



الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية  
République Algérienne Démocratique et Populaire  
وزارة التعليم العالي والبحث العلمي  
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

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

معهد الصيانة والأمن الصناعي  
Institut de Maintenance et de Sécurité Industrielle

**Département d'hygiène et de sécurité industrielle**

## **MÉMOIRE**

Pour l'obtention du diplôme de Master

**Filière** : Hygiène et Sécurité Industrielle

**Spécialité** : Sécurité Industrielle et Environnement

### **Thème**

**Systeme de détection et d'intervention**

**SECURI-CITERNE**

Présenté et soutenu publiquement par :

**Abdelhadi Sabrina et Taibi Fatima Zohra**

Devant le jury composé de :

<b>Nom et Prénom</b>	<b>Grade</b>	<b>Etablissement</b>	<b>Qualité</b>
Mme. Hebbar Chafika	Pr	IMSI	Présidente
Mr. Guetarni Islam Hadj Mohamed	MCB	IMSI	Encadreur
Mme. Moulessehoul Atika	MCB	IMSI	Examinatrice

**Année 2023/2024**

# ***REMERCIEMENT***

Nous tenons tout d'abord à remercier Dieu le Tout-Puissant et Miséricordieux, qui nous a donné la force et la patience d'accomplir ce modeste travail.

Nous tenons à exprimer notre gratitude et remerciements les plus sincères à toutes les personnes qui ont contribué à la réalisation de ce projet de fin d'études. En premier lieu, Nous remercions notre encadrant, M. Guetarni Mohamed Islam, pour son soutien, ses conseils avisés, et sa disponibilité tout au long de ce projet. Son expertise et son expérience ont été d'une aide précieuse pour mener à bien cette recherche et notre coéquipier Otmani Noubâ Elhachemi dont ça contribution a été importante et prépondérante à la réalisation de ce projet.

Nous tenons à exprimer nos sincère gratitude à Madame Hebbar Chafika, présidente de notre jury de mémoire, d'avoir accepté d'évaluer ce travail. Votre expertise et votre regard attentif ont grandement enrichi cette expérience académique.

Nous souhaitons également à remercier chaleureusement Madame Moulessehoul Atika, examinatrice de ce mémoire, pour le temps consacré à l'évaluation de notre travail et pour vos commentaires constructifs. Vos observations pertinentes ont permis d'approfondir et d'améliorer cette étude.

Merci à vous deux pour votre contribution à ce projet et pour l'honneur que vous nous avez fait en acceptant de faire partie des membres de jury.

Nous remercions également notre encadrante de stage, Mme Benzerga Soumeïya, chef du service HSE au niveau du Naftal District Carburant 317, qui nous a guidés et conseillés tout au long de notre stage. Son encouragement permanent et son dynamisme organisateur nous ont énormément facilité la tâche. Nous la remercions vivement pour tout.

Nous tenons également à remercier M. Lalaoui, chef du département HSE, ainsi que nos enseignants pour leur encadrement technique et moral, qu'ils n'ont cessé de nous apporter.

Enfin, nous remercions toutes les personnes qui ont accepté de participer à cette recherche, merci infiniment À tous.

# *Dédicace*

*À moi-même,*

*Je célèbre le voyage, les défis que j'ai surmontés et les victoires que j'ai remportées. Je suis fier de la personne que je suis devenue et je continuerai d'avancer avec confiance et gratitude pour tout ce que la vie a à offrir. Je me remercie donc pour tous les efforts que j'ai déployés et pour les moments de faiblesse qui m'ont rendu plus fort.*

*À ma mère, qui s'est privée des plaisirs de la vie pour m'en prodiguer. Maman, ton amour inconditionnel, tes sacrifices innombrables et ta détermination à me voir réussir ont été ma plus grande source de force et d'inspiration. Merci pour ta patience, ta générosité et pour avoir toujours cru en moi, même dans les moments les plus difficiles. (Je t'aime Mama)*

*À mon père, dont le soutien indéfectible et les nombreux sacrifices ont été essentiels à ma réussite. Papa, ton engagement à m'aider à atteindre mes objectifs, tes conseils précieux et ta présence rassurante ont été inestimables. Merci pour ta foi en mes capacités et pour avoir toujours été là pour me soutenir et m'encourager.*

*À mes sœurs Fatima et Hanaa et mon frère Abderrahmane pour leur soutien inconditionnel, leur encouragement et leur présence tout au long de ce voyage.*

*À mes chères amis Mariem, Houda, Chaimaa, Z. Amira, Imen, Sabah, Radajaa et ma meilleure amie d'université/binôme Fatima qui ont partagé avec moi les joies et les peines de ce voyage. Merci pour votre écoute, pour les moments de rire et de détente, et pour être à mes côtés dans les bons comme dans les mauvais moments. Vous avez rendu cette expérience bien plus enrichissante et supportable.*

*Et à celui qui m'a soutenu et m'a aidé à surmonter tous mes moments difficiles, Nouba. Merci pour avoir cru en moi-même quand je doutais de moi-même.*

*Avec toute ma gratitude et mon affection.*

**Sabrina**

# *Dédicace*

*Ma très chère mère,*

*Qui a œuvré pour ma réussite, par son amour, son soutien, tous les sacrifices consentis et ses précieux conseils, pour toute son assistance et sa présence dans ma vie, reçois à travers ce travail aussi modeste soit-il, l'expression de mes sentiments et de mon éternelle gratitude.*

*Mon très cher père, Qui peut être fier et trouver ici le résultat de longues années de sacrifices et de privations pour m'aider à avancer dans la vie. Puisse Dieu faire en sorte que ce travail porte son fruit ; Merci pour les valeurs nobles, l'éducation et le soutien permanent venu de toi. Votre soutien indéfectible est la lumière qui guide chacun de mes pas.*

*À mon frère ABDEL ILLAH et à ma sœur DOUAA, Pour votre présence réconfortante et vos encouragements constants. Vous êtes les piliers sur lesquels je m'appuie et les confidents auxquels je me tourne. Votre amour et votre compréhension m'ont donné la force de continuer.*

*À mes amis, ma deuxième famille, \*Abderrahmane, Tarek, Yacine, Aymen, Imène, Amira\*, qui ont partagé chaque étape de ce voyage avec moi. Votre amitié a été un trésor inestimable, rendant les moments difficiles plus supportables et les moments joyeux encore plus mémorables. Merci pour votre soutien et pour les souvenirs que nous avons créés ensemble.*

*À mon binôme et meilleure amie, Merci pour ta collaboration précieuse, ta patience, et ton esprit d'équipe. Sans toi, ce projet n'aurait pas été le même. Ton soutien et ta détermination ont été une source d'inspirations constante. Merci de m'avoir accompagnée dans cette aventure plus que magnifique. Je vous dédie ce travail avec tous mes vœux de bonheur, de santé et de réussite.*

***Fatima***

### **Système de détection et d'intervention**

#### **SECURI-CITERNE**

#### **RESUME**

Ce projet explore les risques significatifs associés au transport de produits inflammables par Camions-citernes, en soulignant l'importance cruciale de ce mode de transport pour l'industrie pétrolière et gazière. Les accidents de Camions-citernes peuvent entraîner des conséquences catastrophiques, incluant des incendies, des explosions, et des impacts environnementaux graves. Face à ces défis, nous avons développé un système intelligent de prévention et d'intervention pour améliorer la sécurité et la gestion des risques liés au transport de matières dangereuses.

Nous avons utilisé le logiciel PHAST pour modéliser les scénarios catastrophiques et évaluer les conséquences potentielles des accidents impliquant des Camions-citernes. En intégrant des capteurs avancés de température, de pression et de fumée, ainsi que des systèmes de communication basés sur l'Internet des objets (IoT), notre prototype surveille en temps réel les conditions critiques et déclenche des dispositifs d'extinction automatique en cas de danger. Les tests et simulations ont démontré la pertinence de notre approche pour prévenir les accidents et minimiser leurs conséquences.

**Mots clés :** transport des matièresdangereuses, les scénarios catastrophiques, Camion-citerne, les accidents, le prototype

### **Detection and intervention system**

#### **SECURI-CITERNE**

#### **Abstract**

This project explored the significant risks associated with transporting flammable products by tanker trucks, emphasizing the crucial role this mode of transport plays in the oil and gas industry. Accidents involving tanker trucks can lead to catastrophic consequences, including fires, explosions, and severe environmental impacts. In response to these challenges, we have developed an intelligent prevention and intervention system to enhance safety and risk management in the transportation of hazardous materials.

We utilized PHAST software to model catastrophic scenarios and assess the potential consequences of accidents involving tanker trucks. By integrating advanced temperature, pressure, and smoke sensors, along with communication systems based on the Internet of Things (IoT), our prototype continuously monitors critical conditions and triggers automatic extinguishing devices in case of danger. Our tests and simulations have demonstrated the relevance of our approach in preventing accidents and minimizing their consequences.

**Keywords:** transportation of hazardous materials, catastrophic scenarios, tanker truck, accidents, the prototype

### نظام الكشف والتدخل

### SECURI-CITERNE

#### ملخص

لقد وضحنا المخاطر الكبيرة المرتبطة بنقل المواد القابلة للاشتعال بواسطة شاحنات الصهاريج، مسلطين الضوء على الأهمية البالغة لهذا النوع من النقل لصناعة النفط والغاز. يمكن أن تؤدي حوادث شاحنات الصهاريج إلى عواقب كارثية تشمل الحرائق والانفجارات وتأثيرات بيئية خطيرة. لمواجهة هذه التحديات، قمنا بتطوير نظام ذكي للوقاية والتدخل بهدف تحسين السلامة وإدارة المخاطر المرتبطة بنقل المواد الخطرة.

استخدمنا برنامج PHAST لنمذجة السيناريوهات الكارثية وتقييم العواقب المحتملة للحوادث التي تشمل شاحنات الصهاريج. من خلال دمج أجهزة استشعار متقدمة لقياس درجة الحرارة والضغط والدخان، بالإضافة إلى أنظمة الاتصالات المستندة إلى إنترنت الأشياء (IoT)، يقوم نموذجنا الأولي بمراقبة الظروف الحرجة في الوقت الفعلي وتفعيل أجهزة الإطفاء التلقائي في حالة الخطر. لقد أظهرت الاختبارات والمحاكاة فعالية نهجنا في الوقاية من الحوادث وتقليل عواقبها.

**الكلمات المفتاحية:** نقل المواد الخطرة، السيناريوهات الكارثية، شاحنة الصهريج، الحوادث، النموذج الأولي.

## **Table des matières**

---

Remerciement

Dédicace

Résumé

Table des matières

Liste des abréviations

Liste des tableaux

Liste des figures

### **Chapitre 01 : Gestion des risques lors du transport des matières dangereuses**

Introduction.....	4
I.1 Notion de risque .....	5
I.2 Notion de danger .....	7
I.3 Notion d'accident .....	8
I.4 Notion de sécurité.....	9
I.4.1 Notion ISO .....	9
I.4.2 ISO 31000 .....	9
I.4.3 IEC 31010:2019 .....	10
II. Transport des marchandises dangereuse .....	11
Introduction.....	11
II.1 Qu'est-ce qu'une matière dangereuse ? .....	12
II.2 La classification des matières dangereuses .....	12
II.3 La signalisation .....	13
II.3.1. Signalisation générale TMD .....	14
II.3.2 par une plaque-étiquette de danger : .....	16
II.4 Les différents types de transport de matières dangereuses .....	17
II.5 Qu'est-ce que le risque transport de matières dangereuses? .....	17
II.6 Les causes d'accidents de TMD.....	18
II.7 Les principaux dangers liés aux TMD .....	19
II.8 Conséquences possibles lors d'un accident de TMD .....	22
III. Les scénarios catastrophiques de TMD .....	23
IV. Réglementation et normes .....	24
Conclusion.....	25

### **Chapitre 02: L'intelligence artificielle et l'internet of things**

Introduction .....	27
I. Intelligence artificielle .....	27
I.1 Qu'est-ce qu'une intelligence artificielle ? .....	27
I.2 Historique de l'intelligence artificielle .....	28
I.3 Les types d'intelligence artificielle (IA) .....	30

## **Table des matières**

---

I.4 Comment fonctionne l'IA ? .....	31
I.5 Intelligence Artificielle et Sécurité Industrielle .....	32
I.6 Comment garantir la sécurité industrielle grâce à l'IA ? .....	32
II. Internet des objets .....	36
INTRODUCTION .....	36
II.1 Définitions d'Internet des objets .....	36
II.2 Composantes de l'IoT .....	37
II.3 Qu'est-ce que l'IoT industriel (IIoT) ? .....	38
II.4 L'importance d'IoT à l'industrie .....	38
II.5 Domaines d'applications .....	43
Conclusion .....	45

### **Chapitre 03: Modélisation des scenarios catastrophiques**

Introduction .....	47
III.1 Description de camion citerne .....	47
III.1.1 Généralités sur les camions citerne .....	47
III.1.2 Décryptage des Paramètres du Camion-citerne de Transport de GPL .....	49
III.2 Modélisation des scénarios avec logiciel PHAST .....	50
III.2.1 Description des données nécessaires .....	50
III.2.2 Modélisation de la dispersion de nuage de polluant : .....	52
III.2.3 Modélisation de feu de flash (flash Fire) .....	54
III.2.4 Effets thermiques .....	55
III.2.5 Effets de surpression .....	58
Conclusion .....	60

### **Chapitre 04: Sécurité citerne description de prototype et résultats**

INTRODUCTION .....	62
I. Matériel et composants utilisés dans le prototype .....	63
II. Mise en Œuvre du Prototype .....	70
II.1 Montage des Capteurs et de l'Electronique .....	70
II.2 Programmation Arduino .....	72
II.3 Interface Graphique Utilisateur (GUI) .....	74
III. Collecte et Analyse des Données .....	75
III.1 Collecte des Données du MPU6050 .....	75
III.2 Algorithme de Régression pour la Prédiction des Dangers .....	76
IV. Système d'Alarme et Intervention .....	77
IV.1 Détection des Conditions Anormales .....	77
IV.2 Envoi de SMS d'Alerte .....	78
IV.3 Transmission des Données et Localisation .....	79
V. Tests et Résultats .....	80



## ***Table des matières***

---

V.1 Tests du Système .....	80
V.1.1 Scénarios de Test pour Chaque Capteur et Alarme .....	80
V.1.2 Simulation d'Accidents et de Conditions de Danger .....	81
V.2 Résultats .....	81
V.2.1 Analyse des Résultats des Tests .....	81
V.2.2 Simulation avec Blender .....	82
V.2.3 Discussion sur l'Efficacité du Système de Prévention et d'Intervention .....	83
Conclusion.....	84
Conclusion générale .....	85
Bibliographie .....	86

**Liste des Tableaux**

Tableau I 1 :Un recueil des plus importants accidents industriels survenus dans le monde entre 1961 et 2001. ....	8
Tableau I.2:Classification des matières dangereuses selon l'Accord européen relatif au transport international de marchandises dangereuses par Route (ADR)[10] .....	12
Tableau I.3:Les chiffres de danger .....	14
Tableau III. 1:Les données météorologiquesn.....	50
Tableau III. 2:Seuils thermiques des effets sur l'homme .....	55
Tableau III. 3:Seuils thermiques des effets dominos .....	55
Tableau III. 4: Seuils de surpression des effets sur l'homme .....	58
Tableau III. 5:Seuils de surpression des effets dominos.....	58

### Liste des Figures

Figure I. 2:les Plaques de la signalisation générale TMD .....	14
Figure I. 3:Un Camion-citerne avec étiquetages .....	15
Figure I. 4:les étiquettes de danger .....	16
Figure I. 5:les conséquences d'explosion d'un Camion-citerne.....	19
Figure I. 6:bleve d'un Camion-citerne .....	20
Figure I. 7:Boil over .....	21
Figure II. 2:Frise chronologique de l'IA .....	29
Figure III.1:Camion-citerne.....	47
Figure III.2:dispositifs de sécurité des camions citernes .....	48
Figure III.3:caractéristique d'équipement étudié .....	51
Figure III.4:discharge résultats .....	51
Figure III.5:surface de la dispersion de polluant en fonction de la distance (Rupture).....	52
Figure III.6:les zones affectées par le polluant (Rupture). .....	53
Figure III.7:Les zones atteintes par le feu de flash (Grande fuite .....	54
Figure III.8:les zones touchées par les radiations thermiques .....	56
Figure III.9:Modélisation de feu de nappe (pool fire).....	57
Figure III 10: les zones affectées par l'explosion en fonction du temps (Rupture).....	59
Figure III 12:les distances atteintes par l'explosion.....	59
Figure IV.1 :Arduinouno .....	63
Figure IV.2:Thermocouple .....	63
Figure IV.3:BMP180 .....	64
Figure IV.4:MPU-6050.....	64
Figure IV.5:SIM900-A.....	65
Figure IV.6:NEO-6M.....	65
Figure IV.7:LM2596 .....	66
Figure IV.8:BREADBOARD .....	66
Figure IV.9:LCD I2C .....	67
Figure IV.10:SONORE .....	67
Figure IV.11:LED-ROUGE.....	67
Figure IV.12:Logiciel de Surveillance.....	68
Figure IV 13:ARDUINO IDE .....	69
Figure IV.14:Montage des capteurs de prototype .....	70
Figure IV.15: Circuit électrique de la carte mère du produit final.....	71
Figure IV.16:Circuit PCB de la carte mère du produit final.....	71
Figure IV.17:Organigramme.....	73
Figure IV.18:Logiciel de Surveillance.....	74
Figure IV.19:la Voiture pour la collection des données .....	75
Figure IV 20:Simulation de la carte mère avec Blender .....	83

### **Liste des abréviations**

**IA** : Intelligence artificielle.

**IoT** : Internet des objets (Internet of things).

**TMD** : Transport des matières dangereuses.

**BLEVE**: liquide bouillant explosion de vapeur en expansion (Boiling Liquid Expanding Vapor).

**GPL** : Gaz de pétrole liquéfié.

**ISO** : Organisation internationale de normalisation (International standardisation organisation).

**ANI** : Intelligence Artificielle Étroite.

**AGI** : Intelligence Artificielle Forte.

**GUI** : Interface Graphique Utilisateur (Graphical user interface).

**GPS** : Système de positionnement global (Global Positioning System).

**SMS** : Service de messages courts (Short message service).

# **INTRODUCTION GENERALE**

Le transport de produits inflammables par Camions-citernes joue un rôle crucial dans les chaînes d'approvisionnement modernes, en particulier pour l'industrie pétrolière et gazière. Chaque jour, des milliers de Camions-citernes traversent les routes pour acheminer des produits dangereux tels que le pétrole, le gaz liquéfié (GPL) et d'autres hydrocarbures vers leurs destinations finales. Bien que ce mode de transport soit indispensable pour l'économie mondiale, il présente également des risques significatifs pour la sécurité publique et l'environnement.

Les accidents impliquant des Camions-citernes peuvent avoir des conséquences catastrophiques, incluant des incendies, des explosions, des pertes humaines, des dommages matériels considérables et des impacts environnementaux graves. Ces incidents soulignent l'importance d'une gestion rigoureuse des risques et la nécessité de systèmes de sécurité avancés pour prévenir et atténuer les effets des accidents.

Malgré les progrès technologiques et les réglementations de sécurité strictes, les accidents de Camions-citernes continuent de se produire, souvent en raison de défaillances techniques, d'erreurs humaines ou de conditions routières imprévues. Les systèmes de sécurité actuellement utilisés, bien qu'efficaces dans certains cas, présentent des limitations en termes de détection précoce des dangers et de réponse rapide aux situations d'urgence.

Les entreprises de transport de produits inflammables sont confrontées à un double défi : d'une part, elles doivent garantir la sécurité de leurs opérations et protéger les biens et les vies humaines ; d'autre part, elles doivent se conformer à des normes de plus en plus strictes en matière de sécurité et de protection de l'environnement. Dans ce contexte, il est crucial de développer des solutions innovantes qui intègrent les dernières avancées technologiques pour améliorer la sécurité et la gestion des risques associés au transport de produits inflammables.

Face à cette réalité, ce mémoire se concentre sur le développement d'un système intelligent de prévention et d'intervention spécifiquement dédié au transport des matières dangereuses par Camions-citernes. Ce système vise à combiner des technologies avancées de suivi en temps réel et des dispositifs d'extinction automatique pour prévenir les accidents et minimiser leurs conséquences. Plus spécifiquement, ce mémoire se propose de détailler les composants et les technologies utilisés, tels que les capteurs de température, de pression et de fumée, ainsi que les systèmes de communication basés sur l'Internet des objets (IoT).

Notre travail se divisera en deux parties :

Une partie théorique qui est scindé sur deux chapitres :

## *Introduction générale*

---

Le premier chapitre présente des généralités et des notions sur le danger, le risque, l'accident et la sécurité ainsi que le transport des matières dangereuses, Les principaux dangers liés à ce transport et les scénarios catastrophiques qui ont eu lieu Et vers la fin les normes et réglementations concernant le transport des matières dangereuses.

Le deuxième chapitre explore l'importance de l'intelligence artificielle (IA) et de l'Internet des objets (IoT) dans la sécurité industrielle. Il couvre des aspects tels que les définitions et l'historique de l'IA, les types d'IA, le fonctionnement de l'IA, ainsi que les applications et avantages de l'IoT dans divers domaines industriels.

Une partie pratique qui est scindé sur deux chapitres :

Le premier chapitre présente la modélisation des scénarios catastrophiques d'une étude de cas d'un Camion-citerne de transport de gaz de pétrole liquéfié (GPL) par le logiciel phast.

Le deuxième chapitre présente l'application pratique d'un système de surveillance et d'intervention pour Camions-citernes, intégrant divers capteurs et modules pour détecter et prévenir les accidents, avec une mise en œuvre détaillée, des tests rigoureux et des résultats de simulations pour garantir la fiabilité du prototype développé.

Enfin nous terminons par une synthèse globale sur notre travail dans la partie conclusion.

# *Chapitre 01*

## **Gestion des risques lors du transport des matières dangereuses**

## **Introduction**

La gestion des risques est une composante essentielle de toute entreprise ou organisation, en particulier lorsqu'il s'agit du transport de marchandises dangereuses (TMD). Comprendre les risques potentiels, anticiper les scénarios catastrophiques et mettre en place des stratégies efficaces pour les prévenir ou les atténuer sont des impératifs cruciaux pour assurer la sécurité des personnes, des biens et de l'environnement.

Ce chapitre vise à explorer en profondeur la notion de gestion des risques dans le contexte spécifique du transport de marchandises dangereuses. Nous examinerons les différents types de risques auxquels sont exposées les organisations opérant dans ce domaine, allant des dangers inhérents aux marchandises elles-mêmes aux risques liés aux processus de transport et aux infrastructures impliquées.

Nous aborderons également les scénarios catastrophiques qui peuvent survenir en cas d'incident majeur lors du transport de matières dangereuses, ainsi que les conséquences potentiellement dévastatrices de ces événements.

Enfin, nous explorerons la partie normative et réglementation permettant la mise en œuvre des méthodes d'analyse des risques, afin de mieux comprendre comment évaluer, hiérarchiser et gérer efficacement les risques associés au transport de marchandises dangereuses.

Cette exploration approfondie vise à fournir aux lecteurs une compréhension claire et approfondie des enjeux liés à la gestion des risques dans le domaine du transport de marchandises dangereuses, ainsi que des outils et des stratégies pour faire face à ces défis de manière proactive et efficace.



## I. NOTION DE BASE

### I.1 Notion de risque

Le concept de risque est essentiel pour appréhender les incertitudes et les dangers potentiels auxquels font face les individus, les organisations et les sociétés. Il se définit comme la combinaison de la probabilité et des conséquences d'un événement, nécessitant une évaluation basée sur des connaissances suffisantes pour estimer sa survenance et ses impacts. La perception du risque varie en fonction de divers facteurs, notamment l'exposition, le mode d'exposition et la gravité des effets potentiels, ainsi que des facteurs psychologiques, sociologiques et économiques. Dans la société contemporaine, la gestion des risques revêt une importance cruciale, surtout dans un contexte de mondialisation et de société de l'information, où de nouveaux risques émergent et où la confiance dans la science et la technologie peut être remise en question. Ainsi, comprendre le risque et mettre en place des stratégies pour le gérer sont essentiels pour promouvoir la sécurité, la santé et la protection de l'environnement dans un monde en constante évolution.[1]

Selon le Petit Robert (2012), le risque est défini comme « un danger éventuel plus ou moins prévisible ». Selon Besson et Possin, (2006); « le risque désigne un danger bien identifié, associé à l'occurrence d'un événement ou d'une série d'événements, parfaitement descriptibles, dont on ne sait pas s'ils se produiront mais dont on sait qu'ils sont susceptibles de se produire ». Selon Bressy (2004); « les risques d'entreprise sont tous les événements pouvant survenir et qui sont de nature à réduire sa rentabilité, voire à remettre en question son existence. Il peut s'agir de menaces qui se réalisent, d'erreurs de gestion ou de prévisions ou encore de la survenance d'aléas défavorables ». Ces définitions permettent de rendre compte de l'existence de concepts communs liés à la notion de risque. Le risque y est défini comme un danger que l'on identifie sans ambiguïté, associé à la réalisation d'un événement dont la réalisation est probable. Les deux éléments importants sont l'identification du danger et la probabilité de réalisation de l'évènement. [2]

Le risque est une notion permettant de qualifier une situation et d'agir en conséquence. Il est défini comme le produit de la probabilité et des conséquences d'un événement (Taylor-Gooby et Zinn, 2006, p. 22-26).[2]

#### Classification des risques

Dans la littérature, on trouve plusieurs classifications des risques. L'analyse des risques permet de les classer en cinq grandes familles :

Les risques naturels : inondation, feu de forêt, avalanche, tempête, séisme, etc. ;

Les risques technologiques : d'origine anthropique, ils regroupent les risques industriels, nucléaires, biologiques, ruptures de barrage, etc., les risques de transports collectifs (personnes, matières dangereuses) sont aussi considérés comme des risques technologiques ;

Les risques de la vie quotidienne : accidents domestiques, accidents de la route, etc. ;

Les risques liés aux conflits. Une des classifications les plus répandues est de classer les risques en deux catégories : les risques naturels et les risques liés à l'activité humaine.

Une des classifications les plus répandues est de classer les risques en deux catégories : les risques naturels et les risques liés à l'activité humaine. Selon cette classification, les risques peuvent être naturels dans le sens où ils ont trait à un événement sans cause humaine directe avérée. Les causes directes supposées ou indirectes ne doivent pas modifier cette distinction. Les risques liés à l'activité humaine recouvrent un ensemble de catégories de risques divers :

- les risques techniques, Technologiques, industriels et nucléaires ;
- les risques liés aux transports ;
- les risques sanitaires ;
- les risques économiques, financiers, managériaux ;
- les risques médiatiques ;
- les risques professionnels.[3]

### **Qu'est-ce que l'évaluation des risques professionnels ?**

L'évaluation des risques professionnels est une démarche dont l'objectif est de recenser et qualifier les risques afin de mettre en œuvre des actions d'améliorations adaptées et ainsi les réduire ou les faire disparaître.

Elle vise à élaborer, a priori, une cartographie hiérarchisée des différents risques liés aux situations de travail réel. Elle a deux fonctions principales :

- Réaliser un bilan écrit de la situation générale de la collectivité en matière de santé, de sécurité et de conditions de travail
- Être le point de départ de l'élaboration d'un plan d'actions ayant pour but d'améliorer la prévention des risques au sein de la collectivité. [4]

**Les étapes clés de l'évaluation des risques :****1. Identification des Risques:**

La première étape consiste à identifier les dangers potentiels présents dans l'environnement de travail. Cela peut être réalisé à travers des méthodes telles que le brainstorming, l'analyse documentaire, les observations sur le terrain, etc. Les risques peuvent être classés en différentes familles selon les objectifs de gestion des risques, comme les risques financiers, opérationnels, de conformité, etc. [4], [5]

**2. Analyse des Risques:**

Une fois les risques identifiés, il est crucial d'analyser leur probabilité d'occurrence et leur impact potentiel. Cette analyse permet de déterminer la criticité des risques en évaluant leur gravité et leur fréquence d'exposition. Cette étape aide à prioriser les actions à mettre en place pour limiter la probabilité d'apparition et l'impact des risques.[4], [5]

**3. Évaluation du Risque Brut:**

L'évaluation du risque brut consiste à déterminer si les moyens de maîtrise mis en place sont suffisants pour gérer efficacement les dangers identifiés. Cette évaluation permet de classer les risques en fonction de leur indice de risque brut, aidant ainsi à décider des actions correctives nécessaires pour renforcer la sécurité au travail.

l'évaluation des risques est un processus structuré et essentiel pour garantir un environnement de travail sûr et sain en identifiant, analysant et gérant efficacement les dangers potentiels qui pourraient compromettre la sécurité des travailleurs.[4], [5]

**I.2 Notion de danger**

Le sens du mot « danger » peut être ambigu. Souvent, les dictionnaires ne donnent pas de définitions précises du mot ou associent ce dernier au terme « risque ». Par exemple, plusieurs dictionnaires proposent « risque » comme synonyme de « danger », ce qui explique pourquoi un grand nombre de personnes utilisent indifféremment ces termes.

Un danger est une source potentielle de dommage, c'est-à-dire un événement non souhaité, un préjudice ou un effet nocif pouvant causer des dommages aux personnes (p. ex. des effets sur la santé), les organisations (p. ex. pertes de biens ou d'équipement) ou l'environnement (des substances chimiques toxiques, des équipements défectueux, des situations de travail dangereuses, etc).

Selon l'INRS, le danger est défini comme "la propriété intrinsèque d'un produit, d'un équipement, d'une situation susceptible de causer un dommage à l'intégrité mentale ou physique du salarié.

Le danger lui-même n'est pas le dommage, mais la source potentielle de celui-ci. Le dommage résulte de l'exposition à un danger et peut se manifester sous différentes formes, telles que des blessures physiques, des maladies professionnelles, des pertes financières pour l'entreprise ou des dommages à l'environnement.[6], [7]

### I.3 Notion d'accident

L'accident est un événement imprévu entraînant la mort, une détérioration de la santé, des lésions, des dommages ou autres pertes.

Le tableau présente un recueil des plus importants accidents industriels survenus dans le monde entre 1961 et 2001.[3]

**Tableau I 1 :Un recueil des plus importants accidents industriels survenus dans le monde entre 1961 et 2001.**

Accident	Type d'accident	Victimes et dégâts
1961 - Accident de la Baie de Minamata (Japon)	Rejets de mercure dans la baie par une usine chimique.	Empoisonnement au mercure entraînant des malformations congénitales et des décès.
1976 - Catastrophe de Seveso (Italie)	Explosion dans une usine chimique produisant des dioxines.	Contamination chimique entraînant des évacuations massives et des problèmes de santé à long terme.
1984 - Catastrophe de Bhopal (Inde)	Fuite de gaz toxiques dans une usine de pesticides.	L'une des pires catastrophes industrielles de l'histoire, avec des milliers de décès et des dizaines de milliers de blessés.
1986 - Explosion de la centrale nucléaire de Tchernobyl (Ukraine)	Erreur humaine et défaillances techniques lors d'un test de sécurité.	Fusion du cœur du réacteur, dispersion de substances radioactives dans l'atmosphère et contamination de vastes zones environnantes.
1989 - Explosion de la raffinerie de Phillips (États-Unis)	Explosion dans une raffinerie de pétrole due à une fuite de gaz.	23 morts, des centaines de blessés et d'importants dégâts matériels.
1989 - Désastre écologique de l'Exxon Valdez (États-Unis)	Échouement du pétrolier Exxon Valdez dans les eaux d'Alaska.	L'une des plus graves marées noires de l'histoire, entraînant des dommages environnementaux majeurs et des pertes pour l'industrie de la pêche.

1999 - Explosion de l'usine AZF (France)	Explosion dans une usine chimique à Toulouse.	31 morts, des milliers de blessés et d'importants dégâts matériels.
--	---	---

## I.4 Notion de sécurité

La sécurité est souvent définie par rapport à son contraire : elle serait l'absence de danger, d'accident ou de sinistre.

la sécurité concerne la non occurrence d'événements pouvant diminuer ou porter atteinte à l'intégrité du système, pendant toute la durée de l'activité du système, que celle-ci soit réussie, dégradée ou ait échouée. la sécurité est l'absence de risque inacceptable, de blessure ou d'atteinte à la santé des personnes, directement ou indirectement, résultant d'un dommage au matériel ou à l'environnement.[3]

### I.4.1 Notion ISO

L'ISO (Organisation internationale de normalisation) est une fédération mondiale d'organismes nationaux de normalisation (comités membres de l'ISO). L'élaboration des Normes internationales est en général confiée aux comités techniques de l'ISO. Chaque comité membre intéressé par une étude a le droit de faire partie du comité technique créé à cet effet. Les organisations internationales, gouvernementales et non gouvernementales, en liaison avec l'ISO participent également aux travaux. L'ISO collabore étroitement avec la Commission électrotechnique internationale (CEI) en ce qui concerne la normalisation électrotechnique.

Les Normes internationales sont rédigées conformément aux règles données dans les Directives ISO/CEI.[8]

### I.4.2 ISO 31000 : Management du risque Principes et lignes directrices

L'ISO 31000 a été élaborée par le groupe de travail du Bureau de gestion technique ISO sur le Management du risque.

La famille de normes ISO 31000, établie par l'Organisation internationale de normalisation (ISO), fournit des principes et des directives pour la gestion des risques au sein des organisations. Son objectif est d'harmoniser les différentes approches, normes et méthodologies existantes en matière de gestion des risques, plutôt que de promouvoir une uniformisation rigide. Cette famille de normes comprend actuellement trois documents clés :

1. ISO 31000:2018 - Management du risque : Principes et lignes directrices
2. ISO/CEI 31010:2009 - Gestion des risques : Techniques d'évaluation des risques
3. ISO Guide 73:2009 - Management du risque : Vocabulaire

Publiée en novembre 2009, la norme internationale ISO 31000 a été rapidement adoptée et transposée en norme française par l'AFNOR sous la référence NF ISO 31000:2018. Cette norme offre des principes et des directives pour le management des risques, ainsi que des processus de mise en œuvre aux niveaux stratégique et opérationnel. [8], [9]

L'ISO 31000:2009 fournit des principes et des lignes directrices générales sur le management du risque.

L'ISO 31000:2009 peut être appliquée par tout public, toute entreprise publique ou privée, toute collectivité, toute association, tout groupe ou individu. Par conséquent, l'ISO 31000:2009 n'est pas spécifique à une industrie ou un secteur donné.

L'ISO 31000:2009 peut être appliquée tout au long de la vie d'un organisme et à une large gamme d'activités, dont les stratégies et les prises de décisions, les activités opérationnelles, les processus, les fonctions, les projets, les produits, les services et les actifs.

L'ISO 31000:2009 peut s'appliquer à tout type de risque, quelle que soit sa nature, que ses conséquences soient positives ou négatives.

Bien que l'ISO 31000:2009 fournisse des lignes directrices générales, elle ne vise pas à promouvoir l'uniformisation du management du risque au sein des organismes. La conception et la mise en œuvre des plans et des structures organisationnelles de management du risque devront tenir compte des divers besoins d'un organisme spécifique, de ses objectifs, son contexte, sa structure, son activité, ses processus, ses fonctions, ses projets, ses produits, ses services ou ses actifs particuliers, ainsi que de ses pratiques spécifiques.

Il est prévu que l'ISO 31000:2009 serve à harmoniser les processus de management du risque dans les normes existantes et à venir. Elle offre une approche commune à l'établissement des normes traitant de risques et/ou secteurs spécifiques, sans toutefois remplacer ces normes. [8], [9]

#### **I.4.3 IEC 31010:2019 : Management du risque Techniques d'appréciation du risque**

IEC 31010:2019 est publiée en tant que norme double logo avec ISO et donne des recommandations pour le choix et l'application des techniques d'appréciation du risque dans différentes situations. Ces techniques visent à aider à la prise de décision en cas d'incertitude, à donner des informations relatives à des risques particuliers et dans le cadre d'un processus de management du risque. Le document récapitule l'éventail des techniques, avec des références vers d'autres documents où ces techniques sont décrites de manière plus précise. Cette deuxième édition annule et remplace la première édition parue en 2009. Cette édition constitue une révision technique. Cette édition inclut les modifications techniques majeures suivantes par rapport à l'édition précédente: • les processus de planification, de mise en œuvre, de vérification et de validation de l'utilisation des techniques sont décrits de manière plus précise; • le nombre et la plage d'application des techniques ont été élargis; • les concepts couverts par l'ISO 31000 ne sont plus traités dans la présente norme. Mots clés: incertitude, management du risque. [8]

## II. Transport des marchandises dangereuse

### Introduction

Le transport de matières dangereuses (TMD) ne se limite pas aux produits hautement toxiques, explosifs ou polluants. Il englobe également des produits couramment utilisés tels que les carburants, le gaz et les engrais, qui peuvent représenter des risques pour les populations et l'environnement en cas d'incident.

Plusieurs facteurs compliquent l'évaluation du risque associé au transport de matières dangereuses. Ces facteurs incluent la diversité des substances transportées, les nombreux types d'accidents possibles sur différents types de routes et dans diverses zones géographiques, ainsi que les multiples causes potentielles d'incidents, comme les défaillances de matériel, les erreurs humaines, etc.

Le risque lié au transport de matières dangereuses est généralement classé en trois catégories : le risque rapproché, qui concerne les zones proches des installations génératrices de flux de TMD ;

Le risque diffus, réparti sur l'ensemble du réseau de transport ;

Le risque de canalisation, qui est plus facilement identifiable et localisé.

Pour gérer efficacement ce risque, une réglementation stricte est en vigueur depuis de nombreuses années. Cette réglementation vise à mettre en place des mesures de protection et de prévention appropriées.

## II.1 Qu'est-ce qu'une matière dangereuse ?

D'après la définition du Ministère de l'Ecologie, du Développement Durable et de l'Energie, « une matière est classée dangereuse lorsqu'elle est susceptible d'entraîner des conséquences graves pour la population, les biens et l'environnement, en fonction de ses propriétés chimiques et/ou physiques ou par la nature des réactions qu'elle peut engendrer ».[10]

## II.2 La classification des matières dangereuses

La réglementation pour le transport de matières dangereuses distingue les matières dangereuses en neuf classes selon leur comportement, leurs dangers immédiats ou ultérieurs, et les effets envisageables associés (tableau 2).

**Tableau I.2: Classification des matières dangereuses selon l'Accord européen relatif au transport international de marchandises dangereuses par Route (ADR)[10]**

Classe	Type de matière dangereuse	Risque Principal
Classe 1	Matières et objets explosibles	Explosivité
Classe 2	Gaz comprimés, liquéfiés ou dissous sous pression	État gazeux
Classe 3	Matières liquides inflammables	Inflammabilité
Classe 4	4.1 : Matières solides inflammables, 4.2 : Matières sujettes spontanément à l'inflammation, 4.3 : Matières dégageant au contact de l'eau des gaz inflammables	Inflammabilité
Classe 5	5.1 : Matières comburantes, 5.2 : Peroxydes organiques.	Inflammabilité
Classe 6	6.1 : Matières toxiques, 6.2 : Matières infectieuses.	Toxicité
Classe 7	Matières radioactives	Radioactivité
Classe 8	Matières corrosives	Corrosivité
Classe 9	Matières et objets dangereux divers	Toxicité, température, divers



**Classe 4.2 :** Matières sujettes à l'inflammation spontanée

Les matières pyrophoriques liquides ou solides qui, au contact de l'air s'enflamment en 5 minutes et les matières et objets auto-échauffantes

**Classe 4.3 :** Matières qui, au contact de l'eau, dégagent des gaz inflammables

Toutes les matières et objets qui, par réaction avec l'eau, dégagent des gaz inflammables susceptibles de former des mélanges explosifs avec l'air.

**Classe 5.1 :** Matières comburantes

Font partie de la classe 5.1 les matières et objets qui, sans être toujours combustibles peuvent en général, en l'absence de l'oxygène, provoquer ou favoriser la combustion d'autres matières.

**Classe 5.2 :** Peroxydes organiques

Toutes les matières organiques contenant une liaison. Oxygène – Oxygène

**Classe 6.1 :** Matières infectieuses

Les matières toxiques de la classe 6.1 sont des matières dont on sait qu'elles peuvent en quantité relativement faible, par une action unique ou de courte durée, nuire à la santé de l'homme ou causer la mort par inhalation, par absorption cutanée ou par ingestion.

**Classe 6.2 :** Matières qui, au contact de l'eau, dégagent des gaz inflammables

Toutes les matières contenant ou pouvant contenir des agents pathogènes :

- des micro-organismes viables (bactéries, virus, parasites, champignons)
- des micro-organismes recombinés susceptibles de transmettre des maladies infectieuses chez l'homme ou l'animal.[11]

**II.3 La signalisation**

Une signalisation spécifique s'applique à tous les moyens de transport : véhicule routier, wagon SNTF, containers. En fonction des quantités de matières dangereuses transportées, les véhicules doivent être signalés :

### II.3.1. Signalisation générale TMD

Plaques oranges réfléchissantes (dimension de 40 cm par 30 cm), placées à l'avant et à l'arrière, ou sur les côtés du moyen de transport.

Ou

Plaques oranges réfléchissantes indiquant le code matière et le code danger. Elle permet de connaître rapidement les principaux dangers présentés par la matière transportée.

Le numéro d'identification du danger (code danger) est situé dans la moitié supérieure du panneau.

Le numéro d'immatriculation de la matière (code ONU) est situé dans la moitié inférieure du panneau.[12]



Figure I. 1: les Plaques de la signalisation générale TMD

#### Le Code danger

Tableau I.3: Les chiffres de danger

	Premier chiffre Danger principal	Deuxième et troisième chiffres Dangers secondaires
0		Absence de danger secondaire
1	Matière explosive	
2	Gaz comprimé	Risque d'émanation de gaz
3	Liquide inflammable	Inflammable
4	Solide inflammable	
5	Matière comburante ou peroxyde	Comburant
6	Matière toxique	Toxique
7	Matière radioactive	
8	Matière corrosive	Corrosif
9	Danger de réaction violente ou spontanée	Danger de réaction violente ou spontanée
X	Danger de réaction violente au contact de l'eau	

- Dans la partie supérieure du panneau orange, un nombre indique le ou les dangers présentés par la matière. Le premier chiffre indique le danger principal, le deuxième et le troisième indiquent un ou des dangers secondaires [Voir tableau ci-dessus]. S'il n'y a pas de danger secondaire, le deuxième chiffre est un zéro. Ainsi 36 se lira :

« Inflammable, toxique ».

Le redoublement d'un chiffre indique une intensification du danger. Ainsi 33 se lira « très inflammable »).

Ce numéro peut également être précédé d'un X, ce qui signifie que la matière réagit dangereusement au contact de l'eau et que l'emploi de l'eau est rigoureusement interdit. Les secours et les personnes présentes lors d'un accident devra accroître leur vigilance par temps de pluie ou ambiance humide.

#### - Le code ONU

Dans la partie inférieure du panneau orange est inscrit un numéro à quatre chiffres. Il s'agit du numéro d'identification de la matière, conformément à une nomenclature de l'ONU, reprise au Journal officiel du 23

janvier 1975. Ainsi le code 2031 correspond à l'acide nitrique et le code 1017 au chlore.

Les numéros d'identification ne sont utilisés que dans les cas de transports de matières dangereuses en citerne ou en vrac solide.[13]



Figure I. 2:Un Camion-citerne avec étiquetages

II.3.2 par une plaque-étiquette de danger :

- Si la quantité transportée est telle que le transporteur doit faire apparaître sur son véhicule le code matière et le code danger de la matière transportée. Il doit alors apposer également les plaques-étiquettes représentant les pictogrammes des principaux dangers. Cette opération s'appelle le « placardage ».

- Si le transport se fait en colis, une étiquette de danger matérialisée également par un losange et reproduisant le symbole du danger prépondérant de la matière, doit être apposée sur l'emballage.[13]

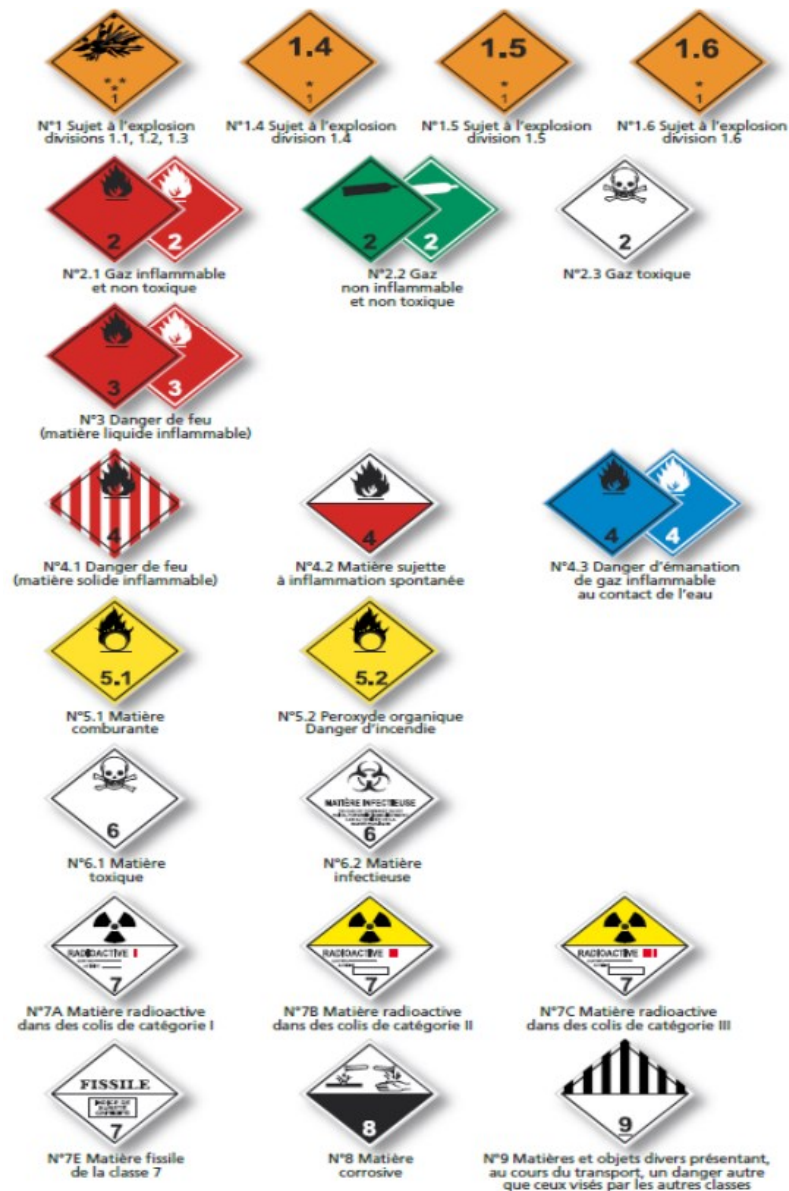


Figure I. 3:les étiquettes de danger

## II.4 Les différents types de transport de matières dangereuses

Les matières dangereuses peuvent être acheminées par différents modes de transport :

- **le transport par route (camions)** représente environ 76 % (1997) du tonnage transporté sur l'ensemble de la France ; [14]
- **le transport par voie ferrée** supporte environ 16 % (1997) du tonnage. Le transport de produits dangereux peut se faire en vrac (citerne) ou dans des emballages tels que jerricanes, fûts, sacs ou caisses ; [14]
- **le transport par voie d'eau (transport fluvial)** : bien qu'il ne représente que quelques pourcents du trafic, ce mode de transport est en véritable évolution. Les atouts de ce type de transport sont la grande capacité de transport, un prix attractif et un réseau non saturé ; Transport des matières dangereuses ; [14]
- **le transport par canalisations enterrées** (qui peuvent être aériennes sur de très faibles distances). Ce type de transport se compose d'un ensemble de conduites sous pression, de diamètres variables, qui sert à déplacer de façon continue ou séquentielle des fluides ou des gaz liquéfiés. Les canalisations sont principalement utilisées pour véhiculer du gaz naturel (gazoducs), des hydrocarbures liquides ou liquéfiés (oléoducs, pipelines), certains produits chimiques (éthylène, propylène, etc.) et de la saumure (saumoduc).[11]
- **Le transport par air est négligeable.** On peut noter cependant son utilisation pour le transport de matières radioactives ou biologiques, à destination médicale. Il fait l'objet d'une réglementation spécifique. À service équivalent, un seul convoi de 4 400 tonnes par voie fluviale représente 220 camions de 20 tonnes ou 3 à 4 trains de 110 wagons. [11]

## II.5 le risque de transport de matières dangereuses

Le risque de transport de matières dangereuses, ou risque TMD, survient en cas d'accident lors du déplacement de ces marchandises par voie routière, ferroviaire, fluviale ou par canalisations. Les transports de matières dangereuses se concentrent principalement sur les routes, représentant environ les deux tiers du trafic en tonnes-kilomètres, et sur les voies ferrées, qui couvrent environ un tiers du trafic.

En revanche, la voie maritime et la voie aérienne contribuent à moins de 5% du trafic total. Il est estimé que près de la moitié des accidents majeurs survenus au cours de la dernière décennie au sein de l'OCDE sont liés aux transports, en particulier ceux impliquant des gaz et des hydrocarbures.[13]

## II.6 Les causes d'accidents de TMD

Les causes d'accidents du transport des matières dangereuses sont multiples selon le type de transport.

**1-Le transport routier** : est le plus exposé, car les causes d'accidents sont multiples : état du véhicule, faute de conduite du conducteur ou d'un tiers, météo... Les produits transportés, les modes de stockage et de transport peuvent constituer un aléa supplémentaire. Ainsi, un combustible liquide, transporté dans une citerne, pourra, dans un virage, faire déplacer le centre de gravité et basculer le camion : 72% des accidents de TMD mettent en cause des camions citernes.

En moyenne chaque année, cent à deux cents accidents en France impliquent un véhicule transportant des matières dangereuses. Dans un tiers des cas environ la matière dangereuse joue un rôle prépondérant.[11]

**2-Le transport ferroviaire** : s'avère plus sécuriser (système contrôlé automatiquement, conducteurs asservis à un ensemble de contraintes, pas de risque supplémentaire dû au brouillard, au verglas, etc.). On dénombre cependant plusieurs incidents, dont les origines sont liées au matériel ou à des erreurs humaines. Les trains sont formés dans des gares de triage qui présentent des risques, en raison des quantités de matières dangereuses en attente de départ. C'est pour cette raison que ces gares sont dotées de plans de prévention spécifiques (réalisés par la SNCF) et éventuellement de plans de secours départementaux (gérés par le préfet). [11]

**3-Le transport par canalisation** : véritables autoroutes pour les matières dangereuses, les canalisations peuvent être à l'origine d'accidents majeurs. L'analyse des accidents déjà survenus montre que la cause principale est une détérioration de la canalisation par un engin de travaux publics (pelle mécanique) ou un engin agricole. En cas de défaut de protection, l'oxydation de la canalisation peut également provoquer un accident. Les accidents imputables au véhicule transportant la matière dangereuse sont en général déclenchés par une erreur humaine (écart sur accotement, assoupissement, manœuvre dangereuse, ...) ou par un comportement infractionnel (vitesse excessive, insuffisance d'arrimage, refus de priorité, ...). L'origine des accidents TMD causés par un tiers est le plus souvent la vitesse, les manœuvres dangereuses et les pertes de contrôle du véhicule tiers. Les causes externes sont principalement liées à la météo (chaussée verglacée ou glissante, intempéries). [11]

**Type d'accident** : les accidents sont classés suite aux conséquences :

Accidents type C : Il s'agit d'accidents de circulation au cours desquels il n'y a pas de matière dangereuse, ou elle a été libérée.

Accidents type M : Il s'agit d'accidents ayant l'une des caractéristiques suivantes :

- des blessures imputables à la matière dangereuse (intoxications, brûlures, malaises, etc.) ;

- un épandage de la matière supérieur à 100 litres (citernes, mais aussi colis, bouteilles, fûts, bidons, etc.) ;
- une fuite de gaz, quel qu'en soit le volume ;
- une explosion ou un incendie du chargement de matières dangereuses, ou d'une partie de ce chargement. [11]

## II.7 Les principaux dangers liés aux TMD

### - l'explosion :

Peut-être occasionnée par un choc avec production d'étincelles, par l'échauffement d'une cuve de produit volatil ou comprimé, par le mélange de plusieurs produits ou par l'allumage inopiné d'artifices ou de munitions. Les effets sont ressentis à proximité et aux alentours avec des risques de traumatisme direct ou par onde de choc. [15]

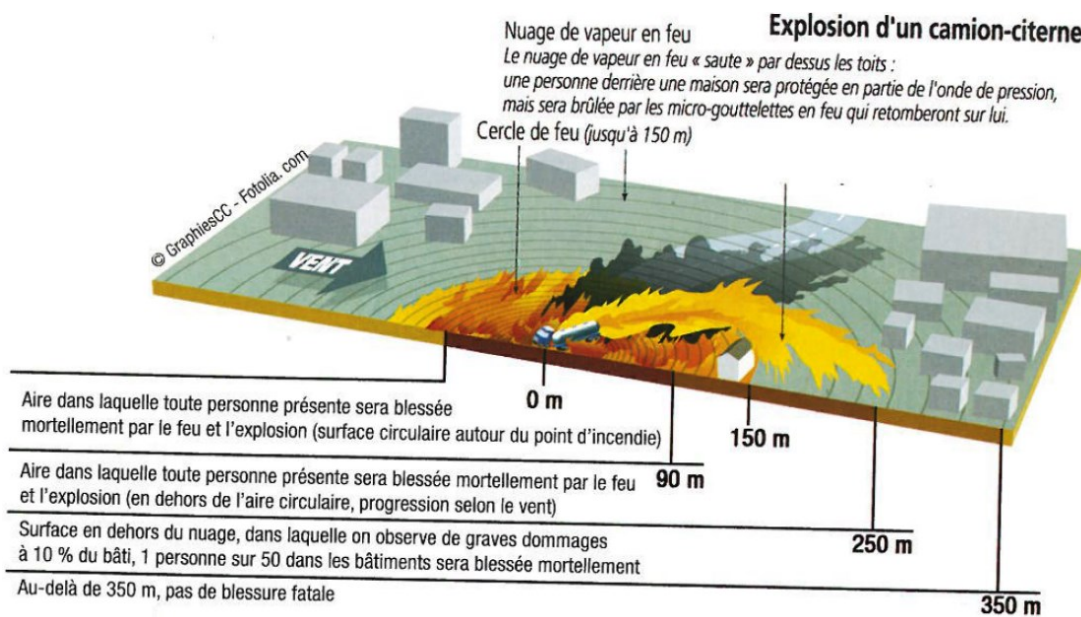


Figure I. 4: les conséquences d'explosion d'un Camion-citerne



**- l'incendie :**

Peut-être causé par un choc avec production d'étincelles, par l'échauffement anormal d'un organe d'un produit ou d'un organe du véhicule, par l'inflammation d'une fuite. L'incendie augmente les risques de brûlures ou d'asphyxie.[15]

- **la dispersion dans l'air (nuage toxique)**, l'eau et/ou le sol : d'une fuite de produits toxique ou résultant d'une combustion (même d'un produit non toxique). En se propageant, cela peut engendrer des intoxications par inhalation, par ingestion ou par contact et/ou des pollutions.[15]

**- BoilingLiquidExpandingVapor (BLEVE):**

BoilingLiquidExpandingVapor Explosion, ou Vaporisation explosive d'un liquide porté à ébullition.

Le BLEVE peut être défini comme la vaporisation violente à caractère explosif consécutive à la rupture d'un réservoir contenant un liquide à une température significativement supérieure à sa température d'ébullition à la pression atmosphérique.

Le phénomène peut survenir avec tout liquide, inflammable ou non, lors d'un apport thermique contraint dans une enceinte rigide et hermétique, qui lui fait dépasser la température d'ébullition du liquide (dans les conditions normales de température et de pression). Il peut se produire à froid (température ambiante, par exemple à la suite d'un accident ou d'une défaillance mécanique) ou à chaud (à la suite d'un incendie, faisant augmenter la température et la pression à l'intérieur du contenant).[16]

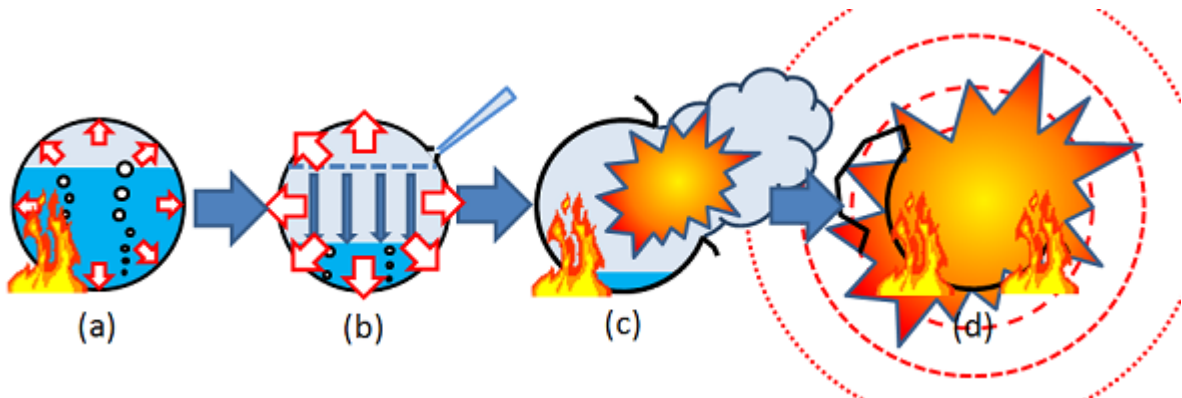


Figure I. 5:bleve d'un Camion-citerne

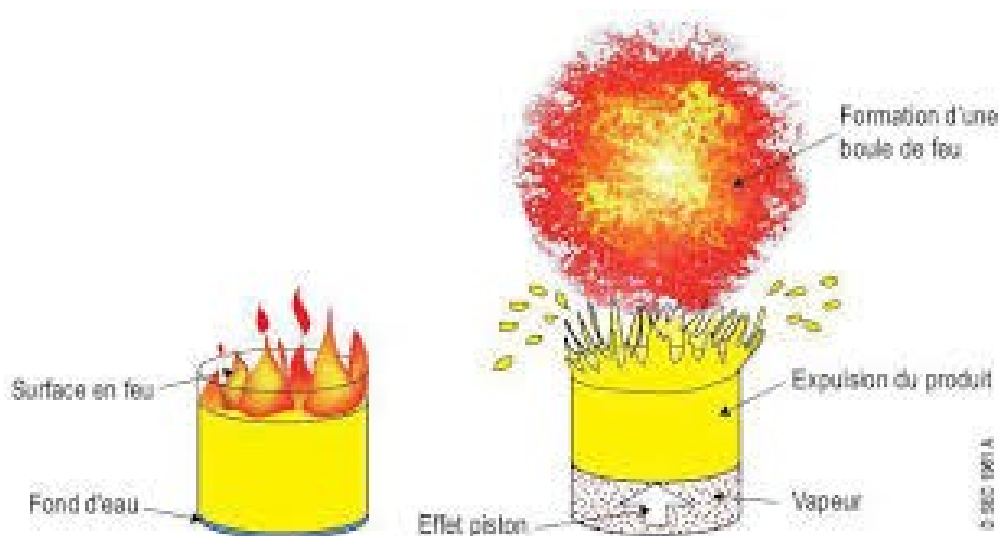


**-Flash fire :**

Un feu instantané est une flamme se déplaçant rapidement et se propageant à travers un combustible diffus, tel qu'un gaz ou une vapeur inflammable.[17]

**-Boil-over :**

Le Boil-Over ou Boilover est un phénomène explosif lié aux incendies d'hydrocarbures. En présence d'un réservoir d'hydrocarbures en flamme, l'eau utilisée pour lutter contre l'incendie peut s'accumuler sous celui-ci du fait de la différence de densité des deux liquides. La chaleur de l'incendie est communiquée à l'eau qui peut se vaporiser brusquement en projetant des gouttelettes d'hydrocarbure enflammées dans l'air sous la forme d'une boule de feu.[18]



**Figure I. 6:Boil over**

**-jet fire :**

Un jet enflammé, également appelé "jet-fire" ou "feu torche", est une flamme de diffusion turbulente qui résulte de la combustion continue d'un composé relâché avec une vitesse initiale élevée dans une direction privilégiée.

Les jets enflammés accidentels proviennent généralement de fuites sur des raccords, de parois perforées ou de ruptures de canalisations dans des installations de stockage de liquides inflammables comme les dépôts pétroliers. Lorsque le fluide relâché est un hydrocarbure gazeux, la flamme a une couleur jaune due aux suies incandescentes, tandis que l'hydrogène brûle avec une flamme quasi-invisible.

Pour les fluides liquides comme le kérosène, le diesel ou le méthanol, la vitesse de relâchement élevée permet la formation de gouttelettes qui s'évaporent, alimentant une flamme de diffusion lente. Les jets enflammés présentent des risques importants en termes

d'intensité thermique et de sévérité, et doivent donc être pris en compte dans l'évaluation des conséquences d'un accident potentiel dans ce type d'installation.[17]

## II.8 Conséquences possibles lors d'un accident de TMD

Les conséquences d'un accident impliquant des marchandises dangereuses sont généralement limitées dans l'espace, du fait des faibles quantités transportées, sauf en des éventualités très rares où les quantités en jeu peuvent être importantes, tels que celui des canalisations de transport de fort diamètre et à haute pression.

**Conséquences humaines** : elles désignent les personnes physiques qui sont directement ou indirectement exposées aux effets de l'accident. On les retrouve dans les espaces publics, à leur domicile ou sur leur lieu de travail. Le risque pour ces personnes :

Incendie de produits inflammables solides, liquides ou gazeux : effets thermiques (brûlures) qui peuvent être aggravés par des problèmes d'asphyxie et d'intoxication, liés à l'émission de fumées toxiques.[12]

Explosion : A proximité du sinistre et dans un rayon de plusieurs centaines de mètres, les blessures peuvent être très graves et parfois mortelles : brûlures, asphyxies, lésions internes consécutives à l'onde de choc et/ou traumatisme dus aux projectiles.[12]

Nuage toxique se propageant dans l'air, l'eau et/ou le sol : risque toxique par inhalation, par ingestion directe ou indirecte, par la consommation de produits contaminés (eau), par contact. Ces effets peuvent être ressentis jusqu'à quelques kilomètres du lieu du sinistre.[12]

**Conséquences économiques** : Les facteurs qui conduisent à un accident de TMD peuvent avoir un impact négatif sur le potentiel économique d'une zone. Lieu de l'accident, les routes, les voies ferrées, etc., peuvent être gravement endommagés ou détruits, avec des répercussions économiques désastreuses.[15]

**Conséquences environnementales** : un accident de TMD peut avoir des répercussions importantes sur les écosystèmes. On peut assister à une destruction partielle ou totale de la faune et de la flore. Les conséquences d'un accident peuvent également avoir un impact sanitaire, tels que la pollution des nappes phréatiques, des cours d'eau des réseaux d'eaux potables ou eaux usées ; et par voie de conséquence, un effet sur l'homme. On parlera alors d'un "effet différé".[15]

### III. Les scénarios catastrophiques de TMD

1 Un accident se produit sur une autoroute entre une voiture et un camion conteneur-citerne chargé de 23,4 l de disulfure de carbone (CS<sub>2</sub>).

Le choc engendre une sortie de route et un renversement du camion conteneur-citerne. Une fuite au goutte à goutte puis filaire, sous le calorifuge, est constatée. Les secours mettent en place un contenant sous la fuite pour limiter la dispersion du produit. Un périmètre de sécurité est mis en place et la circulation est interrompue sur l'autoroute. D'importants bouchons se forment et 1 500 poids lourd sont stockés sur une aire. L'autoroute est bloquée dans les 2 sens pendant 22 h. La population est confinée dans un rayon de 400 m. La conductrice de la voiture, gravement blessée, décède 2 jours plus tard.

L'usine chimique confirme l'absence de fuite au niveau de la citerne. Le goutte à goutte constaté pourrait être issu d'un suintement d'eau de ruissellement qui se serait infiltrée entre la citerne et le calorifuge et qui se serait écoulé lorsque la citerne s'est renversée. Les détecteurs portatifs utilisés et l'ensemble des mesures n'ont rien révélé. La citerne est dépotée dans le bac du CS<sub>2</sub> "hors norme" qui repart à la distillation. Le transport doit se faire soit à partir du camion équipé d'une rétention de 20 m<sup>3</sup> avec un fond d'eau sur lequel la citerne est posée, soit après grattage de la citerne sur un châssis habituel. Le dépotage comme l'emportage se font sous inertage à l'azote avec contrôle du taux d'O<sub>2</sub>. [19]

2 Une collision se produit entre une voiture, un Camion-citerne transportant 34 m<sup>3</sup> de carburant et un camion-plateau. Le Camion-citerne se renverse et s'enflamme. Un important panache de fumée noire est visible à plusieurs kilomètres. Les hydrocarbures se déversent au sol sur 50 m.

La circulation est interrompue dans les 2 sens entraînant des bouchons sur 5 km. Les secours établissent un tapis de mousse. Ils éteignent l'incendie après avoir mis en œuvre plus de 1 000 l d'émulseur. Le conducteur du Camion-citerne est tué. Celui de la voiture est gravement brûlé. Le chauffeur du camion-plateau et un passager sont blessés plus légèrement. [20]

3 Un Camion-citerne transportant du combustible pour avions s'enflamme puis explose, sur l'autoroute métropolitaine 40, à la suite d'un accident avec d'autres véhicules. Lors du carambolage, la citerne s'enflamme et l'incendie se propage aux autres véhicules. Un épais panache de fumées noires se dégage. Les secours évacuent les bâtiments à proximité.

L'autoroute et les voies de service sont fermées dans les 2 sens de circulation. Les transports publics sont impactés par la coupure. Le carburant contenu dans la citerne s'écoule dans les égouts. L'autoroute reste fermée pour une durée indéterminée.

Le chauffeur d'un autre camion décède et 6 personnes sont blessées. De nombreux bris de vitres sont constatés sur les bâtiments à proximité de l'autoroute.

Le mauvais entretien et l'état mécanique déficient du véhicule sont à l'origine de l'accident. [21]

## **IV. Réglementation et normes**

Décret exécutif n° 90-79 du 27 février 1990 portant réglementation du transport de matières dangereuses.[22]

Décret présidentiel n° 90-32 du 23 janvier 1990 fixant les règles d'organisation et de fonctionnement du conseil supérieur de la magistrature (Rectificatif).

J.O n° 04 du 24 janvier 1990.[22]

Décret exécutif n° 90-78 du 27 février 1990 portant réglementation du transport de matières dangereuses (rectificatif).

J.O. n° 10 du mercredi 7 mars 1990.[22]

## Conclusion

En conclusion, ce chapitre a examiné en détail la gestion des risques associés au transport des marchandises dangereuses. Nous avons exploré les concepts fondamentaux tels que la notion de risque, de danger et d'accident, ainsi que les normes et directives internationales telles que les normes ISO 31000 et IEC 31010 qui guident la gestion des risques dans ce domaine.

Nous avons également analysé les scénarios catastrophiques qui peuvent survenir lors du transport des marchandises dangereuses, ainsi que les normes concernant les méthodes d'analyse des risques utilisées pour évaluer et atténuer ces scénarios. Ces méthodes sont cruciales pour identifier les risques potentiels, prendre des décisions éclairées et mettre en place des mesures préventives efficaces afin d'assurer la sécurité des opérations.

Cependant, face à la complexité croissante des scénarios catastrophiques et à l'évolution des risques, il est devenu impératif d'explorer de nouvelles approches et technologies pour renforcer la maîtrise des risques. Dans ce contexte, les nouvelles technologies telles que l'intelligence artificielle (IA) et l'Internet des objets (IoT) jouent un rôle crucial.

L'IA peut être utilisée pour analyser de vastes ensembles de données en temps réel, détecter les tendances et les anomalies, et même prédire les risques potentiels avant qu'ils ne se produisent. L'IoT, quant à lui, permet la collecte de données en temps réel à partir de capteurs intégrés dans les équipements et les infrastructures, offrant ainsi une visibilité et un contrôle accrus sur les opérations.

En intégrant ces nouvelles technologies dans les stratégies de gestion des risques, les organisations peuvent améliorer leur capacité à anticiper, prévenir et répondre aux scénarios catastrophiques, assurant ainsi la sécurité des personnes, des biens et de l'environnement dans le domaine du transport des marchandises dangereuses.

# **Chapitre 02**

## **L'intelligence artificielle et l'internet des objets**

## Introduction

Par la révolution de l'industrie 4.0, l'opération des systèmes industriels avancement en tirant parti de l'intelligence artificielle (IA) ainsi que de l'internet des objets (IOT). Les systèmes basés sur l'IA ou bien l'IOT améliorent les industries en automatisant les tâches répétitives et en améliorant l'efficacité globale tout en minimisant l'intervention de l'être humain. Cependant, d'un point de vue de la sécurité, l'exploitation d'un système utilisant l'IA sans interaction humaine soulève des préoccupations quant à sa fiabilité. Les développements récents ont rendu impératif l'établissement d'un système collaboratif entre les humains et l'IA, connu sous le nom d'Intelligent Augmentation (IA). L'industrie 5.0 se concentre sur le développement de systèmes basés sur l'IA qui facilitent la collaboration entre les humains et l'IA.

Du présent chapitre représente l'importance de l'IA ainsi que de l'IOT et leurs applications dans le domaine de la sécurité industrielle.

## I. Intelligence artificielle

### INTRODUCTION

L'intelligence artificielle, en constante évolution, ne cesse de repousser les frontières de ce que nous pensons possible. Chaque jour, elle assimile et développe les capacités cognitives humaines, parfois même en les surpassant. Un exemple marquant est celui d'AlphaGo Zero de Google, qui en seulement trois jours, a émergé comme un maître du jeu de Go, battant à la fois le champion du monde et les IA préexistantes dédiées à ce jeu. Ces exploits sont le résultat d'un perfectionnement quotidien des techniques et des modèles appliqués dans le domaine de l'intelligence artificielle.

### I.1 Qu'est-ce qu'une intelligence artificielle ?

- **Définition 1** : L'intelligence artificielle est une discipline de l'informatique qui a pour but de créer des machines intelligentes, en "opposition" avec l'intelligence naturelle des êtres vivants. Le terme a beaucoup évolué au fil du temps, il englobe dorénavant toutes les idées visant à permettre à une machine de pouvoir émuler les capacités cognitives de l'Homme, et de les surpasser. Ce terme "d'intelligence artificielle" voit le jour en 1956 après les nombreux travaux débutés post Seconde Guerre Mondiale et constitue l'un des plus récents champs d'études parmi les sciences et l'ingénierie. Cela fait suite aux nombreuses inventions au fil des siècles permettant à des machines de calculer que l'hypothèse qu'elles puissent penser et agir par elles-mêmes virent le jour également.[1]

- **Définition 2** : L'intelligence artificielle est « un domaine technique et scientifique consacré aux systèmes techniques qui génèrent des sorties telles que du contenu, des prévisions, des recommandations ou des décisions pour un ensemble donné d'objectifs définis par l'homme ».[2]

## I.2 Historique de l'intelligence artificielle

L'histoire de l'intelligence artificielle est parsemée de succès, de déceptions et de prédictions non réalisées. Dès 1950, Alan Turing tente d'établir un critère permettant de juger de l'intelligence d'une machine à travers le test dit « de Turing », il prédisait qu'en l'an 2000 personne ne pourrait distinguer les réponses données par un homme ou un ordinateur. La naissance à proprement dit de l'intelligence artificielle date de l'été 1956 sur le campus de Dartmouth College aux USA durant lequel une dizaine de chercheurs définissent ce nouveau domaine de recherche, et parmi eux John Mc Carthy et Marvin Lee Minsky qui co-fondent en 1959 le groupe d'intelligence artificielle du MIT (MIT AI Lab) grand artisan du développement de cette discipline (Russell & Norvig, 2010).

Jusqu'au milieu des années 70, c'est l'euphorie, la recherche n'a pas de mal à trouver du financement et les espoirs sont grandissants. Certains experts prédisent même que « des machines seront capables, d'ici 20 ans, de faire le travail que toute personne peut faire ». Malheureusement les résultats ne seront pas au rendez-vous, principalement à cause d'un manque de maturité des algorithmes et aux faibles capacités du « hardware » de l'époque. Les principaux financeurs se désengagent des différents projets et la discipline connaîtra un hiver qui durera jusqu'aux années 90.

En parallèle, un nouveau type de solution apparaît, c'est le « système expert » qui est basé sur un ensemble de règles configurées par des experts humains. Il connaîtra un succès certain avec par exemple, dans le domaine médical MYCIN qui contenait 450 règles, ce système réussissait à diagnostiquer à un niveau proche des experts humains. Ces systèmes seront progressivement adoptés par l'industrie dans les années 80 (Russell & Norvig, 2010).

A partir de 1987, l'intelligence artificielle adopte les méthodes scientifiques, ce qui va accélérer les progrès en la matière. La victoire du superordinateur d'IBM « Deep Blue » sur le champion des échecs Garry Kasparov en 1997 marque un premier tournant en matière de progrès de l'intelligence artificielle (Russell & Norvig, 2010). Les années suivantes seront marquées par l'explosion de données disponibles, qui, conjuguées aux progrès énormes en matière de puissance de calcul vont booster cette discipline tout au long des années 2000. La démonstration de la solution actuelle d'IBM « Watson » qui gagne aux jeux de Jeopardy en 2011, et l'an dernier celle de Google « AlphaGO Zero » au jeu de go en sont de belles illustrations. [3]



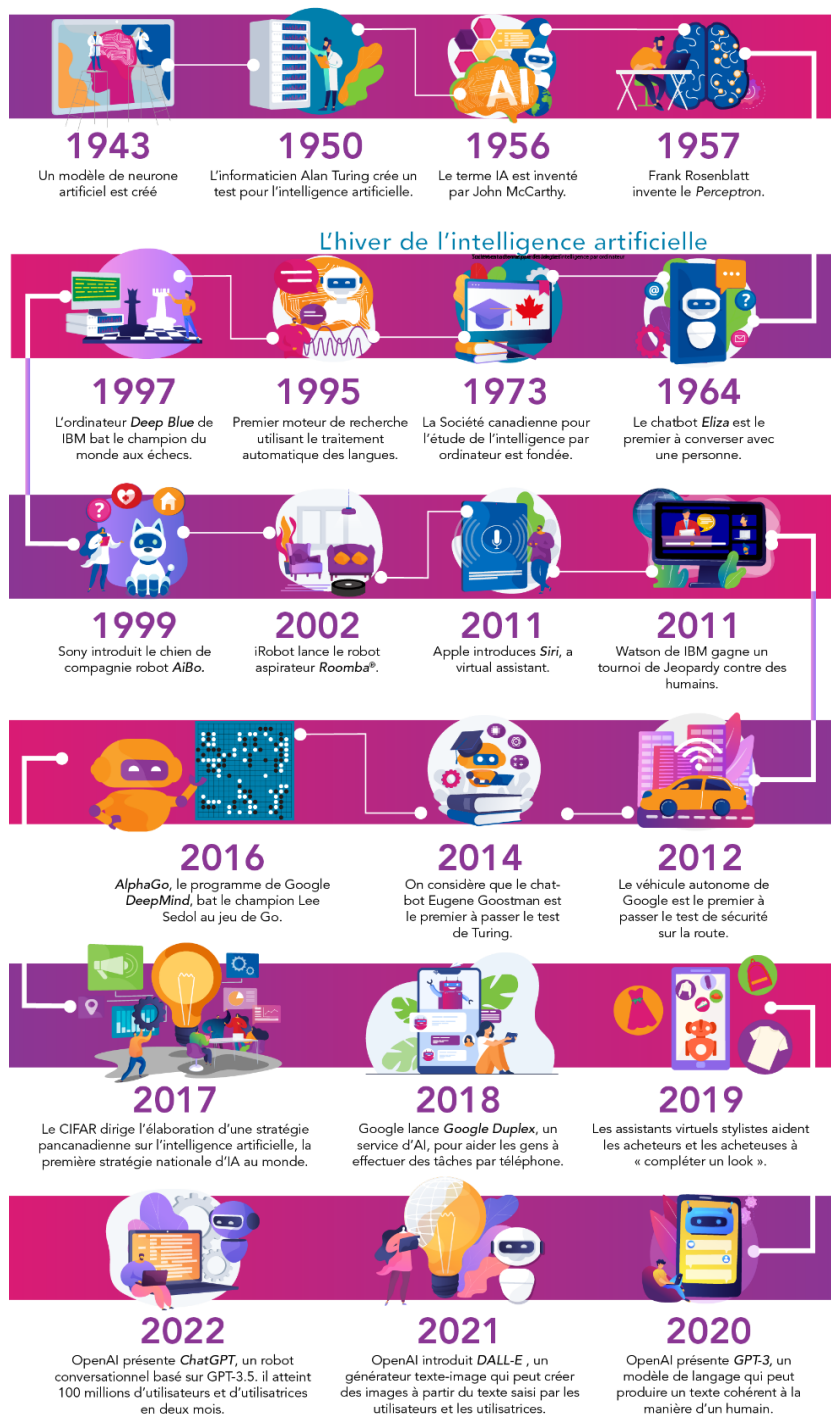


Figure II. 1:Frise chronologique de l'IA

### I.3 Les types d'intelligence artificielle (IA)

Les types d'intelligence artificielle (IA) peuvent être catégorisés en plusieurs catégories en fonction de leurs capacités et de leurs applications.

**Intelligence Artificielle Étroite (ANI) :** Aussi connue sous le nom d'IA faible, cette forme d'IA est spécialisée dans des tâches spécifiques et ne possède pas la capacité d'apprentissage ni la compréhension générale du contexte comme le font les humains. Elle est conçue pour effectuer une seule tâche de manière performante, mais limitée dans sa polyvalence.[4], [5]

L'ANI est le type d'IA le plus simple à identifier, déjà utilisé par la plupart des individus.

Quelques exemples d'ANI :

Les voitures sans conducteur : les voitures sans conducteur n'ont ni volant ni pédales. Elles fonctionnent avec des cartes en 3D et sont contrôlées par un Chauffeur Google.

Les appareils à commande vocale : de Siri à Alexa, la plupart des consommateurs possèdent et utilisent quotidiennement une interface ANI via des appareils intelligents.

Les filtres de messagerie : toutes les boîtes de réception, sinon la plupart, offrent aux utilisateurs la possibilité de trier des spams et de signaler des messages spéciaux.

**Intelligence Artificielle Forte (AGI) :** Contrairement à l'ANI, l'AGI, également appelée IA générale, vise à reproduire l'intelligence humaine de manière plus globale. Les systèmes AGI sont capables de gérer des tâches complexes et variées, avec une capacité d'apprentissage et de compréhension plus étendue.[4], [5]

**Intelligence Artificielle Générative :** Ce type d'IA se concentre sur la génération de contenu, que ce soit du texte, des images, des sons ou des vidéos. Elle est utilisée pour créer de manière autonome des éléments artistiques ou des contenus visuels.[6]

En résumé, les principaux types d'IA incluent l'Intelligence Artificielle Étroite spécialisée dans des tâches spécifiques, l'Intelligence Artificielle Forte visant à reproduire l'intelligence humaine de manière plus globale, et l'Intelligence Artificielle Générative axée sur la création de contenu artistique.

## I.4 Comment fonctionne l'IA ?

En substance, l'IA analyse des données pour en extraire des schémas et formuler des prédictions. Pour ce faire, elle combine de grands ensembles de données au moyen d'algorithmes d'IA intelligents, ou définit des règles, pour permettre au logiciel d'apprendre de ces schémas tirés des données. Le système peut effectuer cette tâche à travers un réseau de neurones, lequel se compose de couches de nœuds interconnectés qui relaient l'information entre les différentes couches pour trouver des connexions et tirer du sens à partir des données.

Pour en comprendre pleinement le fonctionnement, il convient de décliner les concepts suivants :

**Apprentissage** : sous-domaine de l'IA, l'apprentissage machine permet aux machines d'apprendre à partir de données, d'identifier des schémas et de prendre des décisions sans programmation explicite à cette fin. Poussé à un niveau supérieur, ce sous-domaine devient l'apprentissage profond qui permet au logiciel d'IA de comprendre des schémas plus complexes en mobilisant des millions de points de données.[7]

**Raisonnement** : la capacité de raisonner est essentielle à l'IA en ce qu'elle permet à la machine d'imiter le cerveau humain. L'IA peut tirer des déductions selon les commandes reçues, ou d'autres informations disponibles, pour former des hypothèses ou élaborer des stratégies en réponse à un problème donné.[7]

**Capacité à résoudre les problèmes** : la capacité de l'IA à résoudre des problèmes repose sur la manipulation de données au moyen de techniques essais-erreurs. Elle suppose l'utilisation d'algorithmes pour explorer les divers chemins possibles pour trouver la solution la plus optimale à des problèmes complexes.[7]

**Traitement du langage** : l'IA utilise le traitement du langage naturel (ou NLP pour natural language processing) pour analyser des données sur le langage humain et les rendre compréhensibles pour l'ordinateur. Qu'est-ce que le NLP ? Le NLP renvoie à la capacité des ordinateurs à comprendre le langage humain, à l'interpréter et à le générer, par l'analyse de corpus de textes, l'analyse des sentiments et la traduction machine.[7]

**Perception** : l'IA balaie l'environnement à travers des capteurs, comme les sondes de température et les caméras. Connu sous le nom de vision artificielle, ce domaine de l'IA permet aux machines d'interpréter et de comprendre les données visuelles et sert à la reconnaissance d'images, la reconnaissance faciale ou la détection d'objets.[7]

## I.5 Intelligence Artificielle et Sécurité Industrielle

Dans le secteur industriel, l'IA est un atout de taille pour la santé et la sécurité des travailleurs. En effet, l'IA nous offre un énorme potentiel et des perspectives prometteuses pour la prévention et la sécurité en entreprise. Les métiers à risque et les travailleurs isolés du secteur industriel sont particulièrement concernés par cette évolution. Prévenir et limiter l'exposition aux risques afin d'éviter les accidents et d'optimiser la sécurité des travailleurs est le premier objectif des nouveaux dispositifs dotés d'une IA. Probablement ce chapitre, nous souhaitons mettre en lumière le lien entre l'IA, la sûreté et la sécurité industrielle.[8]

## I.6 Comment garantir la sécurité industrielle grâce à l'IA ?

Aujourd'hui accessible aux entreprises, les systèmes dotés d'une IA peuvent être utilisés en maintenance préventive afin de garantir la sécurité des travailleurs. Ainsi, l'IA peut :

Détecter des comportements inhabituels par le biais des images de vidéosurveillance grâce à la reconnaissance des visages, des objets ou des lieux, mais aussi grâce à des détecteurs de mouvements ;

Effectuer des rapports d'incidents et faciliter la transmission des informations ;

Réaliser des contrôles et certaines interventions.

Tous ces éléments permettent d'automatiser la collection de données telles que la localisation et la situation d'un individu et ainsi, de réduire les risques d'accidents et de maintenance. Les efforts de développement sont concentrés sur l'analyse des situations à risque. La détection des risques peut être liée :

À la présence d'une machine dans une zone piétonne ;

À la présence d'une personne dans une zone machine ;

À la vérification des équipements de protection ;

Au respect des normes de sécurité ;

Au bon usage des outils et du matériel.[8]

L'IA joue un rôle crucial en optimisant la sécurité des travailleurs, en prévenant les risques et en améliorant la productivité dans le secteur industriel parce qu'elle est capable d'anticiper les risques de réagir et d'apporter une solution en temps réel et réagir efficacement face aux situations dangereuses. Agir avant que la situation ne devienne risquée voire dangereuse, c'est tout l'intérêt de cette réaction instantanée. Comme on dit : il faut mieux prévenir que guérir. Et c'est exactement ce que propose l'IA en anticipant les risques.[8], [9]

Pour garantir la sécurité industrielle, l'IA agit sur tous les fronts. Contrairement à un humain, elle est capable d'agir sur une zone, tout en gardant son attention sur les autres. L'IA ne se contente pas de garantir la sécurité, elle l'optimise.

L'humain a toujours un rôle important dans la sécurité industrielle. Le responsable, ou préventeur, peut se faire accompagner par l'IA afin de gagner du temps et d'accomplir d'autres missions qui ne peuvent être confiées qu'à un humain. Pendant que l'IA s'occupe de contrôler les postures, les protections et les bons gestes, le préventeur peut se focaliser sur une tâche et augmenter sa productivité.[8]

En outre, l'IA contribue à la prévention des accidents en surveillant les postures, les équipements de protection et les gestes appropriés, permettant ainsi aux travailleurs de se concentrer sur des tâches spécifiques et d'augmenter leur productivité.[9]

### **Coût et productivité**

L'amélioration de la compétitivité est la première valeur ajoutée que peut apporter l'intelligence artificielle à l'industrie. En maîtrisant les données et donc les flux, l'entreprise peut organiser sa chaîne de production, intégrer de nouveaux processus, gagner en flexibilité, en efficacité, en productivité, pour répondre plus rapidement à la demande tout en optimisant ses coûts et ainsi accroître sa compétitivité. Grâce au machine learning, l'analyse des paramètres qui influencent la performance d'une ligne de production et la comparaison des données quantitatives et structurées recueillies sur site avec un pool de données de référence, permettent de faire des propositions d'optimisation des procédés de production. Par exemple en influant sur la vitesse, la consommation de matière ou l'énergie...

Au-delà de l'optimisation des processus de production, l'IA appliquée à l'industrie peut apporter une réponse concrète à la prévention et la gestion des pannes. Grâce aux capteurs connectés, il est désormais possible de détecter en temps réel une anomalie de fonctionnement ou une usure prématurée. La maintenance est réalisée par anticipation, avant même que la panne ne survienne et ce au plus près du besoin réel : c'est la maintenance prédictive des équipements. On évite ainsi les ruptures dans la chaîne de production, avec toutes les conséquences économiques qui en découlent. La prédiction des défaillances techniques remplace alors la maintenance programmée et répétitive, synonyme de surcoûts. La maintenance prédictive peut notamment s'appuyer sur le deep Learning. Cette méthode fonctionne sur le principe du réseau neuronal du cerveau et permet de produire des modèles de prédictions en se basant sur des données complexes comme des images ou des sons.[10]

### **L'IA dans la sécurité des installations**

Dans les opérations des installations industrielles, les modèles d'IA sont développés en utilisant les données disponibles ou les connaissances existantes. Par conséquent, ces modèles peuvent ne pas être formés pour tous les scénarios dans un environnement industriel dynamique. Cependant, assurer la sécurité de l'industrie nécessite une compréhension approfondie de la dynamique des systèmes et un raisonnement logique, en particulier lorsque

le processus s'écarte de son fonctionnement normal. En outre, l'IA doit se conformer aux réglementations et normes de sécurité lorsque les industries sont prêtes à remplacer les humains et à fonctionner avec une IA automatisée.[11]

L'IA est également au service du collaborateur dans ce qui touche à sa sécurité. Prévention des accidents, baisse de l'exposition à des situations dangereuses, diminution des charges physiques sont des exemples concrets d'applications des solutions connectées. Certaines assistances visuelles ont même pour objectif de ramener le risque d'erreur à zéro sur l'espace de travail en passant par le processus de « deep learning ». Tout écart détecté par l'algorithme, par rapport à une situation « normale », déclenche un signal d'alerte, permettant d'anticiper l'accident (telle que la présence d'une main en zone de coupe ou d'un outil sur la trajectoire d'un véhicule). Les comportements déviants peuvent aussi être analysés pour parfaire la formation et l'information des travailleurs sur les bonnes pratiques (ports des équipements de protection individuelle - EPI, temps de travail sans pause, somnolence, etc.).

### **Qualité et environnement**

La qualité est cruciale en industrie. Aucun fabricant ne souhaite connaître un jour un rappel de produits, nuisant fortement à sa réputation et à son business. Le zéro défaut est devenu la norme et l'industrie doit investir en technologies pour atteindre ce niveau d'exigence. Par exemple, le Smart Kitting, l'utilisation par un opérateur de lunettes et tablettes connectées capables de reconnaître automatiquement les pièces et composants nécessaires pour mener à bien sa mission, diminue le nombre d'erreurs humaines dans la préparation de commande ou d'approvisionnement, et accélère le rythme et l'efficacité de l'exécution de cette tâche.

En sortie de ligne de production, les contrôles de qualité des produits finis deviennent automatisés grâce à l'intelligence artificielle. Un grand volume de données de bonne qualité est nécessaire pour permettre à la machine et aux algorithmes de reconnaître un défaut. Le système d'alerte détecte par anticipation les dérives de production : la correction quasi immédiate devient possible. Ainsi la diminution du taux de retour et du coût du contrôle qualité constitue un véritable levier de performance économique, avec à la clé la satisfaction du client. La qualité se joue également tout au long de la chaîne de vie du produit, et il est aujourd'hui possible de suivre son parcours, de sa fabrication jusqu'à sa vente. Les informations recueillies, analysées et stockées permettent l'amélioration continue de la qualité du produit et une traçabilité totale.

Les exigences des consommateurs sont également des vecteurs d'amélioration continue de l'entreprise. En s'adaptant à la demande du marché, l'industrie conforte le consommateur ou le client dans sa décision d'achat. Et les leviers sont variés : qualité intrinsèque du produit, valeurs écologiques, éthiques ou encore sociétales. L'intégration de solutions connectées peut permettre de répondre aux enjeux RSE de l'entreprise industrielle. Sur le volet environnemental, l'Intelligence Artificielle est un atout précieux, en permettant notamment de rationaliser l'utilisation des matières premières et des ressources de l'usine (eau, énergie, etc.). Les indicateurs de réduction de consommation pourront par la suite être recueillis et communiqués pour participer au rayonnement de la démarche RSE de l'entreprise. Enfin,

l'industrie 4.0, dans sa mutation, est créatrice de nouveaux emplois, plus qualifiés et à haute valeur ajoutée. Travailler à l'usine n'est plus synonyme d'un travail pénible et rébarbatif mais devient un métier connecté.[10]

En effet, l'intégration de l'IA dans le domaine des télécommunications apporte des avantages significatifs en termes de sécurité, de sûreté et de transparence. Voici quelques détails sur la manière dont l'IA offre ces avantages :

1. Prévention proactive des menaces : L'IA peut analyser de vastes quantités de données en temps réel pour identifier les schémas et les anomalies qui pourraient indiquer des menaces potentielles. Par exemple, elle peut détecter des comportements suspects sur les réseaux, tels que des tentatives d'accès non autorisées, des tentatives de piratage ou des activités malveillantes.[12]

2. Détection des menaces : En plus de la prévention proactive, l'IA est capable de détecter les menaces en cours en analysant en temps réel les données de trafic réseau, les journaux d'événements et d'autres sources pertinentes. Elle peut repérer les attaques en cours et déclencher des alertes pour permettre une réponse rapide et appropriée.[12]

3. Analyse des comportements des utilisateurs : L'IA peut surveiller les schémas de comportement des utilisateurs et des appareils connectés aux réseaux de télécommunications. Elle peut détecter les comportements anormaux qui pourraient indiquer une compromission de sécurité, tels que des tentatives d'accès répétées, des changements soudains dans les habitudes de trafic ou des activités suspectes sur les comptes utilisateur.[12]

4. Amélioration de la sécurité des données : En utilisant des techniques d'apprentissage automatique, l'IA peut identifier et classer les données sensibles, ce qui facilite leur protection et leur sécurisation. Elle peut également détecter les tentatives d'exfiltration de données et aider à renforcer les mesures de sécurité pour prévenir les fuites de données.[13]

5. Gestion des incidents de sécurité : L'IA peut jouer un rôle crucial dans la gestion des incidents de sécurité en analysant les données en temps réel, en évaluant l'impact des incidents et en fournissant des recommandations pour atténuer les dommages et restaurer la sécurité du réseau.[13]

6. Transparence et responsabilité : En fournissant des analyses détaillées sur les menaces détectées, les décisions prises et les actions entreprises, l'IA favorise la transparence et la responsabilité dans la gestion de la sécurité des télécommunications. Les opérateurs et les responsables de la sécurité peuvent mieux comprendre les risques auxquels ils sont confrontés et prendre des décisions éclairées pour y faire face.[12]

En combinant ces capacités, l'IA contribue à renforcer la sécurité et la sûreté des réseaux de télécommunications, tout en améliorant la capacité des organisations à détecter, prévenir et répondre aux menaces de manière proactive.[14]

## II. Internet des objets

### INTRODUCTION

Le "Internet of Things" (IoT) représente un réseau mondial d'objets connectés à Internet, dépassant en nombre les appareils utilisés par les individus. Chaque objet dispose d'une adresse unique et est capable de transmettre des informations ainsi que de recevoir des commandes. Cette évolution marque une nouvelle phase pour Internet, permettant une amélioration significative de sa capacité. De plus, l'IoT ouvre la voie à une multitude de scénarios qui reposent sur l'interconnexion entre le monde physique et le monde virtuel.

#### II.1 Définitions d'Internet des objets

Il n'existe pas une définition standard et unifiée de l'Internet des objets, et certaines définitions concernent les aspects techniques de l'IoT, tandis que d'autres définitions évoquent l'utilisation et caractéristique

- **Définition 1** : L'IoT définit différentes solutions techniques avec un ensemble de caractéristiques identification des objets, capter, stocker, traiter, et transférer des données dans les environnements physiques .[15]

- **Définition 2** : La technologie IoT est considérée comme l'émergence du futur Internet, certains définir comme "un objet doté d'une identité et d'une personnalité virtuelles, opérant dans des espaces intelligents et en utilisant des interfaces intelligentes pour se connecter et communiquer dans une variété d'environnements d'utilisation". [15]

D'autres s'en tiennent au côté omniprésent de l'IoT, permettant aux gens de se connecter les uns aux autres, N'importe où, n'importe quand, n'importe quel objet. Ce nouveau paradigme informatique n'est plus basé sur les PC et les périphériques ordinateurs, mais sur les objets du quotidien en leur attribuant un capteur intégré Intelligence et capacité à communiquer sur Internet. [16]



## II.2 Composantes de l'IoT

Les composants l'IoT sont cinq. L'objet connecté est d'abord un objet qui a une fonction mécanique et/ou électrique propre, il peut soit être conçu directement connectable, soit il est déjà existant et la connectivité est rajoutée à posteriori. L'objet connecté a pour fonction de collecter des données de capteurs, de traiter ces données et de les communiquer à l'aide de d'une fonction de connectivité et de recevoir des instructions pour exécuter une action. Généralement ces fonctions de l'objet connecté nécessitent une source d'énergie, surtout quand les données sont prétraitées directement dans l'objet. [23]

- **Capteur** est le composant qui transforme une information physique (température, pression, débit...) en un signal électronique. Il en existe plusieurs types selon l'information que l'on souhaite récupérer. Parmi les types de capteurs les plus utilisés :

Luxmètre : mesure la luminosité (un éclairage public qui s'allume à la tombée de la nuit)

Thermomètre : mesure la température (un thermostat connecté qui rallume le chauffage en deçà d'un certain niveau)

Hygromètre : mesure l'humidité (pour savoir quand irriguer des cultures)

Accéléromètre : mesure la vitesse et les chocs (une alarme d'urgence se déclenche si votre voiture a eu un accident)

Gyroscope : mesure la rotation (permet à un drone ou une torpille de garder son cap)

Le capteur peut être physiquement séparé (juste relié par un câble) du "cerveau" du devise, le micro-ordinateur.[23]

- **Réseaux de capteurs** Afin de satisfaire les besoins de communication entre eux, les capteurs sont équipés de dispositifs sans fil pour l'émission et la réception de données. Cela ne suffit cependant pas à Chapitre I généralité sur l'internet des objets 8 rendre un ensemble de capteurs accessibles ou du moins de manière interopérable, transparente et simplifiée pour cela, les capteurs doivent aussi s'organiser ce qui caractérise un réseau de capteurs, c'est que ses éléments sont de très petits appareils, dotes de capacités de transmission sans fil.[15]

- **Énergie** La plus importante contrainte à laquelle sont soumis les restes aux capteurs concernant l'énergie. L'autonomie temporelle des nœuds s'évalue en termes d'années.[15]

- **Actionneurs** Les actionneurs sont des dispositifs qui transforment une donnée digitale en phénomène physique pour créer une action, ils sont en quelque sorte l'inverse du capteur. Exemple d'actionneurs : Afficheurs, Alarmes, Caméras, Haut-parleurs, Interrupteurs, Lampes, Moteurs, Pompes, Serrures, Vannes, Ventilateur, Vérins.[15]

- **Connectivité** (couche de réseau) La connectivité de l'objet est assurée par une petite antenne Radio Fréquence qui va permettre la communication de l'objet vers un ou plusieurs réseaux. Elle explique comment les données sont transférées et traitées pour assurer une

communication transparente entre les appareils connectés, les capteurs, le cloud et les actionneurs. Pour que cela fonctionne efficacement, ces éléments doivent être interconnectés afin de comprendre les données et de répondre par une action appropriée. C'est là que les protocoles IoT et les passerelles IoT entrent en jeu. Les protocoles IoT fournissent un moyen de transport pour les données collectées par les capteurs. Les données passent ensuite par une passerelle IoT qui collecte et traduit les données reçues à travers les protocoles.[24]

### **II.3 Qu'est-ce que l'IoT industriel (IIoT) ?**

L'Internet des Objets Industriel (IIoT) désigne la technologie connectée à Internet que l'on intègre aux réseaux afin de créer un écosystème industriel plus efficace, précis, rentable et productif, mais aussi plus visible pour pouvoir le surveiller plus facilement.

L'IIoT est constitué d'un vaste ensemble d'appareils, de capteurs et d'actionneurs connectés qui collectent, communiquent et coordonnent leurs données. Ces informations sont ensuite injectées dans des systèmes d'analyse afin d'améliorer la production industrielle et d'optimiser les revenus. L'IIoT résout des problèmes de contrôle complexes au sein d'un réseau de systèmes, de plateformes et d'applications en utilisant une technologie embarquée qui communique et partage des données en temps réel.

L'évolution des technologies réseau a ouvert la voie à l'industrie 4.0 et à l'IIoT. Les opérateurs exploitent la connectivité et l'automatisation avancées pour pallier les manques dans les processus industriels traditionnels et surmonter les complexités liées aux ressources, au transport et à la chaîne d'approvisionnement. [17]

### **II.4 L'importance d'Iot a l'industrie**

Les avantages d'IoT dans les applications commerciales et industrielles sont nombreux. La plupart d'entre eux sont axés sur l'efficacité - non seulement parce que des opérations efficaces permettent de réduire les coûts et notre impact sur la planète, mais aussi parce que, dans certains cas, l'efficacité d'un processus donné, ou la fourniture d'informations et l'automatisation des processus, est essentielle à la mission. Dans de nombreux cas, des vies en dépendent.[17]

#### **La gestion des identités et des accès**

La gestion des identités et des accès dans le contexte de l'Internet des Objets (IoT) repose sur l'utilisation de certificats numériques et de la PKI (Infrastructure à Clés Publiques).

Les certificats numériques et la PKI permettent d'authentifier les appareils IoT, garantissant ainsi que seuls les dispositifs autorisés et les utilisateurs légitimes ont accès aux ressources appropriées; systèmes et aux données sensibles. Cette authentification renforce la sécurité en empêchant l'accès non autorisé et permet de limiter les risques de cyber menaces, de piratage et de fuites de données, renforçant ainsi la protection des infrastructures industrielles contre les attaques malveillantes.[17], [25]

## Maintenance prédictive : le principal projet de l'IoT dans l'industrie

L'un des principaux avantages de l'utilisation du site IoT est la maintenance prédictive, qui implique une surveillance continue des systèmes et des processus afin d'identifier les indicateurs clés des problèmes avant qu'ils n'entraînent un temps d'arrêt ou une panne du système.

Traditionnellement, la notification de la nécessité de la maintenance d'une machine ou d'un système survenait lorsque l'équipement tombait en panne, que les opérations étaient interrompues ou qu'un sinistre se produisait - entraînant des pertes de revenus, des dommages environnementaux, des amendes, des cauchemars en matière de relations publiques et une perte de confiance du public.

L'avantage d'IoT est l'automatisation de la détection et des rapports, car le personnel ne peut tout simplement pas surveiller manuellement chaque processus. Avec la maintenance prédictive activée par IoT, les équipes informatiques et opérationnelles sont averties lorsque certaines conditions indiquent la nécessité d'envoyer du personnel sur un site pour la maintenance. [26]

Il en existe trois types de la maintenance des équipements industriels :

La maintenance curative : s'occuper d'un problème dès son apparition;

La maintenance préventive : prévenir les pannes et préparer un ensemble d'opérations (bémol, un coût important avec le changement de pièces encore exploitables);

La maintenance prédictive : collecter et analyser des données liées au fonctionnement des machines pour anticiper une panne.

Cette dernière, aussi appelée maintenance prévisionnelle, permet de prédire les défaillances des outils en surveillant leur fonctionnement propre. L'idée : étudier constamment l'état de chaque équipement. Il est ainsi possible de connaître les éventuelles interventions de maintenance nécessaires avant qu'un problème survienne.

Associé à la GMAO (Gestion de Maintenance Assistée par Ordinateur), l'IoT sert donc à prévenir les pannes des machines industrielles. Une stratégie de maintenance prédictive s'avère alors primordiale pour les industries ![27]

## Automatisation

Dans de nombreux secteurs, le monde s'oriente vers une automatisation basée sur le site IoT. Cela est particulièrement important dans des applications telles que les systèmes industriels et la fabrication.

Prenons, par exemple, l'importance cruciale de la détection de la surchauffe des systèmes inflammables ou explosifs qui peuvent être automatiquement arrêtés si certaines conditions sont détectées. Un autre exemple clé est la fabrication de pièces automobiles et de dispositifs

médicaux, qui doivent être construits avec précision pour fonctionner parfaitement dans le monde réel.

Les avantages que les solutions IoT apportent dans le domaine de l'automatisation de la fabrication comprennent plusieurs capacités que les humains ne peuvent offrir :

Les machines peuvent assembler les pièces avec plus de précision et de rapidité, ce qui réduit les erreurs lors de l'assemblage.

L'automatisation permet également à une usine de travailler de plus longues heures sans fatigue

Les robots peuvent détecter très rapidement des défauts qui ne sont pas nécessairement détectés par l'œil humain.

Parmi les autres exemples d'automatisation, citons la gestion intelligente du trafic pour améliorer la fluidité et acheminer rapidement les véhicules d'urgence à travers la ville ; la technologie des véhicules connectés, qui automatise le comportement et le freinage des véhicules pour plus de sécurité ; et les ventilateurs antigivres automatisés dans l'agriculture lorsque du givre est détecté.[26]

### **Amélioration des processus**

L'amélioration des processus est l'un des avantages essentiels des déploiements de l'Internet des objets, car l'amélioration des processus affecte chaque aspect des résultats d'une opération.[26]

Prenons l'exemple d'une usine de fabrication qui produit des pièces automobiles. Traditionnellement, la maintenance des équipements est effectuée selon un calendrier préétabli ou en réponse à des pannes signalées par les opérateurs sur le terrain. Cependant, ce mode de maintenance peut être coûteux en termes de temps d'arrêt non planifié et de remplacement prématuré des pièces.

En intégrant des capteurs IoT aux machines de production, il devient possible de collecter en temps réel des données sur les performances et l'état de santé de chaque équipement. Ces capteurs peuvent mesurer des paramètres tels que la température, la pression, les vibrations, les niveaux de fluides, etc.

Grâce à ces données, les algorithmes d'analyse prédictive peuvent détecter les signes avant-coureurs de défaillance ou de mauvais fonctionnement des machines. Par exemple, une augmentation anormale de la température d'un moteur pourrait indiquer un risque de surchauffe imminente.

En recevant ces alertes en temps réel, l'équipe de maintenance peut intervenir de manière préventive avant que la machine ne tombe en panne. Cela permet d'éviter les temps d'arrêt

imprévus, de réduire les coûts de réparation et de prolonger la durée de vie utile des équipements.

De plus, en analysant les données collectées sur une période plus longue, les gestionnaires peuvent identifier les tendances de performance et optimiser les processus de maintenance de manière proactive. Par exemple, ils peuvent ajuster les intervalles de maintenance en fonction des modèles de défaillance réels plutôt que de se fier à un calendrier fixe.

### **Réduction des coûts**

L'Internet des Objets (IoT) offre divers moyens de réduire les coûts dans différents secteurs. Voici quelques façons dont l'IoT peut contribuer à cette réduction des coûts :

1. Amélioration du temps de fonctionnement des systèmes : En surveillant en temps réel les performances des équipements, l'IoT permet de détecter les signes de défaillance imminente, réduisant ainsi les temps d'arrêt non planifiés. Cela se traduit par une production plus continue et une meilleure utilisation des ressources.[28]
2. Automatisation des processus : L'IoT permet d'automatiser de nombreuses tâches et processus, réduisant les besoins en main-d'œuvre et en ressources. Par exemple, la surveillance automatisée des conditions environnementales peut déclencher des actions correctives sans intervention humaine, réduisant les coûts opérationnels.[28]
3. Réduction du risque de défaillance et de perte de revenus : Grâce à la maintenance prédictive, l'IoT aide à prévenir les pannes, évitant ainsi les pertes de production et de revenus liées aux temps d'arrêt imprévus. Cela permet également d'éviter les coûts élevés de réparations d'urgence.[28]
4. Meilleure prise de décision : En fournissant des données en temps réel et des analyses avancées, l'IoT permet aux gestionnaires de prendre des décisions plus éclairées et stratégiques. Cela peut conduire à une allocation plus efficace des ressources et à des économies de coûts à long terme.[28]
5. Optimisation des ressources et réduction de la consommation : En surveillant et en analysant la consommation d'énergie, d'eau, de matières premières, etc., l'IoT aide les organisations à identifier les gaspillages et à optimiser l'utilisation des ressources, entraînant des économies de coûts significatives.[28]

La réalisation de ces objectifs implique un coût initial pour l'acquisition, la configuration et le déploiement du système IoT. Par conséquent, la clé pour toute organisation est d'examiner le retour sur investissement, c'est-à-dire la rapidité avec laquelle le temps et le coût de développement et de déploiement du système seront rentabilisés. [26]

### **Amélioration des connaissances**

IoT Les systèmes de l'Internet des objets sont souvent les yeux et les oreilles d'équipements et de processus distants, difficiles à atteindre ou largement distribués. C'est pourquoi certains des principaux avantages de l'internet des objets sont la visibilité à l'échelle du réseau et l'obtention rapide de données critiques à partir de systèmes informatiques périphériques, ce qui permet d'améliorer la compréhension.[26]

### **Adaptabilité**

L'Internet des objets (IoT) offre aux organisations une flexibilité essentielle dans un monde en constante évolution. Cette adaptabilité permet de répondre rapidement aux nouvelles exigences commerciales, aux besoins des clients et aux conditions changeantes. L'entrepreneuriat IoT, en identifiant les opportunités et en exploitant la technologie pour résoudre des problèmes réels, joue un rôle crucial dans la création de valeur et l'amélioration de l'efficacité opérationnelle.

En utilisant les bons outils, une organisation peut initialement déployer divers dispositifs connectés, tels que des affichages numériques, des stations de recharge de véhicules électriques, des kiosques de loterie, des véhicules connectés ou des applications de surveillance environnementale. Par la suite, elle peut exploiter la connectivité de ces systèmes pour effectuer des mises à niveau supplémentaires au fil du temps. Ces mises à niveau pourraient inclure l'amélioration des fonctionnalités, l'envoi de nouvelles configurations aux appareils ou encore le renforcement de la sécurité face aux menaces émergentes.[26]

L'entrepreneuriat IoT permet d'identifier des opportunités et de créer de la valeur en exploitant la technologie IoT pour résoudre des problèmes réels, améliorer l'efficacité et offrir une meilleure expérience utilisateur. Cela démontre comment l'IoT favorise l'adaptabilité en permettant aux entrepreneurs de s'ajuster rapidement aux besoins changeants du marché.[29]

### **Conformité réglementaire**

Dans de nombreux secteurs industriels, il existe des réglementations strictes en matière de sécurité et de protection des données. L'IoT peut aider les entreprises à se conformer à ces réglementations en mettant en œuvre des mesures de sécurité robustes et en documentant les processus de conformité.[30]

Les systèmes IoT, grâce à l'utilisation de capteurs, de passerelles et d'intelligence périphérique, permettent aux équipes de visualiser leurs systèmes, de recevoir des notifications en temps réel lorsque les mesures sont hors de portée et de produire des rapports rapidement. Cette capacité à fournir les bonnes données au bon moment est essentielle pour garantir la conformité réglementaire et la sécurité.[31]

Dans les industries, l'IoT est essentiel car il permet une surveillance continue des paramètres critiques, émet des alertes en cas de déviation et génère des rapports automatisés. Cela réduit

le risque d'erreurs humaines et assure une conformité stricte aux normes et réglementations en vigueur..[31]

## II.5 Domaines d'applications

L'Internet des Objets est utilisé dans divers secteurs tel que la sécurité industrielle l'agriculture, soins de santé, la domotique... etc.

### La sécurité industrielle :

Un défi majeur à reconnaître dans les écosystèmes IoT est de fournir une infrastructure fiable pour les milliards de dispositifs attendus et de délivrer les services prévus sans échouer de manière inattendue et catastrophique. Un système est considéré comme sûr en cas de défaillance s'il présente une ou plusieurs pannes inoffensives d'où IOT joue un rôle primordiale pour assurer la sécurité des systèmes en intervenant en temps réel et assurant la sécurité des employer des installations et de l'environnement.[17]

- **Sécurité des Employés**

L'IoT permet de surveiller en temps réel les conditions de travail et d'identifier les risques potentiels pour la sécurité des employés. Les capteurs IoT peuvent détecter des anomalies comme des fuites de gaz, des températures élevées ou des vibrations anormales, et alerter immédiatement les équipes de sécurité pour intervenir rapidement. En intégrant des dispositifs portables IoT, les entreprises peuvent suivre la localisation et l'état de santé des employés, assurant ainsi une réponse rapide en cas d'accident ou d'urgence. [18]

- **Sécurité des Installations**

Les installations industrielles bénéficient grandement de l'IoT grâce à la surveillance continue et à la maintenance prédictive. Les capteurs IoT peuvent surveiller les équipements en temps réel, détecter les signes de défaillance imminente et alerter les techniciens avant que les pannes ne surviennent. Cela permet non seulement de réduire les temps d'arrêt et les coûts de réparation, mais aussi de prévenir les accidents potentiels liés aux défaillances des équipements.[19]

- **Sécurité de l'Environnement**

L'IoT joue également un rôle crucial dans la protection de l'environnement en surveillant les émissions de polluants et en assurant la conformité aux réglementations environnementales. Les capteurs peuvent mesurer la quantité de l'air et de l'eau, détecter les fuites de substances dangereuses et déclencher des actions correctives immédiates. De plus, l'IoT peut aider à optimiser l'utilisation des ressources, réduire les déchets et minimiser l'empreinte carbone des opérations industrielles.[20]

### Environnement

Dans ce domaine, un rôle clé est joué par capacité à détecter et autogérer les phénomènes naturels, vent, Hauteurs des rivières, etc. De plus, une intégration transparente de ces données hétérogènes.[21]

**Industriel**

Dans le domaine de l'IoT industriel permettra un suivi complet des produits, En encadrant de la chaîne de production à la chaîne logistique de distribution conditions de fourniture, lutte contre la contrefaçon, la fraude et la criminalité économie transfrontalière.[15]

**Sécurité générale à l'échelle de tous les secteurs d'activité**

Outre le suivi des actifs physiques, l'IoT peut être utilisé pour renforcer la sécurité des collaborateurs. Les collaborateurs qui travaillent dans des environnements dangereux, tels que les mines, les puits de pétrole ou de gaz, et les usines chimiques ou les centrales électriques, par exemple, doivent être informés des événements dangereux qui peuvent les mettre en péril. Lorsqu'ils sont connectés à des applications reposant sur des capteurs IoT, ils peuvent être avertis des accidents ou en être secourus au plus vite. Les applications IoT sont également utilisées pour les dispositifs portables qui peuvent surveiller la santé humaine et les conditions environnementales. Les applications de ce type n'aident pas uniquement les personnes à mieux comprendre leur propre santé, elles permettent également aux médecins de surveiller leurs patients à distance.[22]

Afin de renforcer la sécurité de manière efficace, plusieurs types de capteurs sont disponibles pour la surveillance. Par exemple, les capteurs ambiants peuvent détecter la présence de produits chimiques dangereux, tandis que les capteurs de surveillance comportementale peuvent repérer les individus agissant de manière suspecte.



## **Conclusion**

En intégrant l'IA et l'IoT, les industries peuvent non seulement améliorer la sécurité des travailleurs en réduisant les risques d'accidents et d'incidents, mais aussi optimiser la maintenance prédictive et la gestion des actifs, ce qui conduit à une efficacité opérationnelle accrue. Cette synergie technologique permet également une meilleure conformité aux réglementations de sécurité, offrant ainsi une couche supplémentaire de protection. En conclusion, l'IA et l'IoT sont des piliers indispensables pour le futur de la sécurité industrielle, apportant des solutions robustes et intelligentes pour un environnement de travail plus sûr et plus efficace.

# **Chapitre 03**

## **Modélisation des scénarios catastrophiques**

## Introduction

Ce chapitre explore les risques associés au transport de gaz de pétrole liquéfié (GPL) par Camion-citerne, en se concentrant sur la modélisation des scénarios catastrophiques. Les spécifications techniques des Camions-citernes sont détaillées, ainsi que les mesures de sécurité intégrées. La modélisation avec le logiciel PHAST permet de simuler la dispersion des nuages de gaz, les incendies et les explosions, en utilisant des données climatologiques spécifiques. Les résultats montrent les distances d'impact potentielles et les conséquences sur l'environnement, la santé humaine et les infrastructures, soulignant l'importance de dispositifs de sécurité avancés pour prévenir de tels incidents.

### III.1 Description de Camion-citerne

#### III.1.1 Généralités sur les camions citerne

Le Camion-citerne est un véhicule utilisé pour le transport de liquides, de gaz ou encore de pulvérulents stockés en vrac. « Figure III.1 »

En raison de la diversité des matériaux liquéfiés, il existe différents modèles de remorques,

Les facteurs distinctifs des remorques-citernes comprennent : la forme de la citerne, le type de charge qu'une remorque transporte et la taille. D'autres facteurs distinctifs sont la capacité de réfrigération, la capacité de pressurisation et la résistance aux acides.



Figure III.1:Camion-citerne

### III.1.1.1 Les types les plus courants de Camion-citerne :

- Remorque-citerne de carburant.
- Remorque citerne de poudre en vrac.
- Remorque à tubes GNC (gaz naturel comprimé).
- Remorque-citerne GNL (gaz naturel liquéfié).
- Remorque-citerne GPL (gaz de pétrole liquéfié).

### III.1.1.2 Éléments inclus dans un Camion-citerne :

- Brise-lames intérieur pour le transport avec remplissage partiel.
- Pare-soleil en aluminium dans la partie supérieure du cylindre.
- Trou d'homme.
- Charge/décharge en zone arrière, sur le côté droit.
- Armoire de distribution en zone arrière.
- Autres: plaques ADR, extincteurs.

## Dispositifs de sécurité des camions-citernes

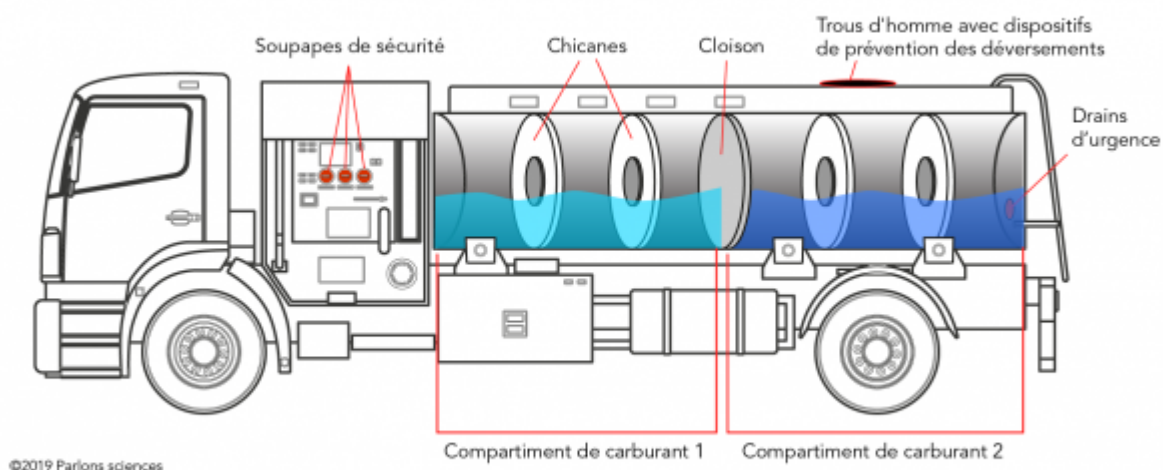


Figure III.2:dispositifs de sécurité des camions citernes

### III.1.2 Décryptage des Paramètres du Camion-citerne de Transport de GPL

#### III.1.2.1 Spécifications Techniques

Le Camion-citerne présenté dans cette étude est équipé d'un réservoir en acier haute tension, d'une épaisseur de 8 mm, permettant un stockage sécurisé du GPL. Les dimensions globales du véhicule sont de 11700 x 2490 x 3690 mm, avec un poids total en charge de 34000 kg et une capacité de chargement de 16000 kg. Le moteur diesel de 371 ch, conforme à la norme Euro II, assure la propulsion du véhicule, avec une vitesse d'avancement maximale de 90 km/h.

#### III.1.2.2 Performances Opérationnelles

Le Camion-citerne est conçu pour un usage efficace dans le transport de GPL, avec une capacité de réservoir de 35,5 CBM -calculateur de mètre cube pour expédition-. Le rapport de remplissage de 520 kg/m<sup>3</sup> garantit une utilisation optimale de l'espace de chargement, tandis que la soupape de sécurité, la jauge de niveau et d'autres équipements de série assurent un fonctionnement sécurisé et fiable.

#### III.1.2.3 Mesures de Sécurité

La sécurité est primordiale dans le transport de GPL, et le Camion-citerne est équipé d'une gamme complète de dispositifs de sécurité pour prévenir les incidents :

Boutons d'arrêt d'urgence : Positionnés le long de la citerne, ces boutons permettent une intervention rapide en cas d'urgence. Lorsqu'ils sont actionnés manuellement, ils ferment les vannes de fond du réservoir et mettent la pompe en mode d'arrêt, contribuant ainsi à prévenir les incidents.

Détecteur d'armoire fermée : Un système de détection vérifie si l'armoire de vannes est fermée, indiquant qu'il n'y a aucune intention de transférer du GPL. Dans cette situation, les

Vannes de fond se ferment automatiquement et la pompe passe en mode d'arrêt, renforçant la sécurité lors des périodes d'inactivité.

Frein de stationnement : Les vannes de fond ne peuvent être ouvertes que lorsque le frein de

Stationnement de la semi-remorque est activé, garantissant ainsi que les opérations de

Chargement et de déchargement se déroulent dans des conditions sécurisées.

Système anti-redémarrage : Un dispositif de sécurité empêche le démarrage du véhicule si

L'armoire des vannes est ouverte. En cas de tentative de démarrage dans cette situation, le

Système agit sur les freins de la semi-remorque pour immobiliser le véhicule. Pour éviter tout risque de freinage brusque sur la route, ce système n'entre en action que lorsque la vitesse du véhicule est inférieure à 5 km/h, réduisant ainsi les risques potentiels pour la sécurité.

Ces dispositifs renforcent la sécurité du Camion-citerne de manière proactive, offrant une protection supplémentaire contre les incidents potentiels tout au long de son utilisation.

Malgré ces dispositifs de sécurité le nombre d'accident des camions citernes survient souvent causant ainsi des conséquences importantes.

## III.2 Modélisation des scénarios avec logiciel PHAST :

### III.2.1 Description des données nécessaires :

#### III.2.1.1 Conditions atmosphériques :

La dispersion d'un nuage de vapeurs de GNL est principalement influencée par la force et la direction du vent, la stabilité atmosphérique, ainsi que dans une moindre mesure, par l'humidité relative et la température. Lors d'une libération continue, la présence d'un vent fort contribuera à la dilution du nuage formé.

Les données météorologiques utilisées dans cette étude sont basées sur les données climatiques de la wilaya D'Oran :

**Tableau III. 1:Les données météorologiques**

Paramètre	Valeur
Température moyenne (°C)	27
Humidité relative moyenne (%)	80%
Vitesse moyenne du vent (m/s)	4
Direction dominante du vent	N/E
Classe de stabilité atmosphérique	B/C

**III.2.1.2 Scénario :**

**III.2.1.1.1 Description des évènements redoutés :**

L'évènement redouté est une rupture complète et instantanée du tank suite a un accident du camion. Le scénario étudié est donc la perte de confinement d'une quantité importante d'hydrocarbures liquides GPL au niveau d'une station de service.

Les phénomènes dangereux redoutés sont un feu de flaque en cas d'ignition immédiate et une explosion retardée (VCE) ou un feu flash suite à l'évaporation de la flaque et à une ignition retardée.

Le tank est supposé plein et l'alimentation coupée.

**III.2.1.1.2 Caractéristique d'équipement étudié :**

The screenshot shows a configuration window for a tank. Under the 'Material' tab, 'Material' is set to 'GPL' and 'Material to track' is also 'GPL'. A checkbox 'Specify volume inventory?' is checked. The 'Mass inventory' is 28564,3 kg and 'Volume inventory' is 0 m³. Under the 'Phase' tab, 'Specified condition' is '(Pressure/temperature)'. 'Temperature' is 27 degC and 'Pressure (gauge)' is 19 bar. 'Fluid state' is 'Liquid' and 'Liquid mole fraction' is 1.

**Figure III.3:caractéristique d'équipement étudié**

**III.2.1.1.3 Paramètres finaux de la fuite :**

Discharge Results (after atmospheric expansion)

Path	Scenario	Weather	Temperature [degC]	Liquid mass fraction in material [fraction]	Droplet diameter [um]	Velocity [m/s]
Study\Pressure vessel	Catastrophic rupture	Category 4/B-C	-36,6912	0,675132	107,918	38,5752

**Figure III.4:discharge résultats**

### III.2.2 Modélisation de la dispersion de nuage de polluant :

Comme étant le GPL s'évapore a l'aire libre le nuage de gaz peut atteindre des distances dépassant les 40 m avec une concentration de 9250ppm dans une zone a forte présence d'ignition d'où ça facilite l'explosion du Camion-citerne.

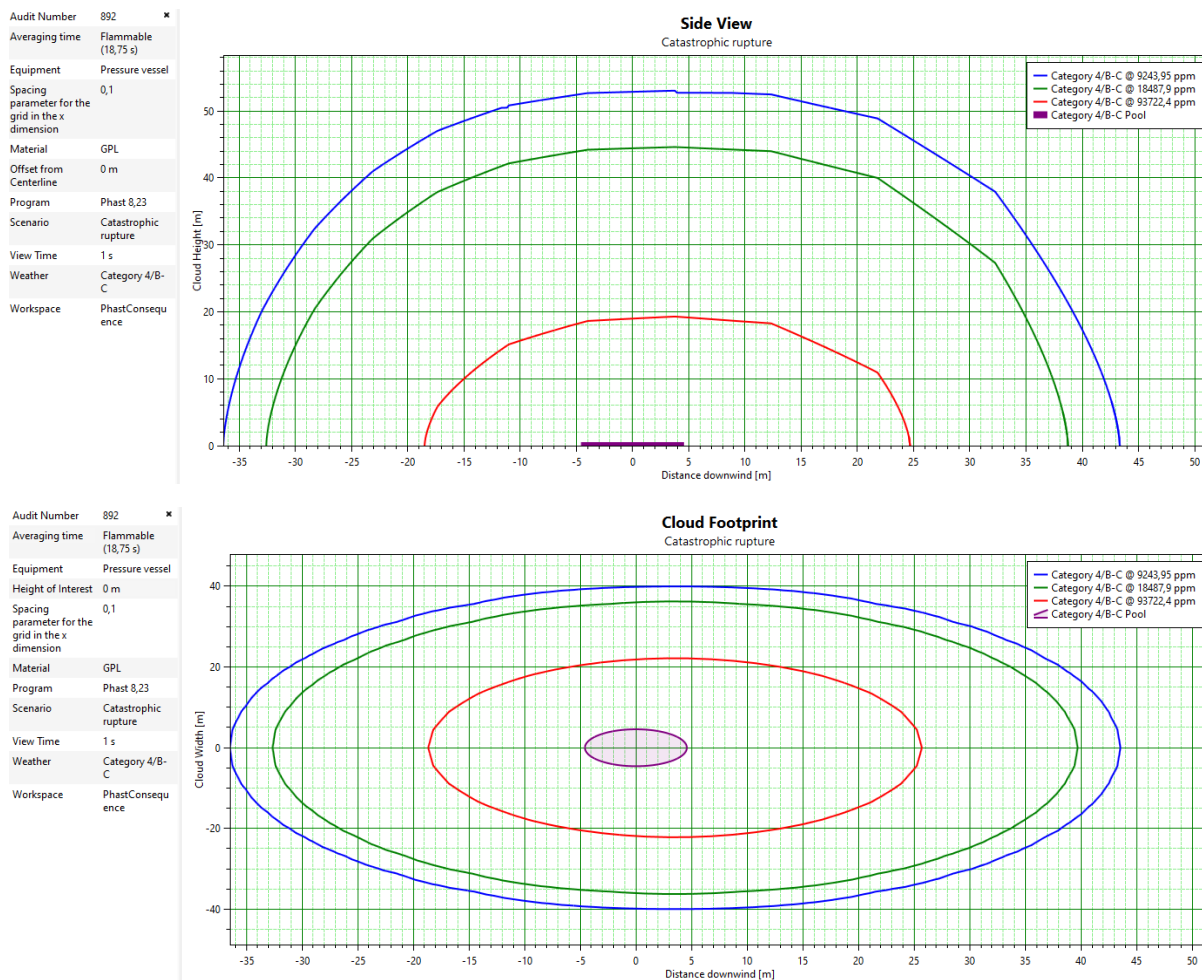


Figure III.5:surface de la dispersion de polluant en fonction de la distance (Rupture).



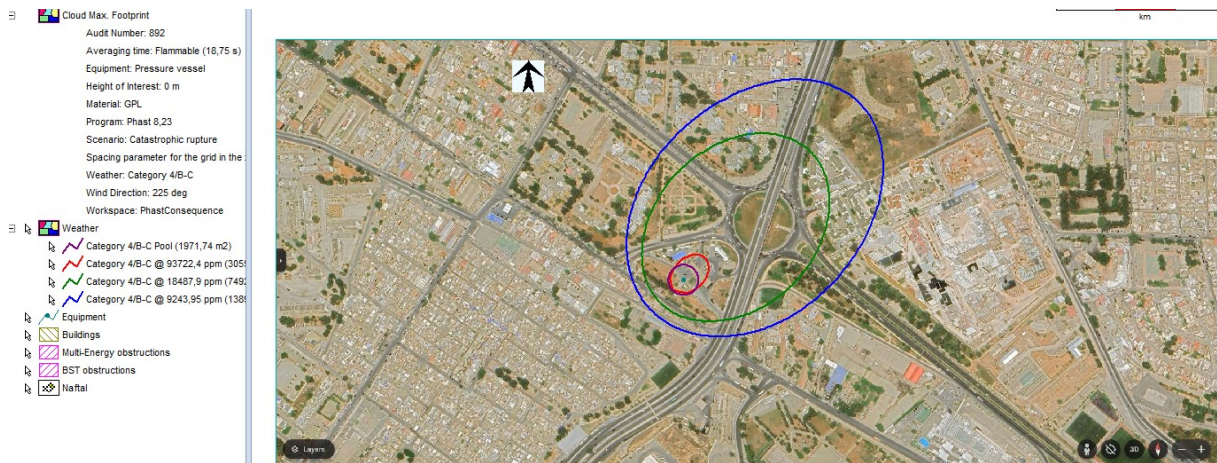


Figure III.6:les zones affectées par le polluant (Rupture).

### III.2.3 Modélisation de feu de flash (flash Fire) :

Ce résultat concerne un phénomène aussi caractéristique à la dispersion et à l'inflammabilité des gaz qui est le feu de flash. Ce dernier est caractérisé par les limites :

- Limite Inferieure d'Inflammabilité, LII (en rouge) : peut atteindre une distance de 415 m.
- Limite Inferieure d'Inflammabilité, LSI (en vert) : peut atteindre une distance de 300 m.

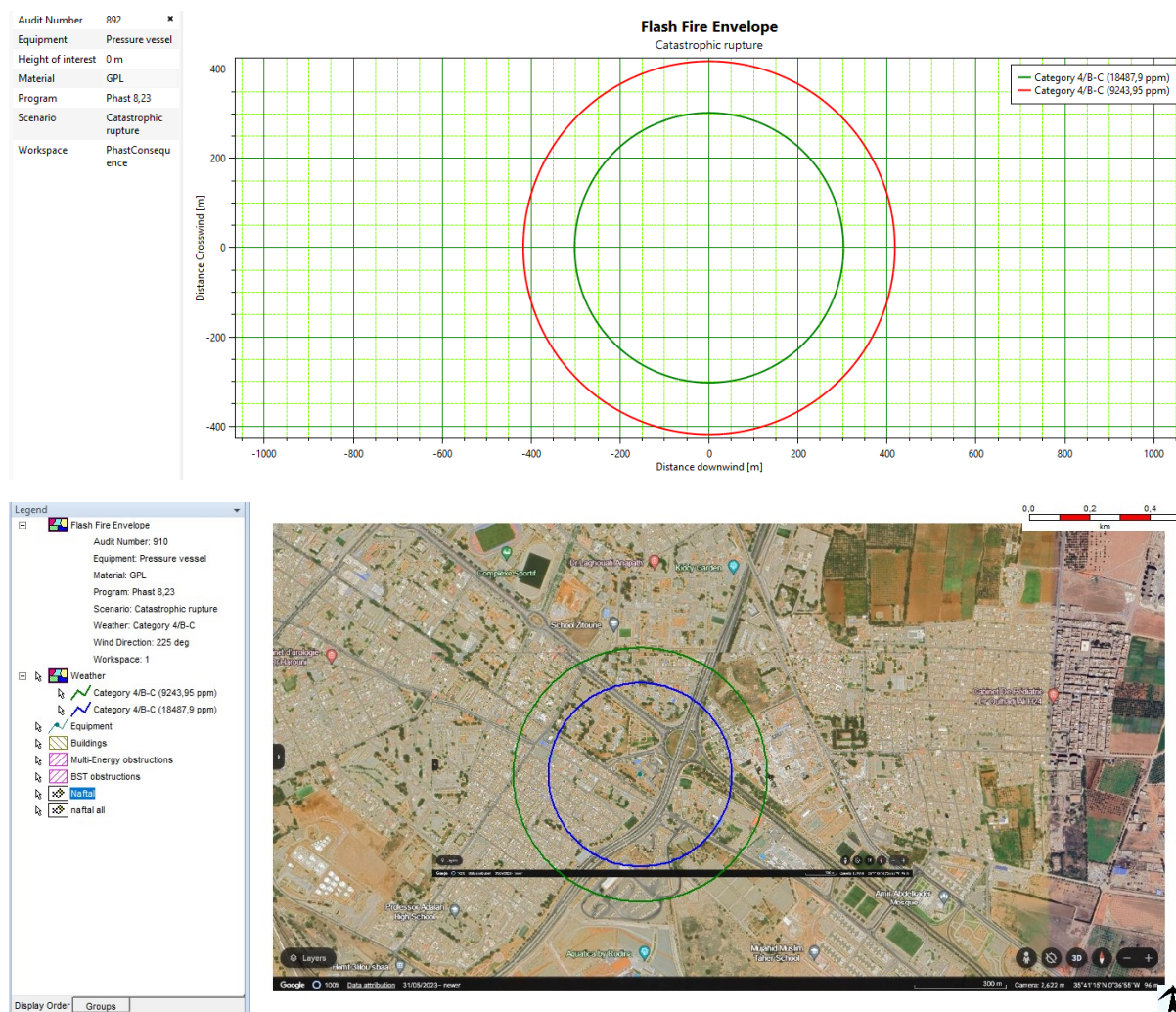


Figure III.7: Les zones atteintes par le feu de flash (Grande fuite)

### III.2.4 Effets thermiques :

#### III.2.4.1 Seuils de référence pour les effets thermiques :

- Seuils pour les effets sur l'homme :

**Tableau III. 2:Seuils thermiques des effets sur l'homme**

Seuils	Justifications
2.5kW/m <sup>2</sup>	L'accident peut affecter des personnes sensibles ou non averties
6.4 kW/m <sup>2</sup>	Conséquences graves, directes ou indirectes, immédiate ou à long Terme
10 kW/ m <sup>2</sup>	1% de fatalité après 20s pour des personnes non protégées
12.5 kW/m <sup>2</sup>	Conséquences irréversibles ou létales, même a courte exposition

- Seuils pour les effets domino :

**Tableau III. 3:Seuils thermiques des effets dominos**

Seuils	Justifications
8 kW/m <sup>2</sup>	Dégâts aux installations non protégées
32 kW/m <sup>2</sup>	Dégâts aux installations protégées opérant à pression atmosphérique
44 kW/m <sup>2</sup>	Dégâts aux installations protégées opérant sous pression

III.2.4.2 Modélisation de boule de feu (Fire Ball) :

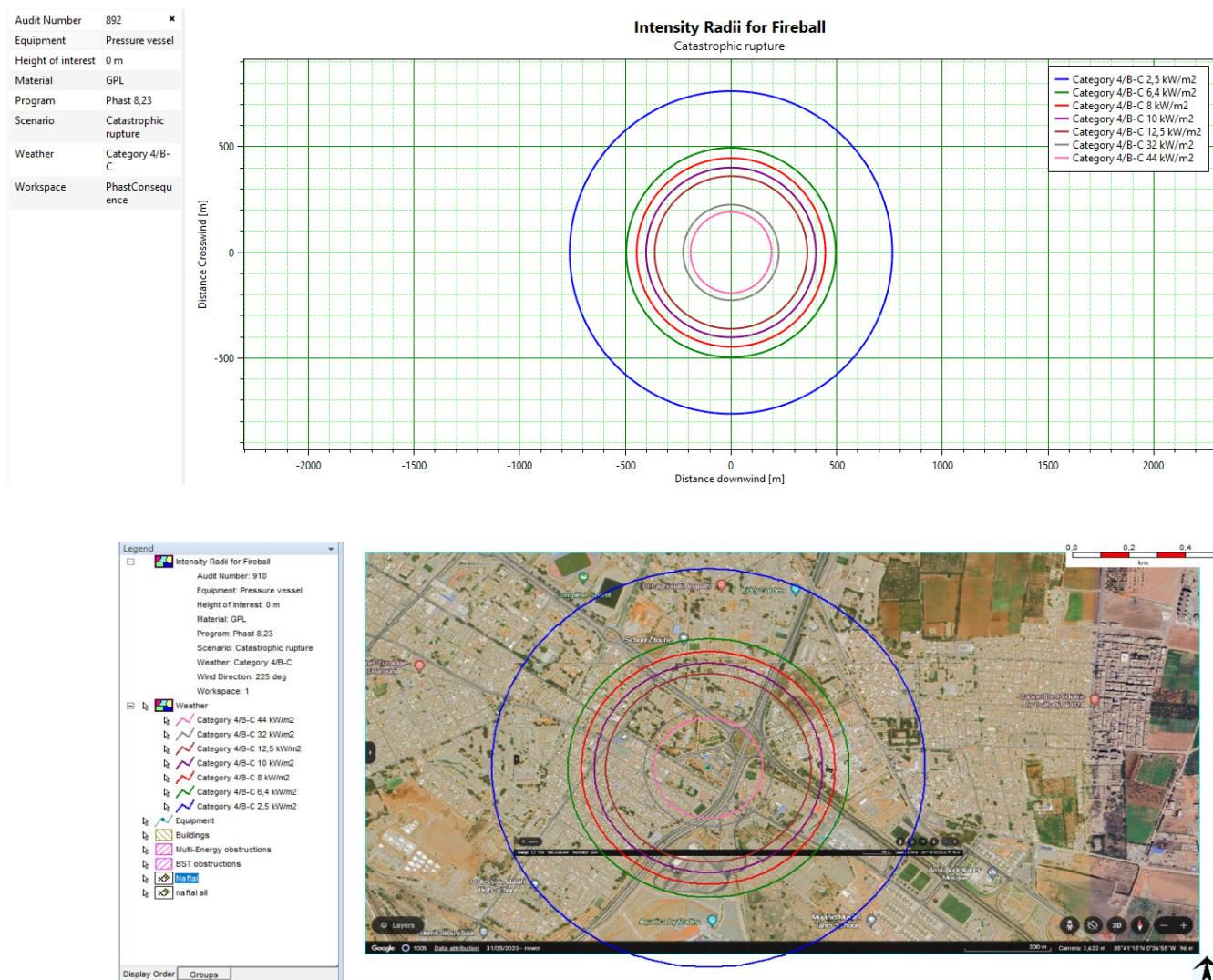


Figure III.8: les zones touchées par les radiations thermiques

On remarque d'après le résultat suivant que

- Le seuil pour les effets thermiques sur l'homme sont

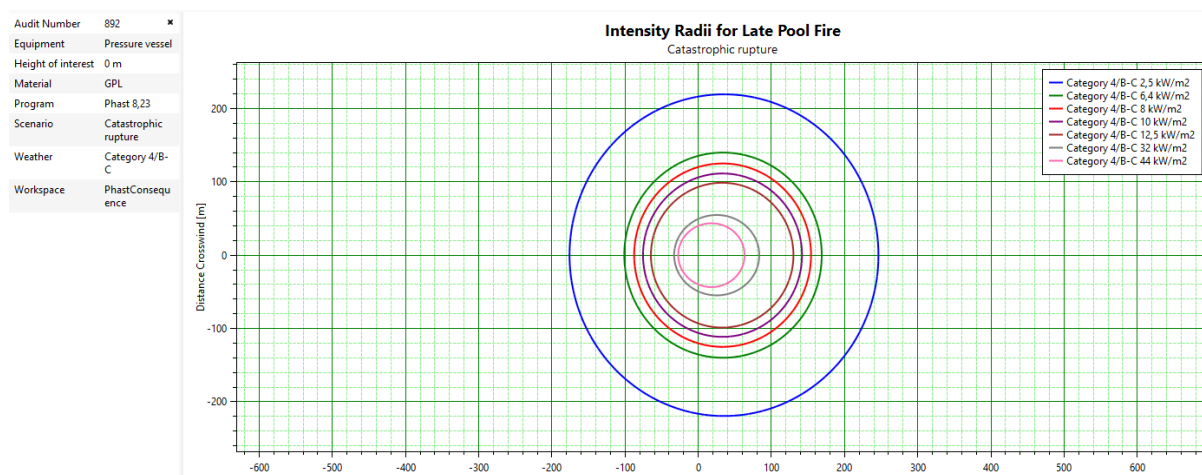
- Distance au seuil des effets qui peuvent affecter les personnes non averties est d'environ 780m
- Distance au seuil des effets graves directe ou indirecte, immédiate à long terme est d'environ 500m.
- Distance à l'effet irréversible ou létal est d'environ 350 m.



- **Le seuil pour effet dominos**

- Dégâts aux installations non protégées 450 m
- Dégâts aux installations protégées opérant à pression atmosphérique 210m
- Dégâts aux installations protégées opérant sous pression 200m

### III.2.4.3 Modélisation de feu de nappe (pool fire) :



**Figure III.9:Modélisation de feu de nappe (pool fire)**

On remarque d'après le résultat suivant que

- **Le seuil pour les effets thermiques sur l'homme sont :**

- Distance au seuil des effets qui peuvent affecter les personnes non averties est d'environ 240 m
- Distance au seuil des effets graves directe ou indirecte, immédiate à long terme est d'environ 170 m.
- Distance à l'effet irréversible ou létales est d'environ 130 m.

- **Le seuil pour effet dominos :**

- Dégâts aux installations non protégées 165m
- Dégâts aux installations protégées opérant à pression atmosphérique 60m
- Dégâts aux installations protégées opérant sous pression 40m

**III.2.5 Effets de surpression :****III.2.5.1 Seuils de références pour les effets de surpression :**

Pour les effets de surpression, les seuils retenus sont les suivants :

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

**Tableau III. 4: Seuils de surpression des effets sur l'homme**

Seuils	Justifications
25mbar	Dommmages grave
50mbar	Dommmages irréversibles ou létaux

- **Seuils pour les effets domino**

**Tableau III. 5:Seuils de surpression des effets dominos**

Seuils	Justifications
160mbar	Dégâts aux structures (effets dominos)
300mbar	Dommmages irréversibles ou létaux

III.2.5.2 Modélisation de l'explosion :

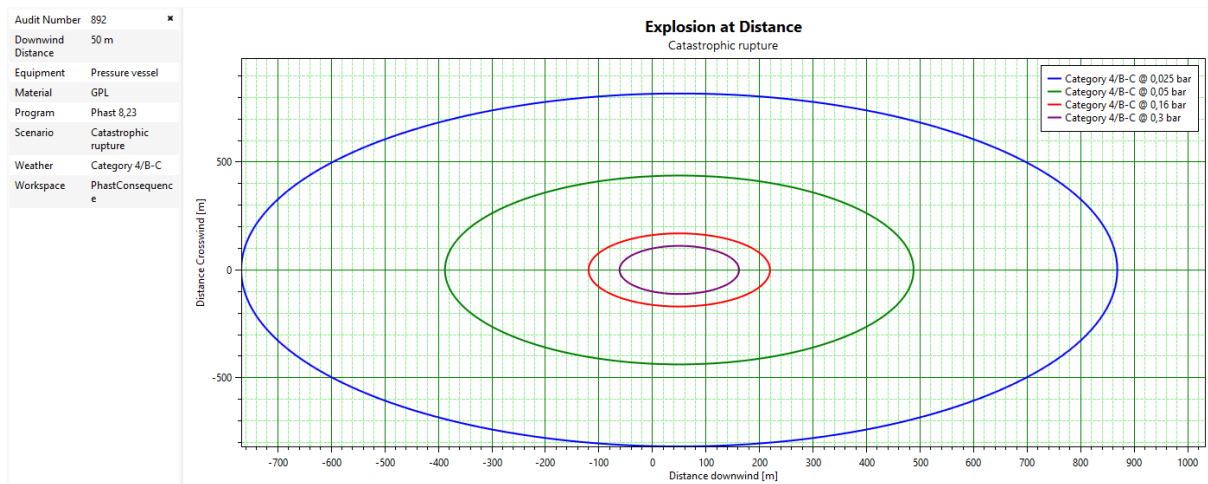


Figure III 10: les zones affectées par l'explosion en fonction du temps (Rupture).

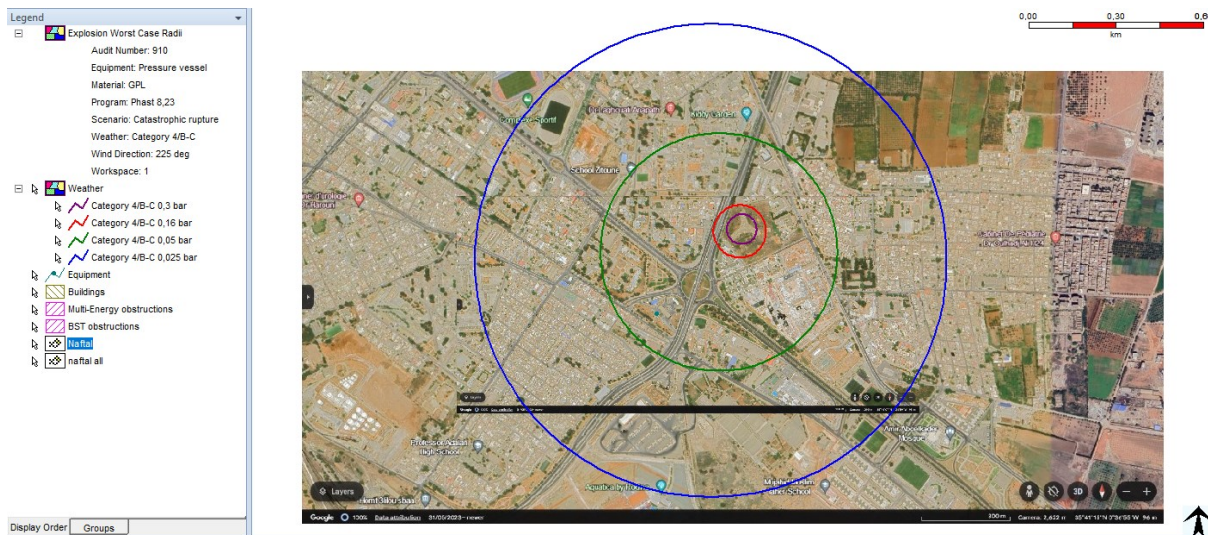


Figure III 11: les distances atteintes par l'explosion

On remarque d'après le résultat suivant que

- **Les seuils pour effets sur l'homme sont**
  - Distance au seuil des dommages graves est de 870m
  - Distance au seuil des dommages irréversibles ou le taux est de 485 m
- **Les seuils pour effets dominos sont**
  - Distance au seuil des dégâts de structures effet domino est de 220m
  - Distance au seuil de dégâts graves aux structures est de 130m

## **Conclusion**

En conclusion, ce chapitre a permis de mettre en lumière l'ampleur des conséquences potentielles d'une fuite de citerne, en particulier dans le cas du transport de GPL.

Nous avons détaillé les spécifications techniques des Camions-citernes et les mesures de sécurité en place, ainsi que la modélisation des scénarios catastrophiques a illustré les distances d'impact des différentes formes de fuites, explosions, et feux, mettant en évidence la gravité des conséquences possibles ainsi que leurs impacts sur l'environnement, la santé humaine et les infrastructures.

Les résultats obtenus montrent clairement la nécessité de dispositifs de sécurité avancés pour prévenir et gérer de tels incidents. Dans cette optique, le prochain chapitre présentera notre prototype Sécuri-citerne, une solution innovante et proactive destinée à renforcer la sécurité et à minimiser les risques associés au transport de matières dangereuses.



# **Chapitre 04**

**Securi citerne description de  
prototype et résultats**

## INTRODUCTION

Ce chapitre détaille l'application pratique du système de surveillance et d'intervention développé pour un Camion-citerne. Il comprend la mise en œuvre des dispositifs de prévention et d'intervention, la collecte des données des capteurs, et les résultats obtenus à travers des tests et simulations. Le prototype est réalisé avec Arduino et divers capteurs pour surveiller la température, la pression, et les mouvements anormaux du camion. Des mesures sont prises pour prévenir les accidents et intervenir rapidement en cas de danger.

### Problématique

Les Camions-citernes transportant des matières dangereuses sont sujets à divers dangers, notamment les accidents pouvant entraîner des conséquences graves telles que des fuites, des explosions ou des incendies. La difficulté réside dans la surveillance constante de conditions critiques telles que la température, la pression et les mouvements du véhicule pour prévenir de tels incidents. Les défis incluent la nécessité d'une détection précoce des anomalies et d'une réponse rapide pour minimiser les risques pour l'environnement et la sécurité publique.

### Solution proposée

La solution proposée consiste en le développement d'un kit de surveillance avancé pour camions-citernes. Ce kit intègre divers capteurs comme le thermocouple pour la température, le BMP180 pour la pression, et le MPU-6050 pour les mouvements anormaux. Un module GSM SIM900 est inclus pour l'envoi d'alertes SMS, et un module GPS NEO-6M permet la localisation en temps réel. Un système d'interface utilisateur basé sur Python avec Tkinter est développé pour la visualisation en temps réel des données des capteurs. L'algorithme de régression intégré analyse les données du MPU-6050 pour prédire les dangers potentiels basés sur les mouvements détectés. En cas de détection d'anomalies telles que des températures élevées, des pressions anormales, ou des mouvements suspects, des alertes sont déclenchées pour assurer une intervention rapide et minimiser les risques d'accidents pour les camions-citernes transportant des matériaux dangereux.

## I. Matériel et composants utilisés dans le prototype

### HARDWARE :

1-**Arduino Uno** : Le microcontrôleur utilisé pour intégrer et gérer les capteurs.



Figure IV.1:Arduino uno

- **Description** : L'Arduino Uno est une carte microcontrôleur basée sur le ATmega328P. Il possède 14 broches d'entrée/sortie numériques (dont 6 peuvent être utilisées comme sorties PWM), 6 entrées analogiques, un quartz de 16 MHz, une connexion USB, une prise d'alimentation, un header ICSP et un bouton de réinitialisation.

2- **Capteur de Température (Thermocouple)** : Pour mesurer la température du Camion-citerne.

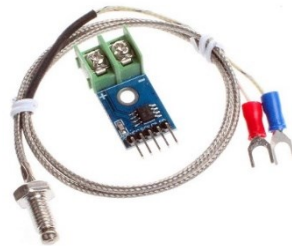


Figure IV.2:Thermocouple

- **Description** : Un thermocouple est un capteur de température qui mesure la température par la conversion d'une différence de température en une tension électrique.

3- **BMP180 (Capteur de Pression)** : Pour surveiller la pression interne du camion.

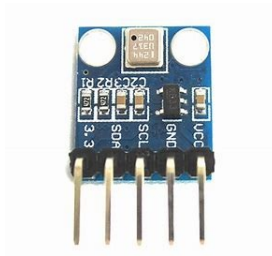


Figure IV.3: BMP180

- **Description** : Le BMP180 est un capteur de pression barométrique et de température qui permet des mesures précises de la pression et de la température. Il est souvent utilisé pour des applications météorologiques et de navigation.

4- **MPU-6050 (Accéléromètre et Gyroscope)** : Pour détecter les mouvements anormaux du camion.



Figure IV.4: MPU-6050

- **Description** : Le MPU6050 est un module contenant un accéléromètre et un gyroscope. Il est utilisé pour mesurer l'accélération et la rotation sur trois axes.

5- SIM900-A : Module GSM pour envoyer des SMS d'alerte.



Figure IV.5:SIM900-A

- **Description** : Le SIM900 est un module GSM/GPRS utilisé pour la communication sans fil. Il peut envoyer et recevoir des SMS et des appels, et se connecter à Internet via GPRS.

6-NEO-6M (Module GPS) : Pour localiser le camion en temps réel.



Figure IV.6:NEO-6M

- **Description** : Un module GPS est un dispositif qui reçoit des signaux des satellites GPS pour déterminer la position géographique du camion en temps réel.

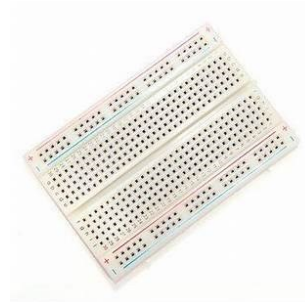
### 7- LM2596: Régulateur de tension.



**Figure IV.7:LM2596**

- **Description** : Le LM2596 est un régulateur de tension DC-DC. Il convertit une tension d'entrée variable en une tension de sortie fixe et régulée. Il est utilisé pour alimenter les composants électroniques avec une tension stable.

### 8- Breadboard : Pour prototyper les circuits électroniques.



**Figure IV.8:BREADBOARD**

- **Description** : Une breadboard est une planche utilisée pour le prototypage de circuits électroniques. Elle permet de réaliser des connexions temporaires sans soudure.

9 -LCD 16x2 : Afficheur pour visualiser les données en temps réel.



Figure IV.9:LCD I2C

- **Description** : Un écran LCD 16x2 peut afficher deux lignes de 16 caractères chacune. Il est couramment utilisé pour afficher des informations telles que les lectures de capteurs ou les messages de statut.

10- LED et SONORE: Utilisés pour indiquer visuellement et par un signal sonore les alarmes.



Figure IV.10:SONORE



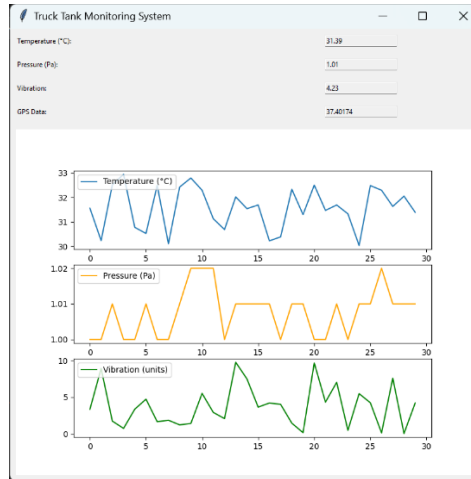
Figure IV.11:LED-ROUGE

**Description :**

- **LED** : Une diode électroluminescente (LED) est utilisée pour indiquer visuellement l'état du système, comme les alertes activées.
- **SONORE**: Un buzzer émet un signal sonore pour alerter les utilisateurs en cas de danger ou d'alerte.

**Software :**

**1- Logiciel de Surveillance :** Un programme en Python pour afficher en temps réel les données des capteurs.

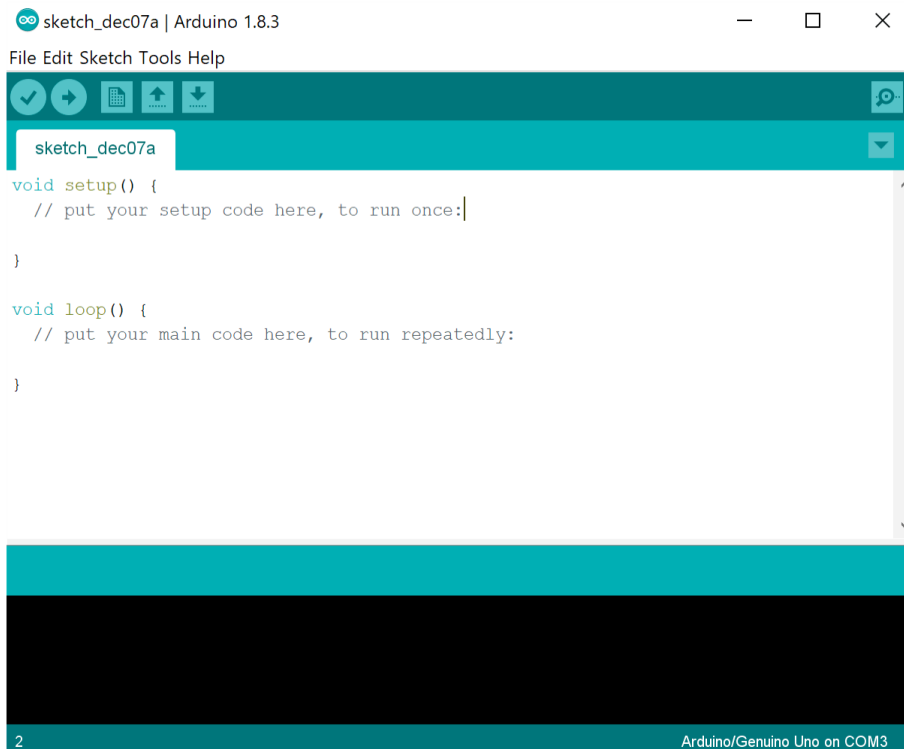


**Figure IV.12:Logiciel de Surveillance**

- **Description:** Le logiciel de surveillance est un programme développé en Python qui utilise la bibliothèque Tkinter pour fournir une interface graphique intuitive. Ce logiciel est conçu pour afficher en temps réel les données collectées à partir de divers capteurs connectés à un système de surveillance. Grâce à Tkinter, le programme offre une visualisation conviviale et interactive des données, permettant aux utilisateurs de suivre facilement les mesures et les alertes en direct.



2- **Arduino IDE** : Environnement de développement intégré utilisé pour programmer l'Arduino.



**Figure IV 13:ARDUINO IDE**

- **Description** : Le logiciel Arduino IDE permet d'écrire, de compiler et de télécharger du code sur une carte Arduino.

## II. Mise en Œuvre du Prototype

### II.1 Montage des Capteurs et de l'Electronique

Dans cette section, nous allons décrire le montage des capteurs et de l'électronique en utilisant l'Arduino, ainsi que les méthodes de communication UART et I2C. Nous présenterons deux circuits : le circuit prototype avec l'Arduino et les capteurs, et le circuit final avec une carte mère PCB.

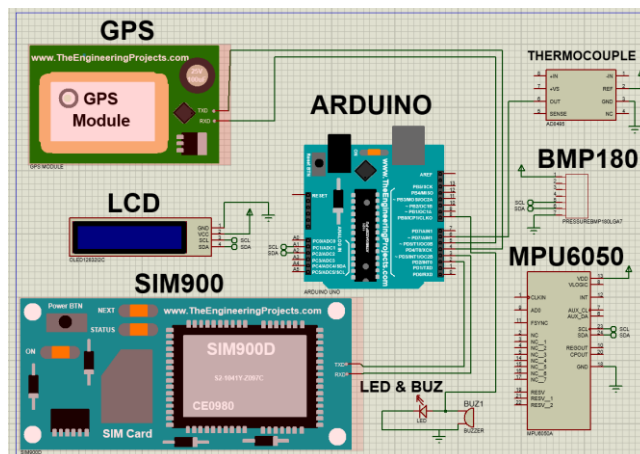


Figure IV.14:Montage des capteurs de prototype

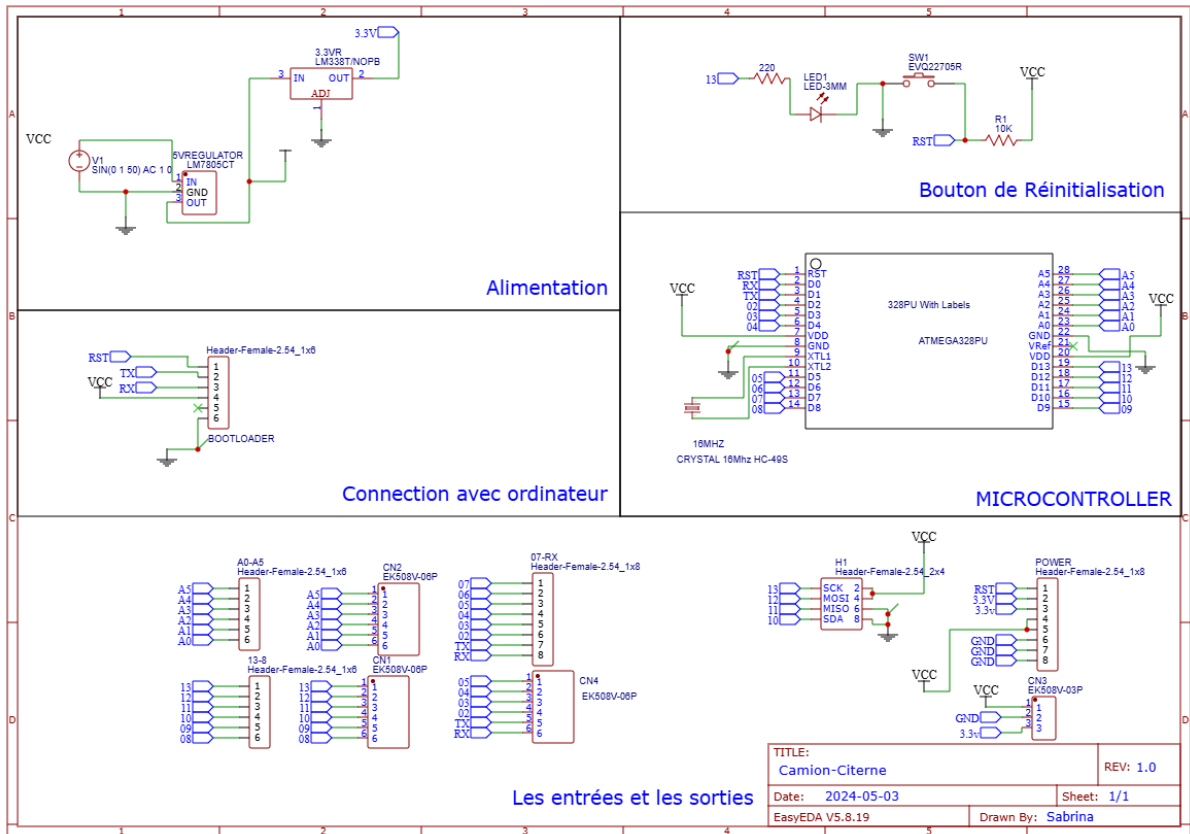


Figure IV.15: Circuit électrique de la carte mère du produit final

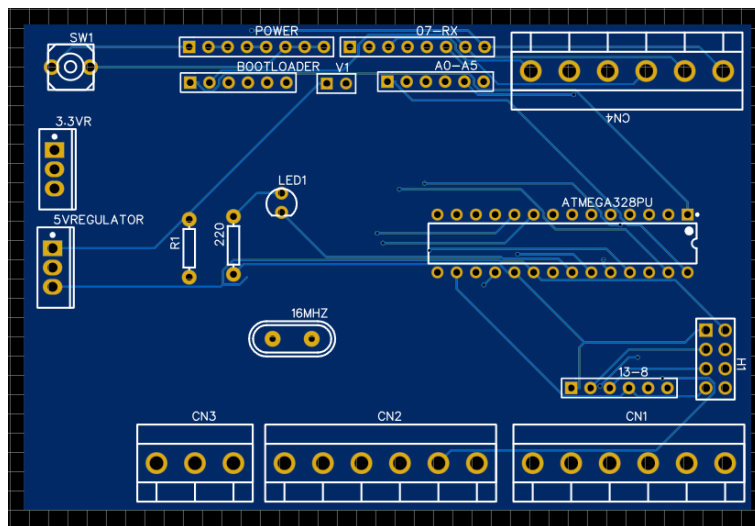


Figure IV.16: Circuit PCB de la carte mère du produit final

## Méthodes de Communication

- **I2C (Inter-Integrated Circuit) :**
  - **Description** : L'I2C est un protocole de communication série synchrone qui permet de connecter plusieurs périphériques avec seulement deux fils : SDA (données série) et SCL (horloge série). Il est largement utilisé pour les capteurs et les modules qui nécessitent une communication avec un microcontrôleur comme l'Arduino.
  - **Utilisation** : Utilisé pour connecter plusieurs capteurs (BMP180, MPU6050, LCD 16x2) à l'Arduino avec seulement deux fils (SDA et SCL), simplifiant le câblage.
- **UART (Universal Asynchronous Receiver-Transmitter) :**
  - **Description** : L'UART est un protocole de communication série asynchrone utilisé pour la communication entre deux appareils. Il utilise deux lignes pour la transmission des données : TX (transmission) et RX (réception). Les modules SIM900 et GPS utilisent ce protocole pour communiquer avec l'Arduino.
  - **Utilisation** : Utilisé pour la communication série avec le SIM900 et le module GPS, nécessitant des connexions TX et RX séparées pour chaque périphérique.

## II.2 Programmation Arduino

Cet organigramme détaille le flux d'actions de notre système, ainsi que les conditions de chaque partie du système.

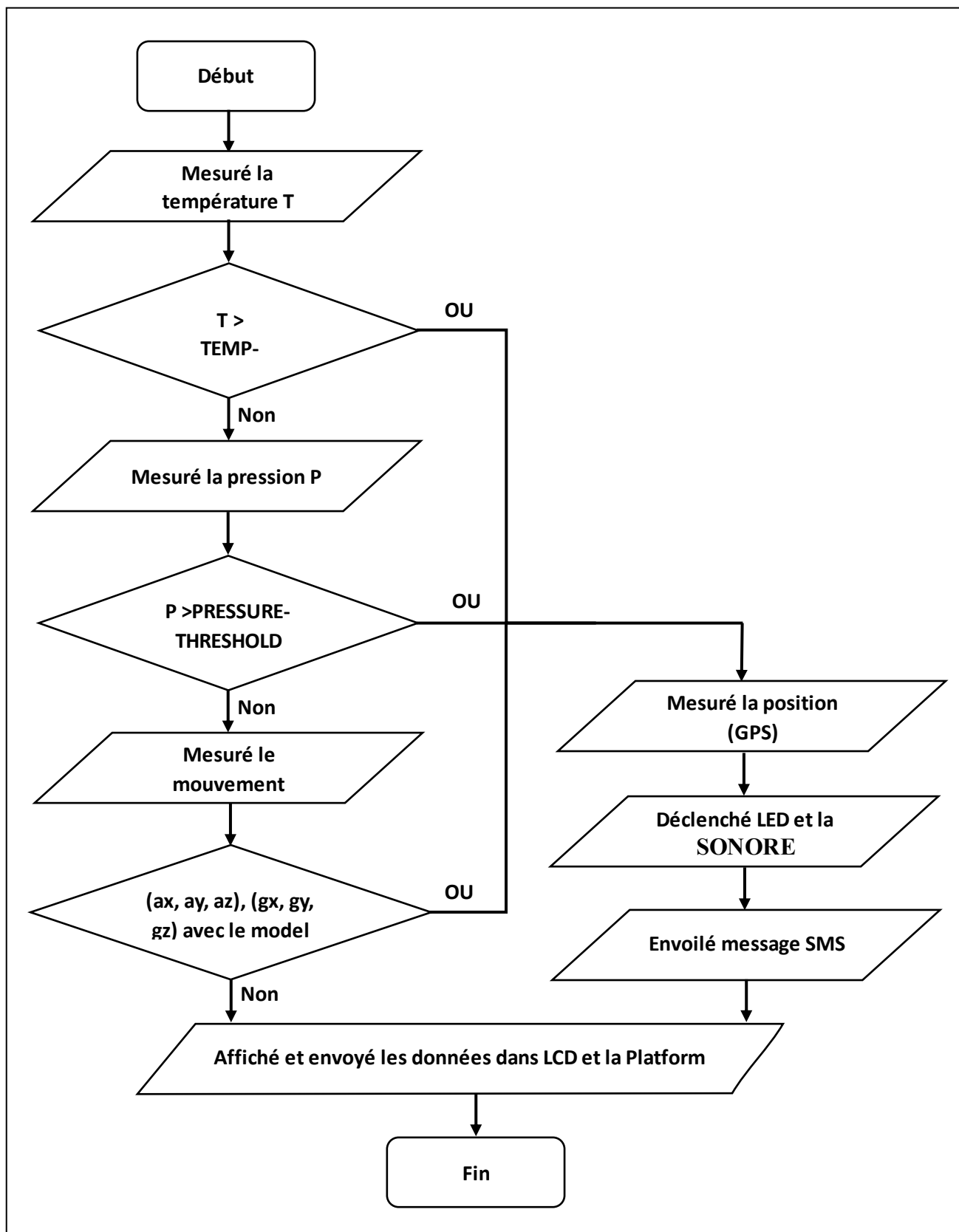


Figure IV.17:Organigramme

## II.3 Interface Graphique Utilisateur (GUI)

- **Développer une interface en Python pour afficher en temps réel les données des capteurs.**

Nous avons créé une interface graphique en Python utilisant la bibliothèque Tkinter pour afficher en temps réel les données des capteurs. Cette interface permet aux utilisateurs de visualiser facilement les mesures prises par les capteurs connectés.

- **Tracer les valeurs de température et de pression.**

L'interface inclut des graphiques en temps réel pour tracer les valeurs de température et de pression, offrant ainsi une visualisation claire et intuitive des variations de ces paramètres au fil du temps.

- **Visualiser les données de mouvement du MPU6050.**

Les données de mouvement collectées par le capteur MPU6050, qui incluent les mesures des accélérations linéaires et des vitesses angulaires, sont également affichées en temps réel sur l'interface. Cela permet de suivre et d'analyser les mouvements avec précision et d'identifier rapidement toute anomalie.

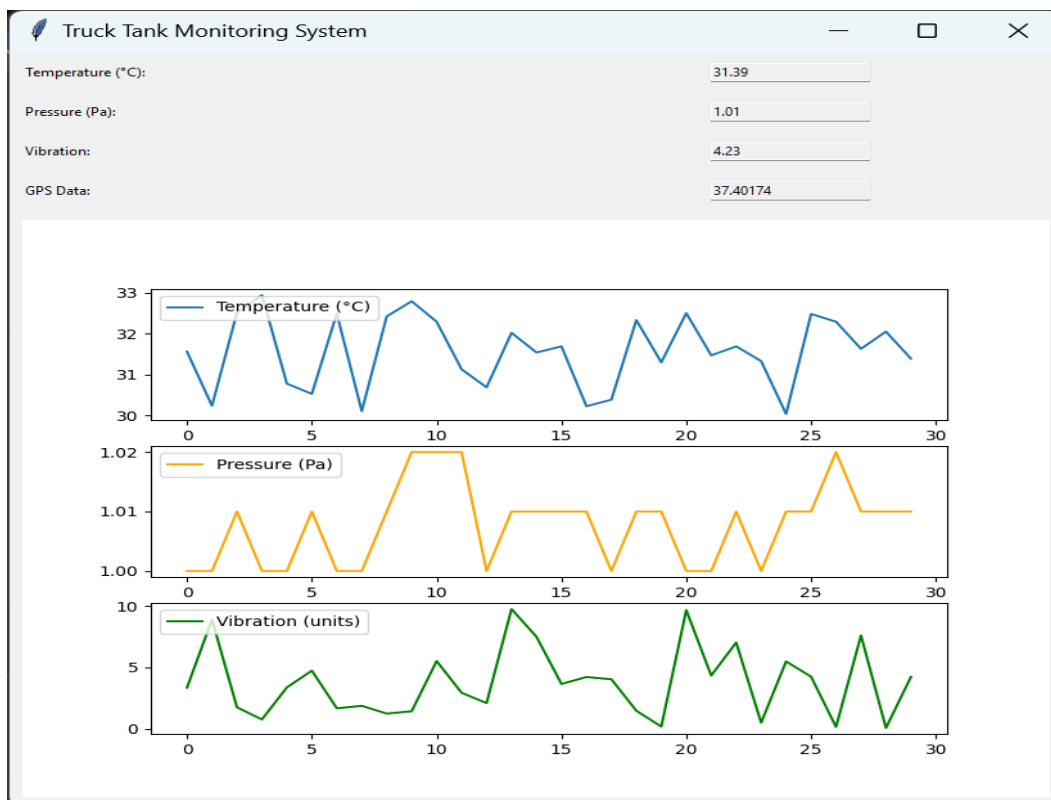


Figure IV.18:Logiciel de Surveillance

### III. Collecte et Analyse des Données

#### III.1 Collecte des Données du MPU6050

Pour comprendre et analyser les mouvements d'un Camion-citerne en conditions réelles, nous avons entrepris une série d'expériences en utilisant un prototype de voiture à petite échelle. L'objectif principal de ces expériences était de simuler divers scénarios de conduite, y compris des accidents, afin de collecter des données détaillées à l'aide du capteur MPU6050. Ce capteur intégré combine un accéléromètre et un gyroscope, ce qui permet de mesurer les accélérations linéaires ainsi que les vitesses angulaires de la voiture prototype.

#### Conception et Construction de la Voiture Prototype

Nous avons d'abord conçu une petite voiture robotisée en utilisant un châssis de robot mobile, sur lequel nous avons monté une carte ArduinoUno pour le contrôle et la gestion des capteurs. Le capteur MPU6050 a été fixé solidement sur le châssis pour assurer la précision des mesures. Le module Bluetooth HC-05 a été ajouté pour permettre la communication sans fil entre la voiture prototype et un ordinateur portable ou un smartphone, facilitant ainsi la collecte et l'analyse des données en temps réel.



Figure IV.19: la Voiture pour la collection des données

## III.2 Algorithme de Régression pour la Prédiction des Dangers

Pour prédire les dangers potentiels à partir des données de mouvement recueillies par notre prototype de voiture, nous avons développé un algorithme de régression. Cet algorithme analyse les données du capteur MPU6050 pour identifier les modèles de mouvement normaux et anormaux et prévoir les risques de collision ou de conditions dangereuses.

### Analyse des Données

La première étape dans le développement de notre algorithme de régression a été l'analyse des données collectées. Les données incluaient des mesures des accélérations linéaires ( $a_x$ ,  $a_y$ ,  $a_z$ ) et des vitesses angulaires ( $g_x$ ,  $g_y$ ,  $g_z$ ). Nous avons utilisé des techniques de prétraitement pour nettoyer et normaliser les données, en supprimant les anomalies et en lissant les variations brusques causées par des interférences ou des erreurs de capteur.

Nous avons ensuite segmenté les données en différents types de mouvements : conduite normale, virages, montées et descentes, et situations de collision. Cette segmentation nous a permis de créer des étiquettes pour les différentes conditions de conduite et de construire un ensemble de données d'entraînement pour notre algorithme.

### Développement de l'Algorithme de Régression

L'algorithme de régression a été conçu pour prédire la probabilité d'un danger basé sur les entrées du capteur MPU6050. Nous avons choisi d'utiliser la régression linéaire multiple, car elle permet de modéliser la relation entre plusieurs variables indépendantes (les lectures du capteur) et une variable dépendante (le risque de danger).

### Fonctionnement de l'Algorithme

1. **Sélection des Variables** : Les données des six axes du MPU6050 ( $a_x$ ,  $a_y$ ,  $a_z$ ,  $g_x$ ,  $g_y$ ,  $g_z$ ) ont été utilisées comme variables indépendantes. Ces variables fournissent une image complète des mouvements linéaires et angulaires de la voiture prototype.
2. **Création des Étiquettes de Danger** : Chaque segment de données a été étiqueté en fonction de la situation de conduite : normal (0) ou danger (1). Les dangers incluaient des scénarios de collision et des mouvements anormaux soudains.
3. **Entraînement du Modèle (.h5)** : Nous avons divisé les données en ensembles d'entraînement et de test. L'ensemble d'entraînement a été utilisé pour ajuster



les coefficients du modèle de régression, en minimisant l'erreur entre les prédictions du modèle et les étiquettes réelles.

4. **Validation et Ajustement** : Après l'entraînement initial, nous avons validé le modèle en utilisant l'ensemble de test. Les résultats ont été analysés pour évaluer la précision du modèle. Des techniques telles que la validation croisée a été utilisées pour affiner et ajuster le modèle, en assurant qu'il généralise bien aux nouvelles données.
5. **Prédiction en Temps Réel** : Une fois le modèle de régression finalisé, il a été intégré dans le système embarqué de la voiture prototype. En temps réel, les lectures du MPU6050 sont passées à travers le modèle pour prédire la probabilité d'un danger. Si la probabilité dépasse un certain seuil, une alerte est déclenchée.

## Conclusion

L'algorithme de régression développé pour prédire les dangers potentiels à partir des données du MPU6050 a démontré une utilité pour la surveillance proactive des conditions de conduite. En identifiant les modèles de mouvement normaux et anormaux, nous avons pu créer un système capable de prévoir les situations dangereuses et de déclencher des alertes appropriées. Cette approche améliore considérablement la sécurité en permettant une réponse rapide et informée aux dangers potentiels, ce qui est crucial pour des applications telles que la surveillance des Camion-citerne en conditions réelles.

## IV. Système d'Alarme et Intervention

La sécurité des Camions-citernes est essentielle, surtout lorsqu'ils transportent des matériaux dangereux. Pour garantir une surveillance continue et une intervention rapide en cas de conditions anormales, nous avons développé un système d'alarme et d'intervention. Ce système se compose de plusieurs sous-systèmes interdépendants, chacun jouant un rôle crucial dans la détection des conditions dangereuses, l'envoi des alertes et la transmission des données critiques.

### IV.1 Détection des Conditions Anormales

Pour assurer une réaction rapide face aux situations potentiellement dangereuses, notre système surveille en permanence plusieurs paramètres critiques : la température, la pression et les mouvements anormaux.

#### Température et Pression Élevées

Les capteurs de température et de pression, tels que le thermocouple (MAX6675) et le capteur de pression BMP180, jouent un rôle clé dans la détection des anomalies. Lorsque ces capteurs détectent des valeurs dépassant les seuils prédéfinis (par

exemple, une température supérieure à 30°C ou une pression dépassant 101325 Pa), une alarme est immédiatement déclenchée. Voici comment le système fonctionne :

- **Surveillance Continue** : Les capteurs mesurent les valeurs en temps réel et les envoient au microcontrôleur Arduino.
- **Comparaison avec les Seuils** : Les valeurs mesurées sont comparées aux seuils de sécurité définis.
- **Déclenchement de l'Alarme** : Si une valeur anormale est détectée, un signal d'alarme est activé, et une action d'alerte est initiée.

### Mouvements Anormaux Détectés par le MPU6050

Le capteur MPU6050, intégrant un accéléromètre et un gyroscope, détecte les mouvements de la citerne. Les mouvements anormaux, tels que des chocs violents ou des changements brusques de direction, sont des indicateurs de situations dangereuses comme des accidents. Le système analyse en continu les données du MPU6050:

- **Analyse des Données en Temps Réel** : Les valeurs des axes de l'accéléromètre et du gyroscope sont surveillées en continu.
- **Identification des Modèles de Mouvement** : Grâce au modèle de régression développé précédemment, les mouvements anormaux sont identifiés.
- **Activation de l'Alarme** : En cas de détection de mouvements suspects, le système déclenche une alarme.

Notre modèle de régression, basé sur les données de mouvement collectées, permet de prédire les dangers potentiels. Le modèle analyse les lectures des capteurs et compare les données actuelles avec les modèles de mouvement normal et anormal établis lors de l'entraînement. Si les mouvements correspondent à des patterns anormaux identifiés (par exemple, ceux enregistrés lors des accidents simulés), le système considère cela comme un indicateur de danger et déclenche une alarme.

## IV.2 Envoi de SMS d'Alerte

Lorsqu'une condition anormale est détectée, il est crucial d'alerter rapidement les parties concernées. Le module SIM900 GSM est utilisé pour envoyer des SMS d'alerte avec le déclenchement de LED et la SONORE.

### Processus d'Envoi des SMS

- **Préparation du Message** : Le système compile les données critiques (température, pression, mouvements) et la localisation GPS dans un message texte.

- **Envoi aux Destinataires** : Les messages sont envoyés aux pompiers, à l'entreprise et au chauffeur. Les numéros de téléphone des destinataires sont prédéfinis dans le système.
- **Transmission des Détails** : Le message SMS contient des informations détaillées sur l'état des capteurs et la localisation exacte du camion.

Voici un exemple de message d'alerte :

« Alerte!Produit : GPL, Pression: 102000 Pa, Vibration: 25000 units, Temp Thermo: 38.0°C, GPS: Latitude, Longitude. »

### IV.3 Transmission des Données et Localisation

Pour une surveillance efficace, le système utilise le module GPS et le module SIM900 pour transmettre les données en temps réel.

#### Utilisation du Module GPS

- **Localisation en Temps Réel** : Le module GPS collecte les coordonnées géographiques du camion.
- **Mise à Jour Continue** : Les données de localisation sont mises à jour régulièrement et transmises au microcontrôleur.

#### Envoi des Données

- **Surveillance à Distance** : Les responsables peuvent surveiller en temps réel la position et l'état du camion via une interface web ou une application mobile.

En intégrant ces technologies, notre système d'alarme et d'intervention assure une surveillance constante et une réponse rapide aux situations dangereuses. Cette approche proactive permet non seulement de protéger les biens et les vies humaines, mais aussi de minimiser les risques associés au transport de matériaux dangereux.

## V. Tests et Résultats

Pour garantir la fiabilité et l'efficacité du système de surveillance et d'alerte développé, une série de tests rigoureux a été effectuée. Ces tests visent à vérifier le bon fonctionnement des capteurs, la précision des algorithmes et l'efficacité des mécanismes d'alerte et de communication.

### V.1 Tests du Système

#### V.1.1 Scénarios de Test pour Chaque Capteur et Alarme

Pour chaque capteur intégré au système (BMP180, MPU6050, MAX6675 et module GPS), nous avons conçu des scénarios de test spécifiques pour évaluer leur performance et leur précision.

- **Test du Capteur de Température (MAX6675) :**
  - **Scénario** : Soumettre le capteur à différentes températures (ambiante, chaude, froide) pour vérifier la précision des lectures.
  - **Résultat Attendu** : Le capteur doit mesurer et rapporter avec précision les variations de température.
  
- **Test du Capteur de Pression (BMP180) :**
  - **Scénario** : Exposer le capteur à différentes pressions (simulées en laboratoire) pour vérifier sa précision.
  - **Résultat Attendu** : Le capteur doit fournir des lectures précises de la pression atmosphérique.
  
- **Test du Capteur de Mouvement (MPU6050) :**
  - **Scénario** : Soumettre le capteur à différents types de mouvements, y compris des secousses et des vibrations, pour évaluer sa capacité à détecter des anomalies.
  - **Résultat Attendu** : Le capteur doit détecter et rapporter avec précision les mouvements anormaux.
  
- **Test du Module GPS :**
  - **Scénario** : Tester le module dans différentes conditions (en mouvement, à l'arrêt) pour vérifier la précision de la localisation.
  - **Résultat Attendu** : Le module doit fournir des coordonnées GPS précises et en temps réel.

## V.1.2 Simulation d'Accidents et de Conditions de Danger

Pour évaluer la réponse du système aux conditions de danger, nous avons simulé différents scénarios critiques.

- **Simulation de Températures Élevées :**
  - **Scénario** : Exposer le capteur de température à une source de chaleur jusqu'à ce que la température dépasse le seuil critique (30°C).
  - **Résultat Attendu** : L'alarme doit se déclencher et un SMS d'alerte doit être envoyé.
- **Simulation de Pression Anormale :**
  - **Scénario** : Modifier la pression autour du capteur pour qu'elle dépasse le seuil critique (101325 Pa).
  - **Résultat Attendu** : L'alarme doit se déclencher et un SMS d'alerte doit être envoyé.
- **Simulation de Mouvement Anormal :**
  - **Scénario** : Faire subir au prototype des chocs et des secousses similaires à ceux d'un accident.
  - **Résultat Attendu** : L'algorithme de détection des anomalies doit identifier les mouvements anormaux, déclencher l'alarme et envoyer un SMS d'alerte.

## V.2 Résultats

### V.2.1 Analyse des Résultats des Tests

Les tests ont été réalisés dans un environnement contrôlé pour garantir la répétabilité et la fiabilité des résultats. Voici un résumé des résultats obtenus :

- **Capteur de Température :**
  - **Observation** : Le capteur a mesuré avec précision les variations de température. L'alarme s'est déclenchée à chaque dépassement de seuil et des SMS d'alerte ont été envoyés correctement.
  - **Conclusion** : Le capteur de température et le mécanisme d'alerte fonctionnent comme prévu.

- **Capteur de Pression :**
  - **Observation :** Le capteur de pression a rapporté des lectures précises. Les conditions de pression anormales ont été détectées et ont déclenché les alarmes et l'envoi de SMS.
  - **Conclusion :** Le capteur de pression et le mécanisme d'alerte fonctionnent comme prévu.
  
- **Capteur de Mouvement (MPU6050) :**
  - **Observation :** Les mouvements anormaux ont été détectés avec précision. L'algorithme de régression a identifié les conditions dangereuses et les alarmes ont été activées comme attendu.
  - **Conclusion :** Le capteur de mouvement et l'algorithme de détection des anomalies fonctionnent comme prévu.
  
- **Module GPS et Envoi de SMS :**
  - **Observation :** La localisation GPS a été précise et les SMS contenant les données des capteurs et la localisation ont été envoyés rapidement aux destinataires.
  - **Conclusion :** Le module GPS et le mécanisme de communication via SIM900 fonctionnent comme prévu.

## V.2.2 Simulation avec Blender

**V.2.2.1 Blender :** est un logiciel libre et open source de modélisation, d'animation, de rendu 3D, et de simulation. Il est utilisé pour créer des graphiques 3D interactifs, des animations et des simulations réalistes.

Pour évaluer les scénarios de test et les conditions de danger, nous avons utilisé Blender pour simuler les environnements et les situations critiques. Blender a été choisi pour sa flexibilité et ses capacités avancées de modélisation et d'animation, ainsi que pour mon expérience préalable avec cet outil, ce qui a permis de créer des simulations précises et détaillées.



**Figure IV 20:Simulation de la carte mère avec Blender**

### **V.2.3 Discussion sur l'Efficacité du Système de Prévention et d'Intervention**

Les tests ont démontré que le système développé est capable de surveiller en continu les conditions critiques d'un Camion-citerne et de réagir rapidement en cas de danger. Les capteurs ont montré une grande fiabilité et précision, et les mécanismes d'alerte ont fonctionné efficacement, garantissant une transmission rapide des informations aux parties concernées.

## Conclusion

Le chapitre conclut sur l'efficacité et la fiabilité du système développé. Les étapes et les résultats des tests démontrent la capacité du prototype à surveiller les conditions critiques d'un Camion-citerne et à intervenir rapidement en cas de danger. Les améliorations potentielles et les perspectives futures pour ce système sont également discutées.

### Améliorations Potentielles et Perspectives Futures

Pour améliorer encore le système, les développements futurs pourraient inclure :

- **Intégration de Capteurs Supplémentaires** : Ajouter des capteurs pour surveiller d'autres paramètres critiques tels que l'humidité ou la présence de gaz dangereux.
- **Optimisation de l'Algorithme de Régression** : Affiner l'algorithme de régression pour améliorer la précision de la prédiction des dangers.
- **Amélioration de la Communication** : Utiliser des technologies de communication plus avancées pour assurer une transmission encore plus rapide et fiable des données.
- **Développement d'une Interface Utilisateur** : Créer une application mobile ou une interface web pour permettre une surveillance en temps réel et une gestion plus facile des alertes.

En conclusion, le système développé a démontré son potentiel pour améliorer la sécurité des Camions-citernes, offrant une surveillance proactive et une intervention rapide en cas de conditions dangereuses.



### **Conclusion générale**

Le transport de matières dangereuses est essentiel à l'économie mondiale, mais il comporte des risques significatifs pour la sécurité publique et l'environnement. Les accidents impliquant des Camions-citernes peuvent avoir des conséquences catastrophiques, ce qui souligne la nécessité de solutions innovantes et efficaces pour gérer ces risques.

Nous avons examiné les bases théoriques nécessaires à la compréhension des risques et des enjeux du transport de matières dangereuses, ainsi que les avancées technologiques pertinentes dans les domaines de l'intelligence artificielle et de l'IoT. Cette revue de la littérature a permis de contextualiser notre projet et de mettre en évidence les opportunités offertes par ces technologies pour améliorer la sécurité industrielle.

Nous avons modélisé des scénarios catastrophiques et développé un prototype fonctionnel du système proposé. Grâce à des tests et des simulations, nous avons démontré l'efficacité de notre solution pour prévenir les accidents et minimiser leurs conséquences en cas d'incident, tout en fournissant des notifications en temps réel aux unités concernées.

Ce mémoire propose des recommandations pour l'optimisation et la mise en œuvre de notre système dans le secteur du transport de matières dangereuses. En adoptant de telles solutions, les entreprises peuvent non seulement améliorer la sécurité de leurs opérations, mais aussi se conformer aux normes de sécurité de plus en plus strictes et protéger l'environnement.

### Bibliographie

- [1] B. Athmane, « gestion et analyse des risques », Université Lumière Lyon 2. Consulté le: 11 mars 2024. [En ligne]. Disponible sur: [https://www.memoireonline.com/12/07/795/m\\_analyse-et-gestion-des-risques0.html?fbclid=IwAR1gZ-TAxqVdLpFfv75G0u4PrPvNfGIjCWmCflVq7iSC-FIwDd9FZUUrLqk#\\_Toc182211359](https://www.memoireonline.com/12/07/795/m_analyse-et-gestion-des-risques0.html?fbclid=IwAR1gZ-TAxqVdLpFfv75G0u4PrPvNfGIjCWmCflVq7iSC-FIwDd9FZUUrLqk#_Toc182211359)
- [2] « Dictionnaire : Le Petit Robert ! » p. 2840 pages.
- [3] N. ACHOURI, « APPORT DE LA LOGIQUE FLOUE Á L'ANALYSE DE CRITICITÉ DES RISQUES INDUSTRIELS », Université El-Hadj Lakhdar -, BATNA, 2009. Consulté le: 11 mars 2024. [En ligne]. Disponible sur: [http://eprints.univ-batna2.dz/756/1/hygh\\_Nouhed%20ACHOURI.pdf](http://eprints.univ-batna2.dz/756/1/hygh_Nouhed%20ACHOURI.pdf)
- [4] « ÉVALUATION DES RISQUES PROFESSIONNELS ». Consulté le: 11 mars 2024. [En ligne]. Disponible sur: <https://www.cnracl.retraites.fr/sites/default/files/SERVICES/FNP/publications/MethodoEvRP.pdf>
- [5] « 5 étapes pour identifier et évaluer vos risques », 17 octobre 2023. Consulté le: 11 mars 2024. [En ligne]. Disponible sur: <https://optimiso-group.com/articles/5-etapes-pour-identifier-et-evaluer-vos-risques/>
- [6] Centre canadien d'hygiène et de sécurité au travail, « danger et risque ». Consulté le: 18 mars 2024. [En ligne]. Disponible sur: [https://www.cchst.ca/oshanswers/hsprogram/hazard/hazard\\_risk.html?fbclid=IwAR3R56dP4fDqalYK\\_6hOWb7yvSnRwkHiGd8BwN1IR3rJWd\\_eGNLfdykR2Kw](https://www.cchst.ca/oshanswers/hsprogram/hazard/hazard_risk.html?fbclid=IwAR3R56dP4fDqalYK_6hOWb7yvSnRwkHiGd8BwN1IR3rJWd_eGNLfdykR2Kw)
- [7] Spiformation, « Comprendre les notions de risque et de danger en entreprise (PRAP) ». Consulté le: 18 mars 2024. [En ligne]. Disponible sur: <https://spi-formation-securite.fr/blog/risque-danger-comprendre/>
- [8] « iso ». Consulté le: 18 mars 2024. [En ligne]. Disponible sur: <https://www.iso.org/fr/standard/43170.html>
- [9] « ISO 31000 ». Consulté le: 12 mars 2024. [En ligne]. Disponible sur: [https://fr.wikipedia.org/wiki/ISO\\_31000](https://fr.wikipedia.org/wiki/ISO_31000)
- [10] Chloé Griot, « Vulnérabilité et transport de matières dangereuses : une méthode d'aide à la décision issue de l'expertise de la Sécurité Civile », 2007. Consulté le: 19 mars 2024. [En ligne]. Disponible sur: <https://journals.openedition.org/cyberge0/5995>
- [11] « Transport des matières dangereuses », Université des Frères Mentouri Constantine. Consulté le: 19 mars 2024. [En ligne]. Disponible sur: [https://fac.umc.edu.dz/fstech/cours/G%20Transport/L3%20%20TDH\\_Transport%20des%20mat%C3%A8res%20dangereuses.pdf](https://fac.umc.edu.dz/fstech/cours/G%20Transport/L3%20%20TDH_Transport%20des%20mat%C3%A8res%20dangereuses.pdf)
- [12] « Le transport de matières dangereuses ». Consulté le: 31 mai 2024. [En ligne]. Disponible sur: <https://www.nimes.fr/habitat/prevention-des-risques/le-transport-de-matieres-dangereuses.html>

- [13] « LE RISQUE TRANSPORT DE MATIERES DANGEREUSES ». Consulté le: 25 mars 2024. [En ligne]. Disponible sur: <https://www.cotes-darmor.gouv.fr/contenu/telechargement/8312/49955/file/Le>
- [14] « Transport des matières dangereuses ». Consulté le: 25 mai 2024. [En ligne]. Disponible sur: [https://fac.umc.edu.dz/fstech/cours/G%20Transport/L3%20%20TDH\\_Transport%20des%20mati%C3%A8res%20dangereuses.pdf](https://fac.umc.edu.dz/fstech/cours/G%20Transport/L3%20%20TDH_Transport%20des%20mati%C3%A8res%20dangereuses.pdf)
- [15] « Le risque lié auX TMD ». [En ligne]. Disponible sur: <https://www.bas-rhin.gouv.fr/contenu/telechargement/29254/200821/file/Risque+li%C3%A9+aux+transports+et+mati%C3%A8res+dangereuses.pdf>
- [16] *BLEVE*. Consulté le: 31 mai 2024. [En ligne]. Disponible sur: [https://www.actu-environnement.com/ae/dictionnaire\\_environnement/definition/boiling\\_liquid\\_expanding\\_vapor\\_bleve.php4](https://www.actu-environnement.com/ae/dictionnaire_environnement/definition/boiling_liquid_expanding_vapor_bleve.php4)
- [17] « Phénomènes dangereux dans les dépôts de liquides inflammables - Incendies et explosions ». Consulté le: 31 mai 2024. [En ligne]. Disponible sur: <https://www.techniques-ingenieur.fr/base-documentaire/environnement-securite-th5/risques-d-explosion-phenomenologie-et-effets-42157210/phenomenes-dangereux-dans-les-depots-de-liquides-inflammables-se5086/uvce-flash-fire-se5086niv10004.html>
- [18] *Boil Over*. Consulté le: 31 mai 2024. [En ligne]. Disponible sur: [https://www.actu-environnement.com/ae/dictionnaire\\_environnement/definition/boil\\_over.php4#:~:text=L%20Boil%20Over%20ou%20Boilover,de%20densit%C3%A9%20des%20deux%20liquides](https://www.actu-environnement.com/ae/dictionnaire_environnement/definition/boil_over.php4#:~:text=L%20Boil%20Over%20ou%20Boilover,de%20densit%C3%A9%20des%20deux%20liquides)
- [19] « Accident de poids lourd TMD », FRANCE - 38 - CHASSE-SUR-RHONE, 18 mai 2022. Consulté le: 31 mai 2024. [En ligne]. Disponible sur: <https://www.aria.developpement-durable.gouv.fr/accident/59079/>
- [20] « TMD: collision et incendie d'un camion de carburant », FRANCE - 38 - SAINT-ANDRE-LE-GAZ, 4 juillet 2016. Consulté le: 31 mai 2024. [En ligne]. Disponible sur: <https://www.aria.developpement-durable.gouv.fr/accident/48256/>
- [21] « TMD: Incendie mortel d'un Camion-citerne », CANADA - 00 - MONTREAL, 9 août 2016. Consulté le: 31 mai 2024. [En ligne]. Disponible sur: <https://www.aria.developpement-durable.gouv.fr/accident/55684/>
- [22] « JOURNAL OFFICIEL DE LA REPUBLIQUE ALGERIENNE N° 10 », 7 mars 1990.
- [23] « L'intelligence artificielle : une solution à la prise de décision quotidienne ? », école supérieure de génie informatique, 2018.
- [24] « Des normes mondiales pour des produits et des services sûrs ».
- [25] J. ELMAHDALI, « L'intelligence artificielle. Outil de la gestion des connaissances. », Ecole de Management de Grenoble, 2018.
- [26] « Les Différents types d'Intelligence Artificielle à destination des entreprises ».

- [27] « Qu'est-ce que l'intelligence artificielle et pourquoi est-ce important ? » [En ligne]. Disponible sur: <https://www.talend.com/fr/resources/what-is-artificial-intelligence/#>
- [28] « IA générative et autres types d'IA ». Consulté le: 31 mai 2024. [En ligne]. Disponible sur: [https://www.adobe.com/ca\\_fr/products/firefly/discover/generative-ai-vs-other-ai.html](https://www.adobe.com/ca_fr/products/firefly/discover/generative-ai-vs-other-ai.html)
- [29] « Qu'est-ce que l'IA ? Tout ce qu'il faut savoir sur l'intelligence artificielle ». Consulté le: 31 mai 2024. [En ligne]. Disponible sur: <https://www.iso.org/fr/intelligence-artificielle/quoi-ia>
- [30] « Intelligence Artificielle et Sécurité Industrielle ». Consulté le: 31 mai 2024. [En ligne]. Disponible sur: <https://dati-plus.com/intelligence-artificielle-et-securite-industrielle/>
- [31] « L'intelligence artificielle au service de la prévention des risques au travail ». Consulté le: 31 mai 2024. [En ligne]. Disponible sur: <https://inforisque.fr/fiches-pratiques/IA-risques-travail.php>
- [32] R. Nicolas, « Les 3 enjeux fondamentaux de l'IA pour l'industrie 4.0 ». [En ligne]. Disponible sur: <https://www.lemondeinformatique.fr/actualites/lire-les-3-enjeux-fondamentaux-de-l-ia-pour-l-industrie-40-86533.html>
- [33] Díaz-Rodríguez, « Artificial intelligence – Human intelligence conflict and its impact on process system safety ».
- [34] « What is the Role of AI in Threat Detection? » Consulté le: 31 mai 2024. [En ligne]. Disponible sur: <https://www.paloaltonetworks.com/cyberpedia/ai-in-threat-detection#>
- [35] « AI in Cybersecurity: Revolutionizing threat detection and defense ». Consulté le: 31 mai 2024. [En ligne]. Disponible sur: <https://datasciencedojo.com/blog/ai-in-cybersecurity/>
- [36] « Quatre avantages de l'IA pour la sécurité, la sûreté et la transparence dans les télécommunications », Quatre avantages de l'IA pour la sécurité, la sûreté et la transparence dans les télécommunications. Consulté le: 31 mai 2024. [En ligne]. Disponible sur: <https://www.ericsson.com/fr/blog/2024/1/four-benefits-of-ai-for-security-safety-and-transparency-in-telecom>
- [37] BELHADJ et ABBAD, « La sécurité de l'Internet des Objets (IoT) », IBN-KHALDOUN DE TIARET, 2021. [En ligne]. Disponible sur: <http://dspace.univ-tiaret.dz/bitstream/123456789/2580/1/TH.M.GE.FR.2022.16.pdf>
- [38] Mankouri Abdelkrim; Taleb Omar, « Programmation de la sécurité Internet des Objets, Etude de cas module WIFI Electric imp », Université de Tlemcen, Algérie, 2016.
- [39] Georges, « Anatomie d'un device IoT : tout ce qu'il faut savoir ». [En ligne]. Disponible sur: <https://www.matooma.com/fr/s-informer/actualites-iot-m2m/device-iot>
- [40] Deon Hattingh, « QU'EST-CE QU'UN ÉCOSYSTÈME IOT ? » Consulté le: 31 mai 2024. [En ligne]. Disponible sur: <https://telecoms.adaptit.tech/fr/blog/what-is-an-iot-ecosystem/>
- [41] Martin Lowry, « Les avantages de l'IoT industriel doivent être renforcés par une sécurité accrue des appareils ».

- [42] « Gestion des identités et des accès pour AWS IoT ». Consulté le: 31 mai 2024. [En ligne]. Disponible sur: [https://docs.aws.amazon.com/fr\\_fr/iot/latest/developerguide/security-iam.html](https://docs.aws.amazon.com/fr_fr/iot/latest/developerguide/security-iam.html)
- [43] Jayna Locke, « Les avantages de IoT ». [En ligne]. Disponible sur: <https://fr.digi.com/blog/post/the-benefits-of-iot-real-world-examples>
- [44] « Internet des objets ou IoT, qu'est-ce que c'est ? » Consulté le: 31 mai 2024. [En ligne]. Disponible sur: <https://fr.rs-online.com/web/content/blog-discovery/maintenance/iot-explication>
- [45] Dawn Illing, « Comment sécuriser les dispositifs IoT ». Consulté le: 31 mai 2024. [En ligne]. Disponible sur: <https://www.globalsign.com/fr/blog/securiser-dispositifs-iot>
- [46] « L avenir est connecte explorer les opportunités de l'entrepreneuriat IoT », 12 avril 2024. Consulté le: 31 mai 2024. [En ligne]. Disponible sur: <https://fastercapital.com/fr/contenu/L-avenir-est-connecte---explorer-les-opportunités-de-l-entrepreneuriat-IoT.html>
- [47] « Des solutions IoT pour tous les secteurs ». Consulté le: 31 mai 2024. [En ligne]. Disponible sur: <https://www.synox.io/services-iot/connecter-vos-objets/>
- [48] « QU'EST-CE QU'UN CAPTEUR CONNECTÉ IOT ? » Consulté le: 24 mars 2024. [En ligne]. Disponible sur: <https://www.ip-systemes.com/quest-ce-quun-capteur-connect-iot.html>
- [49] Kang, H., Lee, S., & Jung, J, « Smart construction safety management using IoT technology », 2016, p. 321 - 326.
- [50] « The Internet of Things (IoT): Applications, investments, and challenges for enterprises ». Consulté le: 31 mai 2024. [En ligne]. Disponible sur: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0007681315000373>
- [51] Rathore, M. M., Ahmad, A., Paul, A., & Rho, S, « Urban planning and building smart cities based on the Internet of Things using Big Data analytics », 2016.
- [52] Atoumi, Yanis, Bensadi, Sonia, et Khanouche, M. Essaid ; promoteur, « Approche évolutionnaire pour la composition de services sensible à la QoS dans l'Internet des Objets à large échelle. », Université Abderrahmane Mira- Bejaia, 2018.
- [53] « Qu'est-ce que l'IoT ? » Consulté le: 25 mai 2024. [En ligne]. Disponible sur: <https://www.oracle.com/fr/internet-of-things/what-is-iot/>

