



وزارة التعليم العالي والبحث العلمي
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

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

معهد الصيانة والأمن الصناعي
Institut de Maintenance et de Sécurité Industrielle

Département de Maintenance en instrumentation

MÉMOIRE

Pour l'obtention du diplôme de Master

Filière : Génie Industriel

Spécialité : Maintenance de l'Automatisme et de l'Instrumentation

Thème

Assistant intelligent au service de l'industrie basé
sur un système collaboratif Homme-Machine

Présenté et soutenu publiquement par :

ABDELAZIZ Nada

Devant le jury composé de :

Nom et Prénom	Grade	Etablissement	Qualité
HADJ DJELLOUL Kheira	MAA	IMSI-Univ. D'Oran2	Présidente
BELKHODJA Leila	MCB	IMSI-Univ. D'Oran2	Encadrante
CHENNOUFI Mohamed	PR	IMSI-Univ. D'Oran2	Examineur

Année 2025/2026

Résumé

Ce travail présente le développement d'un assistant intelligent basé sur la collaboration Homme–Machine pour la surveillance de l'opérateur dans un environnement industriel. Le système proposé utilise les technologies de vision par ordinateur afin de détecter la fatigue à travers l'analyse des yeux ainsi que les mauvaises postures du dos et de la tête. Développé avec OpenCV et MediaPipe, ce système permet d'améliorer la sécurité industrielle, de réduire les erreurs humaines et de renforcer l'assistance à l'opérateur.

ملخص

يقدم هذا العمل تطوير مساعد ذكي قائم على التعاون بين الإنسان والآلة لمراقبة المشغل داخل البيئة الصناعية. يعتمد النظام على تقنيات الرؤية الحاسوبية للكشف عن التعب من خلال تحليل العينين واكتشاف الوضعيات الخاطئة للظهر والرأس. تم، ويساهم في تحسين السلامة الصناعية وتقليل الأخطاء البشرية *MediaPipe* و *OpenCV* تطوير النظام باستخدام مكتبات وتعزيز دعم المشغل.

Abstract

This work presents the development of an intelligent assistant based on Human–Machine collaboration for operator monitoring in an industrial environment. The proposed system uses computer vision technologies to detect fatigue through eye analysis and identify bad postures of the back and head. Developed using OpenCV and MediaPipe, the system aims to improve industrial safety, reduce human errors, and enhance operator assistance.

Remerciements

Au terme de ce travail, il m'est essentiel d'exprimer ma profonde reconnaissance envers toutes les personnes qui ont participé, de près ou de loin, à la réalisation de ce mémoire.

Je remercie avant tout **ALLAH**, Le Tout-Puissant, de m'avoir accordé la force, la patience et la persévérance nécessaires tout au long de mon parcours universitaire, ainsi que le courage d'achever ce travail.

J'adresse mes plus sincères et profondes remerciements à mon encadrante, **Dr. BELKHODJA Leila**, pour la qualité exceptionnelle de son encadrement, pour sa disponibilité constante, sa patience et sa rigueur scientifique. Ses précieux conseils, son soutien permanent ainsi que ses orientations pertinentes ont été d'une aide inestimable tout au long de l'élaboration de ce mémoire. Son accompagnement attentif et ses encouragements ont grandement contribué à l'aboutissement de ce travail dans les meilleures conditions.

Enfin, j'exprime toute ma gratitude à toutes les personnes qui ont contribué, directement ou indirectement, à la réalisation de ce projet par leur aide et leurs encouragements.

Dédicaces

À mes très chers parents,
aucun mot ne saurait exprimer l'amour, la reconnaissance et le respect que je vous porte.
Merci pour tous les sacrifices consentis afin de me voir avancer et réussir. Votre soutien indéfectible, vos prières, votre patience et votre amour ont toujours été ma plus grande force. Ce travail est avant tout le fruit de vos efforts et de votre confiance en moi.

À ma chère
petite princesse **Ayla Toline**,
source de tendresse, de joie et de bonheur. Ton innocence et ton sourire illuminent les cœurs et apportent une lumière particulière à chaque instant.

À mes trois frères et ma sœur ,
Dadou , Djahid ,Nani et Rachida
pour leur présence, leur affection et leurs encouragements constants. Merci d'avoir été à mes côtés dans les moments de doute comme dans les moments de joie. Que ce travail soit le témoignage de mon attachement et de ma profonde gratitude envers vous.

À mon amie
Yasmin,
pour avoir été une véritable source de force et l'une des raisons qui m'ont permis de continuer sans abandonner, grâce à son soutien, sa présence et ses encouragements constants.

À mes chers amis,
Hadil ,
Hadjer, Yasmin , Nada, Bouchra
qui ont illuminé ce parcours par leur sincérité, leur soutien et les précieux souvenirs partagés. Merci pour chaque mot d'encouragement, chaque moment de réconfort et chaque sourire qui ont rendu cette aventure plus belle et plus légère.

Enfin, à toutes les personnes qui occupent une place particulière dans mon cœur et qui ont contribué, de près ou de loin, à mon parcours personnel et académique.

Liste des acronymes

TMS : Troubles Musculo-Squelettiques

H-CPPS : Human-Cyber-Physical Production Systems (Systèmes de production cyber-physiques centrés sur l'humain)

IHM : Interface Homme-Machine

VR : Virtual Reality (Réalité Virtuelle)

Cobot : Collaborative Robot (Robot collaboratif)

Robotique flexible : Ensemble de systèmes robotiques adaptables aux changements de tâches ou de production

Cyber : Cyberattaques ou incidents liés à la cybersécurité

IIoT : Industrial Internet of Things, ou Internet Industriel des Objets.

EPI : Équipement de Protection Individuelle

Big Data : grandes quantités de données analysées pour en extraire des informations utiles.

ASM : Abnormal Situation Management (Gestion des situations anormales)

SIL : Safety Integrity Level (Niveau d'intégrité de sécurité)

PL : Performance Level (Niveau de performance en sécurité)

PLC : Programmable Logic Controller (Automate Programmable Industriel – API en français)

SCADA : *Supervisory Control And Data Acquisition* (Système de supervision, de contrôle et d'acquisition de données.)

Tchernobyl, Bhopal, Piper Alpha ou Deepwater Horizon : Des grandes catastrophes industrielles

I5.0 : Industrie 5.0

IHM : Interface Homme-Machine

IoT : Internet of Things (Internet des Objets)

CPS : Cyber-Physical Systems (Systèmes Cyber-Physiques)

CV : Computer Vision (Vision par Ordinateur)

EAR : Eye Aspect Ratio (Ratio d'Ouverture de l'Œil)

MAR : Mouth Aspect Ratio (Ratio d'Ouverture de la Bouche)

FPS : Frames Per Second (Images par Seconde)

ROI : Region of Interest (Région d'Intérêt)

CLAHE : Contrast Limited Adaptive Histogram Equalization

PnP : Perspective-n-Point

Yaw : Rotation horizontale de la tête (gauche/droite)

Pitch : Inclinaison de la tête vers l'avant ou l'arrière

Roll : Inclinaison latérale de la tête

GUI : Graphical User Interface (Interface Graphique Utilisateur)

API : Application Programming Interface

CPU : Central Processing Unit (Processeur)

VGA : Video Graphics Array

EEG : Électroencéphalogramme

RGB : Red Green Blue

BGR : Blue Green Red

OpenCV : Open Source Computer Vision Library

UML : Unified Modeling Language (Langage de Modélisation Unifié)

Liste des figures

Chapitre I : Contexte industriel et facteur humain

Figure 1.1 : Chronologie des révolutions industrielles de l'Industrie 1.0 à 5.0	3
Figure 1.2 : Les principales technologies habilitantes de l'Industrie 4.0	7
Figure 1.3 : Les technologies clés de l'Industrie 5.0	9
Figure 1.4 : Types d'interventions dans l'industrie de procédés	15

Chapitre II : Conception et Modélisation du Système

Figure 2.1 : Architecture globale du système pipeline étendu à 6 blocs et 8 indicateurs	25
Figure 2.2 Diagramme des modules du système et flux de données.....	26
Figure 2.3 :Eye Aspect Ratio (EAR) — œil ouvert vs fermé et formule de calcul.....	28
Figure 2.4 : Mouth Aspect Ratio (MAR) — bouche fermée vs bâillement	28
Figure 2.5 Stare Detection (timeline de détection de la fixation prolongée).....	29
Figure 2.6 : Orientation de la tête (Yaw, Pitch, Roll et seuils de détection	30
Figure 2.7 : Angle cervical et charge sur la colonne	31
Figure 2.8 : Flowchart du système étendu.....	34

Chapitre III : Conception et Modélisation du Système

Figure 3.1 : Fenêtre principale de l'interface graphique en temps réel.....	44
Figure 3.2 : Déclenchement des alertes visuelles sur l'IHM (Fatigue et Distraction)	45
Figure 3.3 : L'opérateur assis bien droit, le squelette cyan bien aligné.....	46
Figure 3.3 : L'opérateur affaissé vers l'avant, le squelette cyan courbé	47

Liste des tableaux

Chapitre I : Contexte industriel et facteur humain

Tableau 1.1 : Principales familles de risques pour l'opérateur.....	14
Tableau 1.2 : Principales limites des systèmes actuels du point de vue de l'opérateur et leurs impacts sur la sécurité.....	18

Chapitre II : Conception et Modélisation du Système

Tableau 2.1 : Comparaison des approches de détection de fatigue.....	24
Tableau 2.2 : Récapitulatif des 8 indicateurs du système.....	32

Chapitre III : Conception et Modélisation du Système

Tableau 3.1 : Synthèse des indicateurs métriques, seuils critiques et logiques d'alertes du système unifié	51
---	----

SOMMAIRE:

Résumé	VII
Remerciements.....	VII
Dédicace.....	VII
Listes des acronymes et symboles	VII
Listes des figures et des tableaux	VII
Introduction générale	VII

I. Chapitre I Contexte industriel et facteur humain

I.1 Introduction	2
I.2 Évolution des systèmes industriels.....	3
I.3 La transformation industrielle à l'ère de l'Industrie 4.0	4
I.3.1 Automatisation industrielle et sécurité.....	4
I.3.2 Industrie 4.0 : digitalisation et supervision	5
I.4 Industrie 5.0 : humain au centre du système.....	7
I.5 Systèmes d'informatique industrielle	10
I.5.1 Niveau terrain : capteurs liés à la sécurité.....	10
I.5.2 Niveau contrôle : automates et fonctions de sécurité.....	10
I.5.3 Niveau supervision : SCADA et gestion des alarmes.....	11
I.5.4 Niveau gestion : traçabilité et analyse des incidents.....	11
I.6 Environnement de travail de l'opérateur industriel.....	12
I.6.1 Poste de travail et ergonomie	12
I.6.2 Interfaces Homme-Machine (IHM).....	12
I.6.3 Conditions de travail et contraintes opérationnelles.....	13
I.7 Sécurité de l'opérateur en milieu industriel	13
I.7.1 Risques industriels et dangers pour l'opérateur	13
I.7.2 Systèmes de sécurité existants.....	14
I.7.3 Limites des dispositifs de sécurité actuels	15

I.8 Rôle de l'opérateur et interactions Homme–Machine	16
I.8.1 Supervision et surveillance des procédés	16
I.8.2 Gestion des situations anormales	16
I.8.3 Impact du facteur humain sur la sécurité	17
I.9 Limites actuelles du point de vue de la sécurité et du poste opérateur	18
I.9.1 Surcharge d'informations et alarmes critiques.....	18
I.9.2 Manque d'assistance intelligente à l'opérateur.....	19
I.9.3 Risques d'erreurs humaines	19
I.9.4 Insuffisance d'adaptation du système à l'opérateur	20
I.10 Besoin d'un assistant intelligent pour la sécurité et le poste opérateur	20
I.10.1 Aide à la prévention des risques	20
I.10.2 Assistance en temps réel à l'opérateur	20
I.10.3 Amélioration de l'environnement de travail.....	21
I.11 Conclusion.....	21

II. Chapitre II Conception et Modélisation du Système

II.1 Introduction.....	23
II.2 Concept du système propose.....	23
II.2.1 Présentation générale	23
II.2.2 Objectifs du système	24
II.2.3 Analyse comparative des approches	24
II.2.4 Piliers conceptuels.....	24
II.3 Architecture du système.....	25
II.3.1 Vue globale	25
II.3.2 Principes de conception	25
II.4 Description détaillée des modules	25
II.4.1 Module acquisition (caméra)	26
II.4.2 Module traitement (MediaPipe / OpenCV)	27
II.4.3 Module analyse : (indicateurs de fatigue oculaire).....	27
II .4.3.1 Eye Aspect Ratio	27
II .4.3.2 Mouth Aspect Ratio (MAR).....	28
II .4.3.3 Stare Detection (yeux ouverts trop longtemps).....	Error! Bookmark not defined.
II.4.4 Module analyse (indicateurs posturaux et d'orientation)	30

II.4.5 Tableau récapitulatif des indicateurs.....	31
II.5 Module décision et gestion des alertes	32
II.5.1 Architecture de la logique de décision.....	32
II.5.2 Niveaux d'alerte et critères de déclenchement.....	33
II.5.3 Interface utilisateur	33
II.6 Fonctionnement du système.....	33
II.6.1 Cycle de traitement étendu	33
II.6.2 Détail des étapes	34
II.6.3 Gestion des cas particuliers.....	35
II.7 Avantages du système proposé	35
II.7.1 Avantages techniques	35
II.7.2 Avantages pratiques et économiques	35
II.7.3 Limites et perspectives	36
II.8 Conclusion.....	36

III. Chapitre III Mise en Oeuvre pratique

III.1 Introduction.....	37
III.2 Environnement de développement.....	37
III.2.1 Environnement matériel	37
III.2.2 Environnement logiciel	38
III.3 Implémentation du module de détection des yeux	38
III.3.1 Acquisition vidéo par caméra.....	38
III.3.2 Détection des landmarks des yeux avec MediaPipe.....	38
III.3.3 Calcul du Eye Aspect Ratio (EAR)	39
III.3.4 Détection de fatigue par fermeture des yeux.....	39
III.3.5 Détection du staring.....	39
III.3.6 Déclenchement de l'alarme sonore	39
III.3.7 Résultats du module yeux.....	40
III.4 Implémentation du module de distraction de la tête	40
III.4.1 Détection de la position de la tête	40
III.4.2 Calcul du décalage horizontal du nez.....	40
III.4.3 Détection de distraction	41

III.4.4 Génération d’alerte sonore	41
III.4.5 Résultats expérimentaux.....	41
III.5 Implémentation du module de détection de posture du dos	41
III.5.1 Acquisition des points corporels	41
III.5.2 Détection de l’oreille et de la hanche	42
III.5.3 Calcul de l’angle de posture	42
III.5.4 Détection des mauvaises postures	42
III.5.5 Affichage des résultats.....	42
III.5.6 Résultats expérimentaux.....	43
III.6 Interface graphique du système	43
III.6.1 Affichage vidéo temps réel.....	43
III.6.2 Affichage des indicateurs	44
III.6.3 Visualisation des points détectés	48
III.7 Tests et validation	49
III.7.1 Test de fatigue.....	49
III.7.2 Test de staring.....	50
III.7.3 Test distraction tête.....	50
III.7.4 Test mauvaise posture.....	51
III.7.5 Analyse des résultats	52
III.8 Limites du système	52
III.9 Conclusion	53
Annexe A.....	56
Annexe B	59

Introduction générale

L'histoire de l'industrie a toujours été marquée par des transformations majeures qui ont profondément changé les méthodes de production et de travail. Aujourd'hui, l'Industrie 5.0 représente une nouvelle étape fondée sur l'intelligence des systèmes, l'interconnexion et les technologies avancées telles que l'Internet des objets, les systèmes cyber-physiques et la robotique intelligente. Ces technologies ont permis l'émergence des usines intelligentes capables de collecter et d'analyser des données en temps réel afin d'améliorer la performance et la flexibilité des processus industriels.

Cependant, malgré ces avancées technologiques, l'humain reste souvent le maillon le moins protégé dans l'environnement industriel. Alors que les machines bénéficient de systèmes de surveillance avancés pour prévenir les pannes, les opérateurs sont encore exposés à des conditions de travail exigeantes pouvant entraîner fatigue, stress et mauvaises postures.

Dans les milieux industriels, la fatigue humaine constitue un facteur de risque important. Elle affecte progressivement la vigilance, la posture, la coordination des mouvements et le temps de réaction, augmentant ainsi le risque d'erreurs et d'accidents. Les troubles musculo-squelettiques (TMS), les blessures liées aux mauvaises postures et les erreurs causées par un manque de concentration figurent parmi les problèmes les plus fréquents dans l'industrie moderne. Ces risques impactent non seulement la santé et le bien-être de l'opérateur, mais également la productivité et la sécurité globale de l'entreprise.

Face à cette réalité, il devient nécessaire de développer des systèmes intelligents capables de prendre en compte l'état physique de l'opérateur et de prévenir les situations dangereuses avant qu'elles ne provoquent des blessures.

C'est dans cette perspective que s'inscrit ce mémoire de fin d'études. Le projet proposé vise à développer un assistant intelligent capable de détecter en temps réel les signes de fatigue de l'opérateur à travers l'analyse de la fermeture des yeux et des mauvaises postures, afin d'améliorer la sécurité, réduire les risques d'accidents et renforcer la collaboration Homme-Machine dans l'environnement industriel.

I. Chapitre I

Contexte industriel et facteur humain

I.1 Introduction

La quatrième révolution industrielle, communément appelée Industrie 4.0, a profondément transformé le secteur manufacturier grâce à l'intégration de technologies numériques avancées telles que les systèmes cyber-physiques, l'Internet industriel des objets (IIoT) et l'intelligence artificielle. Ces technologies ont favorisé l'émergence de systèmes de fabrication intelligents capables d'améliorer la flexibilité, l'efficacité et la personnalisation des processus de production, notamment dans l'industrie automobile caractérisée par des séries de production de plus en plus courtes et variées .

Si ces innovations apportent des gains significatifs en termes de performance et de productivité, elles posent également des enjeux humains majeurs. En effet, l'introduction de technologies automatisées modifie les environnements de travail et peut avoir des effets directs et indirects sur la santé et la sécurité des opérateurs, en particulier sur la charge cognitive, le stress et les exigences organisationnelles de l'environnement de travail.

Les recherches montrent que les technologies Industrie 4.0 imposent des exigences cognitives et organisationnelles accrues, ce qui peut générer de nouveaux risques professionnels et des effets négatifs sur le bien-être des travailleurs. La transformation numérique ne peut être pleinement efficace sans la prise en compte rigoureuse de ces facteurs humains dans la conception et l'exploitation des systèmes de production .

L'intégration de la fabrication intelligente repose sur l'utilisation de robots collaboratifs, de systèmes interconnectés et de l'analyse de données en temps réel. Si ces technologies améliorent l'efficacité, elles peuvent également exposer les opérateurs à des défis ergonomiques et cognitifs liés à la supervision de systèmes complexes et à la collaboration avec des machines automatisées.

Parmi les risques évoqués dans la littérature figurent notamment une augmentation de la charge mentale, des contraintes liées à la gestion de l'information, ainsi que des interactions Homme-Machine plus exigeantes qui peuvent conduire à des situations potentiellement dangereuses sans assistance adaptée .

Dans ce contexte, ce mémoire se concentre sur le développement d'un assistant intelligent centré sur l'opérateur, visant à améliorer la sécurité, réduire la charge cognitive et optimiser l'environnement de travail. L'objectif est d'aller au-delà des approches traditionnelles uniquement

centrées sur la machine, pour proposer des solutions qui accompagnent réellement l'opérateur dans ses tâches quotidiennes, tout en maintenant l'efficacité des systèmes automatisés.

À travers l'analyse de cas concrets issus de lignes de production automatisées, ce chapitre propose un état des lieux complet des systèmes industriels, des interactions Homme–Machine et des principaux enjeux liés à la sécurité et au confort de l'opérateur. Cette analyse met en évidence les limites des solutions existantes et justifie la nécessité de concevoir des outils intelligents capables de sécuriser et d'améliorer le poste de travail dans les usines modernes.[1]

I.2 Évolution des systèmes industriels

La révolution industrielle débute à la fin du XVIII^e siècle avec l'Industrie 1.0, caractérisée par la mécanisation grâce à la machine à vapeur. L'invention du métier à tisser mécanique par Edmund Cartwright en 1784 marque une étape déterminante, en améliorant considérablement la productivité dans l'industrie textile. Cette période transforme profondément le travail humain, qui passe d'un effort artisanal manuel à une supervision de machines mécanisées.

Au début du XX^e siècle, l'Industrie 2.0 introduit l'électricité et les chaînes de production, permettant la production de masse. L'organisation scientifique du travail restructure alors le rôle de l'opérateur, qui devient davantage spécialisé et intégré dans un système productif standardisé.

L'Industrie 3.0 marque ensuite l'ère de l'automatisation, grâce à l'électronique, à l'informatique industrielle et aux automates programmables. L'opérateur évolue vers un rôle de supervision et de contrôle des systèmes automatisés, plutôt que d'exécution directe des tâches.

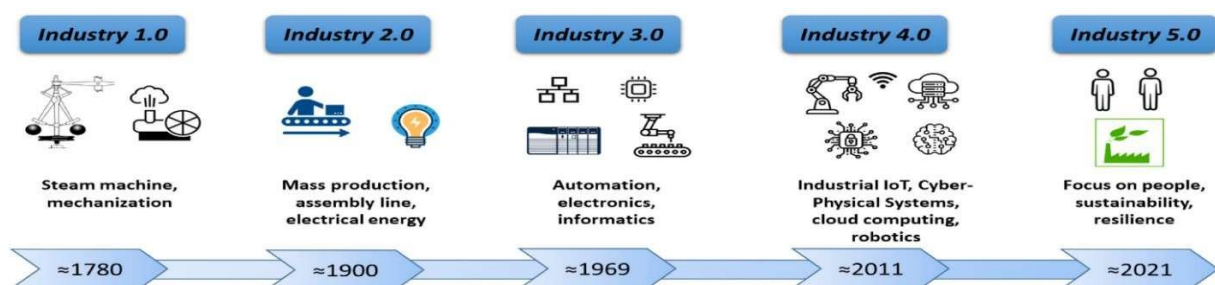


Figure 1.1; : Chronologie des révolutions industrielles de l'Industrie 1.0 à l'Industrie 5.0

Avec l'Industrie 4.0, la transformation numérique s'intensifie. L'intégration de technologies avancées telles que l'Internet industriel des objets (IIoT), les systèmes cyber-physiques, l'intelligence artificielle, les jumeaux numériques, la robotique industrielle et la fabrication additive permet une connectivité accrue et une production intelligente en temps réel. Le concept d'« usine intelligente » devient central, favorisant l'autonomie des systèmes et l'optimisation continue des performances. Toutefois, cette évolution soulève également des défis importants, notamment en matière d'emploi, d'adaptation des compétences et de surcharge informationnelle pour les opérateurs.[2]

Face à ces enjeux émerge le concept d'Industrie 5.0, qui met l'accent sur la collaboration homme-machine, la durabilité et la résilience des systèmes industriels. Contrairement à l'Industrie 4.0, principalement orientée vers la performance technologique, l'Industrie 5.0 recentre le modèle industriel sur l'humain. L'opérateur n'est plus simplement un superviseur de systèmes intelligents, mais un acteur central collaborant activement avec des technologies avancées dans un environnement sécurisé, durable et adaptatif.

Cette évolution progressive montre que, malgré l'augmentation du niveau d'automatisation, la place de l'opérateur demeure essentielle. Son rôle se transforme continuellement, passant de l'exécution manuelle à la supervision numérique, puis à la collaboration intelligente avec les systèmes industriels.[3]

I.3 La transformation industrielle à l'ère de l'Industrie 4.0

I.3.1 Automatisation industrielle et sécurité

Dans la recherche d'une automatisation toujours plus avancée et d'une amélioration continue de la productivité, l'Industrie 4.0 impose une transformation profonde des systèmes industriels traditionnels. Elle repose sur une informatisation massive des processus, une interconnexion permanente des équipements et une intégration à la fois horizontale (entre machines et services) et verticale (entre les différents niveaux hiérarchiques de l'entreprise).

Dans ce cadre, la production industrielle peut être considérée comme un système cyber-physique (CPS), c'est-à-dire un système intelligent qui relie les composants physiques (machines, capteurs,

équipements) aux capacités numériques (logiciels, algorithmes, bases de données). Ces systèmes permettent une gestion dynamique et intelligente des processus industriels.[4]

Grâce à cette approche, les usines deviennent plus flexibles, adaptatives et capables de s'auto-optimiser. Les machines communiquent entre elles en temps réel, les données circulent de manière continue, et les décisions peuvent être prises plus rapidement sur la base d'informations précises. On parle alors d'un environnement de production intelligent, souvent orienté vers les services.

Cependant, cette évolution technologique repose sur plusieurs technologies clés. Ces outils permettent d'atteindre un niveau inédit d'automatisation et de connectivité.

Toutefois, si cette transformation améliore fortement la performance technique des systèmes industriels, elle complexifie également l'environnement de travail de l'opérateur. L'interconnexion massive et la quantité importante d'informations générées peuvent entraîner une surcharge cognitive, rendant la supervision plus exigeante. [5]

I.3.2 Industrie 4.0 : digitalisation et supervision

Le concept d'Industrie 4.0 est souvent désigné par différents termes utilisés de manière interchangeable. On parle parfois d'Âge numérique, d'Internet of Everything (IoE), d'Internet industriel ou encore de Smart Manufacturing. En Europe, l'expression *Industrie 4.0* est la plus répandue, tandis qu'aux États-Unis, on privilégie davantage le terme *Smart Manufacturing*. On retrouve également des notions proches comme transformation digitale, digitalisation industrielle ou simplement digitalisation, bien que ces termes ne possèdent pas toujours une définition claire et universelle.

Dans le contexte industriel, la digitalisation peut être comprise comme l'intégration de dispositifs numériques, de logiciels et de réseaux de communication permettant la collecte, la transmission, le stockage et l'analyse des données issues des machines et des processus de production. Elle constitue le socle technologique de l'Industrie 4.0.

Contrairement à ce que l'on pourrait penser, l'Industrie 4.0 ne correspond pas à une technologie unique. Il s'agit plutôt d'une convergence de plusieurs technologies qui existaient déjà, mais qui atteignent aujourd'hui un niveau de maturité permettant leur intégration globale dans les systèmes industriels.

Parmi les technologies dites « habilitantes » (enabling technologies), les plus souvent citées dans [figure 1.2] :

- Internet Industriel des Objets (IIoT)
- Systèmes cyber-physiques (CPS)
- Big Data et l'intelligence artificielle
- Cloud Computing
- Cybersécurité industrielle
- Robotique collaborative
- Fabrication additive (impression 3D)
- Réalité virtuelle et augmentée
- Simulation numérique
- Intégration verticale et horizontale des systèmes
- Connectivité sans fil (5G)
- Jumeau numérique (Digital Twin)
- Edge Computing
- Blockchain.[6]

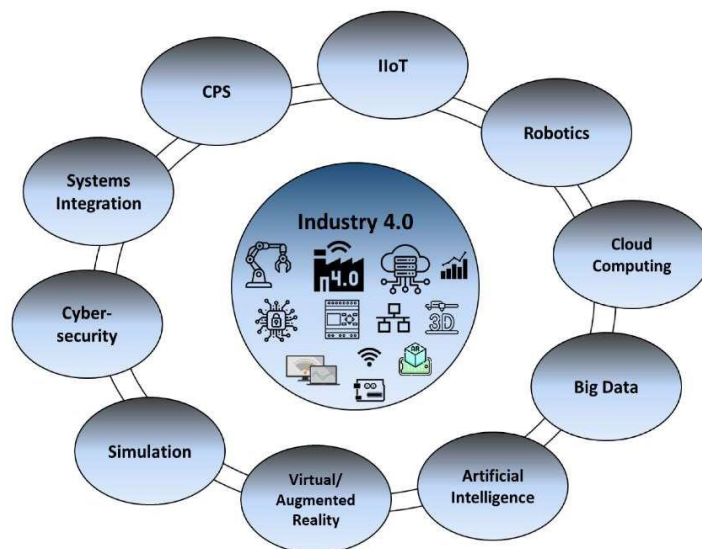


Figure 1.2: Les principales technologies habilitantes de l'Industrie 4.0 [7]

Cependant, il n'existe pas de consensus strict sur le nombre exact de ces technologies ni sur leur classification. Certaines sources parlent de neuf piliers, d'autres en mentionnent cinq, huit ou douze.

Un point central de l'Industrie 4.0 est la convergence entre les systèmes OT (Operational Technology), liés à la production (capteurs, automates, SCADA), et les systèmes IT (Information Technology), liés à la gestion (ERP, MES, systèmes d'information). Cette intégration, appelée convergence IT/OT, permet une circulation fluide des données à tous les niveaux de l'entreprise et favorise une automatisation plus avancée et plus intelligente.

Les systèmes cyber-physiques (CPS) sont souvent considérés comme l'épine dorsale de l'Industrie 4.0. Ils permettent l'interaction autonome entre composants physiques et numériques. De même, l'IIoT est fréquemment présenté comme le principal moteur de cette révolution, car il connecte les machines entre elles via la communication Machine-to-Machine (M2M), générant un volume important de données exploitables.

Toutefois, malgré l'enthousiasme autour de ce paradigme, certaines voix critiques soulignent que l'Industrie 4.0 pourrait simplement être un regroupement de technologies déjà connues, plutôt qu'une véritable révolution. L'absence d'une définition normalisée contribue également à une certaine confusion conceptuelle.

En définitive, l'Industrie 4.0 ne constitue pas une nouvelle technologie en soi, mais plutôt l'intégration coordonnée de technologies numériques et industrielles visant à améliorer la performance, la flexibilité, la durabilité et l'efficacité des systèmes de production.[8]

I.4 Industrie 5.0 : humain au centre du système

L'Industrie 5.0 représente une nouvelle étape dans l'évolution industrielle. Contrairement à l'Industrie 4.0, principalement orientée vers l'automatisation, la performance et l'optimisation des processus, l'Industrie 5.0 place désormais l'humain au cœur du système de production. Elle met l'accent sur la collaboration homme-machine, la durabilité et la résilience des systèmes industriels.

Ce nouveau paradigme industriel vise à intégrer les technologies avancées telles que l'intelligence artificielle, la robotique et les systèmes numériques non pas pour remplacer l'humain, mais pour

renforcer ses capacités. L'objectif est de créer des environnements de production plus adaptatifs, personnalisés et respectueux de l'environnement.[9]

Alors que l'Industrie 4.0 privilégiait des systèmes fortement automatisés, pilotés par les données et les algorithmes, l'Industrie 5.0 réintroduit la dimension humaine dans les processus décisionnels. Elle reconnaît la valeur de l'expertise, de la créativité et de la capacité d'adaptation de l'opérateur, notamment dans des contextes complexes où l'intelligence artificielle seule ne suffit pas.

Ainsi, l'Industrie 5.0 ne constitue pas une rupture technologique totale, mais plutôt une évolution vers un modèle industriel plus équilibré, où la technologie et l'humain collaborent pour améliorer à la fois la performance, la sécurité et la durabilité.[10]

Les technologies clés de l'industrie 5.0 sont résumées dans la (figure 1.3)

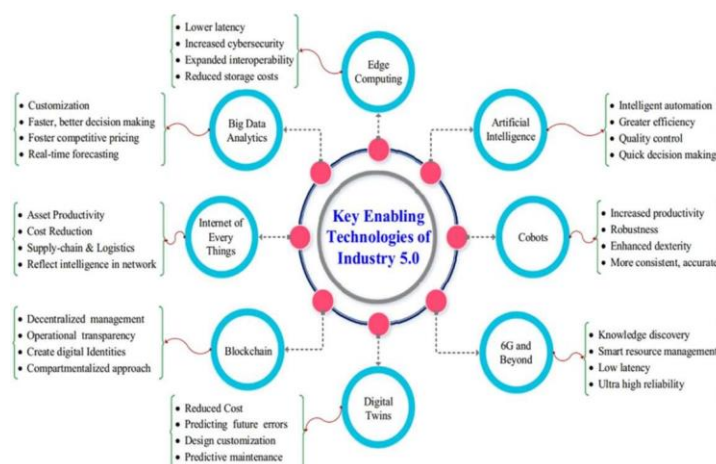


Figure 1.3: Les technologies clés de l'Industrie 5.0[11]

Parmi ses caractéristiques principales nous citons :

❖ **Collaboration centrée sur l'humain**

La caractéristique fondamentale de l'Industrie 5.0 réside dans la relation symbiotique entre l'humain et la machine. Contrairement aux approches précédentes qui visaient principalement

l'automatisation complète, cette nouvelle vision cherche à établir une véritable collaboration intelligente entre l'opérateur et les technologies avancées.

Les robots, l'intelligence artificielle et les systèmes automatisés ne remplacent plus l'humain, mais travaillent à ses côtés. Les tâches répétitives, pénibles ou dangereuses sont confiées aux machines, tandis que l'opérateur se concentre sur des activités à plus forte valeur ajoutée, telles que la prise de décision, la créativité, l'analyse et la résolution de problèmes.[12]

Cette coopération améliore non seulement la productivité globale, mais également la satisfaction au travail et la sécurité des employés. Les robots collaboratifs, appelés *cobots*, illustrent parfaitement cette évolution : conçus pour interagir directement avec l'humain en toute sécurité, ils facilitent un environnement de travail plus flexible et plus sûr.[13]

❖ **Personnalisation et production sur mesure**

L'Industrie 5.0 marque une transition importante de la production de masse vers la personnalisation de masse. Grâce à des technologies comme l'impression 3D, l'intelligence artificielle et l'apprentissage automatique, les entreprises peuvent adapter leurs lignes de production afin de fabriquer des produits personnalisés à grande échelle.

Ces technologies permettent un prototypage rapide, une réduction des cycles de développement et une grande flexibilité dans la conception des produits. Il devient ainsi possible de répondre aux besoins spécifiques des clients sans compromettre l'efficacité ni augmenter significativement les coûts.[14]

Les systèmes de conception assistés par l'IA jouent également un rôle clé en optimisant les produits selon les préférences des consommateurs et les données collectées en temps réel, renforçant ainsi la compétitivité des entreprises.[15]

❖ **Durabilité et économie circulaire**

Un autre pilier essentiel de l'Industrie 5.0 est son engagement en faveur de la durabilité. Ce paradigme vise à réduire l'impact environnemental des activités industrielles en intégrant des technologies vertes, des sources d'énergie renouvelable et des systèmes de production écoénergétiques.[16]

Les technologies numériques, notamment l'Internet des objets (IoT), permettent une surveillance en temps réel des ressources, facilitant la maintenance prédictive et limitant le gaspillage. Cette approche contribue à prolonger la durée de vie des équipements et à optimiser l'utilisation des matières premières.

Par ailleurs, l'Industrie 5.0 encourage le recyclage et la réutilisation des matériaux afin de mettre en place un système de production en boucle fermée, conforme aux principes de l'économie circulaire. L'objectif est de concilier performance industrielle et responsabilité environnementale.[17]

I.5 Systèmes d'informatique industrielle

Un système industriel informatisé est un ensemble complexe de ressources humaines et matérielles (machines, capteurs, actionneurs) piloté par des outils informatiques (logiciels, automates, serveurs) dont l'objectif est de transformer une matière d'œuvre ou de réaliser un service de manière automatisée, tout en assurant le traitement de l'information en temps réel pour optimiser la production, la sécurité et la traçabilité.[18]

L'architecture des systèmes d'informatique industrielle définit comment capteurs, automates, réseaux, supervision, analyse de données et sécurité sont organisés pour piloter et optimiser la production. La recherche montre une évolution forte des architectures pyramidales classiques vers des architectures distribuées, orientées services, données et cybersécurité.

I.5.1 Niveau terrain : capteurs liés à la sécurité

- Capteurs de gaz, température, vibration, fumée, présence opérateur, etc., surveillent en continu l'environnement et l'état des machines pour prévenir incendies, fuites, chocs, surchauffes, etc.[19]

- **Les architectures IIoT/IoT-sécurité** multiplient les capteurs hétérogènes, souvent sans fil, avec traitement local minimal pour garantir la réactivité des fonctions de sécurité .[20]

I.5.2 Niveau contrôle : automates et fonctions de sécurité

-**PLC et PLC** de sécurité implémentent les fonctions arrêt d'urgence, interverrouillages, mise en état sûr, conformément aux niveaux SIL/PL (IEC 61508, ISO 13849-1) .[21]

-Des architectures dédiées permettent des réponses temps réel (5–250 ms) et des modes redondants/fautes tolérantes pour atteindre SIL $\geq$ 2 .

-Des solutions à faible coût ajoutent des fonctions de sécurité sur des PLC existants (bibliothèques logicielles, redondance) tout en respectant les exigences SIL .[22]

I.5.3 Niveau supervision : SCADA et gestion des alarmes

-Le SCADA regroupe données des automates, gère alarmes, événements, enregistrement, visualisation HMI et pilotage à distance .

-La gestion d’alarmes vise détection précoce des dérives et déclenchement d’actions (arrêt, consignes opérateur) avec journalisation pour analyse ultérieure .

-Les SCADA modernes (y compris IoT-basés, mobiles) ajoutent alertes SMS, notifications, historisation et accès distant sécurisé.[23]

I.5.4 Niveau gestion : traçabilité et analyse des incidents

Au niveau gestion, l’objectif est de transformer les événements techniques (alarmes, incidents, near-miss, arrêts) en connaissance exploitable pour la sécurité, la qualité et la performance industrielle.

❖ Traçabilité : quoi, qui, où, quand, comment ?

La traçabilité repose sur l’enregistrement systématique des événements : identifiant d’équipement, opérateur, ordre de fabrication, paramètres process, horodatage précis, identités numériques, etc.

Dans les infrastructures distribuées, les logs doivent permettre de remonter à la source de chaque action pour répondre aux questions qui a fait quoi, où, quand et limiter l’impact des incidents .

Des modèles de données spécifiques (gozinto graph, bill of lots) permettent de relier lots matière, opérations et produits finis, afin de retrouver tous les produits affectés par un composant défectueux ou un incident de process .

❖ Analyse des incidents : de la base de données au retour d’expérience

Les rapports d’incidents sont analysés pour dégager tendances, causes récurrentes et mesures correctives. Des approches text-mining et règles d’association multiné niveaux extraient automatiquement des motifs fréquents à partir de rapports textuels, y compris les quasi-accidents .

Les bases historiques (ex. grandes bases d'accidents industriels) sont exploitées via Business Intelligence (tableaux de bord dynamiques) et algorithmes de Machine Learning pour catégoriser les incidents, repérer scénarios typiques et facteurs de gravité .

Dans l'IT/OT, des modèles de gestion des incidents structurés (ITIL, ISO 27035, COBIT) imposent des métriques : temps de résolution, respect SLA, satisfaction utilisateurs, disponibilité des canaux de traitement, volumes d'incidents critiques, etc. [24]

I.6 Environnement de travail de l'opérateur industriel

L'environnement de travail de l'opérateur 4.0–5.0 combine poste physique, interfaces numériques et organisation du travail. La littérature montre que productivité, santé et sécurité dépendent de l'ergonomie, de la qualité des IHM et des contraintes de travail.

I.6.1 Poste de travail et ergonomie

Un poste de travail mal conçu avec des sièges non réglables, des écrans mal positionnés ou des tâches répétitives peut provoquer fatigue, erreurs et troubles musculo-squelettiques chez les opérateurs.

À l'inverse, une meilleure conception ergonomique du poste peut améliorer les conditions de travail et augmenter la productivité, parfois jusqu'à 15 %.

Dans les systèmes industriels modernes, les approches de conception centrées sur l'humain, notamment dans les systèmes de production cyber-physiques, permettent de réduire les risques ergonomiques tout en maintenant un bon niveau de performance. De plus, certains postes intelligents peuvent ajuster automatiquement la posture de l'opérateur afin de prévenir les TMS.[25]

I.6.2 Interfaces Homme–Machine (IHM)

Dans les usines intelligentes, les IHM jouent un rôle central pour la supervision, la maintenance, le management et la cybersécurité.

Les interfaces adaptatives, prenant en compte perception, cognition et interaction, ajustent la quantité et le format des informations au profil et aux capacités de l'opérateur, améliorant ainsi la conscience de la situation et réduisant la charge mentale.

De nouvelles modalités d'interaction telles que regard, voix, gestes, tactile/haptique et réalité augmentée/VR enrichissent la façon dont l'opérateur interagit avec le système.

Un mauvais design des IHM, avec trop d'alarmes, des écrans non industriels ou des informations difficiles d'accès, peut dégrader la performance et compromettre la sécurité.[26]

I.6.3 Conditions de travail et contraintes opérationnelles

Les environnements de travail dans l'industrie peuvent présenter de nombreuses contraintes pour les opérateurs. Le bruit, les vibrations, le froid, les postures contraignantes, les longues durées de poste, la forte charge de travail et la responsabilité accrue font partie des facteurs fréquemment rencontrés dans les ateliers et les usines. Ces conditions peuvent affecter la santé, la sécurité et la performance des opérateurs sur le long terme.

Les opérateurs travaillant avec des robots, des cobots ou dans des environnements de robotique flexible disposent souvent de moins de marge de manœuvre pour gérer le rythme de travail. Cette limitation peut accentuer le stress et la fatigue mentale, en particulier dans des contextes où la précision et la rapidité sont cruciales pour le processus industriel.[25]

Les contraintes psychosociales représentent également un facteur important. La pression du temps réel, la peur de l'accident et l'incertitude concernant l'emploi contribuent à augmenter la tension ressentie par les opérateurs. Cependant, le soutien social et la participation aux décisions au sein de l'équipe ou de l'entreprise jouent un rôle protecteur, permettant de réduire le stress et d'améliorer le bien-être général des opérateurs, tout en maintenant la performance opérationnelle.[27]

I.7 Sécurité de l'opérateur en milieu industriel

I.7.1 Risques industriels et dangers pour l'opérateur

Dans la vie réelle en usine, un opérateur est confronté à un ensemble de dangers variés. Parmi les dangers physiques, on retrouve les machines en mouvement, les chutes de hauteur, le bruit, la chaleur et les vibrations. Les dangers chimiques et biologiques incluent l'exposition à des gaz toxiques, des solvants et des poussières, pouvant affecter les poumons, la peau et augmenter les risques de maladies graves telles que le cancer ou la leucémie.

Les risques ergonomiques proviennent de postures pénibles, d'efforts répétitifs, de travail statique, d'interfaces mal conçues et d'une surcharge d'alarmes, ce qui peut générer fatigue, TMS et diminution de la performance.

Enfin, les dangers psychosociaux et sécuritaires comprennent le stress lié au travail en temps réel, la peur d'accidents majeurs, les menaces cybernétiques ou terroristes, ainsi que les conflits avec les riverains. Ces expositions peuvent provoquer des effets immédiats tels que brûlures, irritations ou maux de tête, et conduire à des maladies chroniques comme les troubles musculo-squelettiques, les maladies respiratoires ou cardiovasculaires.[28]

Tableau 1.1 : Principales familles de risques pour l'opérateur .[29]

Type de risqué	Exemple concret pour l'opérateur
Physique	Se coincer dans une machine, chute, explosion
Chimique	Inhalation de gaz ou poussières toxiques
Ergonomique	Lombalgies, TMS au poste de contrôle
Psychosocial / sécurité	Stress lié à une attaque cybernétique ou terroriste

I.7.2 Systèmes de sécurité existants

Dans les ateliers et salles de contrôle, la protection des opérateurs repose sur plusieurs niveaux complémentaires. Les dispositifs techniques incluent les carters et protecteurs de machines, les arrêts d'urgence, les verrouillages, les cobots sûrs, les alarmes de procédé et les systèmes instrumentés de sécurité. Les équipements individuels, tels que les EPI (casques, gants, harnais, protections respiratoires ou détecteurs de gaz portatifs) viennent renforcer cette protection.

La surveillance et la détection sont assurées par des systèmes de présence humaine, des caméras, des détecteurs de gaz et par l'IIoT qui permet un suivi en temps réel des opérations. Du côté de l'organisation et du management HSE, l'attention se porte sur les analyses de risques, les procédures, les permis de travail, les formations, les comités de sécurité et des interventions combinant mesures techniques, organisationnelles et comportementales.

Les nouvelles tendances visent à intégrer l'intelligence artificielle et des capteurs pour détecter les comportements à risque ou le non-port d'EPI, ainsi que des solutions de télé-exploitation qui

permettent d'éloigner l'opérateur des zones dangereuses, tout en maintenant la performance et la sécurité des processus.[30]

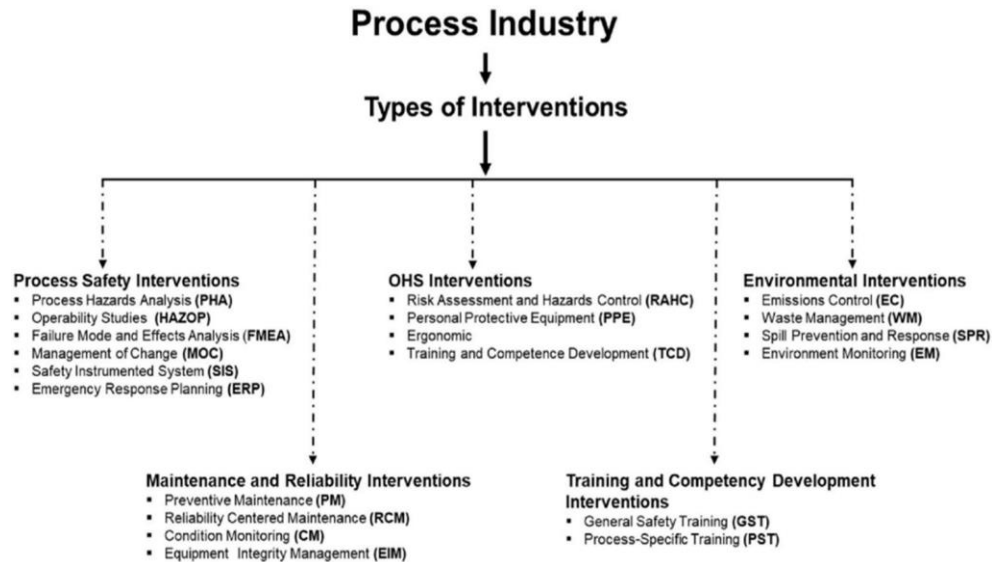


Figure 1.4 : Types d'interventions dans l'industrie de procédés[31]

I.7.3 Limites des dispositifs de sécurité actuels :

Malgré toutes les mesures mises en place, les accidents continuent de se produire. Les études mettent en évidence plusieurs limites, tant humaines que techniques :

- ✓ **Surcharge d'alarmes et d'informations** : les opérateurs sont submergés par un flot d'alarmes mal réglées, ce qui crée du stress et réduit leur capacité à réagir rapidement aux situations critiques.
- ✓ **Conception trop centrée sur la technique** : les interfaces et équipements ne tiennent pas toujours compte du travail réel. Des procédures pensées uniquement "sur le papier", des capteurs mal positionnés et des écrans peu ergonomiques compliquent le travail quotidien.
- ✓ **Nouveaux risques liés au numérique** : les cyberattaques peuvent avoir des conséquences physiques, et la frontière entre sécurité des machines et cybersécurité devient parfois floue pour les opérateurs.[32]

- ✓ **Inégalités d'accès à la sécurité** : certaines entreprises ou pays manquent de moyens ou de sensibilisation, ce qui entraîne une application incomplète des règles et une exposition accrue des travailleurs.
- ✓ **Intelligence artificielle et systèmes "intelligents" encore fragiles** : les technologies peuvent générer de faux avertissements, créer une dépendance excessive, et introduire de nouveaux dangers, par exemple avec des drones ou des cobots mal configurés. [33]

I.8 Rôle de l'opérateur et interactions Homme-Machine

Dans l'industrie de procédés, l'opérateur travaille en interaction constante avec les systèmes automatisés à travers les interfaces homme-machine (IHM). Il surveille le fonctionnement du procédé, interprète les informations affichées et intervient lorsque cela est nécessaire afin d'assurer un fonctionnement sûr et stable des installations.

I.8.1 Supervision et surveillance des procédés

Même dans des installations fortement automatisées, les opérateurs jouent un rôle essentiel dans la supervision des procédés industriels. Ils assurent la surveillance continue des variables critiques telles que la pression, la température et les débits, tout en analysant les informations fournies par les systèmes de contrôle afin de détecter d'éventuelles **anomalies**. En cas de dérive du procédé, leur intervention permet de corriger la situation et de maintenir des conditions de fonctionnement sûres et stables.[34]

Par ailleurs, l'intégration de technologies telles que l'IIoT, l'analyse de Big Data et les modèles prédictifs facilite la détection précoce des anomalies. Toutefois, ces outils restent des systèmes d'assistance à la décision et ne remplacent pas l'expertise et le jugement de l'opérateur.[35]

I.8.2 Gestion des situations anormales

Lorsqu'un **défaul ou une dérive** se produit dans un procédé industriel, comme une fuite, un emballement ou la panne d'un capteur, la gestion de cette **situation anormale (ASM)** repose encore largement sur l'opérateur. Même avec des systèmes automatisés, **c'est le jugement humain qui reste central** pour détecter et résoudre ces incidents.

Dans ce contexte, l'opérateur :

- ✓ **Reconnaît qu’une situation est anormale**, même lorsque les signaux sont ambigus ou incomplets ;
- ✓ **Diagnostic la cause réelle du problème** en intégrant les alarmes, les historiques de données et le contexte terrain ;
- ✓ **Applique ou adapte les procédures d’urgence**, souvent sous pression et avec des informations partielles ;
- ✓ **Coordonne ses actions avec la maintenance, l’encadrement et les secours** afin de garantir une intervention efficace et sûre.

À ce jour, les systèmes automatisés de détection et de diagnostic de défaut restent peu répandus à grande échelle, en partie à cause de la complexité de modéliser tous les modes de faute possibles. Cela maintient une forte dépendance au savoir-faire humain, indispensable pour assurer la sécurité et la continuité du procédé.[36]

I.8.3 Impact du facteur humain sur la sécurité

Les études montrent de manière constante que 70 à 90 % des accidents industriels impliquent une dimension liée au facteur humain, incluant les erreurs, l’organisation et la culture de sécurité. Le facteur humain peut jouer un rôle négatif, par exemple en cas de compétences insuffisantes, de fatigue, de surcharge cognitive ou de pression liée au temps et aux coûts, ce qui augmente le risque d’erreurs.

Mais il peut aussi être positif : l’expérience et la vigilance des opérateurs permettent de corriger des situations non prévues par les systèmes techniques, d’adapter les procédures et parfois d’éviter des accidents majeurs. Les grandes catastrophes industrielles, telles que Tchernobyl, Bhopal, Piper Alpha ou Deepwater Horizon, montrent que les “erreurs opérateur” sont souvent le symptôme de problèmes plus profonds liés à la culture sécurité, à l’organisation ou à la supervision.

Pour limiter ces risques, il est essentiel de mettre en place une formation continue des opérateurs, un renforcement de la culture sécurité, un design centré sur l’humain et une analyse systématique des facteurs humains.[37]

I.9 Limites actuelles du point de vue de la sécurité et du poste opérateur

Le tableau suivant présente les principales limites des systèmes industriels actuels du point de vue de l'opérateur ainsi que leurs impacts sur la sécurité.

Tableau 1.2 : Principales limites des systèmes actuels du point de vue de l'opérateur et leurs impacts sur la sécurité .[38]

Limites majeures côté opérateur	Effet sur la sécurité
Alarmes non rationalisées	Alarm floods, perte de signaux critiques
Interfaces denses et peu hiérarchisées	Surcharge cognitive, lenteur dans la prise de décision
Assistance peu intelligente	Faible soutien pour le diagnostic et la prise de décision
Prise en compte limitée du facteur humain	Erreurs récurrentes et baisse de la performance en matière de sécurité

I.9.1 Surcharge d'informations et alarmes critiques

Avec l'augmentation du nombre de capteurs et la facilité de configurer des alarmes dans les systèmes industriels, les opérateurs sont souvent confrontés à des situations de **surcharge d'alarmes (alarm floods)**. Ce phénomène peut dégrader la performance des systèmes de supervision et a déjà été impliqué dans plusieurs accidents industriels majeurs.

Dans ces situations, les opérateurs reçoivent un volume d'alarmes bien supérieur à leur capacité de traitement. Cette accumulation d'informations rend difficile la compréhension globale de la situation et peut conduire à une perte de la vision d'ensemble du procédé. Progressivement, les opérateurs peuvent également devenir désensibilisés aux alarmes, ce qui réduit leur réactivité face aux signaux réellement critiques.

Ce problème est souvent aggravé par des interfaces mal structurées, dans lesquelles les informations ne sont pas organisées selon une hiérarchie claire ou ne bénéficient pas de mécanismes de filtrage adaptés. Dans ces conditions, la charge cognitive de l'opérateur augmente, ce qui peut nuire à la prise de décision et à la sécurité du système industriel.[38]

I.9.2 Manque d'assistance intelligente à l'opérateur

Dans de nombreux environnements industriels, les systèmes actuels restent principalement centrés sur la supervision technique, notamment à travers l'utilisation de capteurs et de systèmes SCADA. Toutefois, ces systèmes offrent encore peu d'assistance contextuelle à l'opérateur, c'est-à-dire la capacité de fournir la bonne information, au bon moment et dans un format adapté à la situation.

Les études et revues consacrées aux systèmes d'assistance intelligents montrent également qu'il existe un écart important entre les prototypes développés dans le milieu académique et leur mise en œuvre réelle dans l'industrie. Des technologies comme les jumeaux numériques ou les systèmes context-aware sont largement étudiées et testées dans des environnements de recherche, mais leur déploiement à grande échelle dans les installations industrielles reste encore limité.

Par conséquent, le soutien apporté aux opérateurs demeure insuffisant dans certaines tâches essentielles, notamment pour le diagnostic des anomalies, la priorisation des risques ou encore l'apprentissage en situation réelle, qui sont pourtant des éléments clés pour améliorer la sécurité et la performance des systèmes industriels.[39]

I.9.3 Risques d'erreurs humaines

La majorité des accidents industriels sont encore attribuables au facteur humain, lui-même influencé par des contraintes telles que la surcharge de travail, des interfaces peu ergonomiques, une gestion imparfaite de l'information et une culture sécurité insuffisante. Plusieurs études montrent que les erreurs sont souvent le résultat d'une combinaison de facteurs individuels, organisationnels et technologiques. La complexité du travail, le volume élevé d'informations à traiter, des consignes peu claires, une gestion déficiente des alarmes et une confiance excessive dans les systèmes automatisés augmentent la probabilité d'erreurs.[40]

Ces observations confirment que le facteur humain peut être à la fois une source de risque et une barrière de sécurité : lorsqu'il est soutenu par une formation adéquate, une culture sécurité forte et des interfaces bien conçues, l'opérateur est capable de détecter et corriger des anomalies que la technologie seule ne peut anticiper. Cette analyse souligne l'importance d'une approche systémique prenant en compte l'environnement de travail, la conception des systèmes et la supervision organisationnelle afin de réduire significativement les accidents liés aux erreurs humaines.[41]

I.9.4 Insuffisance d'adaptation du système à l'opérateur

De nombreux systèmes industriels restent peu centrés sur l'utilisateur, avec une ergonomie souvent insuffisante et une faible prise en compte des capacités, des limites et des préférences des opérateurs. L'ajustement dynamique de la charge de travail, des informations affichées ou du niveau d'assistance en fonction de l'expertise de l'opérateur est encore rare, alors qu'il constitue un levier essentiel pour réduire les erreurs, la fatigue et le stress liés à la conduite des procédés.[42]

I.10 Besoin d'un assistant intelligent pour la sécurité et le poste opérateur

I.10.1 Aide à la prévention des risques

Les capteurs IoT, les jumeaux numériques et l'IA permettent une surveillance continue des environnements industriels, en suivant en temps réel les polluants, l'état des machines et les conditions de travail, tout en anticipant les situations dangereuses avant leur apparition.

Ces technologies s'inscrivent dans la hiérarchie de contrôle des risques, en contribuant à plusieurs niveaux de prévention : élimination ou substitution des dangers, mise en place de mesures techniques (arrêts d'urgence automatiques), actions organisationnelles (alertes, formations) et utilisation d'EPI intelligents.

L'analyse structurée des risques, basée sur des méthodes et des logiciels spécialisés, constitue un élément clé pour prévenir les accidents industriels et soutenir les politiques internationales de sécurité.[43]

I.10.2 Assistance en temps réel à l'opérateur

Les systèmes d'aide à la décision basés sur l'IA, les modèles dynamiques et le renforcement learning permettent de fournir un guidage en temps réel à l'opérateur. Ils contribuent à réduire la charge mentale, à améliorer la performance globale et à mieux gérer les situations de surcharge d'alarmes, tout en laissant la décision finale à l'humain.

Les solutions de réalité augmentée (AR) adaptative ajustent en temps réel le niveau de détail des informations et des consignes en fonction du profil et des performances de l'opérateur. Cela permet de diminuer les erreurs, de réduire le temps d'exécution des tâches et de limiter la surcharge cognitive, tout en renforçant la sécurité.

Les jumeaux numériques et les outils de simulation en ligne offrent la possibilité de réaliser des analyses *what-if*, de prévoir les états futurs des systèmes et de proposer des recommandations d'actions optimales pour l'opérateur ou le responsable de production. [43]

I.10.3 Amélioration de l'environnement de travail

L'approche de conception centrée humain, au cœur de l'Industry 5.0, vise à concevoir des postes de travail et des cellules collaboratives capables d'optimiser à la fois la productivité, la sécurité et le bien-être des opérateurs. Elle repose notamment sur la réduction de la charge physique et mentale, ainsi que sur une allocation intelligente des tâches selon plusieurs objectifs. Dans cette dynamique, les espaces de travail intelligents, associés au concept Operator 4.0, intègrent des technologies avancées telles que les *wearables*, le feedback multimodal, les *chatbots* et les *smart glasses*. Ces solutions permettent d'améliorer l'ergonomie des postes, de faciliter la formation, de renforcer les systèmes d'alerte et, de manière globale, d'augmenter l'efficacité et la performance des environnements industriels.[44]

I.11 Conclusion

À travers ce chapitre, on a vu comment les systèmes industriels ont évolué, passant de simples machines mécaniques à des systèmes intelligents intégrant les technologies de l'Industrie 4.0. Cette évolution a permis d'améliorer fortement la productivité et l'automatisation, mais elle a aussi rendu le travail de l'opérateur plus complexe.

Aujourd'hui, l'opérateur ne se contente plus d'exécuter des tâches simples. Il doit surveiller, analyser et réagir rapidement dans des environnements parfois stressants, où la surcharge d'informations, la fatigue et les mauvaises postures peuvent entraîner des erreurs et mettre en danger la sécurité.

C'est justement pour répondre à ces limites que le concept d'Industrie 5.0 a été introduit. Contrairement à l'approche précédente, il ne s'agit plus seulement de rendre les machines intelligentes, mais aussi de mieux prendre en compte l'humain, ses capacités et ses limites.

Ainsi, ce chapitre a permis de montrer l'importance du facteur humain dans les systèmes industriels modernes, et de mettre en évidence le besoin de solutions capables d'assister l'opérateur au quotidien.

Dans cette logique, le chapitre suivant sera consacré à la conception d'un assistant intelligent capable de détecter la fatigue et les mauvaises postures, afin d'améliorer la sécurité, de réduire les erreurs humaines et de faciliter la collaboration entre l'homme et la machine.

II. Chapitre II

Conception et Modélisation du Système

II.1 Introduction

La fatigue au volant et les troubles posturaux représentent deux des principales causes de dégradation des performances cognitives et physiques chez les conducteurs, opérateurs industriels et travailleurs de bureau. Selon les statistiques mondiales, la somnolence est directement impliquée dans environ 20 % des accidents de la route, une proportion comparable à celle attribuée à l'alcool au volant. [45]

Les manifestations de la fatigue visuelle sont multiples et ne se réduisent pas à la seule fermeture des yeux. Des études en neurosciences et en ergonomie ont démontré que la fatigue se traduit également par une réduction de la fréquence de clignement (hypoblinkésis) et des épisodes de fixation visuelle prolongée, phénomènes qui précèdent souvent la somnolence franche. [46]

Parallèlement, l'orientation anormale de la tête qu'il s'agisse d'une rotation excessivement latérale (distraction visuelle), d'une inclinaison avant (somnolence) ou d'une torsion latérale (fatigue musculaire) constitue un indicateur comportemental précoce et fiable désormais bien documenté dans la littérature.

Ce chapitre présente la conception et l'architecture complète du système de surveillance intelligente proposé. Il couvre l'ensemble des indicateurs implémentés : fermeture des yeux (EAR), bâillement (MAR), yeux ouverts trop longtemps (Stare Detection), orientation de la tête (Yaw/Pitch/Roll), angle cervical et alignement des épaules. [47], [48]

II.2 Concept du système proposé

II.2.1 Présentation générale

Le système proposé est une solution de surveillance non invasive et temps réel, destinée à détecter automatiquement les signes de fatigue et les anomalies posturales à partir du seul flux vidéo d'une caméra standard. Il s'appuie sur l'extraction et l'analyse de points de repère anatomiques (landmarks) du visage et du corps pour calculer huit indicateurs quantitatifs organisés en deux catégories : indicateurs de fatigue oculaire et faciale (EAR, MAR, Stare) et indicateurs posturaux et d'orientation (angles de tête, angle cervical).[49], [50]

II.2.2 Objectifs du système

Le système vise les objectifs suivants :

- Détecter précocement la somnolence (fermeture des yeux, bâillement, fixation prolongée).
- Détecter la distraction visuelle et les postures de tête anormales (Yaw/Pitch/Roll).
- Surveiller les angles cervicaux .
- Alerter l'utilisateur en temps réel selon trois niveaux de gravité gradés.
- Enregistrer un historique des événements pour analyse a posteriori de session.
- Fonctionner entièrement en local sur matériel standard, sans infrastructure cloud.

II.2.3 Analyse comparative des approches

Le tableau suivant compare les principales catégories de systèmes de détection de fatigue afin de justifier nos choix technologiques [49][50].

Tableau 2.1 : Comparaison des approches de détection de fatigue

Approche	Précision	Coût	Temps réel	Invasif
Vision (caméra)	Élevée	Faible	Oui	Non
EEG (électrodes)	Très haute	Élevé	Partiel	Oui
Capteurs volant	Moyenne	Moyen	Oui	Partiel
Comportement véhicule	Faible	Faible	Oui	Non

Notre système adopte l'approche par vision artificielle, qui offre le meilleur compromis entre précision, coût, non-intrusivité et fonctionnement temps réel [45][49].

II.2.4 Piliers conceptuels

- Non-intrusivité : seule une caméra standard est requise, déjà intégrée dans la plupart des postes de travail.

Temps réel : analyse complète en moins de 33 ms par image (≥ 30 FPS). [48], [51]

- Autonomie et confidentialité : traitement entièrement local, aucune donnée biométrique transmise.
- Multi-indicateurs : huit indicateurs complémentaires couvrant fatigue, orientation et posture.

II.3 Architecture du système

II.3.1 Vue globale

L'architecture repose sur un pipeline de traitement séquentiel étendu. La figure 2.1 présente cette architecture, intégrant les nouveaux indicateurs de stare detection et d'orientation de la tête.[50]

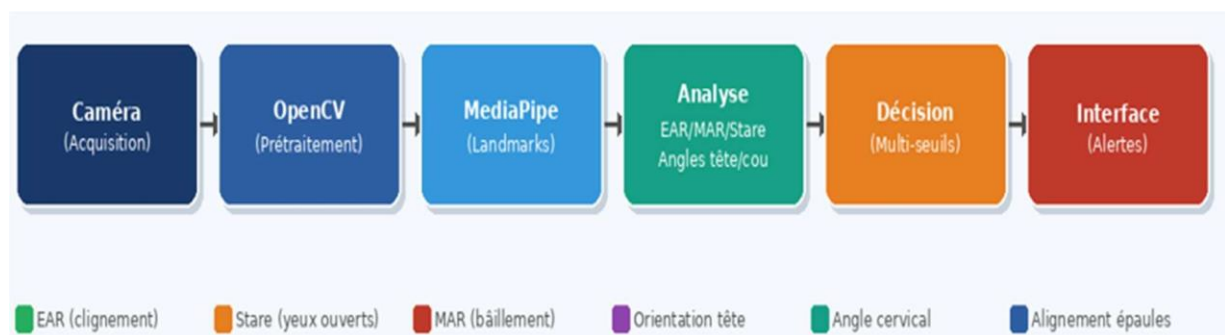


Figure 2.1 : Architecture globale du système pipeline étendu à 6 blocs et 8 indicateurs [50]

II.3.2 Principes de conception

- Séparation des préoccupations : chaque module possède une responsabilité unique.
- Faible couplage : communication par interfaces standardisées (tableaux NumPy, dictionnaires Python).
- Extensibilité : ajout de nouveaux indicateurs sans modification des modules existants. [51]
- Robustesse : gestion explicite des cas particuliers (absence de détection, faible luminosité, multiples visages).

II.4 Description détaillée des modules

Le diagramme des modules, présenté dans la figure 2.2 ci-dessous, illustre la description détaillée des modules cités auparavant.

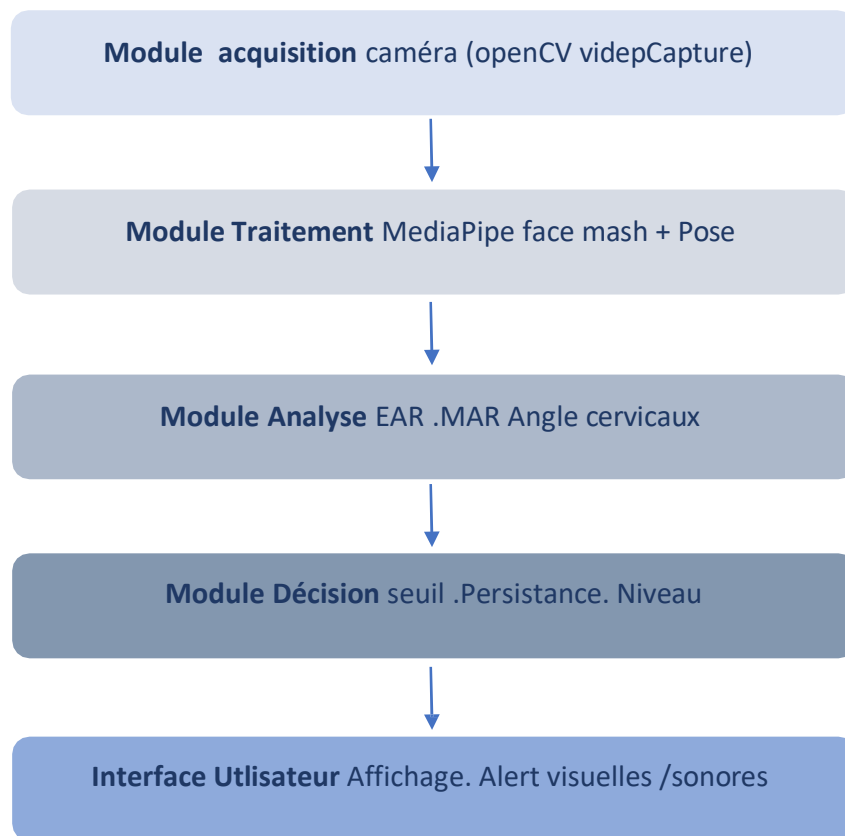


Figure 2.2 : Diagramme des modules du système et flux de données

II.4.1 Module acquisition (caméra)

Le module d'acquisition capture le flux vidéo via l'interface VideoCapture d'OpenCV. Il gère la configuration du périphérique, la normalisation des images et la robustesse aux pannes matérielles. [47]

❖ Paramètres de configuration

- Résolution : 640×480 pixels (VGA) recommandée ; 720p et 1080p supportées au détriment de la vitesse.
- Cadence : 30 FPS standard ; paramétrable jusqu'à 60 FPS selon le matériel.
- Conversion colorimétrique automatique BGR → RGB requise par MediaPipe [48].

❖ Gestion des erreurs:

En cas d'échec de connexion, un mécanisme de retry à délai exponentiel est activé. En cas de perte de signal en cours de session, le système maintient le dernier état connu pendant 2 secondes avant d'émettre une alerte de perte de détection.

II.4.2 Module traitement (MediaPipe / OpenCV)

Ce module exploite deux composants de MediaPipe et les primitives de traitement d'OpenCV pour extraire l'ensemble des données anatomiques nécessaires aux huit indicateurs[47][48].

❖ MediaPipe Face Mesh :468 landmarks

Face Mesh détecte 468 points tridimensionnels sur le visage humain en temps réel, avec une précision submillimétrique. Les landmarks utilisés pour nos indicateurs sont : contours oculaires (EAR, Stare), contour labial (MAR), arête nasale et tempes (orientation de la tête). [48]

❖ MediaPipe Pose : 33 landmarks corporels

Pose estime 33 points de repère anatomiques. Pour notre système, le nez (0) et des oreilles (7, 8) sont spécifiquement utilisés pour le calcul de l'angle cervical, de l'alignement et l'orientation globale de la tête. [48]

❖ Prétraitement adapté

Un algorithme d'égalisation d'histogramme adapté (CLAHE — Contrast Limited Adaptive Histogram Equalization) est appliqué en prétraitement pour améliorer la détectabilité des landmarks dans des conditions d'éclairage défavorables (faible lumière, contre-jour). [47]

II.4.3 Module analyse : (indicateurs de fatigue oculaire)

Ce module implémente les indicateurs liés à l'analyse des yeux et de la bouche : EAR, MAR et Stare Detection.

II .4.3.1 Eye Aspect Ratio (EAR) (fermeture des yeux)

L'EAR, quantifie le degré d'ouverture des paupières. Sa formule est :

$$EAR = (\|P2-P6\| + \|P3-P5\|) / (2 \times \|P1-P4\|). [52]$$

Un œil ouvert présente typiquement un EAR compris entre 0.25 et 0.35. Un clignement normal (150–400 ms) provoque une chute temporaire sous 0.20. La somnolence se caractérise par un EAR inférieur à 0.25 maintenu pendant plus de 20 frames consécutives (≈ 0.67 secondes). [52]

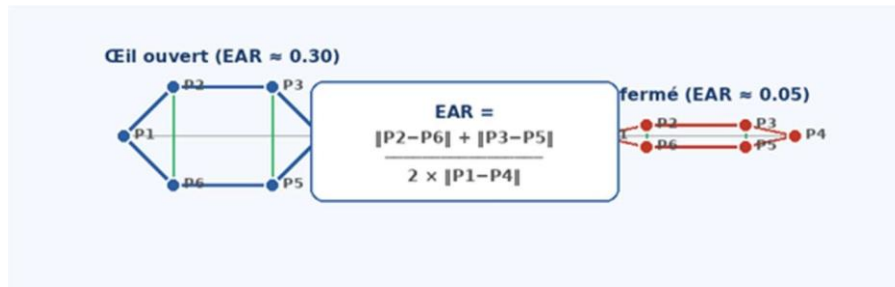


Figure 2.3 : Eye Aspect Ratio (EAR) — œil ouvert vs fermé et formule de calcul .[52]

II .4.3.2 Mouth Aspect Ratio (MAR)

Le MAR détecte les bâillements, signal comportemental précoce et fiable de la somnolence. Sa formule est :

$$\text{MAR} = (||\mathbf{B}-\mathbf{H}|| + ||\mathbf{C}-\mathbf{G}|| + ||\mathbf{D}-\mathbf{F}||) / (2 \times ||\mathbf{A}-\mathbf{E}||).[52]$$

Une bouche fermée présente un MAR de 0.2–0.4. Un bâillement est détecté quand $\text{MAR} > 0.6$ pendant plus de 15 frames. La combinaison EAR + MAR réduit significativement le taux de faux positifs.[52]

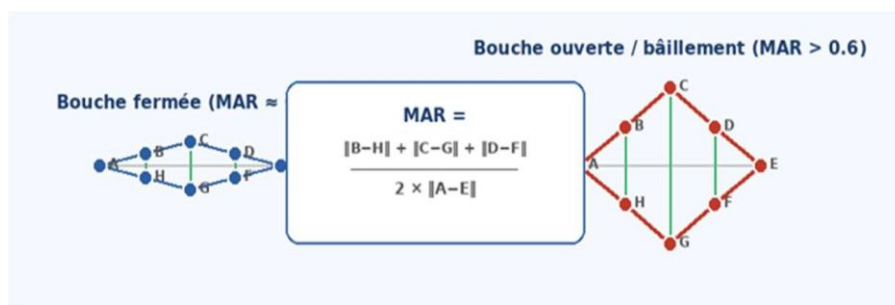


Figure 2.4 : Mouth Aspect Ratio (MAR) — bouche fermée vs bâillement.[52]

II .4.3.3 Stare Detection (yeux ouverts trop longtemps)

La détection de fixation prolongée (Stare Detection) est un indicateur complémentaire et souvent négligé des systèmes existants. En situation normale, un être humain cligne des yeux entre 15 et 20 fois par minute (toutes les 3 à 4 secondes en moyenne). Des recherches ont établi que la fréquence de clignement diminue significativement lors de la fatigue mentale, du stress ou de la concentration intense, pouvant tomber à moins de 5 clignements par minute. [53]

La fixation visuelle prolongée (absence de clignement pendant plus de 3 secondes) est associée non seulement à la fatigue cognitive, mais aussi à des risques de sécheresse oculaire pouvant aggraver l'inconfort et réduire davantage les performances. ont démontré que les paramètres de clignement (fréquence et durée) sont des indicateurs fiables de la somnolence chez le conducteur. [46]

Notre système implémente la Stare Detection comme suit : un compteur de temps sans clignement est incrémenté à chaque frame où l'EAR reste supérieur au seuil normal (> 0.20 , œil ouvert). Ce compteur est remis à zéro dès qu'un clignement est détecté ($EAR < 0.20$). Un avertissement est émis au-delà de 3 secondes sans clignement, et une alerte critique est déclenchée après 5 secondes continues. [46]

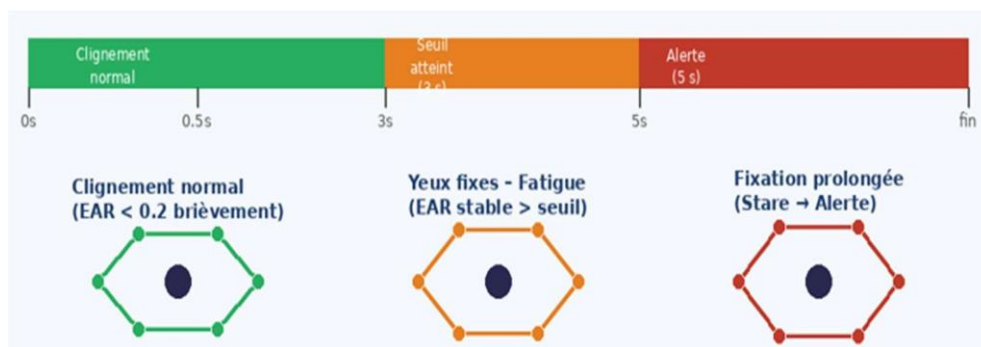


Figure 2.5 : Stare Detection (timeline de détection de la fixation prolongée) [46]

L'état des yeux est déterminé selon la logique suivante :

- $EAR < 0.20$ pendant ≤ 20 frames : clignement normal → remise à zéro du compteur Stare.
- $EAR \geq 0.20$ en continu depuis 3 secondes : avertissement Stare (niveau 1).
- $EAR \geq 0.20$ en continu depuis 5 secondes : alerte Stare critique (niveau 2-3).
- Combinaison Stare + EAR bas simultanément : impossible , les deux indicateurs s'excluent mutuellement par définition, ce qui garantit la cohérence du système d'alerte.

II.4.4 Module analyse (indicateurs posturaux et d'orientation)

❖ Orientation de la tête (Yaw / Pitch / Roll)

La détection de l'orientation anormale de la tête est un indicateur comportemental fondamental pour la détection de la distraction visuelle et de certaines formes de somnolence. ont réalisé une revue complète des méthodes d'estimation de la pose de la tête (Head Pose Estimation), identifiant trois axes de rotation indépendants. [54]

L'orientation tridimensionnelle de la tête est décrite par trois angles : le Yaw (lacet, rotation horizontale gauche/droite), le Pitch (tangage, inclinaison avant/arrière) et le Roll (roulis, inclinaison latérale). Ces trois angles sont estimés à partir des coordonnées 3D des landmarks faciaux de MediaPipe Face Mesh en appliquant un algorithme PnP (Perspective-n-Point) avec la matrice intrinsèque de la caméra.

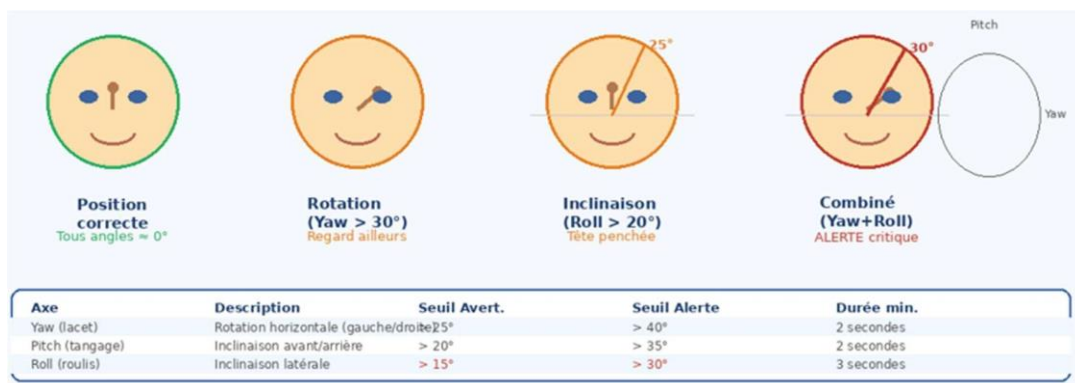


Figure 2.6 : Orientation de la tête (Yaw, Pitch, Roll et seuils de détection) [55]

La signification comportementale de chaque axe est la suivante :

- Yaw élevé (> 25°) : le conducteur ou l'opérateur regarde sur le côté, indiquant une distraction visuelle. Un Yaw > 40° maintenu plus de 2 secondes constitue une alerte critique.
- Pitch négatif prononcé (> 35° en avant) : la tête tombe vers l'avant, signe classique de somnolence avancée ou de fatigue cervicale extrême.

- Roll important ($> 20^\circ$) : la tête s'incline latéralement de façon anormale, signal caractéristique de micropause ou de somnolence.

La combinaison de deux ou trois axes simultanément dépassés est pondérée par le module de décision pour élever immédiatement le niveau d'alerte au niveau 3.

❖ Analyse de la posture cervicale

L'angle cervical de flexion est calculé comme l'angle entre l'axe vertical et la droite reliant le milieu des épaules au centre de la tête. Des études biomécaniques ont établi que la charge exercée sur la colonne cervicale augmente de façon non linéaire avec cet angle : 5 kg en position neutre, 27 kg à 15° , 40 kg à 30° et 49 kg à 45° . [55]

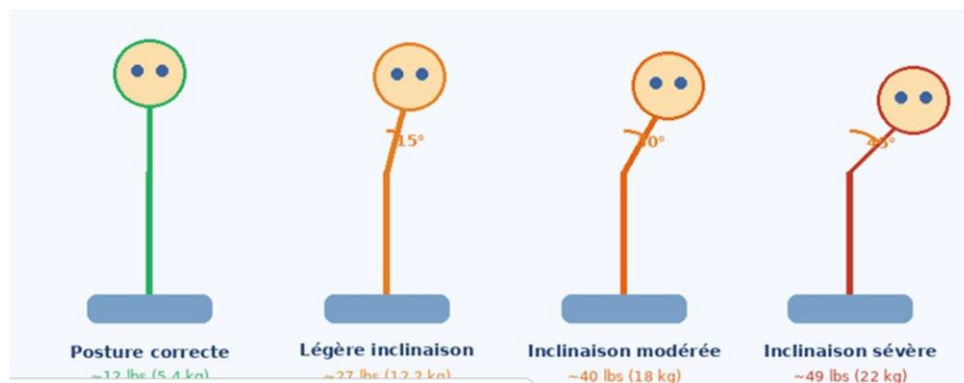


Figure 2.7 : Angle cervical et charge sur la colonne (4 postures typées) [55]

Notre système déclenche une alerte lorsque l'angle cervical dépasse 15° pendant plus de 30 secondes, seuil à partir duquel les risques de TMS cervicaux augmentent significativement. L'alignement des épaules (asymétrie supérieure à 10°) est également surveillé. [55]

II.4.5 Tableau récapitulatif des indicateurs

Le tableau suivant synthétise l'ensemble des huit indicateurs implémentés, leurs formules ou méthodes de calcul, et leurs seuils d'alerte respectifs.

Tableau 2.2 : Récapitulatif des 8 indicateurs du système [46][52][53][55][56].

Indicateur	Formule / Méthode	Seuil d'alerte	Persistance
EAR	$EAR = \frac{ x_2 - x_6 + x_3 - x_5 }{2 \times x_1 - x_4 }$	< 0.25	20 frames
MAR	$MAR = \frac{ x - x + x - x + x - x }{2 \times x - x }$	> 0.60	15 frames
Stare	Absence de clignement (EAR stable)	> 3 sec	Continu
Yaw (tête)	Angle de rotation horizontale	> 40°	2 sec
Pitch (tête)	Angle d'inclinaison avant/arrière	> 35°	2 sec
Roll (tête)	Angle d'inclinaison latérale	> 30°	3 sec
Angle cervical	Droite tête-épaules / verticale	> 15°	30 sec
Alignement épaules	Asymétrie angulaire des épaules	> 10°	30 sec

II.5 Module décision et gestion des alertes

II.5.1 Architecture de la logique de décision

Le module de décision reçoit en entrée les valeurs des huit indicateurs calculés, leurs compteurs de persistance respectifs et l'historique récent des événements. Il applique une logique multi-critères pondérée pour déterminer le niveau d'alerte global. [45], [49]

La logique de décision distingue deux types d'indicateurs :

- Indicateurs à seuil absolu : EAR, MAR, Stare, angles de tête. L'alerte est déclenchée si la valeur dépasse le seuil pendant N frames consécutives.
- Indicateurs à seuil temporel : angle cervical, alignement des épaules. L'alerte est déclenchée après une durée cumulée de dépassement (pas nécessairement consécutif) sur une fenêtre glissante.

II.5.2 Niveaux d'alerte et critères de déclenchement

- Niveau 1 : vertissement (vert) : un seul indicateur dépasse son seuil d'avertissement depuis moins de 2 secondes. Signal visuel discret, aucune interruption sonore.
- Niveau 2 : Alerte modérée (orange) : un indicateur dépasse son seuil d'alerte, ou deux indicateurs dépassent simultanément leurs seuils d'avertissement. Signal visuel prononcé et bip sonore bref.
- Niveau 3 : Alerte critique (rouge) : un indicateur à seuil critique dépassé (EAR, Stare, Yaw), ou combinaison de trois indicateurs ou plus actifs simultanément. Alerte visuelle et sonore continue, message d'action immédiate.

II.5.3 Interface utilisateur

L'interface affiche en temps réel le flux vidéo annoté avec les landmarks, les valeurs numériques des indicateurs, des barres de progression colorées et des messages d'alerte contextuels. Un tableau de bord latéral présente l'état synthétique des huit indicateurs avec code couleur. [47]

II.6 Fonctionnement du système

II.6.1 Cycle de traitement étendu

Le cycle itératif étendu intègre le calcul des nouveaux indicateurs (Stare, orientation de tête) dans le pipeline existant. La Figure 6 présente le flowchart mis à jour.[48], [51]

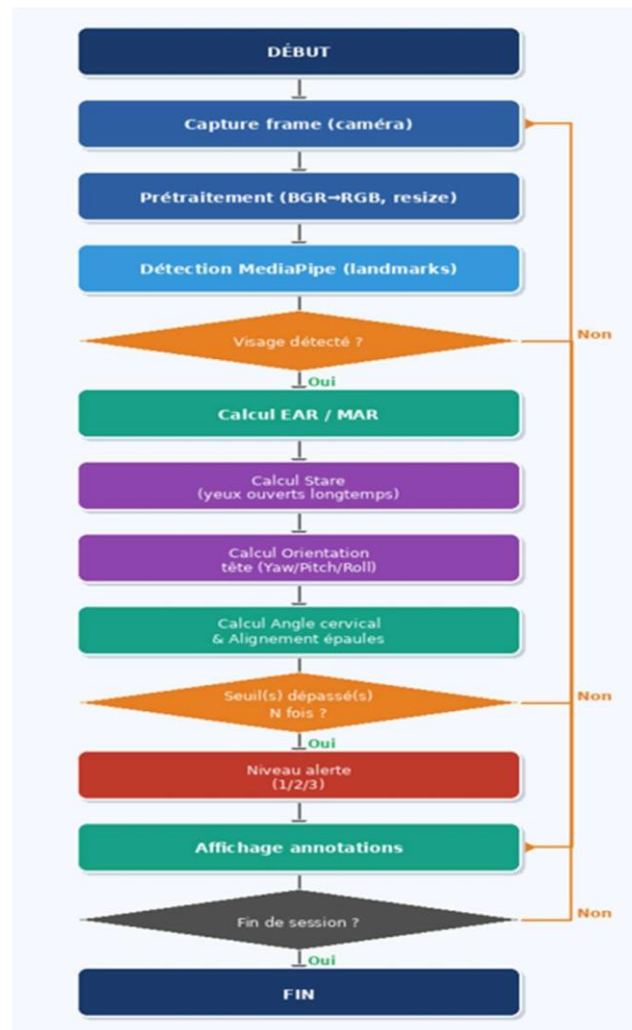


Figure 2.8 : Flowchart du système conçu étendu

II.6.2 Détail des étapes

- Étape 1 : Capture : extraction de la frame via `cv2.VideoCapture.read()`.
- Étape 2 : Prétraitement : redimensionnement, CLAHE, conversion BGR→RGB. [47]
- Étape 3 : Détection : Face Mesh (468 pts) + Pose (33 pts) via MediaPipe. [48]
- Étape 4a : Calcul EAR/MAR : indicateurs oculaires et buccaux. [52]
- Étape 4b : Calcul Stare : mise à jour du compteur de temps sans clignement. [46]
- Étape 4c : Calcul orientation tête : estimation Yaw/Pitch/Roll par algorithme PnP. [56]

- Étape 4d : Calcul postural : angle cervical et alignement des épaules. [55]
- Étape 5 : Décision : évaluation multi-critères et mise à jour du niveau d'alerte.
- Étape 6 : Rendu : affichage des annotations, tableau de bord et alertes.

II.6.3 Gestion des cas particuliers

- Absence de détection : maintien de l'état 2 secondes, puis alerte de perte de détection.
- Multiples visages : sélection du visage de plus grande surface (utilisateur principal).
- Port de lunettes : détection automatique par analyse de la zone oculaire ; basculement vers des landmarks robustes.
- Faible luminosité : application du prétraitement CLAHE adaptatif. [47]
- Microsommies : détectées par la combinaison EAR bas + Stare actif + Pitch prononcé simultanément cette combinaison déclenche immédiatement le niveau 3.

II.7 Avantages du système proposé

II.7.1 Avantages techniques

- Couverture complète : 8 indicateurs couvrant fatigue, distraction, orientation et posture.
- Haute précision : 468 landmarks MediaPipe vs détecteurs classiques (68 landmarks). [51]
- Faible latence : pipeline complet < 33 ms sur CPU Intel Core i5 ou équivalent. [48]
- Robustesse : invariance aux variations de distance, d'éclairage et de résolution.

II.7.2 Avantages pratiques et économiques

- Coût matériel : webcam standard < 30 euros, soit 10× moins cher qu'une solution EEG. [50]
- Confidentialité : traitement local 100 %, compatible RGPD par conception.
- Déploiement : installation en moins de 5 minutes (pip install mediapipe opencv-python).
- Multiplateforme : Windows 10/11, Ubuntu 20.04+, macOS 11+. [47]

- Open-source : aucune licence propriétaire (Apache 2.0, MIT). [48], [51]

II.7.3 Limites et perspectives

- Port de lunettes épaisses : dégradation possible de l'EAR. Solution : basculement vers PERCLOS infrarouge.
- Variabilité interindividuelle des seuils EAR : phase d'étalonnage personnalisé prévue.
- Stare Detection sous forte luminosité artificielle : certains reflets peuvent biaiser la valeur EAR.
- Perspective : intégration d'un classificateur LSTM pour la détection de microsomnies par analyse de séquences temporelles. [57]

II.8 Conclusion

Ce chapitre a présenté en détail la conception et l'architecture complète du système de surveillance intelligente proposé. Le système implémente huit indicateurs complémentaires organisés en deux catégories : indicateurs de fatigue oculaire et faciale (EAR, MAR, Stare Detection) et indicateurs posturaux et d'orientation (Yaw/Pitch/Roll, angle cervical, alignement des épaules).

L'ajout de la Stare Detection, qui complète l'EAR en détectant les épisodes de fixation prolongée caractéristiques de la fatigue cognitive, et la détection de l'orientation anormale de la tête selon trois axes (Yaw, Pitch, Roll), améliorent significativement la couverture diagnostique du système par rapport aux solutions existantes. [53]

L'architecture modulaire en pipeline, fondée sur MediaPipe et OpenCV, garantit des performances temps réel, une extensibilité maximale et une déployabilité sur matériel standard sans infrastructure cloud. Le chapitre suivant détaille l'implémentation technique et présente les résultats expérimentaux de validation. [47]

III. Chapitre III

Mise en œuvre pratique

III.1 Introduction

La mise en œuvre pratique d'un système collaboratif Homme-Machine en milieu industriel exige de transcender les modèles conceptuels pour se confronter aux impératifs du temps réel et de la fiabilité algorithmique. Ce troisième chapitre est entièrement consacré à l'implémentation logicielle, à l'expérimentation et à la validation de notre assistant intelligent de surveillance de l'opérateur.

Après avoir exposé l'environnement technique, matériel et logiciel qui soutient notre prototype, nous détaillerons l'intégration et le fonctionnement de nos trois modules clés : la surveillance de la fatigue oculaire, l'analyse transactionnelle de l'orientation de la tête, et l'évaluation biomécanique innovante de la posture du dos réalisée par une capture latérale (de profil). Enfin, nous présenterons une analyse critique des performances de traitement ainsi que les limites physiques rencontrées par le système lors des phases de tests dynamiques.

III.2 Environnement de développement

III.2.1 Environnement matériel

La validation expérimentale de notre prototype a été réalisée en s'appuyant sur les ressources matérielles suivantes :

- ❖ **Caméra** : Une webcam standard intégrée et une caméra USB générique fonctionnant à une résolution native de 640×480 pixels à une cadence stable de 30 FPS. Conformément aux objectifs, aucun capteur industriel onéreux ou invasif n'a été requis.
- ❖ **Ordinateur utilisé** : Une station de travail standard équipée d'un processeur Intel Core i5 cadencé à 2.5 GHz avec 8 Go de mémoire RAM, exécutant le système d'exploitation Windows 11.
- ❖ **Configuration minimale** : Le pipeline étant optimisé pour s'exécuter localement sans infrastructure Cloud , la configuration minimale se résume à un microprocesseur double cœur (Dual-Core) x86/x64, 4 Go de RAM et un périphérique d'acquisition d'images standard.

III.2.2 Environnement logiciel

L'écosystème logiciel retenu pour le développement du code source repose exclusivement sur des technologies open-source hautement documentées, assurant l'extensibilité du système sans surcoût de licence propriétaire:

- ❖ **Langage Python (v3.10)** : Choisi pour sa robustesse, sa flexibilité inter-plateforme et sa compatibilité native avec les écosystèmes de vision par ordinateur.
- ❖ **Bibliothèque OpenCV (v4.8)** : Utilisée comme couche d'abstraction basse pour la capture du flux vidéo, les opérations d'égalisation d'image, les transformations d'espaces colorimétriques et le rendu de l'interface graphique.
- ❖ **Framework MediaPipe (v0.10)** : Framework de perception développé par Google, exploitant des pipelines de Deep Learning légers pour l'extraction simultanée des landmarks faciaux (*Face Mesh*) et corporels (*Pose*).
- ❖ **Visual Studio Code (VS Code)** : Environnement de développement intégré (IDE) pour l'écriture, le débogage et l'optimisation itérative du code.

III.3 Implémentation du module de détection des yeux

III.3.1 Acquisition vidéo par caméra

L'interfaçage avec le capteur optique s'effectue au moyen de la méthode native d'OpenCV `cv2.VideoCapture(0, cv2.CAP_DSHOW)`. La capture des trames s'opère au sein d'une boucle synchrone. Une transformation matricielle de type miroir horizontal via la fonction `cv2.flip(frame, 1)` est immédiatement appliquée afin d'aligner la perception de l'opérateur sur ses mouvements physiques réels.

III.3.2 Détection des landmarks des yeux avec MediaPipe

Le composant *MediaPipe Face Mesh* réalise l'inférence en temps réel pour mapper 468 points de repère tridimensionnels sur le visage humain. Pour évaluer l'état oculaire, le script isole les sous-ensembles d'indices topologiques décrivant la géométrie des paupières supérieure et inférieure .

Voici les valeurs obtenues par MediaPipe :

- **Contour de l'œil gauche** : Indices [33, 160, 158, 133, 153, 144].

- **Contour de l'œil droit** : Indices [362, 385, 387, 263, 373, 380].

Les coordonnées normalisées (x_{eye_right} , y_{eye_right})

sont converties en coordonnées spatiales absolues (pixels) par produit vectoriel avec les dimensions de l'image (w et h).

III.3.3 Calcul du Eye Aspect Ratio (EAR)

L'ouverture palpébrale est quantifiée mathématiquement en implémentant la formule suivante [52] :

$$EAR = \frac{|x_2 - x_6| + |x_3 - x_5|}{2 \times |y_1 - y_4|}$$

Le script calcule l'EAR pour chaque œil de manière indépendante avant d'en effectuer la moyenne arithmétique globale, immunisant ainsi l'indicateur contre les asymétries transitoires du visage.

III.3.4 Détection de fatigue par fermeture des yeux

Alors qu'un clignement physiologique normal engendre une baisse de l'EAR sous le seuil de 0.20 pendant une durée brève comprise entre 150 et 400 ms, l'état de somnolence se caractérise par un affaissement durable des paupières. Le module intègre un filtre de persistance temporelle basé sur la variable `frame_counter`. Si l'EAR global descend sous la limite critique de 0.22 pendant plus de 15 frames consécutives (`EAR_CONSEC_FRAMES = 15`), soit l'équivalent de 0.5 seconde à 30 FPS, l'état de fatigue oculaire est formellement validé.

III.3.5 Détection du staring

La fatigue cognitive induite par une forte charge mentale ou le stress opérationnel provoque une diminution de la fréquence de clignement (*hypoblinkésis*). Pour monitorer ce comportement anormal, le système évalue en continu la variable `staring_elapsed` en soustrayant le temps système courant à la référence temporelle `blink_timer`. Dès qu'un clignement valide est enregistré ($EAR < 0.22$), le minuteur se réinitialise instantanément à zéro. Si l'opérateur maintient fixement les yeux ouverts au-delà du seuil critique fixé à `STARING_TIME = 10` secondes, l'état de staring est levé.

III.3.6 Déclenchement de l'alarme sonore

Pour matérialiser la boucle de rétroaction IHM sans perturber l'activité de production, le système sollicite l'API Windows `winsound.Beep()` au sein de routines non bloquantes. Afin de catégoriser

la nature du risque, la détection de fatigue (yeux clos) génère une tonalité stridente à la fréquence de 1000 Hz, tandis que l'état de staring (yeux fixes ouverts trop longtemps) déclenche un signal distinct calibré à 1200 Hz.

III.3.7 Résultats du module yeux

- ❖ **Détection normale :** L'opérateur présente un clignement régulier. L'EAR oscille de manière stable entre 0.26 et 0.33, maintenant les compteurs d'alertes à zéro.
- ❖ **Fatigue détectée :** L'EAR chute drastiquement sous la barre des 0.22 et y demeure. À la quinzième frame consécutive, le bandeau textuel rouge "FATIGUE DETECTED!" s'incruste à l'écran, synchronisé avec le signal sonore à 1000 Hz.
- ❖ **Staring détecté :** L'EAR reste élevé (> 0.22), mais la variable staring_elapsed franchit le cap des 10 secondes. Le système affiche instantanément l'alerte critique "STARING DETECTED!".

III.4 Implémentation du module de distraction de la tête

III.4.1 Détection de la position de la tête

Afin de préserver la faible latence algorithmique sur une architecture CPU standard, le sous-module d'estimation de la distraction de la tête utilise une méthode de suivi géométrique basée sur la déviation linéaire des structures médianes du visage. Le point focal extrait du modèle *MediaPipe Face Mesh* correspond à l'indice topologique 1, matérialisant géométriquement l'arête nasale (pointe du nez).

III.4.2 Calcul du décalage horizontal du nez

Le script évalue la déviation directionnelle en calculant la distance absolue séparant la coordonnée horizontale x du nez (nose_x) et la coordonnée centrale idéale calculée à partir des dimensions de la trame (center_x = w // 2) ainsi [52]:

$$h_{\text{offset}} = \text{nose_x} - \text{center_x}$$

Une ligne verticale de couleur cyan est tracée numériquement au centre géométrique du flux vidéo afin de matérialiser l'axe neutre de référence.

III.4.3 Détection de distraction

Si l'opérateur détourne son regard de sa tâche principale pour fixer une zone périphérique, l'arête nasale s'écarte de la ligne médiane, provoquant une hausse rapide de la variable `head_offset`. L'état de distraction attentionnelle est validé lorsque ce décalage franchit le seuil limite de `HEAD_THRESHOLD = 25` pixels et coexiste simultanément avec une absence de clignement prolongée (`staring_elapsed > DISTRACTION_TIME`, configuré à 60 secondes pour simuler un abandon de tâche durable), confirmant que l'opérateur ne consulte plus son poste de conduite.

III.4.4 Génération d'alerte sonore

La validation de la distraction active immédiatement une routine audio dédiée. Le système émet une tonalité grave et continue configurée à une fréquence spécifique de 1400 Hz pendant une durée de 500 ms, rappelant fermement à l'opérateur l'exigence de recentrage attentionnel sur sa tâche.

III.4.5 Résultats expérimentaux

- ❖ **Position correcte** : Le nez coïncide avec la zone médiane de l'image. L'offset reste inférieur à 25 pixels, et l'indicateur graphique confirme l'alignement nominal du visage.
- ❖ **Mauvaise orientation de la tête** : L'opérateur effectue une rotation faciale prolongée vers la gauche ou vers la droite. Le marqueur nasal franchit la barrière des 25 pixels, ce qui déclenche l'affichage immédiat de la chaîne textuelle d'avertissement "`DISTRACTION DETECTED!`" en couche supérieure du rendu OpenCV.

III.5 Implémentation du module de détection de posture du dos

III.5.1 Acquisition des points corporels

Les configurations caméra de face s'avèrent inefficaces pour évaluer l'affaissement du dos en raison de l'occultation de l'axe sagittal de la colonne vertébrale. Pour résoudre cette contrainte technique, notre système déporte le capteur optique sur le côté de l'opérateur. Cette disposition latérale permet au framework *MediaPipe Pose* d'extraire de profil la structure cinématique du tronc supérieur de l'utilisateur.

III.5.2 Détection de l'oreille et de la hanche

Pour modéliser précisément la flexion du dos sans subir l'influence d'une asymétrie frontale des épaules, le script isole les coordonnées cartésiennes de trois articulations clés situées sur le profil exposé de l'opérateur

- L'oreille gauche (Landmark d'index 7).
- L'épaule gauche (Landmark d'index 11) défini comme le sommet de l'angle.
- La hanche gauche (Landmark d'index 23).

III.5.3 Calcul de l'angle de posture

En désignant l'épaule gauche comme le sommet (point B), l'oreille gauche comme le point A et la hanche gauche comme le point C, deux vecteurs bidimensionnels sont construits : $\vec{BA} = A - B$ et $\vec{BC} = C - B$. L'angle cinématique interne θ décrivant l'alignement tête-buste est obtenu par la formule du produit scalaire normalisé suivante [52] :

$$\theta = \arccos^{-1} \frac{\vec{BA} \cdot \vec{BC}}{|\vec{BA}| \times |\vec{BC}|}$$

La valeur radian obtenue est convertie en degrés au sein du script Python via la fonction native `np.degrees()`.

III.5.4 Détection des mauvaises postures

En posture de travail droite et ergonomique, l'angle θ s'approche d'une ligne droite verticale (valeurs typiquement comprises entre 165° à 175°). Sous l'effet de la fatigue musculaire ou d'un relâchement postural, l'opérateur projette le cou vers l'avant et courbe la colonne thoracique. Dès que l'angle cinématique descend sous la barrière ergonomique de `BAD_POSTURE_ANGLE = 160` degrés, l'état de mauvaise posture du dos est déclaré.

III.5.5 Affichage des résultats

L'interface graphique dessine en temps réel le squelette anatomique sagittal de l'opérateur : des cercles pleins bleus sont appliqués sur l'oreille, l'épaule et la hanche, reliés par des segments jaunes épais. La valeur entière de l'angle et le diagnostic dynamique s'affichent instantanément dans le coin inférieur gauche de la fenêtre de rendu.

III.5.6 Résultats expérimentaux

- ❖ **Bonne posture** : Le dos reste droit. L'angle calculé se maintient au-dessus de 160 °et la mention "GOOD POSTURE" s'affiche en vert vif.
- ❖ **Mauvaise posture** : L'opérateur s'affaisse vers l'avant (l'angle plongeant fréquemment 150° à 156°). Le système bascule instantanément son affichage textuel vers la mention rouge "BAD POSTURE!", avertissant d'un risque élevé de survenance de Troubles Musculo-Squelettiques (TMS) cervicaux et dorsaux.

III.6 Interface graphique du système

La conception de l'Interface Homme-Machine (IHM) au sein d'un système collaboratif s'inscrit au cœur des directives de l'Industrie 5.0, où l'environnement informatique doit assister l'opérateur de manière bienveillante, adaptative et non intrusive. Afin de garantir une boucle de rétroaction visuelle performante sans surcharger la mémoire de travail de l'utilisateur, notre interface graphique unifiée a été développée en s'appuyant sur les primitives de rendu de la bibliothèque OpenCV.

Cette interface assure la fusion synchrone du flux vidéo capturé, des superpositions géométriques des modèles d'apprentissage profond et des données métriques décisionnelles. Elle se structure autour de trois fonctionnalités visuelles majeures : l'affichage vidéo en temps réel, l'encapsulation dynamique des indicateurs et la visualisation des points topologiques détectés.

III.6.1 Affichage vidéo temps réel

L'affichage vidéo en temps réel constitue la brique de base de la perception visuelle de l'assistant intelligent. L'accès aux trames brutes fournies par le capteur optique de profil est géré par OpenCV. Chaque matrice de pixels subit instantanément un traitement géométrique de retournement horizontal (effet miroir) via la fonction `cv2.flip(frame, 1)`, permettant à l'opérateur de visualiser sa propre posture latérale de façon naturelle et intuitive.

Pour maintenir une réactivité conforme aux exigences industrielles, le rafraîchissement de la fenêtre d'affichage (`cv2.imshow`) est synchronisé avec la cadence d'acquisition du capteur, configurée à 30 images par seconde. La gestion de l'affichage s'effectue au sein d'un thread d'exécution optimisé, limitant l'allocation mémoire à la trame courante.

Le flux d'affichage maintient une stabilité rigoureuse avec une latence d'affichage négligeable, garantissant que l'opérateur perçoit les modifications de son état corporel ou oculaire de manière instantanée, favorisant ainsi une auto-correction immédiate de sa position de travail.

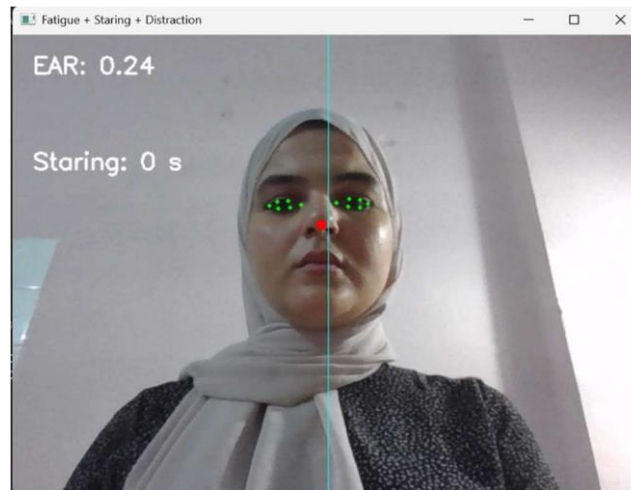


Figure 3.1 : Fenêtre principale de l'interface graphique en temps réel.

III.6.2 Affichage des indicateurs

Afin de transformer les variables mathématiques brutes calculées par les algorithmes en informations directement exploitables par l'humain, l'interface graphique intègre un tableau de bord textuel et colorimétrique incrusté (HUD - *Heads-Up Display*). Ce module utilise la fonction de rendu de texte OpenCV `cv2.putText` pour afficher dynamiquement, à chaque frame, les valeurs numériques des indicateurs clés:

- ❖ **Le Eye Aspect Ratio (EAR)** : Affiché de façon continue sous forme décimale (ex. : EAR: 0.28), permettant de surveiller le degré d'ouverture ou d'affaissement des paupières en temps réel.



Fenêtre avec tête inclinée et le texte rouge "DISTRACTION DETECTED!".



Fenêtre avec les yeux fermés et le texte rouge "FATIGUE DETECTED!".



Fenêtre avec le regard fuyant et le texte rouge "STARING DETECTED!".

Figure 3.2 : Déclenchement des alertes visuelles sur l'IHM (Fatigue et Distraction).

- ❖ **Le temps de Staring :** Un compteur temporel qui comptabilise de seconde en seconde l'absence de clignement oculaire (ex. : Staring: 4s), servant d'indicateur direct de la fatigue cognitive ou de la fixation visuelle prolongée.
- ❖ **L'angle cinématique du dos :** Une mesure entière (ex. : Back Angle: 171°) qui traduit de profil l'alignement de la colonne vertébrale entre l'oreille, l'épaule et la hanche.

Pour maximiser la conscience de la situation par l'opérateur, la gestion des messages d'erreur et des niveaux de gravité suit une logique de codage par couleur stricte, gérée par le module de décision multicritère:

- ❖ **Mode Nominal (Vert) :** Lorsque les angles posturaux et les ratios oculaires respectent les critères ergonomiques, la mention "GOOD POSTURE" s'affiche en vert vif (0, 255, 0), validant le confort de l'opérateur.



Figure 3.3 : L'opérateur assis bien droit, le squelette cyan bien aligné, l'angle $>160^\circ$ et le texte vert "GOOD POSTURE"

- ❖ **Mode Critique (Rouge)** : Dès qu'un seuil de tolérance est franchi de manière persistante (EAR faible ou angle inférieur à 160°), l'interface génère instantanément des bandeaux d'alerte hautement contrastés en rouge cramoisi (0, 0, 255) tels que "FATIGUE DETECTED!" ou "BAD POSTURE!". Ces messages visuels sont conçus pour capter l'attention périphérique de l'utilisateur sans générer de fatigue visuelle additionnelle.



Figure 3.3 : L'opérateur affaissé vers l'avant, le squelette cyan courbé, l'angle $<160^\circ$ et le texte rouge "BAD POSTURE!".

III.6.3 Visualisation des points détectés

Le troisième pilier de notre interface graphique repose sur la superposition géométrique des structures anatomiques extraites par les modèles de Deep Learning (humain, visage, yeux, épaules, etc...). La visualisation de ces points de repère (*landmarks*) valide la précision de la détection submillimétrique effectuée par les frameworks sous-jacents et fournit une interprétation spatiale claire de la posture de l'opérateur.

L'interface utilise les primitives de dessin d'OpenCV (`cv2.circle` et `cv2.line`) pour projeter deux masques distincts sur le corps de l'opérateur:

- ❖ **Le masque oculaire :** Les sous-ensembles de points du modèle *MediaPipe Face Mesh* décrivant les contours des yeux gauche et droit sont matérialisés par des micro-pastilles vertes circulaires de 1 pixel de rayon. Cette discrétion graphique permet de confirmer la robustesse du suivi palpébral même lors des mouvements de rotation de la tête, sans masquer l'œil de l'utilisateur.

- ❖ **Le point d'ancrage nasal** : La pointe du nez (landmark d'index 1) est surlignée par un point rouge distinct, servant de point de pivot pour l'évaluation instantanée du décalage par rapport à l'axe central.
- ❖ **Le squelette cinématique du dos** : Profitant de la configuration déportée de profil, l'interface extrait les landmarks corporels majeurs de *MediaPipe Pose* : l'oreille gauche (7), l'épaule gauche (11) et la hanche gauche (23). Ces articulations sont modélisées par des marqueurs circulaires bleus de 5 pixels de rayon, puis interconnectées dynamiquement par des lignes pleines de couleur jaune-cyan d'une épaisseur de 2 pixels.

Ce tracé filaire forme un goniomètre virtuel de profil directement visible sur l'image. Il illustre de façon explicite le comportement biomécanique du tronc de l'opérateur, rendant immédiatement évident l'angle d'affaissement cervical ou de cassure de la colonne thoracique lors des phases de relâchement musculaire induites par la fatigue.

III.7 Tests et validation

La validation expérimentale d'un système cyber-physique centré sur l'humain (*H-CPPS*) est une phase cruciale pour confirmer l'adéquation entre les exigences théoriques de sécurité et les performances réelles du logiciel. Afin d'évaluer la robustesse, la précision et la réactivité de notre assistant intelligent face aux comportements à risque de l'opérateur industriel, une série de campagnes de simulations d'incidents a été menée au sein de notre environnement de test.

Ces essais pratiques se structurent autour de quatre scénarios représentatifs des dérives cognitives et biomécaniques couramment observées aux postes de contrôle : la fatigue oculaire, la fixation visuelle prolongée (*staring*), la distraction de la tête et l'affaissement postural du dos de profil.

III.7.1 Test de fatigue

Le premier protocole expérimental visait à valider le comportement du système lors de la survenance d'une phase de somnolence ou de fatigue oculaire franche. L'opérateur a simulé des fermetures prolongées des paupières ainsi que des micro-sommeils. Lors de l'abaissement des paupières, les algorithmes de suivi du maillage facial *MediaPipe Face Mesh* ont réagi instantanément : la valeur calculée du *Eye Aspect Ratio* (EAR) s'est effondrée, passant de sa plage nominale de repos (comprise entre 0.27 et 0.32) vers des valeurs résiduelles minimales oscillant entre 0.06 et 0.11.

L'intégration du compteur de persistance temporelle a démontré toute son efficacité : les clignements physiologiques réflexes (dont la durée s'établit entre 150 et 400 ms) ont été correctement filtrés par le système, évitant ainsi le déclenchement intempestif de fausses alertes. À l'inverse, dès que la valeur de l'EAR est restée maintenue sous le seuil critique de 0.22 pendant plus de 15 frames consécutives (soit un horizon temporel de 0.50 seconde à une cadence de 30 FPS), l'état anormal de fatigue a été formellement validé. L'interface a immédiatement incrusté le bandeau d'alerte critique "FATIGUE DETECTED!" en rouge vif, synchronisé avec l'émission continue du signal sonore d'avertissement à la fréquence 1000 Hz.

III.7.2 Test de staring

Le second scénario de test était dédié à l'évaluation du sous-module de détection de la fixation visuelle prolongée (*Staring Detection*), un indicateur de fatigue cognitive intense et de surmenage souvent négligé par les dispositifs de sécurité traditionnels. L'opérateur a simulé une concentration excessive en maintenant les yeux grands ouverts fixés vers l'écran, sans effectuer le moindre clignement oculaire.

Au cours de cet essai, l'EAR est resté stable et élevé (> 0.22), confirmant l'ouverture des yeux. Parallèlement, l'absence de franchissement du seuil bas de clignement a empêché la réinitialisation de la variable de référence `blink_timer`, provoquant l'incrémentaire linéaire du compteur temporel `staring_elapsed` à chaque frame.

Les résultats ont confirmé le strict respect de la logique décisionnelle :

- Dès le franchissement du cap des 3 secondes d'immobilité oculaire, l'interface graphique a généré un avertissement visuel de niveau 1 (orange).
- Au-delà de 10 secondes continues sans clignement (`STARING_TIME = 10 s`), l'état critique de staring a été validé. L'IHM a immédiatement affiché le message "STARING DETECTED!" en couche supérieure du rendu OpenCV, déclenchant l'alarme sonore dédiée codée à la fréquence de 1200 Hz pour inviter l'opérateur à relâcher sa barrière d'attention.

III.7.3 Test distraction tête

Le troisième essai visait à quantifier la capacité de l'assistant intelligent à identifier une perte d'attention ou un abandon de tâche de conduite par l'analyse des mouvements de la tête. L'opérateur

a exécuté des rotations axiales volontaires du visage vers la gauche et vers la droite pour mimer la consultation de documents extérieurs ou la discussion avec un tiers.

L'extraction en temps réel du landmark d'index 1 (la pointe du nez) a permis de mesurer fidèlement la dérive du visage par rapport à l'axe neutre du poste. Lors des phases de rotation, le point rouge du nez s'est écarté de la ligne médiane jaune tracée au centre de l'interface. Dès que la distance absolue `head_offset` a franchi la barrière limite des 25 pixels (correspondant géométriquement à un angle de rotation latérale supérieur à 25°, le système a détecté l'anomalie.

Conformément à la logique multicritère, lorsque cette déviation s'est prolongée en corrélation avec l'absence de dynamique oculaire pendant une durée représentative d'une distraction durable, le niveau d'alerte s'est élevé, matérialisé par l'affichage instantané de la chaîne textuelle "DISTRACTION DETECTED!" associée au signal sonore d'alerte grave à 1400Hz.

III.7.4 Test mauvaise posture

Le quatrième protocole de test concernait la validation du module de surveillance ergonomique, configuré de manière novatrice avec **une caméra déportée sur le côté de l'opérateur** afin de capter l'axe sagittal du tronc sans les occlusions inhérentes aux vues de face. L'opérateur a adopté une posture nominale droite avant de s'affaïsser progressivement vers l'avant, simulant le relâchement musculaire typique induit par la fatigue prolongée sur table de contrôle.

L'extraction des coordonnées cartésiennes absolues de l'oreille gauche (7), de l'épaule gauche (11) et de la hanche gauche (23) par le composant *MediaPipe Pose* a démontré une excellente stabilité de suivi. En position droite, l'angle cinématique interne α calculé au sommet de l'épaule est resté supérieur à 160°(oscillant de manière stable entre 168°et 174°, validant l'affichage textuel "GOOD POSTURE" en vert vif à l'écran.

Dès que l'opérateur a fléchi la colonne thoracique et projeté les cervicales en avant, diminuant la distance relative entre l'oreille et la hanche, l'angle α a chuté sous le seuil critique ergonomique fixé à 160 degrés (atteignant des moyennes expérimentales de 151° à 154°. L'interface graphique a réagi instantanément en modifiant son code couleur pour afficher la mention d'avertissement rouge "BAD POSTURE!", prouvant la viabilité du goniomètre virtuel de profil pour la prévention des Troubles Musculo-Squelettiques (TMS).

III.7.5 Analyse des résultats

L'analyse croisée des données recueillies lors des différentes campagnes d'expérimentation confirme la haute performance, la stabilité et la viabilité opérationnelle de l'assistant intelligent. L'utilisation de compteurs de persistance temporelle et de filtres de trames indépendants par indicateur confère au système une excellente immunité contre les faux positifs induits par les mouvements naturels de l'opérateur.

Tableau 3.1 : Synthèse des indicateurs métriques, seuils critiques et logiques d'alertes du système unifié.

Composant / Risque	Indicateur mathématique	Valeur de repos	Valeur de crise	Seuil critique / temporisation	Alerte IHM	Signal audio	État global
Fatigue oculaire	EAR	0,27 à 0,32	0,06 à 0,11	EAR < 0,22 pendant 15 frames	FATIGUE DETECTED!	1000 Hz	Critique (Niveau 3)
Vigilance (Staring)	staring_elapsed	0 s	> 10 s	> 10 s sans clignement	STARING DETECTED!	1200 Hz	Critique (Niveau 3)
Attention (Tête)	head_offset	< 25 px	> 25 px	head_offset > 25 px	DISTRACTION DETECTED!	1400 Hz	Modéré (Niveau 2)
Posture du dos	Angle θ	168° à 174°	151° à 154°	$\theta < 160^\circ$	BAD POSTURE!	1000 Hz	Ergonomique (TMS)

- **Efficience Informatique (Temps Réel) :** L'exécution découplée de nos scripts maintient un temps de calcul de **18 à 25 ms par image**, générant un flux fluide de **40 à 55 FPS**.
- **Autonomie :** Ce rendement dépasse la contrainte critique du temps réel ≥ 30 FP, validant un déploiement local à bas coût sans infrastructure cloud.

III.8 Limites du système

Malgré l'atteinte des objectifs de précision, de faible latence et de non-intrusivité, l'évaluation expérimentale approfondie de notre prototype a mis en évidence plusieurs limites techniques et environnementales qu'il convient de documenter rigoureusement :

1. **Sensibilité aux variations de luminance :** L'extraction des landmarks faciaux par le framework MediaPipe dépend étroitement de la clarté des contrastes texturaux de l'image.

Bien que l'application de l'algorithme d'égalisation d'histogramme adaptatif (CLAHE) améliore substantiellement la robustesse du suivi dans la pénombre, le système subit des pertes de suivi ou des instabilités transitoires lorsque l'éclairement de l'atelier descend sous le seuil critique de 10 ou lors de l'apparition de violents contre-jours directs.

2. **Contraintes géométriques liées au positionnement de la caméra :** Le choix architectural d'orienter le capteur optique sur le côté de l'opérateur s'avère optimal pour l'analyse biomécanique du dos de profil. Cependant, cette configuration introduit une occultation inhérente de la face opposée du visage. Si l'opérateur effectue une rotation de la tête à l'extrême opposé de l'objectif de la caméra, la visibilité des contours palpébraux est altérée, ce qui peut fausser temporairement le calcul précis de l'EAR des deux yeux.
3. **Dépendance à la qualité du signal vidéo :** L'utilisation de webcams génériques d'entrée de gamme génère un bruit thermique prononcé en conditions de faible luminosité artificielle. Ce bruit numérique induit des micro-fluctuations (instabilités) sur les coordonnées des points détectés, se traduisant par des oscillations artificielles sur les angles calculés ou par l'apparition de faux micro-clignements oculaires.
4. **Seuils décisionnels statiques :** La valeur de l'EAR au repos (œil ouvert) présente une variabilité interindividuelle naturelle selon la morphologie oculaire de chaque individu. L'application d'un seuil critique fixe de 0.22 pour l'ensemble des opérateurs constitue une rigidité logicielle qui peut induire des erreurs de catégorisation chez certains sujets.

III.9 Conclusion

Ce troisième chapitre a permis de concrétiser l'ensemble des modélisations conceptuelles de notre assistant intelligent collaboratif à travers le développement et la validation d'une application informatique unifiée sous Python. En exploitant de manière synergique la puissance de traitement matriciel d'OpenCV et la légèreté des modèles d'apprentissage profond de MediaPipe, nous avons démontré la faisabilité technique d'un outil de monitoring multicritère non invasif, économique et hautement réactif.

Les résultats expérimentaux confirment la capacité du système à diagnostiquer efficacement et simultanément la fatigue oculaire par le ratio EAR, la baisse de vigilance par le staring, la distraction attentionnelle par le suivi de l'arête nasale, et enfin, l'affaissement du tronc par le calcul

de l'angle cinématique sagittal de profil. S'exécutant intégralement en local sur une station de calcul standard avec une latence moyenne de cycle inférieure à 25 ms, cette réalisation prouve qu'il est possible de concilier les impératifs de performance productive et de préservation de la santé au travail.

Bien que certaines limites liées aux conditions d'éclairage ou aux occlusions angulaires de profil subsistent, les perspectives de développement notamment l'intégration d'une routine d'étalonnage personnalisé de session et le remplacement des compteurs de frames statiques par un classificateur temporel profond de type réseau de neurones LSTM ouvrent la voie à une industrialisation fiable de la solution. En remplaçant l'humain au centre des flux d'informations et de supervision, cet assistant collaboratif pose ainsi des jalons logiciels concrets pour l'émergence d'environnements de production plus sûrs, résilients et bienveillants, en parfaite adéquation avec la philosophie de l'Industrie 5.0.

Conclusion Générale

Ce mémoire de fin d'études avait pour ambition de répondre à une problématique centrale de l'industrie moderne : comment protéger l'opérateur humain dans des environnements de production de plus en plus automatisés et exigeants ?

À travers les trois chapitres développés, un cheminement cohérent a permis de passer de l'analyse théorique à la réalisation concrète d'une solution intelligente. Le premier chapitre a mis en lumière l'évolution des systèmes industriels, depuis la mécanisation de l'Industrie 1.0 jusqu'au paradigme humano-centré de l'Industrie 5.0, en soulignant les limites persistantes des dispositifs de sécurité actuels : surcharge d'alarmes, manque d'assistance contextuelle, et prise en compte insuffisante du facteur humain. Cette analyse a confirmé que malgré l'essor des technologies numériques, l'opérateur demeure le maillon le plus vulnérable de la chaîne industrielle.

Le deuxième chapitre a répondu à ce constat en proposant l'architecture complète d'un assistant intelligent de surveillance. S'appuyant sur la vision par ordinateur, le système conçu intègre huit indicateurs complémentaires : l'EAR, le MAR, la Stare Detection, les angles de tête (Yaw, Pitch, Roll), l'angle cervical et l'alignement des épaules organisés dans un pipeline de traitement modulaire, temps réel et non invasif. Cette conception, fondée sur MediaPipe et OpenCV, offre un équilibre optimal entre précision diagnostique, coût matériel réduit et respect de la confidentialité des données.

Le troisième chapitre a validé expérimentalement la viabilité de cette solution à travers quatre scénarios de test représentatifs : fatigue oculaire, fixation visuelle prolongée, distraction de la tête et mauvaise posture du dos. Les résultats obtenus confirment la capacité du système à détecter efficacement ces comportements à risque avec une latence moyenne de cycle inférieure à 25 ms sur matériel standard, sans aucune infrastructure cloud.

Au terme de ce travail, l'assistant intelligent développé illustre concrètement la philosophie de l'Industrie 5.0 : non pas remplacer l'humain, mais le soutenir, le protéger et renforcer sa collaboration avec la machine. Les limites identifiées par la variabilité interindividuelle des seuils, sensibilité à l'éclairage, contraintes de positionnement de la caméra ouvrent des perspectives d'amélioration prometteuses, notamment l'intégration d'un étalonnage personnalisé de session et le

recours à des classificateurs temporels de type LSTM pour une détection encore plus robuste des micro-somnolences.

En définitive, ce projet contribue, à son échelle, à l'émergence d'environnements de travail industriels plus sûrs, plus intelligents et plus bienveillants envers l'opérateur répondant ainsi aux enjeux fondamentaux de sécurité, de santé au travail et de performance productive qui caractérisent l'industrie de demain.

Bibliographie

- [1] X. Min, M. D. Jeanne, et H. Suk, « The Fourth Industrial Revolution: Opportunities and Challenges », *Int. J. Financ. Res.*, vol. 9, p. 13194-13194, févr. 2018, doi: 10.5430/ijfr.v9n2p90.
- [2] « Industry 4.0: state of the art and future trends: International Journal of Production Research: Vol 56 , No 8 - Get Access ». Consulté le: 9 mai 2026. [En ligne].
- [3] B. Pasi, S. Mahajan, et S. Rane, « The current sustainability scenario of Industry 4.0 enabling technologies in Indian manufacturing industries », *Int. J. Product. Perform. Manag.*, vol. ahead-of-print, déc. 2020, doi: 10.1108/IJPPM-04-2020-0196.
- [4] Y. Lu, « Industry 4.0: A survey on technologies, applications and open research issues », *J. Ind. Inf. Integr.*, vol. 6, p. 1-10, juin 2017, doi: 10.1016/j.jii.2017.04.005.
- [5] M. Peruzzini, F. Grandi, et M. Pellicciari, « Benchmarking of Tools for User Experience Analysis in Industry 4.0 », *Procedia Manuf.*, vol. 11, p. 806-813, janv. 2017, doi: 10.1016/j.promfg.2017.07.182.
- [6] A. Sufian, B. Abdullah, M. Ateeq, R. Wah, et D. Clements, « Six-Gear Roadmap towards the Smart Factory », *Appl. Sci.*, vol. 11, p. 3568, avr. 2021, doi: 10.3390/app11083568.
- [7] A. H. G. Rossi *et al.*, « Lean Tools in the Context of Industry 4.0: Literature Review, Implementation and Trends », *Sustainability*, vol. 14, n° 19, p. 12295, janv. 2022, doi: 10.3390/su141912295.
- [8] X. Xu, Y. Lu, B. Vogel-Heuser, et L. Wang, « Industry 4.0 and Industry 5.0-Inception, conception and perception », *J. Manuf. Syst.*, vol. 61, p. 530-535, oct. 2021, doi: 10.1016/j.jmsy.2021.10.006.
- [9] M. Golovianko, V. Terziyan, V. Branytskyi, et D. Malyk, « Industry 4.0 vs. Industry 5.0: Co-existence, Transition, or a Hybrid », *Procedia Comput. Sci.*, vol. 217, p. 102-113, janv. 2023, doi: 10.1016/j.procs.2022.12.206.
- [10] « The “dark side” of Industry 4.0: How can technology be made more sustainable? | International Journal of Operations & Production Management | Emerald Publishing ». Consulté le: 12 mai 2026. [En ligne].
- [11] « Industrie 5.0 : Vers une production durable | PDF | Développement durable | Économie ». Consulté le: 12 mai 2026. [En ligne].

- [12] L. D. Evjemo, T. Gjerstad, E. I. Grøtli, et G. Sziebig, « Trends in Smart Manufacturing: Role of Humans and Industrial Robots in Smart Factories », *Curr. Robot. Rep.*, vol. 1, n° 2, p. 35-41, juin 2020, doi: 10.1007/s43154-020-00006-5.
- [13] J. M. Rožanec *et al.*, « Human-centric artificial intelligence architecture for industry 5.0 applications », *Int. J. Prod. Res.*, vol. 61, n° 20, p. 6847-6872, oct. 2023, doi: 10.1080/00207543.2022.2138611.
- [14] L. S. Dalenogare, G. B. Benitez, N. F. Ayala, et A. G. Frank, « The expected contribution of Industry 4.0 technologies for industrial performance », *Int. J. Prod. Econ.*, vol. 204, p. 383-394, oct. 2018, doi: 10.1016/j.ijpe.2018.08.019.
- [15] P. M. Bednar et C. Welch, « Socio-Technical Perspectives on Smart Working: Creating Meaningful and Sustainable Systems », *Inf. Syst. Front.*, vol. 22, n° 2, p. 281-298, avr. 2020, doi: 10.1007/s10796-019-09921-1.
- [16] A. Belhadi, K. Zkik, A. Cherrafi, S. M. Yusof, et S. El fezazi, « Understanding Big Data Analytics for Manufacturing Processes: Insights from Literature Review and Multiple Case Studies », *Comput. Ind. Eng.*, vol. 137, p. 106099, nov. 2019, doi: 10.1016/j.cie.2019.106099.
- [17] R. Y. Zhong, S. T. Newman, G. Q. Huang, et S. Lan, « Big Data for supply chain management in the service and manufacturing sectors: Challenges, opportunities, and future perspectives », *Comput. Ind. Eng.*, vol. 101, p. 572-591, nov. 2016, doi: 10.1016/j.cie.2016.07.013.
- [18] P. Martin, « L'informatique industrielle au service des scieries », *Rev. For. Fr.*, n° S, p. 179, 1993, doi: 10.4267/2042/26485.
- [19] M. I. Ibrahim, M. Nabil, M. M. Fouda, M. Mahmoud, W. Alasmary, et F. Alsolami, « Efficient Privacy-Preserving Electricity Theft Detection with Dynamic Billing and Load Monitoring for AMI Networks », 28 mai 2020, *arXiv*: arXiv:2005.13793. doi: 10.48550/arXiv.2005.13793.
- [20] P. K. Mishra, R. F. Stewart, M. Bolic, et M. C. E. Yagoub, « RFID in Underground-Mining Service Applications », *IEEE Pervasive Comput.*, vol. 13, n° 1, p. 72-79, janv. 2014, doi: 10.1109/MPRV.2014.14.
- [21] « Cybersecurity Requirements for Industrial Machine Control Systems ». Consulté le: 12 mai 2026. [En ligne]. Disponible sur: <https://www.mdpi.com/2076-3417/15/3/1267>
- [22] « ON SAFETY ISSUE OF INDUSTRIAL CONTROL SYSTEMS. Journal Scientific and Technical Of Information Technologies, Mechanics and Optics ». Consulté le: 12 mai 2026. [En ligne].
- [23] D. Bogatinov et S. Gelev, « Design and implementation of SCADA systems », présenté à ETIMA 2023, mars 2024, p. 167-173. doi: 10.46763/ETIMA2321167b.

- [24] O. L. Tsvetkova et A. R. Aidinyan, « Architecture of the Information Security Incident Management System at Oil and Gas Enterprises », *Her. Dagestan State Tech. Univ. Tech. Sci.*, vol. 51, n° 2, p. 164-174, juill. 2024, doi: 10.21822/2073-6185-2024-51-2-164-174.
- [25] « A qualitative study of safety and human factors challenges in process control rooms operators | Scientific Reports ». Consulté le: 12 mai 2026. [En ligne].
- [26] « Human-machine interaction towards Industry 5.0: Human-centric smart manufacturing - ScienceDirect ». Consulté le: 12 mai 2026. [En ligne]. Disponible sur: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2950550X2400013X>
- [27] A.-R. Ioniță, D.-C. Anghel, et T. Boudouh, « Mind, Machine, and Meaning: Cognitive Ergonomics and Adaptive Interfaces in the Age of Industry 5.0 », *Appl. Sci.*, vol. 15, juill. 2025, doi: 10.3390/app15147703.
- [28] C. Benson, I. C. Obasi, D. V. Akinwande, et C. Ile, « The impact of interventions on health, safety and environment in the process industry », *Heliyon*, vol. 10, n° 1, p. e23604, janv. 2024, doi: 10.1016/j.heliyon.2023.e23604.
- [29] S. O. Johnsen et S. Winge, « Human Factors and Safety in Automated and Remote Operations in Oil and Gas: A Review », *Proceeding 33rd Eur. Saf. Reliab. Conf.*, p. 2288-2295, 2023, doi: 10.3850/978-981-18-8071-1_P271-cd.
- [30] W. S. Intifada, « Analisis Risiko dan Strategi Peningkatan Keselamatan Kerja di Sektor Industri Manufaktur: Tinjauan Literatur », *Ind. J. Ilm. Tek. Ind.*, vol. 9, n° 1, p. 240-253, janv. 2025, doi: 10.37090/indstrk.v9i1.1901.
- [31] F. Guldenmund, « The Nature of Safety Culture: A Review of Theory and Research », *Saf. Sci. - SAF SCI*, vol. 34, p. 215-257, févr. 2000, doi: 10.1016/S0925-7535(00)00014-X.
- [32] S. O. Johnsen et S. Winge, « Human Factors and Safety in Automated and Remote Operations in Oil and Gas: A Review », *Proceeding 33rd Eur. Saf. Reliab. Conf.*, p. 2288-2295, 2023, doi: 10.3850/978-981-18-8071-1_P271-cd.
- [33] S. O. Johnsen et S. Winge, « Human Factors and Safety in Automated and Remote Operations in Oil and Gas: A Review », in *Proceeding of the 33rd European Safety and Reliability Conference*, Research Publishing Services, 2023, p. 2288-2295. doi: 10.3850/978-981-18-8071-1_P271-cd.
- [34] A. M. R. Tortora, V. Di Pasquale, C. Franciosi, S. Miranda, et R. Iannone, « The Role of Maintenance Operator in Industrial Manufacturing Systems: Research Topics and Trends », *Appl. Sci.*, vol. 11, n° 7, p. 3193, janv. 2021, doi: 10.3390/app11073193.

- [35] B. Lu et X. Zhou, « Quality and reliability oriented maintenance for multistage manufacturing systems subject to condition monitoring », *J. Manuf. Syst.*, vol. 52, p. 76-85, juill. 2019, doi: 10.1016/j.jmsy.2019.04.003.
- [36] S. Liu, F. Lei, D. Zhao, et Q. Liu, « Abnormal Situation Management in Chemical Processes: Recent Research Progress and Future Prospects », *Processes*, vol. 11, n° 6, p. 1608, juin 2023, doi: 10.3390/pr11061608.
- [37] Q.-K. Li, H. Lin, X. Tan, et S. Du, « H^∞ Consensus for Multiagent-Based Supply Chain Systems Under Switching Topology and Uncertain Demands », *IEEE Trans. Syst. Man Cybern. Syst.*, vol. 50, n° 12, p. 4905-4918, déc. 2020, doi: 10.1109/TSMC.2018.2884510.
- [38] G. Murtarelli, A. Gregory, et S. Romenti, « A conversation-based perspective for shaping ethical human-machine interactions: The particular challenge of chatbots », *J. Bus. Res.*, vol. 129, p. 927-935, mai 2021, doi: 10.1016/j.jbusres.2020.09.018.
- [39] M. A. Dhuieb, F. Laroche, et A. Bernard, « Context-awareness: A Key Enabler for Ubiquitous Access to Manufacturing Knowledge », *Procedia CIRP*, vol. 41, p. 484-489, janv. 2016, doi: 10.1016/j.procir.2015.12.027.
- [40] S. J. Guastello, R. R. Gershon, et L. R. Murphy, « Catastrophe model for the exposure to blood-borne pathogens and other accidents in health care settings », *Accid. Anal. Prev.*, vol. 31, n° 6, p. 739-749, nov. 1999, doi: 10.1016/s0001-4575(99)00037-8.
- [41] « Grimaila, M. R. The genesis of the NATO cooperative cyber defense centre of excellence. ISSA J. ;16(8). 23-30 (2018). », Bing. Consulté le: 12 mai 2026. [En ligne].
- [42] A. Georgescu, A. Vevera, et C. Cîrnu, « A Critical Infrastructure Protection Perspective on Counter-Terrorism in South-Eastern Europe », *Cyber Terror. Extrem. Threat Crit. Infrastruct. Prot.*, Consulté le: 12 mai 2026. [En ligne]. Disponible sur: <https://www.isij.eu/article/critical-infrastructure-protection-perspective-counter-terrorism-south-eastern-europe>
- [43] S. Damiros, S. Saliakas, D. Karasavvas, et E. P. Koumoulos, « An Overview of Tools and Challenges for Safety Evaluation and Exposure Assessment in Industry 4.0 », *Appl. Sci.*, vol. 14, n° 10, p. 4207, janv. 2024, doi: 10.3390/app14104207.
- [44] T. Montanaro, I. Sergi, I. Stefanizzi, L. Landi, L. Di Donato, et L. Patrono, « IoT-Aware Architecture to Guarantee Safety of Maintenance Operators in Industrial Plants », *Appl. Syst. Innov.*, vol. 6, n° 2, p. 46, mars 2023, doi: 10.3390/asi6020046.
- [45] Haisong Gu et Qiang Ji, « An automated face reader for fatigue detection », in *Sixth IEEE International Conference on Automatic Face and Gesture Recognition, 2004. Proceedings.*, Seoul, Korea: IEEE, 2004, p. 111-116. doi: 10.1109/AFGR.2004.1301517.

- [46] « Blink-Parameter-as-Indicators-of-Drivers-Sleepiness-Possibilities-and-Limitations.pdf ». Consulté le: 5 juin 2026. [En ligne].
- [47] G. Bradski, « The OpenCV Library. », Consulté le: 5 juin 2026. [En ligne]. Disponible sur: <https://elibrary.ru/item.asp?id=4934581>
- [48] C. Lugaresi *et al.*, « MediaPipe: A Framework for Building Perception Pipelines », 14 juin 2019, *arXiv*: arXiv:1906.08172. doi: 10.48550/arXiv.1906.08172.
- [49] M. Ngxande, J.-R. Tapamo, et M. Burke, « Driver drowsiness detection using behavioral measures and machine learning techniques: A review of state-of-art techniques », in *2017 Pattern Recognition Association of South Africa and Robotics and Mechatronics (PRASA-RobMech)*, nov. 2017, p. 156-161. doi: 10.1109/RoboMech.2017.8261140.
- [50] O. F. Hassan, A. F. Ibrahim, M. A. Makhoulf, B. Hafiz, et A. Gomaa, « Intelligent driver monitoring systems: a survey of drowsiness detection technologies for road safety », *Artif. Intell. Rev.*, vol. 59, n° 6, p. 137, mai 2026, doi: 10.1007/s10462-026-11505-w.
- [51] P. Viola et M. Jones, *Rapid Object Detection using a Boosted Cascade of Simple Features*, vol. 1. 2001, p. 511. doi: 10.1109/CVPR.2001.990517.
- [52] T. Soukupova, « Eye Blink Detection Using Facial Landmarks ».
- [53] J. A. Stern, D. Boyer, et D. Schroeder, « Blink Rate: A Possible Measure of Fatigue », *Hum. Factors*, vol. 36, n° 2, p. 285-297, juin 1994, doi: 10.1177/001872089403600209.
- [54] E. Murphy-Chutorian et M. M. Trivedi, « Head Pose Estimation in Computer Vision: A Survey », *IEEE Trans. Pattern Anal. Mach. Intell.*, vol. 31, n° 4, p. 607-626, avr. 2009, doi: 10.1109/TPAMI.2008.106.
- [55] K. K. Hansraj, « Assessment of Stresses in the Cervical Spine Caused by Posture and Position of the Head ».
- [56] E. Murphy-Chutorian et M. M. Trivedi, « Head Pose Estimation in Computer Vision: A Survey », *IEEE Trans. Pattern Anal. Mach. Intell.*, vol. 31, n° 4, p. 607-626, avr. 2009, doi: 10.1109/TPAMI.2008.106.
- [57] O. Steven Eyobu et D. S. Han, « Feature Representation and Data Augmentation for Human Activity Classification Based on Wearable IMU Sensor Data Using a Deep LSTM Neural Network », *Sensors*, vol. 18, n° 9, p. 2892, sept. 2018, doi: 10.3390/s18092892.

Annexes

Annexe A

Paramètres et seuils du système.

ANNEXE A

Récapitulatif des paramètres et seuils du système

A.1 Synthèse globale des seuils

Le tableau suivant récapitule l'ensemble des seuils décisionnels, des indicateurs mathématiques, des valeurs observées en simulation et des réponses du système pour les quatre types d'événements détectés.

Tableau A.1 Synthèse complète des paramètres du système

Événement	Indicateur	Valeur normale	Valeur crise	Seuil/durée	Alarme (Hz)
Fatigue (yeux)	EAR moyen	0.27 – 0.32	0.06 – 0.11	< 0.22 / 15 fr.	1000 Hz
Staring	staring_elapsed	0 – 3 s	> 10 s	> 10 s	1200 Hz
Distraction	head_offset	< 25 px	> 25 px	> 25 px	1400 Hz
Mauvaise posture	Angle θ (°)	168° – 174°	151° – 154°	< 160° / 5 s	1000 Hz

A.2 Indices landmarks MediaPipe utilizes

Tableau A.2 Indices landmarks MediaPipe utilisés dans les scripts

Index	Partie du corps	Modèle MediaPipe	Utilisation dans le script
33,160,158,133,153,144	Contour œil gauche	Face Mesh	Calcul EAR gauche
362,385,387,263,373,380	Contour œil droit	Face Mesh	Calcul EAR droit
1	Pointe du nez	Face Mesh	Calcul head_offset (distraction)

Index	Partie du corps	Modèle MediaPipe	Utilisation dans le script
7	Oreille gauche	Pose	Point A — calcul angle posture
11	Épaule gauche	Pose	Point B (sommet) — calcul angle
23	Hanche gauche	Pose	Point C — calcul angle posture

Annexe B

Guide d'installation et d'exécution.

B.1 Prérequis système

- Système d'exploitation : Windows 10 / Windows 11 (64 bits) — obligatoire pour winsound.
- Python : version 3.10 ou supérieure recommandée.
- Processeur : Intel Core i5 ou équivalent (cadence ≥ 2.0 GHz).
- Mémoire RAM : 8 Go minimum (4 Go suffisants pour les scripts seuls).
- Caméra : webcam USB standard (640×480, 30 FPS minimum).
- Connexion Internet : requise uniquement pour l'installation des bibliothèques.

B.2 Installation des bibliothèques Python

Ouvrir l'invite de commandes Windows (cmd) ou PowerShell en tant qu'administrateur, puis exécuter la commande suivante pour installer toutes les dépendances nécessaires :

```
pip install mediapipe opencv-python numpy  
# Vérification des versions installées
```

```
pip show mediapipe opencv-python numpy
```

Note : la bibliothèque winsound est native à Python sur Windows et ne nécessite aucune installation supplémentaire. La bibliothèque math est également native.

B.3 Positionnement de la caméra

Pour le Script 1 (yeux_et_tete.py) :

- Positionner la caméra de face, à une distance de 50 à 80 cm du visage de l'opérateur.
- La caméra doit être centrée par rapport au visage pour que le calcul head_offset soit valide.
- Éviter les contre-jours (fenêtre derrière l'opérateur).

Pour le Script 2 (badposture2.py) :

- Positionner la caméra sur le côté gauche de l'opérateur (vue latérale gauche).
- La caméra doit voir simultanément l'oreille gauche (landmark 7), l'épaule gauche (landmark 11) et la hanche gauche (landmark 23).

- Distance recommandée : 1.0 à 1.5 m de l'opérateur.
- La caméra doit être à hauteur de la ceinture pour une vue latérale optimale.

B.4 Exécution des scripts

```
# Naviguer vers le dossier contenant les scripts
cd C:\chemin\vers\votre\dossier

# Lancer le module de détection des yeux et de la tête
python yeux_et_tete.py

# Pour quitter : appuyer sur la touche ESC

# Lancer le module de détection de posture du dos
python badposture2.py

# Pour quitter : appuyer sur la touche ESC
```

B.5 Résolution des problèmes courants

Tableau B.1 Guide de résolution des problèmes courants

Problème rencontré	Solution
Camera not detected	Vérifier que la webcam est branchée. Changer l'index : cv2.VideoCapture(1)
ModuleNotFoundError: mediapipe	Exécuter : pip install mediapipe
Fenêtre qui ne s'ouvre pas	S'assurer qu'OpenCV est installé : pip install opencv-python

Problème rencontré	Solution
Landmarks non détectés	Améliorer l'éclairage, se rapprocher de la caméra, éviter les contre-jours
Alarme non fonctionnelle	winsound fonctionne uniquement sur Windows. Sur Linux/Mac, remplacer par pygame.mixer
FPS trop lent	Réduire la résolution : cap.set(cv2.CAP_PROP_FRAME_WIDTH, 640)