par une défaillance mécanique brutale au niveau du deuxième étage du compresseur KA-27-02A.

Il repose sur des capteurs connectés, un réseau de transmission *LoRa*, un microcontrôleur embarqué et un dispositif daction autonome, permettant une réaction en quelques secondes sans intervention humaine.

Le fonctionnement du système se décompose en plusieurs phases successives :

- Phase de perception
- Phase de transmission
- Phase de traitement
- Phase daction
- Phase de coordination

- Phase de perception

La collecte continue de données critiques est assurée par des capteurs intelligents (pression, température, vibrations) positionnés autour du compresseur. Ces capteurs permettent de détecter toute anomalie annonçant une perte de confinement.

- Phase de transmission

Les données sont transmises via le réseau *LoRa*, à faible consommation et longue portée. La passerelle LoRa installée dans la salle technique centralise les données, et les répéteurs assurent la redondance si nécessaire.

- Phase de traitement

Un microcontrôleur embarqué analyse les données reçues en les comparant à des seuils critiques. En cas danomalie, le système réagit immédiatement sans intervention humaine, assurant une prise de décision autonome même en cas de défaillance réseau.

- Phase daction

Le contrôleur ESD déclenche automatiquement larrêt du compresseur. Des actionneurs pneumatiques isolent la zone critique, et une alerte est transmise via liaison satellite vers la salle de contrôle. Les données sont également transmises au système *SCADA*.

- Phase de coordination

Cette phase assure le suivi de lévénement : affichage en temps réel, enregistrement des données, et transmission aux opérateurs. Elle permet lintervention humaine via le PII et garantit une transition fluide entre automatisme et gestion manuelle.

4.1.4.2 Fonctionnement du système intégré de détection multisensorielle et extinction automatisée

Ce système est conçu pour faire face à un scénario critique de type feu de nappe, causé par une fuite de condensats dans la ligne de refoulement.

Il sappuie sur des capteurs de température, de gaz et de flamme, un réseau *LoRa*, un microcontrôleur, ainsi quun dispositif dextinction automatisée. Lobjectif est de détecter et maîtriser un feu de nappe en quelques secondes, sans intervention humaine.

Les phases de fonctionnement sont :

- Phase de perception
- Phase de transmission
- Phase de traitement
- Phase daction
- Phase de coordination

- Phase de perception

Les capteurs multisensoriels identifient un point chaud, la présence de vapeurs inflammables et la confirmation visuelle dun feu de nappe.

- Phase de transmission

Les données sont envoyées via une passerelle *LoRa* au microcontrôleur pour analyse immédiate.

- Phase de traitement

Le microcontrôleur fusionne les données des capteurs pour vérifier la concordance des signaux. En cas dalerte, il déclenche instantanément le scénario dextinction.

- Phase daction

Une pompe mousse connectée et une ventilation motorisée sactivent pour éteindre le feu et limiter la propagation thermique.

- Phase de coordination

Les informations sont transmises à la plateforme *SCADA* et au centre HSE. Lalerte satellite permet de notifier le personnel même en cas de coupure du réseau local.

4.1.4.3 Fonctionnement du système de détection multimodale et coupure automatique anti-jet enflammé

Dans cette partie, nous présentons le principe de fonctionnement du système IoT déployé pour répondre au troisième scénario critique : le jet enflammé, faisant suite à une rupture brutale dune conduite au niveau du collecteur principal.

Le système repose sur une détection à trois niveaux :

- Transmission longue portée *LoRa*
- Microcontrôleur embarqué
- Dispositif darrêt durgence avec rideau deau

Ces éléments permettent une réaction immédiate, sans intervention humaine.

Le fonctionnement est structuré autour de cinq phases principales :

- Phase de perception
- Phase de transmission
- Phase de traitement
- Phase daction
- Phase de coordination

- Phase de perception

Cette phase repose sur une logique de détection en cascade, conçue pour anticiper toute rupture au niveau du collecteur.

Elle débute par la lecture de micro-vibrations anormales via un capteur de vibration, indicateur précoce dun relâchement mécanique ou dune fissuration en cours.

Ce signal est ensuite recoupé avec la détection de gaz à forte concentration, puis confirmé par un capteur de flamme optique validant lapparition dun jet enflammé.

- Phase de transmission

Les données issues des trois capteurs sont transmises quasi instantanément à la passerelle *LoRa* installée dans la salle technique.

Cette technologie longue portée, robuste et peu sensible aux interférences électromagnétiques, assure une transmission fiable même en atmosphère explosive.

- Phase de traitement

Le signal combiné (vibration, gaz, flamme) est traité par un microcontrôleur embarqué.

Celui-ci applique une logique séquentielle : la détection isolée dun seul paramètre nengendre pas daction, mais la combinaison des trois signaux entraîne une alerte critique.

Ce traitement localisé permet une réaction ultra-rapide, sans passer par le cloud, garantissant une latence minimale.

- Phase daction

Une fois lalerte confirmée, le microcontrôleur déclenche une double réponse automatisée :

- Fermeture instantanée des vannes haute pression en amont du collecteur
- Activation du rideau deau multi-niveaux générant un brouillard haute pression

Ce rideau vise à refroidir lenvironnement, protéger les équipements sensibles et diluer le gaz en combustion.

- Phase de coordination

Simultanément, une alerte critique est transmise à la salle de contrôle via une liaison satellite indépendante, assurant la continuité même en cas de rupture physique du câblage.

Lalerte est priorisée dans le *SCADA* et le PII est déclenché : évacuation, sécurisation des zones voisines, et mobilisation des moyens dextinction secondaires.

4.1.5 Évaluation du temps de réponse global pour les 3 systèmes

Afin danalyser la réactivité des systèmes proposés, le temps de réponse total t_r a été estimé pour chacun.

Ce temps correspond à la durée écoulée entre la détection initiale dun événement et lactivation effective des mesures automatiques de sécurité (arrêt durgence, fermeture de vannes, déclenchement dextincteurs, etc.).

Il est calculé selon la formule [22] :

$$t_r = t_d + t_c + t_a \tag{4.10}$$

Avec :

- t_r : Temps de réponse global (s)
- t_d : Temps de détection (s)
- t_c : Temps de communication (s)
- t_a : Temps dactivation (s)

Il est important de préciser que les valeurs indiquées dans le tableau 4.7 ne résultent pas de mesures expérimentales réalisées sur site, mais ont été déduites à partir des exigences normatives spécifiées par les référentiels **IEC 61511** et **ISO 13849**. Ces normes encadrent les performances des systèmes instrumentés de sécurité et des dispositifs de commande associés à la sécurité.

Elles définissent notamment des seuils de temps de réponse acceptables en fonction du niveau de criticité des scénarios accidentels (explosion de type VCE, feu de nappe, jet enflammé, etc.).

Pour chaque système analysé, le temps maximal admissible a été sélectionné selon le type dévénement simulé, tout en respectant les exigences en matière de rapidité.

4.1.5.1 Estimation du temps de détection t_d

Le temps de détection t_d représente le délai nécessaire à un capteur pour identifier une anomalie (gaz, chaleur, vibration, flamme, etc.) dès son apparition.

Dans notre travail, t_d a été estimé à partir des données retenues dans les fiches techniques et qui sont présentées dans le tableau 4.6 suivant.

Lestimation repose sur des capteurs industriels fiables, en se basant sur leur temps de réponse typique, noté T_{90}, qui correspond au délai requis pour atteindre 90 % de la valeur finale du signal détecté.

Tableau 4.6 : Caractéristiques techniques [24]

Capteur IoT	**Type de mesure**	**Temps de réponse**	**Plage de mesure**	**Technologie de communication**
Polytron 8700 IoT (Dräger)	Gaz (CH_4, H_2S)	15 s (T90)	Variable selon le gaz	420 mA, HART, Modbus, LoRa
X3301 (Det-Tronics)	Flamme	< 3 s	Jusquà plusieurs mètres	Relais, 420 mA, RS-485, Modbus
Vibration Sensor V3 (IoT)	Vibration	1 ms	ś16 g (triaxial)	Analogique / LoRa

Par la suite, nous présentons le tableau 4.7, qui contient les résultats des temps de réponse pour les trois systèmes, établis à partir des données extraites des fiches techniques de chaque capteur *IoT*, ainsi que des valeurs de référence présentes dans les normes .

Tableau 4.7 : Estimation des temps de réponse pour les trois systèmes selon les fiches techniques des capteurs *IoT*

Nř	**Système**	t_d (s)	t_c (s)	t_a (s)	$t_{r,\text{estimé}}$ (s)	$t_{r,\text{norme}}$ (s)	**Interprétation**
01	Détection gaz + coupure automatique	10	1	1,5	12,5	≤ 18	Action rapide grâce au capteur *Polytron 8700 IoT*.
02	Anti-incendie (flamme + température)	2,5	1	2	5,5	≤ 10	Détection efficace via *X3301*.
03	Vibration + arrêt durgence	0,0001	0,8	1,9	2,7001	≤ 4	Réaction immédiate via *Vibration Sensor V3*.

Le principal avantage des systèmes *IoT* réside dans la réduction significative du temps de réponse face à des ERs. Grâce à la détection automatique, à la transmission rapide via le protocole *LoRa*, et à la génération immédiate dalertes, laction devient quasi-instantanée dès quun seuil critique est franchi, sans nécessiter de validation humaine préalable.

Ce dernier chapitre a été consacré à la mise en uvre de la cinquième étape de notre démarche méthodologique, à savoir la conception et lintégration dun ST basé sur l*IoT*. Cette solution a été élaborée en réponse aux insuffisances identifiées dans les dispositifs dintervention et de protection existants, analysés lors des étapes précédentes.

Conclusion générale

Lintégration des technologies IoT dans la GUI constitue une avancée stratégique majeure pour renforcer la sûreté des installations critiques, à limage de lunité de compression KB-23-C01A/B. Le système intelligent que nous avons proposé combine détection, traitement autonome, transmission de données et déclenchement automatique dactions, permettant doptimiser la gestion des ERs. Ce travail sinscrit dans une logique de transformation digitale des systèmes HSE, en réponse aux besoins croissants en matière de réactivité, de fiabilité et de coordination dans les milieux industriels à haut risque.

Lapproche méthodologique adoptée a permis de construire une solution complète, depuis lanalyse fonctionnelle à laide de la méthode SADT, jusquau dimensionnement et au positionnement de 184 capteurs IoT, répartis comme suit : 65 capteurs de gaz, 40 capteurs de vibration, 27 capteurs de pression, 20 capteurs de température et 32 détecteurs de flamme. Leur implantation a été réalisée en tenant compte des zones critiques de lunité (telles que les compresseurs, lignes de refoulement, soupapes, points de fuites probables, etc.), en conformité avec les normes internationales telles que IEC 60079-29-2. Cette architecture assure une couverture homogène et ciblée de lUC.

Lévaluation du système a porté sur trois scénarios daccidents simulés. Les temps de réponse obtenus sont les suivants : 12,5 secondes pour le premier système, 5,5 secondes pour le deuxième, et 2,7001 secondes pour le troisième. Dans tous les cas, ces délais restent nettement inférieurs aux seuils critiques définis (respectivement 18 s, 10 s et 4 s). Ces résultats traduisent une amélioration de plus de 75 % par rapport aux systèmes traditionnels, où lintervention humaine dépasse souvent 15 secondes. Le système réagit de manière autonome, sans nécessiter de validation manuelle.

Au-delà de la performance technique, la solution technologique proposée répond également à des insuffisances structurelles souvent observées sur le terrain. Elle permet de réduire les délais de décision, déviter les instructions contradictoires en situation de stress, déliminer le risque dinaction humaine dans les premières secondes critiques, et dassurer une validation rapide et fiable des données critiques. Par ailleurs, elle garantit une traçabilité complète des événements, facilitant le retour RETEX et lamélioration continue des procédures de sécurité.

Cette ST assure également une coordination fluide entre les différents acteurs impliqués (opérateurs, responsables HSE, maintenance, etc.) via lintégration avec les systèmes SCADA et la possibilité dalerte à distance. Grâce à larchitecture LoRa et au traitement embarqué local, elle reste fonctionnelle même en cas de défaillance du réseau principal, garantissant ainsi une résilience accrue du système de sécurité.

le système IoT développé représente une avancée concrète et opérationnelle dans la digitalisation de la sécurité industrielle. Il apporte une valeur ajoutée à la GUI en milieu sensible, en renforçant lefficacité, la réactivité et la fiabilité des actions de sécurité. Cette solution peut être étendue à dautres installations industrielles présentant des risques similaires,

et constitue une base solide pour des développements futurs intégrant des technologies telles que :lIA.

Bibliographie

[1] : E. K. Mihailidou, K. D. Antoniadis, M. J. Assael, The 319 major industrial accidents since 1917, *International Review of Chemical Engineering*, vol. 4, no. 6, 2012.

[2] : Sonatrach & Eni. (2021). Étude de danger du champ gazier MLE Bloc 405b, bassin de Berkine. Édition révisée, EDD interne.

[3] : INERIS. (2016). Guide méthodologique pour la gestion des risques industriels (GRI). Institut National de lEnvironnement Industriel et des Risques.

[4] : INRS. (2015). Organisation des secours et gestion des situations durgence sur les lieux de travail. Institut National de Recherche et de Sécurité.

[5] : INERIS. (2017). Gestion des situations durgence : principes, organisation et retours dexpérience. Institut National de lEnvironnement Industriel et des Risques.

[6] : République Algérienne Démocratique et Populaire. (2005 & 2025). Décrets exécutifs nř 05-378 du 5 octobre 2005 et nř 25-63 du 28 janvier 2025 relatifs au Plan dIntervention Interne (PII), Plan Particulier dIntervention (PPI) et plan ORSEC. Journal Officiel de la République Algérienne.

[7] : République Algérienne Démocratique et Populaire. (2005 & 2025). Cadre réglementaire de la gestion des urgences industrielles : Corrélation entre les phases dintervention (préparation, alerte, réponse, récupération) et les plans PII, PPI, ORSEC, conformément aux décrets exécutifs nř 05-378 du 5 octobre 2005 et nř 25-63 du 28 janvier 2025. Journal Officiel de la République Algérienne.

[8] : Marca, D. A., & McGowan, C. L. (1988). *Méthode SADT : Une technique structurée danalyse et de conception de systèmes*. Paris : McGraw-Hill. Centre for Chemical Process Safety (CCPS). (2000). *Guidelines for Chemical Process Quantitative Risk Analysis*. AIChE Utilisation de la méthode du nud papillon pour lanalyse des risques.

[9] : Minerva, R., Biru, A., & Rotondi, D. (2015). Towards a definition of the Internet of Things (IoT). IEEE Internet Initiative, 186.

[10] : Buyya, R., & Dastjerdi, A. V. (2016). *Internet of Things : Principles and paradigms*. Amsterdam : Morgan Kaufmann.

[11] : Madakam, S., Ramaswamy, R., & Tripathi, S. (2015). *Internet of Things (IoT) : A literature review*. Journal of Computer and Communications, 3(5), 164173.

[12] : Bahga, A., Madisetti, V. (2014). *Internet of Things : A Hands-On Approach*. United States : Universities Press.

[13] : Rayes, A., & Salam, S. (2017). Internet of Things : From hype to reality The road to digitization. Cham : Springer.

[14] : Gubbi, J., Buyya, R., Marusic, S., & Palaniswami, M. (2013). Internet of Things (IoT) : A vision, architectural elements, and future directions. *Future Generation Computer Systems, 29*(7), 16451660.

[15] : Sonatrach, & ENI. (2022). Fiches de scénarios daccidents majeurs Champ MLE : Élaboration dans le cadre de lEDD et du Plan dIntervention Interne (PII). *Direction HSE, Hassi Messaoud*.

[16] : Sonatrach. (2023). Classification des défaillances techniques et retour dexpérience Documents internes MLE, unité de compression KB-23-C01A/B. *Direction HSE, Département Maintenance, Hassi Messaoud*.

[17] : Sonatrach, & ENI. (2022). Analyse des défaillances techniques basée sur le retour dexpérience maintenance Champ MLE. *Département Mécanique, HSE Hassi Messaoud*.

[18] : Sonatrach, & ENI. (2022). Étude de dangers (EDD) et Plan dIntervention Interne (PII) Données techniques fournies par le Département Exploitation, Service Procédés. *Champ MLE, Hassi Messaoud*.

[19] : Sonatrach, & ENI. (2022). Manuel dexploitation Unité de Compression (UC). *Département Exploitation, Service Procédés, Champ MLE, Hassi Messaoud*.

[20] : Sonatrach, & ENI. (2022). Spécifications techniques des capteurs utilisés dans lunité de compression Données fournies par le Département Exploitation, Service Procédés. *Champ MLE, Hassi Messaoud*.

[21] : Gubbi, J., Buyya, R., Marusic, S., & Palaniswami, M. (2013). Internet of Things (IoT) : A vision, architectural elements, and future directions. *Future Generation Computer Systems, 29*(7), 16451660.

[22] : Kopetz, H. (2011). *Real-time systems : Design principles for distributed embedded applications* (2nd ed.). Springer.

[23] : ISO/IEC. (2018). *ISO/IEC 30141:2018 Internet of Things (IoT) Reference Architecture*. Geneva : International Organization for Standardization / International Electrotechnical Commission.

[24] : Fabricants des capteurs IoT. (2024). *Fiches techniques des capteurs IoT : Polytron 8700, X3301, et Vibration Sensor V3*.

Annexes

Annexe 1 : Scénarios d'accident retenus par l'EDD

Nř	Scénario	Événement redouté	Taille de la fuite	Produit	Phénomène
1	Défaillance au niveau des installations de réception	Perte de confinement d'une grande quantité de gaz	Grande	Gaz	VCE
2	Défaillance au niveau des installations de réception	Perte de confinement d'une grande quantité de gaz	Grande	Gaz	Jet Enflammé
3	Défaillance au niveau des installations de réception	Perte de confinement d'une grande quantité de gaz	Grande	Gaz	Feu de Nappe
4	Défaillance au niveau des installations de réception	Perte de confinement d'une grande quantité de gaz	Grande	Gaz	Feu Flash
5	Défaillance slug catcher	Perte de confinement d'hydrocarbures liquides	Grande	Liquide	VCE
6	Défaillance slug catcher	Perte de confinement d'hydrocarbures liquides	Grande	Gaz	VCE
7	Défaillance slug catcher	Perte de confinement d'hydrocarbures liquides	Rupture	Liquide	Jet Enflammé
8	Une défaillance mécanique du 2^{e} étage du compresseur KA-27-02A ou du ballon daspiration associé	Perte de confinement dhydrocarbures gazeux	Rupture	Gaz	VCE, flash fire et jet fire

Nř	Scénario	Évènement redouté	Taille de la fuite	Produit	Phénomène
9	Défaillance slug catcher	Perte de confinement d'hydrocarbures liquides	Grande	Liquide	Jet Enflammé
10	Défaillance slug catcher	Perte de confinement d'hydrocarbures liquides	Grande	Gaz	Jet Enflammé
11	Défaillance slug catcher	Perte de confinement d'hydrocarbures liquides	Rupture	Liquide	Feu de Nappe
12	Défaillance slug catcher	Perte de confinement d'hydrocarbures liquides	Rupture	Gaz	Feu de Nappe
13	Défaillance slug catcher	Perte de confinement d'hydrocarbures liquides	Grande	Liquide	Feu de Nappe
14	Défaillance slug catcher	Perte de confinement d'hydrocarbures liquides	Grande	Gaz	Feu de Nappe
15	Défaillance slug catcher	Perte de confinement d'hydrocarbures liquides	Rupture	Liquide	Feu Flash
16	Défaillance slug catcher	Perte de confinement d'hydrocarbures liquides	Rupture	Gaz	Feu Flash
17	Défaillance slug catcher	Perte de confinement d'hydrocarbures liquides	Grande	Liquide	Feu Flash
18	Défaillance slug catcher	Perte de confinement d'hydrocarbures liquides	Grande	Gaz	Feu Flash
19	Défaillance au niveau du scrubber dentrée	Perte de confinement d'hydrocarbures liquides	Rupture	Liquide	Jet Enflammé
20	Défaillance au niveau du scrubber dentrée	Perte de confinement d'hydrocarbures liquides	Rupture	Gaz	Jet Enflammé
21	Défaillance au niveau du scrubber dentrée	Perte de confinement d'hydrocarbures liquides	Grande	Liquide	Jet Enflammé

Nř	Scénario	Évènement redouté	Taille de la fuite	Produit	Phénomène
22	Défaillance au niveau du scrubber dentrée	Perte de confinement d'hydrocarbures liquides	Grande	Gaz	Jet Enflammé
23	Défaillance du 2e étage du compresseur KB23-C02A ou rupture du ballon daspiration associé	Perte de confinement dhydrocarbures gazeux et liquides	Rupture	Gaz et liquide	Feu de nappe jet enflammé flash fire VCE
24	Défaillance du 2e étage du compresseur KA-26-C02A ou du ballon daspiration associé	Perte de confinement dhydrocarbures liquides et gazeux	Rupture	Gaz et liquide	Feu de nappe flash fire jet fire VCE
25	Défaillance au niveau de la section slug Catcher	perte de confinement dune quantité importante dhydrocarbures gazeux ou liquide.	Grande	Liquide	Feu de Nappe
26	Défaillance au niveau de la section slug Catcher	Lperte de confinement dune quantité importante dhydrocarbures gazeux ou liquide.	Grande	Gaz	Feu de Nappe
27	Défaillance au niveau de la section slug Catcher	perte de confinement dune quantité importante dhydrocarbures gazeux ou liquide.	Rupture	Liquide	Feu Flash
28	Défaillance au niveau de la section slug Catcher	perte de confinement dune quantité importante dhydrocarbures gazeux ou liquide.	Rupture	Gaz	Feu Flash

Nř	Scénario	Évènement redouté	Taille de la fuite	Produit	Phénomène
29	Défaillance au niveau de la section slug Catcher	perte de confinement dune quantité importante dhydrocarbures gazeux ou liquide.	Grande	Liquide	Feu Flash
30	Défaillance au niveau de la section slug Catcher	perte de confinement dune quantité importante dhydrocarbures gazeux ou liquide.	Grande	Gaz	Feu Flash
31	Défaillance unité élimination H2S/HG	perte de confinement de gaz et de liquide.	Grande	Liquide	Jet Enflammé
32	Défaillance unité élimination H2S/HG	perte de confinement de gaz et de liquide.	Grande	Gaz	Jet Enflammé
33	Défaillance unité élimination H2S/HG	perte de confinement de gaz et de liquide.	Grande	Liquide	Feu de Nappe
34	Défaillance unité élimination H2S/HG	perte de confinement de gaz et de liquide.	Grande	Gaz	JFeu de Nappe
35	Défaillance unité élimination H2S/HG	perte de confinement de gaz et de liquide.	Grande	Liquide	Feu Flash
36	Défaillance unité élimination H2S/HG	D perte de confinement de gaz et de liquide.	Grande	Gaz	Feu Flash
37	Défaillance unité de refroidissement / déshydratation gaz	perte confinement gaz ou liquide.	Rupture	Liquide	Jet Enflammé

Nř	Scénario	Évènement redouté	Taille de la fuite	Produit	Phénomène
38	Défaillance unité de refroidissement / déshydratation gaz	perte confinement gaz ou liquide.	Rupture	Gaz	Jet Enflammé
39	Défaillance unité de refroidissement / déshydratation gaz	perte confinement gaz ou liquide.	Grande	Liquide	Jet Enflammé
40	Défaillance unité de refroidissement / déshydratation gaz	perte confinement gaz ou liquide.	Grande	Gaz	Jet Enflammé
41	Défaillance unité de refroidissement / déshydratation gaz	perte confinement gaz ou liquide.	Rupture	Liquide	Feu de Nappe
42	Défaillance unité de refroidissement / déshydratation gaz	perte confinement gaz ou liquide.	Rupture	Gaz	Feu de Nappe
43	Défaillance unité de refroidissement / déshydratation gaz	perte confinement gaz ou liquide.	Grande	Liquide	Feu de Nappe
44	Défaillance unité de refroidissement / déshydratation gaz	perte confinement gaz ou liquide.	Grande	Gaz	Feu de Nappe
45	Défaillance unité de refroidissement / déshydratation gaz	perte confinement gaz ou liquide.	Rupture	Liquide	Feu Flash

Nř	Scénario	Évènement redouté	Taille de la fuite	Produit	Phénomène
46	Défaillance unité de refroidissement / déshydratation gaz	perte confinement gaz ou liquide.	Rupture	Gaz	Feu Flash
47	Défaillance unité de refroidissement / déshydratation gaz	perte confinement gaz ou liquide.	Grande	Liquide	Feu Flash
48	Défaillance unité de refroidissement / déshydratation gaz	perte confinement gaz ou liquide.	Grande	Gaz	Feu Flash
49	Défaillance unité conditionnement gaz	perte de confinement de gaz ou liquide.	Rupture	Liquide	Jet Enflammé
50	Défaillance unité conditionnement gaz	perte de confinement de gaz ou liquide.	Rupture	Gaz	Jet Enflammé
51	Défaillance unité conditionnement gaz	perte de confinement de gaz ou liquide.	Grande	Liquide	Jet Enflammé
52	Défaillance unité conditionnement gaz	perte de confinement de gaz ou liquide.	Grande	Gaz	Jet Enflammé
53	Défaillance unité conditionnement gaz	perte de confinement de gaz ou liquide.	Rupture	Liquide	Feu de Nappe
54	Défaillance unité conditionnement gaz	perte de confinement de gaz ou liquide.	Rupture	Gaz	Feu de Nappe

Nř	Scénario	Évènement redouté	Taille de la fuite	Produit	Phénomène
55	Défaillance unité conditionnement gaz	perte de confinement de gaz ou liquide.	Grande	Liquide	Feu de Nappe
56	Défaillance unité conditionnement gaz	perte de confinement de gaz ou liquide.	Grande	Gaz	Feu de Nappe
57	Défaillance unité conditionnement gaz	perte de confinement de gaz ou liquide.	Rupture	Liquide	Feu Flash
58	Défaillance unité conditionnement gaz	perte de confinement de gaz ou liquide.	Rupture	Gaz	Feu Flash
59	Défaillance unité conditionnement gaz	perte de confinement de gaz ou liquide.	Grande	Liquide	Feu Flash
60	Défaillance unité conditionnement gaz	perte de confinement de gaz ou liquide.	Grande	Gaz	Feu Flash
61	Défaillance dun DE-ETHANISEUR	perte de confinement dhydrocarbures liquides (C5+) en fond et gazeux en tête.	Rupture	Liquide	Jet Enflammé
62	Défaillance dun DE-ETHANISEUR	perte de confinement dhydrocarbures liquides (C5+) en fond et gazeux en tête.	Rupture	Gaz	Jet Enflammé
63	Défaillance dun DE-ETHANISEUR	perte de confinement dhydrocarbures liquides (C5+) en fond et gazeux en tête.	Grande	Liquide	Jet Enflammé
64	Défaillance dun DE-ETHANISEUR	perte de confinement dhydrocarbures liquides (C5+) en fond et gazeux en tête.	Grande	Gaz	Jet Enflammé

Nř	Scénario	Évènement redouté	Taille de la fuite	Produit	Phénomène
65	Défaillance dun DE-ETHANISEUR	perte de confinement dhydrocarbures liquides (C5+) en fond et gazeux en tête.	Rupture	Liquide	Feu de-Nappe
66	Défaillance dun DE-ETHANISEUR	perte de confinement dhydrocarbures liquides (C5+) en fond et gazeux en tête.	Rupture	Gaz	Feu de-Nappe
67	Défaillance dun DE-ETHANISEUR	perte de confinement dhydrocarbures liquides (C5+) en fond et gazeux en tête.	Grande	Liquide	Feu de Nappe
68	Défaillance dun DE-ETHANISEUR	perte de confinement dhydrocarbures liquides (C5+) en fond et gazeux en tête.	Grande	Gaz	Feu de Nappe
69	Défaillance dun DE-ETHANISEUR	perte de confinement dhydrocarbures liquides (C5+) en fond et gazeux en tête.	Moyen	Liquide	Feu Flash
70	Défaillance de lunité de compression de gaz	perte de confinement dhydrocarbures gazeux.	Rupture	Gaz	Jet Enflammé
71	Défaillance de lunité de compression de gaz	perte de confinement dhydrocarbures gazeux.	Grande	Gaz	Jet Enflammé
72	Défaillance de lunité de compression de gaz	perte de confinement dhydrocarbures gazeux.	Rupture	Gaz	VCE
73	Défaillance de lunité de compression de gaz	perte de confinement dhydrocarbures gazeux.	Grande	Gaz	VCE

Nř	Scénario	Évènement redouté	Taille de la fuite	Produit	Phénomène
74	Défaillance de lunité de compression de gaz	perte de confinement dhydrocarbures gazeux.	Rupture	Gaz	Feu Flash
75	Défaillance de lunité de compression de gaz	perte de confinement dhydrocarbures gazeux.	Grande	Gaz	Feu Flash
76	Défaillance dune ligne de gaz de vente	perte de confinement dune quantité importante de gaz.	Rupture	Liquide	Jet Enflammé
77	Défaillance dune ligne de gaz de vente	perte de confinement dune quantité importante de gaz.	Rupture	Gaz	Jet Enflammé
78	Défaillance dune ligne de gaz de vente	perte de confinement dune quantité importante de gaz.	Grande	Liquide	Jet Enflammé
79	Défaillance dune ligne de gaz de vente	perte de confinement dune quantité importante de gaz.	Grande	Gaz	Jet Enflammé
80	Défaillance dune ligne de gaz de vente	perte de confinement dune quantité importante de gaz.	Grande	Liquide	VCE
81	Défaillance dune ligne de gaz de vente	perte de confinement dune quantité importante de gaz.	Grande	Gaz	VCE
82	Défaillance dune ligne de gaz de vente	perte de confinement dune quantité importante de gaz.	Rupture	Liquide	Feu Flash
83	Défaillance dune ligne de gaz de vente	perte de confinement dune quantité importante de gaz.	Rupture	Gaz	Feu Flash

Nř	Scénario	Évènement redouté	Taille de la fuite	Produit	Phénomène
84	Défaillance dune ligne de gaz de vente	perte de confinement dune quantité importante de gaz.	Grande	Liquide	Feu Flash
85	Défaillance dune ligne de gaz de vente	perte de confinement dune quantité importante de gaz.	Grande	Gaz	Feu Flash
86	Défaillance du collecteur de condensats	perte de confinement dhydrocarbures gazeux ou liquide.	Grande	Gaz	VCE
87	Défaillance du collecteur de condensats	perte de confinement dhydrocarbures gazeux ou liquide.	Rupture	Gaz	VCE
88	Défaillance du collecteur de condensats	perte de confinement dhydrocarbures gazeux ou liquide.	Grande	Gaz	Jet Enflammé
89	Défaillance du collecteur de condensats	perte de confinement dhydrocarbures gazeux ou liquide.	Rupture	Gaz	Jet Enflammé
90	Défaillance du collecteur de condensats	perte de confinement dhydrocarbures gazeux ou liquide.	Grande	Gaz	Feu de Nappe
91	Défaillance du collecteur de condensats	perte de confinement dhydrocarbures gazeux ou liquide.	Rupture	Gaz	Feu de Nappe
92	Défaillance du collecteur de condensats	perte de confinement dhydrocarbures gazeux ou liquide.	Moyenne	Gaz	Jet Enflammé
93	Défaillance de la colonne de stabilisation condensat	perte de confinement dhydrocarbures liquides (C5+) en fond et gazeux en tête.	Rupture	Gaz	Jet Enflammé

Nř	Scénario	Évènement redouté	Taille de la fuite	Produit	Phénomène
94	Défaillance de la colonne de stabilisation condensat	perte de confinement dhydrocarbures liquides (C5+) en fond et gazeux en tête.	Grande	Gaz	Jet Enflammé
95	Défaillance de la colonne de stabilisation condensat	perte de confinement dhydrocarbures liquides (C5+) en fond et gazeux en tête.	Rupture	Gaz	Feu de Nappe
96	Défaillance de la colonne de stabilisation condensat	perte de confinement dhydrocarbures liquides (C5+) en fond et gazeux en tête.	Grande	Gaz	Feu de Nappe
97	Défaillance de la colonne de stabilisation condensat	perte de confinement dhydrocarbures liquides (C5+) en fond et gazeux en tête.	Rupture	Gaz	Feu Flash
98	Défaillance dun débutaniseur	Perte de confinement dhydrocarbures liquides (C5+) en fond et gazeux en tête.	Rupture	Gaz	Feu de Jet
99	Défaillance dun débutaniseur	Perte de confinement dhydrocarbures liquides (C5+) en fond et gazeux en tête.	Grande	Gaz	Feu de Jet
100	Défaillance dun débutaniseur	Perte de confinement dhydrocarbures liquides (C5+) en fond et gazeux en tête.	Rupture	Gaz	Feu de Nappe
101	Défaillance dun débutaniseur	Perte de confinement dhydrocarbures liquides (C5+) en fond et gazeux en tête.	Grande	Gaz	Feu de Nappe
102	Défaillance dun débutaniseur	Perte de confinement dhydrocarbures liquides (C5+) en fond et gazeux en tête.	Rupture	Gaz	VCE

Nř	Scénario	Évènement redouté	Taille de la fuite	Produit	Phénomène
103	Défaillance dun débutaniseur	Perte de confinement dhydrocarbures liquides (C5+) en fond et gazeux en tête.	Grande	Gaz	VCE
104	Défaillance dun débutaniseur	Perte de confinement dhydrocarbures liquides (C5+) en fond et gazeux en tête.	Rupture	Gaz	Feu Flash
105	Défaillance dun débutaniseur	Perte de confinement dhydrocarbures liquides (C5+) en fond et gazeux en tête.	Grande	Gaz	Feu Flash
106	Défaillance sur un bac de stockage de condensat	Perte de confinement dune quantité importante de condensat et de vapeurs associées.	Rupture	Liquide	Feu de Jet
107	Défaillance sur un bac de stockage de condensat	Perte de confinement dune quantité importante de condensat et de vapeurs associées.	Grande	Liquide	Feu de Jet
108	Défaillance sur un bac de stockage de condensat	Perte de confinement dune quantité importante de condensat et de vapeurs associées.	Rupture	Liquide	Feu de Nappe
109	Défaillance sur un bac de stockage de condensat	Perte de confinement dune quantité importante de condensat et de vapeurs associées.	Grande	Liquide	Feu de Nappe
110	Défaillance sur un bac de stockage de condensat	Perte de confinement dune quantité importante de condensat et de vapeurs associées.	Rupture	Liquide	VCE
111	Défaillance sur un bac de stockage de condensat	Perte de confinement dune quantité importante de condensat et de vapeurs associées.	Grande	Liquide	VCE

Nř	Scénario	Évènement redouté	Taille de la fuite	Produit	Phénomène
112	Défaillance sur un bac de stockage de condensat	Perte de confinement dune quantité importante de condensat et de vapeurs associées.	Rupture	Liquide	VCE
113	Défaillance sur un bac de stockage huile	perte de confinement dune quantité importante dhuile et des vapeurs associées.	Rupture	Liquide	Feu de Jet
114	Défaillance sur un bac de stockage huile	perte de confinement dune quantité importante dhuile et des vapeurs associées.	Rupture	Liquide	Feu de Jet
115	Défaillance sur un bac de stockage huile	perte de confinement dune quantité importante dhuile et des vapeurs associées.	Rupture	Liquide	Feu de Nappe
116	Défaillance sur un bac de stockage huile	perte de confinement dune quantité importante dhuile et des vapeurs associées.	Rupture	Liquide	Feu de Nappe
117	Défaillance sur un bac de stockage huile	perte de confinement dune quantité importante dhuile et des vapeurs associées.	Rupture	Liquide	Feu de Cuvette
118	Défaillance sur un bac de stockage huile	perte de confinement dune quantité importante dhuile et des vapeurs associées.	Rupture	Liquide	Feu de Cuvette
119	Défaillance dune sphère de stockage de GPL	Rupture complète de la sphère. Mise à latmosphère quasi instantanée dun gaz liquéfié stocké au-dessus de sa température débullition.	Rupture	Gaz	Jet Enflammé
120	Défaillance dune sphère de stockage de GPL	Rupture complète de la sphère. Mise à latmosphère quasi instantanée dun gaz liquéfié stocké au-dessus de sa température débullition.	Grande	Liquide	Jet Enflammé

Nř	Scénario	Évènement redouté	Taille de la fuite	Produit	Phénomène
121	Défaillance dune sphère de stockage de GPL	Rupture complète de la sphère. Mise à latmosphère quasi instantanée dun gaz liquéfié stocké au-dessus de sa température débullition.	Rupture	Gaz	Jet Enflammé
122	Défaillance dune sphère de stockage de GPL	Rupture complète de la sphère. Mise à latmosphère quasi instantanée dun gaz liquéfié stocké au-dessus de sa température débullition.	Grande	Liquide	Feu de Nappe
123	Défaillance dune sphère de stockage de GPL	Rupture complète de la sphère. Mise à latmosphère quasi instantanée dun gaz liquéfié stocké au-dessus de sa température débullition.	Rupture	Gaz	Feu de Nappe
124	Défaillance dune sphère de stockage de GPL	Rupture complète de la sphère. Mise à latmosphère quasi instantanée dun gaz liquéfié stocké au-dessus de sa température débullition.	Grande	Liquide	VCE
125	Défaillance sur une ligne / réservoir de méthanol	perte de confinement dune quantité importante de méthanol.	Grande	Liquide	VCE
126	Défaillance sur une ligne / réservoir de méthanol	perte de confinement dune quantité importante de méthanol.	Grande	Liquide	Jet enflammé
127	Défaillance sur une ligne / réservoir de méthanol	perte de confinement dune quantité importante de méthanol.	Grande	Liquide	Feu de nappe

Nř	Scénario	Évènement redouté	Taille de la fuite	Produit	Phénomène
128	Défaillance sur une ligne / réservoir de méthanol	perte de confinement dune quantité importante de méthanol.	Grande	Liquide	Feu Flash
129	Défaillance au niveau de lunité Fuel Gaz	perte de confinement dune quantité importante de gaz.	Rupture	Gaz	Feu de Chalumeau
130	Défaillance au niveau de lunité Fuel Gaz	perte de confinement dune quantité importante de gaz.	Grande	Gaz	Feu de Chalumeau
131	Défaillance au niveau de lunité Fuel Gaz	perte de confinement dune quantité importante de gaz.	Rupture	Gaz	VCE
132	Défaillance au niveau de lunité Fuel Gaz	perte de confinement dune quantité importante de gaz.	Grande	Gaz	VCE
133	Défaillance au niveau de lunité Fuel Gaz	perte de confinement dune quantité importante de gaz.	Rupture	Gaz	Feu Flash
134	Défaillance au niveau de lunité Fuel Gaz	perte de confinement dune quantité importante de gaz.	Grande	Gaz	Feu Flash
135	Défaillance sur le manifold TAGI /F6	perte de confinement dune quantité importante dhuile brute ou de gaz.	Grande	Gaz	Feu de Jet
136	Défaillance sur le manifold TAGI /F6	perte de confinement dune quantité importante dhuile brute ou de gaz.	Grande	Gaz	VCE
137	Défaillance au niveau de la section slug catchers	perte de confinement dune quantité importante dhydrocarbures gazeux ou liquide.	Grande	Gaz	VCE

Nř	Scénario	Évènement redouté	Taille de la fuite	Produit	Phénomène
138	Défaillance au niveau de la section slug catchers	perte de confinement dune quantité importante dhydrocarbures gazeux ou liquide.	Grande	Gaz	Feu de Jet
139	Défaillance au niveau de la section slug catchers	perte de confinement dune quantité importante dhydrocarbures gazeux ou liquide.	Grande	Gaz	Feu Flash
140	Défaillance du séparateur dentrée et dessalage brut	perte de confinement dhydrocarbures gazeux ou liquide.	Grande	Liquide	VCE
141	Défaillance du séparateur dentrée et dessalage brut	perte de confinement dhydrocarbures gazeux ou liquide.	Grande	Gaz	VCE
142	Défaillance du séparateur dentrée et dessalage brut	perte de confinement dhydrocarbures gazeux ou liquide.	Grande	Liquide	VCE
143	Défaillance du séparateur dentrée et dessalage brut	perte de confinement dhydrocarbures gazeux ou liquide.	Grande	Gaz	VCE
144	Défaillance du séparateur dentrée et dessalage brut	perte de confinement dhydrocarbures gazeux ou liquide.	Grande	Liquide	Feu de Jet
145	Défaillance du séparateur dentrée et dessalage brut	perte de confinement dhydrocarbures gazeux ou liquide.	Grande	Gaz	Feu de Jet

Nř	Scénario	Évènement redouté	Taille de la fuite	Produit	Phénomène
146	Défaillance du séparateur dentrée et dessalage brut	perte de confinement dhydrocarbures gazeux ou liquide.	Grande	Liquide	Feu de Jet
147	Défaillance du séparateur dentrée et dessalage brut	perte de confinement dhydrocarbures gazeux ou liquide.	Grande	Gaz	Feu de Jet
148	Défaillance du séparateur dentrée et dessalage brut	perte de confinement dhydrocarbures gazeux ou liquide.	Grande	Liquide	Feu de Nappe
149	Défaillance du séparateur dentrée et dessalage brut	perte de confinement dhydrocarbures gazeux ou liquide.	Grande	Gaz	Feu de Nappe
150	Défaillance du séparateur dentrée et dessalage brut	perte de confinement dhydrocarbures gazeux ou liquide.	Grande	Liquide	Feu de Nappe
151	Défaillance du séparateur dentrée et dessalage brut	perte de confinement dhydrocarbures gazeux ou liquide.	Grande	Gaz	VCE Feu de Nappe
152	Défaillance du séparateur dentrée et dessalage brut	perte de confinement dhydrocarbures gazeux ou liquide.	Grande	Liquide	Feu de Jet
153	Défaillance du séparateur dentrée et dessalage brut	perte de confinement dhydrocarbures gazeux ou liquide.	Grande	Gaz	Feu de Jet

Nř	Scénario	Évènement redouté	Taille de la fuite	Produit	Phénomène
154	Défaillance du séparateur dentrée et dessalage brut	perte de confinement dhydrocarbures gazeux ou liquide.	Grande	Liquide	Feu de Jet
155	Défaillance du séparateur dentrée et dessalage brut	perte de confinement dhydrocarbures gazeux ou liquide.	Grande	Gaz	Feu de Jet
156	Défaillance de la section de stabilisation du brut	perte de confinement dhydrocarbures gazeux ou liquide.	Rupture	Gaz	Feu de Jet
157	Défaillance de la section de stabilisation du brut	perte de confinement dhydrocarbures gazeux ou liquide.	Grande	Liquide	Feu de Jet
158	Défaillance de la section de stabilisation du brut	perte de confinement dhydrocarbures gazeux ou liquide.	Rupture	Gaz	VCE
159	Défaillance de la section de stabilisation du brut	perte de confinement dhydrocarbures gazeux ou liquide.	Grande	Gaz	VCE
160	Défaillance sur linstallation de stockage hors spécification	perte de confinement dune quantité importante dhuile et vapeurs associées.	Grande	Liquide	Feu de Jet
161	Défaillance sur linstallation de stockage hors spécification	perte de confinement dune quantité importante dhuile et vapeurs associées.	Grande	Gaz	Feu de nappe
162	Défaillance sur linstallation de stockage hors spécification	perte de confinement dune quantité importante dhuile et vapeurs associées.	Grande	Liquide	VCE

Nř	Scénario	Évènement redouté	Taille de la fuite	Produit	Phénomène
163	Défaillance sur linstallation de stockage hors spécification	perte de confinement dune quantité importante dhuile et vapeurs associées.	Grande	Gaz	Feu Flash
164	Défaillance de lunité de compression	perte de confinement dhydrocarbures gazeux ou liquide.	Grande	Gaz	Jet Enflammé
165	Défaillance de lunité de compression	perte de confinement dhydrocarbures gazeux ou liquide.	Grande	Liquide	Jet Enflammé
166	Défaillance de lunité de compression	perte de confinement dhydrocarbures gazeux ou liquide.	Grande	Gaz	Feu de nappe
167	Défaillance de lunité de compression	perte de confinement dhydrocarbures gazeux ou liquide.	Grande	Liquide	Feu de nappe
168	Défaillance de lunité de compression	perte de confinement dhydrocarbures gazeux ou liquide.	Grande	Liquide	VCE
169	Défaillance de lunité de compression	perte de confinement dhydrocarbures gazeux ou liquide.	Grande	Gaz	VCE
170	Défaillance de lunité de compression	perte de confinement dhydrocarbures gazeux ou liquide.	Grande	Gaz	Feu Flash
171	Défaillance de lunité de compression	perte de confinement dhydrocarbures gazeux ou liquide.	Grande	Gaz	Feu Flash
172	Défaillance de lunité de compression	perte de confinement de gaz.	Rupture	Gaz	Jet Enflammé

Nř	Scénario	Évènement redouté	Taille de la fuite	Produit	Phénomène
173	Défaillance de lunité de compression	perte de confinement de gaz.	Rupture	Gaz	Jet Enflammé
174	Défaillance de lunité de compression	perte de confinement de gaz.	Rupture	Gaz	Feu de Nappe
175	Défaillance de lunité de compression	perte de confinement de gaz.	Rupture	Gaz	Feu de Nappe
176	Défaillance de lunité de compression	perte de confinement de gaz.	Rupture	Gaz	VCE
177	Défaillance au niveau du manifold dinjection gaz	perte de confinement dune quantité importante de gaz.	Grande	Gaz	VCE
178	Défaillance au niveau du manifold dinjection gaz	perte de confinement dune quantité importante de gaz.	Grande	Gaz	Feu de Jet
179	Défaillance au niveau du manifold dinjection gaz	perte de confinement dune quantité importante de gaz.	Grande	Gaz	Feu Flash

Annexe 2 : Check-list dévaluation des scénarios daccidents retenus par l'EDD

Nř scénario	Diversité des phénomènes dangereux	Familles de défaillances dominantes	Clarté des informations EDD
1	X	X	
2	X		
3	X		X
4	X		X
5	X		X
6	X		
7	X		
8	X	X	X
9	X	X	
10	X	X	
11	X		
12	X		
13	X		
14	X		
15	X		
16	X	X	
17	X		
18	X		
19	X		
20	X		
21	X	X	
22	X		
23	X	X	X

Nř scénario	Diversité des phénomènes dangereux	Familles de défaillances dominantes	Clarté des informations disponibles dans lEDD, le PPI et le PII
24	X	X	X
25	X		
26	X		
27	X		
28	X		
29	X		
30	X		
31	X		
32	X	X	
33	X	X	
34	X	X	
35	X	X	
36	X	X	
37	X	X	
38	X		
39	X		
40	X		
41	X		
42	X		
43	X		
44	X		
45	X		
46	X		
47	X		

Nř scénario	Diversité des phénomènes dangereux	Familles de défaillances dominantes	Clarté des informations disponibles dans lEDD, le PPI et le PII
48	X	X	
49	X	X	
50	X	X	
51	X	X	
52	X		
53	X		
54	X		
55	X		
56	X		
57	X	X	
58	X		
59	X		
60	X		
61	X		
62	X		
63	X		
64	X	X	
65	X		
66	X		
67	X		X
68	X		X
69	X		X
70	X		
71	X	X	

Nř scénario	**Diversité des phénomènes dangereux**	**Familles de défaillances dominantes**	**Clarté des informations disponibles dans lEDD, le PPI et le PII**
72	X		
73	X		
74	X		
75	X		
76	X		
77	X		
78	X		
79	X		
80	X		
81	X		
82	X		
83	X		
84	X		
85	X		
86	X		
87	X		
88	X		
89	X		
90	X		
91	X		
92	X		
93	X		
94	X		
95	X		

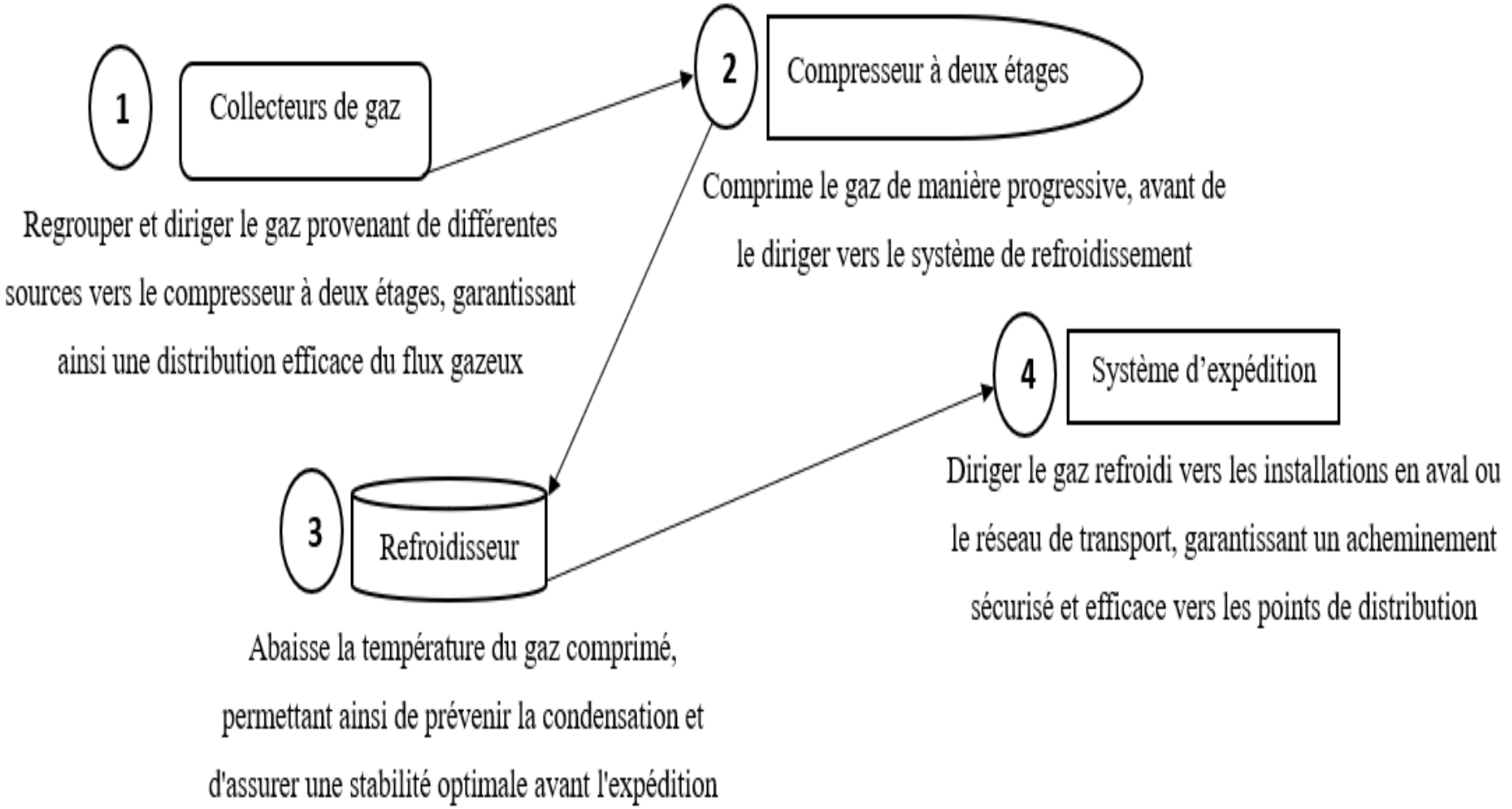
Nř scénario	Diversité des phénomènes dangereux	Familles de défaillances dominantes	Clarté des informations disponibles dans lEDD, le PPI et le PII
96	X		
97	X		
98	X		
99	X		
100	X	X	
101	X	X	
102	X	X	
103	X	X	
104	X	X	
105	X	X	
106	X	X	
107	X	X	
108	X	X	
109	X		
110	X		
111	X		
112	X		
113	X		
114	X		
115	X		
116	X		
117	X		
118	X		
119	X		

Nř scénario	Diversité des phénomènes dangereux	Familles de défaillances dominantes	Clarté des informations disponibles dans lEDD, le PPI et le PII
120	X		X
121	X		X
122	X		X
123	X		X
124	X		X
125	X		X
126	X		X
127	X		X
128	X		X
129	X		X
130	X		X
131	X		
132	X		
133	X		
134	X		
135	X		
136	X		
137	X		
138	X		
139	X		
140	X		
141	X		
142	X		
143	X		

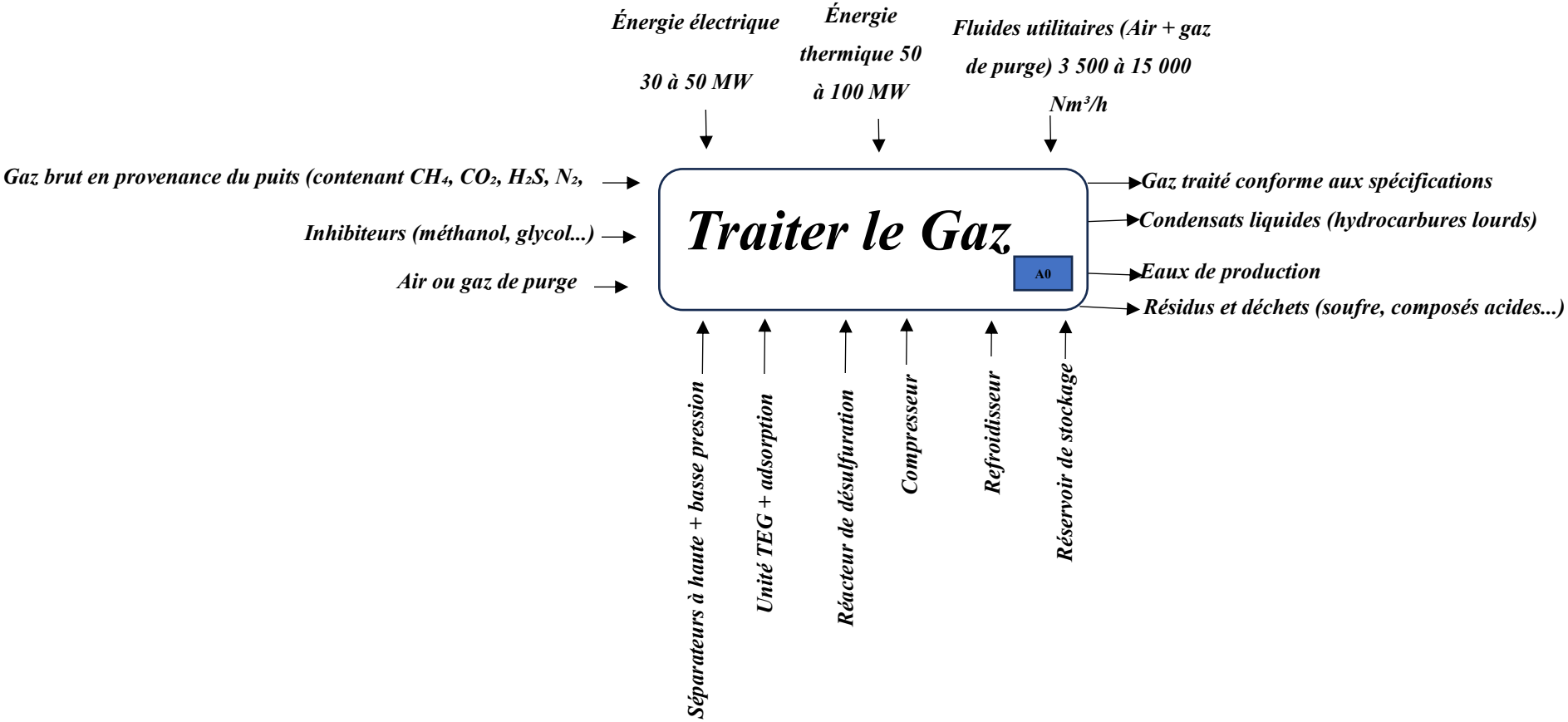
Nř scénario	**Diversité des phénomènes dangereux**	**Familles de défaillances dominantes**	**Clarté des informations disponibles dans lEDD, le PPI et le PII**
144	X		
145	X		
146	X		
147	X		
148	X	X	
149	X		
150	X		
151	X		
152	X		
153	X		
154	X		
155	X		
156	X		
157	X		
158	X		
159	X		
160	X	X	
161	X		
162	X		X
163	X		X
164	X		X
165	X		X
166	X		X
167	X		X

Nř scénario	**Diversité des phénomènes dangereux**	**Familles de défaillances dominantes**	**Clarté des informations disponibles dans lEDD, le PPI et le PII**
168	X		X
169	X		
170	X	X	
171	X		
172	X		
173	X		
174	X		
175	X		
176	X		
177	X		
178	X		
179	X		

Annexe 3 : Fonctionnement de l'UC

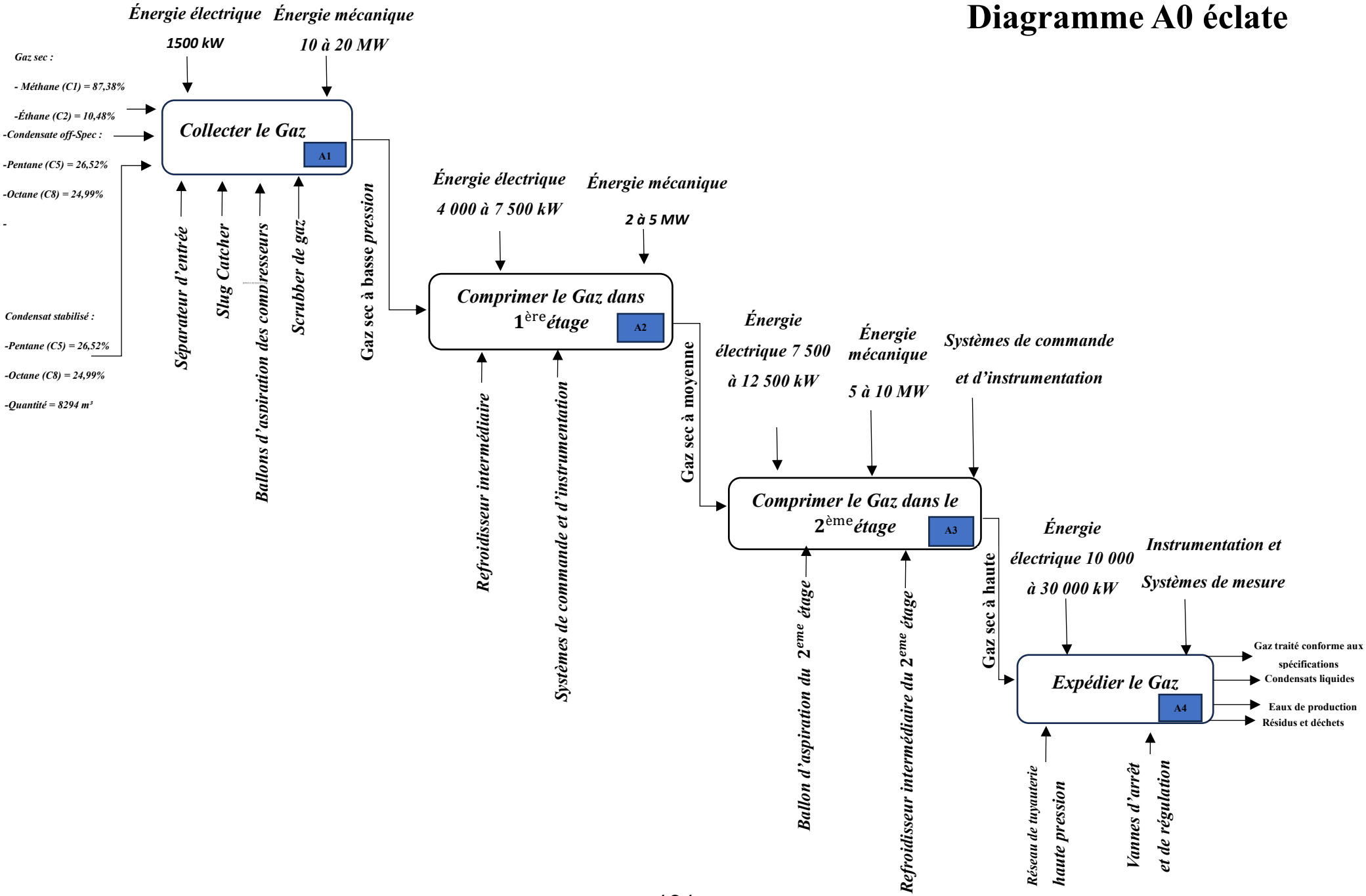

1
Collecteurs de gaz
Regrouper et diriger le gaz provenant de différentes sources vers le compresseur à deux étages, garantissant ainsi une distribution efficace du flux gazeux
2
Compresseur à deux étages
Comprime le gaz de manière progressive, avant de le diriger vers le système de refroidissement
3
Refroidisseur
Abaisse la température du gaz comprimé, permettant ainsi de prévenir la condensation et d'assurer une stabilité optimale avant l'expédition
4
Système d'expédition
Diriger le gaz refroidi vers les installations en aval ou le réseau de transport, garantissant un acheminement sécurisé et efficace vers les points de distribution

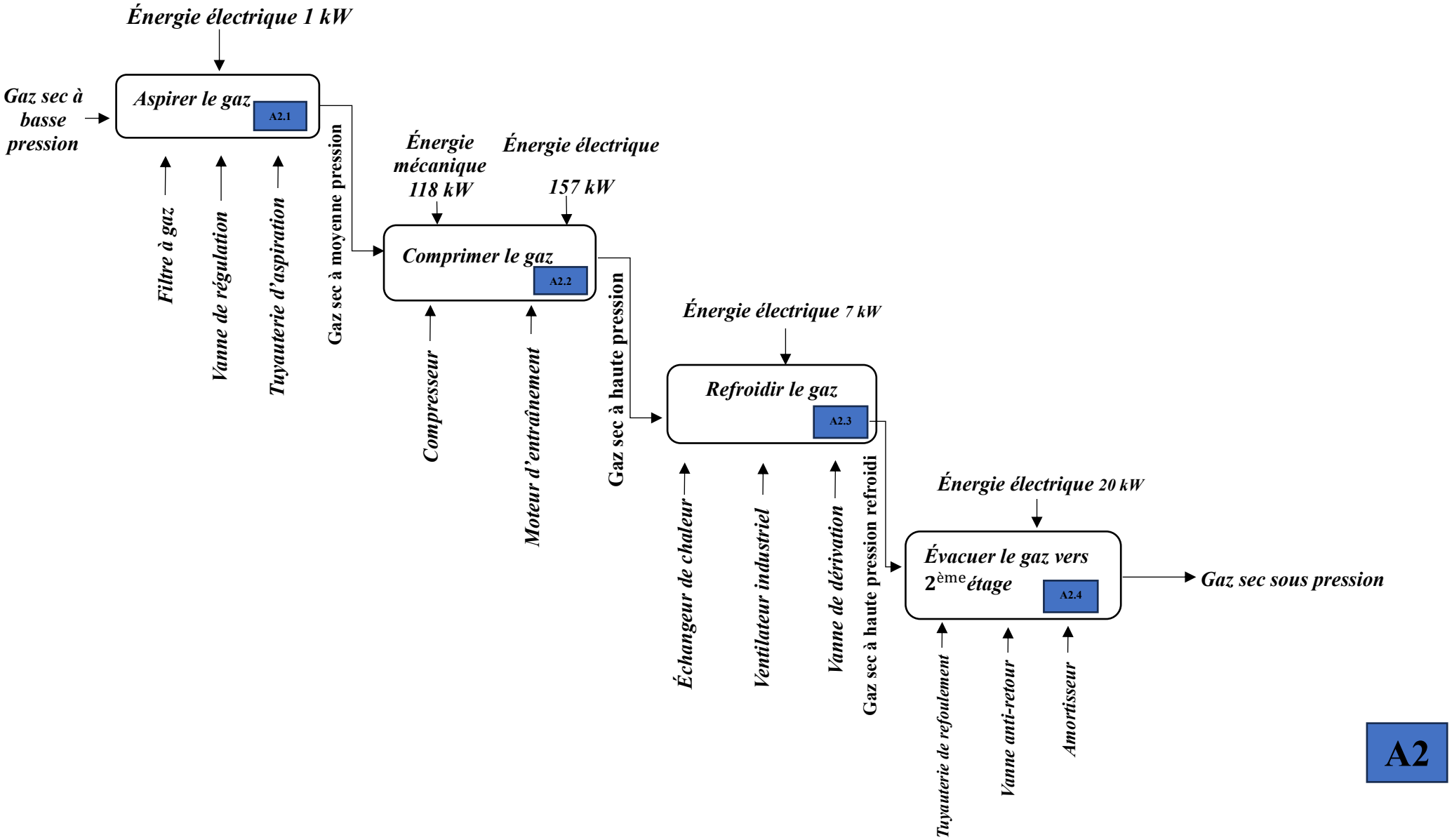
Annexe 4 : Décomposition fonctionnelle par la *SADT* (A0, A0 éclaté, A2, A3)

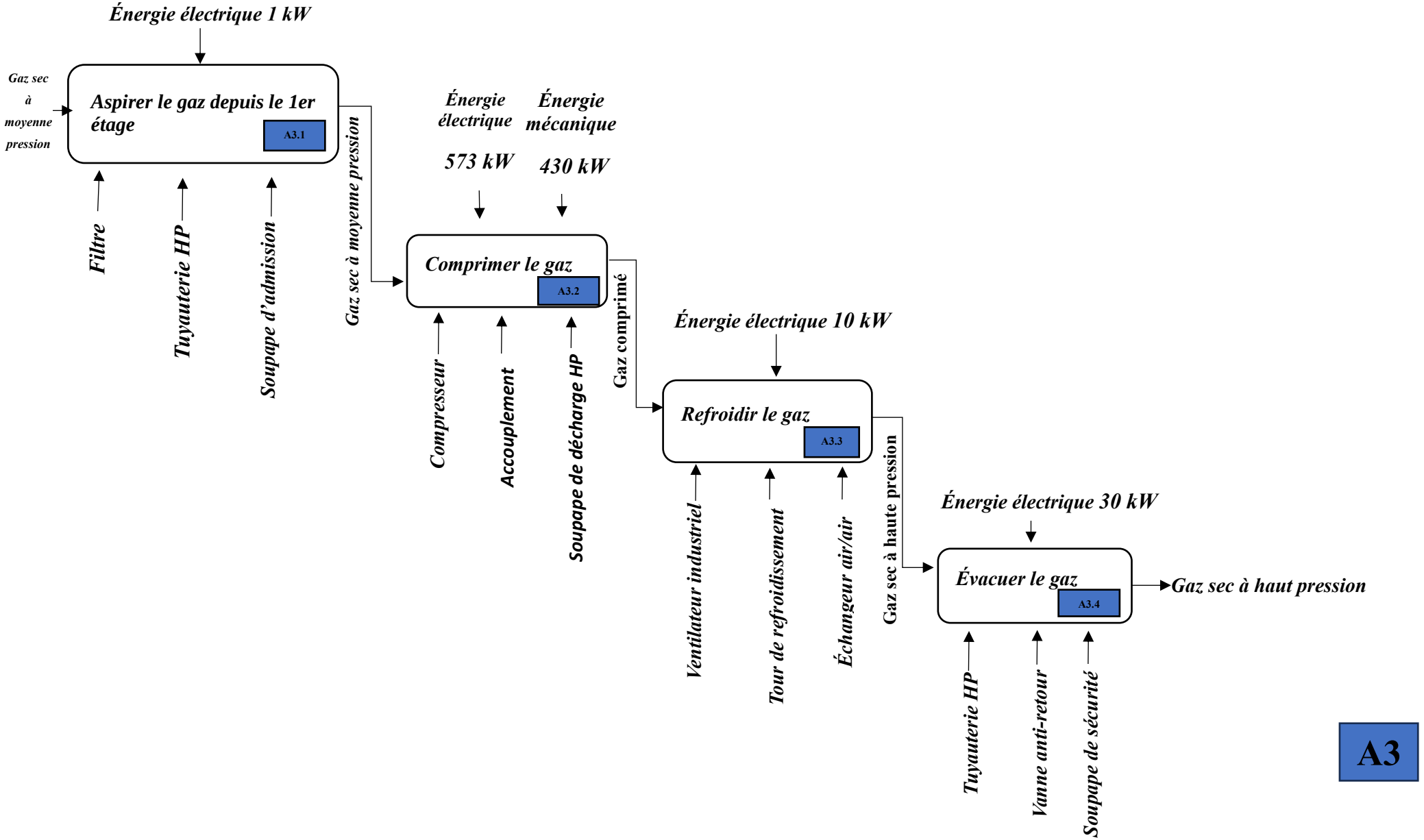

Énergie électrique
30 à 50 MW
Énergie thermique 50 à 100 MW
Fluides utilitaires (Air + gaz de purge) 3 500 à 15 000 Nm³/h
Gaz brut en provenance du puits (contenant CH₄, CO₂, H₂S, N₂,
Inhibiteurs (méthanol, glycol...)
Air ou gaz de purge
Traiter le Gaz
A0
Gaz traité conforme aux spécifications
Condensats liquides (hydrocarbures lourds)
Eaux de production
Résidus et déchets (soufre, composés acides...)
Séparateurs à haute + basse pression
Unité TEG + adsorption
Réacteur de désulfuration
Compresseur
Refroidisseur
Réservoir de stockage

A0

Diagramme A0 éclate




Énergie électrique 1 kW
Gaz sec à basse pression
Aspirer le gaz
A2.1
Filtre à gaz
Vanne de régulation
Tuyauterie d'aspiration
Gaz sec à moyenne pression
Énergie mécanique 118 kW
Énergie électrique 157 kW
Comprimer le gaz
A2.2
Compresseur
Moteur d'entraînement
Gaz sec à haute pression
Énergie électrique 7 kW
Refroidir le gaz
A2.3
Échangeur de chaleur
Ventilateur industriel
Vanne de dérivation
Gaz sec à haute pression refroidi
Énergie électrique 20 kW
Évacuer le gaz vers 2ème étage
A2.4
Gaz sec sous pression
Tuyauterie de refoulement
Vanne anti-retour
Amortisseur
A2


Énergie électrique 1 kW
Gaz sec à moyenne pression
Aspirer le gaz depuis le 1er étage
A3.1
Filtre
Tuyauterie HP
Soupape d'admission
Gaz sec à moyenne pression
Énergie électrique
573 kW
Énergie mécanique
430 kW
Comprimer le gaz
A3.2
Compresseur
Accouplement
Soupape de décharge HP
Gaz comprimé
Énergie électrique 10 kW
Refroidir le gaz
A3.3
Ventilateur industriel
Tour de refroidissement
Échangeur air/air
Gaz sec à haute pression
Énergie électrique 30 kW
Évacuer le gaz
A3.4
Gaz sec à haut pression
Tuyauterie HP
Vanne anti-retour
Soupape de sécurité
A3

Annexe 5 : Identification des barrières de protection et dintervention

Nř	Barrière de Protection et dinterven-tion	Fonction	Limites Iden-tifiées	Améliorations pos-sibles avec les cap-teurs IoT
01	Système darrêt dur-gence	Coupe auto-matiquement lalimentation en gaz ou en fluide dange-reux. Protège les installations en isolant les équipements défaillants.	Ne détecte pas les fuites progressives. Activation réac-tive, dépend de signaux reçus tardivement.	Détection en temps réel des variations de pression/gaz. Activa-tion proactive avec alerte intelligente.
02	Rideaux deau	Protège contre la chaleur et limite la pro-pagation des flammes.	Inefficace contre les explosions (VCE). Acti-vation souvent manuelle ou tardive.	Détection précoce des fuites. Activation au-tomatique ajustée au vent par capteurs mé-téo.
03	Système de dépressu-risation	Réduit la pres-sion et évacue les gaz vers une tor-chère.	Ne détecte pas les hausses de pression pré-coces. Risque de déclenche-ment tardif ou inadapté.	Détection continue. Activation automa-tique optimisée par analyse prédictive.
04	Vannes coupe-feu	Isole les sections à risque en cas dincendie.	Se ferme après détection de feu. Risque de panne mécanique.	Fermeture anticipée à la détection danoma-lie.

Nř	Barrière de Protection et dintervention	Fonction	Limites Identifiées	Améliorations possibles avec les capteurs IoT
05	Systèmes dalarme et dalerte	Informe le personnel en cas de danger.	Réaction lente en cas de détection tardive. Risque de fausses alertes.	Détection précise et instantanée. Alertes ciblées.
06	Ventilation durgence	Évacue les gaz toxiques/explosifs.	Activation tardive. Mauvaise distribution dair possible.	Activation dynamique ajustée selon la localisation et concentration de gaz.
07	Torchère	Brûle les gaz excédentaires.	Inefficace sur la fuite initiale. Risque de mauvaise combustion.	Contrôle automatisé assurant une combustion efficace.
08	Détecteurs de gaz	Identifie la présence de gaz inflammables/-toxiques.	Nécessite un étalonnage fréquent.	Auto-étalonnage et analyse continue pour fiabilité accrue.
09	Extincteurs automatiques	Éteignent les incendies automatiquement.	Risque de mauvaise zone ciblée. Activation locale parfois inefficace.	Ciblage précis. Activation intelligente selon détection en temps réel.
10	Système dinertage	Remplace loxygène par un gaz inerte.	Dosage parfois mal calibré. Activation manuelle ou peu adaptable.	Ajustement automatique du niveau dinertage selon les conditions.
11	Capteurs de température	Détectent les hausses anormales de température.	Temps de réaction long. Localisation peu précise.	Surveillance continue avec localisation exacte du point chaud.

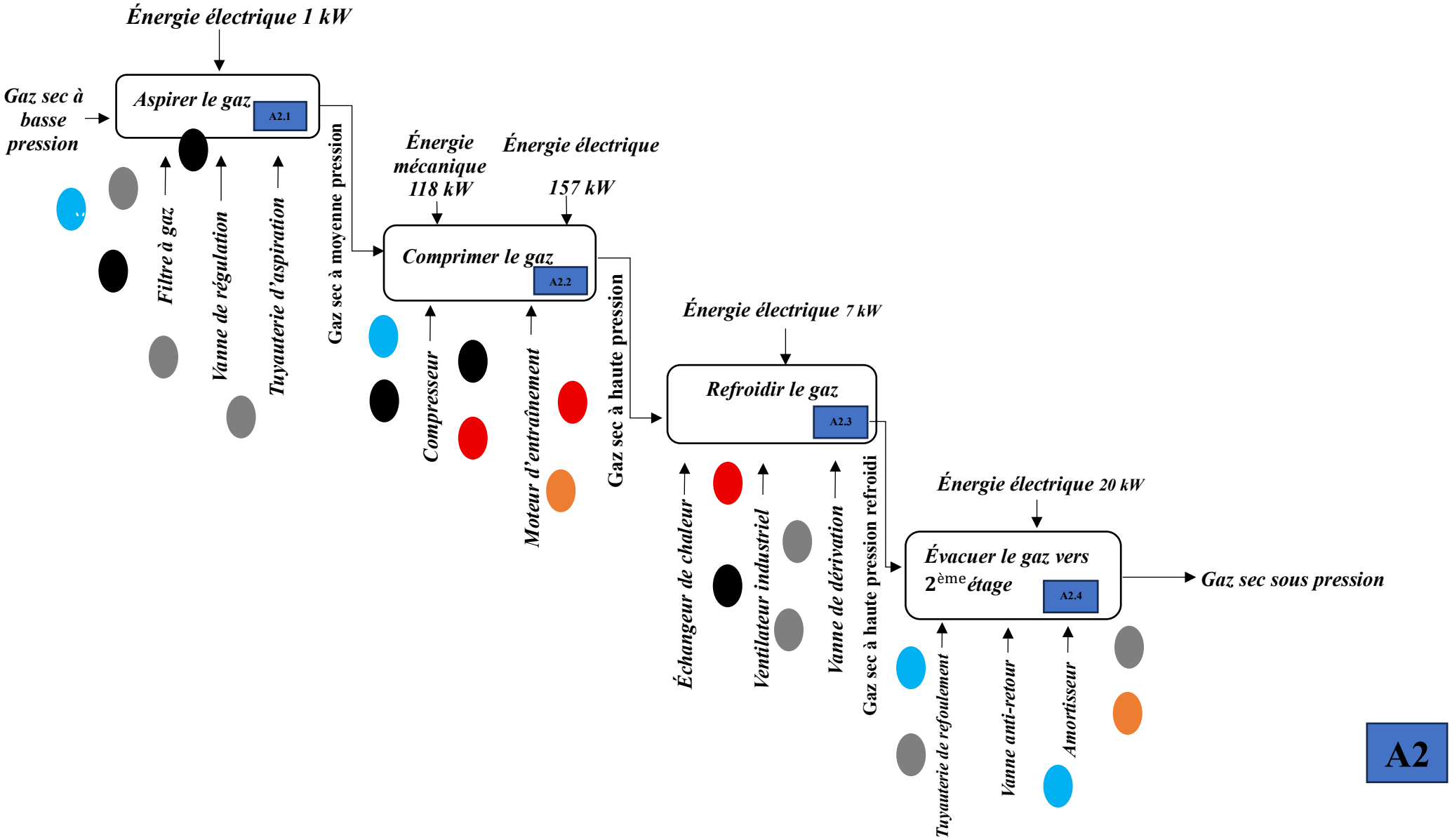
Nř	Barrière de Protection et dintervention	Fonction	Limites Identifiées	Améliorations possibles avec les capteurs IoT
12	Système de confinement	Limite la propagation dun feu/explosion/-fuite.	Ne stoppe pas la fuite initiale. Efficacité dépend du dimensionnement.	Activation précoce et adaptation automatique aux anomalies.

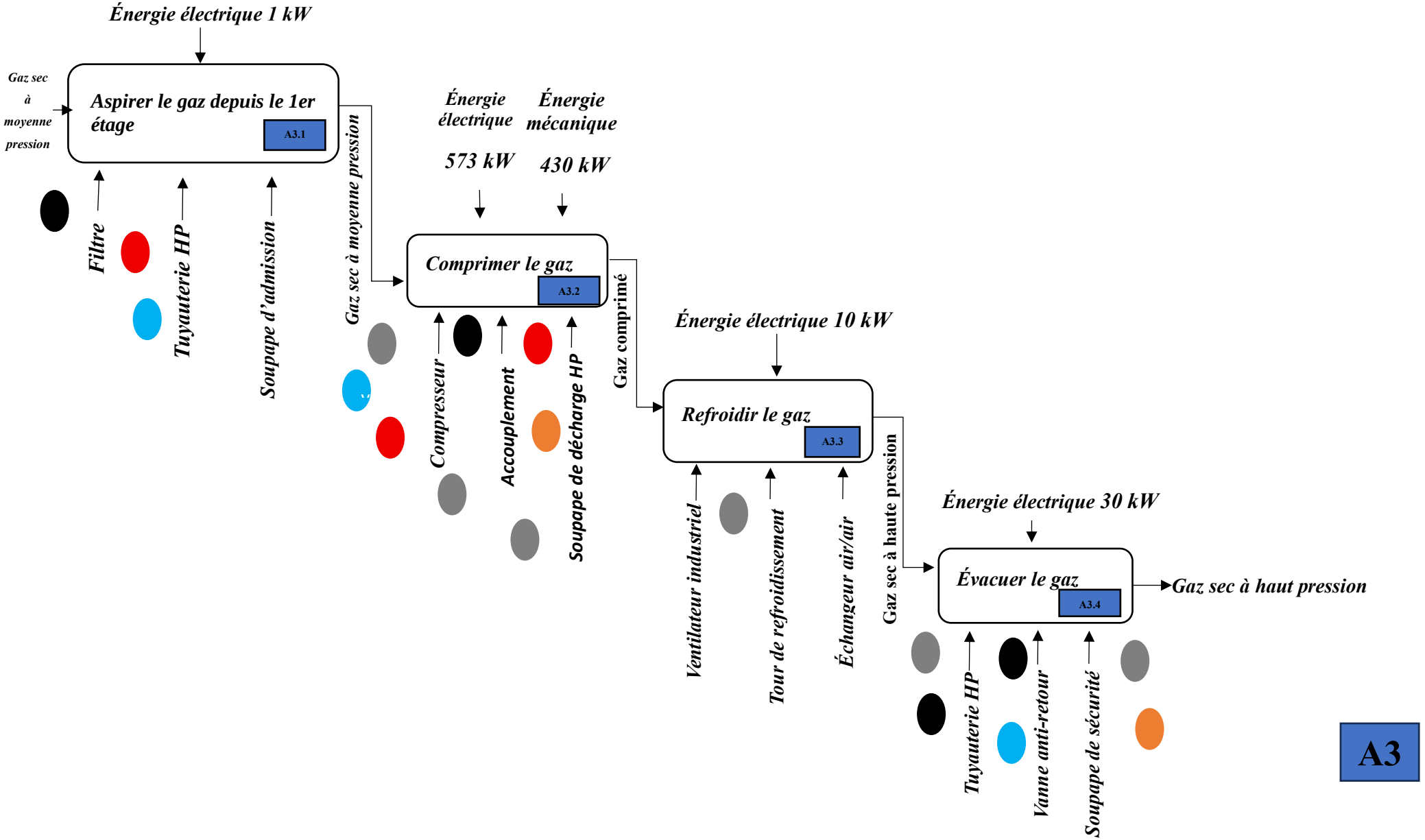
Annexe 6 : Emplacement des capteurs IoT dans les diagrammes A2 et A3

Le tableau ci-dessous présente la légende des couleurs utilisées pour les différents capteurs IoT dans les schémas A2 et A3.

Tableau - Annexe 6.1 : Légende des couleurs utilisées pour les capteurs IoT

Couleur	**Type de capteur IoT**
Rouge	Température
Noir	Pression
Bleu	Vibration
Orange	Flamme
Gris	Gaz inflammable


Énergie électrique 1 kW
Gaz sec à basse pression
Aspirer le gaz
A2.1
Filtre à gaz
Vanne de régulation
Tuyauterie d'aspiration
Gaz sec à moyenne pression
Énergie mécanique 118 kW
Énergie électrique 157 kW
Comprimer le gaz
A2.2
Compresseur
Moteur d'entraînement
Gaz sec à haute pression
Énergie électrique 7 kW
Refroidir le gaz
A2.3
Échangeur de chaleur
Ventilateur industriel
Vanne de dérivation
Gaz sec à haute pression refroidi
Énergie électrique 20 kW
Évacuer le gaz vers 2ème étage
A2.4
Gaz sec sous pression
Tuyauterie de refoulement
Vanne anti-retour
Amortisseur
A2


Énergie électrique 1 kW
Gaz sec à moyenne pression
Aspirer le gaz depuis le 1er étage
A3.1
Filtre
Tuyauterie HP
Soupape d'admission
Gaz sec à moyenne pression
Énergie électrique
573 kW
Énergie mécanique
430 kW
Comprimer le gaz
A3.2
Compresseur
Accouplement
Soupape de décharge HP
Gaz comprimé
Énergie électrique 10 kW
Refroidir le gaz
A3.3
Ventilateur industriel
Tour de refroidissement
Échangeur air/air
Gaz sec à haute pression
Énergie électrique 30 kW
Évacuer le gaz
A3.4
Gaz sec à haut pression
Tuyauterie HP
Vanne anti-retour
Soupape de sécurité
A3

Annexe 7 : Fiches techniques

Technical Data

Dräger Polytron 8700 IR

Type	Explosion proof / flameproof enclosed transmitter (“d”) or combined with increased safety (“d/e”)		
Gases	Flammable gases and vapours		
Measuring ranges	Methane, propane, ethylene	0 to 20 ... 100 % LEL	
	Methane	0 to 100 % vol.	
	Other substances and measuring ranges on request		
Display	Backlit graphic LCD; 3 Status LEDs (green/yellow/red)		
Performance Characteristics	Accuracy/repeatability	Sensitivity	≤ ± 1 % LEL
		Long term drift	≤ ± 1 % LEL after 12 month
	Response time	T90	4 seconds (w/o splash guard)
Electrical data	Signal output analogue	Normal operation	4 to 20 mA, 3- or 4-wire, sink or source
		Maintenance	Constant 3.4 mA or 4 mA ±1 mA 1 Hz modulation; (adjustable)
		Fault	< 1.2 mA
	Signal output digital	HART® w/ 3- or 4-wire, PROFIBUS® PA, FOUNDATION fieldbus™ H1 and Modbus RTU w/ 4-wire	
	Power supply	10 to 30 V DC	
	Relay specification (option)	2 alarm relays and 1 fault relay, single-pole two-way contact 5 A @ 230 VAC, 5 A @ 30 VDC, resistance-bound	
Environmental conditions (see sensor data sheet)	Temperature	-40 to 65 °C (-40 to 149 °F) without relay	
		-40 to 65 °C (-40 to 149 °F) with relay	
	Pressure	20.7 to 38.4 inch Hg / 700 to 1,300 mbar	
	Humidity	0 to 100 % r. h., non-condensing	
Housing	Transmitter housing	Epoxy coated copper-free aluminium or stainless steel SS316 L	
	Sensor housing	Stainless steel SS316 L	
	Enclosure protection type	NEMA 4X & 7, IP65/66/67	
	Cable entry point	3/4" NPT threaded holes or M20 cable gland	
	Dimensions (H x W x D), approx.	w/o docking station	11.0" x 5.9" x 5.1" / 280 x 150 x 130 mm
		w/ docking station	11.0" x 7.1" x 7.5" / 280 x 180 x 190 mm
	Weight, approx.	w/o docking station Aluminium	4.9 lbs / 2.2 kg
		w/o docking station SS316 L	8.8 lbs / 4.0 kg
		w/ docking station Aluminium	7.7 lbs / 3.5 kg
		w/ docking station SS316 L	11.9 lbs / 5.4 kg

Technical Data

Approvals*	UL	Class I, Div 1, Groups A, B, C, D;	
		Class II, Div 1, Groups E, F, G;	
		Class I, Zone 1, Group IIC;	
		T-Code T6/T4	
	CSA	Class I, Div 1, Groups A, B, C, D;	
		Class II, Div 1, Groups E, F, G;	
		Class I, Zone 1, Group IIC;	
		T-Code T6/T4	
	IECEx	4-20-mA HART®	Ex db IIC T6/T4 Gb, -40 ≤ Ta ≤ +40/+80 °C; 'd' version
			Ex db eb IIC T6/T4 Gb, -40 ≤ Ta ≤ +40/+80 °C; 'e' version; Ex tb IIIC T80/130 °C Db
		PROFIBUS® & FF	Ex db ia IIC T6/T4 Gb, -40 ≤ Ta ≤ +40/+80 °C; 'd' version
			Ex db eb ia IIC T6/T4 Gb, -40 ≤ Ta ≤ +40/+80 °C; 'e' version; Ex tb IIIC T80/130 °C Db
	ATEX	4-20-mA HART®	II 2G Ex db IIC T6/T4 Gb, -40 ≤ Ta ≤ +40/+70 °C; 'd' version
			II 2G Ex db eb IIC T6/T4 Gb, -40 ≤ Ta ≤ +40/+70 °C; 'e' version; II 2D Ex tb IIIC T135 °C Db
		PROFIBUS® & FF	II 2G Ex db ia IIC T6/T4 Gb, -40 ≤ Ta ≤ +40/+70 °C; 'd' version
			II 2G Ex db eb ia IIC T6/T4 Gb, -40 ≤ Ta ≤ +40/+70 °C; 'e' version; II 2D Ex tb IIIC T135 °C Db
	CE markings	ATEX (Directive 2014/34/EU)	
		Electromagnetic Compatibility (Directive 2014/30/EU)	
		Low Voltage (Directive 2014/35/EU)	
	Shipping approvals (for DQ sensor only)	DNV GL, ABS, LR, CCS, RMRS	
	MED approval (for DQ sensor only)	Certificate No. MEDB0000411	
	Performance approval (for DQ sensor only)	Certificate No. BVS 13 ATEX G 001 X	
	SIL 2 certified by TUEV Sued	Certificate No. Z10 17 05 53474 023	

* All docking station versions are only ATEX/IECEx approved

Ordering Information

Dräger Polytron 8700 IR (incl. splash guard and status indicator)	**Approval Code**	**Order Number**
Dräger Polytron 8700 IR 334 d A 4-20/HART®	ITR 0410	83 44 601
Dräger Polytron 8700 IR 334 d A 4-20/HART® relay	ITR 0411	83 44 602
Dräger Polytron 8700 IR 334 d S 4-20/HART®	ITR 0510	83 44 610
Dräger Polytron 8700 IR 334 d S 4-20/HART® relay	ITR 0511	83 44 611
Dräger Polytron 8700 IR 334 e A 4-20/HART® (incl. Docking Station)	ITR 041I	83 44 619
Dräger Polytron 8700 IR 334 e A 4-20/HART® relay (incl. Docking Station)	ITR 041J	83 44 620
Dräger Polytron 8700 IR 334 e S 4-20/HART® (incl. Docking Station)	ITR 051I	83 44 628
Dräger Polytron 8700 IR 340 d A 4-20/HART®	ITR 0420	83 44 637
Dräger Polytron 8700 IR 340 d A 4-20/HART® relay	ITR 0421	83 44 638
Dräger Polytron 8700 IR 340 e A 4-20/HART® (incl. Docking Station)	ITR 042I	83 44 655
Dräger Polytron 8700 IR 340 e A 4-20/HART® relay (incl. Docking Station)	ITR 042J	83 44 656

Accessories	**Order Number**
Magnetic wand	45 44 101
Pipe mount bracket	45 44 198
Duct mount kit	68 12 300
Duct mount kit Flow Cell for PIR 7x00	68 11 945
Duct mount kit Bump Test Adapter for PIR 7x00	68 11 990
Status indicator for PIR 7000	68 11 625
Splash guard for PIR 7000	68 11 911
Flow Cell for PIR 7000	83 23 405
Bump Test Adapter for PIR 7000	68 11 630
Insect guard for PIR 7x00	68 11 609
Hydrophobic filter for PIR 7x00	68 11 890
Calibration adapter for PIR 7x00	68 11 610
PolySoft licence (1 year)	68 28 600
PolySoft licence (subscription)	68 28 601
PolySoft Premium licence (1 year)	83 28 639
PolySoft Premium licence (subscription)	83 28 640
Process cuvette for PIR 7x00, POM (Polyoxymethylene)	68 11 915
Process cuvette for PIR 7x00, stainless steel	68 11 415
Process cuvette for PIR 7x00, SGR	68 13 219

SPECIFICATIONS

Operating Voltage 24 Vdc nominal (18 Vdc minimum, 30 Vdc maximum). Maximum ripple is 2 volts peak-to-peak

Power Consumption 4 watts minimum (without heater), 17 watts at 30 Vdc with EOL resistor installed and heater on maximum

Relays Contacts rated 5 amperes at 30 Vdc

Fire Alarm: — Form C (NO and NC contacts)
— normally de-energized
— latching/non-latching

Fault: — Form A (NO contacts)
— normally energized
— latching/non-latching

Auxiliary: — Form C (NO and NC contacts)
— normally energized/de-energized
— latching/non-latching.

Current Output (Optional) 0–20 mA (± 0.3 mA), with a maximum loop resistance of 500 ohms from 18–19.9 Vdc, 600 ohms from 20–30 Vdc

Temperature Range Operating: –40°F to +167°F (–40°C to +75°C)
Storage: –67°F to +185°F (–55°C to +85°C)

Hazardous location ratings from –55°C to +125°C

Humidity Range 0 to 95% relative humidity, can withstand 100% condensing humidity for short periods of time.

Spectral Sensitivity Range 4 - 5 microns

Wiring 16 AWG or 2.5 mm^2 shielded cable is recommended.

Enclosure Material Copper-free aluminum (painted) or stainless steel (316/CF8M Cast)

Conduit Entry Size 3/4 inch NPT or M25

Warranty 5 years

Response Characteristics

	Fuel	Size	Distance Ft (m)	Average Response Time (seconds)***
Very High Sensitivity	n-Heptane	1 x 1 foot	265 (80.7)*	22
	n-Heptane	1 x 1 foot	250 (76.2)	17
	n-Heptane	1 x 1 foot	100 (30.5)	3
	n-Heptane	6 in. x 6 in.	100 (24.4)	7
	Isopropanol	6 in. x 6 in.	70 (21.3)	6
	Diesel	1 x 1 foot	175 (53.3)	6**
	Ethanol	1 x 1 foot	210 (64)	11
	Methanol	6 in. x 6 in.	40 (12.2)	3
	Methanol	1 x 1 foot	150 (45.7)	7
	Methanol	1 x 1 foot	150 (45.7)	5**
	Methane	32 inch plume	125 (38.1)	5
	Propane	32 inch plume	125 (38.1)	5
	Jet A	1 x 1 foot	150 (45.7)	4**
	JP-5	2 x 2 feet	235 (71.6)	3**
	JP-8	1 x 1 foot	150 (45.7)	5**
	Class A	Ø12 in. x 7 in.	150 (45.7)	3**
Medium Sensitivity	n-Heptane	1 x 1 foot	100 (30.5)	7
	n-Heptane	1 x 1 foot	50 (15.24)	<2
	Diesel	1 x 1 foot	70 (21.3)	4**
	Ethanol	1 x 1 foot	85 (25.9)	7
	Methanol	1 x 1 foot	70 (21.3)	6
	Methane	32 inch plume	70 (21.3)	6
	Methane	32 inch plume	55 (16.8)	4
	Propane	32 inch plume	75 (22.8)	<5
	JP-5	2 x 2 feet	150 (45.7)	3**
	Class A	Ø12 in. x 7 in.	50 (15.24)	4**

* Outdoor test condition.
** 10 second pre-burn from ignition.
*** Add 2 seconds for EQP Model.
Ø Diameter

NOTE: Refer to the X3301 instruction manual (95-8704) for additional sensitivity levels.

Shipping Weight (Approximate) Aluminum: 7 lbs. (3.2 kg)
Stainless Steel: 13.8 lbs. (6.3 kg)

Field of View 90° horizontal by 75° vertical, at a minimum of 70% of the on-axis detection distance.

Certification

FM APPROVED CSA

Class I, Div. 1, Groups B, C & D (T4A)
Class II, Div 1, Groups E, F & G (T4A)
Class I, Div. 2 , Groups A, B, C & D (T3C)
Class II, Div 2. Groupd F & G (T3C)
Class III
Enclosure NEMA/Type 4X per NEMA 250

For FM and CSA Zone approval information, refer to the X3301 instruction manual (95-8704)

IEC 61508
Certified SIL 2 Capable.
Applies to specific models –
Refer to the SIL 2 Certified
X3301 Safety manual (95-8720)

RUSSIA & KAZAKHSTAN

EAC

VNIIFTRI
CERTIFICATE OF CONFORMITY TO "TP TC 012/2011"
№ TC RU C-US. BH02.B.00401

2ExdeIICT6/T5 IP66
T6 (Tamb = –50°C to +60°C)
T5 (Tamb = –50°C to +75°C)
Ex tb IIIC T130°C Db
– OR –
1ExdIICT6/T5/T4 IP66
T6 (Tamb = –55°C to +60°C)
T5 (Tamb = –55°C to +75°C)
T4 (Tamb = –55°C to +125°C)
Ex tb IIIC T130°C Db

RUSSIA

VNIIPO
CERTIFICATE OF CONFORMITY TO TECHNICAL REGULATIONS,
GOST R 53325-2012
C-US.ПБ01.B.02910

LPCB VdS

Approvals to EN54-10. See instruction manual for details.

US Coast Guard
Coast Guard Approval No. 161.002/49/0.

DNV
Type Approval Certificate Number TAA00000V2
DNV Certificate Number MED-B-9427

DEMKO 01 ATEX 130204X
Increased Safety Model
CE 0539 Ex II 2 G II 2 D

Ex d e IIC T6...T5 Gb
Ex tb IIIC T130°C
T6 (Tamb –50°C to +60°C)
T5 (Tamb –50°C to +75°C)
IP66

Flameproof Model
CE 0539 Ex II 2 G II 2 D

Ex d IIC T6...T4 Gb
T6 (Tamb –55°C to +60°C)
T5 (Tamb –55°C to +75°C)
T4 (Tamb –55°C to +125°C)
IP66/IP67

IEC IECEx

IECEx Certificate of Conformity
IECEx ULD 06.0017X
Ex db eb IIC T6...T5 Gb
Ex tb IIIC T130°C
T6 (Tamb = –50°C to +60°C)
T5 (Tamb = –50°C to +75°C)
IP66
– OR –
Ex db IIC T6...T4 Gb
T6 (Tamb = –55°C to +60°C)
T5 (Tamb = –55°C to +75°C)
T4 (Tamb = –55°C to +125°C)
IP66/IP67

INMETRO UL BR

UL-BR 12.0093X
Ex d e IIC T6-T5 Gb IP66/IP67
Ex tb IIIC T130°C
T6 (Tamb = –50°C to +60°C)
T5 (Tamb = –50°C to +75°C).
– OR –
Ex d IIC T6-T4 Gb IP66/IP67
Ex tb IIIC T130°C
T6 (Tamb = –55°C to +60°C)
T5 (Tamb = –55°C to +75°C)
T4 (Tamb = –55°C to +125°C).

CANADA
QPS

ULC/ORD-C386:2015
ULC S529-09
QPS Cert # LR1371-1R1

DET-TRONICS®

Corporate Office
6901 West 110th Street
Minneapolis, MN 55438 USA
www.det-tronics.com

Phone: +1 952.941.5665
Toll-free: +1 800.765.3473
Fax: 952.829.8750
det-tronics@carrier.com