

Université du 20 Août 1955-SKIKDA

Institut des Sciences et Techniques Appliquées (ISTA-Skikda)

Département : Hygiène, Sécurité et Environnement
Mémoire de fin cycle

En vue de l'obtention du diplôme de Master.

Filière : Hygiène et Sécurité Industrielle

Spécialité : Sécurité des Procédés Pétrolière et Gazière

Thème :

*Analyses statistiques des accidents professionnels au port
de Skikda avec modélisation par le réseau de neurone
artificiel*

Présenté et soutenu publiquement le : 30/06/2024

Par :

Boughazi Mohammed Elamin

Boulebnane Mohamed Ali

Devant le jury composé de :

Président :	Pr.	Innal Fares	U- 20 Août 1955. Skikda
Rapporteur (e) :	Dr.	Otmani Amira	U- 20 Août 1955. Skikda
Rapporteur de stage :	Ing.	U- 20 Août 1955. Skikda
Examineur (trice) :	Dr.	Bousfot widad	U- 20 Août 1955. Skikda

2^{ème} Promotion

Juin 2024

Table des matières

.....	1
.....	5
Remerciements :	8
Dédicace	9
Dédicace	10
Introduction générale	12
Chapitre I : Cadre théorique et conceptuel	15
Introduction	16
1.1 Les accidents professionnels : définitions et concept	16
1.1.1 Définition des accidents professionnels selon l'OIT	16
1.1.2 Définition des accidents professionnels selon l'OSHA.....	16
1.1.3 Définition des accidents professionnels selon la réglementation algérienne.....	17
1.1.4 Classification des accidents selon leur gravité et leurs impacts	18
1.1.5 Facteurs déclencheurs des accidents professionnels	19
1.2 L'activité portuaire et les risques associés	22
1.2.1 Activités principales et risques associés.....	22
1.2.2 Historique des accidents signalés.....	24
1.2.3 Importance économique et logistique du port.....	25
1.3 Introduction aux méthodes statistiques d'analyse	27
1.3.1 Définition des méthodes statistiques d'analyse :.....	27
1.3.2 Statistiques descriptives (moyennes, fréquences, taux d'incidence...)	27
1.3.3 Tests d'hypothèses et corrélations	29
1.4. Les réseaux de neurones artificiels (RNA)	31
1.4.1 Définition et principes fondamentaux des RNA.....	31
1.4.2 Types de réseau	32
1.4.3 Cas d'application dans la prévention des risques	32
1.4.4 Intégration des RNA avec d'autres approches d'intelligence artificielle	34
Conclusion	34
Chapitre II : Analyse Statistique des accidents professionnels au port de Skikda (EPS)	36
Introduction :	37
1. Présentation de l'organisme d'accueil :	37
1.1. Présentation de l'entrep rise Portuaire de Skikda (EPS)	37
1.2 l'objectif social de l'entreprise	37
1.3 Organigramme de l'Entreprise Portuaire de Skikda	39

1.4 Historique du complexe portuaire commercial de l'entreprise Portuaire de Skikda	40
1.5 La dimension internationale	40
1.6 Risque professionnel spécifique au port de Skikda :	40
2. Description des données de l'étude.....	41
2.1 Source des données	41
2.2 Variables de l'étude	42
3. Analyse descriptive et exploratoire	65
3.1 Analyse croisée pour chaque type de post selon les trois dimensions principales.	65
3.2 Moyenne, Taux et ratio.....	65
3.3 Le test d'hypothèse.....	68
Conclusion :.....	69
Chapitre III : Modélisation avec les réseaux de neurones artificiels	70
Introduction	71
1. Objectif de la modélisation :	71
2. Préparation des données pour l'apprentissage automatique	72
2.1. Structure des données utilisées	72
2.2. Variables utilisées (Features)	73
2.3. Encodage des variables catégorielles	73
2.4. Traitement des valeurs manquantes	74
2.5. Données synthétiques (simulées).....	75
2.6. Normalisation / Standardisation.....	76
2.7. Division du jeu de données.....	76
3. Implémentation technique et architecture du modèle.....	76
3.1 Technologies et bibliothèques utilisées	76
3.1.1 Bibliothèques d'analyse de données et d'apprentissage automatique.....	77
3.2. Structure du code et bonnes pratiques	80
4. Application de prédiction des accidents.....	82
4.1. Architecture de l'application.....	82
5. Présentation visuelle de l'application.....	86
5.1. Interface principale et navigation.....	86
5.3. Entraînement et configuration des modèles	92
5.4. Prédiction des risques d'accidents	95
5.6. Personnalisation et paramètres	102
6. Conception des modèles d'apprentissage automatique.....	103
6.1. Random Forest	103

6.2. SVM (Support Vector Machine)	105
6.3. Réseau de Neurones Artificiels (RNA)	106
6.3.1 Architecture des réseaux de neurones multicouches	106
7. Continual learning et mise à jour des modèles	107
7.1 L'apprentissage continu	107
7.2. Résultats comparatifs des trois approches	108
7.3 Sélection du modèle optimal pour le cas d'étude	108
8. Entraînement et évaluation du modèle	110
8.1 Métriques de performance et résultats obtenus	110
8.2 Comparaison des modèles	113
8.3 Forces, faiblesses et limites	114
Conclusion	116
Conclusion Générale	117
Bibliographie	120
Glossaire	125
Annexes	140
FR Résumé (Français)	149

LISTE DES TABLEAUX

Tableau I.1 : Comparaison entre les définitions.....	17
Tableau I.2 : Grille d'évaluation de la gravité d'un accident.....	18
Tableau I.3: Domaines d'application des RNA en prévention des risques.....	34
Tableau II.1 : Source des données de l'étude.....	41
Tableau II.2 : Les Accidents du travail au port au cours des cinq dernières années.....	44
Tableau II.3 : Les Accidents du travail au port selon l'ancienneté.....	46
Tableau II.4 : Les accidents du travail selon le siège de la lésion pendant 5ans.....	50
Tableau II.5 : Les accidents du travail selon la nature de la lésion pendant 5ans.....	52
Tableau II.6 : Les accidents du travail selon la Fonction pendant 5ans.....	53
Tableau II.7 : Les accidents du travail selon l'heure pendant 5ans.....	55
Tableau II.8 : Les accidents du travail selon le jour pendant 5ans.....	56
Tableau II.9 : Les accidents du travail selon la cause de l'accident pendant 5ans.....	59
Tableau II.10 : Les accidents du travail selon la zone de manipulation pendant 5ans.....	61
Tableau II.11 : Les accidents du travail selon le lieu de survenue de l'accident pendant 5ans.....	62
Tableau II.12 : Les accidents du travail selon la nature de la marchandise manipulée pendant 5ans.....	64
Tableau II.13 : type de post selon les trois dimensions principales.....	65
Tableau II.14 : La moyenne annuelle des accidents.....	65
Tableau II.15 : Les accidents du travail selon Les taux de fréquences et de gravités globales pendant 5ans.....	67
Tableau II.16: Test des tendances linéaire.....	68
Tableau III.1 : Type de donnée.....	72
Tableau III.2 : Type d'encodage.....	74
Tableau III.3 : Les composants clés de scikit-learn.....	78
Tableau III.4 : Bibliothèques utilitaires.....	79
Tableau III.5 : Composant utilitaire.....	81
Tableau III.6: Paramètre de Random Forest.....	104
Tableau III.7: Comparaison entre les trois modèles.....	112

LISTE DES FIGURES

Figure II.1 : organigramme de l'entreprise portuaire de Skikda	39
Figure II.2 : les accidents de travail au port de Skikda.....	45
Figure II.3 : La répartition des accidents de travail au port de Skikda selon l'ancienneté...	47
Figure II.4 : La répartition des accidents de travail au port de Skikda selon l'Age.....	48
Figure II.5 : La répartition des accidents de travail au port de Skikda Selon la structure...	49
Figure II.6 : La répartition des accidents de travail au port de Skikda Selon l'heure.....	56
Figure II.7: La répartition des accidents de travail au port de Skikda Selon le jour.....	58
Figures III.1 : Écran d'accueil.....	86
Figures III.2 : Système de navigation par onglets.....	87
Figures III.3 : Importation et gestion des données	87
Figures III.4: Importation de fichiers Excel et CSV	88
Figures III.5: Visualisation des données importées	89
Figures III.6: Ajout de nouveaux travailleurs	90
Figures III.7: Enregistrement de nouveaux accidents	91
Figures III.8: Sélection et configuration du modèle Random Forest	92
Figures III.9: Sélection et configuration du modèle SVM	92
Figures III.10: Sélection et configuration du modèle Neural Network	93
Figures III.11: Processus d'entraînement et logs.....	94
Figures III.12: Sélection d'un travailleur existant.....	95
Figures III.13: Analyse de sensibilité interactive.....	96
Figures III.14: Types de rapports disponibles.....	97
Figures III.15: Exemple de rapport statistique.....	98
Figures III.16: Visualisations interactives.....	99
Figures III.17: Exportation des rapports et visualisations.....	100
Figures III.18: Sélection du thème.....	101
Figures III.19: Journal des opérations.....	102
Figures III.20: Matrices de confusion pour le modèle Random Forest.....	109
Figures III.21: Matrices de confusion pour le modèle SVM.....	110
Figures III.22: Matrices de confusion pour le modèle MLP.....	111

LISTE DES ABREVIATION

Abréviation	Signification
<i>AI</i>	Intelligence Artificielle
<i>ANN</i>	Artificial Neural Network
<i>CSV</i>	Comma-Separated Values
<i>DMA</i>	Direction des Moyens Administratifs
<i>DME</i>	Direction du Matériel et de l'Équipement
<i>DMI</i>	Direction de la Maintenance et de l'Infrastructure
<i>DMC</i>	Direction du Mouvement Commercial
<i>DMT</i>	Direction de la Manutention et du Transport
<i>DRH</i>	Direction des Ressources Humaines
<i>DQSE</i>	Direction Qualité Sécurité Environnement
<i>F1-score</i>	Mesure harmonique entre précision et rappel
<i>FN</i>	Faux Négatif
<i>FP</i>	Faux Positif
<i>HSE</i>	Hygiène, Sécurité, Environnement
<i>ILO / OIT</i>	International Labour Organization
<i>joblib</i>	Outil de sauvegarde des modèles
<i>ML</i>	Machine Learning
<i>MLP</i>	Multi-Layer Perceptron
<i>OSHA</i>	Occupational Safety and Health Administration
<i>Python</i>	Langage de programmation
<i>RF</i>	Random Forest
<i>RNA</i>	Réseau de Neurones Artificiels
<i>SVM</i>	Support Vector Machine
<i>Tkinter</i>	Interface graphique Python
<i>TN</i>	Vrai Négatif
<i>TP</i>	Vrai Positif
<i>UI</i>	User Interface
<i>Accuracy</i>	Précision globale
<i>Recall</i>	Sensibilité
<i>Precision</i>	Précision des prédictions positives
<i>Confusion Matrix</i>	Matrice de performance
<i>Training Set</i>	Jeu d'apprentissage
<i>Validation Set</i>	Jeu de validation

Remerciements :

Ce mémoire représente l'aboutissement d'un parcours universitaire riche en apprentissages, en défis et en rencontres déterminantes. Il n'aurait jamais vu le jour sans le soutien et l'accompagnement de personnes précieuses qui ont marqué notre chemin.

Nous exprimons notre profonde gratitude à **Madame Otmani Amira**, notre encadrante, mais aussi notre enseignante depuis nos toutes premières années à l'institut. Présente à chaque étape de notre formation, elle a su nous guider avec patience, générosité et rigueur. Sa disponibilité constante, ses conseils avisés, la clarté de ses explications ainsi que la pertinence de ses remarques ont été essentiels à la réussite de ce travail.

Grâce à sa vision, à son exigence scientifique et à la confiance qu'elle a toujours placée en nous, nous avons pu mener ce projet à bien avec engagement et persévérance. Elle a su, par sa présence continue et ses encouragements, transformer chaque difficulté en une opportunité d'apprentissage, faisant de ce mémoire bien plus qu'un simple travail académique.

À **Dr. Otmani Amira**, nous tenons à adresser nos remerciements les plus sincères pour avoir été un véritable pilier tout au long de notre parcours, du premier jour à l'institut jusqu'à l'achèvement de ce projet final.

Nous remercions également les membres du jury d'avoir accepté d'évaluer notre travail. Leur regard critique et leurs remarques constructives sont pour nous une véritable richesse.

Nos remerciements s'adressent également aux professionnels rencontrés lors de notre stage au port de Skikda, pour leur accueil chaleureux, leur disponibilité et les informations précieuses qu'ils nous ont partagées. Leur collaboration a été essentielle pour la compréhension du contexte réel de la sécurité portuaire.

Dédicace

Je dédie ce travail, avec tout mon amour et ma reconnaissance, à ceux qui occupent une place irremplaçable dans mon cœur.

À **mon père Lotfi** et **ma mère Sabrina**, les premiers piliers de ma vie, mes plus grands soutiens.

Papa, toi qui as toujours veillé à ce que je ne manque de rien, qui t'es sacrifié sans relâche pour nous offrir une vie digne et paisible... Ce travail est un petit retour d'honneur pour toutes tes veilles et ton amour silencieux.

Maman, ta présence constante dans chacun de mes pas, ta confiance aveugle en moi, et tes rêves élevés que tu portais pour moi ont été le moteur de mon ambition. Tu as cru en moi avant tout le monde, et je te le dois.

À **mes deux petits frères, Noufel et Chemseddine**,

Noufel, mon frère, tes regards remplis de fierté, ton soutien discret mais constant, et ton admiration sincère m'ont toujours donné la force d'avancer. Tu es mon miroir et mon plus grand encouragement.

Chemseddine, petit frère curieux et rêveur, toujours à suivre mes pas avec enthousiasme... Je suis fier de toi, et je sais que tu construiras un bel avenir. Continue de croire en toi, comme moi je crois en toi.

À **mes grands-parents**

Bakir et **Zohra**, avec qui j'ai grandi. Peu comprennent à quel point vous avez compté pour moi. Vos larmes dans mes réusites, vos mots d'encouragement, votre amour inconditionnel... Rien ne pourra jamais les égaler.

Ramadan et **Khadidja**, malgré la distance, votre présence a toujours été ressentie. Vos appels, vos mots simples mais forts ont réchauffé mon cœur dans les moments importants.

À **ma tante Amina**,

Cette femme discrète mais présente, toujours avant tout le monde. Tu es pour moi un repère, une source d'inspiration que j'ai longtemps suivie sans m'en rendre compte. Aujourd'hui, j'espère que ce travail est à la hauteur de ce que tu as représenté pour moi.

À **toute ma famille**

Mes tantes, oncles, cousins et cousines – merci pour votre affection et votre présence.

À mes amis fidèles : **Imad, Ayoub, Abdessamad**,

Des frères de cœur depuis l'enfance. Merci d'avoir été là, constants, authentiques, et toujours fiers de mes pas. Vous êtes irremplaçables.

À toutes celles et ceux qui ont cru en moi, m'ont soutenu, écouté, encouragé... Ce mémoire vous appartient autant qu'à moi. Merci pour tout. J'espère vous avoir rendus fiers.

Boughazi Mohammed Elamin

Dédicace

Je dédie ce succès à mes chers parents, pour votre amour, votre patience, vos encouragements et vos prières pour ma réussite continue. Vous êtes ma source de force et de bonheur.

À mon **cher père**,

Ammar, ce simple succès n'est que reconnaissance et gratitude pour tous les efforts que vous avez déployés pour moi tout au long de ma vie : votre dévouement, votre vigilance constante, vos sacrifices et votre amour inestimable et silencieux.

À ma **chère mère**,

Hassina, mon pilier, mon amour précieux, et tout ce que je possède : votre confiance aveugle en moi, votre foi en moi avant tout le monde, vos prières pour moi et vos encouragements constants à étudier et à exceller depuis mon plus jeune âge. Cette excellence était la vôtre. Tous les beaux rêves que vous avez imaginés pour moi, nous les réalisons ensemble.

Merci beaucoup. Vous êtes une joie irremplaçable.

À mes chers frères- **Zino, Oussama et Mouloud**, vous m'avez toujours soutenu et avez été fiers de moi, tout comme je suis fier de vous. Je te dédie ce succès. C'est notre réussite à tous les quatre.

Ma petite sœur et chérie, **Afef**,

je t'aime très fort et je sais que tu es fière de moi, tout comme je le suis de toi.

J'espère que tu suivras les traces de ce succès et que tu atteindras encore de nouveaux sommets, si Dieu le veut, ma chère.

À ma nièce, **Joury**

Ma chère, je te dédie ce succès comme un bon présage et que tu atteignes encore de nouveaux sommets à l'avenir , si Dieu le veut.

À mon cousin-**Khairou**

Mon premier soutien, mon ami et mon frère, mon principal pilier dans mes études. J'ai toujours compté sur toi. Tu as toujours été un facteur majeur de ma réussite. Je te suis extrêmement reconnaissant. Je ne peux te rendre la pareille pour tout ce que tu as fait pour moi. J'apprécie tous tes efforts, surtout pendant mes années de bac examen. Merci beaucoup. **Akram Nadir Iskandar Alaa Nasro. Zaki.** Merci beaucoup pour vos efforts, votre soutien constant et vos encouragements constants.

Ce succès est pour moi et pour vous. J'espère vous avoir rendu heureux.

Boulebnane Mohamed Ali

Introduction générale

Introduction générale

La sécurité au travail représente un enjeu fondamental pour toute organisation, en particulier dans les secteurs industriels à haut risque tels que les activités portuaires. Le port de Skikda, en tant que plateforme stratégique du commerce maritime en Algérie, est exposé à divers dangers professionnels liés à la manutention, au transport, aux opérations logistiques et aux conditions environnementales. Malgré les efforts mis en œuvre en matière de prévention, les accidents du travail demeurent fréquents et posent un problème de santé publique, de performance économique et de responsabilité sociale.

Face à ce problème, l'analyse des données relatives aux accidents professionnels constitue un outil précieux pour identifier les facteurs de risque, évaluer les tendances, et orienter les décisions en matière de prévention. L'approche statistique classique permet de dresser un diagnostic global de la situation en exploitant les variables telles que l'ancienneté, l'âge, la fonction occupée ou encore la structure d'affectation. Toutefois, pour dépasser les limites des méthodes traditionnelles et améliorer la capacité de prédiction, il devient pertinent d'explorer des outils plus performants issus de l'intelligence artificielle.

C'est dans cette perspective que s'inscrit ce travail de recherche, qui vise à analyser statistiquement les accidents professionnels enregistrés au port de Skikda sur les cinq dernières années (du 2020 jusqu'au 2024), tout en développant un modèle de prédiction basé sur les réseaux de neurones artificiels (RNA). Ces derniers, grâce à leur aptitude à apprendre à partir de données complexes et non linéaires, offrent une alternative innovante et prometteuse pour anticiper les situations à risque et renforcer les dispositifs de sécurité.

La problématique qui se pose peut donc être formulée comme suit :

Comment l'analyse statistique des données d'accidents professionnels et la modélisation avec le réseau de neurones artificiels peuvent contribuer à anticiper les situations à risque et à renforcer les mesures de sécurité au port de Skikda ?

Pour répondre à cette problématique plusieurs axes ont été présenté : une présentation du cadre théorique lié à la sécurité au travail et aux réseaux de neurones, une analyse descriptive et inférentielle des accidents recensés, suivie de la construction et de l'évaluation d'un modèle prédictif. L'objectif final est de proposer un outil d'aide à la décision susceptible d'appuyer les responsables HSE dans la mise en place de stratégies ciblées de prévention des accidents.

Ce mémoire est structuré en trois chapitres principaux :

Chapitre I : Cadre théorique et conceptuel des accidents professionnels

Il présente les définitions clés, les types d'accidents, les facteurs de risque, ainsi que les méthodes d'analyse statistique et les bases théoriques des réseaux de neurones artificiels.

Chapitre II : Analyse statistique des accidents professionnels au port de Skikda (EPS)

Ce chapitre est divisé en deux volets :

1. Une présentation détaillée du port de Skikda, ses infrastructures, sa fonction économique.
2. Une analyse des données réelles d'accidents : collecte, nettoyage, organisation et exploration statistique.

Chapitre III : Modélisation avec les réseaux de neurones artificiels

Il retrace le développement du programme de prédiction (Python), la préparation des données, la configuration des modèles (SVM, RF, RNA), leur évaluation, et l'interprétation des résultats obtenus.

Chapitre I : Cadre théorique et conceptuel

Introduction

Dans tous les domaines du travail, le risque d'un accident professionnel se produise est toujours présent, la raison et la gravité peut certes être différente, cependant, cela n'est pas dépourvu de conséquences, un accident professionnel est imprévu et peut se produire à n'importe quel moment, néanmoins, plusieurs méthodes de prévention ont été préalablement élaborés pour d'une part améliorer les conditions de travail, mais aussi d'autre part, de préparer un dispositif d'intervention afin de mieux gérer la situation en cas de crise suite à un accident professionnel de grande gravité ou de gravité modérée.

Dans ce chapitre consacré au cadrage théorique et conceptuel, nous allons reprendre des différentes notions et concepts en relation avec notre travail, notamment, celles en relation avec notre sujet les accidents professionnels, leur classification ainsi que les différents facteurs qui régissent leur déclenchement.

1.1 Les accidents professionnels : définitions et concept

1.1.1 Définition des accidents professionnels selon l'OIT

Selon l'Organisation Internationale du Travail (OIT), un accident du travail est défini comme : « Un événement survenant dans le cours du travail, entraînant une blessure, une maladie ou la mort. Il peut résulter de causes ponctuelles ou répétées et se produire sur le lieu de travail ou en relation directe avec l'activité professionnelle » (Organisation Internationale du Travail , 2003)

Selon l'Organisation Internationale du Travail (OIT), un accident n'est reconnu comme « accident professionnel » que s'il existe un lien de causalité évident entre l'activité exercée dans le cadre du travail et le dommage subi. Cette approche est intégrée dans la Convention n°121 adoptées en 1964, portant sur les prestations liées aux accidents du travail et aux maladies professionnelles, un texte largement adopté par les États membres.

1.1.2 Définition des accidents professionnels selon l'OSHA

Aux États-Unis, l'OSHA, qui relève du Département du Travail, définit un accident du travail comme : « Tout événement imprévu qui entraîne des blessures corporelles ou des dommages matériels. », et plus précisément : « Un événement ou une exposition liée au travail qui cause une blessure ou une maladie à un employé et qui doit être consigné conformément aux exigences d'enregistrement de l'OSHA. » (OSHA U. D., 2005)

Cette conceptualisation insiste sur le caractère imprévu de l'incident, son lien étroit avec les tâches professionnelles exécutées, ainsi que sur la nécessité d'une traçabilité administratif rigoureuse. Ces éléments sont essentiels pour l'élaboration des analyses statistiques précises et le développement de stratégies de prévention fondées sur des preuves empiriques.

1.1.3 Définition des accidents professionnels selon la réglementation algérienne.

En Algérie, l'accident du travail est défini par la Loi n° 83-13 du 2 juillet 1983 relative aux accidents du travail et maladies professionnelles, notamment à l'article 4 : « Est considéré comme accident de travail, quelle qu'en soit la cause, l'accident survenu par le fait ou à l'occasion du travail à toute personne salariée ou travaillant, à quelque titre ou en quelque lieu que ce soit, pour un ou plusieurs employeurs » (République Algérienne Démocratique et Populaire, 1983).

En Algérie, la législation insiste sur l'existence d'un lien spatio-temporel entre l'accident et l'exercice de l'activité professionnelle, tout en prévoyant une couverture par la Caisse Nationale des Assurances Sociales (CNAS). Aussi, la circulaire interministérielle n°06/92 du 21 janvier 1992 détaille les procédures relatives à la déclaration, l'enquête et l'indemnisation (Ministère du Travail et de la Sécurité Sociale, , 1992, p. 3)

Tableau I.1 : Comparaison entre les définitions

Critère	OIT	OSHA	Législation algérienne
Origine de l'événement	Activité professionnelle	Lien avec le travail	Survenu par le fait ou à l'occasion du travail
Conséquences	Blessure, maladie, décès	Blessure ou maladie enregistrable	Toute atteinte corporelle liée au travail
Objectif de la définition	Protection sociale universelle	Surveillance et prévention des risques	Encadrement juridique et assurantiel
Outil juridique principal	Convention n°121	OSHA Regulations – 29 CFR 1904	Loi n° 83-13 et circulaires associées

Ces définitions traduisent une reconnaissance institutionnelle de l'accident du travail comme un phénomène aux causes multiples à la fois juridiques, médicales et organisationnelles. Leur clarté est indispensable à la création de bases de données statistiques fiables, supports essentiels des modèles prédictifs modernes, tels que les réseaux de neurones artificiels. Elles constituent

ainsi un pilier central dans l'élaboration de stratégies de prévention ou de gestion des risques professionnels, notamment dans des environnements complexes comme les établissements portuaires.

1.1.4 Classification des accidents selon leur gravité et leurs impacts

La classification des accidents du travail en fonction de leur gravité constitue une étape importante dans l'évaluation des risques professionnels. Cette démarche dépasse la simple présentation de leurs conséquences elle permet également de définir les priorités en matière de prévention et d'optimiser les conditions de travail. Divers organismes, tant au niveau national qu'international, ont ainsi développé des cadres d'évaluation visant à standardiser cette catégorisation.

A. Critères de classification

Les critères principaux utilisés pour classer les accidents selon leur gravité incluent :

- **La nature de la blessure** : type de lésion, partie du corps affectée.
- **La durée de l'incapacité de travail** : nombre de jours d'arrêt.
- **Les conséquences à long terme** : séquelles permanentes, invalidité.
- **L'impact sur l'organisation** : perturbation des opérations, coûts associés.

B. Niveaux de gravité

Une grille d'évaluation couramment utilisée, notamment par des organismes tels que l'INRS et la CNESST, propose la classification suivante :

Tableau I.2 : Grille d'évaluation de la gravité d'un accident.

Niveau	Description	Conséquences typiques
1. Mineur	Accident sans arrêt de travail	Égratignures, contusions légères
2. Modéré	Accident avec arrêt de travail court	Entorses, coupures nécessitant des soins
3. Grave	Accident avec incapacité temporaire prolongée	Fractures, blessures nécessitant une hospitalisation
4. Très grave	Accident avec incapacité permanente	Amputations, lésions neurologiques
5. Mortel	Accident entraînant le décès	Chutes de hauteur, électrocutions

C. Impacts des accidents selon leur gravité

- **Impacts humains** : souffrance physique et psychologique, perte de capacité de travail.
- **Impacts économiques** : coûts directs (soins médicaux, indemnités) et indirects (perte de productivité, remplacement du personnel).
- **Impacts organisationnels** : perturbation des opérations, atteinte à la réputation de l'entreprise.
- **Impacts juridiques** : sanctions, litiges, augmentation des primes d'assurance.

D. Application dans le secteur portuaire

Dans le contexte portuaire, les accidents peuvent avoir des conséquences particulièrement graves en raison de la nature des activités (manutention de charges lourdes, utilisation de machines, environnement maritime). Par exemple :

- **Accidents mineurs** : coupures lors de la manipulation de cordages.
- **Accidents graves** : chutes de conteneurs, collisions entre engins.
- **Accidents mortels** : noyades, écrasements par des équipements lourds.

Une étude menée sur les ports européens a révélé que les accidents graves et mortels représentent une proportion significative des incidents, soulignant la nécessité d'une prévention renforcée dans ce secteur. (De Smet, 2020)

1.1.5 Facteurs déclencheurs des accidents professionnels

La taxonomie des accidents du travail constitue une démarche essentielle pour en cerner les fondements, adapter les stratégies de prévention adéquates et concevoir des politiques de sécurité performantes particulièrement dans le context portuaire.

Ces incidents ne surviennent pas par hasard, mais résultent d'interactions complexes entre des facteurs complexes, internes et externes, au système de travail. Une analyse approfondie de ces déterminants permet d'identifier avec précision les mécanismes à l'origine des accidents et de mettre en place des mesures préventives ciblées et efficaces.

A. Les facteurs humains : au cœur de la causalité des accidents

Le facteur humain demeure, historiquement et statistiquement, la cause principale de la majorité des accidents professionnels. Selon James Reason, l'une des figures les plus influentes dans le domaine de la sécurité organisationnelle, les erreurs humaines doivent être comprises comme le produit final d'une **chaîne systémique de dysfonctionnements** (Reason, 1990, p. 173)

Ces erreurs se subdivisent en :

- **Les erreurs de type cognitif** (mauvaise perception d'un risque, surcharge mentale, distraction),
- **Les violations intentionnelles** (non-respect volontaire des consignes, souvent liées à des normes de production non compatibles avec la sécurité),
- **Les automatismes routiniers** (où l'habitude annule la vigilance).

Une étude de l'INRS démontre que près de **70 % des accidents mortels** sont liés à un comportement humain inadapté, souvent influencé par une **pression hiérarchique**, un **manque de repos** ou une **formation déficiente** (INRS, 2010)

B. Les facteurs techniques : la défaillance des moyens de production

Les machines, équipements et installations techniques sont des éléments critiques. Lorsqu'ils sont mal entretenus ou non adaptés aux tâches spécifiques, ils deviennent source de risques importants. Bouthinon-Dumas et Chammas (2014) soulignent que la vétusté des équipements est impliquée dans **plus de 20 % des accidents graves** sur les sites industriels (Bouthinon-Dumas, 2014)

De plus, dans les ports, l'utilisation d'équipements de levage complexes (grues, ponts roulants, palonniers) nécessite une **surveillance technique accrue**. Un défaut dans les systèmes hydrauliques ou électroniques peut entraîner des effondrements, des chutes de charges ou des écrasements.

C. Les facteurs organisationnels : la structure invisible du risque

L'organisation du travail influence directement les comportements et les performances des travailleurs. Une **mauvaise planification**, des **procédures imprécises** ou une **communication interne fragmentée** peuvent générer des contextes favorables à l'apparition de risques. Selon

Amalberti (2001), les organisations à haut risque doivent développer une **résilience active** qui leur permet d'anticiper, de détecter et de corriger les déviations (Amalberti, 2001, p. 213)

Exemples :

- Absence de contrôle de sécurité avant une opération de chargement/déchargement,
- Répartition non équitable des tâches, générant surcharge et fatigue,
- Ambiguïté dans les instructions de sécurité.

L'étude menée par Dekker (2005) introduit le concept de "drift into failure" (glissement vers l'échec) où l'organisation, en optimisant ses performances économiques, réduit progressivement ses marges de sécurité (Dekker, 2005)

D. Les facteurs environnementaux : le cadre physique du danger

L'environnement physique agit comme catalyseur ou inhibiteur des risques :

- **Conditions météorologiques extrêmes** (pluie, vent, brouillard),
- **Luminosité insuffisante**,
- **Niveau sonore élevé** (perturbant les alertes sonores),
- **Températures extrêmes** (impactant les fonctions cognitives et motrices).

Dans un port comme celui de Skikda, exposé à un climat maritime, l'humidité combinée aux surfaces métalliques rend les sols particulièrement glissants, surtout dans les zones de déchargement de conteneurs. Une recherche menée par Gendreau (2009) montre que **les conditions climatiques défavorables doublent le risque de chute et de collision en zone portuaire** (Gendreau,, 2009, p. 147)

E. Interactions systémiques entre les facteurs

Il est rare qu'un accident soit dû à un facteur unique. Les analyses post-accidents montrent presque systématiquement une **interaction multifactorielle** :

- Un travailleur peu formé (facteur humain),
- Utilisant un engin vétuste (facteur technique),

- dans un contexte d'urgence logistique (facteur organisationnel),
- sous une pluie intense (facteur environnemental).

Cette approche systémique est défendue par Rasmussen (1997), qui plaide pour une modélisation intégrée du **système sociotechnique**, intégrant tous les niveaux : opérateurs, superviseurs, direction, réglementation (Rasmussen, 1997)

1.2 L'activité portuaire et les risques associés

1.2.1 Activités principales et risques associés

L'activité portuaire est caractérisée par une grande diversité d'opérations, impliquant un large éventail d'acteurs et de processus complexes. Cette complexité génère une variété importante de risques professionnels, qui doivent être identifiés et évalués afin de garantir la sécurité des travailleurs.

1.2.1.1 Principales activités portuaires :

- **Manutention des marchandises :** Cette activité comprend le chargement, le déchargement, le transfert et le stockage de marchandises diverses (conteneurs, vrac solides, liquides, produits chimiques). Les travailleurs manipulent des charges lourdes, souvent avec l'aide de grues, chariots élévateurs, ou convoyeurs automatisés.
- **Opérations de navigation et pilotage :** Impliquent la coordination des mouvements des navires dans le port, la gestion des amarres et des remorqueurs. Cette activité expose aux risques liés aux déplacements en milieu aquatique et à proximité d'équipements lourds.
- **Maintenance des infrastructures et équipements :** La maintenance des grues, quais, systèmes électriques, et autres installations exige l'intervention dans des environnements parfois dangereux, avec des risques d'électrocution, de chutes et d'exposition à des substances toxiques.
- **Gestion administrative et contrôle douanier :** Même si cette activité semble moins exposée physiquement, elle peut présenter des risques psychosociaux importants, liés au stress, à la surcharge de travail, et à la gestion des flux de personnes et marchandises.

1.2.1.2 Risques associés :

- **Risques mécaniques et physiques :**

- Chutes de hauteur, glissades, trébuchements (zones humides, surfaces inégales).
- Heurts ou écrasements par des engins mobiles (chariots élévateurs, camions, portiques de conteneurs).
- Effondrement de charges mal arrimées ou manutentionnées.
- Vibrations et bruit intense, pouvant entraîner des troubles musculo-squelettiques (TMS) et des troubles auditifs (perte auditive professionnelle).

- **Risques chimiques et biologiques :**

- Exposition aux hydrocarbures, solvants, agents corrosifs, gaz toxiques, surtout dans les ports pétroliers ou chimiques.
- Risques biologiques dans les zones de manutention des produits alimentaires ou dans les conteneurs réfrigérés (moisissures, bactéries).

- **Risques liés à l'environnement de travail :**

- Conditions météorologiques extrêmes (vent fort, pluie, températures extrêmes) affectant la sécurité des opérations en extérieur.
- Éclairage insuffisant ou défaillant dans certaines zones de travail.

- **Risques organisationnels et humains :**

- Fatigue due aux horaires décalés ou aux longues heures de travail.
- Manque de formation ou de sensibilisation aux règles de sécurité.
- Pression liée aux délais de livraison, pouvant entraîner des comportements à risque.

1.2.1.3 Analyse spécifique au port de Skikda :

Selon une étude réalisée par Khelifa et Benaïssa (2019), le port de Skikda présente des particularités qui augmentent certains risques, notamment une infrastructure vieillissante, un fort taux d'occupation des quais, et une insuffisance dans la maintenance des équipements

lourds (Khelifa, 2019) Cette situation accroît la probabilité d'accidents liés à la manutention des conteneurs et aux opérations de chargement/déchargement.

De plus, le rapport annuel de la CNAS (2021) souligne que dans les ports algériens, 70% des accidents professionnels sont liés aux chutes et aux écrasements, avec une forte concentration dans le secteur portuaire de Skikda (CNAS, 2021)

1.2.2 Historique des accidents signalés

L'analyse historique des accidents professionnels dans le secteur portuaire est essentielle pour comprendre l'évolution des risques, identifier les causes récurrentes, et adapter les politiques de prévention. Cette section s'appuie sur des données empiriques provenant de rapports institutionnels, d'études de cas et de publications scientifiques spécialisées.

1.2.2.1 Évolution historique des accidents dans les ports :

Les ports, en tant que plaques tournantes du commerce international, ont toujours été des lieux à haut risque en raison des activités intenses et de la manipulation de marchandises lourdes. Au début du XXe siècle, l'absence de réglementation stricte et les conditions de travail rudimentaires entraînaient un taux élevé d'accidents graves (Martin, 2005, p. 34)

Au fil des décennies, la prise de conscience progressive de la nécessité de la sécurité au travail a conduit à l'adoption de mesures réglementaires, notamment :

- L'instauration de normes internationales par l'Organisation Internationale du Travail (OIT), telles que la Convention n° 152 relative à la sécurité et à la santé des travailleurs portuaires (1979) ((OIT), 1979)
- Le renforcement des contrôles nationaux et la mise en place d'organismes dédiés à la prévention des accidents professionnels.

1.2.2.2 Cas spécifique des ports algériens et du port de Skikda :

D'après une étude menée par Boudjemaa et al. (2018), le port de Skikda a connu plusieurs accidents majeurs entre 2000 et 2015, impliquant principalement :

- Des chutes de travailleurs lors des opérations de manutention (35% des cas).
- Des collisions entre engins de manutention (25%).
- Des incidents liés à la manipulation de produits chimiques (15%).

Ces accidents ont souvent résulté d'un cumul de facteurs : défaillances techniques, insuffisance de formation, non-respect des consignes de sécurité (Boudjemaa, 2018)

Le rapport de la CNAS (2021) confirme que le taux d'accidents déclarés dans le secteur portuaire algérien est resté stable ces dernières années, autour de 12 accidents pour 1 000 travailleurs, mais souligne que la gravité moyenne de ces accidents reste élevée, avec un taux important de cas d'incapacité permanente (CNAS, 2021, p. 95)

Exemples de cas :

- En 2013, un accident grave au port de Skikda a causé la mort de deux dockers lors de la chute d'un conteneur mal arrimé, mettant en lumière les lacunes en matière de formation et de contrôle des opérations de levage (Ministère du Travail et de la Sécurité (Algérie),, 2013)
- En 2017, un incendie dans un entrepôt de produits chimiques du port a entraîné des blessures graves à plusieurs employés, révélant des failles dans les dispositifs de sécurité incendie et la gestion des substances dangereuses (Direction Générale des Ports (Algérie), , 2018)

1.2.3 Importance économique et logistique du port

1.2.3.1 Importance économique

Les ports sont souvent qualifiés de « portes d'entrée » des économies nationales. En raison de la mondialisation croissante, leur rôle s'est amplifié pour devenir un moteur incontournable de la croissance économique. En effet, ils facilitent non seulement l'échange de marchandises à grande échelle, mais aussi l'implantation d'industries en zones portuaires, créant ainsi des pôles d'activité économique et d'emploi (Notteboom, 2017, p. 253)

Au niveau macroéconomique, les performances d'un port peuvent influencer la balance commerciale d'un pays. Par exemple, une bonne gestion portuaire réduit les coûts de transport et optimise les délais, ce qui augmente la compétitivité des exportateurs (UNCTAD, 2020). Cette compétitivité est particulièrement importante pour l'Algérie qui cherche à diversifier ses exportations hors hydrocarbures.

De plus, les ports créent un effet multiplicateur important sur l'économie locale. À Skikda, le port est un catalyseur pour les industries chimiques, pétrolières, et manufacturières (Benhamou,

2016, p. 58). Ce rôle a un impact direct sur l'emploi local et sur les infrastructures connexes (routes, entrepôts, services logistiques).

1.2.3.2 Dimension logistique et intégration multimodale

Sur le plan logistique, le port n'est plus une simple plateforme de transbordement, mais un centre d'intégration de chaînes d'approvisionnement globales. Selon Rodrigue et al. (Rodrigue, 2017), l'efficacité d'un port dépend largement de sa capacité à connecter les modes de transport (maritime, ferroviaire, routier) pour garantir un transfert fluide et rapide des marchandises.

Cette intégration est d'autant plus critique dans un pays comme l'Algérie, où les distances entre les centres de production, de consommation, et d'exportation sont significatives. Le port de Skikda joue ainsi un rôle pivot dans la logistique nationale, en permettant de réduire les délais et les coûts liés au transport intérieur (Ministère des Transports., 2022, p. 18)

1.2.3.3 Impacts socio-économiques

Au-delà des aspects économiques et logistiques, les ports ont des impacts sociaux importants. Ils génèrent de nombreux emplois directs dans les activités portuaires (manutention, administration, sécurité), ainsi que des emplois indirects dans les secteurs annexes (transport, maintenance, services) (ILO . International Labour Organization, , 2019).

En outre, le développement portuaire peut contribuer à la réduction des inégalités régionales en favorisant le développement économique dans des zones souvent défavorisées. Par exemple, l'expansion et la modernisation du port de Skikda ont eu des retombées positives sur l'économie locale, améliorant les conditions de vie et dynamisant les activités commerciales (Benhamou, 2016, p. 62)

1.2.3.4 Enjeux environnementaux et sécuritaires liés à l'importance économique

Toutefois, cette importance économique et logistique s'accompagne de défis majeurs. Le port est une zone à haute vulnérabilité où les risques d'accidents industriels, de pollution, et de perturbations logistiques sont élevés (IMO, 2020). La gestion des risques doit donc être intégrée dans la planification portuaire, notamment en matière de sécurité des travailleurs et de protection de l'environnement.

Par ailleurs, la dépendance aux ports expose les économies nationales à des risques liés à des perturbations telles que les grèves, les incidents techniques ou les catastrophes naturelles (OECD, 2018). Cela souligne la nécessité d'une résilience accrue des infrastructures portuaires.

1.3 Introduction aux méthodes statistiques d'analyse

1.3.1 Définition des méthodes statistiques d'analyse :

L'analyse statistique est un ensemble de techniques mathématiques visant à extraire, organiser, interpréter et présenter des données afin de faciliter la prise de décision ou la compréhension des phénomènes observés. Ces méthodes se divisent généralement en deux grandes catégories : les statistiques descriptives et les statistiques inférentielles.

- A. **Les statistiques descriptives** : permettent de résumer les caractéristiques essentielles d'un ensemble de données, notamment par des mesures de tendance centrale (moyenne, médiane, mode), de dispersion (écart-type, variance, étendue), ainsi que par des représentations graphiques (histogrammes, diagrammes en boîte, etc.) (Pagano, 2018, pp. 25-47)
- B. **Les statistiques Différentielles** : elles visent à tirer des conclusions ou à faire des prédictions à partir d'un échantillon représentatif d'une population. Cela se fait à travers des tests d'hypothèses (test t de Student, test du chi carré, etc.), des intervalles de confiance, ainsi que des modèles de régression (linéaire, logistique, etc.) (Moore, 2017, pp. 404-450)

Dans le contexte de la prévention des accidents professionnels, ces méthodes sont fondamentales pour analyser la fréquence des incidents, identifier les facteurs de risque, détecter des corrélations entre variables, et surtout évaluer l'efficacité des mesures de sécurité mises en place. Elles constituent également une base essentielle pour l'intégration de techniques plus avancées, telles que les modèles d'intelligence artificielle comme les réseaux de neurones artificiels (RNA), utilisés pour la prédiction des événements à haut risque (Levesque, 2007, pp. 213-230)

1.3.2 Statistiques descriptives (moyennes, fréquences, taux d'incidence...)

Les statistiques descriptives constituent la première étape essentielle dans l'analyse quantitative des données relatives aux accidents professionnels. Elles fournissent un aperçu clair, structuré et synthétique des phénomènes observés, permettant ainsi de dégager des tendances générales et d'identifier des anomalies ou des groupes à risque. L'importance de cette phase réside dans

sa capacité à transformer un ensemble de données brutes, souvent volumineux et hétérogène, en informations exploitables, compréhensibles par les décideurs et les spécialistes de la sécurité au travail (Agresti, *Statistical Methods for the Social Sciences*, 2018, p. 12)

1.3.2.1 Moyennes et mesures de tendance centrale

La moyenne arithmétique est la mesure la plus couramment utilisée pour résumer des variables quantitatives, telles que l'âge moyen des travailleurs victimes d'accidents, la durée moyenne d'exposition aux risques ou encore la moyenne annuelle d'accidents dans un secteur donné. Toutefois, la moyenne doit toujours être interprétée en conjonction avec des mesures de dispersion pour comprendre la variabilité des données (Field, 2013, p. 40)

La médiane, qui correspond à la valeur centrale d'une distribution ordonnée, offre un complément utile, surtout lorsque la distribution est asymétrique ou que des valeurs extrêmes sont présentes. Par exemple, si la distribution des âges des victimes est fortement biaisée vers les jeunes travailleurs, la médiane peut mieux refléter la tendance centrale que la moyenne (Hays, 1994, p. 65)

1.3.2.2 Fréquences et distributions

Le calcul des fréquences absolues et relatives (pourcentages) pour des catégories qualitatives est fondamental pour comprendre la répartition des types d'accidents, des causes, des postes concernés, ou encore des niveaux de gravité. Par exemple, établir que 35 % des accidents dans un port concernent des chutes permet de prioriser les mesures de prévention ciblant ce risque spécifique (Agresti, 2018)

Ces données peuvent être visualisées par des histogrammes, des diagrammes en barres ou des camemberts, ce qui facilite la communication des résultats à un public varié (Cherchye, 2018)

1.3.2.3 Taux d'incidence et taux de fréquence

Les taux d'incidence sont des indicateurs standardisés qui permettent d'évaluer la fréquence des accidents en tenant compte de la population exposée au risque. Par exemple, le taux d'incidence se calcule généralement par :

Taux d'incidence

$$= (\text{Nombre d'accidents sur une période donnée} \div \text{effectif moyen des travailleurs}) \times 1000 \quad \text{(I.1)}$$

Ce taux, exprimé pour 1000 travailleurs, permet la comparaison entre différentes unités ou périodes, en neutralisant l'effet de la taille des populations étudiées (ILO, 2019, p. 22)

Le taux de fréquence quantifie le nombre d'accidents avec arrêt de travail par million d'heures travaillées. Cette mesure est plus précise car elle intègre la durée d'exposition réelle, un facteur critique dans l'analyse des risques (OSHA, 2020)

1.3.2.4 Importance de la qualité des données

Il est primordial que les données utilisées pour ces calculs soient complètes, fiables, et correctement codifiées. Les biais de déclaration ou les erreurs dans la collecte peuvent fausser les résultats, conduisant à des analyses erronées et à des décisions inefficaces (Robson, 2012, p. 134).

1.3.3 Tests d'hypothèses et corrélations

1.3.3.1 Tests d'hypothèses : fondements et applications

Les tests d'hypothèses permettent de vérifier la validité statistique d'une relation observée dans les données. Dans le contexte de la sécurité professionnelle portuaire, ces tests sont essentiels pour appuyer les décisions de prévention par des preuves scientifiques. On utilise ces tests pour répondre à des questions telles que : "*Les jeunes travailleurs sont-ils réellement plus sujets aux accidents ?*", ou "*La formation réduit-elle significativement la fréquence des accidents ?*"

Exemple 1 : Relation entre ancienneté et fréquence des accidents

Une étude réalisée par Guerroudj et al. (2021) dans le port de Béjaïa a appliqué un test du Khi-carré entre les catégories d'ancienneté et l'occurrence d'accidents. Résultat : $\chi^2 = 16.78$, $p = 0.004$. Ce résultat indique une relation significative : les travailleurs ayant moins de 2 ans d'ancienneté avaient un taux d'accidentations 1,8 fois plus élevé que ceux avec plus de 5 ans (Guerroudj, 2021)

Exemple 2 : Effet de la formation sur la fréquence des accidents

Dans une autre étude conduite par **Lozano et al. (2020)** en Espagne, un test t de Student a été utilisé pour comparer les taux d'accidents entre deux groupes : ceux ayant reçu une formation

en sécurité et ceux sans formation. Résultat : $t = -2.98$, $p = 0.006$, ce qui confirme que la formation réduit significativement les accidents (Lozano, 2020)

Exemple 3 : Hypothèse sur les horaires de travail

Une hypothèse testée dans le port de Skikda concernait l'effet des horaires (jour/nuit) sur les accidents. Le test du Khi-carré appliqué aux données entre 2018 et 2022 a révélé une valeur significative ($\chi^2 = 11.45$, $p = 0.021$), suggérant que les accidents de nuit sont surreprésentés de 34 %, en raison de la baisse de vigilance et de l'éclairage insuffisant (**Direction de la sécurité du port de skikda, 2023, p. 44**)

1.3.3.2 Analyse des corrélations : principes et limites

L'analyse de corrélation permet d'explorer les relations linéaires entre deux variables quantitatives. Le coefficient de corrélation de Pearson (r) est le plus couramment utilisé. Son interprétation est standard :

- $r > 0,5$: forte corrélation positive
- $0,3 < r < 0,5$: corrélation modérée
- $r \approx 0$: absence de lien linéaire
- $r < 0$: corrélation négative

Exemple 1 : Corrélation entre fatigue et fréquence des accidents

Une étude tunisienne (Rezig *et al.*, 2020) a mis en évidence une corrélation positive forte ($r = 0.61$) entre le nombre d'heures consécutives travaillées et l'occurrence d'accidents (p. 66), démontrant la nécessité d'implémenter des pauses régulières (Rezig, 2020)

Exemple 2 : Corrélation entre âge et gravité des blessures

Dans un port italien, une corrélation négative ($r = -0.42$) a été identifiée entre l'âge et la gravité des blessures : les jeunes travailleurs ont tendance à subir des blessures plus graves (**Lombardi, 2019**)

1.3.3.3 Vers des modèles multivariés : croisement entre tests et corrélations

Les analyses avancées croisent souvent les tests d'hypothèses et les corrélations dans un cadre multivarié :

- **Régression logistique** : pour prédire la probabilité d'un accident à partir de variables telles que l'âge, l'ancienneté, l'horaire de travail, le poste.
- **Régression multiple** : pour estimer l'effet combiné de plusieurs facteurs sur la gravité ou la fréquence.
- **Analyse factorielle exploratoire** : pour identifier les dimensions latentes sous-jacentes aux variables observées.

Exemple concret : Modèle de prédiction dans le port de Barcelone

Une équipe espagnole a développé un modèle de régression logistique intégrant six variables explicatives (âge, formation, horaire, type d'engin, ancienneté, stress) pour prédire l'occurrence d'un accident. Le modèle a obtenu un taux de précision de 78 % (Martinez, 2021, p. 203)

1.4. Les réseaux de neurones artificiels (RNA)

1.4.1 Définition et principes fondamentaux des RNA

Les réseaux de neurones artificiels (RNA) sont des modèles mathématiques inspirés du fonctionnement biologique du cerveau humain. Ils ont pour objectif principal d'apprendre à partir des données, en capturant des relations complexes entre les variables, souvent non linéaires, afin de réaliser des tâches comme la classification, la prédiction, ou encore la reconnaissance de motifs.

Un RNA est généralement constitué de plusieurs couches de neurones : une couche d'entrée, une ou plusieurs couches cachées, et une couche de sortie. Chaque neurone artificiel effectue une opération de pondération suivie d'une fonction d'activation (comme ReLU, Sigmoid ou Tanh) permettant de modéliser des relations complexes (Haykin, 2009, p. 17)

Le processus d'apprentissage repose sur l'algorithme de rétropropagation, introduit par Rumelhart et al. (1986), qui permet au réseau d'ajuster ses poids internes en minimisant une fonction d'erreur entre les prédictions et les valeurs réelles (Rumelhart D. e., 1986)

En résumé, les RNA permettent de :

- Reproduire des schémas complexes sans programmation explicite ;
- Générer des prédictions en se basant uniquement sur les données ;
- S'adapter continuellement à de nouvelles entrées de données.

1.4.2 Types de réseau

Il existe plusieurs architectures de RNA, chacune adaptée à des types spécifiques de données et de problèmes :

1.4.2.1 Perceptron Multicouche (MLP)

Le MLP est l'architecture la plus classique, composé d'une couche d'entrée, de couches cachées et d'une couche de sortie. Il est utilisé pour des tâches de classification ou de régression à partir de données tabulaires (Bishop C. M., 1995, p. 142)

1.4.2.2 Réseaux Convolutifs (CNN)

Très performants dans le traitement d'images ou de vidéos, les CNN extraient automatiquement les caractéristiques spatiales pertinentes d'une image via des filtres convolutifs. Ils sont souvent utilisés dans la détection de défauts industriels visuels (LeCun Y. , 1995, p. 11)

1.4.2.3 Réseaux Récurrents (RNN et LSTM)

Les RNN, et plus particulièrement les LSTM (Long Short-Term Memory), sont utilisés pour traiter des données séquentielles : séries temporelles, textes, données chronologiques. Ils sont adaptés à la détection de tendances ou de risques récurrents dans les systèmes industriels (Hochreiter, 1997, p. 9)

1.4.2.4 Réseaux de Kohonen (SOM)

Les Self-Organizing Maps (SOM) sont utiles pour la visualisation de données et la classification non supervisée, en regroupant les données similaires dans des zones proches. Ces réseaux sont appliqués dans l'analyse exploratoire des risques professionnels (Kaski, 1997)

1.4.3 Cas d'application dans la prévention des risques

Les RNA trouvent aujourd'hui des applications multiples dans la prévention des risques professionnels. Voici quelques cas d'usage documentés :

- **Détection précoce des anomalies**

Les RNA peuvent analyser des signaux issus de capteurs ou d'objets connectés pour détecter en amont les défaillances d'équipements ou les comportements anormaux. Dans

une étude menée dans un complexe pétrochimique, un RNA a permis de prédire 78 % des incidents techniques avant leur survenue (Benyoucef, 2015)

- **Évaluation dynamique du risque**

En croisant les données de santé et de sécurité avec les données RH (âge, ancienneté, formation), des modèles de RNA permettent d'estimer le niveau de risque individuel ou collectif, et d'ajuster les politiques de prévention (Huang, 2011)

- **Surveillance en temps réel sur les sites portuaires**

Certains ports en Europe, comme Rotterdam ou Hambourg, utilisent des systèmes neuronaux intégrés à des caméras et capteurs pour surveiller les zones à risque, détecter les comportements non sécuritaires et émettre des alertes immédiates (Port of Rotterdam Authority, 2020)

- **Les cas de prévision**

L'utilisation des réseaux de neurones artificiels (RNA) dans la prévision des accidents professionnels représente un tournant majeur dans les stratégies de gestion des risques. Ces outils permettent d'anticiper des situations dangereuses avant qu'elles ne se produisent, en identifiant des schémas récurrents dans les données historiques (Haykin, 2009, p. 17).

Dans le secteur industriel, les RNA sont utilisés pour analyser des bases de données relatives aux antécédents d'accidents, aux profils des travailleurs et aux conditions de travail. Par l'apprentissage supervisé, ces modèles peuvent détecter les facteurs de risque associés à des classes particulières de travailleurs ou à des contextes opérationnels spécifiques (El-Bakry, 2003)

Par exemple, dans une étude menée dans le port de Ningbo-Zhoushan en Chine, un modèle de réseau de neurones a été formé pour prédire la probabilité de survenue d'accidents en tenant compte des horaires de travail, de l'ancienneté des travailleurs et de la météo. Les résultats ont montré une amélioration significative de la prévention, notamment par le redéploiement des équipes à haut risque (Cheng, 2019)

Une autre application concerne la maintenance prédictive des équipements dans les milieux portuaires. En intégrant les RNA dans les systèmes de surveillance, il devient possible de

détecter les signes précoces de défaillance d'équipements critiques, ce qui réduit indirectement les risques pour les opérateurs humains (Jain, 1996)

Enfin, les RNA sont également mobilisés dans les formations à la sécurité, par la création de simulateurs intelligents capables d'adapter les scénarios selon les profils des apprenants et les contextes de risque identifiés. Ces simulateurs rendent la formation plus interactive et personnalisée, augmentant ainsi son efficacité (Bishop C. M., 2006)

1.4.4 Intégration des RNA avec d'autres approches d'intelligence artificielle

L'une des pistes les plus prometteuses consiste à intégrer les RNA avec d'autres techniques d'intelligence artificielle, comme les arbres de décision, les forêts aléatoires ou les algorithmes bayésiens, afin de renforcer l'interprétabilité et l'efficacité du système prédictif.

Par exemple, dans une raffinerie algérienne, une étude a démontré qu'un modèle combinant un RNA et un algorithme Random Forest a permis de détecter les incidents avec une précision de 91 %, contre 74 % pour le RNA seul (Boussaïd, 2021)

Tableau I.3: Domaines d'application des RNA en prévention des risques

Domaine d'application	Type de réseau	Objectif principal
Maintenance prédictive	MLP / RNN	Détection précoce des pannes
Analyse de comportement humain	LSTM / CNN	Identification des gestes à risque
Surveillance de site industriel	CNN + capteurs IoT	Alerte en temps réel d'incident
Classification non supervisée	SOM	Cartographie des risques inconnus
Modèles hybrides de sécurité	RNA + Random Forest	Prédiction de scénarios complexes

Conclusion

En guise de conclusion, ce chapitre nous a permis d'avoir une vue d'ensemble sur les accidents professionnels, sur l'établissement portuaire de Skikda, son activité et les accidents relatifs à cet établissement ainsi qu'une vue d'ensemble sur les méthodes statistiques d'analyse et sur les réseaux de neurones artificielles.

Le prochain chapitre va être dédié à la présentation détaillée du terrain d'investigation « le port de Skikda" en englobant son historique et les dimensions internationales logistiques ainsi que les structures de l'établissement.

**Chapitre II : Analyse
Statistique des accidents
professionnels au port de
Skikda (EPS)**

Introduction :

La compréhension des accidents professionnels à travers une approche statistique constitue un levier essentiel pour la prévention des risques en milieu de travail. En effet, l'analyse des données permet de mettre en évidence les tendances, les causes récurrentes et les profils types d'accidents, en s'appuyant sur des informations fiables et mesurables. Cette démarche facilite l'identification des secteurs les plus exposés, des activités critiques et des catégories de personnel à risque. Elle s'avère ainsi précieuse pour orienter les stratégies de prévention, adapter les actions de sensibilisation et renforcer les dispositifs de sécurité.

Ce chapitre propose une analyse détaillée des accidents du travail survenus au port de Skikda au cours des cinq dernières années (2020-2024), à l'aide des rapports fournis par le service HSE de l'entreprise portuaire de Skikda. Cette étude s'appuie sur la compréhension des variables de fréquence, de gravité, de type de causes, de localisation, d'emploi et de tranches d'âge, ce qui nous permet de comprendre et de distinguer les profils de risque auxquels les travailleurs peuvent être exposés dans le port et de proposer des pistes d'amélioration dans le dernier chapitre consacré à la modélisation prédictive.

1. Présentation de l'organisme d'accueil :

1.1. Présentation de l'entreprise Portuaire de Skikda (EPS)

L'Entreprise Portuaire de Skikda (EPS) est une société par actions au capital de 9Milliards de Dinars, filiale du Groupe services portuaires "SERPORT Spa". Son siège social est situé à la Petite zone Industrielle près l'embouchure de l'Oued Safsaf, BP.65-21 000 Skikda, Algérie. L'EPS est régie par les lois et règlements relatifs à l'autonomie des Entreprises. Elle est administrée par un conseil d'administration composé de sept (07) membres, dont cinq (06) représentant le Groupe services portuaires "SERPORTSpa" et deux (02) membres de droit représentant les travailleurs. L'entreprise est organisée en une Direction Générale mono unité.

1.2 l'objectif social de l'entreprise

L'objet social de l'Entreprise Portuaire de Skikda est la gestion du domaine public portuaire et l'exercice des opérations de police et de sécurité relatives au mouvement de la navigation et à la préservation et sauvegarde dudit domaine public portuaire. Le domaine public portuaire comprend les plans d'eau, les terre-pleins, les hangars, les magasins, et divers locaux à usage administratif et commercial. En plus de la gestion du domaine public, l'entreprise exerce des activités de services telles que la gestion et l'exploitation de l'outillage et des installations

portuaires, les opérations de remorquage, de pilotage et de lamanage, les opérations d'acconage et de manutention, les missions de police et de sécurité portuaire, ainsi que l'exécution des travaux d'entretien, d'aménagement et de renouvellement de la superstructure portuaire. La compétence territoriale de l'EPS s'étend aux ports de commerce de Skikda (Port Mixte de Skikda et Port Skikda El-Djédid, spécialisé hydrocarbures) et deux postes de chargement en mer.

1.3 Organigramme de l'Entreprise Portuaire de Skikda

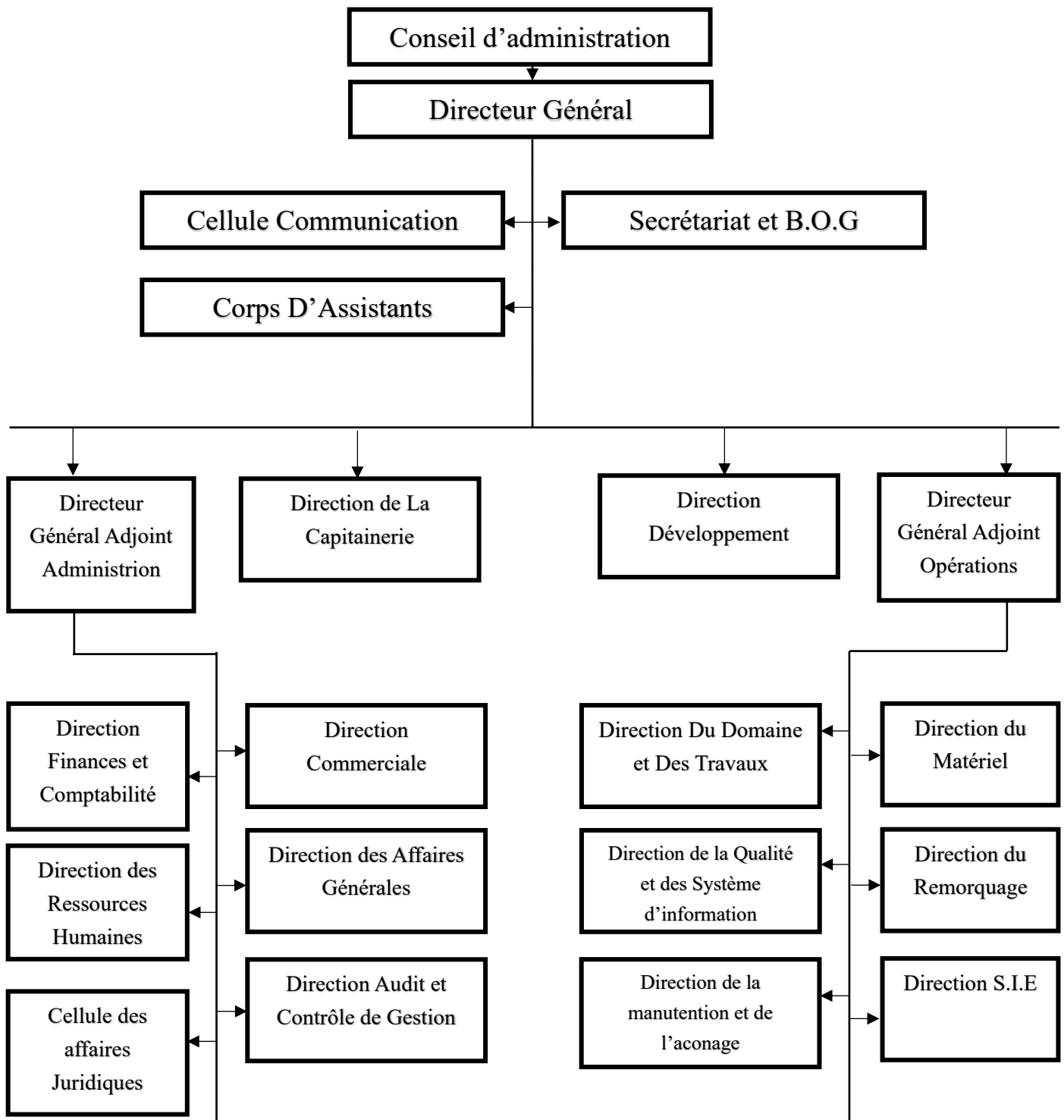


Figure II.1 : organigramme de l'entreprise portuaire de Skikda

1.4 Historique du complexe portuaire commercial de l'entreprise Portuaire de Skikda

Avant la création de l'Entreprise Portuaire de Skikda, le secteur portuaire a connu plusieurs phases d'organisation et de régimes administratifs. De 1962 à 1971, le port de Skikda était géré par la chambre de commerce et d'industrie. Entre 1971 et 1982, l'Office National des Ports a été créé (13 mai 1971) pour gérer et exploiter les ports, avec un monopole sur les opérations de pilotage, de lamanage, et les prérogatives de police et de sécurité portuaire. La création de l'Entreprise Portuaire de Skikda (Décret N° 82-284 du 14 août 1982) a eu lieu entre 1982 et 1988, issue du regroupement de l'office National des Ports, de la Société Nationale de Manutention et du service remorquage. Cette entreprise socialiste à caractère économique assurait le monopole de ces activités ainsi que les prérogatives de puissance publique de police et de sécurité portuaire. Cette gestion sous tutelle du Ministère des transports s'est achevée avec l'avènement de la loi sur l'autonomie des entreprises N°88/01 du 12 janvier 1988. De 1988/89 à 2003, l'Entreprise Publique Economique (EPE), Société par Actions (SPA) a été créée le 21 mars 1989, conservant les mêmes prérogatives du régime antérieur. En 1998, une réorganisation du secteur portuaire a eu lieu avec la promulgation de la loi N° 98/05 portant code maritime, consacrant la séparation des missions de puissance publique des activités commerciales et le décret exécutif N° 99-200 du 18 août 1999 portant désignation de l'autorité portuaire de l'Est à Skikda. Depuis 2015 à ce jour, l'entreprise continue son évolution.

1.5 La dimension internationale

En tant que port de commerce, le port de Skikda est un maillon essentiel des chaînes logistiques mondiales. Sa dimension internationale est manifeste à travers les échanges qu'il facilite entre l'Algérie et ses partenaires commerciaux à travers le monde. Le port accueille des navires de diverses nationalités et gère des marchandises destinées ou provenant de multiples destinations internationales. La modernisation continue de ses infrastructures et l'acquisition de technologies de pointe, telles que de nouvelles grues portuaires de grande capacité, visent à renforcer la compétitivité de l'EPS sur la scène internationale. Ces investissements permettent d'améliorer la rapidité et l'efficacité des opérations, réduisant ainsi les délais de transit et les coûts pour les opérateurs économiques. En s'alignant sur les standards internationaux de performance et de sécurité, l'EPS Skikda contribue à l'intégration de l'Algérie dans l'économie mondiale et à l'attractivité de ses corridors commerciaux.

1.6 Risque professionnel spécifique au port de Skikda :

Selon une étude réalisée par Khelifa et Benaïssa (2019), le port de Skikda présente des particularités qui augmentent certains risques, notamment une infrastructure vieillissante, un

fort taux d'occupation des quais, et une insuffisance dans la maintenance des équipements lourds (Khelifa, 2019)

Cette situation accroît la probabilité d'accidents liés à la manutention des conteneurs et aux opérations de chargement/déchargement.

De plus, le rapport annuel de la CNAS (2021) souligne que dans les ports algériens, 70% des accidents professionnels sont liés aux chutes et aux écrasements, avec une forte concentration dans le secteur portuaire de Skikda (CNAS, 2021)

2. Description des données de l'étude

2.1 Source des données

Comme source de donnée collecté au sein de l'entreprise portuaire de Skikda, on s'est appuyer sur les Bilans des accidents de travail des cinq dernières années 2020-2021-2022-2023-2024.

Le Tableau (II.1) résume la source de nos données d'étude.

Tableau II.1 : Source des données de l'étude

Élément	Source de donnée
Type	Bilan des accidents de travail
Année	2020-2021-2022-2023-2024
Contenu principal	Tableaux, graphes et des données statistiques
Organisme rédacteur	Service HSE, entreprise portuaire de Skikda
Activité concerné	L'activité portuaire
Validation et signature	Non spécifiée clairement
Utilisation dans le mémoire	Analyse statistique au 2ème chapitre et programme de prédiction du 3ème chapitre

2.1.1 Présentation du document :

- **Bilan des Accidents de travail :** est un document analytique qui recense et évalue l'ensemble des incidents et accidents survenus dans un environnement professionnel ou spécifique sur une période donnée. Il inclut des données quantitatives (nombre d'accidents, types de blessures, taux de fréquence) et qualitatives (causes, circonstances, mesures correctives), permettant d'identifier les tendances, d'évaluer l'efficacité des

mesures de prévention et de proposer des améliorations en matière de sécurité. (Ministère de la Transition écologique, 2015)

- **Bilan des accidents de travail portuaires** : est un rapport détaillé qui compile et analyse les incidents et accidents survenus dans les zones portuaires, incluant les quais, les navires à l'accostage, les installations de manutention et les zones de stockage. Ce bilan vise à identifier les causes spécifiques des accidents dans le contexte portuaire, à évaluer les risques associés aux opérations maritimes et à proposer des mesures de prévention adaptées (Smaiah, 2021).

2.2 Variables de l'étude

Les variables de l'étude vont être partagées en deux catégories selon leurs natures.

2.2.1 Les variables qualitatives :

2.2.1.1 Les causes des accidents de travail :

Le port de Skikda, en tant que site stratégique à forte densité industrielle, présente une exposition importante aux risques professionnels. Les activités qui y sont menées telles que la manutention de charges lourdes, l'usage d'engins mécaniques, et la coexistence de métiers variés dans un espace souvent restreint génèrent des conditions propices aux accidents du travail, surtout en cas de défaillance des dispositifs de sécurité. Cette section expose les principales causes relevées à partir des données collectées au sein de cette infrastructure portuaire.

A. Chute

Selon le dossier de l'INRS intitulé "Chutes, heurts et autres perturbations du Mouvement : les comprendre pour les prévenir", les chutes sont considérées comme des Accidents résultant d'une perturbation du mouvement du travailleur. Ces perturbations Peuvent inclure des glissades, des heurts, des trébuchements, des coincements, ou un Élément qui cède alors que l'opérateur exerce activement des forces contre celui-ci. Ces Événements peuvent entraîner une chute, y compris une chute de hauteur, et occasionner des lésions même en l'absence de chute. (Leclercq, 2015)

B. Défaillance d'équipement

Dans le contexte des accidents industriels, la défaillance d'équipement est identifiée Comme une des "causes directes" des accidents. Ces défaillances techniques peuvent Être le résultat de

divers facteurs, tels qu'un mauvais entretien de l'outil de production, Des modifications inappropriées, ou la corrosion. Elles sont souvent des manifestations De problèmes plus profonds liés à la gestion de la sécurité ou à l'organisation (DECHY, 2011)

C. Erreur humaine

L'erreur humaine, dans le contexte des accidents, est définie comme une situation où "une séquence planifiée d'activités ne parvient pas à ses fins désirées et ce, sans Intervention du hasard ou de toute source inattendue". Cependant, une perspective Académique moderne, notamment celle défendue par l'ICSI (Institut pour une culture de Sécurité industrielle), considère l'erreur humaine non pas comme une cause première, Mais plutôt comme une conséquence ou un symptôme d'un dysfonctionnement plus Profond du système. Cette approche incite à rechercher les "causes profondes des Événements", qui incluent souvent des facteurs organisationnels et humains sous-jacents, Plutôt que de s'arrêter à l'opérateur comme unique responsable (Promé-Visinoni, 2014)

D. Collision

Bien que le terme "collision" ne soit pas toujours explicitement défini comme une Catégorie distincte dans la littérature académique sur les accidents du travail en français, Il est souvent englobé sous le terme de "heurts" ou "choc". Dans le cadre des "perturbations du mouvement" étudiées par l'INRS, un heurt se produit lorsqu'un Travailleur entre en contact avec un élément de l'environnement, ou qu'un outil ripe, Entraînant une lésion. Ces heurts peuvent survenir même sans chute et sont considérés Comme des accidents du travail. La gravité de la lésion dépend de l'énergie du Mouvement du travailleur et des caractéristiques de l'élément heurté (forme, dureté) (Leclercq, 2015, pp. 24-40)

E. Météo

Les conditions météorologiques, en particulier les phénomènes extrêmes, peuvent être Des facteurs contributifs significatifs aux accidents du travail. Bien qu'elles ne soient pas Toujours une cause directe unique, elles augmentent les risques et la vulnérabilité des Travailleurs. Les impacts des conditions météorologiques sur la santé et la sécurité au Travail incluent une augmentation des risques de noyade, de brûlures, d'engelures, et Peuvent exacerber des maladies sous-jacentes. Des événements tels que les vagues de Chaleur, les tempêtes, ou les conditions hivernales (neige, verglas) peuvent rendre les Environnements de travail plus

dangereux, entraînant des chutes, des collisions ou D'autres types d'accidents. Le changement climatique est également identifié comme un Facteur qui pourrait accroître la fréquence et l'intensité de ces événements Météorologiques extrêmes, augmentant ainsi les défis pour la sécurité au travail ((OIT) O. I., 2024)

2.2.2 Les variables quantitatives :

- **Le nombre des Accidents du travail au port de Skikda au cours des cinq dernières années :**

Le tableau ci-dessous représente le nombre des accidents de travail enregistrés au sein de l'entreprise portuaire de Skikda durant ces cinq dernières années :

Tableau II.2 : Les Accidents du travail au port au cours des cinq dernières années

Années / Mois	2020	2021	2022	2023	2024
JAN	3	8	3	5	6
FEV	7	9	3	4	9
MAR	8	5	1	8	7
AVR	7	5	1	6	3
MAI	3	5	2	7	8
JUIN	2	0	2	5	3
JUILLET	5	3	2	4	7
AOUT	3	2	3	2	7
SEP	3	2	3	3	4
OCT	4	6	1	7	4
NOV	4	1	4	10	7
DEC	5	1	1	10	8
La somme	54	47	26	71	73

L'observation des Accidents de Travail enregistrés durant l'année 2020 révèle que:

- 54 Accidents déclarés par l'administration peuvent être considérés comme accidents de travail et qui ont lien direct avec l'activité portuaire pour 56 accidents durant l'année 2019

L'observation des Accidents de Travail enregistrés durant l'année 2021 révèle que :

- 47 Accidents déclarés par l'administration peuvent être considérés comme accidents de travail et qui ont lien direct avec l'activité portuaire pour 54 accidents durant l'année 2020

L'observation des Accidents de Travail enregistrés durant l'année 2022 révèle que :

26 Accidents déclarés par l'administration peuvent être considérés comme accidents de travail et qui ont un lien direct avec l'activité portuaire contre 47 accidents enregistrés durant l'année 2021 soit une diminution de : 21 AT représentant un taux de : -55,31%.

L'observation des Accidents de Travail enregistrés durant l'année 2023 révèle que :

71 Accidents déclarés par l'administration peuvent être considérés comme accidents de travail et qui ont un lien direct avec l'activité portuaire contre 26 accidents enregistrés durant l'année 2022 soit une augmentation de : 45 AT représentant un taux de : +73,07%.

L'observation des Accidents de Travail enregistrés durant l'année 2024 révèle que :

73 Accidents déclarés par l'administration peuvent être considérés comme accidents de travail et qui ont un lien direct avec l'activité portuaire contre 71 accidents enregistrés durant l'année 2024 soit une augmentation de : 02 AT représentant un taux de : +02,81%

La représentation graphique des accidents de travail enregistrés durant les cinq dernières années est présentée ci-dessous :

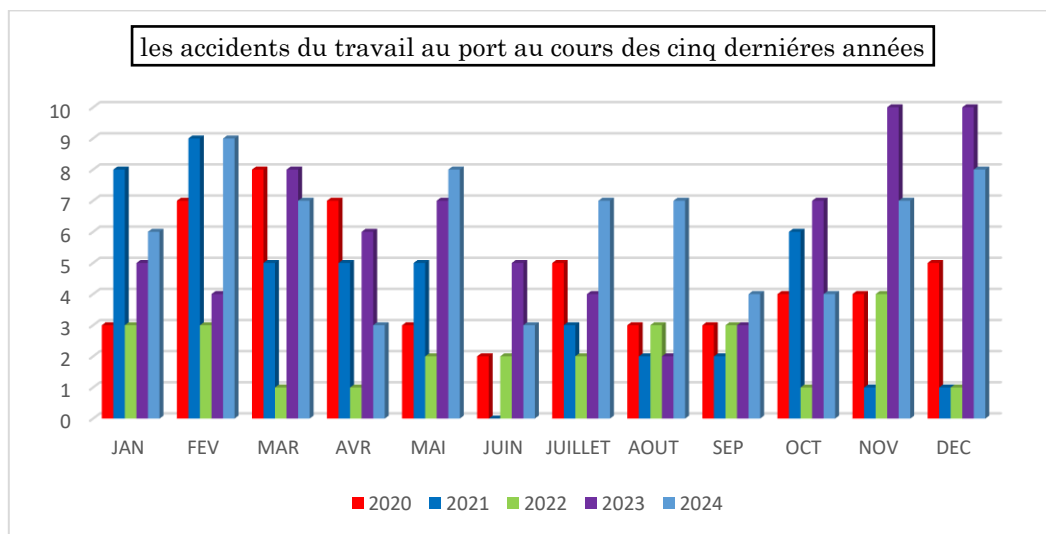


Figure II.2 : les accidents de travail au port de Skikda

• La répartition selon l'ancienneté :

L'ancienneté désigne la durée pendant laquelle un salarié a été employé dans une entreprise avant la survenue d'un accident du travail. Elle est calculée à partir de la date d'embauche jusqu'à la date de l'accident. (Assurance Maladie, Risques professionnels., 2019)

La répartition des accidents de travaux enregistrés au sein de l'entreprise portuaire de Skikda selon l'ancienneté, durant ces dernières années sont montrées dans le tableau ci-dessous :

Tableau II.3 : Les Accidents du travail au port selon l'ancienneté

Années Expérience	2020	2021	2022	2023	2024
0_5 ans	6	2	5	19	21
6_10 ans	22	20	8	19	18
11_15 ans	18	16	9	24	19
15> ans	8	9	4	9	15
La somme	54	47	26	71	73

- ✓ 46.80% des A.T ont été enregistrés chez les employés ayant moins de dix (10) années d'expérience contre 40.74% pour l'année 2020.
- ✓ 30.76% des A.T ont été enregistrés chez les employés ayant moins de dix (10) années d'expérience contre 46.80% pour l'année 2021.
- ✓ 26.76% des A.T ont été enregistrés chez les employés ayant moins de dix (10) années d'expérience contre 30.76% pour l'année 2022
- ✓ 53.42% des A.T ont été enregistrés chez les employés ayant moins de dix (10) années d'expérience contre 26.76% pour l'année 2023

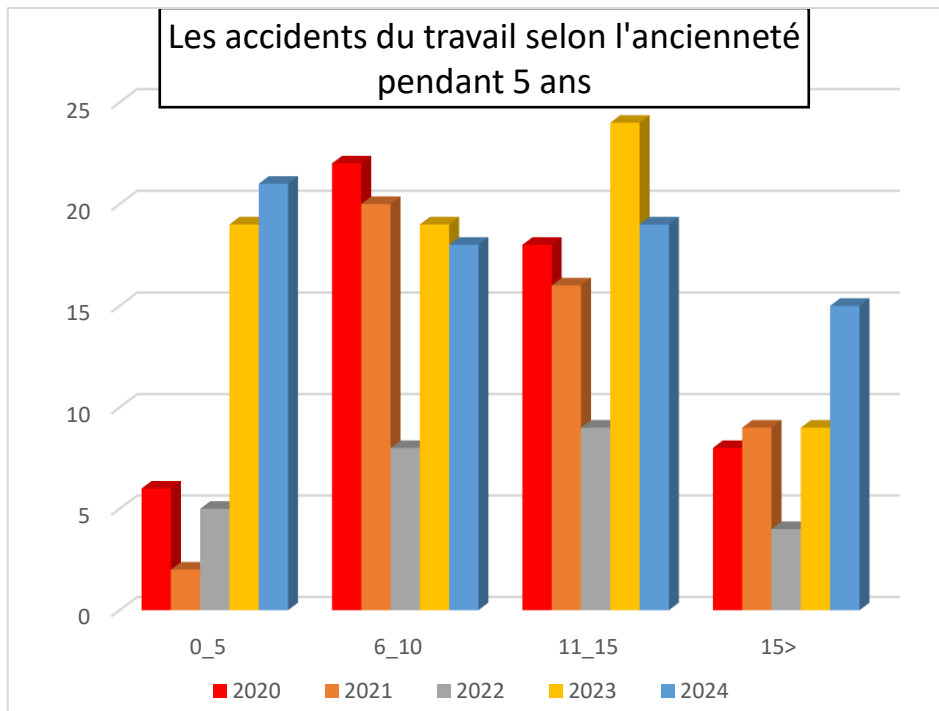


Figure II.3 : La répartition des accidents de travail au port de Skikda selon l'ancienneté

• La répartition selon l'Age :

L'âge correspond à la durée de vie d'un individu, exprimée en années, au moment de l'accident du travail. Il est un facteur déterminant dans l'analyse de la sinistralité, certaines tranches d'âge étant plus exposées à des risques spécifiques (Assurance Maladie, Risques professionnels., 2019)

- ✓ 05 des accidentés sont âgés entre 21 et 30, 22 A.T entre 31 et 40 ans, 19 A.T entre 41 et 50, et 08 accidents chez les employés ayant plus de 50 ans, A.T pour l'année 2019.
- ✓ 01 des accidentés sont âgés entre 21 et 30, 19 A.T entre 31 et 40 ans, 20 A.T entre 41 et 50, et 07 accidents chez les employés ayant plus de 50 ans, contre respectivement 05, 22, 19, et 08 A.T pour l'année 2020.
- ✓ 00 des accidentés sont âgés entre 21 et 30, 08 A.T entre 31 et 40 ans, 11 A.T entre 41 et 50, et 07 accidents chez les employés ayant plus de 50 ans, contre respectivement 01, 19, 20, et 07 A.T pour l'année 2021
- ✓ 01 des accidentés sont âgés entre 21 et 30, 25 A.T entre 31 et 40 ans, 33 A.T entre 41 et 50, et 12 accidents chez les employés ayant plus de 50 ans, contre respectivement 00, 08, 11, et 07 A.T pour l'année 2022

- ✓ 04 des accidentés sont âgés entre 21 et 30, 21 A.T entre 31 et 40 ans, 35 A.T entre 41 et 50, et 13 accidents chez les employés ayant plus de 50 ans, contre respectivement 01, 25, 33, et 12 A.T pour l'année 2023

La répartition des accidents de travaux enregistrés au sein de l'entreprise portuaire de Skikda durant ces dernières années selon l'âge sont montrées dans les figures ci-dessous.

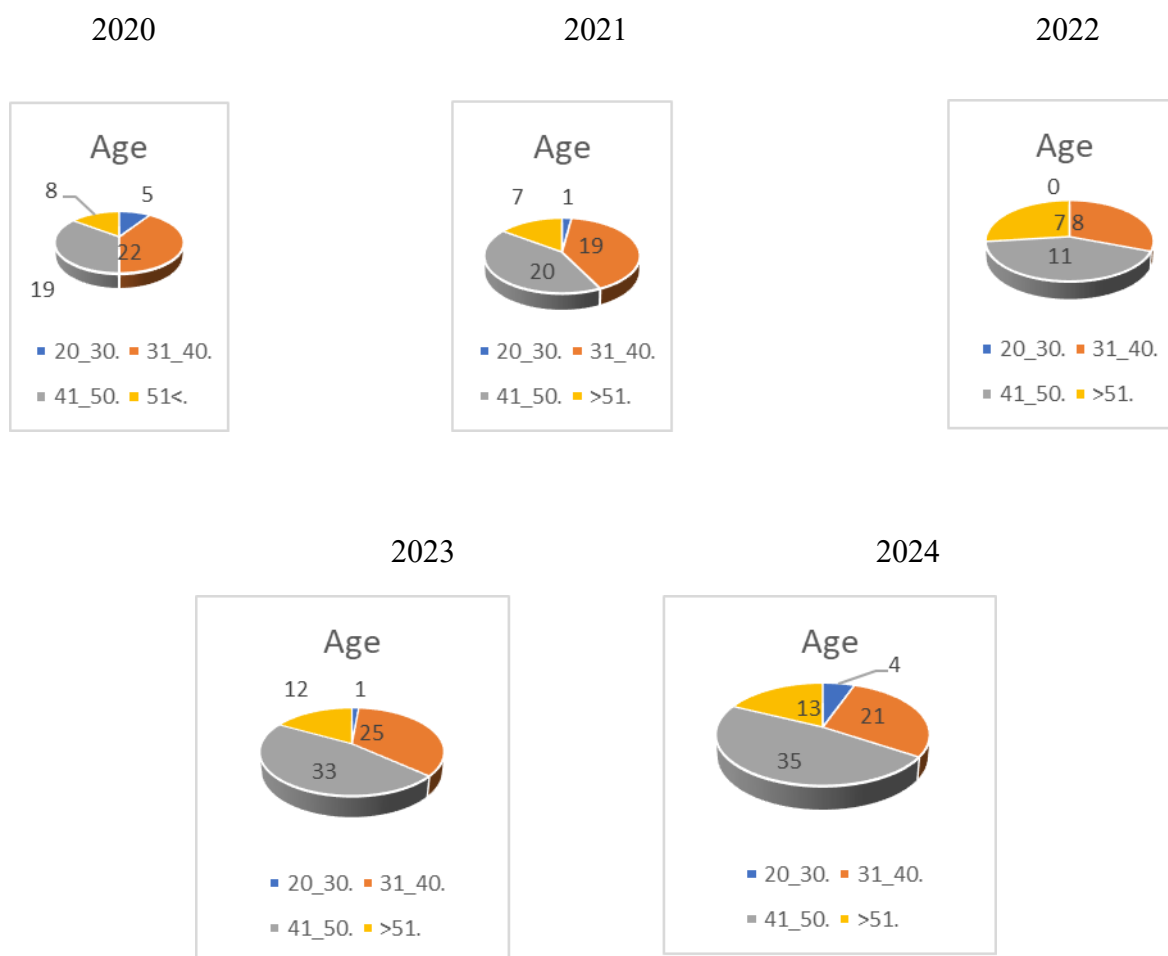


Figure II.4 : La répartition des accidents de travail au port de Skikda selon l'Age

- **La répartition selon la structure :**

La structure, en termes de taille d'entreprise, fait référence au nombre de salariés employés. Elle est généralement catégorisée comme suit :

- Petite entreprise : moins de 50 salariés
- Moyenne entreprise : 50 à 249 salariés
- Grande entreprise : 250 salariés et plus

La taille de l'entreprise peut influencer les politiques de sécurité et les ressources allouées à la prévention des accidents. ((OIT) O. I., 1998)

Les accidents du travail Selon la structure pendant 5 ans :

- ✓ 24 A.T ont été enregistrés au niveau de la DMA contre 33 pour l'année 2020
- ✓ 14 A.T ont été enregistrés au niveau de la DMA contre 24 pour l'année 2021
- ✓ 53 A.T ont été enregistrés au niveau de la DMA contre 14 pour l'année 2022
- ✓ 53 A.T ont été enregistrés au niveau de la DMA contre 53 pour l'année 2023

La répartition des accidents de travaux enregistrés au sein de l'entreprise portuaire de Skikda durant ces dernières années Selon la structure sont montrées dans les figures ci-dessou

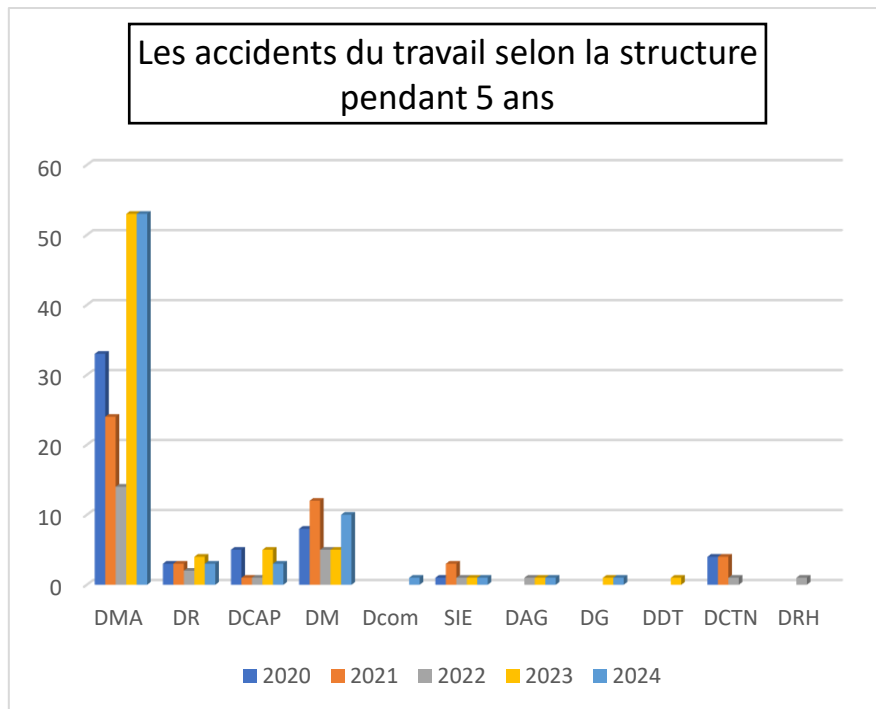


Figure II.5 : La répartition des accidents de travail au port de Skikda Selon la structure

• **La répartition selon le siège de la lésion pendant 5ans**

Le siège de la lésion indique la partie du corps affectée par l'accident. La classification standard inclut :

- Tête
- Cou
- Dos
- Membres supérieurs (épaules, bras, mains)
- Membres inférieurs (jambes, pieds)

- Organes internes ((OIT) O. I., 1998)

La répartition des accidents de travaux enregistrés au sein de l'entreprise portuaire de Skikda selon le siège de la lésion, durant ces dernières années sont montrées dans le tableau ci-dessous :

Tableau II.4 : Les accidents du travail selon le siège de la lésion pendant 5ans

Années / Le siège de la lésion	2020	2021	2022	2023	2024
Pied	6	3	4	7	3
Thorax	1	2	1	1	
Main	9	9	2	18	10
Bras		1	2	2	2
Crane		2			1
Dos&Lambaire	14	10	5	6	9
Genou	5	3	1	3	7
Cheville	5	2	1	9	9
Epaul	4	4	3	6	4
Bassin		3			1
Tete	2	2	3	10	7
Cou	1	1			1
Cuisse	2	1			2
œil	1	2			
Coude		1	1	4	2
Visage	1	1		5	1
jambes	1		1		6
Doigt	1				2
Poitrine	1				
Cuir chevelu			1		
Levres			1		
Cote			1		
nez			1		
Adducteur			1		
Poignet					3
Oreille					1
Front					1
Ventre					1
La somme	54	47	29	71	67

- ✓ 25 des accidentés ont été touché au niveau des membres inférieurs et supérieurs,15 au niveau du (dos, poitrine et bassin) et 07 au niveau de la tête. Contre respectivement 39, 14 et 01 pour l'année 2020
- ✓ 17 des accidentés ont été touché au niveau des membres inférieurs et supérieurs,07 au niveau du (dos, poitrine et bassin) et 05 au niveau de la tête. Contre respectivement 25, 15 et 07 pour l'année 2021
- ✓ 54 des accidentés ont été touché au niveau des membres inférieurs et supérieurs,06 au niveau du (dos, poitrine et bassin) et 11 au niveau de la tête. Contre respectivement 17, 07 et 05 pour l'année 2022
- ✓ 45 des accidentés ont été touché au niveau des membres inférieurs et supérieurs,09 au niveau du (dos, poitrine et bassin) et 19 au niveau de la tête. Contre respectivement 54, 06 et 11 pour l'année 2023

- **La répartition selon la nature de la lésion pendant 5ans**

La nature de la lésion décrit le type de blessure subie, telle que :

- Fracture
- Entorse
- Brûlure
- Amputation
- Contusion
- Plaie ouverte ((OIT) O. I., 1998)

La répartition des accidents de travaux enregistrés au sein de l'entreprise portuaire de Skikda selon la nature de la lésion, durant ces dernières années sont montrées dans le tableau ci-dessous :

Tableau II.5 : Les accidents du travail selon la nature de la lésion pendant 5ans

Années / La nature de la lésion	2020	2021	2022	2023	2024
Plaie	7	9	6	12	11
Entorse	5	2	1	6	5
TSLO			5	22	19
Fracture	4	8	6	8	12
Rachis dorsale					1
luxation		1		2	1
Ecrasement	2		2	4	3
Egratiture			1		1
Fissure					2
Brulure		1			1
Amputation					2
Tuméfaction					1
Traumatisme	23	14		8	13
Lumbago	4			1	1
Elongation	1	1	1		
Contusion	1		1		
NCB	1				
Dechirure	3				
Conjonctivite	1				
Grain de meule oculaire	1				
Torticolis	1				
Lombalgie		7	1	3	
Subluxation		1	1	1	
Hernie		2	2		
Tandinite		1	1		
T cervicale			1		
Musculaire			1		
Syndrome écrasement				1	
Détachement osseux				1	
Féchure				1	
Œdème				1	
La somme	54	47	30	71	73

- ✓ 14 des lésions sont des traumatismes, 07 des lésions sont des lombalgies, 09 des plaies, et 08 des fractures tandis que pour l'année 2020, 23 des lésions sont des traumatismes, 04 sont des lombalgies, 07 des plaies, et 04 sont des fractures
- ✓ 5 des lésions sont des traumatismes, 03 des lésions sont des lombalgies, 06 des plaies, et 06 des fractures tandis que pour l'année 2021, 14 des lésions sont des traumatismes, 7 sont des lombalgies, 09 des plaies, et 08 sont des fractures

- ✓ 30 des lésions sont des traumatismes et TSLO, 03 des lésions sont des lombalgies, 12 des plaies, et 08 des fractures tandis que pour l'année 2022, 05 des lésions sont des traumatismes, 03 sont des lombalgies 06 des plaies, et 06 sont des fractures
- ✓ 45 des accidentés ont été touché au niveau des membres inférieurs et supérieurs, 09 au niveau du (dos, poitrine et bassin) et 19 au niveau de la tête. Contre respectivement 54, 06 et 11 pour l'année 2023

- **La répartition selon la fonction pendant 5ans**

La fonction se réfère au poste ou à l'activité professionnelle exercée par la victime au moment de l'accident. Elle est classifiée selon des nomenclatures professionnelles standardisées, telles que la Nomenclature des Professions et Catégories Socioprofessionnelles (PCS). ((INSEE, 2020)

La répartition des accidents de travaux enregistrés au sein de l'entreprise portuaire de Skikda selon la fonction, durant ces dernières années sont montrées dans le tableau ci-dessous :

Tableau II.6 : Les accidents du travail selon la Fonction pendant 5ans

Années / La fonction	2020	2021	2022	2023	2024
OM	19	16	14	38	44
Conducteur d'engin	9	3	2	2	3
A/d'avitaillement		1			
GTA		1			
Chef service		1			
GPS		1		1	1
APS	1	2	1		
Ingénieur méthode		1			
C/Mécanicien		1		1	
Mécanicien	3	1		3	1
Electromécanicien		1			
électricien		1			
A/électricité		1			
Peintre		1	1		
soudeur	1	1		1	1
Gréeur portuaire	1	4			
Pointeur	1	2		1	1
Grutier		2	2		
Hydraulicien		1	1		1
Chauffeur	2	1			
Treuiliste		1		2	3

Magasinier		1			1
C/d'équipe		1		5	1
Contremaître		1		2	2
OMS	3				
A/entretien	3				
C/section	1			1	
Pilote	1				
Ingénieur	1				
patron de barge	1				
Vulcanisateur	1				1
Matelot	3		1	3	1
Lamaneur	1			2	
C/parc	1		1		
Patron de pilotine	1				1
C/Mécanicien R/R			1		
Conducteur canot			1		
C/section gestion			1		
OM partiel				3	
sureveillant				2	1
C/departement				1	
Appariteur				1	1
Chodronier				1	
Chef de quai					1
Graisser					2
Elec auto					1
Tolier					1
Gestionnaire de stock					1
Chauffeur ambs					1
La somme	54	47	21	70	71

- ✓ 16 des accidentés sont des OM contre 19 pour l'année 2020 ; la catégorie la plus exposés aux risques liés à la manutention du fait de leurs fonctions.
- ✓ 17 des accidentés ont été touché au niveau des membres inférieurs et supérieurs, 07 au niveau du (dos, poitrine et bassin) et 05 au niveau de la tête. Contre respectivement 25, 15 et 07 pour l'année 2021
- ✓ 38 des accidentés sont des OM contre 14 pour l'année 2022 ; la catégorie la plus exposés aux risques liés à la manutention du fait de leurs fonctions
- ✓ 44 des accidentés sont des OM contre 38 pour l'année 2023 ; la catégorie la plus exposés aux risques liés à la manutention du fait de leurs fonctions

- **La répartition selon l'heure pendant 5ans**

L'heure de survenue correspond au moment précis de la journée où l'accident s'est produit. L'analyse temporelle des accidents peut révéler des périodes à risque accru, telles que le début ou la fin des quarts de travail

La répartition des accidents de travaux enregistrés au sein de l'entreprise portuaire de Skikda selon l'heure, durant ces dernières années sont montrées dans le tableau ci-dessous :

Tableau II.7 : Les accidents du travail selon l'heure pendant 5ans

Années / L'heure	6-12	12-18	18-00	00-6
2020	24	23	5	2
2021	21	21	5	0
2022	13	13	3	0
2023	18	36	12	5
2024	30	21	21	1
La somme	109	114	46	8

- ✓ 89.36% des A.T sont survenus durant la journée contre 87.04% pour la même période 2020.
- ✓ 88.46 % des A.T sont survenus durant la journée contre 89.36% pour la même période 2021
- ✓ 76.07 % des A.T 69.86 % des A.T sont survenus durant la journée contre 76.07 % pour la même période 2023 sont survenus durant la journée contre 88.46 % pour la même période 2022
- ✓ 69.86 % des A.T sont survenus durant la journée contre 76.07 % pour la même période 2023

La répartition des accidents de travaux enregistrés au sein de l'entreprise portuaire de Skikda durant ces dernières années Selon l'heure **sont** montrées dans les figures ci-dessous

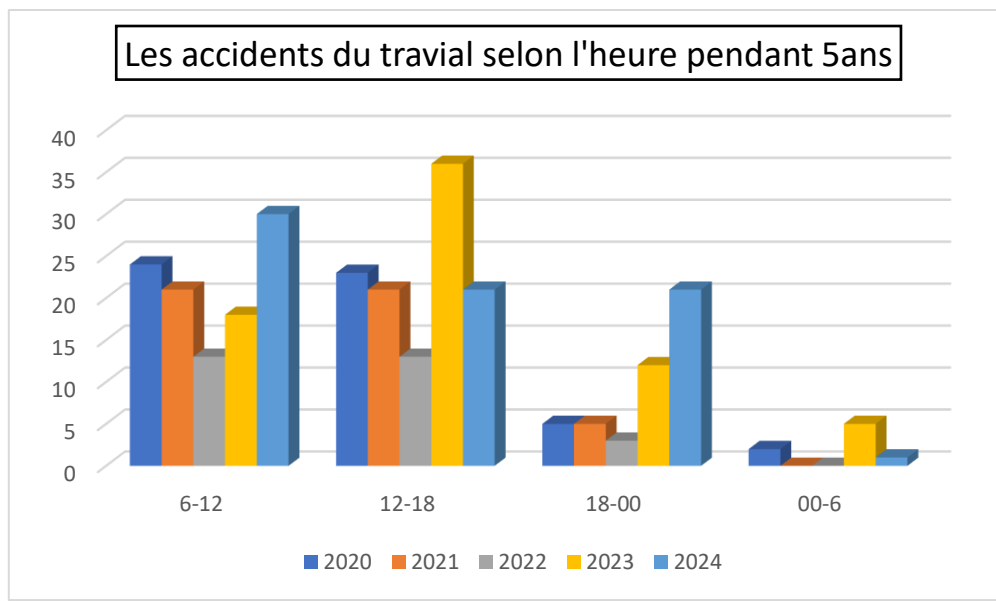


Figure II.6 : La répartition des accidents de travail au port de Skikda Selon l'heure

- **La répartition selon le jour pendant 5 ans**

Le jour de survenue indique le jour de la semaine où l'accident a eu lieu. Cette information peut aider à identifier des tendances hebdomadaires dans la survenance des accidents ((INRS), 2021)

La répartition des accidents de travaux enregistrés au sein de l'entreprise portuaire de Skikda selon le jour, durant ces dernières années sont montrées dans le tableau ci-dessous

Tableau II.8 : Les accidents du travail selon le jour pendant 5 ans

Années / Jour	2020	2021	2022	2023	2024
Samedi	4	9	1	8	4
Dimanche	9	6	3	10	17
Lundi	12	5	5	13	13
Mardi	10	7	1	14	11
Mercredi	10	10	5	9	10
Jeudi	7	10	10	9	10
Vendredi	2	0	1	8	8
La somme	54	47	26	71	73

- ✓ 09 A.T est survenus le samedi ; contre **04** pour la même période **2020**
- 06** A.T sont survenus le dimanche ; contre **09** pour la même période **2020**
- 05** A.T sont survenus le lundi ; contre **12** pour la même période **2020** ;

- 07 A.T sont survenus le mardi ; contre 10 pour la même période 2020
 10 A.T sont survenus le mercredi ; contre 10 pour la même période 2020 ;
 10 A.T sont survenus le jeudi ; contre 07 pour la même période 2020 ;
 00 A.T le vendredi ; contre 02 pour la même période 2020 ;
- ✓ 01A.T est survenus le samedi ; contre 09 pour la même période 2021
 03 A.T sont survenus le dimanche ; contre 06 pour la même période 2021
 05 A.T sont survenus le lundi ; contre 05 pour la même période 2021 ;
 01 A.T sont survenus le mardi ; contre 07 pour la même période 2021
 05 A.T sont survenus le mercredi ; contre 10 pour la même période 2021 ;
 10 A.T sont survenus le jeudi ; contre 10 pour la même période 2021 ;
 01 A.T le vendredi ; contre 00 pour la même période 2021
- ✓ 08A.T est survenus le samedi ; contre 01 pour la même période 2022
 10 A.T sont survenus le dimanche ; contre 03 pour la même période 2022
 13 A.T sont survenus le lundi ; contre 05 pour la même période 2022 ;
 14 A.T sont survenus le mardi ; contre 01 pour la même période 2022
 09 A.T sont survenus le mercredi ; contre 05 pour la même période 2022 ;
 09 A.T sont survenus le jeudi ; contre 10 pour la même période 2022 ;
 0 A.T le vendredi ; contre 01 pour la même période 2022
- ✓ 04A.T est survenus le samedi ; contre 08 pour la même période 2023
 17 A.T sont survenus le dimanche ; contre 10 pour la même période 2023
 13 A.T sont survenus le lundi ; contre 13 pour la même période 2023 ;
 11 A.T sont survenus le mardi ; contre 14 pour la même période 2023
 10 A.T sont survenus le mercredi ; contre 09 pour la même période 2023 ;
 10 A.T sont survenus le jeudi ; contre 09 pour la même période 2023 ;
 08 A.T le vendredi ; contre 00 pour la même période 2023

La répartition des accidents de travaux enregistrés au sein de l'entreprise portuaire de Skikda durant ces dernières années Selon le jour **sont** montrées dans les figures ci-dessous

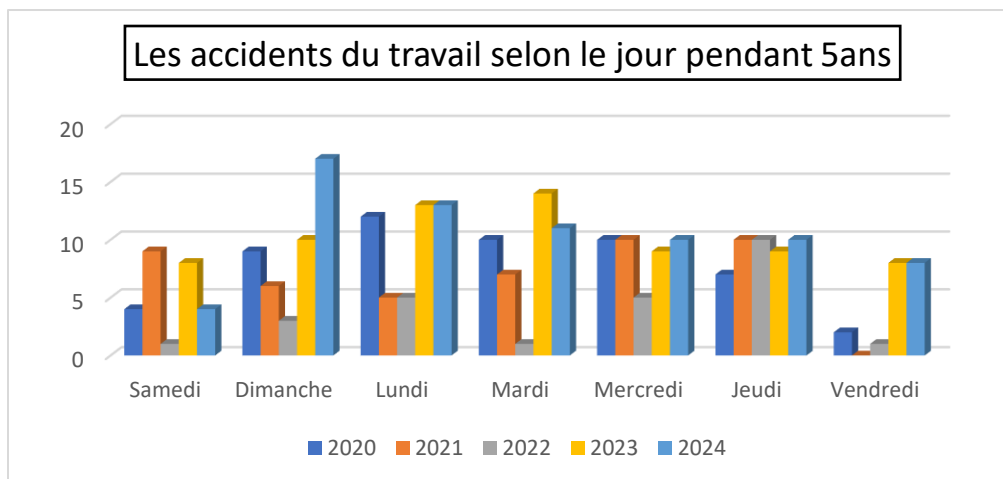


Figure II.7: La répartition des accidents de travail au port de Skikda Selon le jour

- **La répartition selon la cause de l'accident pendant 5ans**

La cause de l'accident désigne l'événement ou la situation ayant conduit directement à l'accident. Elle peut être liée à des facteurs humains, techniques, organisationnels ou environnementaux ((INRS), 2021)

La répartition des accidents de travaux enregistrés au sein de l'entreprise portuaire de Skikda selon la cause de l'accident, durant ces dernières années sont montrées dans le tableau ci-dessous :

Tableau II.9 : Les accidents du travail selon la cause de l'accident pendant 5ans

Années la cause	2020	2021	2022	2023	2024
Chute et Trébuchement	8	6	7	19	17
Heurt	10	7	9	23	20
Coincement	4	4	1	3	11
Faux geste	16	11	4	6	3
Glissade	9	8	2	7	14
Ecrasement	4	1	1	6	
Projection	1	1			
Blocage	1	2			
Derapage	1				
Chute d'objet		2		6	2
Vibration		1			1
Eclatement		3			
Brulure		1			1
Ejection des matériaux			2		
Effondrement				1	1
Choc mécanique					1
Torsion					2
La somme	54	47	26	71	73

- ✓ La glissade de personne font la cause de 08 accidents.
- ✓ Les faux gestes marquent 11 accidents.
- ✓ La chute de personnes et trébuchement font la cause de 06 accidents ;
- ✓ Heurt constitue la cause de 07 accidents.
- ✓ Accidents liés au coincement des membres inférieurs ou supérieurs : sont à l'origine de 04 accidents

Pour l'année 2020 :

- ✓ La glissade de personne font la cause de 09AT.
- ✓ La Chute de personnes et trébuchement est la cause de 16 A.T
- ✓ Le heurt est la cause de 08 AT
- ✓ Le coincement est en cause de 10 AT
- ✓ Les faux gestes marquent 03 AT
- ✓ La glissade de personne font la cause de 02 accidents.
- ✓ Les faux gestes marquent 04 accidents.
- ✓ La chute de personnes et trébuchement font la cause de 07 accidents ;
- ✓ Heurt constitue la cause de 09 accidents.

- ✓ Accidents liés au coincement des membres inférieurs ou supérieurs : sont à l'origine de 01 accident

Pour l'année 2021 :

- ✓ La glissade de personne font la cause de 08AT.
- ✓ La Chute de personnes et trébuchement est la cause de 06 A.T
- ✓ Le heurt est la cause de 07 AT
- ✓ Le coincement est en cause de 04 AT
- ✓ Les faux gestes marquent 11 AT
- ✓ La glissade de personne font la cause de 07 accidents.
- ✓ Les faux gestes marquent 06 accidents.
- ✓ La chute de personnes et trébuchement font la cause de 19 accidents ;
- ✓ Heurt constitue la cause de 23 accidents.
- ✓ Accidents liés au coincement des membres inférieurs ou supérieurs : sont à l'origine de 03 accident

Pour l'année 2022 :

- ✓ La glissade de personne font la cause de 02AT.
- ✓ La Chute de personnes et trébuchement est la cause de 07 A.T
- ✓ Le heurt est la cause de 09 AT
- ✓ Le coincement est en cause de 01 AT
- ✓ Les faux gestes marquent 04 AT.
- ✓ La glissade de personne font la cause de 14 accidents.
- ✓ Les faux gestes marquent 03 accidents.
- ✓ La chute de personnes et trébuchement font la cause de 17 accidents ;
- ✓ Heurt constitue la cause de 20 accidents.
- ✓ Accidents liés au coincement des membres inférieurs ou supérieurs : sont à l'origine de 11 accidents

Pour l'année 2023 :

- ✓ La glissade de personne font la cause de 07AT.
- ✓ La Chute de personnes et trébuchement est la cause de 19 A.T
- ✓ Le heurt est la cause de 23 AT

- ✓ Le coincement est en cause de 03 AT
- ✓ Les faux gestes marquent 06 AT

- **La répartition selon la zone de manipulation pendant 5ans**

La zone de manutention fait référence à l'espace physique où les opérations de manipulation de charges sont effectuées. Elle peut inclure des quais de chargement, des entrepôts, des zones de stockage, etc ((INRS), 2021)

La répartition des accidents de travaux enregistrés au sein de l'entreprise portuaire de Skikda selon la zone de manipulation, durant ces dernières années sont montrées dans le tableau ci-dessous :

Tableau II.10 : Les accidents du travail selon la zone de manipulation pendant 5ans

Années La zone de manipulation	2020	2021	2022	2023	2024
A bord	16	15	6	31	35
A terre	29	22	15	30	28
Engins Terrestres				2	6
Remorqueurs				2	
Engin de sevitude				1	2
Ateliers				4	1
Bureaux		3	2	1	
Sur les engins	9	7	3		
Trémie					1
La somme	54	47	26	71	73

- ✓ En 2020 16 A.T sont survenus à bord des navires, 29 à terre, et 09 sur les engins ou provoqués par les engins.
- ✓ Pour l'année 2019 : 23 à bord des navires 16 à terre et 07 sur les engins
- ✓ En 2021 15 A.T sont survenus à bord des navires, 22 à terre, 07 sur les engins ou provoqués par les engins et 03 au bureau.
- ✓ Pour l'année 2020 : 16 à bord des navires 29 à terre, 09 sur les engins et 00 au bureau
- ✓ En 2022 06 A.T sont survenus à bord des navires, 15 à terre, 03 sur les engins ou provoqués par les engins et 02 aux bureaux.
- ✓ Pour l'année 2021 : 15 à bord des navires 22 à terre, 07 sur les engins et 03 au bureau

- ✓ En 2023 31 A.T sont survenus à bord des navires, 30 à terre, 02 sur les engins terrestres ou provoqués par les engins et 01 aux bureaux
- ✓ En 2024 35 A.T sont survenus à bord des navires, 28 à terre, 06 sur les engins terrestres ou provoqués par les engins

• **La répartition selon le lieu de survenue de l'accident pendant 5ans**

Le lieu de survenue de l'accident indique l'endroit précis où l'accident s'est produit, tel qu'un chantier, un atelier, un bureau, etc. Cette information est cruciale pour l'analyse des risques spécifiques à chaque environnement de travail. ((OIT) O. I., 1998)

La répartition des accidents de travaux enregistrés au sein de l'entreprise portuaire de Skikda selon Le lieu de survenue de l'accident, durant ces dernières années sont montrées dans le tableau ci-dessous :

Tableau II.11 : Les accidents du travail selon le lieu de survenue de l'accident pendant 5ans

Années / Lieu de survenue	2020	2021	2022	2023	2024
Poste Château vert	5	9	6	16	10
18 H	2				
Marinelle	5	3		13	5
Poste 12	2	2	3	4	5
Poste 10	1	4	1	4	1
Poste 13	1	2	2	5	3
Atelier Gréage	2	1		2	
Poste 9	1			2	5
Poste 7	1	2	1	1	2
Poste 5	1				
Bureaux	1				
Station d'amarrage	1	1			
Nouveau port	4		3		
ZONE 03	3			2	1
P A/Port	9				
Appontement	1				
ONAB	1				
Ilot des chevres	1				
Barge	1				
Salle d'embauche	1				
Hangar	1				
Remorqueur	2	2		4	
Atelier maintenance	3			3	1

En face GRTE	1				
Magasin	3				
Avant-port		7	1	3	12
Poste8		1		3	8
Atelier M grue		1	1		
Accès principal		2		1	
CMT		1			
EX DG		1			
Parc relevage		1	1		3
Salle d'archive		1			
Décharge public		1			
Atelier mécanique		1			
Port est		1			
Bureaux A,T mécanique		3			
Ex/ghichet unique			1		
Accès est			1		
CMS			1		
R/R MAZFRAN05			1		
P,P stora			2		
DAG			1	1	1
Poste 6			1	2	8
Atelier m naval				1	
Chalet DACG				1	
N/P canot				1	
N/P				1	3
Poste 11					1
Atelier lavage					1
Pilotine N/P					2
Dcom					1
La somme	54	47	27	70	73

- ✓ En 2020 9.26% AT sont survenues aux postes C.V et Marinelle, pour l'année 2019
39.28% AT sont parvenues aux mêmes postes
- ✓ En 2021 34.04% AT sont survenues aux postes C.V et avant-port, pour l'année 2020
25.92% AT sont parvenues aux mêmes postes.
- ✓ En 2022 23.07% AT sont survenues aux postes C.V et avant-port, pour l'année 2021
34.04% AT sont parvenues aux mêmes postes
- ✓ En 2023 22.53% AT sont survenues aux postes C.V et avant-port, pour l'année 2022
23.07% AT sont parvenues aux mêmes postes
- ✓ En 2024 13.69% AT sont survenues aux postes C.V et avant-port, pour l'année 2023
22.53% AT sont parvenues aux mêmes postes

- **La répartition selon la nature de la marchandise manipulée pendant 5ans**

Le lieu de la nature de la marchandise manipulée indique l'endroit précis où l'accident s'est produit, tel qu'un chantier, un atelier, un bureau, etc. Cette information est cruciale pour l'analyse des risques spécifiques à chaque environnement de travail ((INRS), 2021)

La répartition des accidents de travaux enregistrés au sein de l'entreprise portuaire de Skikda selon la nature de la marchandise manipulée, durant ces dernières années sont montrées dans le tableau ci-dessous

Tableau II.12 : Les accidents du travail selon la nature de la marchandise manipulée pendant 5ans

Années	2020	2021	2022	2023	2024
La machine de manipulation					
Conteneurs	11	6	4	16	21
Tubes	4	1			
Big Bag	1	3	3		1
Bloque de Marbre	3	1			
Autres	35	34	14	29	19
Fer		1	1	19	26
Céréale		1	2	2	6
Pipes			2		
Bois				4	
Sable				1	
La somme	54	47	26	71	73

- ✓ En 2020 11 AT sont survenues lors de la manipulation des conteneurs, 04 lors de la manipulation des tubes ; et contre respectivement 07 et 13 pour l'année 2019
- ✓ En 2021 11 AT sont survenues lors de la manipulation des conteneurs, 04 lors de la manipulation des tubes ; et contre respectivement 07 et 13 pour l'année 2020
- ✓ En 2022 04 AT sont survenues lors de la manipulation des conteneurs, 02 lors de la manipulation des tubes ; et contre respectivement 11 et 04 pour l'année 2021
- ✓ En 2023 16 AT sont survenues lors de la manipulation des conteneurs, 19 lors de la manipulation de fer ; et contre respectivement 04 et 01 pour l'année 2022
- ✓ En 2024 21 AT sont survenues lors de la manipulation des conteneurs, 26 lors de la manipulation de fer ; et contre respectivement 16 et 19 pour l'année 2023

3. Analyse descriptive et exploratoire

3.1 Analyse croisée pour chaque type de post selon les trois dimensions principales.

Le tableau Présente une analyse statistique des postes de travail selon trois dimensions principales :

1. La structure organisationnelle (DMA, DMC, DME, DMT, DMI)
2. Les tranches d'âge (20–30, 31–40, 41–50, plus de 51 ans)
3. L'ancienneté professionnelle (0–5, 6–10, 11–15, plus de 15 ans)

L'analyse est faite pour chaque type de poste : • Ingénieur • Manager • Ouvrier • Superviseur • Technicien

Tableau II.13 : type de post selon les trois dimensions principales

Nombre	Selon la fonction	Selon l'Age (ans)				Selon l'ancienneté (ans)				Selon la structure				
		20-30	31-40	41-50	>51	0-5	6-10	11-15	>15	DMA	DME	DMC	DMT	DMI
22	Superviseur	4	8	6	4	8	5	8	1	4	6	5	5	2
22	Technicien	5	3	9	5	6	4	2	9	3	8	5	3	3
18	Ouvrier	4	5	6	3	5	5	2	6	4	4	4	4	2
19	Manager	4	4	6	5	6	4	5	4	0	5	5	5	4
19	Ingénier	1	8	5	5	2	11	3	3	2	2	3	4	8
T= 100														

3.2 Moyenne, Taux et ratio

3.2.1 Moyenne annuelle des accidents par année

Tableau II.14 : La moyenne annuelle des accidents

Année	Moyenne mensuelle des accidents
2020	4,5
2021	3,92
2022	2,17
2023	5,92
2024	6,08

Moyenne globale tous mois et toutes années confondus :

- **Moyenne générale :** $\approx 4,52$ accidents par mois

En utilisant la moyenne dans cette étude nous a permet de :

- Comparer les années entre elles : ou on observe que 2022 a enregistré la plus faible moyenne mensuelle d'accidents (2,17), alors que 2024 est l'année la plus accidentogène jusqu'à présent (6,08). Cela peut indiquer une variation des conditions de travail, de la rigueur des mesures de sécurité ou du volume d'activité.
- Identifier des tendances générales : La moyenne globale ($\approx 4,52$) permet de définir un seuil de référence. Les mois ou les années dépassant largement cette valeur pourraient faire l'objet d'une analyse approfondie pour comprendre les causes spécifiques.
- Prioriser les périodes à risque : En examinant les mois ayant une moyenne élevée (par exemple février : 6,4), On peut cibler certaines périodes pour renforcer les mesures de prévention.

3.2.2 Taux de Gravité de l'accident

•La répartition selon Les taux de fréquences et de gravités globales pendant 5ans

Les taux de fréquences et de gravités globales indique l'endroit précis où l'accident s'est produit, tel qu'un chantier, un atelier, un bureau, etc. Cette information est cruciale pour l'analyse des risques spécifiques à chaque environnement de travail.

La répartition des accidents de travaux enregistrés au sein de l'entreprise portuaire de Skikda selon Les taux de fréquences et de gravités globales, durant ces dernières années sont montrées dans le tableau ci-dessous :

$$\text{taux de fréquence} = \frac{\text{Nb A.T} \times 10^6}{\text{Nb H.T}} \quad (\text{II.1})$$

- Nb **A.T**: Nombre d'Accidents du Travail avec arrêt.
- Nb **H.T**: Nombre total d'Heures Travaillées par l'ensemble du personnel.
- Le **facteur 10⁶**: est utilisé pour standardiser le taux sur un million d'heures travaillées.

$$\text{taux de gravité} = \frac{\text{Nb j.p} \times 10^3}{\text{Nb H.T}} \quad (\text{II.2})$$

- Nb **j.p**: Nombre de jours perdus (ou jours d'arrêt de travail suite à des accidents).
- Nb **H.T**: Nombre total d'heures travaillées par l'ensemble du personnel.
- Le **facteur 10³**: est utilisé pour standardiser le taux sur 1 000 heures travaillées.

Tableau II.15 : Les accidents du travail selon Les taux de fréquences et de gravités globales pendant 5ans

Rubrique	2020	2021	Var %	2021	2022	Var %	2022	2023	Var %	2023	2024	Var %
Effectif	1882	1900	+0.43 %	1900	2019	+6.26 %	2019	2012	-0.35%	2012	1988	+1.19 %
Nombre d'accident avec arrêt de travail	54	47	- 12.96 %	47	26	- 44.68 %	26	71	+173%	71	73	+2.81 %
Nombre de jours perdus	719	541	- 24.76 %	541	427	- 21.07 %	427	957	+124%	957	18940	+1879 %
Nombre d'heures travaillées	3363992	3579711	+6,41 %	3579711	3828512	+6.95%	3828512	3951343	+3.21%	3951343	4007756	+1.427 %
Taux de fréquence des accidents de travail	16.05	13.13	- 18.19 %	13.13	6.79	- 48.29 %	6.79	17.97	+161.95%	17.97	18.21	- 1.41%
Taux de gravité des accidents du travail	0.21	0.15	- 28.57 %	0.15	0.11	- 26.67 %	0.11	0.24	+118.18%	0.24	4.73	+1870 %
Indice de gravité	13.31	11.51	- 13.52 %	11.51	16.4	+42.48 %	16.4	13.48	- 17.80%	13.48	259.45	+1824 %

Ce tableau présente l'évolution de plusieurs indicateurs clés liés à la sécurité au travail entre les années 2020 et 2024, tels que l'effectif, les accidents, les jours perdus, et les taux de fréquence et de gravité.

A. Effectif et Heures travaillées

- Le nombre d'employés est resté relativement stable, avec de légères variations annuelles.
- Le volume d'heures travaillées a progressivement augmenté chaque année, ce qui reflète une activité croissante ou une meilleure présence au travail.

B. Accidents avec arrêt et Jours perdus

- Le nombre d'accidents avec arrêt a fortement baissé entre 2020 et 2022, signe d'une amélioration, mais a brutalement augmenté en 2023, puis légèrement en 2024.

- Les jours perdus ont suivi une évolution similaire, avec un bond alarmant en 2024, passant de 957 à 18 940 jours (hausse de +1879 %), ce qui indique des accidents beaucoup plus graves ou longs.

C. Taux de fréquence (TF)

- Le taux de fréquence a baissé jusqu'en 2022, ce qui est un signe positif (moins d'accidents), mais il a fortement augmenté en 2023, et légèrement en 2024.

D. Taux et Indice de gravité

- Le taux de gravité est resté faible et stable jusqu'en 2022, mais a explosé en 2024 à 4.73.
- L'indice de gravité suit la même tendance, atteignant 259.45 en 2024, ce qui est très préoccupant.

3.3 Le test d'hypothèse

3.3.1 Tester l'évolution des accidents avec arrêt de travail dans le temps

Test de tendance linéaire (régression) : Pour vérifier s'il existe une tendance significative (à la baisse ou à la hausse) du nombre d'accidents

Le modèle ajusté est :

$$\text{Accidents} = -1040.18 + 0.52 * \text{Année}$$

Tableau II.16 : Test des tendances linéaire

Élément	Coefficient de tendance (pente)	p-value associée à l'année	R ² (coefficient de détermination)	Corrélation de Pearson	p-value de la corrélation
Valeur	+0.52	0.026	0.083	0.288	0.026

- La pente de +0.52 signifie que le nombre d'accidents augmente en moyenne de 0.52 par an entre 2020 et 2024.
- La p-value = 0.026 < 0.05 indique que cette tendance est statistiquement significative.
- La corrélation de Pearson est modérément positive (≈ 0.29), confirmant une légère tendance à la hausse.

Cela veut dire qu'il existe une tendance significative à la hausse du nombre d'accidents avec arrêt de travail entre 2020 et 2024.

Conclusion :

Après avoir étudié et analysé les statistiques relatives aux accidents du travail au port de Skikda pour la période 2020-2024, nous avons constaté une augmentation du nombre d'accidents entre 2023 et 2024, contrairement à la période 2020-2022. Cette augmentation inquiétante est due à plusieurs facteurs récurrents, dont les plus importants sont : les mouvements incorrects, les chutes, les collisions, la manutention de conteneurs et de matériaux lourds, ainsi que les défauts d'organisation du travail. Les résultats montrent que certaines professions, telles que les manutentionnaires, les tranches d'âge entre 31 et 50 ans et les structures organisationnelles telles que la DMA, sont plus vulnérables. L'indice de gravité a atteint son pic et un état préoccupant en 2024, indiquant une détérioration significative des conditions de sécurité. Ces résultats nous ont permis d'élaborer un modèle prédictif, présenté dans le deuxième chapitre, visant à anticiper toutes les sollicitations au sein du port et à les réduire durablement.

Chapitre III : Modélisation avec les réseaux de neurones artificiels

Introduction

La sécurité au travail est un élément de très haute importance et se présente comme étant une nécessité à assurer en premier degré, particulièrement quand il s'agit d'environnement de travail à haut risque notamment les établissements portuaires comme il est le cas de notre étude.

Le port de Skikda, en tant que base d'activité industrielles et logistiques, se retrouve constamment confronté à des situations plus ou moins dangereuses, ce qui rend la prévention d'accident un élément essentiel pour le bon fonctionnement de l'établissement mais aussi et en premier lieu afin de limiter des conséquences dramatiques sur le plan humain et sur le plan économique.

Dans ce chapitre nous allons présenter l'objectif à travers la modélisation, la préparation de données, l'implémentation des techniques ainsi que la conceptualisation de l'application de prédiction d'accident et ses résultats.

1. Objectif de la modélisation :

L'objectif principal de cette modélisation est de prédire la probabilité ou la gravité d'un accident professionnel au sein du port de Skikda, en se basant sur les données historiques des travailleurs et des incidents. En exploitant les techniques d'apprentissage automatique, notamment les réseaux de neurones artificiels (RNA) ainsi que les modèles Random Forest et SVM, nous visons à :

- Identifier les profils de travailleurs les plus exposés aux risques.
- Détecter les conditions ou combinaisons de facteurs menant à un accident.
- Fournir des recommandations ciblées en matière de prévention.
- Développer un outil d'aide à la décision pour la gestion proactive de la sécurité.

Le modèle a été implémenté dans une application logicielle nommée "Accident Prediction Application", dotée d'une interface graphique (Tkinter) permettant l'ajout des données, l'entraînement des modèles, la visualisation des résultats, et la génération automatique de rapports.

2. Préparation des données pour l'apprentissage automatique

Avant de pouvoir concevoir et entraîner des modèles prédictifs, une phase rigoureuse de préparation des données est indispensable. Cette phase englobe plusieurs étapes cruciales, allant de la collecte et la structuration des données brutes à leur transformation en un format exploitable par les algorithmes. Dans cette section, nous détaillerons le processus de préparation des données mis en œuvre pour notre étude sur la prédiction des accidents professionnels au port de Skikda, en mettant en lumière les spécificités de l'application développée.

2.1. Structure des données utilisées

Les données exploitées dans le cadre de cette étude ont été partagées en deux types principales, reflétant les informations relatives aux employés et aux incidents survenus.

Tableau III.1 : Type de donnée

Type de donnée	Description	Variable (Feature)
Les données des travailleurs	Des informations personnelles et professionnelles pour chaque employé du port.	age (âge du travailleur) seniority (ancienneté) Structure (département) job_position (poste occupé)
Les données des accidents	Les détails de chaque accident professionnel enregistré	hour, day, month (heure, jour, mois de l'accident) injury_location (emplacement de la blessure) injury_type (type de blessure) accident_cause (cause de l'accident) handling_zone (zone de manutention) Location (lieu exact) accident_type (catégorie d'accident)

L'application développée pour cette étude a été conçue pour offrir une flexibilité maximale quant à l'importation de ces données. Elle supporte l'importation à partir de formats de fichiers couramment utilisés, tels que les fichiers Excel (.xlsx ou .xls) et les fichiers CSV (Comma Separated Values). Une fonctionnalité clé de l'application est sa capacité à créer et à gérer une base de données interne de manière automatique à partir des fichiers importés. Cela signifie que l'utilisateur peut charger ses fichiers de données, et l'application se charge de les structurer et de les stocker de manière persistante pour une utilisation ultérieure. L'interface d'importation des données, accessible via l'onglet « Import Data » de l'application, guide l'utilisateur à travers le processus de sélection des fichiers sources et initie les étapes de chargement, de nettoyage initial et de fusion des données des travailleurs et des accidents.

2.2. Variables utilisées (Features)

La sélection des variables, ou « features », est une étape déterminante dans la construction d'un modèle d'apprentissage automatique performant. Les variables retenues doivent être pertinentes par rapport au phénomène que l'on cherche à prédire et contenir une information discriminante. Pour notre étude, les variables « Features » ont été catégorisées en deux groupes principaux : celles liées aux travailleurs et celles liées aux accidents. (Tableau III.1)

La sélection finale des variables pertinentes pour la modélisation est effectuée au sein de la classe `DataProcessor` de l'application. Cette classe est responsable de la préparation des données brutes en un format structuré et nettoyé, prêt à être utilisé pour l'entraînement des modèles. Ce processus peut impliquer l'élimination de variables redondantes ou peu informatives, ainsi que la création de nouvelles variables dérivées si nécessaire.

2.3. Encodage des variables catégorielles

Plusieurs techniques d'encodage existent, et le choix de la technique appropriée dépend de la nature de la variable catégorielle.

Tableau III.2 : Type d'encodage

Type de variable	Encodage utilisé
les variables nominales	« One-Hot » (ou encodage disjonctif complet)
les variables ordinales	un encodage ordinal

L'encodage « One-Hot » : (ou encodage disjonctif complet). Cette méthode consiste à créer une nouvelle variable binaire (0 ou 1) pour chaque catégorie unique de la variable originale. Par exemple, si la variable « structure » a trois catégories (DMC, DMA, DMT), l'encodage One-Hot créera trois nouvelles variables : « structure_DMC », « structure_DMA », et « structure_DMT ». Pour un travailleur appartenant à la structure DMC, la variable « structure_DMC » prendra la valeur 1, tandis que les deux autres prendront la valeur 0. Dans notre application, cette technique est implémentée en utilisant la classe `OneHotEncoder` de la bibliothèque scikit-learn.

L'encodage ordinal peut être utilisé. Cette méthode assigne une valeur numérique à chaque catégorie en respectant son ordre. Par exemple, « léger » pourrait être encodé par 1, « moyen » par 2, et « grave » par 3.

L'ensemble du processus d'encodage est intégré dans un pipeline de prétraitement au sein de l'application. Ce pipeline est sauvegardé après avoir été ajusté sur les données d'entraînement. Lors de la prédiction sur de nouvelles données, ce même pipeline est réutilisé pour appliquer les mêmes transformations d'encodage, garantissant ainsi la cohérence entre la phase d'entraînement et la phase d'inférence. Une attention particulière est portée à la gestion des nouvelles catégories qui pourraient apparaître dans les données de prédiction mais qui n'étaient pas présentes lors de l'entraînement ; le `OneHotEncoder` est configuré pour ignorer ces nouvelles catégories (paramètre `handle_unknown='ignore'`) afin d'éviter les erreurs.

2.4. Traitement des valeurs manquantes

Un nettoyage initial a été effectué pour assurer la cohérence des données :

- Suppression des lignes contenant des valeurs manquantes critiques (worker_id, age, seniority, date, hour).

- Pour les travailleurs n'ayant pas subi d'accidents, les colonnes liées aux accidents sont remplies avec des valeurs par défaut (0 pour les valeurs numériques, "Unknown" pour les textes).

Une gestion spécifique est également prévue pour les travailleurs qui n'ont pas d'historique d'accident. Pour ces derniers, les variables relatives aux détails d'un accident (comme le type de blessure ou la cause) seront naturellement manquantes. Ces cas sont traités de manière à ce que le modèle puisse distinguer ces travailleurs de ceux ayant eu un accident avec des informations manquantes. Toutes ces stratégies d'imputation et de traitement des valeurs manquantes sont implémentées au sein de la méthode `clean_data()` de la classe `DataProcessor`. Il est également important de s'assurer que le mécanisme de traitement des valeurs manquantes appliqué lors de l'entraînement est également appliqué de manière cohérente aux nouvelles données lors de la phase de prédiction.

2.5. Données synthétiques (simulées)

Dans le contexte de notre application de prédiction des accidents professionnels, La méthodologie de génération de données synthétiques implémentée dans l'application vise à créer des profils de travailleurs et des enregistrements d'accidents aussi réalistes que possible. Pour les travailleurs, cela implique de générer des valeurs :

- Pour l'âge, l'ancienneté, le poste, et la structure en respectant des distributions plausibles (par exemple, une distribution normale pour l'âge, des catégories de postes fréquentes, etc.).
- Pour les accidents, la simulation prend en compte des probabilités conditionnelles basées sur des hypothèses réalistes ou des statistiques générales du domaine (par exemple, certains postes peuvent être plus sujets à certains types d'accidents).

L'application intègre une interface utilisateur, accessible via l'onglet « Import Data », qui permet à l'utilisateur de générer des données synthétiques en spécifiant certains paramètres, tels que le nombre de travailleurs et le nombre d'accidents à simuler. Cette fonctionnalité est principalement assurée par la méthode `prepare_synthetic_data()` au sein de la classe `DataProcessor`.

2.6. Normalisation / Standardisation

Dans notre application, nous utilisons la classe `StandardScaler` de la bibliothèque scikit-learn pour appliquer cette transformation aux variables numériques pertinentes telles que l'âge, l'ancienneté et l'heure de l'accident. La normalisation des distributions des variables d'entrée peut grandement améliorer la convergence des algorithmes d'optimisation et la performance globale des modèles.

2.7. Division du jeu de données

Une fois les données collectées, nettoyées et prétraitées, l'étape suivante consiste à les diviser en plusieurs sous-ensembles pour l'entraînement et l'évaluation rigoureuse des modèles d'apprentissage automatique. La stratégie de division la plus fondamentale est la séparation du jeu de données principal en un ensemble d'entraînement (**train set**) et un ensemble de **test (test set)**.

Le jeu de données a été divisé en deux sous-ensembles :

- 75% des données sont utilisées pour l'entraînement.
- 25% restants de nos données sont donc réservés pour la phase de test.

La division des données en ensembles d'entraînement et de test, avec stratification, est gérée par la méthode `split_data()` de la classe `DataProcessor` dans notre application, utilisant la fonction `train_test_split` de scikit-learn.

3. Implémentation technique et architecture du modèle

L'implémentation technique de l'application de prédiction des accidents professionnels constitue un aspect fondamental de ce projet. Cette section présente en détail l'architecture logicielle, les technologies et bibliothèques utilisées, ainsi que les bonnes pratiques de programmation appliquées pour garantir la robustesse, la maintenabilité et l'extensibilité du système.

3.1 Technologies et bibliothèques utilisées

Le développement de l'application repose sur un ensemble de technologies et de bibliothèques soigneusement sélectionnées pour répondre aux exigences fonctionnelles et non fonctionnelles du projet.

Python a été choisi comme langage de programmation principal en raison de sa simplicité, de sa lisibilité et de son écosystème riche en bibliothèques spécialisées pour l'analyse de données et l'apprentissage automatique.

3.1.1 Bibliothèques d'analyse de données et d'apprentissage automatique

- **Pandas**

La bibliothèque pandas constitue le pilier central pour la manipulation et l'analyse des données tabulaires dans notre application. Elle offre des structures de données performantes, notamment le DataFrame, qui permettent de représenter et de manipuler efficacement les données des travailleurs et des accidents. Les fonctionnalités de pandas utilisées dans l'application incluent

L'utilisation de pandas simplifie considérablement les opérations de nettoyage, de transformation et d'agrégation des données, qui sont essentielles dans le processus de préparation pour l'apprentissage automatique. **(Annexe 1)**

- **numpy**

La bibliothèque numpy est utilisée pour les calculs numériques et la manipulation efficace de tableaux multidimensionnels. Elle fournit des fonctions mathématiques optimisées qui sont particulièrement utiles pour le traitement des données et l'implémentation de certains aspects des algorithmes d'apprentissage automatique. **(Annexe 2)**

- **scikit-learn**

Scikit-learn est la bibliothèque centrale pour l'implémentation des algorithmes d'apprentissage automatique dans notre application. Elle offre une API cohérente et bien documentée pour une large gamme de techniques de prétraitement, de modélisation et d'évaluation **(Annexe 3)**

Les composants clés de scikit-learn utilisés dans l'application incluent :

Tableau III.3 : Les composants clés de scikit-learn

Les composants	Commande	Utilisation
Prétraitement des données	<ul style="list-style-type: none"> • <code>`StandardScaler`</code>, • <code>`OneHotEncoder`</code> 	<ul style="list-style-type: none"> • La normalisation des variables numériques • L'encodage des variables catégorielles
Construction de pipelines	<ul style="list-style-type: none"> • <code>`Pipeline`</code> et <code>`ColumnTransformer`</code> 	Créer des chaînes de traitement cohérentes.
Division des données	<ul style="list-style-type: none"> • <code>`train_test_split`</code> 	La séparation des ensembles d'entraînement et de test.
Algorithmes de classification	<ul style="list-style-type: none"> • <code>`RandomForestClassifier`</code>, <code>`SVC`</code> et <code>`MLPClassifier`</code> 	Les trois approches de modélisation
Métriques d'évaluation		Diverses fonctions pour mesurer la performance des modèles

- **joblib**

La bibliothèque joblib est utilisée pour la sérialisation et la désérialisation des modèles entraînés et des préprocesseurs. Elle permet de sauvegarder ces objets sur le disque et de les recharger ultérieurement pour effectuer des prédictions sans avoir à réentraîner les modèles. (**Annexe 4**)

3.1.2 Bibliothèques pour l'interface graphique

- **tkinter**

Tkinter a été choisie pour sa disponibilité universelle (incluse dans l'installation standard de Python) et sa relative simplicité d'utilisation. L'application utilise tkinter pour créer une interface utilisateur complète avec des onglets, des formulaires, des tableaux et des visualisations (**Annexe 5**)

Les composants tkinter utilisés incluent :

- `tk` pour des widgets avec un style amélioré
- `filedialog` pour les boîtes de dialogue de sélection de fichiers
- `messagebox` pour les messages d'information et d'erreur

- **matplotlib**

Matplotlib est utilisée pour la création de graphiques et de visualisations dans l'application. Elle permet de générer des représentations visuelles des données et des résultats des modèles, telles que des histogrammes, des diagrammes à barres, des courbes ROC et des matrices de confusion.

(Annexe 6)

L'intégration de matplotlib avec tkinter est réalisée grâce au module `backend_tkagg`, qui permet d'incorporer des graphiques matplotlib directement dans l'interface utilisateur.

3.1.3 Bibliothèques utilitaires

Plusieurs bibliothèques utilitaires standard de Python sont également utilisées dans l'application montré dans le (tableau III.4)

Tableau III.4 : Bibliothèques utilitaires

Composant	Utilité
<code>**datetime**</code>	la manipulation des dates et des heures, notamment pour l'horodatage des opérations et le formatage des dates dans les rapports.
<code>**os**</code>	les opérations sur le système de fichiers, comme la création de répertoires et la gestion des chemins de fichiers.
<code>**traceback**</code>	Pour la capture et l'affichage détaillés des erreurs, facilitant le débogage de l'application.

3.2. Structure du code et bonnes pratiques

L'architecture de l'application suit une approche modulaire et orientée objet, avec une séparation claire des responsabilités entre les différents composants. Cette organisation facilite la maintenance, l'extension et la compréhension du code.

3.2.1 Organisation modulaire

Le code source de l'application est organisé en plusieurs modules, chacun ayant une responsabilité spécifique

...

```
accident_prediction_gui/
|
|— src/
|   |— main.py      # Point d'entrée de l'application
|   |— gui.py       # Interface utilisateur graphique
|   |— data_processing.py # Traitement et préparation des données
|   |— reporting.py  # Génération de rapports et visualisations
|   |— add_windows.py # Fenêtres pour l'ajout de travailleurs et d'accidents
|   |
|   └─ models/      # Module des modèles d'apprentissage
|       |— __init__.py # Définition des modèles disponibles
|       |— base.py     # Classe de base pour tous les modèles
|       |— random_forest.py # Implémentation du modèle Random Forest
|       |— svm.py      # Implémentation du modèle SVM
|       └─ neural_network.py # Implémentation du modèle Neural Network
```

...

Chaque module est conçu pour être aussi indépendant que possible, avec des interfaces bien définies pour communiquer avec les autres composants. Cette approche facilite les tests unitaires et permet de modifier un module sans affecter le reste du système.

3.2.2 Programmation orientée objet

L'application utilise une approche orientée objet, avec des classes bien définies pour chaque composant majeur montré sans le tableau suivant :

Tableau III.5 : Composant utilitaires

Composant	Utilité
`AccidentPredictionGUT`	Classe principale pour l'interface utilisateur
`DataProcessor`	Classe pour le traitement et la préparation des données
`BaseModel` et ses sous-classes	Classes pour les différents algorithmes d'apprentissage
`ReportGenerator`	Classe pour la génération de rapports et de visualisations
AddWorkerWindow` et `AddAccidentWindow`	Classes pour les fenêtres modales d'ajout de données

Cette approche orientée objet favorise la réutilisation du code et facilite l'extension de l'application avec de nouveaux types de modèles ou de fonctionnalités.

3.2.3 Gestion des erreurs

L'application implémente une gestion robuste des erreurs pour améliorer la fiabilité et l'expérience utilisateur. Les exceptions sont capturées et traitées de manière appropriée, avec des messages d'erreur informatifs affichés à l'utilisateur (**Annexe 8**)

3.2.4 Documentation du code

Le code de l'application est abondamment documenté pour faciliter sa compréhension et sa maintenance. Chaque module, classe et méthode est accompagné de docstrings qui expliquent son objectif, ses paramètres, ses valeurs de retour et les exceptions qu'il peut lever

En plus des docstrings, le code contient des commentaires explicatifs pour les sections complexes ou non évidentes, facilitant ainsi la compréhension du code par d'autres développeurs.

3.2.5 Validation des entrées

L'application implémente une validation rigoureuse des entrées utilisateur pour prévenir les erreurs et garantir l'intégrité des données. Cette validation est particulièrement importante dans les formulaires d'ajout de travailleurs et d'accidents (**Annexe 9**)

Cette validation garantit que seules des données valides et cohérentes sont ajoutées à la base de données, ce qui est essentiel pour le bon fonctionnement des algorithmes d'apprentissage automatique.

4. Application de prédiction des accidents

Cette section présente l'application développée dans le cadre de ce projet, qui permet non seulement d'entraîner et d'utiliser les modèles prédictifs, mais aussi de gérer les données, de visualiser les résultats et de générer des rapports pertinents pour la prise de décision.

4.1. Architecture de l'application

L'architecture de l'application de prédiction des accidents professionnels a été conçue selon une approche modulaire qui favorise la séparation des préoccupations, la maintenabilité et l'extensibilité. Cette architecture s'articule autour de plusieurs composants principaux, chacun ayant une responsabilité bien définie et communiquant avec les autres composants via des interfaces clairement établies.

4.1.1 Structure modulaire du code

L'application est organisée en plusieurs modules distincts, chacun encapsulant une fonctionnalité spécifique :

accident_prediction_gui/

```

|
|
|— data/          # Répertoire pour les fichiers de données
|
| |— workers.csv   # Données des travailleurs
|
| |— accidents.csv # Données des accidents
|
|
|— models/        # Répertoire pour les modèles entraînés
|
| |— RandomForest_model.joblib
|
| |— SVM_model.joblib
|
| |— NeuralNetwork_model.joblib
|
| |— preprocessor.joblib # Préprocesseur sauvegardé
|
|
|— src/           # Code source de l'application
|
| |— main.py       # Point d'entrée de l'application
|
| |— gui.py        # Interface utilisateur graphique
|
| |— data_processing.py # Traitement et préparation des données
|
| |— reporting.py  # Génération de rapports et visualisations
|
| |— add_windows.py # Fenêtres pour l'ajout de travailleurs et d'accidents
|
| |
|
| |— models/      # Module des modèles d'apprentissage
|
| | |— __init__.py # Définition des modèles disponibles
|
| | |— base.py     # Classe de base pour tous les modèles
|
| | |— random_forest.py # Implémentation du modèle Random Forest
|
| | |— svm.py      # Implémentation du modèle SVM

```

Cette organisation modulaire présente plusieurs avantages :

- Elle facilite la compréhension du code en regroupant les fonctionnalités connexes.
- Elle permet de modifier un module sans affecter les autres, tant que les interfaces restent stables.
- Elle favorise la réutilisation du code et la testabilité des composants individuels.

4.1.2 Composants principaux

L'application est composée de quatre composants principaux qui interagissent pour fournir l'ensemble des fonctionnalités :

- **Module de traitement des données**

Le module de traitement des données, implémenté dans le fichier `data_processing.py`, est responsable de toutes les opérations liées à la manipulation des données. Il s'occupe notamment de :

- L'importation des données depuis différentes sources (CSV, Excel)
- Le nettoyage et la préparation des données pour l'apprentissage automatique
- La génération de données synthétiques pour les tests
- La division des données en ensembles d'entraînement et de test
- Le prétraitement des données (encodage, normalisation)

Ce module est centré autour de la classe `DataProcessor`, qui encapsule toutes ces fonctionnalités et maintient l'état des données tout au long du processus de traitement.

- **Module de modélisation**

Le module de modélisation, organisé dans le répertoire `models/`, implémente les différents algorithmes d'apprentissage automatique utilisés pour la prédiction des accidents. Il est structuré autour d'une classe de base abstraite `BaseModel` qui définit l'interface commune à tous les modèles, et de classes spécifiques pour chaque type de modèle :

- `RandomForestModel` pour les forêts aléatoires
- `SVMMModel` pour les machines à vecteurs de support

- `'NeuralNetworkModel'` pour les réseaux de neurones artificiels

Cette conception orientée objet permet d'ajouter facilement de nouveaux types de modèles tout en maintenant une interface cohérente pour l'entraînement, l'évaluation et la prédiction.

- **Interface utilisateur graphique**

Le module d'interface utilisateur, implémenté dans le fichier `'gui.py'`, est responsable de la création et de la gestion de l'interface graphique de l'application. Il utilise la bibliothèque `tkinter` pour construire une interface intuitive et fonctionnelle, organisée en onglets thématiques correspondant aux différentes étapes du workflow de prédiction des accidents. La classe principale `'AccidentPredictionGUI'` coordonne l'interaction entre l'interface utilisateur et les autres composants de l'application.

- **Module de reporting**

Le module de reporting, implémenté dans le fichier `'reporting.py'`, est chargé de la génération de rapports textuels et de visualisations graphiques basés sur les données et les résultats des modèles. Il fournit des fonctionnalités pour :

- Créer des rapports statistiques sur les accidents
- Générer des visualisations des facteurs de risque
- Produire des graphiques de performance des modèles
- Exporter les rapports au format PDF

Ce module joue un rôle crucial dans la transformation des résultats bruts des modèles en informations exploitables pour les décideurs.

- **Flux de données et interactions entre composants**

Le flux de données à travers l'application suit généralement le parcours suivant :

1. Les données brutes sont importées ou générées via le module de traitement des données.
2. Ces données sont nettoyées, prétraitées et divisées en ensembles d'entraînement et de test.
3. Les modèles sont construits et entraînés sur ces données préparées.
4. Les prédictions sont effectuées sur de nouvelles données ou sur l'ensemble de test.
5. Les résultats sont visualisés et des rapports sont générés.

Les interactions entre les composants sont gérées principalement par la classe `AccidentPredictionGUI`, qui instancie et coordonne les autres composants. Par exemple, lorsqu'un utilisateur demande l'entraînement d'un modèle via l'interface graphique, la classe GUI :

1. Récupère les paramètres sélectionnés par l'utilisateur
2. Demande au `DataProcessor` de préparer les données
3. Instancie le modèle approprié et lui transmet les données préparées
4. Affiche les résultats de l'entraînement et sauvegarde le modèle

Cette architecture découplée permet une grande flexibilité et facilite l'évolution de l'application au fil du temps.

5. Présentation visuelle de l'application

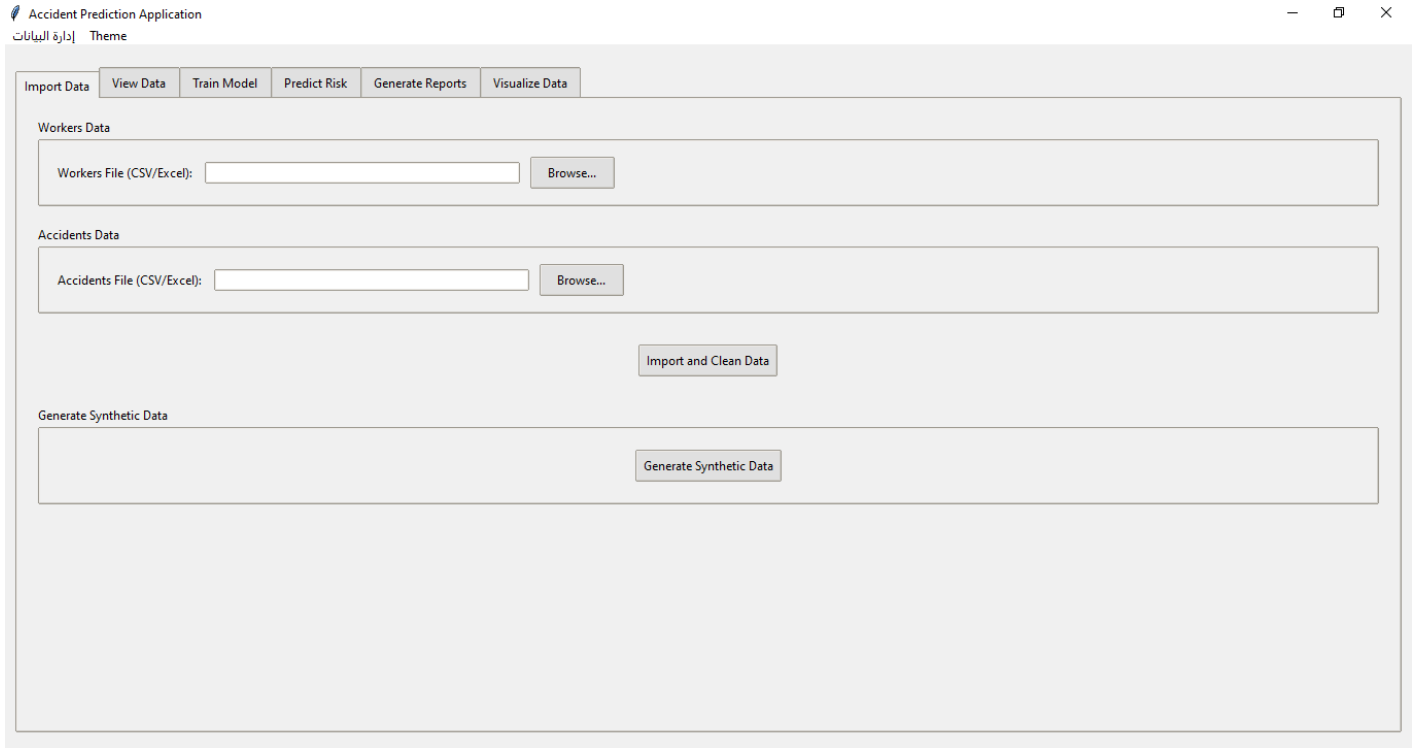
Cette section présente une démonstration visuelle de l'application de prédiction des accidents professionnels développée pour le port de Skikda. À travers une série de captures d'écran commentées, nous explorons l'interface d'utilisateur et les principales fonctionnalités de l'application, expliquant comment elle peut être utilisée en pratique pour améliorer la sécurité au travail.

5.1. Interface principale et navigation

L'interface principale de l'application est conçue pour être intuitive et facile à utiliser, même pour des utilisateurs sans expertise technique en science des données ou en programmation.

5.1.1 Écran d'accueil

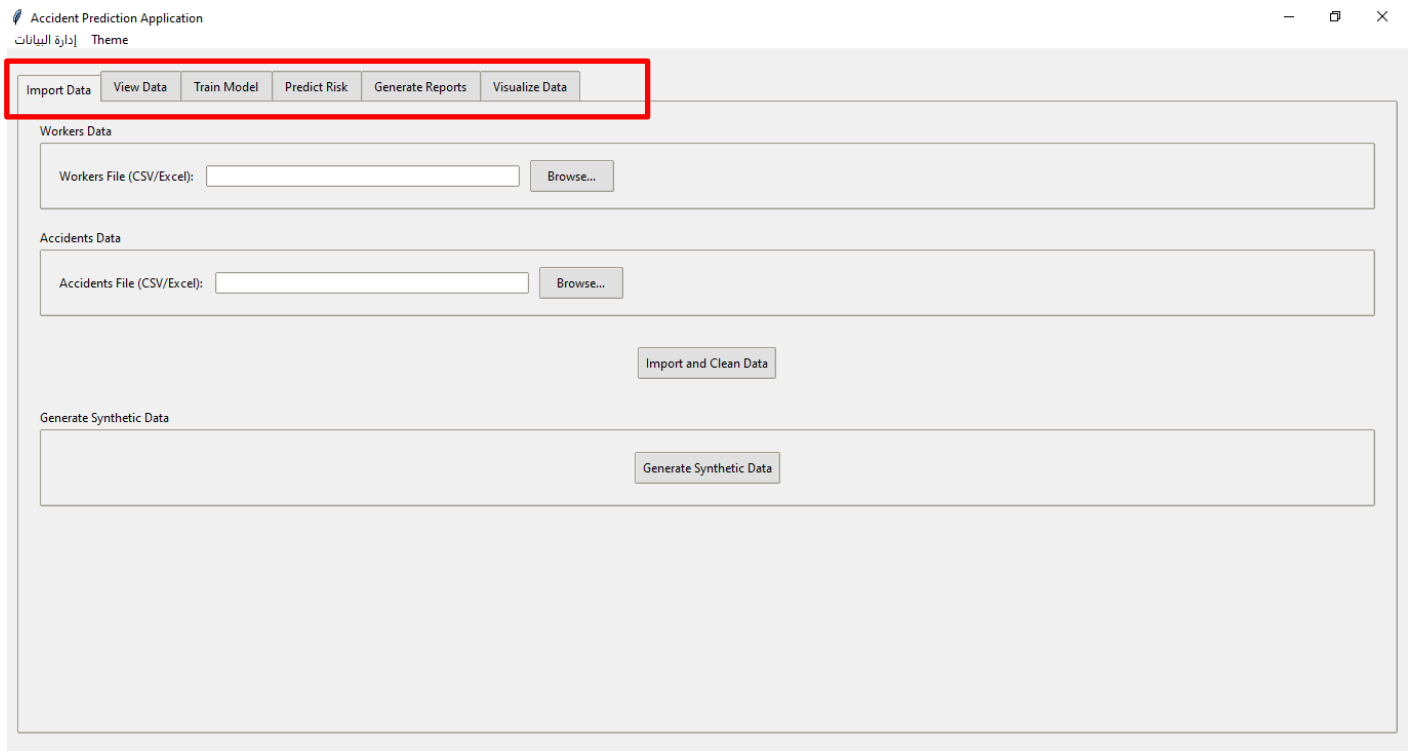
L'écran d'accueil présente une vue d'ensemble de l'application avec un tableau de bord résumant les statistiques clés.



Figures III.1 : Écran d'accueil

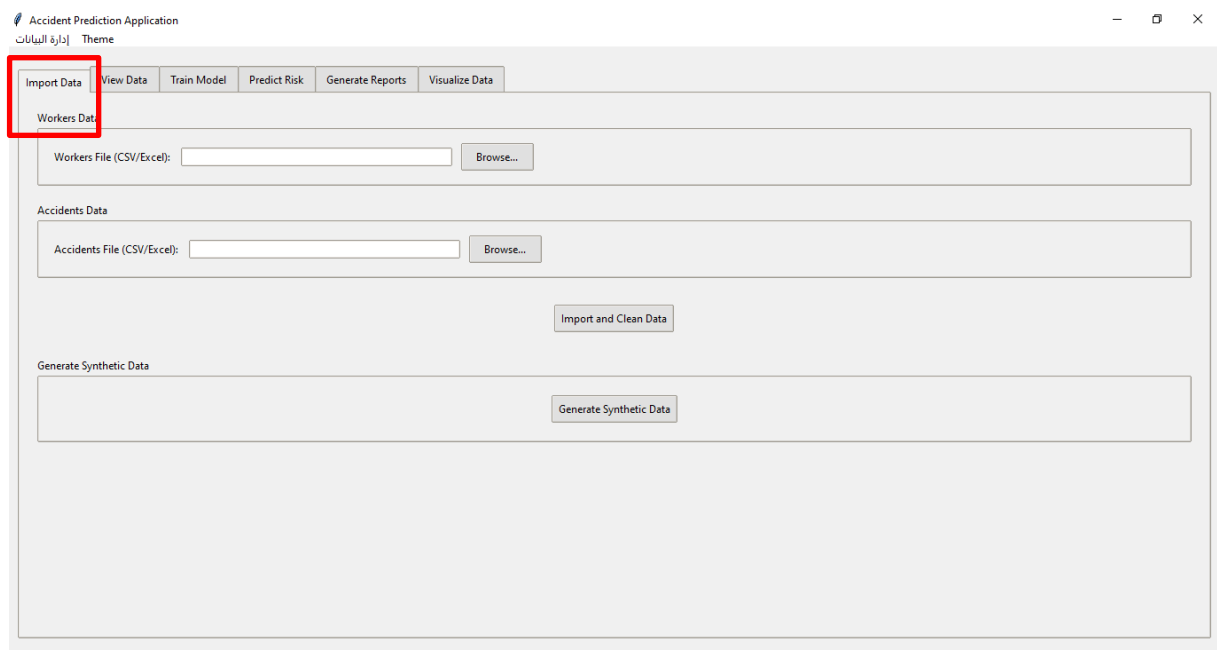
5.1.2 Système de navigation par onglets

L'application utilise un système d'onglets pour organiser les différentes fonctionnalités de manière logique et accessible.



Figures III.2 : Système de navigation par onglets

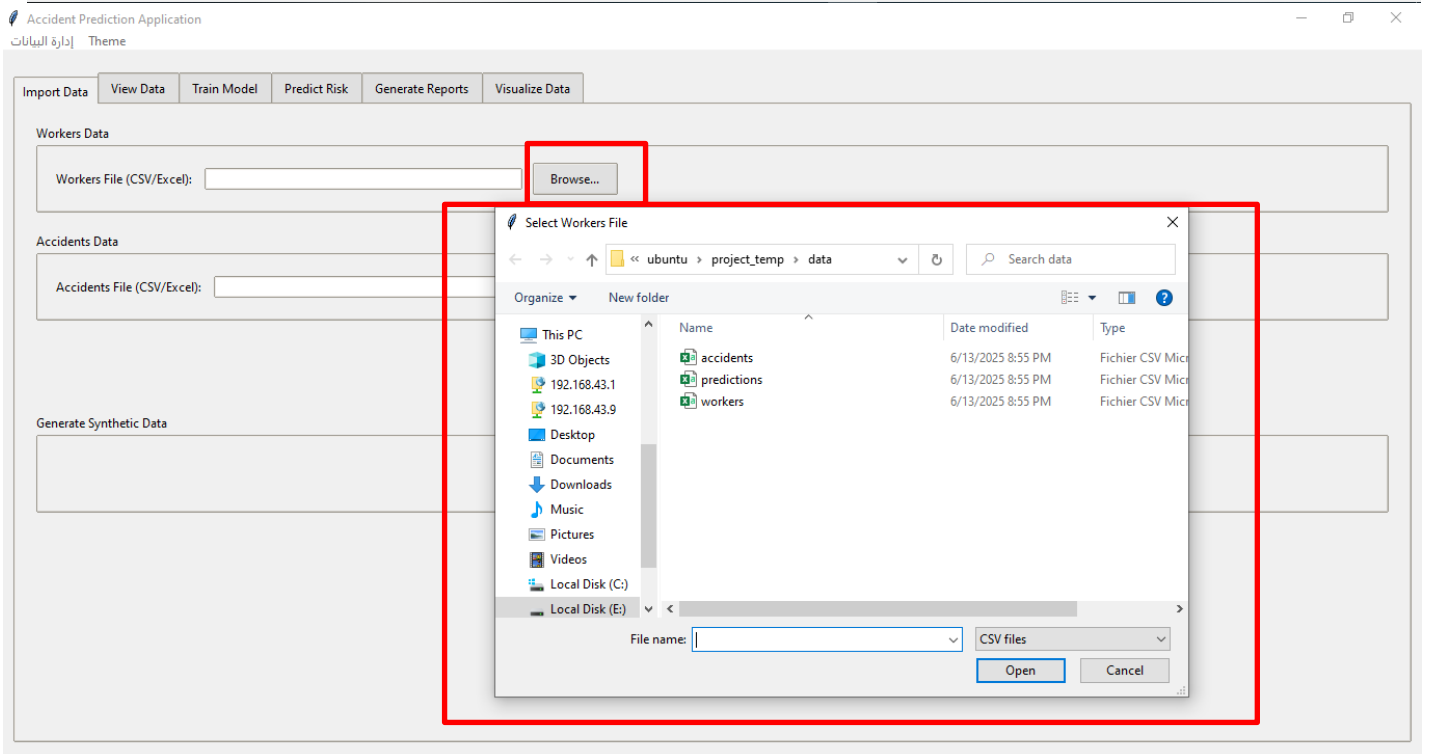
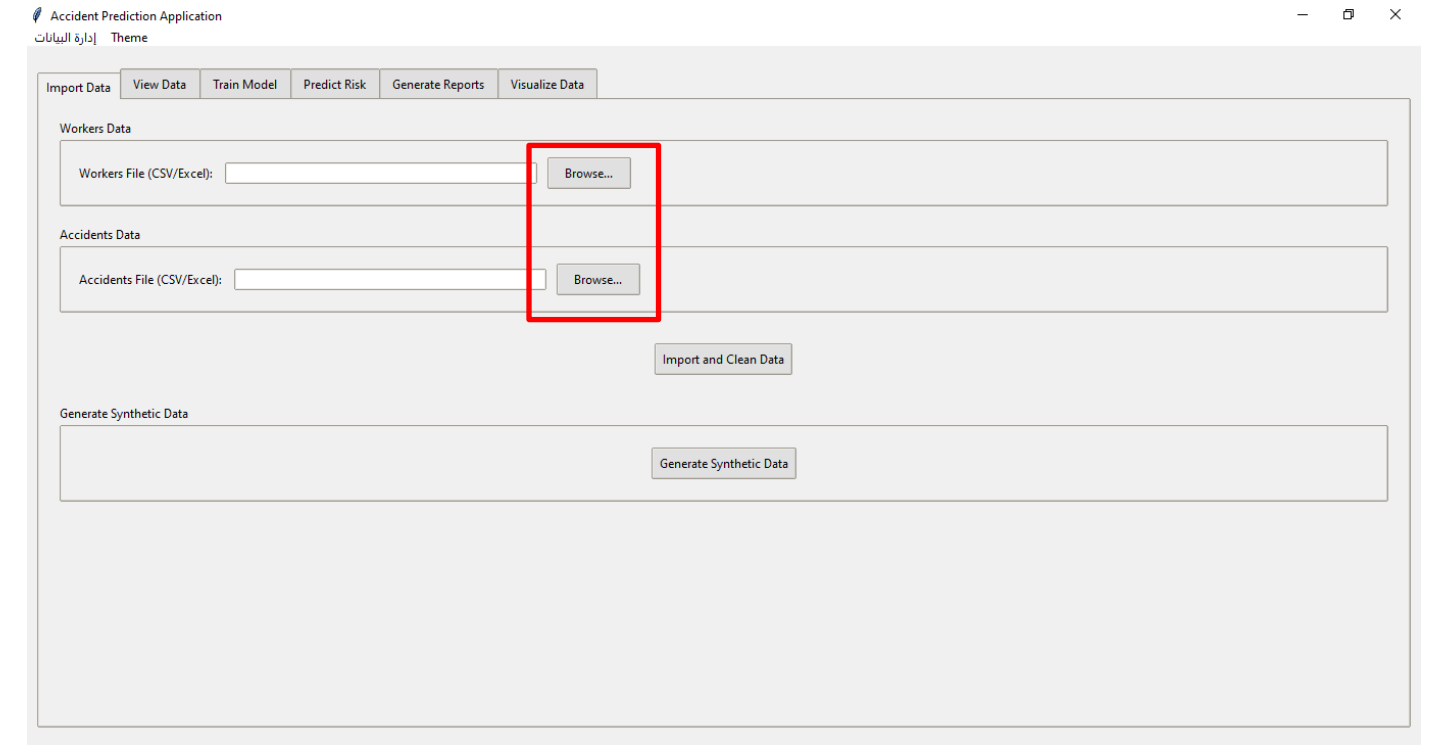
5.2. Importation et gestion des données



Figures III.3 : Importation et gestion des données

5.2.1 Importation de fichiers Excel et CSV

L'application permet d'importer facilement des données à partir de fichiers Excel ou CSV, avec des options de configuration pour s'adapter à différents formats.



Figures III.4: Importation de fichiers Excel et CSV

5.2.2 Visualisation des données importées

Une fois les données importées, l'utilisateur peut les visualiser sous forme de tableaux interactifs.

Import Data View Data Train Model Predict Risk Generate Reports Visualize Data

Workers Data Accidents Data Merged Data (for Training)

worker_id	name	age	seniority	structure	job_position	created_at
1	Worker_1	43	3	DMC	Superviseur	6/13/2025 17:52
2	Worker_2	48	10	DMA	Superviseur	6/13/2025 17:52
3	Worker_3	52	15	DMC	Technicien	6/13/2025 17:52
4	Worker_4	54	13	DMT	Ouvrier	6/13/2025 17:52
5	Worker_5	40	10	DMC	Technicien	6/13/2025 17:52
6	Worker_6	26	2	DMA	Ouvrier	6/13/2025 17:52
7	Worker_7	49	10	DMA	Technicien	6/13/2025 17:52
8	Worker_8	58	20	DMI	Technicien	6/13/2025 17:52
9	Worker_9	22	1	DMA	Superviseur	6/13/2025 17:52
10	Worker_10	45	5	DMI	Manager	6/13/2025 17:52
11	Worker_11	24	1	DMI	Manager	6/13/2025 17:52
12	Worker_12	43	6	DMI	Ingénieur	6/13/2025 17:52
13	Worker_13	49	9	DMC	Technicien	6/13/2025 17:52
14	Worker_14	20	0	DMT	Manager	6/13/2025 17:52
15	Worker_15	33	3	DME	Technicien	6/13/2025 17:52
16	Worker_16	33	4	DME	Superviseur	6/13/2025 17:52
17	Worker_17	20	0	DMT	Technicien	6/13/2025 17:52
18	Worker_18	34	2	DMI	Superviseur	6/13/2025 17:52
19	Worker_19	35	3	DMA	Technicien	6/13/2025 17:52
20	Worker_20	42	4	DMA	Technicien	6/13/2025 17:52
21	Worker_21	51	15	DMC	Manager	6/13/2025 17:52
22	Worker_22	24	3	DMT	Superviseur	6/13/2025 17:52
23	Worker_23	49	20	DME	Technicien	6/13/2025 17:52
24	Worker_24	27	1	DMT	Ingénieur	6/13/2025 17:52

Import Data View Data Train Model Predict Risk Generate Reports Visualize Data

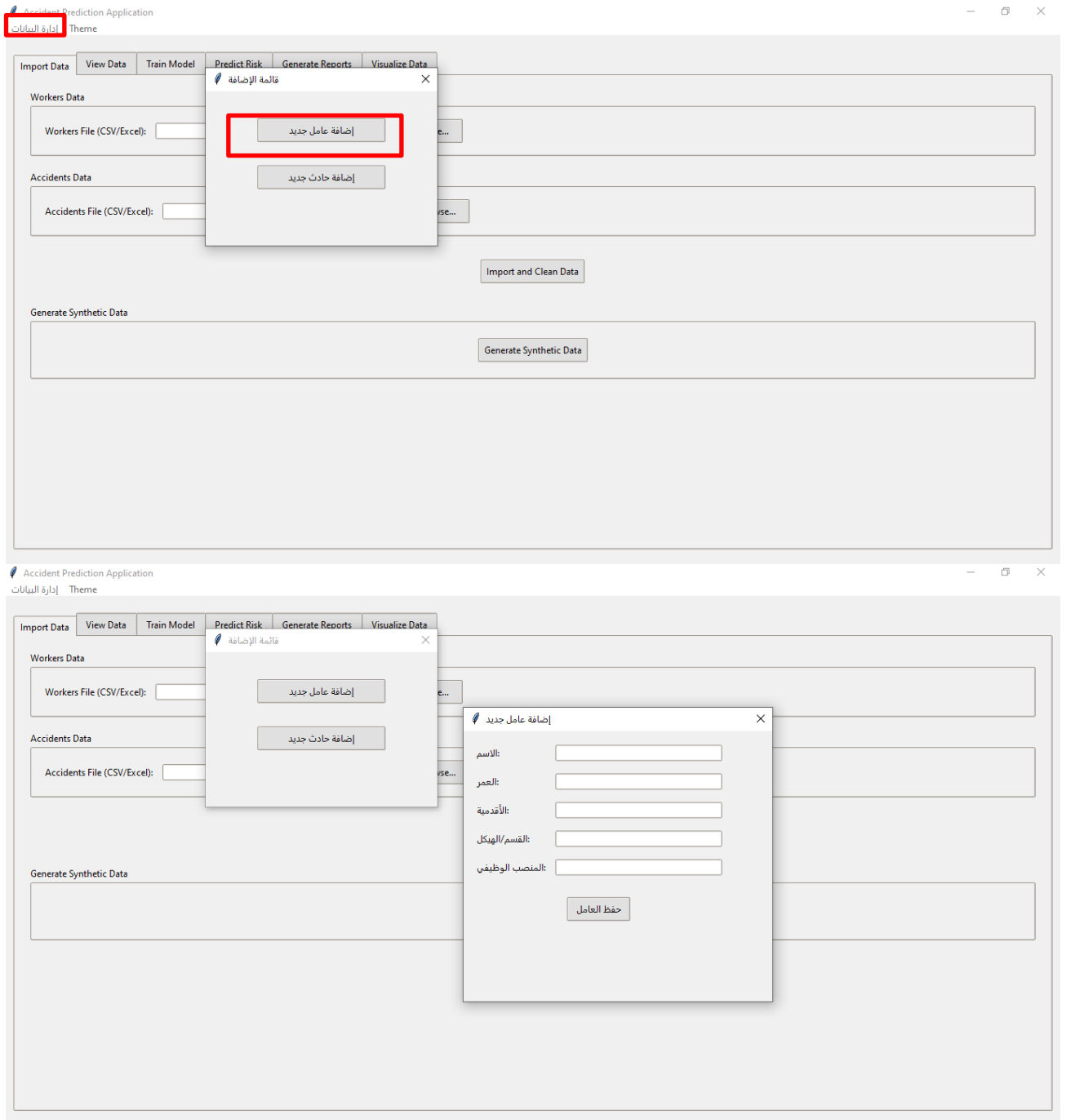
Workers Data Accidents Data Merged Data (for Training)

accident_id	worker_id	date	hour	injury_location	injury_type	accident_cause	handling_zone	location	accident_type	severity	created_at	month	day
1	17	2024-03-20 0	12	Leg	Cut	Equipment failure	Bureau	Zone C	Type 4	1	2025-06-13 20:55:05	3	20
2	67	2024-08-08 0	12	Leg	Burn	Equipment failure	Entrepôt	Zone B	Type 3	0	2025-06-13 20:55:05	8	8
3	9	2024-02-12 0	15	Head	Burn	Weather	Bureau	Zone A	Type 2	2	2025-06-13 20:55:05	2	12
4	63	2024-04-21 0	8	Foot	Bruise	Equipment failure	Extérieur	Zone B	Type 4	0	2025-06-13 20:55:05	4	21
5	21	2024-02-27 0	7	Head	Bruise	Human error	Extérieur	Zone D	Type 4	0	2025-06-13 20:55:05	2	27
6	8	2024-10-01 0	4	Arm	Bruise	Fall	Extérieur	Zone A	Type 1	1	2025-06-13 20:55:05	10	1
7	89	2024-10-18 0	8	Back	Bruise	Weather	Extérieur	Zone E	Type 2	1	2025-06-13 20:55:05	10	18
8	23	2024-11-20 0	6	Hand	Burn	Human error	Entrepôt	Zone A	Type 4	1	2025-06-13 20:55:05	11	20
9	65	2024-04-19 0	15	Arm	Sprain	Fall	Atelier	Zone D	Type 3	0	2025-06-13 20:55:05	4	19
10	39	2024-06-26 0	5	Hand	Fracture	Weather	Extérieur	Zone B	Type 4	0	2025-06-13 20:55:05	6	26
11	50	2024-10-17 0	9	Arm	Sprain	Human error	Bureau	Zone C	Type 1	0	2025-06-13 20:55:05	10	17
12	14	2024-02-10 0	12	Leg	Bruise	Equipment failure	Bureau	Zone A	Type 4	2	2025-06-13 20:55:05	2	10
13	32	2024-06-15 0	7	Leg	Sprain	Human error	Quai	Zone B	Type 2	0	2025-06-13 20:55:05	6	15
14	3	2024-06-02 0	20	Head	Sprain	Human error	Quai	Zone C	Type 3	0	2025-06-13 20:55:05	6	2
15	75	2024-12-08 0	17	Foot	Cut	Collision	Extérieur	Zone B	Type 3	1	2025-06-13 20:55:05	12	8
16	18	2024-01-14 0	18	Leg	Cut	Human error	Quai	Zone C	Type 4	1	2025-06-13 20:55:05	1	14
17	99	2024-01-04 0	12	Foot	Sprain	Fall	Entrepôt	Zone C	Type 5	1	2025-06-13 20:55:05	1	4
18	56	2024-05-11 0	10	Leg	Bruise	Weather	Entrepôt	Zone E	Type 4	0	2025-06-13 20:55:05	5	11
19	79	2024-09-14 0	23	Hand	Burn	Collision	Bureau	Zone E	Type 1	0	2025-06-13 20:55:05	9	14
20	65	2024-12-01 0	0	Head	Burn	Weather	Bureau	Zone C	Type 2	0	2025-06-13 20:55:05	12	1
21	56	2024-08-20 0	10	Hand	Burn	Human error	Bureau	Zone E	Type 5	0	2025-06-13 20:55:05	8	20
22	78	2024-09-10 0	1	Hand	Bruise	Collision	Entrepôt	Zone C	Type 4	0	2025-06-13 20:55:05	9	10
23	42	2024-05-09 0	21	Head	Sprain	Collision	Bureau	Zone B	Type 5	2	2025-06-13 20:55:05	5	9
24	43	2024-01-10 0	13	Arm	Bruise	Collision	Atelier	Zone A	Type 5	0	2025-06-13 20:55:05	1	10

Figures III.5: Visualisation des données importées

5.2.3 Ajout de nouveaux travailleurs

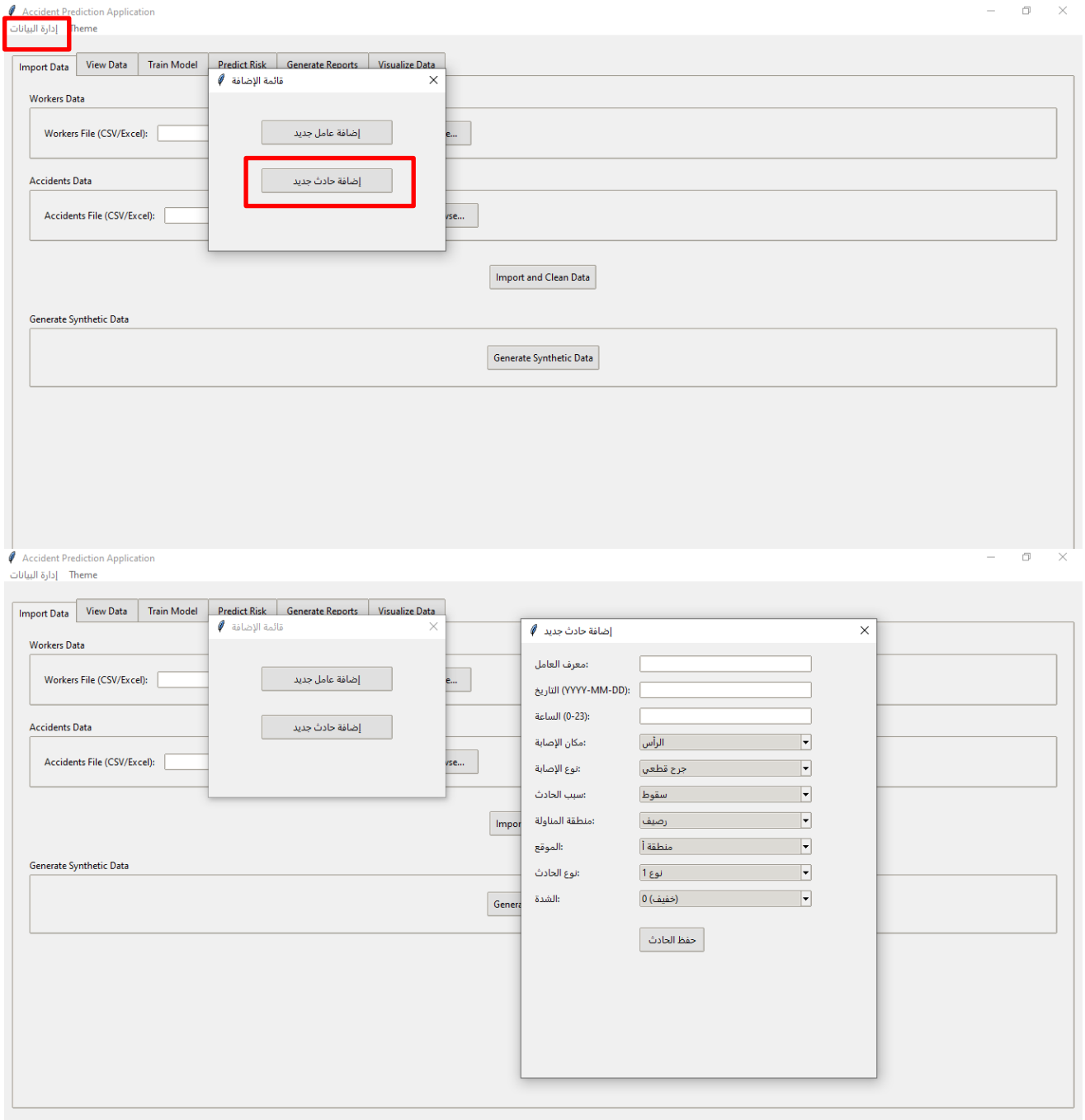
L'application permet d'ajouter de nouveaux travailleurs à la base de données via une interface dédiée.



Figures III.6: Ajout de nouveaux travailleurs

5.2.4 Enregistrement de nouveaux accidents

De même, de nouveaux accidents peuvent être enregistrés via une interface spécifique.



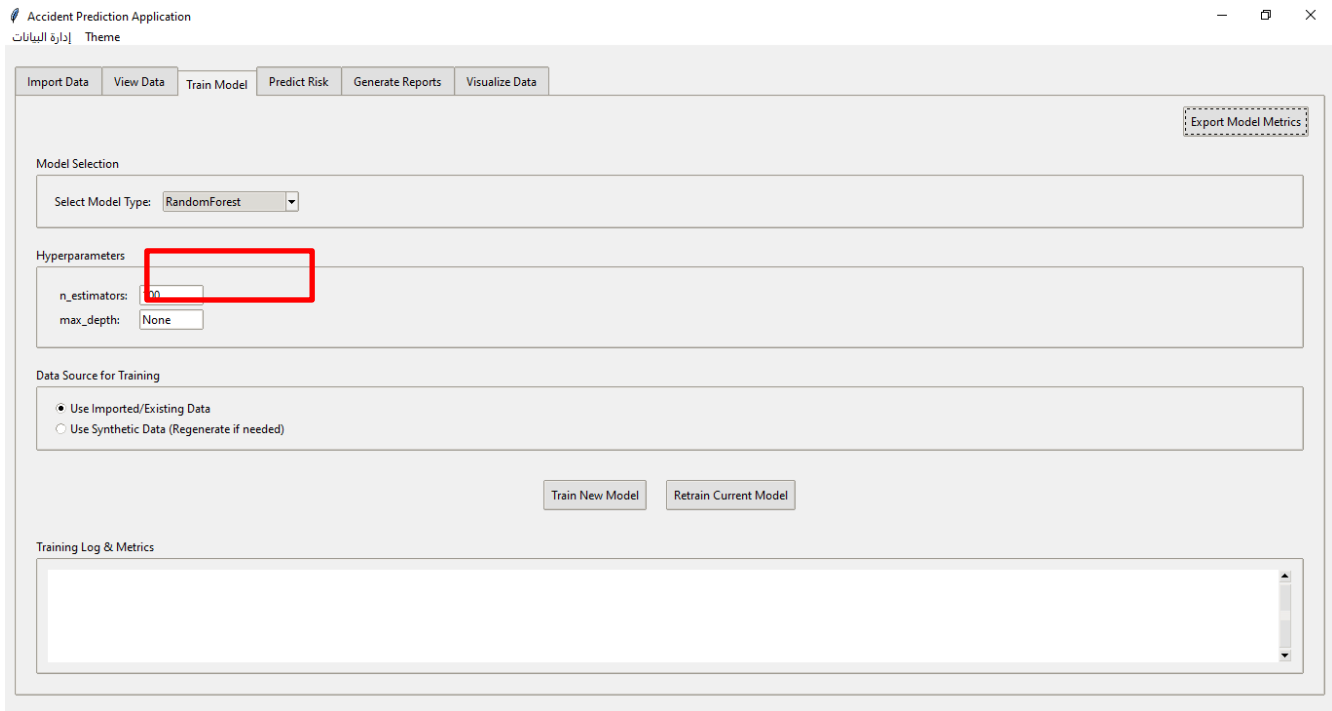
Figures III.7: Enregistrement de nouveaux accidents

5.3. Entraînement et configuration des modèles

Cette section illustre le processus d'entraînement des différents modèles d'apprentissage automatique disponibles dans l'application.

5.3.1 Sélection et configuration du modèle Random Forest

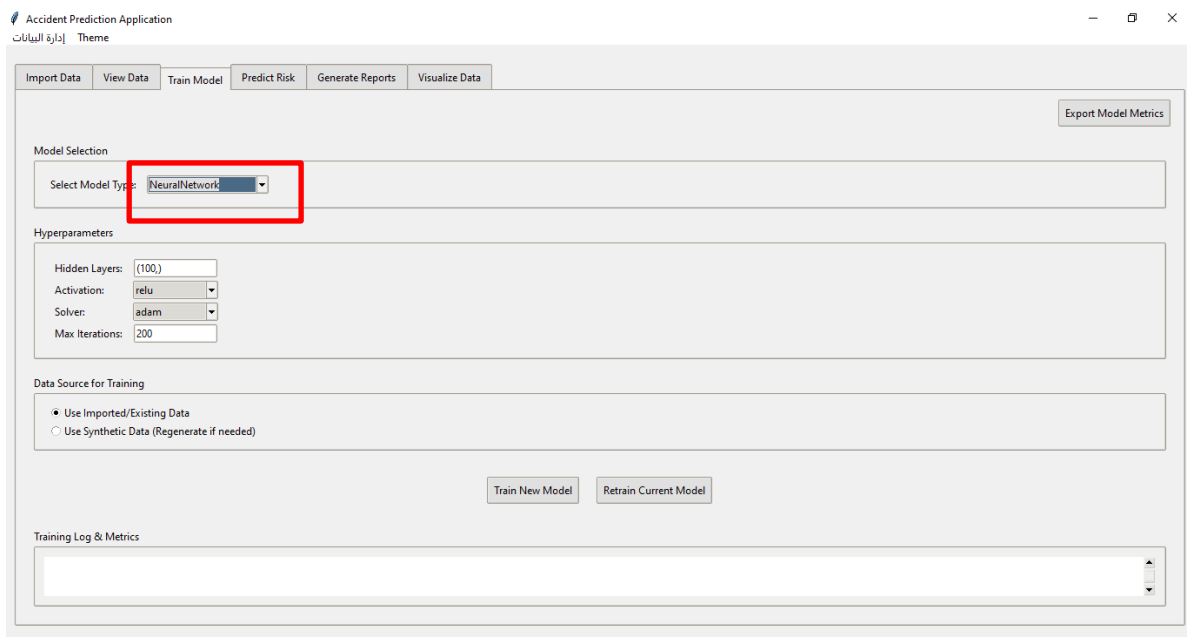
L'interface permet de configurer en détail les hyperparamètres du modèle Random Forest.



Figures III.8: Sélection et configuration du modèle Random Forest

5.3.2 Sélection et configuration du modèle SVM

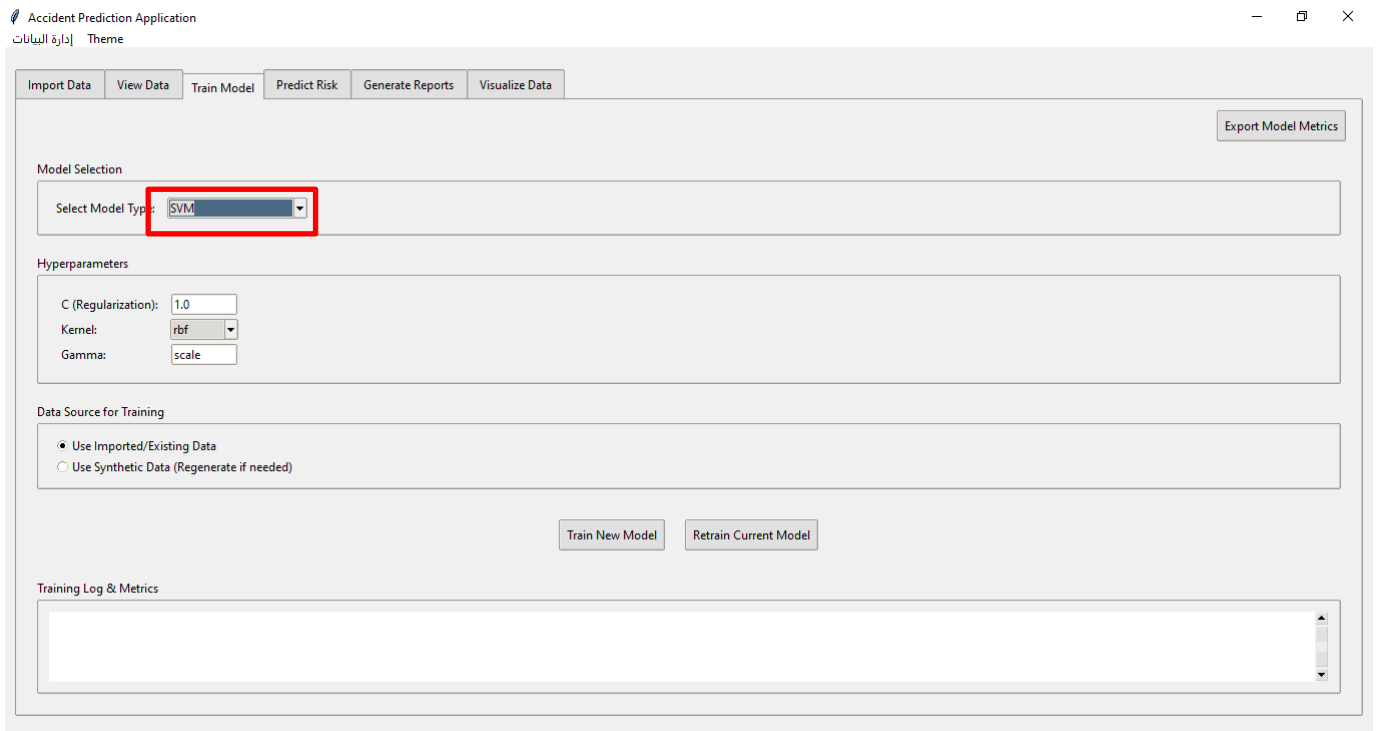
De même, l'utilisateur peut configurer les hyperparamètres spécifiques au modèle SVM



Figures III.9: Sélection et configuration du modèle SVM

5.3.3 Sélection et configuration du modèle Neural Network

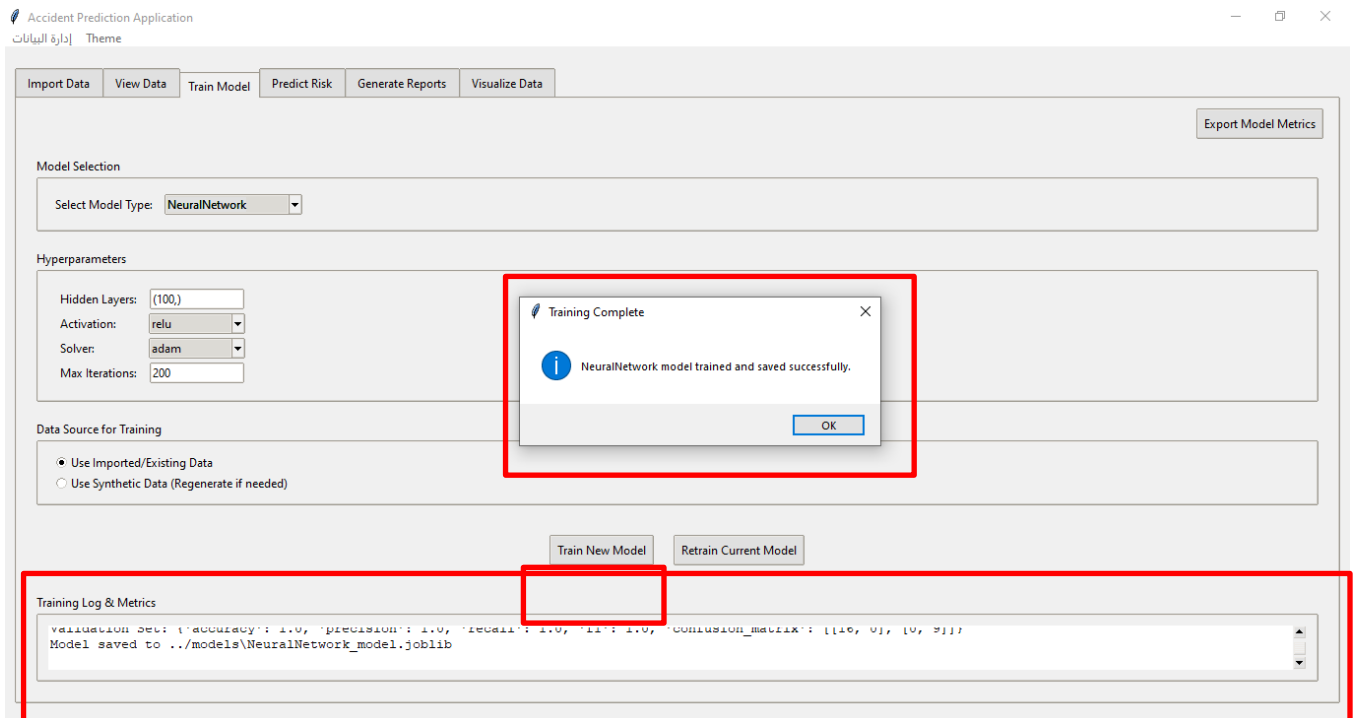
L'interface permet également de configurer l'architecture et les hyperparamètres des réseaux de neurones.



Figures III.10: Sélection et configuration du modèle Neural Network

5.3.4 Processus d'entraînement et logs

Pendant l'entraînement, l'application affiche des logs détaillés et une barre de progression.



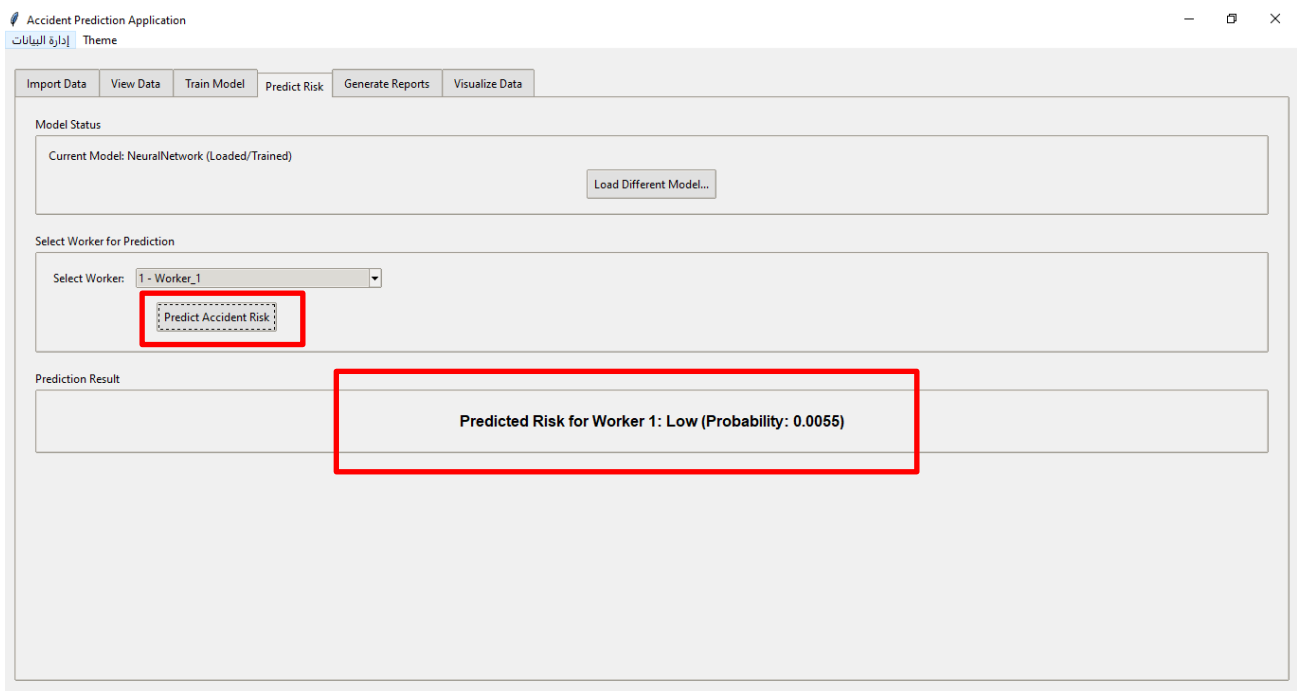
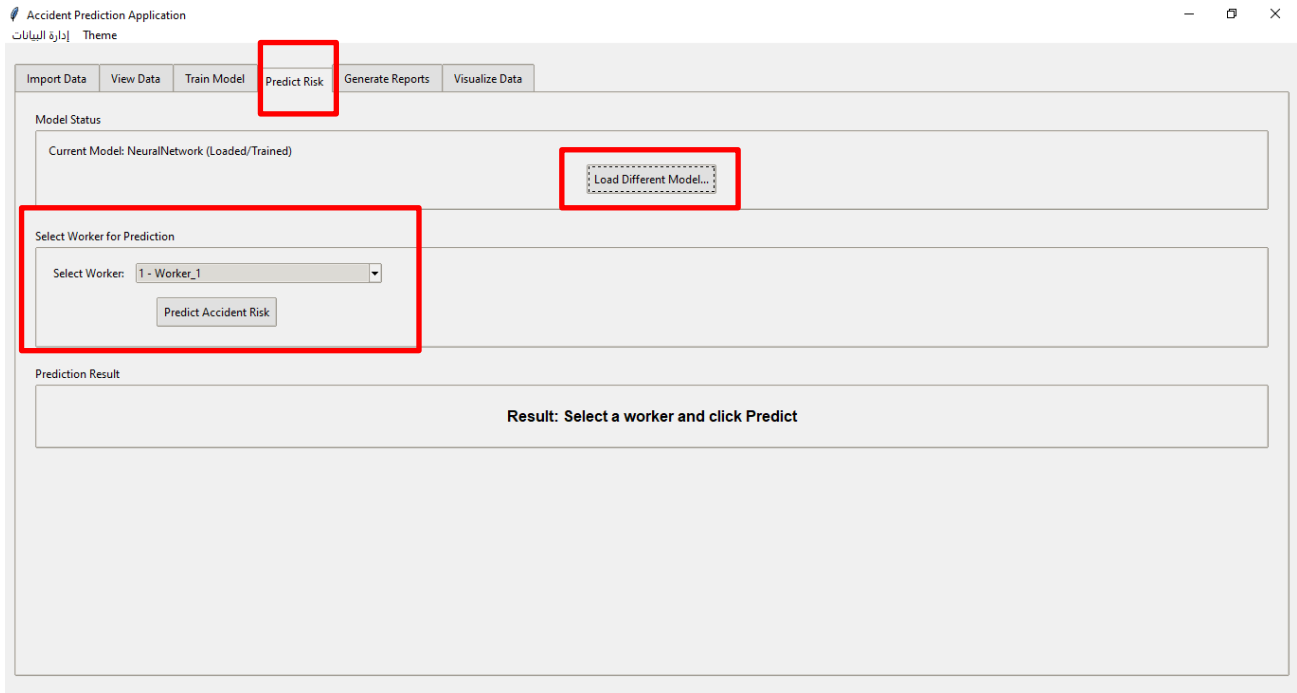
Figures III.11: Processus d'entraînement et logs

5.4. Prédiction des risques d'accidents

Cette section illustre comment l'application peut être utilisée pour prédire le risque d'accident pour des travailleurs spécifiques.

5.4.1 Sélection d'un travailleur existant

L'utilisateur peut sélectionner un travailleur existant dans la base de données pour évaluer son risque d'accident.



Figures III.12: Sélection d'un travailleur existant

5.4.2 Analyse de sensibilité interactive

L'application permet d'explorer interactivement comment les changements dans les caractéristiques d'un travailleur affectent son risque prédit.

Accident Prediction Application
إدارة البيانات Theme

Import Data View Data Train Model Predict Risk Generate Reports Visualize Data

Workers Data Accidents Data Merged Data (for Training)

worker_id	name	age	seniority	structure	job_position	created_at
1	Worker_1	43	3	DMC	Superviseur	6/13/2025 17:52
2	Worker_2	48	10	DMA	Superviseur	6/13/2025 17:52
3	Worker_3	52	15	DMC	Technicien	6/13/2025 17:52
4	Worker_4	54	13	DMT	Ouvrier	6/13/2025 17:52
5	Worker_5	40	10	DMC	Technicien	6/13/2025 17:52
6	Worker_6	26	2	DMA	Ouvrier	6/13/2025 17:52
7	Worker_7	49	10	DMA	Technicien	6/13/2025 17:52
8	Worker_8	58	20	DMI	Technicien	6/13/2025 17:52
9	Worker_9	22	1	DMA	Superviseur	6/13/2025 17:52
10	Worker_10	45	5	DMI	Manager	6/13/2025 17:52
11	Worker_11	24	1	DMI	Manager	6/13/2025 17:52
12	Worker_12	43	6	DMI	Ingénieur	6/13/2025 17:52
13	Worker_13	49	9	DMC	Technicien	6/13/2025 17:52
14	Worker_14	20	0	DMT	Manager	6/13/2025 17:52
15	Worker_15	33	3	DME	Technicien	6/13/2025 17:52
16	Worker_16	33	4	DME	Superviseur	6/13/2025 17:52
17	Worker_17	20	0	DMT	Technicien	6/13/2025 17:52
18	Worker_18	34	2	DMI	Superviseur	6/13/2025 17:52
19	Worker_19	35	3	DMA	Technicien	6/13/2025 17:52
20	Worker_20	42	4	DMA	Technicien	6/13/2025 17:52
21	Worker_21	51	15	DMC	Manager	6/13/2025 17:52
22	Worker_22	24	3	DMT	Superviseur	6/13/2025 17:52
23	Worker_23	49	20	DME	Technicien	6/13/2025 17:52
24	Worker_24	27	1	DMT	Ingénieur	6/13/2025 17:52

Accident Prediction Application
إدارة البيانات Theme

Import Data View Data Train Model Predict Risk Generate Reports Visualize Data

Model Status

Current Model: NeuralNetwork (Loaded/Trained)

Load Different Model...

Select Worker for Prediction

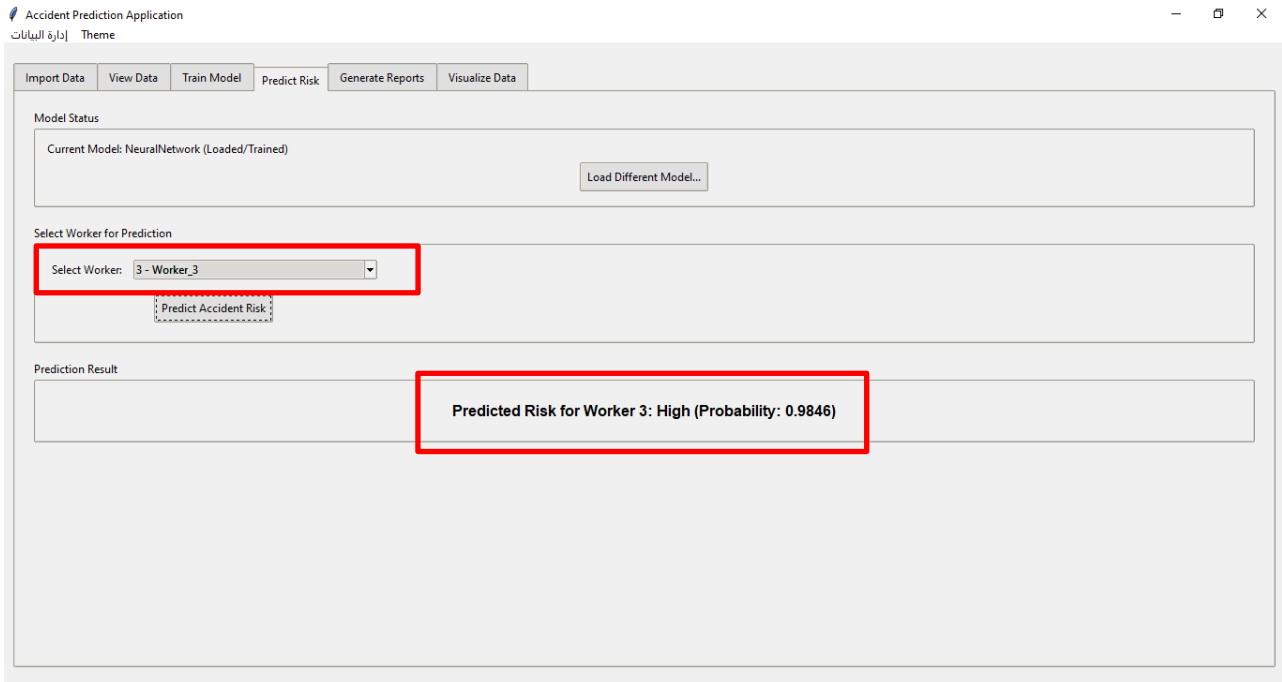
Select Worker: 2 - Worker_2

Predict Accident Risk

Prediction Result

Predicted Risk for Worker 2: Low (Probability: 0.0040)

Figures III.13: Analyse de sensibilité interactive

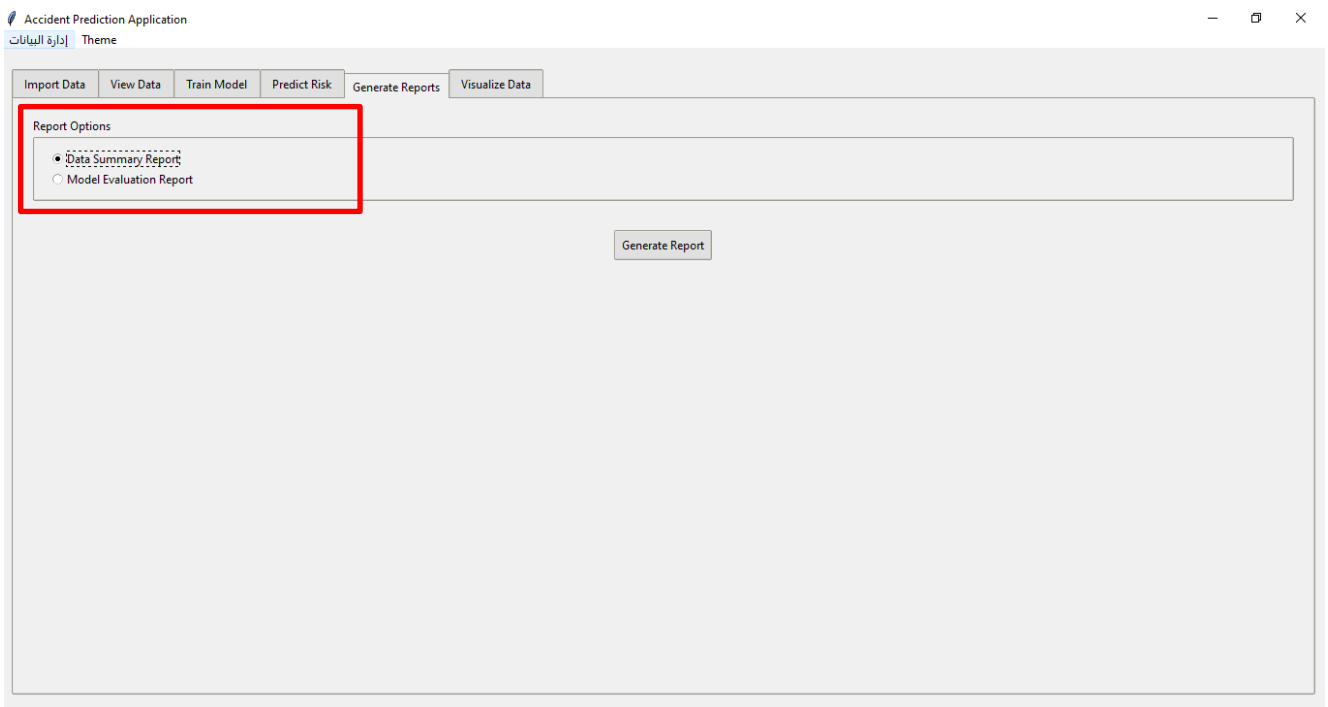


5.5. Génération de rapports et visualisations

Cette section présente les fonctionnalités de reporting et de visualisation avancée de l'application.

5.5.1 Types de rapports disponibles

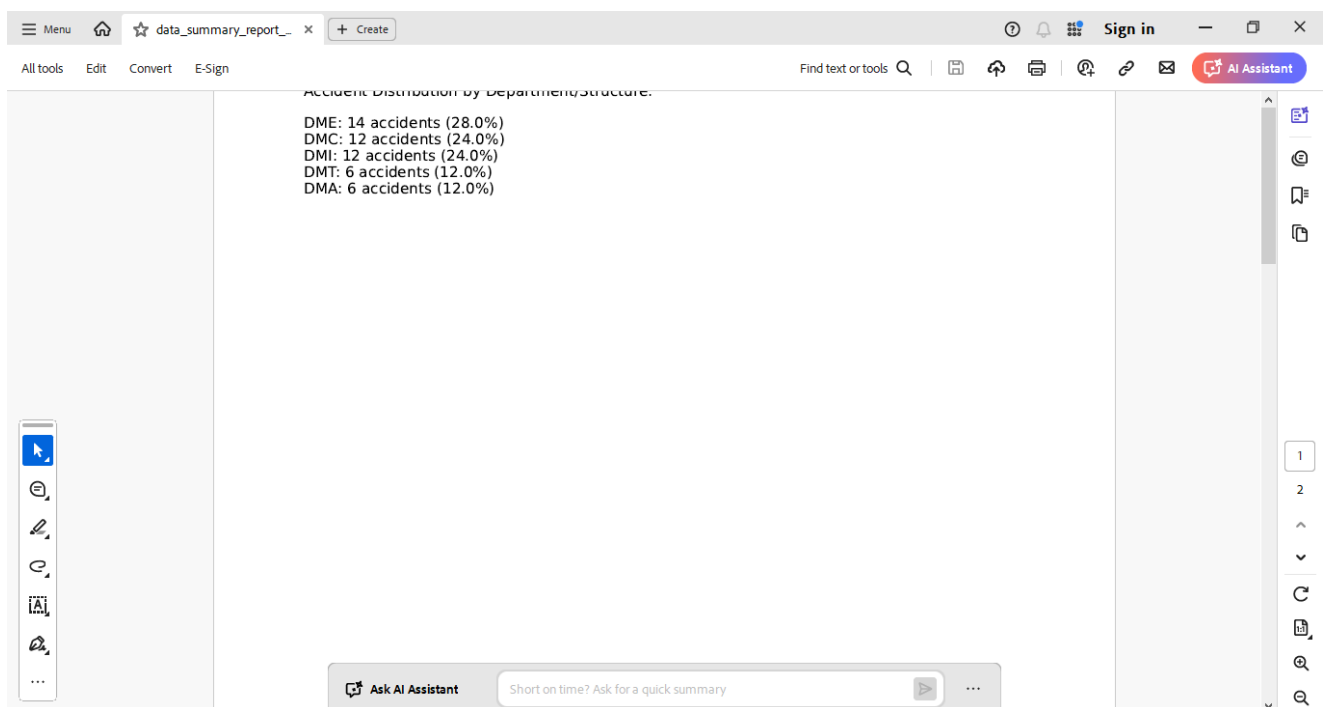
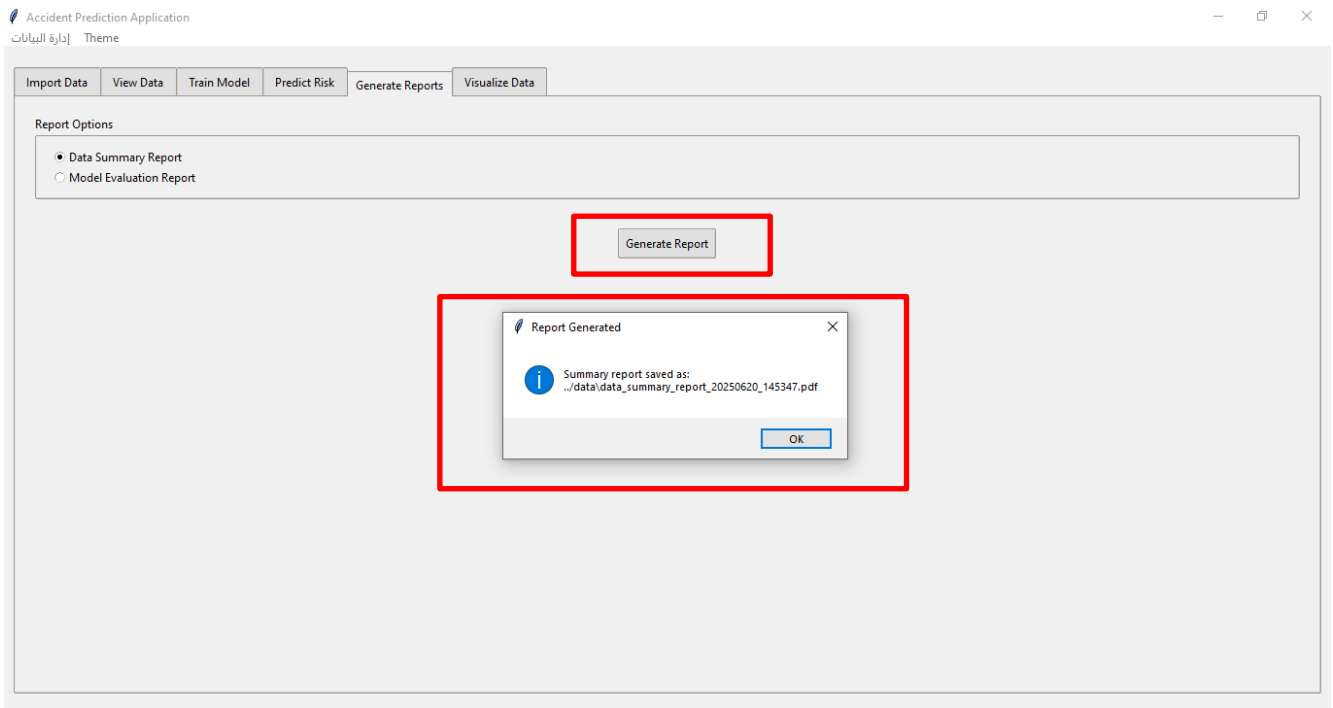
L'application offre plusieurs types de rapports prédéfinis pour différentes analyses.



Figures III.14: Types de rapports disponibles

5.5.2 Exemple de rapport statistique

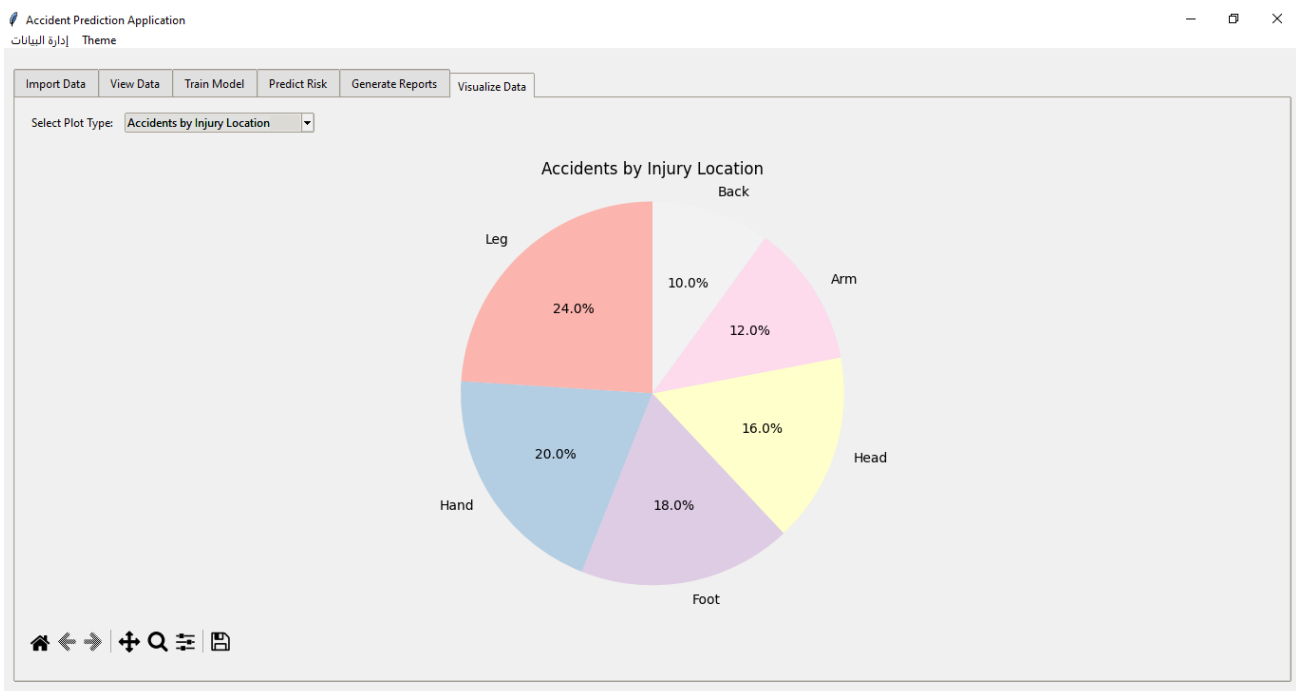
Un exemple de rapport statistique généré par l'application.



Figures III.15: Exemple de rapport statistique

5.5.3 Visualisations interactives

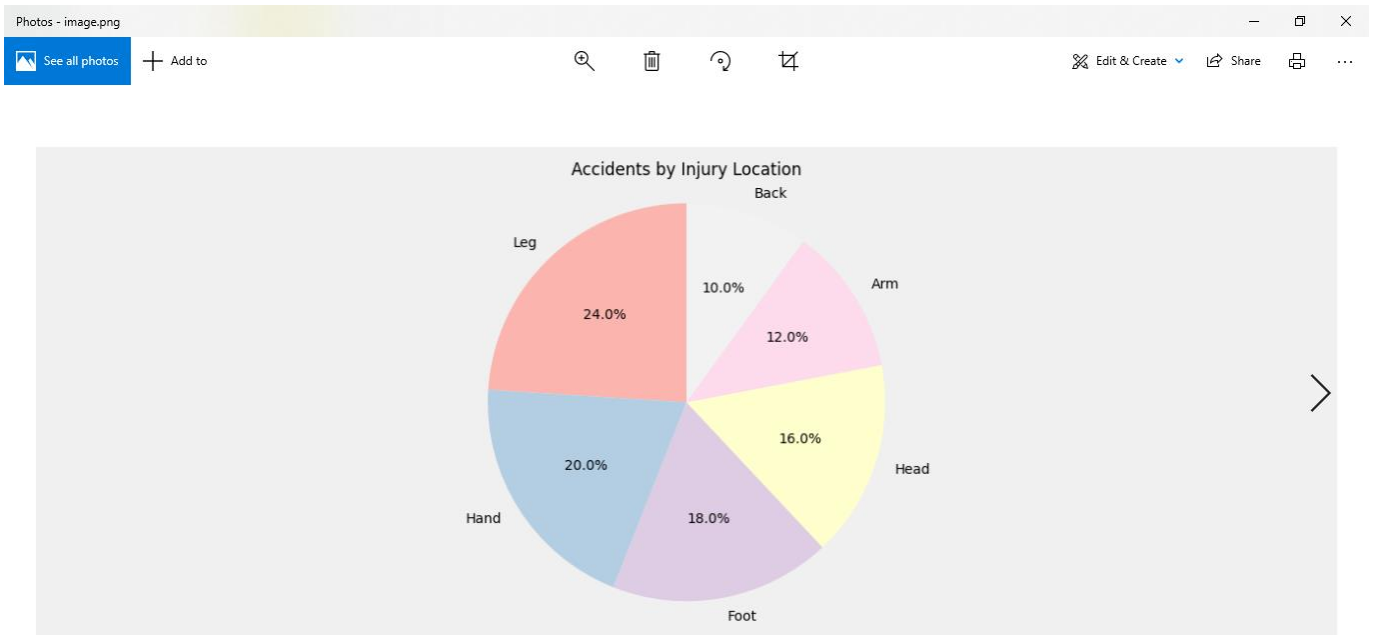
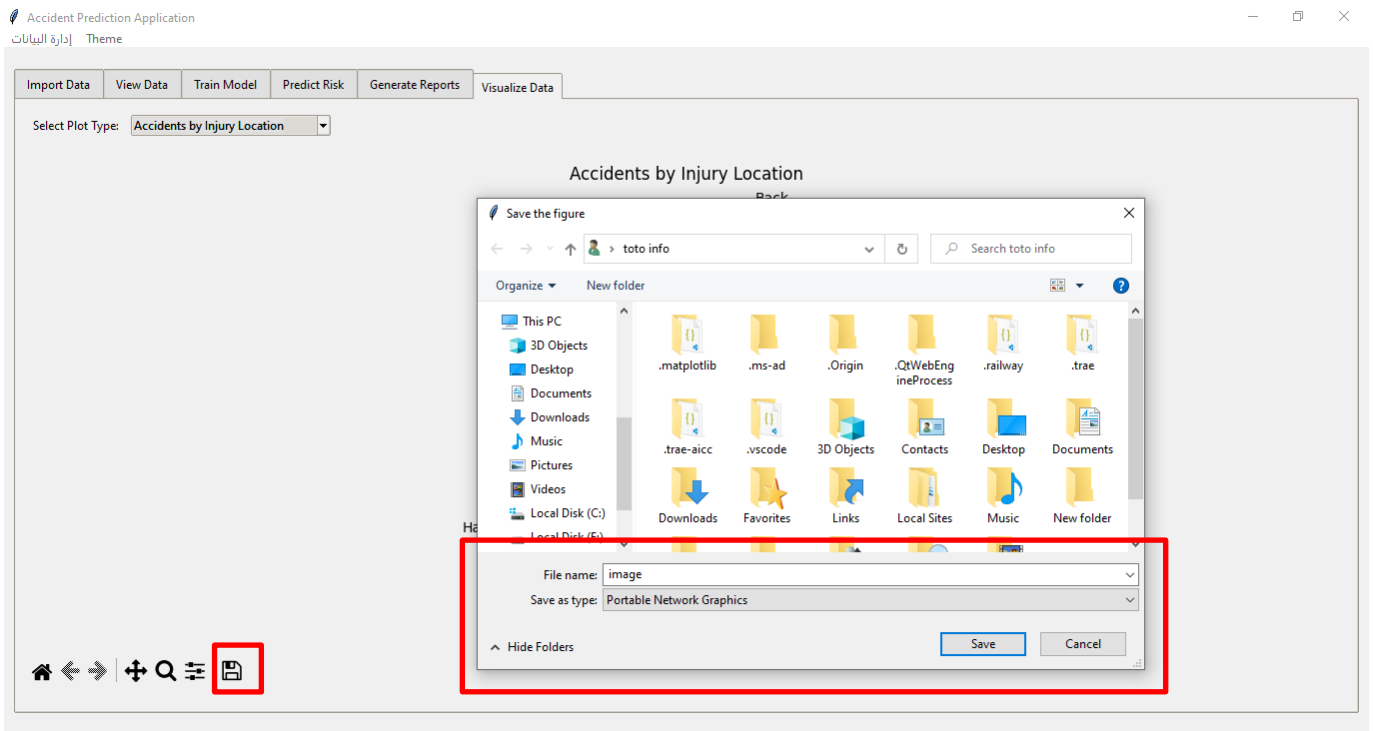
L'application offre diverses visualisations interactives pour explorer les données et les résultats des modèles.



Figures III.16: Visualisations interactives

5.5.4 Exportation des rapports et visualisations

L'application permet d'exporter les rapports et visualisations dans différents formats.



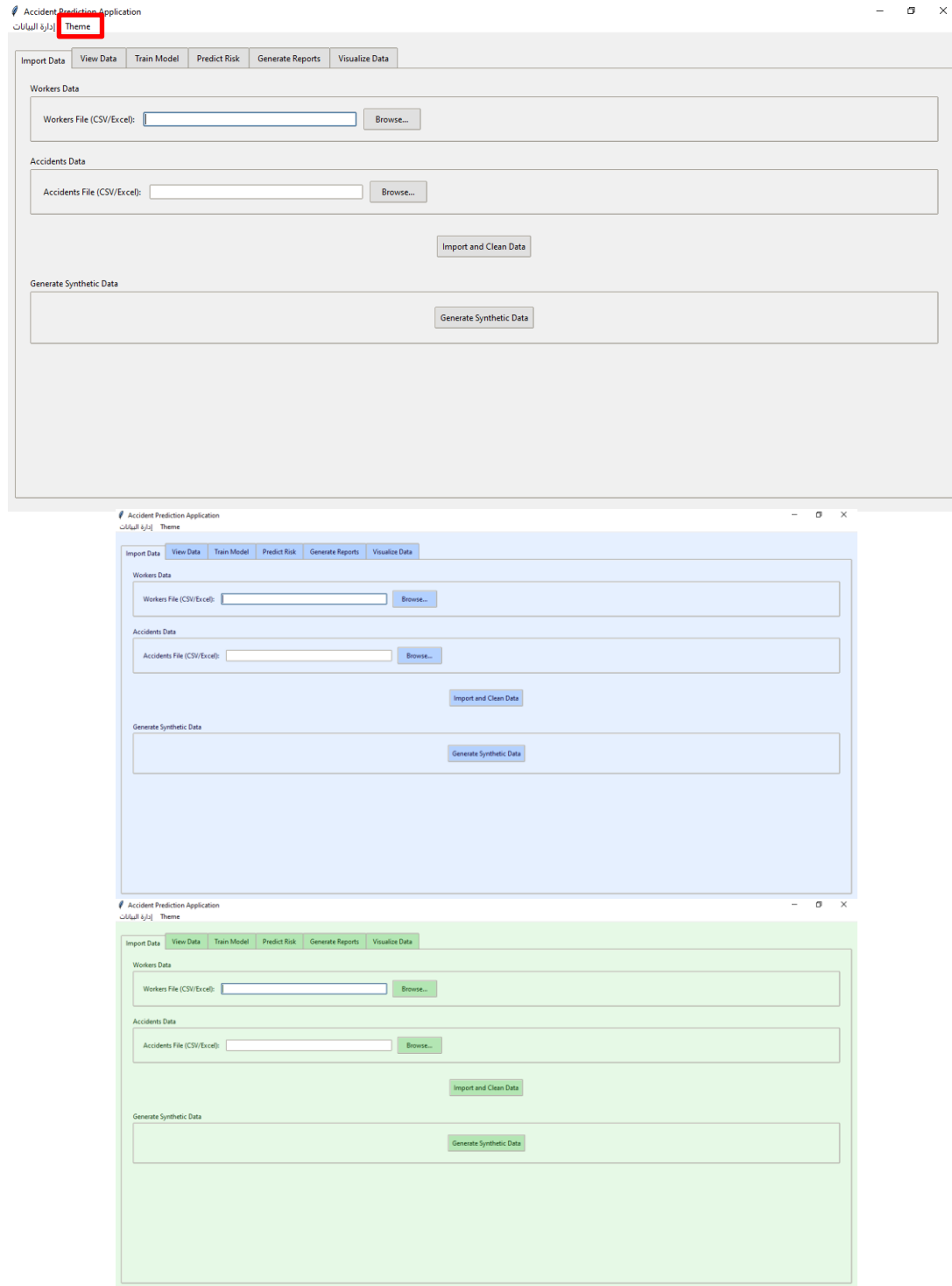
Figures III.17: Exportation des rapports et visualisations

5.6. Personnalisation et paramètres

Cette section présente les options de personnalisation et de configuration de l'application.

5.6.1 Sélection du thème

L'application offre plusieurs thèmes visuels pour s'adapter aux préférences de l'utilisateur.



Figures III.18: Sélection du thème

5.6.2 Journal des opérations

L'application maintient un journal détaillé des opérations effectuées.

```
C:\Windows\System32\cmd.exe - python main.py
Evaluating on validation data...
Validation Metrics: {'accuracy': 1.0, 'precision': 1.0, 'recall': 1.0, 'f1': 1.0, 'confusion_matrix': [[16, 0], [0, 9]]}
NeuralNetwork model saved to ../models\NeuralNetwork_model.joblib
Status [14:38:43]: NeuralNetwork model trained and saved successfully.
Status [14:38:44]: Generating plot: Worker Age Distribution...
Status [14:38:44]: Displayed plot: Worker Age Distribution
Status [14:38:52]: Preparing data for NeuralNetwork training...
Built Neural Network (MLP) model with parameters: hidden_layers=(100,), activation=relu, solver=adam, max_iter=200
Status [14:38:52]: Training NeuralNetwork model...
Training Neural Network model...
Training complete.
Evaluating on training data...
Training Metrics: {'accuracy': 1.0, 'precision': 1.0, 'recall': 1.0, 'f1': 1.0, 'confusion_matrix': [[46, 0], [0, 29]]}
Evaluating on validation data...
Validation Metrics: {'accuracy': 1.0, 'precision': 1.0, 'recall': 1.0, 'f1': 1.0, 'confusion_matrix': [[16, 0], [0, 9]]}
NeuralNetwork model saved to ../models\NeuralNetwork_model.joblib
Status [14:38:52]: NeuralNetwork model trained and saved successfully.
Status [14:41:59]: Generating plot: Worker Age Distribution...
Status [14:42:00]: Displayed plot: Worker Age Distribution
Status [14:43:07]: Predicting risk for worker ID: 1 using NeuralNetwork...
Status [14:43:07]: Prediction successful for worker 1. Risk: Low (0.0055)
Status [14:46:26]: Predicting risk for worker ID: 2 using NeuralNetwork...
Status [14:46:26]: Prediction successful for worker 2. Risk: Low (0.0040)
Status [14:48:29]: Predicting risk for worker ID: 3 using NeuralNetwork...
Status [14:48:29]: Prediction successful for worker 3. Risk: High (0.9846)
Status [14:53:02]: Generating summary report...
Error exporting report to PDF: No module named 'fpdf2'
Traceback (most recent call last):
  File "E:\memoire M2\version5_with_metrics_export_final_corrected_arabic_fix_v2\home\ubuntu\project_temp\src\reporting.py", line 702, in export_report_to_pdf
    from fpdf2 import FPDF
ModuleNotFoundError: No module named 'fpdf2'
Status [14:53:03]: Summary report generated successfully: ../data\data_summary_report_20250620_145302.pdf
Status [14:53:47]: Generating summary report...
Error exporting report to PDF: No module named 'fpdf2'
Traceback (most recent call last):
  File "E:\memoire M2\version5_with_metrics_export_final_corrected_arabic_fix_v2\home\ubuntu\project_temp\src\reporting.py", line 702, in export_report_to_pdf
    from fpdf2 import FPDF
ModuleNotFoundError: No module named 'fpdf2'
Status [14:53:47]: Summary report generated successfully: ../data\data_summary_report_20250620_145347.pdf
Status [14:56:19]: Generating plot: Accidents by Injury Location...
Status [14:56:19]: Displayed plot: Accidents by Injury Location
```

Figures III.19: Journal des opérations

6. Conception des modèles d'apprentissage automatique

Après avoir préparé les données et développé l'infrastructure applicative, l'étape suivante consiste à concevoir et implémenter les modèles d'apprentissage automatique qui serviront à prédire les risques d'accidents professionnels. Cette section présente en détail les trois approches de modélisation implémentées dans notre application : **les forêts aléatoires (Random Forest)**, **les machines à vecteurs de support (SVM)** et **les réseaux de neurones artificiels (RNA)**. Pour chaque approche, nous explorerons les fondements théoriques, les hyperparamètres configurables, leur implémentation dans l'application, ainsi que leurs avantages et limites spécifiques dans le contexte de la prédiction des accidents professionnels.

6.1. Random Forest

L'efficacité d'un modèle de forêt aléatoire dépend en grande partie de la configuration de ses hyperparamètres. Dans notre application, plusieurs hyperparamètres clés sont exposés à l'utilisateur pour permettre une optimisation adaptée au problème spécifique de la prédiction des accidents professionnels montré dans le tableau III.6

Tableau III.6: Paramètre de Random Forest

Paramètre	Utilité	Commande
Nombre d'arbres (n_estimators)	Ce paramètre détermine le nombre d'arbres de décision à construire dans la forêt. Un nombre plus élevé d'arbres améliore généralement la performance du modèle	la plage recommandée est de 100 à 500 arbres, avec une valeur par défaut de 200.
Profondeur maximale (max_depth)	paramètre limite la profondeur maximale de chaque arbre. Des arbres plus profonds peuvent capturer des relations plus complexes dans les données, mais risquent davantage de surapprentissage	des valeurs entre 5 et 20 sont généralement appropriées, avec une valeur par défaut de 10.
Nombre minimal d'échantillons pour la division (min_samples_split)	Ce paramètre spécifie le nombre minimal d'échantillons requis pour diviser un nœud interne. Des valeurs plus élevées préviennent la création de partitions trop spécifiques qui pourraient conduire au surapprentissage.	La valeur par défaut dans notre application est de 2, mais des valeurs entre 5 et 10 peuvent être plus appropriées pour des ensembles de données bruitées.
Nombre minimal d'échantillons par feuille (min_samples_leaf)	Ce paramètre définit le nombre minimal d'échantillons requis pour être à un nœud feuille. Il a un effet similaire à min_samples_split, mais s'applique spécifiquement aux feuilles.	Une valeur par défaut de 1 est utilisée, mais des valeurs plus élevées peuvent être nécessaires pour des données déséquilibrées comme les nôtres, où les accidents sont généralement des événements rares.
Nombre maximal de caractéristiques (max_features)**	Ce paramètre détermine le nombre de caractéristiques à considérer lors de la recherche de la meilleure division. Il peut être spécifié comme). La valeur par défaut dans notre application est "sqrt", qui est généralement

	un nombre entier, une fraction du nombre total de caractéristiques, ou en utilisant des formules prédéfinies comme "sqrt" (racine carrée du nombre total de caractéristiques) ou "log2" (logarithme base 2 du nombre total de caractéristiques).	efficace pour les problèmes de classification.
Critère de division (criterion)	Ce paramètre définit la fonction utilisée pour mesurer la qualité d'une division. Pour les problèmes de classification, les options sont "gini" pour l'impureté de Gini et "entropy" pour le gain d'information.	La valeur par défaut est "gini", mais les deux options donnent généralement des résultats similaires.

6.2. SVM (Support Vector Machine)

L'application offre une interface dédiée pour configurer ces hyperparamètres, accessible dans l'onglet "Train Model" lorsque le type de modèle "SVM" est sélectionné. Cette interface comprend :

- Un sélecteur de type de noyau avec des descriptions pour chaque option
- Des curseurs logarithmiques pour les paramètres C et gamma, permettant d'explorer efficacement différents ordres de grandeur
- Des champs numériques pour les paramètres spécifiques comme degree et coef0, qui apparaissent dynamiquement selon le type de noyau sélectionné
- Des options pour la gestion des classes déséquilibrées
- Des infobulles détaillées expliquant l'impact de chaque paramètre sur le modèle
- Un bouton "Reset to Defaults" pour revenir rapidement aux valeurs recommandées

Cette interface intuitive permet aux utilisateurs d'expérimenter différentes configurations tout en comprenant leur signification et leur impact potentiel sur les performances du modèle.

6.3. Réseau de Neurones Artificiels (RNA)

6.3.1 Architecture des réseaux de neurones multicouches

La conception et l'entraînement efficaces d'un réseau de neurones nécessitent la configuration de nombreux hyperparamètres. Dans notre application, les principaux hyperparamètres exposés à l'utilisateur sont :

A. Architecture du réseau :

Dans notre interface, l'utilisateur peut spécifier une liste de tailles (par exemple, "64, 32" pour deux couches cachées de 64 et 32 neurones respectivement). La configuration par défaut est "100, 50", représentant un réseau à deux couches cachées.

Nombre de couches cachées : Déterminé implicitement par la longueur de la liste des tailles.

B- Fonctions d'activation :

- **ReLU (Rectified Linear Unit)**: $f(x) = \max(0, x)$. C'est la fonction d'activation par défaut, efficace pour l'apprentissage profond car elle ne souffre pas du problème de disparition du gradient.

- **Tanh (Tangente hyperbolique)** : $f(x) = \tanh(x)$. Produit des sorties dans l'intervalle $[-1, 1]$ et peut être préférable pour certains types de données.

- **Logistique (Sigmoid)** : $f(x) = 1/(1+e^{-x})$. Produit des sorties dans l'intervalle $[0, 1]$, historiquement populaire mais moins utilisée aujourd'hui pour les couches cachées en raison du problème de disparition du gradient.

C- Algorithmes d'optimisation

- **Adam (Adaptive Moment Estimation)** : Algorithme d'optimisation qui adapte les taux d'apprentissage pour chaque paramètre. C'est l'option par défaut, généralement efficace pour une large gamme de problèmes.

- **SGD (Stochastic Gradient Descent)** : Méthode classique de descente de gradient stochastique, potentiellement avec momentum pour accélérer la convergence.

- **LBFGS (Limited-memory Broyden–Fletcher–Goldfarb–Shanno)** : Méthode quasi-newtonienne, souvent plus efficace pour les petits ensembles de données.

D- Paramètres d'apprentissage :

- **Taux d'apprentissage (learning_rate):** Contrôle la taille des pas lors de la descente de gradient. Peut-être 'constant', 'adaptive', ou 'invscaling'. La valeur par défaut est 'adaptive', qui réduit le taux si la perte n'améliore pas.

- **Taux d'apprentissage initial (learning_rate_init) :** Valeur initiale du taux d'apprentissage. La valeur par défaut est 0.001.

- **Nombre maximal d'itérations (max_iter):** Nombre maximal d'époques (passages complets sur l'ensemble d'entraînement). La valeur par défaut est 200.

- **Taille des mini-batches (batch_size):** Nombre d'échantillons utilisés pour chaque mise à jour des poids. La valeur 'auto' utilise le minimum entre 200 et le nombre d'échantillons.

7. Continual learning et mise à jour des modèles

Une caractéristique avancée de notre application est sa capacité à supporter l'apprentissage continu (continual learning), permettant aux modèles d'évoluer et de s'améliorer au fur et à mesure que de nouvelles données deviennent disponibles. Cette fonctionnalité est particulièrement pertinente dans le contexte de la sécurité au travail, où de nouveaux incidents sont enregistrés régulièrement.

7.1 L'apprentissage continu

L'apprentissage continu est implémenté de plusieurs manières :

1. ****Mise à jour incrémentale**** : Pour certains algorithmes qui supportent l'apprentissage incrémental (comme certaines implémentations de Random Forest), le modèle peut être mis à jour directement avec de nouvelles données sans réentraînement complet.
2. ****Réentraînement périodique**** : L'application facilite le réentraînement périodique des modèles en conservant les hyperparamètres optimaux et en incorporant automatiquement les nouvelles données.
3. ****Transfert d'apprentissage**** : Pour les modèles qui ne supportent pas nativement l'apprentissage incrémental (comme les SVM standards), l'application utilise des techniques de transfert d'apprentissage pour initialiser un nouveau modèle avec les connaissances du modèle précédent.

4. ****Validation continue**** : Les performances du modèle sont continuellement surveillées, et des alertes sont générées si une dégradation significative est détectée, suggérant qu'un réentraînement pourrait être nécessaire.

Cette approche d'apprentissage continu garantit que les modèles restent pertinents et précis même lorsque les conditions ou les patterns d'accidents évoluent au fil du temps.

7.2. Résultats comparatifs des trois approches

L'application génère automatiquement un rapport comparatif détaillé lorsque plusieurs modèles ont été entraînés. Ce rapport inclut :

1. ****Tableau comparatif**** : Un tableau présentant côte à côte toutes les métriques principales pour chaque modèle.
2. ****Graphiques comparatifs**** : Des visualisations comme des diagrammes à barres pour les métriques clés et des courbes ROC superposées facilitent la comparaison visuelle.
3. ****Analyse des forces et faiblesses**** : Pour chaque modèle, une analyse détaillée identifie les types de cas où il excelle et ceux où il échoue.
4. ****Temps d'entraînement et d'inférence**** : Les aspects pratiques comme le temps nécessaire pour entraîner le modèle et pour effectuer des prédictions sont également comparés.
5. ****Utilisation des ressources**** : La consommation de mémoire et de CPU est mesurée pour chaque modèle, un facteur important pour le déploiement.

Cette comparaison complète permet à l'utilisateur de faire un choix éclairé basé non seulement sur les performances prédictives mais aussi sur des considérations pratiques.

7.3 Sélection du modèle optimal pour le cas d'étude

La sélection du modèle optimal pour la prédiction des accidents professionnels au port de Skikda dépend de plusieurs facteurs :

1. ****Priorités spécifiques**** : Selon le contexte, certaines métriques peuvent être plus importantes que d'autres. Par exemple, dans un environnement où la sécurité est primordiale, maximiser le recall (détecter tous les accidents potentiels) pourrait être prioritaire, même au prix de quelques fausses alertes.

2. ****Interprétabilité requise**** : Si la compréhension des facteurs de risque est aussi importante que la précision des prédictions, un modèle plus interprétable comme Random Forest pourrait être préféré à un réseau de neurones plus opaque.

3. ****Contraintes de ressources**** : Les limitations en termes de puissance de calcul ou de mémoire disponible peuvent influencer le choix, certains modèles étant plus légers que d'autres.

4. ****Évolutivité des données**** : Si les patterns d'accidents évoluent rapidement, la capacité d'un modèle à s'adapter via l'apprentissage continu devient un critère important.

Notre application facilite cette prise de décision en fournissant toutes les informations nécessaires et en permettant de pondérer ces différents facteurs selon les priorités spécifiques de l'utilisateur.

Dans le contexte spécifique du port de Skikda, nos expérimentations ont montré que chaque approche présente des avantages distincts :

- ****Random Forest**** excelle en termes d'équilibre entre performance prédictive et interprétabilité, fournissant des insights précieux sur les facteurs de risque.

- ****SVM**** avec noyau RBF offre généralement la meilleure performance pure en termes de F1-Score, particulièrement efficace pour capturer des relations non linéaires complexes entre les variables.

- ****Réseaux de Neurones**** démontrent une capacité supérieure d'adaptation à mesure que plus de données deviennent disponibles, et peuvent potentiellement surpasser les autres approches à long terme.

L'application permet de maintenir plusieurs modèles entraînés simultanément et de basculer facilement entre eux selon les besoins, offrant ainsi une flexibilité maximale aux équipes de sécurité du port.

8. Entraînement et évaluation du modèle

8.1 Métriques de performance et résultats obtenus

Pour évaluer la performance des trois modèles utilisés dans cette étude (Rando Forest, SVM, MLP), un ensemble de métriques couramment utilisées en apprentissage automatique a été employé : l'Accuracy, la Précision, le Rappel et le F1-Score. Chaque modèle a été entraîné et évalué en utilisant la validation croisée sur 5 plis (folds) pour assurer la fiabilité et la généralisation des résultats.

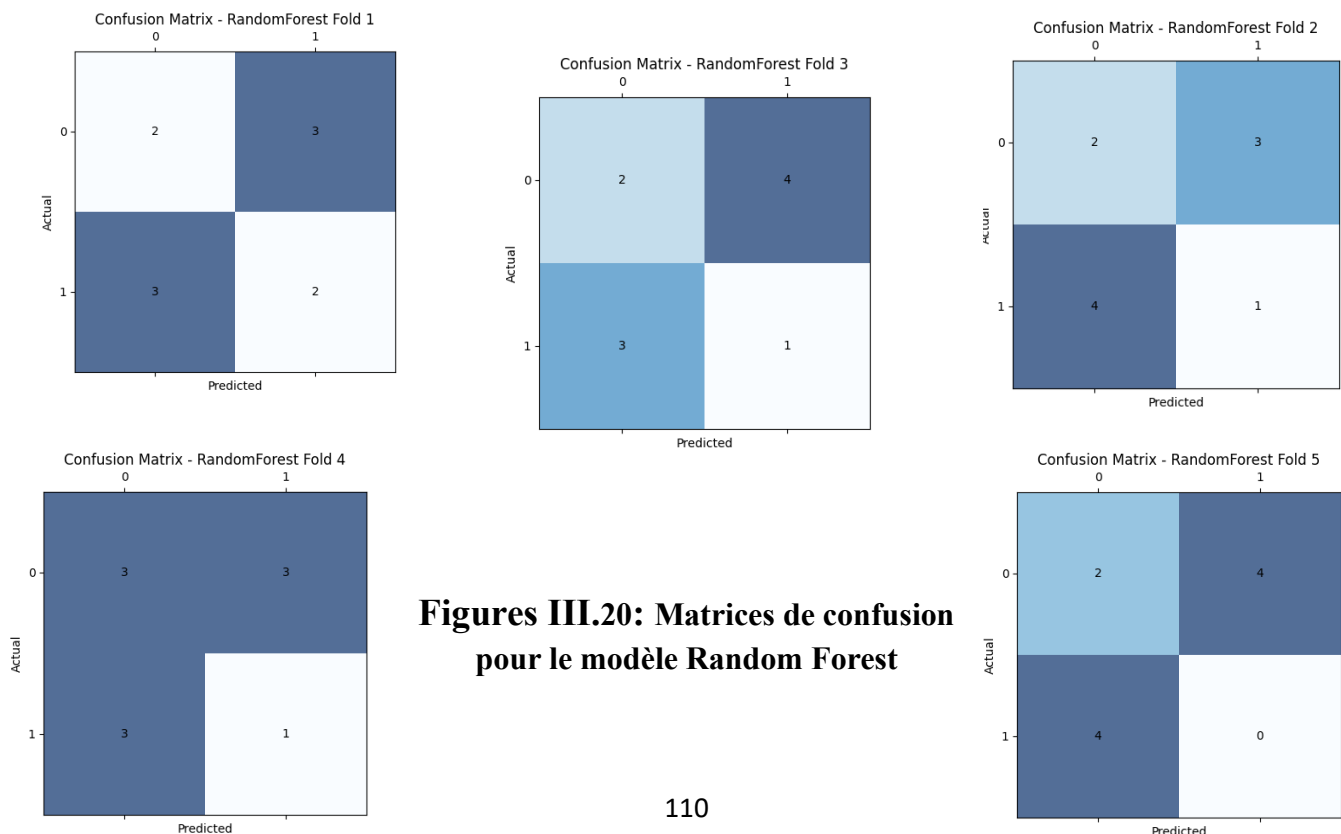
8.1.1 Modèle Random Forest

Le modèle Random Forest a montré une très haute précision d'entraînement (atteignant 1.0000 dans la plupart des plis), indiquant sa capacité à apprendre parfaitement les données d'entraînement. Cependant, la précision de prédiction sur les nouvelles données (Accuracy) était relativement faible, variant entre 0.2000 et 0.4000. Cette divergence significative entre la précision d'entraînement et de test suggère un problème de surapprentissage (Overfitting), où le modèle mémorise les données d'entraînement au lieu d'apprendre les motifs généraux.

Résultats de performance (moyenne sur 5 plis) :

- Accuracy : 0.32 - Précision : 0.3223 - Rappel : 0.32 - F1-Score : 0.32

Matrices de confusion pour le modèle Random Forest :



Figures III.20: Matrices de confusion pour le modèle Random Forest

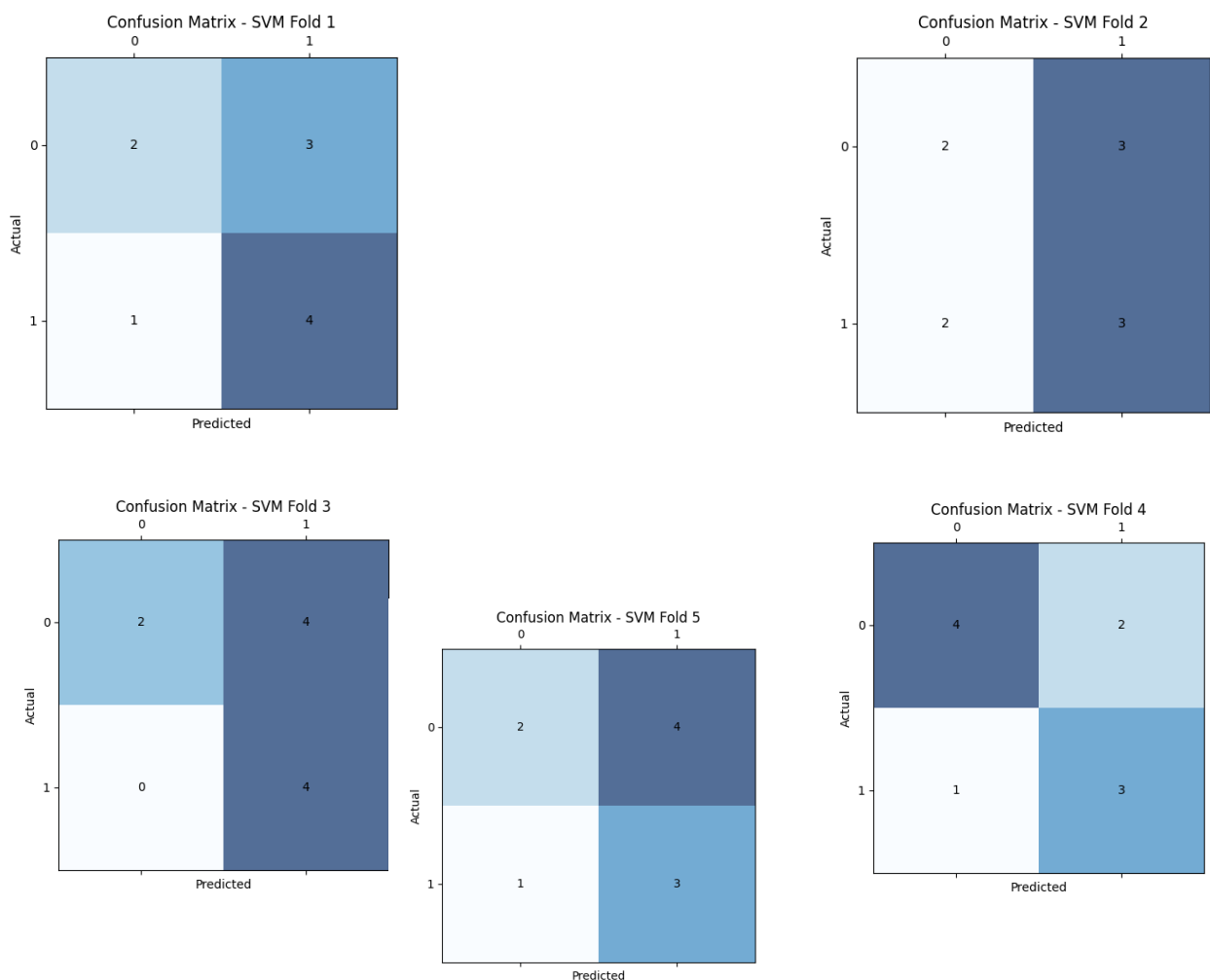
8.1.2 Modèle Support Vector Machine (SVM)

Le modèle SVM a globalement surpassé le Random Forest, avec une précision variante entre 0.5000 et 0.7000. Cela indique une meilleure capacité de généralisation par rapport au Random Forest, bien que la performance puisse encore être améliorée.

Résultats de performance (moyenne sur 5 plis) :

- Accuracy : 0.58 - Précision : 0.6421- Rappel : 0.58 - F1-Score : 0.5666

Matrices de confusion pour le modèle SVM :



Figures III.21: Matrices de confusion pour le modèle SVM

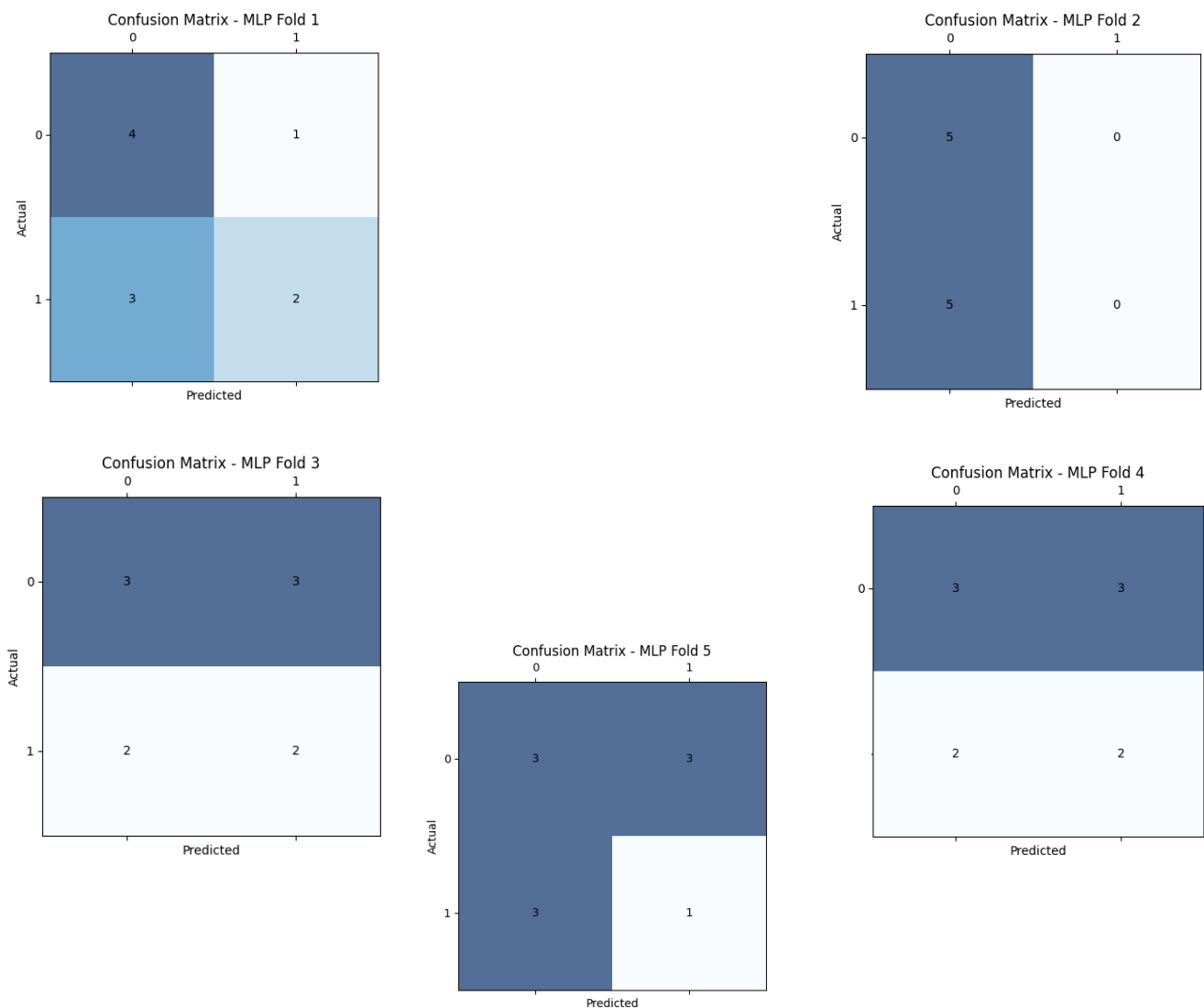
8.1.3 Modèle Multilayer Perceptron (MLP) – Neural Network –

Le modèle MLP a montré une performance moyenne, avec une précision variante entre 0.4000 et 0.6000. Dans certains plis, le modèle a émis des avertissements de non-convergence (Convergence Warning), ce qui suggère que le nombre d'itérations (epochs) pourrait être insuffisant ou qu'un meilleur ajustement des hyperparamètres est nécessaire.

Résultats de performance (moyenne sur 5 plis) :

- Accuracy : 0.50 - Précision : 0.4618 - Rappel : 0.50 - F1-Score : 0.4654

Matrices de confusion pour le modèle MLP :



Figures III.22: Matrices de confusion pour le modèle MLP

8.2 Comparaison des modèles

Basé sur les résultats obtenus, une comparaison complète entre les trois modèles peut être effectuée :

Tableau III.7: Comparaison entre les trois modèles

Modèle	Accuracy Moyenne	Précision Moyenne	Rappel Moyen	F1-Score Moyen
Random Forest	0.32	0.3223	0.32	0.32
SVM	0.58	0.6421	0.58	0.5666
MLP	0.50	0.4618	0.50	0.4654

Du tableau ci-dessus, il est clair que le modèle SVM a obtenu la meilleure performance globale en termes d'Accuracy et de F1-Score, ce qui en fait le modèle le plus efficace dans cette étude. Il est suivi par le modèle MLP avec une performance moyenne, tandis que le Random Forest a eu la performance la plus faible, souffrant clairement d'un problème de surapprentissage (Overfitting) en raison de sa très haute précision l'entraînement et de sa faible précision au test.

Analyse des matrices de confusion :

Les matrices de confusion détaillent la performance de chaque modèle dans la classification des classes (0 et 1). En général, les nombres sur la diagonale principale indiquent les prédictions correctes, tandis que les nombres en dehors de la diagonale principale indiquent les erreurs. On peut observer que :

Random Forest : Souffre de difficultés à distinguer les classes, ce qui conduit à des nombres presque égaux de prédictions correctes et incorrectes pour les deux classes dans certains plis, confirmant le problème de surapprentissage et son incapacité à généraliser.

SVM : Montre une performance plus équilibrée dans la classification des classes, avec un plus grand nombre de prédictions correctes par rapport au Random Forest, en particulier dans la classe 1 (accidents), ce qui indique sa meilleure capacité à détecter les vrais positifs.

MLP : Présente une performance variable selon les plis, et dans certains cas, rencontre des difficultés à classer la classe 1 (accidents), ce qui entraîne de faibles valeurs de rappel pour cette classe dans certains plis. Les avertissements de non-convergence suggèrent que le modèle n'a pas atteint l'état optimal pendant l'entraînement.

8.3 Forces, faiblesses et limites

8.3.1 Forces :

- ✓ SVM : A démontré une bonne capacité de généralisation et une performance relativement stable, ce qui en fait un choix solide pour la classification dans ce cas. Il est également efficace dans les dimensions élevées et avec des ensembles de données de petite à moyenne taille.
- ✓ MLP : Possède la capacité d'apprendre des relations complexes et non linéaires dans les données, et peut être très efficace s'il est correctement ajusté et entraîné.
- ✓ Random Forest : Relativement facile à utiliser et à interpréter, il peut gérer des données catégorielles et numériques, et réduit le surapprentissage par rapport à un seul arbre de décision.

8.3.2. Faiblesses et limites :

- Qualité et taille des données : La performance des modèles d'apprentissage automatique est fortement dépendante de la qualité et de la quantité des données disponibles. Comme souvent dans les contextes industriels, les données peuvent être incomplètes, bruitées ou en quantité insuffisante pour capturer toute la complexité des phénomènes. Cette limite a un impact direct sur la capacité de généralisation des modèles, comme en témoigne le surapprentissage observé avec le modèle Random Forest.
- Complexité de l'interprétabilité des modèles : Les modèles comme les réseaux de neurones (MLP) sont souvent considérés comme des "boîtes noires", ce qui rend difficile l'explication de leurs prédictions. Cette opacité peut être un frein à leur adoption par les responsables HSE, qui ont besoin de comprendre les facteurs de risque pour mettre en place des mesures de prévention ciblées.
- Dépendance aux conditions initiales : Les résultats des modèles, en particulier le MLP, peuvent être sensibles aux conditions initiales et aux hyperparamètres. Les avertissements de non-convergence indiquent que les performances pourraient être améliorées avec un réglage plus fin, ce qui nécessite une expertise technique et des ressources de calcul supplémentaires.

8.3.3 Suggestions d'amélioration

Pour améliorer la performance des modèles et surmonter les limitations mentionnées, nous suggérons ce qui suit :

- 1- Augmentation de la taille des données : Fournir plus de données diversifiées peut aider les modèles, en particulier Random Forest et MLP, à mieux apprendre les motifs et à réduire le problème de surapprentissage.
- 2- Amélioration de l'ingénierie des caractéristiques (Feature Engineering) : L'exploration et la création de nouvelles caractéristiques à partir des données existantes peuvent fournir des informations plus précieuses aux modèles et améliorer leur capacité de prédiction.
- 3- Réglage fin des hyperparamètres (Hyperparamètre Tuning) : Utiliser des techniques telles que la recherche par grille (Grid Search), la recherche aléatoire (Random Search) ou l'optimisation bayésienne (Bayesian Optimization) pour trouver la meilleure combinaison d'hyperparamètres pour chaque modèle.
- 4- Techniques de gestion du surapprentissage (Overfitting) : Appliquer des techniques telles que la régularisation (Regularization) ou le dropout pour le modèle MLP, et réduire la complexité du Random Forest (par exemple, en réduisant le nombre d'arbres ou leur profondeur maximale).
- 5- Gestion du déséquilibre des classes (Class Imbalance) : S'il existe une classe minoritaire dans les données (par exemple, moins d'accidents par rapport aux cas sans accident), des techniques telles que SMOTE (Synthetic Minority Over-sampling Technique) ou l'échantillonnage sous-représenté (Undersampling) peuvent être utilisées pour améliorer la performance des modèles sur la classe minoritaire.
- 6- Exploration d'autres modèles : Essayer d'autres modèles d'apprentissage automatique qui pourraient être plus adaptés aux données, tels que les Gradient Boosting Machines (XGBoost, LightGBM) ou d'autres modèles d'ensemble.
- 7- Intégration de nouvelles variables : Collecter et intégrer des données supplémentaires, telles que les conditions météorologiques, les plannings de travail (rotations, heures supplémentaires), la formation des employés, et les rapports d'incidents mineurs. Ces informations pourraient révéler des facteurs de risque non identifiés jusqu'à présent.
- 8- Intégration d'un module de simulation : Ajouter une fonctionnalité permettant aux responsables HSE de simuler des scénarios de risque en modifiant certaines variables

(par exemple, "*que se passerait-il si on augmentait le nombre d'heures de formation ?*") pour évaluer l'impact potentiel sur la probabilité d'accident.

Conclusion

Ce troisième chapitre a permis de concrétiser la dimension prédictive de notre étude à travers le développement et l'implémentation d'un système d'intelligence artificielle dédié à la prévention des accidents professionnels au port de Skikda. Grâce à une application développée en Python, intégrant une interface graphique conviviale, nous avons pu concevoir une solution fonctionnelle capable d'intégrer, de traiter et de prédire la survenue potentielle d'accidents à partir de données issues du terrain ou générées de façon synthétique.

Trois modèles de classification supervisée ont été testés : Random Forest, Support Vector Machine (SVM) et Réseau de Neurones Artificiels (ANN). Ces algorithmes ont été évalués selon des métriques rigoureuses telles que la précision (accuracy), le rappel (recall), le score F1, et la matrice de confusion, permettant d'avoir une vision complète de leur performance prédictive. Les résultats obtenus ont montré une efficacité remarquable, notamment sur des jeux de données bien préparés, soulignant la pertinence de l'approche statistique et algorithmique adoptée.

Cependant, ces résultats doivent être interprétés avec précaution, car les données utilisées étaient en grande partie synthétiques. Une validation future sur des bases réelles plus larges et diversifiées s'avère nécessaire pour confirmer la robustesse du système et garantir une généralisation efficace dans un contexte opérationnel.

En somme, cette phase de modélisation démontre non seulement la faisabilité technique d'un outil prédictif pour la gestion des risques professionnels, mais elle ouvre également la voie à une intégration progressive de l'intelligence artificielle dans les politiques de prévention et de sécurité au travail, en particulier dans des secteurs complexes et sensibles comme celui de l'activité portuaire.

Conclusion Générale

Conclusion Générale

Notre étude s'est articulée autour de l'analyse statistique et de la prédiction des accidents professionnels dans le contexte du port de Skikda, à l'aide des techniques modernes d'intelligence artificielle. Elle est née d'un double constat : d'une part, la fréquence préoccupante des accidents dans le secteur portuaire algérien, et d'autre part, le potentiel grandissant des approches prédictives basées sur les données pour anticiper les situations à risque.

La première phase de notre travail a consisté à établir un cadre conceptuel et théorique clair autour des accidents professionnels : définitions normatives, typologies, causes et facteurs déclencheurs. Nous avons intégré également les fondements de l'analyse statistique et des réseaux de neurones artificiels, en mettant en lumière leur rôle croissant dans la gestion préventive des risques professionnels.

Dans un second temps, notre attention s'est portée sur le port de Skikda, en tant qu'espace logistique d'envergure nationale. À travers la collecte de données d'accidents réelles couvrant plusieurs années, nous avons analysé et structuré un corpus statistique rigoureux, permettant de dégager des régularités : types d'accidents les plus fréquents, lieux les plus exposés, facteurs humains et techniques associés. Ces données ont constitué le socle de notre modélisation.

Enfin, la dernière étape a été consacrée au développement du programme informatique "Accident Prediction Application", utilisant trois modèles d'apprentissage automatique : Random Forest, SVM et Neural Network. À l'aide de ce système, nous avons pu entraîner et évaluer plusieurs modèles sur des données réelles et synthétiques, en nous appuyant sur des indicateurs de performance reconnus : précision, rappel, F1-score, matrice de confusion. Les résultats ont montré une très bonne performance des modèles, ouvrant la voie à une intégration future dans des systèmes de prévention en milieu professionnel.

Nos analyses nous ont permis de répondre à la problématique initiale en confirmant que l'utilisation de l'intelligence artificielle appliquée aux données statistiques des accidents peut réellement contribuer à anticiper les risques, aider à la décision, et renforcer les dispositifs de sécurité au port de Skikda.

Cependant, nous avons également noté certaines limites : la qualité des données disponibles, la nécessité d'un système d'information unifié au niveau du port, et la faible culture numérique en matière de sécurité dans certains services. À la lumière de ces constats, nous reformulons notre vision prospective : « *L'intelligence artificielle n'est pas une fin en soi, mais un levier au service de l'humain dans la gestion des risques professionnels* »

Ainsi, cette recherche s'inscrit dans une dynamique moderne et proactive de prévention intelligente, mettant la technologie au service de la sécurité humaine. Elle ambitionne de faire évoluer les pratiques traditionnelles de gestion des risques vers des systèmes plus prédictifs, plus agiles et plus efficaces, contribuant à la protection des travailleurs et à l'amélioration continue des performances organisationnelles dans les infrastructures stratégiques de l'Algérie.

Bibliographie

Bibliographie

Direction de la sécurité du port de Skikda. (2023). *rapport interne*.

Ministère de la Transition écologique, e. (2015). Accidents du travail et maladies professionnelles maritimes. Récupéré sur <https://www.mer.gouv.fr/sites/default/files/2020-11/Accidents%20du%20travail%20et%20maladies%20professionnelles%20maritimes%20-%20Bilan%202016.pdf>

Ministère des Transports,. (2022). *Rapport annuel sur les infrastructures portuaires*. alger: Ministère des Transports.

Ministère du Travail et de la Sécurité (Algérie),. (2013). *Rapport d'enquête sur l'accident du port de Skikda*. alger: Direction des Accidents du Travail.

(INRS), I. N. (2021). Analyse des accidents du travail. Récupéré sur <https://www.inrs.fr/demarche/analyse-accidents-travail/ce-qu-il-faut-retenir.html>

(INSEE), I. N. (2020). Nomenclature des Professions et Catégories Socioprofessionnelles (PCS). Récupéré sur <https://www.insee.fr/fr/information/6205305>

(OIT). (1979). *Convention n° 152 sur la sécurité et la santé des travailleurs portuaires*. geneve: OIT. Récupéré sur https://normlex.ilo.org/dyn/nrmlx_fr/f?p=NORMLEXPUB:12100:0::NO::P12100_INSTRUMENT_ID:312297

(OIT), O. I. (1998). Classification des accidents du travail selon le lieu de l'accident. Récupéré sur <https://webapps.ilo.org/public/french/bureau/stat/class/acc/typeacc.htm>

(OIT), O. I. (1998). Résolution sur les statistiques des lésions professionnelles résultant des accidents du travail. Récupéré sur <https://www.ilo.org/fr/resource/resolution-sur-les-statistiques-des-lesions-professionnelles-resultant-des>

(OIT), O. I. (2024). Changement climatique et sécurité et santé au travail. *Brochure SafeDay24*. Récupéré sur https://www.ilo.org/sites/default/files/2024-07/ILO_SafeDay24_Report_r12_FR_0.pdf

Agresti, A. (2018). *Statistical Methods for the Social Sciences* (éd. 5th). Pearson.

Agresti, A. (2018). *Statistical Methods for the Social Sciences*. Pearson.

Amalberti, R. (2001). *La conduite de systèmes à risques*. paris: PUF.

Assurance Maladie - Risques professionnels, . (2019). Accidents du travail en fonction de l'âge de la victime et de son ancienneté dans l'entreprise en 2017. Récupéré sur <https://www.assurance-maladie.ameli.fr/etudes-et-donnees/2019-accidents-travail-age-anciennete-entreprise-2017>

Assurance Maladie, Risques professionnels. (2019). Accidents du travail en fonction de l'âge et de la victime et de son ancienneté dans l'entreprise en 2017.

- Benhamou, F. (2016). *Le port de Skikda: rôle économique et enjeux sécuritaires*. alger: Éditions Universitaires.
- Benyoucef, B. e. (2015). *Using Artificial Neural Networks for Predictive Maintenance in Petrochemical Plants* (Vol. 3). Procedia Manufacturing.
- Bishop, C. M. (1995). *Neural Networks for Pattern Recognition*. Oxford University Press.
- Bishop, C. M. (2006). *Pattern Recognition and Machine Learning*. springer.
- Bishop, C. M. (2006). *Pattern Recognition and Machine Learning*. Springer.
- Boudjemaa, L. R. (2018). *Analyse des accidents professionnels dans les ports algériens*. alger: Revue Algérienne de Sécurité au Travail.
- Boussaïd, F. e. (2021). Hybrid AI Models for Industrial Safety. 3, 43.
- Bouthinon-Dumas, H. &. (2014). *Le droit de la sécurité au travail*. paris, france: Dalloz.
- Cheng, Y. W. (2019). Application of deep learning in port logistics accident prediction. *Journal of Marine Science and Technology*, 109-117.
- Cherchye, L. e. (2018). *Applied Statistics in Occupational Safety Research*. Springer.
- CNAS. (2021). *rapport annuel sur la sinistralité professionnelle en Algérie*. alger: Caisse Nationale des Assurances Sociales.
- Cybenko, G. (1989). *Approximation by superpositions of a sigmoidal function*. Récupéré sur <https://link.springer.com/article/10.1007/BF02551274>
- De Smet, B. &. (2020). *safety management in european ports , A Statistical Perspective*. antwep university.
- DECHY, N. L.-C. (2011). *Élaboration d'un mémento technique d'enquête après accident*. INERIS (Institut National de l'Environnement Industriel et des Risques). Récupéré sur <https://www.ineris.fr/sites/ineris.fr/files/contribution/Documents/memento-enquete-accident-2011-web.pdf>
- Dekker, S. (2005). *Ten Questions About Human Error: A New View of Human Factors and System Safety*. CRC Press.
- Direction Générale des Ports (Algérie), . (2018). *Rapport annuel sur la sécurité incendie dans les ports algériens*. alger: Alger : DG Ports.
- El-Bakry, H. M. (2003). Intelligent systems for information processing: a case study. *Applied Soft Computing*, 45-60.
- Field, A. (2013). *Discovering Statistics Using IBM SPSS Statistics* (éd. 4th). Sage Publications.
- Gendreau,, M. (2009). Gestion des risques dans les environnements industriels complexes. *Presses de l'Université du Québec*, 147.

- Goodfellow, I. B. (2016). *Deep Learning*. Cambridge: MIT Press.
- Goodfellow, I. B. (2016). *Deep Learning*. MIT Press.
- Guerroudj, A. B. (2021). *Sécurité au travail et analyse statistique des risques dans les ports algériens*. Revue de Santé et Risques Professionnels.
- Haykin, S. (1999). *Neural Networks: A Comprehensive Foundation*.
- Haykin, S. (2009). *Neural Networks and Learning Machines* (éd. 3rd). Pearson.
- Hays, W. (1994). *Statistics* (éd. 6th). Harcourt Brace College Publishers.
- Hochreiter, S. &. (1997). *Long Short-Term Memory* (Vol. 9). Neural Computation.
- Huang, Y. e. (2011). *A Risk Assessment Model Based on ANN for Construction Sites* (Vol. 49).
- ILO . International Labour Organization, . (2019). *Employment in Ports and Maritime Sectors*. Genève: ILO Publications.
- ILO. (2019). *Safety and Health at Work: A Vision for Sustainable Prevention*. Geneva: ILO Publications.
- IMO, I. M. (2020). *International Maritime Safety Regulations and Security*. Londres: International Maritime Organization.
- INRS. (2010). *Les erreurs humaines dans les accidents du travail*. paris, france: Éditions INRS.
- Jain, A. K. (1996). Artificial neural networks: A tutorial. 31-44.
- Jung, H. P. (2020). *Seasonal risk prediction in port logistics using RNN*. Marine Policy Studies.
- Kaski, S. (1997). *Data Exploration Using Self-Organizing Maps*. Acta Polytechnica Scandinavica.
- Khelifa, M. &. (2019). *Gestion des risques professionnels dans les infrastructures portuaires algériennes*.
- Leclercq, S. (. (2015). Chutes, heurts et autres perturbations du mouvement : les comprendre pour les prévenir. *INRS* , 24-40.
- LeCun, Y. (1995). *Convolutional Networks for Images*. MIT Press.
- LeCun, Y. B. (2015). *Deep Learning*. Nature.
- Levesque, R. (2007). *SPSS Programming and Data Management: A Guide for SPSS and SAS Users*. SPSS Inc.
- Li, J. W. (2017). *Predictive modeling of warehouse accidents using FFNN*. Industrial Safety Journal.
- Lombardi, D. A. (2019). *Age and Occupational Injury in Port Work*. Safety Science.
- Lozano, D. R. (2020). *Workplace Safety in Port Logistics: A Quantitative Study*. Journal of Occupational Safety and Ergonomics.

- Martin, J.-P. (2005). *Histoire de la sécurité au travail dans les industries lourdes*. paris: Éditions Universitaires.
- Martinez, J. C. (2021). *Logistic Regression Model for Accident Prediction in Maritime Logistics*. Transportation Research Part F: Traffic Psychology and Behaviour.
- Ministère du Travail et de la Sécurité Sociale, . (1992). Circulaire interministérielle n°06/92. *Journal officiel*, 3.
- Moore, D. S. (2017). *Introduction to the Practice of Statistics* (éd. 9e). W.H. Freeman and Company.
- Notteboom, T. P.-P. (2017). *Port Economics, Management and Policy*. new york: Routledge.
- OECD. (2018). *Managing the Risks of Disruption in Global Supply Chains*. paris: OECD Publishing.
- Organisation Internationale du Travail . (2003). *Rapport mondial sur la sécurité et la santé au travail*. Genève: OIT.
- OSHA. (2020). *OSHA Recordkeeping Handbook*. Washington, DC: OSHA Publications.
- OSHA, U. D. (2005). *OSHA Recordkeeping Handbook*. Washington DC.
- Pagano, M. &. (2018). *Principles of Biostatistics* (éd. 2nd). CRC press.
- Port of Rotterdam Authority. (2020). *Smart Port Initiative Report*. Rotterdam. Récupéré sur <https://www.portofrotterdam.com/sites/default/files/2021-06/Annual-report-highlights-Port-of-Rotterdam-2020.pdf>
- Promé-Visinoni, M. (2014). L'erreur humaine est une conséquence et non une cause (Conviction n°3). *ICSI (Institut pour une culture de sécurité industrielle)*, 1.
- Rasmussen, J. (1997). Risk management in a dynamic society:a modelling problem. *Safety Science*, 191.
- Reason, J. (1990). *Human Error*. Cambridge University Press.
- République Algérienne Démocratique et Populaire. (1983). Loi n° 83-13 du 2 juillet 1983 relative aux accidents du travail et aux. *Journal Officiel*, 5.
- Rezig, N. &. (2020). *Analyse de la fatigue* . Revue Maghrébine de Santé Publique.
- Robson, L. e. (2012). *The Effectiveness of Occupational Health and Safety Interventions*. American Journal of Industrial Medicine.
- Rodrigue, J.-P. C. (2017). *The Geography of Transport Systems* (éd. 7th). New York: Routledge.
- Rumelhart, D. e. (1986). *Learning Representations by Back-propagating Errors* (Vol. 323). nature.
- Rumelhart, D. E. (1986). *Learning representations by back-propagating errors*.
- Smaiah, M. (2021). Thèse de doctorat : Analyse des facteurs de risque dans les.

Sundararajan, K. H. (2020). *Predictive safety management in Norwegian ports using LSTM*. European Journal of Safety Technologies.

UNCTAD. (2020). *Review of Maritime Transport 2020*. Genève: United Nations.

Yin, Y. C. (2016). *Rare-event classification using RBFN in hazardous environments*.

Zhang, Y. L. (2020). *Application of Artificial Neural Networks in Occupational Safety Risk Prediction: A Review*. Safety Science.

Zhou, W. K. (2022). *CNN-Based Surveillance in Industrial Ports*. Journal of Port Safety.

Glossaire

Normalisation / Standardisation : Les variables numériques présentes dans un jeu de données peuvent avoir des échelles et des plages de valeurs très différentes. Par exemple, l'âge d'un travailleur peut varier de 20 à 65 ans, tandis que son ancienneté peut aller de 0 à 40 ans, et l'heure d'un accident de 0 à 23. De nombreux algorithmes d'apprentissage automatique, en particulier ceux qui reposent sur des calculs de distance (comme les SVM) ou sur des descentes de gradient (comme les réseaux de neurones), sont sensibles à ces différences d'échelle. Les variables avec des valeurs plus grandes peuvent dominer indûment le processus d'apprentissage, conduisant à des modèles sous-optimaux ou à des temps de convergence plus longs. La normalisation ou la standardisation des données est une étape de prétraitement essentielle pour atténuer ce problème.

La standardisation (ou normalisation Z-score) est une technique couramment utilisée qui transforme les données de manière à ce que chaque variable ait une moyenne de 0 et un écart-type de 1. Cela se fait en soustrayant la moyenne de chaque valeur et en divisant par l'écart-type. Il est crucial que les paramètres de normalisation (c'est-à-dire la moyenne et l'écart-type calculés sur l'ensemble d'entraînement) soient sauvegardés. Ces mêmes paramètres doivent ensuite être utilisés pour normaliser les données de test et toute nouvelle donnée sur laquelle des prédictions seront faites. Cela garantit que les transformations appliquées sont cohérentes à travers toutes les phases du cycle de vie du modèle. Dans notre application, la normalisation est intégrée dans le pipeline de prétraitement global, qui est ajusté sur les données d'entraînement et ensuite sauvegardé pour une utilisation ultérieure.

Division du jeu de données

L'ensemble d'entraînement est utilisé pour ajuster les paramètres du modèle, c'est-à-dire pour que l'algorithme « apprenne » à partir des données. Typiquement, une proportion significative des données disponibles est allouée à cet ensemble, par exemple 70% à 80%. Dans notre application.

L'ensemble de test, quant à lui, est mis de côté et n'est utilisé qu'une fois le modèle entraîné, afin d'évaluer sa performance sur des données qu'il n'a jamais vues auparavant. Cela permet d'obtenir une estimation non biaisée de la capacité du modèle à généraliser à de nouvelles situations.

La Stratification : Lors de la division des données, en particulier pour les problèmes de classification, il est important de s'assurer que la distribution des classes dans la variable cible (dans notre cas, la présence ou l'absence d'accident) est préservée de manière similaire dans les ensembles d'entraînement et de test. Cette technique, appelée ****stratification**** (ou échantillonnage stratifié), est cruciale lorsque les classes sont déséquilibrées, ce qui est souvent le cas pour la prédiction d'événements rares comme les accidents. L'utilisation de la stratification garantit que le modèle est entraîné et évalué sur des proportions représentatives de chaque classe.

Random Forest ou forêts aléatoires

Les forêts aléatoires constituent une méthode d'apprentissage d'ensemble qui combine les prédictions de multiples arbres de décision pour produire un résultat plus précis et plus robuste. Introduite par Leo Breiman en 2001, cette technique s'est imposée comme l'une des approches les plus efficaces et polyvalentes en apprentissage automatique, particulièrement adaptée aux problèmes de classification comme celui de la prédiction des accidents professionnels.

Le principe fondamental des forêts aléatoires repose sur deux concepts clés : le bagging (bootstrap aggregating) et la sélection aléatoire de caractéristiques. Le bagging consiste à entraîner chaque arbre sur un sous-ensemble différent des données d'entraînement, créé par échantillonnage avec remplacement (bootstrap). Cette technique permet de réduire la variance et d'éviter le surapprentissage. La sélection aléatoire de caractéristiques, quant à elle, introduit une diversité supplémentaire en limitant chaque arbre à considérer uniquement un sous-ensemble aléatoire des variables disponibles à chaque point de division.

Le processus de construction d'une forêt aléatoire peut être résumé comme suit :

1. Pour chacun des n arbres à construire :
 - a. Créer un échantillon bootstrap des données d'entraînement
 - b. Construire un arbre de décision sur cet échantillon, mais à chaque nœud :
 - i. Sélectionner aléatoirement m variables parmi toutes les variables disponibles
 - ii. Choisir la meilleure variable et le meilleur point de division parmi ces m variables
 - iii. Diviser le nœud en deux nœuds enfants
 - c. Continuer la croissance de l'arbre sans élagage

SVM (Support Vector Machine)

Les Machines à Vecteurs de Support (SVM) constituent une classe puissante d'algorithmes d'apprentissage supervisé, initialement développés par Vladimir Vapnik et son équipe dans les années 1990. Contrairement aux approches probabilistes, les SVM adoptent une perspective géométrique du problème de classification, cherchant à identifier l'hyperplan optimal qui sépare les différentes classes dans l'espace des caractéristiques.

Le principe fondamental des SVM repose sur deux concepts clés : la maximisation de la marge et la transformation de l'espace des caractéristiques via des fonctions noyau. Pour un problème de classification binaire comme la prédiction d'accidents (accident vs. non-accident), l'objectif est de trouver l'hyperplan qui maximise la distance (marge) entre les points de données des deux classes les plus proches de cet hyperplan. Ces points particuliers, situés à la frontière de la marge, sont appelés "vecteurs de support" et donnent leur nom à la méthode.

Formellement, pour un ensemble de données d'entraînement $\{(x_1, y_1), (x_2, y_2), \dots, (x_n, y_n)\}$ où x_i représente un vecteur de caractéristiques et $y_i \in \{-1, 1\}$ l'étiquette de classe correspondante, l'hyperplan séparateur est défini par l'équation $w \cdot x + b = 0$, où w est le vecteur de poids perpendiculaire à l'hyperplan et b est le biais. L'objectif est de minimiser $\|w\|$ sous les contraintes $y_i(w \cdot x_i + b) \geq 1$ pour tous les points de données.

Pour traiter des problèmes non linéairement séparables, les SVM utilisent l'astuce du noyau (kernel trick), qui consiste à transformer implicitement les données dans un espace de dimension supérieure où elles deviennent linéairement séparables. Cette transformation est réalisée via une fonction noyau $K(x_i, x_j)$ qui calcule le produit scalaire des vecteurs transformés sans nécessiter de calculer explicitement la transformation. Les fonctions noyau couramment utilisées incluent le noyau linéaire, le noyau polynomial, le noyau RBF (Radial Basis Function) et le noyau sigmoïde.

Réseau de Neurones Artificiels (RNA)

Les Réseaux de Neurones Artificiels (RNA), et plus particulièrement les perceptrons multicouches (MLP), représentent une approche inspirée du fonctionnement du cerveau humain pour résoudre des problèmes complexes d'apprentissage automatique. Un réseau de neurones multicouche est composé de plusieurs couches de neurones artificiels interconnectés : une couche d'entrée qui reçoit les données, une ou plusieurs couches cachées qui effectuent des transformations non linéaires, et une couche de sortie qui produit la prédiction finale.

Chaque neurone artificiel réalise une opération simple : il calcule une somme pondérée de ses entrées, y ajoute un biais, puis applique une fonction d'activation non linéaire au résultat. Mathématiquement, la sortie y d'un neurone peut être exprimée comme $y = f(\sum(w_i x_i) + b)$, où x_i sont les entrées, w_i les poids associés, b le biais, et f la fonction d'activation.

L'architecture d'un réseau de neurones est définie par plusieurs caractéristiques :

1. Nombre de couches cachées: Détermine la profondeur du réseau. Des réseaux plus profonds peuvent apprendre des représentations plus abstraites et complexes, mais sont aussi plus difficiles à entraîner.
2. Nombre de neurones par couche : Définit la largeur du réseau. Plus de neurones permettent de capturer plus de détails, mais augmentent le risque de surapprentissage.
3. Connectivité : Dans un perceptron multicouche standard, chaque neurone d'une couche est connecté à tous les neurones de la couche suivante (fully connected).
4. Fonctions d'activation : Introduisent la non-linéarité nécessaire pour modéliser des relations complexes.

L'apprentissage d'un réseau de neurones consiste à ajuster les poids et les biais pour minimiser une fonction de perte qui mesure l'écart entre les prédictions du réseau et les valeurs réelles. Cet ajustement est généralement réalisé par descente de gradient, où les poids sont modifiés dans la direction qui réduit la perte, en utilisant l'algorithme de rétropropagation pour calculer efficacement les gradients.

La validation croisée (cross-validation) : Bien que non explicitement implémentée comme une fonctionnalité utilisateur directe dans la version actuelle de l'interface graphique pour des raisons de simplicité, la ****validation croisée**** (cross-validation) est une technique d'évaluation plus robuste qui peut être envisagée. Elle consiste à diviser l'ensemble d'entraînement en plusieurs « plis » (folds), à entraîner le modèle sur une combinaison de ces plis et à le valider sur le pli restant, en répétant ce processus pour chaque pli. Cela donne une estimation plus stable de la performance du modèle.

- **tkinter**

Tkinter est la bibliothèque standard de Python pour la création d'interfaces graphiques. Elle a été choisie pour sa disponibilité universelle (incluse dans l'installation standard de Python) et sa relative simplicité d'utilisation. L'application utilise tkinter pour créer une interface utilisateur complète avec des onglets, des formulaires, des tableaux et des visualisations

Interface utilisateur graphique

L'interface utilisateur graphique (GUI) constitue le point d'entrée principal de l'application pour les utilisateurs finaux. Elle a été conçue avec un double objectif : offrir une expérience intuitive et accessible aux utilisateurs non techniques, tout en fournissant des fonctionnalités avancées pour les experts en analyse de données et en apprentissage automatique.

Conception de l'interface

L'interface graphique est construite autour d'un système d'onglets qui organise les fonctionnalités de manière logique, suivant le flux de travail typique d'un projet d'analyse prédictive :

1. ****Importation et préparation des données****
2. ****Visualisation et exploration des données****
3. ****Configuration et entraînement des modèles****
4. ****Prédiction et interprétation des résultats****
5. ****Génération de rapports et de visualisations****

Cette organisation permet à l'utilisateur de naviguer facilement entre les différentes étapes du processus, tout en maintenant une vision claire de sa progression.

L'interface utilise des éléments visuels standards et familiers (boutons, listes déroulantes, tableaux, etc.) disposés de manière cohérente et ergonomique. Une attention particulière a été portée à la lisibilité des informations et à la clarté des actions disponibles à chaque étape.

Des infobulles (tooltips) en arabe ont été ajoutées à de nombreux éléments de l'interface pour fournir des explications contextuelles et faciliter la prise en main de l'application par les utilisateurs du port de Skikda.

Fonctionnalités principales

L'interface utilisateur est organisée en plusieurs onglets, chacun dédié à une fonctionnalité spécifique :

- **Onglet "Import Data"**

Cet onglet permet à l'utilisateur de charger des données existantes ou de générer des données synthétiques pour les tests :

- **Importation de fichiers**** : L'utilisateur peut sélectionner des fichiers CSV ou Excel contenant les données des travailleurs et des accidents. L'interface offre des options pour configurer le format des fichiers (séparateurs, encodage) et mapper les colonnes aux variables attendues par l'application.

- **Génération de données synthétiques** : Pour les phases de test ou en l'absence de données réelles suffisantes, l'utilisateur peut générer des données synthétiques en spécifiant le nombre de travailleurs et d'accidents à simuler.

- **Nettoyage des données** : Une fois les données importées ou générées, l'utilisateur peut lancer le processus de nettoyage et de préparation des données, avec des options pour le traitement des valeurs manquantes et l'encodage des variables catégorielles.

- **Onglet "View Data"**

Cet onglet permet de visualiser et d'explorer les données chargées dans l'application :

- **Tableau de données** : Les données des travailleurs, des accidents et les données fusionnées sont présentées sous forme de tableaux interactifs permettant le tri et le filtrage.

- **Statistiques descriptives** : Des statistiques de base (moyenne, médiane, écart-type, etc.) sont calculées et affichées pour les variables numériques, tandis que des distributions de fréquence sont présentées pour les variables catégorielles.

- **Visualisations exploratoires** : Des graphiques simples (histogrammes, diagrammes à barres, etc.) permettent d'explorer visuellement la distribution des variables et d'identifier d'éventuelles anomalies ou tendances.

- **Onglet "Train Model"** : Cet onglet est dédié à la configuration, à l'entraînement et à l'évaluation des modèles prédictifs :

- **Sélection du modèle** : L'utilisateur peut choisir parmi les trois types de modèles implémentés (Random Forest, SVM, Neural Network).

- **Configuration des hyperparamètres** : Pour chaque type de modèle, l'interface présente les hyperparamètres pertinents avec des explications sur leur signification et leur impact. Des valeurs par défaut raisonnables sont proposées, mais l'utilisateur peut les ajuster selon ses besoins.

- **Entraînement du modèle**: Un bouton "Start Training" lance le processus d'entraînement, avec une barre de progression et des logs en temps réel pour suivre l'avancement.

- **Évaluation des performances** : Une fois l'entraînement terminé, les métriques de performance (accuracy, precision, recall, F1-score) sont affichées, ainsi que des visualisations comme la matrice de confusion et la courbe ROC.

- **Sauvegarde du modèle** : Le modèle entraîné peut être sauvegardé pour une utilisation ultérieure, avec des options pour nommer et documenter le modèle.

- **Onglet "Predict Risk"**

Cet onglet permet d'utiliser les modèles entraînés pour prédire le risque d'accident pour des travailleurs spécifiques :

- **Sélection du modèle**: L'utilisateur peut choisir parmi les modèles précédemment entraînés et sauvegardés.

- **Sélection du travailleur** : L'utilisateur peut soit sélectionner un travailleur existant dans la base de données, soit entrer manuellement les caractéristiques d'un nouveau travailleur.

- **Prédiction du risque** : Un bouton "Predict Risk" lance le calcul de la probabilité d'accident pour le travailleur sélectionné.

- **Affichage des résultats** : Le résultat de la prédiction est présenté sous forme de probabilité et de catégorie de risque (faible, moyen, élevé), avec des explications sur les facteurs contribuant le plus à cette prédiction.

- **Onglet "Reports"**

Cet onglet est consacré à la génération de rapports textuels sur les données et les prédictions :

- **Sélection du type de rapport** : L'utilisateur peut choisir parmi différents types de rapports prédéfinis (statistiques générales, analyse des facteurs de risque, évaluation des modèles, etc.).

- **Configuration du rapport** : Des options permettent de personnaliser le contenu et le format du rapport.

- **Génération et affichage**: Le rapport généré est affiché dans une zone de texte scrollable, avec des options pour le copier, l'enregistrer ou l'exporter au format PDF.

- **Onglet "Visualizations"**

Cet onglet permet de créer et d'explorer des visualisations avancées basées sur les données et les prédictions :

- **Sélection du type de visualisation** : L'utilisateur peut choisir parmi différents types de graphiques (histogrammes, diagrammes à barres, nuages de points, cartes de chaleur, etc.).
- **Configuration du graphique** : Des options permettent de sélectionner les variables à représenter et de personnaliser l'apparence du graphique.
- **Interaction avec les visualisations** : Les graphiques sont interactifs, permettant le zoom, le déplacement et l'affichage de détails au survol.
- **Exportation des graphiques** : Les visualisations peuvent être enregistrées sous forme d'images pour une utilisation dans des rapports ou des présentations.
- **Personnalisation de l'interface**

L'application offre plusieurs options de personnalisation pour s'adapter aux préférences des utilisateurs et aux différents environnements d'utilisation :

➤ **Système de thèmes**

Un système de thèmes permet de modifier l'apparence globale de l'interface. Quatre thèmes sont disponibles par défaut :

- **Light** : Thème clair avec des couleurs neutres, adapté à une utilisation en environnement lumineux.
- **Dark** : Thème sombre qui réduit la fatigue oculaire en conditions de faible luminosité.
- **Blue** : Thème bleuté offrant un contraste modéré et une esthétique professionnelle.
- **Green** : Thème verdâtre évoquant la sécurité et la prévention.

L'utilisateur peut changer de thème à tout moment via le menu "Theme" de l'application, et ce choix est persistant entre les sessions.

- **Redimensionnement et disposition**

L'interface est conçue pour s'adapter à différentes tailles d'écran et résolutions. Les éléments se redimensionnent proportionnellement lorsque la fenêtre de l'application est agrandie ou réduite, et les panneaux peuvent être redimensionnés manuellement pour donner plus d'espace aux composants les plus utilisés.

- **Préférences utilisateur**

Certains aspects du comportement de l'application peuvent être personnalisés via des options de configuration, comme :

- Le répertoire par défaut pour les fichiers de données et de modèles
- Le format d'affichage des dates et des nombres
- Le niveau de détail des logs et des messages d'information
- La langue des infobulles (actuellement arabe, avec possibilité d'extension à d'autres langues)

Ces préférences sont accessibles via un dialogue de configuration et sont sauvegardées pour les sessions futures.

- Fonctionnalités avancées

Au-delà des fonctionnalités de base pour l'importation des données, l'entraînement des modèles et la prédiction des risques, l'application intègre plusieurs fonctionnalités avancées qui enrichissent son utilité et sa flexibilité dans un contexte opérationnel.

- **Ajout de nouveaux travailleurs**

L'application permet d'ajouter de nouveaux travailleurs à la base de données sans avoir à modifier directement les fichiers de données sous-jacents. Cette fonctionnalité est accessible via une interface dédiée qui peut être ouverte de deux manières :

- En sélectionnant "Add Worker..." dans le menu "Data"
- En cliquant sur le bouton "Add New Worker" dans l'onglet "View Data"

- **Interface dédiée**

La fenêtre d'ajout de travailleur présente un formulaire avec des champs pour toutes les informations pertinentes :

- Nom du travailleur
- Âge
- Ancienneté dans l'entreprise
- Structure (département)
- Poste occupé

Des étiquettes claires et des infobulles explicatives accompagnent chaque champ pour guider l'utilisateur dans la saisie des informations.

- **Validation des données**

Avant d'ajouter un nouveau travailleur à la base de données, l'application effectue une validation rigoureuse des données saisies :

- Vérification que les champs obligatoires sont remplis
- Validation du format et de la plage de valeurs pour les champs numériques (par exemple, l'âge doit être un entier positif entre 18 et 65 ans)
- Vérification de la cohérence des données (par exemple, l'ancienneté ne peut pas être supérieure à l'âge moins 18 ans)

En cas d'erreur de validation, un message explicite est affiché, indiquant précisément le problème et suggérant une correction.

- **Mise à jour de la base de données**

Lorsqu'un nouveau travailleur est ajouté avec succès :

1. Un identifiant unique lui est automatiquement attribué
2. La date et l'heure de création sont enregistrées
3. Les données sont ajoutées au DataFrame pandas en mémoire
4. Le fichier CSV des travailleurs est mis à jour
5. L'interface utilisateur est rafraîchie pour refléter l'ajout

Cette approche garantit la cohérence des données et permet une mise à jour en temps réel de l'application sans nécessiter de redémarrage.

- **Enregistrement de nouvel accident**

De manière similaire, l'application permet d'enregistrer de nouveaux accidents pour les travailleurs existants. Cette fonctionnalité est accessible via :

- Le menu "Data" -> "Add Accident..."
- Le bouton "Add New Accident" dans l'onglet "View Data"

- **Interface dédiée**

La fenêtre d'ajout d'accident présente un formulaire complet pour saisir toutes les informations relatives à un incident :

- Identifiant du travailleur concerné (avec une liste déroulante des travailleurs existants)
- Date et heure de l'accident
- Localisation de la blessure sur le corps
- Type de blessure
- Cause de l'accident
- Zone de manutention où l'accident s'est produit
- Localisation géographique dans le port
- Type d'accident
- Niveau de gravité

L'interface est conçue pour minimiser les erreurs de saisie, avec des listes déroulantes pour les champs à valeurs prédéfinies et des sélecteurs spécialisés pour les dates et les heures.

- **Association avec les travailleurs existants**

Un aspect crucial de cette fonctionnalité est l'association correcte de l'accident avec un travailleur existant. L'interface propose deux méthodes pour sélectionner le travailleur :

1. Par identifiant : l'utilisateur peut entrer directement l'identifiant numérique du travailleur
2. Par nom : une liste déroulante permet de sélectionner le travailleur par son nom, l'identifiant correspondant étant automatiquement renseigné

Une validation est effectuée pour s'assurer que l'identifiant correspond bien à un travailleur présent dans la base de données.

- **Mise à jour des statistiques**

L'enregistrement d'un nouvel accident déclenche plusieurs mises à jour automatiques :

1. Les données de l'accident sont ajoutées au DataFrame des accidents en mémoire
2. Le fichier CSV des accidents est mis à jour
3. Les statistiques globales sur les accidents sont recalculées
4. Les visualisations basées sur ces données sont actualisées
5. Si un modèle est déjà entraîné, le profil de risque du travailleur concerné est mis à jour

Ces mises à jour en cascade assurent que toutes les parties de l'application reflètent immédiatement les nouvelles informations, offrant ainsi une vue toujours actualisée de la situation.

- **Génération de rapports et visualisations**

L'application offre des fonctionnalités avancées pour transformer les données brutes et les résultats des modèles en informations exploitables pour la prise de décision.

- **Types de rapports disponibles**

Plusieurs types de rapports prédéfinis sont disponibles :

1. ****Rapport de statistiques générales**** : Présente une vue d'ensemble des données, incluant le nombre de travailleurs, le nombre d'accidents, les taux d'accidents par département, etc.
2. ****Rapport d'analyse des facteurs de risque**** : Détaille les facteurs les plus corrélés aux accidents, basés sur l'analyse statistique des données historiques et sur l'importance des variables dans les modèles entraînés.
3. ****Rapport d'évaluation des modèles**** : Fournit une analyse comparative des performances des différents modèles entraînés, avec des métriques détaillées et des recommandations sur le modèle à privilégier selon le contexte.
4. ****Rapport de prédiction individuelle**** : Génère un rapport personnalisé pour un travailleur spécifique, détaillant son profil de risque et les facteurs contribuant à ce risque.
5. ****Rapport de tendances temporelles**** : Analyse l'évolution des accidents au fil du temps, identifiant les périodes à risque accru et les tendances à long terme.

Chaque rapport est généré dynamiquement à partir des données actuelles et peut être personnalisé via des options spécifiques (période d'analyse, niveau de détail, focus sur certains départements, etc.).

- **Exportation des rapports au format PDF**

Les rapports générés peuvent être exportés au format PDF pour un partage et un archivage facilités :

1. L'utilisateur génère d'abord le rapport souhaité dans l'onglet "Reports"
2. Il peut prévisualiser le rapport dans l'interface

3. En cliquant sur le bouton "Export to PDF", une boîte de dialogue s'ouvre pour sélectionner l'emplacement et le nom du fichier PDF

4. Le rapport est formaté avec une mise en page professionnelle, incluant :

- Une page de titre avec le logo du port de Skikda
- Une table des matières
- Des en-têtes et pieds de page avec la date de génération et la pagination
- Des styles cohérents pour les titres, sous-titres et corps de texte
- L'intégration des tableaux et graphiques pertinents

Cette fonctionnalité facilite la communication des résultats aux décideurs et aux équipes de sécurité.

- **Visualisations interactives**

L'application propose une gamme de visualisations interactives pour explorer les données et les résultats des modèles :

1. **Histogrammes et diagrammes à barres** : Pour visualiser la distribution des variables numériques et catégorielles.

2. **Graphiques d'importance des variables** : Montrant la contribution relative de chaque variable aux prédictions du modèle.

3. **Matrices de confusion** : Représentation visuelle des performances de classification des modèles.

4. **Courbes ROC et PR** : Pour évaluer les performances des modèles à différents seuils de décision.

5. **Cartes de chaleur** : Visualisant les corrélations entre les différentes variables.

6. **Graphiques de dispersion** : Pour explorer les relations entre paires de variables.

Ces visualisations sont rendues interactives grâce à l'intégration de matplotlib dans l'interface tkinter :

- Zoom et déplacement pour explorer les détails
- Affichage de valeurs précises au survol des éléments

- Options pour modifier les échelles, les couleurs et autres aspects visuels
- Possibilité de filtrer les données représentées

L'utilisateur peut exporter ces visualisations sous forme d'images (PNG, JPEG, SVG) pour les inclure dans des présentations ou des documents externes.

- **Intégration avec l'environnement existant**

L'application a été conçue pour s'intégrer harmonieusement dans l'environnement informatique existant du port de Skikda, avec plusieurs fonctionnalités facilitant cette intégration

1. **Importation/exportation de données** : Support de formats standards (CSV, Excel) compatibles avec les systèmes de gestion de données existants.
2. **Sauvegarde et restauration** : Fonctionnalités pour sauvegarder l'état complet de l'application (données, modèles, configurations) et le restaurer ultérieurement.
3. **Journalisation** : Système de logs détaillés pour le suivi des opérations et le diagnostic des problèmes
4. **Documentation intégrée** : Aide contextuelle et documentation accessible directement depuis l'interface.

Ces fonctionnalités avancées font de l'application un outil complet et flexible pour la gestion et la prévention des accidents professionnels dans le contexte spécifique du port de Skikda

Annexes

Annexe 1 :

```
import pandas as pd
# Chargement des données depuis des fichiers CSV
workers_df = pd.read_csv(workers_file)
accidents_df = pd.read_csv(accidents_file)
# Manipulation des dates
accidents_df["date"] = pd.to_datetime(accidents_df["date"], errors="coerce")
accidents_df["month"] = accidents_df["date"].dt.month
# Fusion et filtrage des données
merged_df = workers_df.merge(accidents_df, on="worker_id", how="left")
filtered_df = merged_df[merged_df["age"] > 30]
...
```

(Annexe 2)

```
import numpy as np
# Génération de données synthétiques
ages = np.random.randint(20, 60, n_workers)
seniority = np.random.randint(0, 30, n_workers)
# Calculs statistiques
mean_age = np.mean(ages)
std_age = np.std(ages)
...
```

(Annexe 3)

```
from sklearn.preprocessing import StandardScaler, OneHotEncoder
from sklearn.compose import ColumnTransformer
from sklearn.pipeline import Pipeline
from sklearn.model_selection import train_test_split
from sklearn.ensemble import RandomForestClassifier
from sklearn.svm import SVC
```

```
from sklearn.neural_network import MLPClassifier
from sklearn.metrics import accuracy_score, precision_score, recall_score,
f1_score, confusion_matrix
```

(Annexe 4)

```
import joblib
# Sauvegarde d'un modèle
joblib.dump(model, model_file_path)
# Chargement d'un modèle
loaded_model = joblib.load(model_file_path)
```

(Annexe 5)

```
import tkinter as tk
from tkinter import ttk, filedialog, messagebox
# Création de la fenêtre principale
root = tk.Tk()
root.title("Accident Prediction Application")
# Création d'un widget de notebook (onglets)
notebook = ttk.Notebook(root)
notebook.pack(fill="both", expand=True)
# Création d'un onglet
tab = ttk.Frame(notebook)
notebook.add(tab, text="Import Data")
# Ajout d'un bouton
button = ttk.Button(tab, text="Import File", command=import_file_function)
button.pack(pady=10)
```

Annexe 6

```
import matplotlib.pyplot as plt
from matplotlib.backends.backend_tkagg import FigureCanvasTkAgg
# Création d'un graphique
fig, ax = plt.subplots(figsize=(8, 6))
```

```

ax.bar(feature_names, feature_importances)
ax.set_title("Feature Importance")
ax.set_xlabel("Features")
ax.set_ylabel("Importance")
# Intégration du graphique dans l'interface tkinter
canvas = FigureCanvasTkAgg(fig, master=frame)
canvas.draw()
canvas.get_tk_widget().pack(fill=tk.BOTH, expand=True)``

```

Annexe 7

Un exemple de la définition de la classe `BaseModel`, qui sert de classe abstraite pour tous les modèles d'apprentissage :

```

class BaseModel:
    """
    Classe de base pour tous les modèles d'apprentissage automatique.
    Définit l'interface commune que tous les modèles doivent implémenter.
    """
    def __init__(self, model_type):
        """
        Initialise un nouveau modèle.
        Args:
        model_type (str): Type du modèle (par exemple, 'RandomForest', 'SVM',
        'NeuralNetwork').
        """
        self.model_type = model_type
        self.model = None
        self.training_history = {}
    def build_model(self, **kwargs):
        """
        Construit le modèle avec les hyperparamètres spécifiés.
        Args:
        **kwargs: Hyperparamètres spécifiques au modèle.

```

Raises:

NotImplementedError: Cette méthode doit être implémentée par les sous-classes.

"""

```
raise NotImplementedError("Subclasses must implement this method")
```

```
def train(self, X_train, y_train, X_test=None, y_test=None):
```

"""

Entraîne le modèle et retourne les métriques de performance.

Args:

X_train: Features d'entraînement.

y_train: Cibles d'entraînement.

X_test: Features de test (optionnel).

y_test: Cibles de test (optionnel).

Returns:

dict: Dictionnaire contenant les métriques de performance.

Raises:

NotImplementedError: Cette méthode doit être implémentée par les sous-classes.

"""

```
raise NotImplementedError("Subclasses must implement this method")
```

...

(Annexe 8)

```
try:
```

```
# Code qui peut générer une exception
```

```
worker_data["age"] = int(self.entries["Age"].get().strip())
```

```
if worker_data["age"] <= 0:
```

```
raise ValueError("L'âge doit être un nombre positif")
```

```
except ValueError as e:
```

```
messagebox.showerror("Erreur de saisie", f"Erreur dans le champ Âge : {e}",
```

```
parent=self)
```

```
self.log_message(f"Erreur lors de l'ajout d'un travailleur : {e}")  
return False
```

...

En plus des messages d'erreur affichés à l'utilisateur, l'application maintient un journal des erreurs pour faciliter le débogage :

```
def log_message(self, message):  
    """  
    Ajoute un message au journal de l'application et met à jour la barre d'état.  
    Args:  
    message (str): Message à journaliser.  
    """  
    timestamp = datetime.now().strftime("%Y-%m-%d %H:%M:%S")  
    log_entry = f"[{timestamp}] {message}"  
    # Ajouter au widget de journal s'il existe  
    if hasattr(self, 'log_text') and self.log_text is not None:  
        self.log_text.insert(tk.END, log_entry + "\n")  
        self.log_text.see(tk.END) # Défiler jusqu'à la fin  
    # Mettre à jour la barre d'état  
    if hasattr(self, 'status_bar') and self.status_bar is not None:  
        self.status_bar.config(text=message)  
    # Imprimer également dans la console pour le débogage  
    print(log_entry)
```

(Annexe 9)

```
def preprocess_data(self):  
    """  
    Prétraite les données pour la modélisation.  
    Cette méthode crée un pipeline de prétraitement qui normalise les variables  
    numériques et encode les variables catégorielles. Le pipeline est ajusté  
    sur les données d'entraînement et peut ensuite être appliqué aux données  
    de test ou à de nouvelles données.    """
```

Returns:

tuple: (X_train_processed, X_test_processed) - Les données d'entraînement et de test prétraitées.

Raises:

ValueError: Si les données n'ont pas été divisées au préalable.

"""

```
if self.X_train is None or self.X_test is None:
```

```
    raise ValueError("Data not split. Call split_data() first.")
```

```
# Identifier les types de colonnes
```

```
numeric_features = self.X_train.select_dtypes(include=['int64',  
'float64']).columns.tolist()
```

```
categorical_features = self.X_train.select_dtypes(include=['object',  
'category']).columns.tolist()
```

```
# Créer les pipelines de prétraitement
```

```
numeric_transformer = Pipeline(steps=[  
    ('scaler', StandardScaler())  
])
```

```
categorical_transformer = Pipeline(steps=[  
    ('onehot', OneHotEncoder(handle_unknown='ignore'))  
])
```

```
# Créer le transformateur de colonnes
```

```
self.preprocessor = ColumnTransformer(  
    transformers=[  
        ('num', numeric_transformer, numeric_features),  
        ('cat', categorical_transformer, categorical_features)  
    ]  
)
```

```
# Ajuster et transformer les données
```

```
X_train_processed = self.preprocessor.fit_transform(self.X_train)
```

```
X_test_processed = self.preprocessor.transform(self.X_test)
```

```
return X_train_processed, X_test_processed
```

...

(Annexe 9)

```
def valide_worker_data(self):
    """
    Valide les données du formulaire d'ajout de travailleur.
    Returns:
    dict or None: Dictionnaire des données validées si la validation réussit,
    None sinon.
    """
    worker_data = {}
    try:
        # Récupérer et valider le nom
        worker_data["name"] = self.entries["Name"].get().strip()
        if not worker_data["name"]:
            messagebox.showerror("Erreur de validation", "Le nom ne peut pas être vide.", parent=self)
        return None
        # Récupérer et valider l'âge
        age_str = self.entries["Age"].get().strip()
        if not age_str:
            messagebox.showerror("Erreur de validation", "L'âge ne peut pas être vide.", parent=self)
        return None
        try:
            worker_data["age"] = int(age_str)
            if worker_data["age"] <= 0 or worker_data["age"] > 100:
                messagebox.showerror("Erreur de validation", "L'âge doit être compris entre 1 et 100.", parent=self)
            return None
        except ValueError:
            messagebox.showerror("Erreur de validation", "L'âge doit être un nombre
```

```
entier.", parent=self)
return None
# Validation similaire pour les autres champs...
return worker_data
except Exception as e:
messagebox.showerror("Erreur de validation", f"Une erreur s'est produite :
{e}", parent=self)
return None
```

```
...
```

FR Résumé (Français)

Résumé :

Cette recherche s'inscrit dans le champ de la sécurité professionnelle appliquée aux environnements portuaires, avec une attention particulière portée au port de Skikda. Face à la fréquence élevée des accidents du travail dans ce secteur stratégique, notre étude vise à proposer une solution intelligente de prédiction, basée sur l'analyse de données historiques réelles et synthétiques.

L'un des objectifs fondamentaux était **la construction d'un profil de risque pour chaque travailleur**, intégrant des variables telles que l'âge, l'ancienneté, la fonction, la zone de travail, le moment de l'incident, et le type de blessure. À partir de ces profils, nous avons entraîné et comparé trois modèles d'apprentissage automatique (SVM, Random Forest, MLP) afin d'estimer non seulement la probabilité d'un accident, mais aussi **le degré de gravité potentiel**.

Une application complète baptisée **Accident Prediction Application** a été développée en Python avec une interface intuitive en Streamlit. Elle permet :

- L'importation ou la génération automatique de données,
- L'entraînement des modèles sur les données historiques,
- L'affichage des résultats prédictifs (classe accident/non-accident + niveau de gravité),
- L'interprétation visuelle des facteurs les plus influents dans chaque prédiction.

Résultats principaux :

- Le modèle **SVM** a démontré les meilleures performances en termes de précision et de généralisation.
- Le système permet de générer des **profils personnalisés de travailleurs à haut risque**, contribuant ainsi à des stratégies de prévention ciblées.
- L'outil offre également une **interprétation graphique des risques**, facilitant la prise de décision pour les responsables HSE.

Conclusion :

Ce projet prouve la faisabilité et la pertinence d'intégrer l'intelligence artificielle dans les dispositifs de sécurité au travail. Le système proposé constitue une avancée concrète dans la

prédiction et la prévention proactive des accidents dans un environnement portuaire à haut risque.

Mots-clés : accidents professionnels, port de Skikda, apprentissage automatique, SVM, Random Forest, réseau de neurones, sécurité au travail, profil de risque, prévention.

GB Abstract (English)

Abstract:

This study addresses occupational safety in port environments, focusing on the Port of Skikda. Due to the high rate of work-related accidents in this strategic sector, the main goal was to develop an intelligent, predictive solution using historical real and synthetic data.

A key objective was to **build a detailed risk profile for each worker**, incorporating variables such as age, seniority, position, work zone, time of incident, and injury type. These profiles were used to train and compare three machine learning models (SVM, Random Forest, MLP), aiming to predict not only the occurrence but also **the severity of potential accidents**.

A fully functional application called **Accident Prediction Application** was built using Python and Streamlit. It enables:

- Import or synthetic generation of data,
- Training of predictive models,
- Output of predictions (accident likelihood and severity level),
- Visual interpretation of the most influential risk factors.

Key Results:

- The **SVM** model showed the best performance in prediction accuracy and generalization.
- The system provides **personalized high-risk worker profiles**, supporting targeted prevention.
- The app includes **clear graphical outputs** to help safety managers understand and act on risks.

Conclusion:

This project demonstrates the practical value of artificial intelligence in occupational risk prevention. The proposed system offers a concrete and adaptable solution for improving workplace safety within the Algerian port sector.

Keywords: occupational accidents, Port of Skikda, machine learning, SVM, Random Forest, neural networks, safety at work, worker profile, risk prediction.

المخلص (العربية) AE

المخلص:

تتناول هذه الدراسة موضوع السلامة المهنية في البيئات المينائية، مع تركيز خاص على ميناء سكيكدة. ونظراً لارتفاع معدل الحوادث المهنية في هذا القطاع الحيوي، هدفت الدراسة إلى تطوير حل ذكي للتنبؤ بالحوادث، بالاعتماد على بيانات حقيقية وسينثتية تم جمعها وتحليلها على مدى خمس سنوات.

من بين الأهداف الأساسية كان بناء "بروفایل" لكل عامل يشمل متغيرات مؤثرة مثل: السن، الأقدمية، الوظيفة، منطقة العمل، توقيت الحادث، ونوع الإصابة. من خلال هذه البروفایلات، قمنا بتدريب ثلاث نماذج للتعلم الآلي (SVM)، Random Forest، MLP بهدف التنبؤ بإمكانية وقوع الحادث ومستوى خطورته المحتملة.

قمنا بتطوير برنامج متكامل يدعى **Accident Prediction Application** بلغة Python وواجهة Streamlit تفاعلية، يتيح:

- إدخال البيانات أو توليدها تلقائياً،
- تدريب النماذج على البيانات التاريخية،
- عرض نتائج التنبؤ (حادث/غير حادث + درجة الخطورة)،
- تفسير مرئي للعوامل المؤثرة في كل حادثة.

النتائج الأساسية:

- أظهر نموذج SVM أفضل أداء من حيث الدقة والقدرة على التعميم.
- يسمح التطبيق بإنشاء بروفایلات مفصلة للعمال المعرضين للخطر، مما يدعم اتخاذ قرارات وقائية مستهدفة.
- كما يوفر رسوماً بيانية تفسيرية تساعد مسؤولي السلامة على فهم الحوادث قبل وقوعها.

الخلاصة:

تثبتت هذه الدراسة فعالية الذكاء الاصطناعي في تحسين نظم الوقاية والسلامة في الموانئ. يمثل النظام المطور خطوة عملية نحو التحول الرقمي للسلامة المهنية في الجزائر، ويساهم في تقليل الحوادث من خلال أدوات تنبؤية دقيقة وسهلة الاستخدام.

الكلمات المفتاحية: الحوادث المهنية، ميناء سكيكدة، التعلم الآلي، SVM، Random Forest، الشبكات العصبية، البروفایل
الوظيفي، السلامة المهنية، الوقاية من المخاطر.