

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

République Algérienne Démocratique et Populaire

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

المدرسة الوطنية العليا للتكنولوجيات المتقدمة

École Nationale Supérieure des Technologies Avancées

Département : Génie électrique Et Informatique Industrielle



Mémoire de projet de fin d'études

pour l'obtention du diplôme Master en **Automatique**

Spécialité

Automatique et informatique industrielle

L'Impact des Nouvelles Technologies de l'Industrie 4.0 sur la Supervision Industrielle : Révolution et Perspectives

Réalisé par

BABAAISSA Oualid

ZERARKA Mohamed Fawzi

Les membres de Jury :

Président	Mme. BELHACHAT Faiza	M.C.A	ENSTA
Promoteur	M. REZGUI Wail	M.C.B	ENSTA
Co-Promoteur	M. HAMDANIA Mohamed Fouzi	Expert métier	SIEMENS
Examineur	M. CHERABIT Nouredine	M.A.A	ENSTA
Examineur	M. DERMOUCHE Reda	M.C.B	ENSTA

Alger, le 27/06/2024

Année universitaire 2023 – 2024

L'Impact des Nouvelles Technologies de l'Industrie 4.0 sur la Supervision Industrielle : Révolution et Perspectives

ZERARKA Mohamed Fawzi

*Dept. Génie Electrique et Informatique Industrielle
Ecole Nationale Supérieure des Technologies Avancées
Alger, Algérie
m_zerarka@ensta.edu.dz*

BABAAISSA Oualid

*Dept. Génie Electrique et Informatique Industrielle
Ecole Nationale Supérieure des Technologies Avancées
Alger, Algérie
o_babaaissa@ensta.edu.dz*

REZGUI Wail

*Dept. Génie Industriel et Maintenance
Ecole Nationale Supérieure des Technologies Avancées
Alger, Algérie
wail.rezgui@ensta.edu.dz*

HAMDANIA Mohamed Fouzi

*Siemens Digital Industries
Alger, Algérie*

Abstract—L'Industrie 4.0, également connue sous le nom de quatrième révolution industrielle, est caractérisée par l'intégration des technologies de l'information et de la communication avec les systèmes de production traditionnels pour créer des usines intelligentes et interconnectées. Cet article explore les technologies de supervision essentielles pour la mise en œuvre de l'Industrie 4.0, en mettant l'accent sur les interfaces homme-machine (HMI), l'Internet des objets (IoT), l'analyse du Big Data, et l'intelligence artificielle (IA). À travers une étude de cas sur l'automatisation et la supervision d'un séparateur de test triphasique, nous démontrons comment ces technologies peuvent améliorer l'efficacité opérationnelle, réduire les temps d'arrêt, et fournir des connaissances précieuses pour la prise de décision. En outre, nous discutons des tendances émergentes et des perspectives futures, telles que le jumeau numérique et la connectivité 5G, qui continueront à transformer les processus industriels.

Mots-Clé—Industrie 4.0, Internet des objets, systèmes cyber-physiques, Big Data, intelligence artificielle, jumeau numérique, connectivité 5G, supervision industrielle, automatisation, efficacité opérationnelle.

I. INTRODUCTION

L'avènement de l'Industrie 4.0 représente une transformation radicale des systèmes de production industriels, intégrant des technologies avancées telles que l'Internet des Objets (IoT), les systèmes cyber-physiques (CPS), le Big Data, et l'intelligence artificielle (IA). Cette nouvelle ère de la fabrication vise à créer des usines intelligentes et interconnectées, où les machines, les systèmes et les êtres humains collaborent de manière transparente et en temps réel pour améliorer l'efficacité, la flexibilité et la qualité des produits.

L'Industrie 4.0 repose sur l'intégration et l'interaction des technologies de l'information et de la communication avec les processus industriels traditionnels. Cette synergie permet de développer des systèmes de production plus intelligents,

autonomes et décentralisés, capables de s'adapter rapidement aux changements de la demande et aux perturbations du marché. Les usines du futur utiliseront des données en temps réel pour optimiser leurs opérations, réduire les temps d'arrêt, et anticiper les besoins de maintenance.

Dans cet article, nous explorons les différentes technologies de supervision qui jouent un rôle crucial dans la mise en œuvre de l'Industrie 4.0. Nous examinerons en détail les systèmes HMI (Interface Homme-Machine), le rôle de l'IoT dans la surveillance des processus, l'analyse du Big Data pour l'optimisation des performances, ainsi que l'application de l'IA pour la maintenance prédictive et la prise de décision automatisée. En outre, nous aborderons les défis et les opportunités associés à l'intégration de ces technologies dans les environnements industriels existants.

À travers une étude de cas concrète, nous illustrerons comment l'automatisation et la supervision d'un séparateur de test triphasique peuvent bénéficier des technologies de l'Industrie 4.0, en utilisant des capteurs connectés, des systèmes de contrôle avancés, et des plateformes cloud pour la collecte et l'analyse des données. Cette approche permet non seulement d'améliorer l'efficacité opérationnelle, mais aussi de fournir des connaissances précieuses pour la gestion stratégique et la prise de décision.

Enfin, nous discuterons des tendances émergentes et des perspectives futures de l'Industrie 4.0, telles que le jumeau numérique et la connectivité 5G, qui promettent de transformer encore davantage les processus industriels. Ces innovations offrent des possibilités illimitées pour l'optimisation, la personnalisation et la résilience des systèmes de production dans un monde de plus en plus digitalisé et interconnecté.

II. L'INDUSTRIE 4.0

L'Industrie 4.0, également appelée quatrième révolution industrielle, est un concept global et une nouvelle tendance dans la fabrication ainsi que dans les secteurs connexes. Elle repose sur l'intégration de technologies avancées permettant de créer des écosystèmes de fabriques intelligentes, autonomes et décentralisées, ainsi que des services et produits intégrés. Cette révolution aura des impacts énormes sur nos vies, notre travail et nos façons de nous connecter les uns aux autres. Contrairement aux précédentes révolutions industrielles, elle se distingue par sa rapidité, son ampleur et son impact systémique. [1]

Le concept d'Industrie 4.0 repose sur l'intégration des technologies de l'information et de la communication avec les technologies industrielles. Il s'appuie principalement sur la construction de Systèmes Cyber-Physiques (CPS) pour réaliser des usines numériques et intelligentes, visant à promouvoir une approche de fabrication plus numérique, guidée par l'information, personnalisée et respectueuse de l'environnement. [2]

Historiquement, la première révolution industrielle a été marquée par l'utilisation de la machine à vapeur, la deuxième par l'électricité pour générer une production massive, et la troisième par les technologies de l'information pour automatiser la fabrication. La quatrième révolution industrielle se différencie par son intégration rapide de nouvelles technologies qui créent un écosystème de fabrication décentralisé et efficace. [3]

En avril 2013, le concept d'Industrie 4.0 a été officiellement présenté lors d'une foire industrielle à Hanovre, en Allemagne, et il est rapidement devenu une stratégie nationale allemande. Il vise à construire un modèle de production hautement flexible de produits et services personnalisés et numériques, avec des interactions en temps réel entre les personnes, les produits et les dispositifs durant le processus de production. [3]

Les technologies fondamentales de l'Industrie 4.0 comprennent l'intelligence artificielle, les systèmes cyber-physiques, le blockchain, l'Internet des objets, le cloud computing, la cybersécurité, l'intégration des systèmes, le Big Data et les analyses, et la fabrication intelligente (voir Figure 1). Ces technologies transforment les systèmes de production industrielle, améliorant l'efficacité et la compétitivité des usines grâce à l'intégration des systèmes numériques et des réseaux de communication. [3]

Les technologies de l'Industrie 4.0 jouent également un rôle crucial dans la supervision des processus industriels. Grâce à l'Internet des objets (IoT) et aux systèmes cyber-physiques (CPS), les données des capteurs installés sur les équipements de production peuvent être collectées et analysées en temps réel. Cela permet une surveillance continue et précise des processus, aidant à détecter les anomalies et à prévenir les pannes avant qu'elles ne surviennent. De plus, l'analyse des Big Data et l'intelligence artificielle (IA) permettent d'optimiser les opérations en fournissant des informations sur les performances des machines et en recommandant des

actions correctives. Le cloud computing facilite le stockage et le traitement des vastes volumes de données générés, tout en assurant leur accessibilité à distance, ce qui est essentiel pour la supervision à grande échelle. En intégrant ces technologies, les entreprises peuvent non seulement améliorer la qualité et l'efficacité de leur production, mais aussi réduire les coûts opérationnels et les temps d'arrêt. [2]

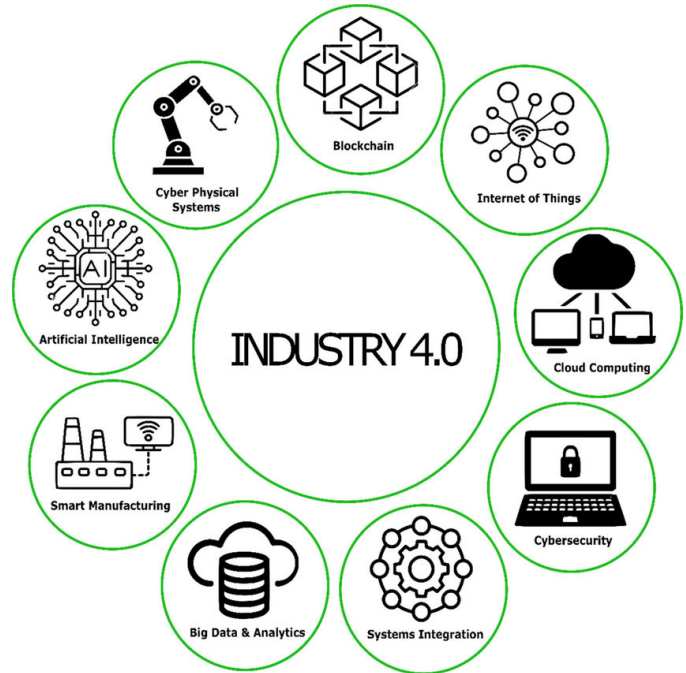


Fig. 1. Les technologies fondamentales de l'Industrie 4.0 [4]

III. FONDEMENTS TECHNOLOGIQUES

A. L'Internet des objets:

L'Internet des objets (IoT) peut être défini comme un réseau mondial de dispositifs connectés, équipés de capteurs et d'autres technologies, permettant la collecte, l'échange et l'analyse de données via Internet. Ces dispositifs, qui peuvent inclure des objets du quotidien, des véhicules, des machines industrielles, et bien plus, sont intégrés avec des composants informatiques qui leur confèrent des capacités de détection et d'action. La figure 2 illustre divers aspects de l'IoT, montrant une variété de dispositifs connectés tels que des voitures, des appareils ménagers, des capteurs industriels et des systèmes de sécurité, tous interagissant au sein d'un réseau global. [5]

Les caractéristiques essentielles de l'IoT comprennent :

- 1) **Connectivité:** Utilisation de réseaux pour permettre la communication entre les dispositifs et avec le cloud.
- 2) **Identifiabilité unique:** Chaque dispositif possède une adresse unique, soit via IPv6, soit via une adresse de contrôle d'accès aux médias (MAC).
- 3) **Automatisation:** Capacité des dispositifs à effectuer des actions sans intervention humaine directe, en se basant sur les données collectées et analysées. [6]



Fig. 2. Illustration des divers dispositifs connectés dans l'Internet des objets (IoT)

L'IoT facilite les interactions entre les mondes physique et virtuel, permettant une connexion fiable entre les personnes et les objets, en tout lieu et à tout moment. Il soutient également des activités industrielles avancées telles que la production intelligente, la maintenance préventive, les réseaux électriques intelligents et les villes intelligentes. En somme, l'IoT vise à établir des connexions autonomes, robustes et sécurisées entre les dispositifs et les applications, en intégrant l'intelligence dans ces dispositifs et en permettant la communication machine-à-machine (M2M). [5]

L'Internet des objets (IoT) joue un rôle essentiel dans la supervision des machines industrielles. En intégrant des capteurs et des dispositifs connectés dans les équipements de production, l'IoT permet la surveillance en temps réel des opérations. Cela inclut la collecte continue de données sur les performances des machines, l'état des composants, et les conditions environnementales. Les données recueillies sont ensuite analysées pour détecter les anomalies, prévoir les pannes potentielles et optimiser les processus de maintenance. Grâce à l'IoT, les industries peuvent améliorer l'efficacité opérationnelle, réduire les temps d'arrêt et les coûts de réparation, et augmenter la durée de vie des équipements. En outre, l'IoT facilite la gestion centralisée et la prise de décision basée sur des données précises et actualisées, ce qui est crucial pour les environnements de production moderne et les initiatives de fabrication intelligente.

B. Systèmes Cyber-Physiques (CPS):

Un système cyber-physique (CPS) est un système qui intègre de l'électronique, des logiciels, des capteurs et des actionneurs avec des capacités de communication. Ces systèmes sont autonomes et embarqués, leur permettant d'interagir avec leur environnement en capturant des données, en les traitant, et en contrôlant ou influençant le processus associé à travers une boucle de rétroaction. Les CPS sont utilisés pour contrôler et piloter les processus physiques, augmentant ainsi ces processus de nouvelles fonctionnalités. Grâce à leurs capacités de communication, les CPS peuvent collaborer avec d'autres systèmes et échanger des données avec des systèmes distants, que ce soit via des connexions filaires, comme un bus industriel, ou sans

fil. Lorsqu'un CPS utilise les technologies de communication de l'internet, il devient un système intégré dans l'Internet des Objets (IoT). [7]

Dans un CPS, des objets physiques et diverses plateformes logicielles sont intégrés pour permettre l'interaction entre les différents composants et l'échange d'informations pertinentes. Au fur et à mesure que la technologie CPS se développe, elle occupera une position importante dans divers domaines, notamment la fabrication de véhicules automobiles, les machines et l'industrie lourde, la métallurgie, la production d'énergie, ainsi que le transport et la logistique. [2]

C. Analyse du Big Data:

Le Big Data se réfère à des ensembles de données massifs, complexes et volumineux produits à une vitesse élevée par diverses sources telles que les réseaux sociaux, les capteurs et les transactions commerciales. Il est caractérisé par les "3 V" : Volume, Variété et Vélocité, avec des attributs supplémentaires de Véracité et de Valeur. Le Volume fait référence à la quantité énorme de données générées, qui peut atteindre des exaoctets. La Variété englobe la diversité des types de données, qu'elles soient structurées, non structurées ou semi-structurées, provenant de différentes sources. La Vélocité concerne la rapidité à laquelle les données sont produites et traitées, nécessitant souvent des capacités de traitement en temps réel. La véracité se rapporte à la fiabilité et à la qualité des données, cruciales pour obtenir des informations précises. Enfin, la Valeur est le potentiel des données à fournir des informations précieuses qui peuvent aider à la prise de décision et à l'optimisation des opérations. [6] [3]

L'analyse des Big Data implique l'utilisation de techniques avancées et de technologies pour examiner ces vastes ensembles de données afin de découvrir des motifs cachés, des corrélations, des tendances du marché, et d'autres informations utiles. Les méthodes d'analyse incluent l'analyse descriptive, qui fournit un aperçu des données historiques, l'analyse diagnostique, qui examine pourquoi certains événements se sont produits, l'analyse prédictive, qui utilise des modèles statistiques et des algorithmes de machine learning pour prévoir les tendances futures, et l'analyse prescriptive, qui recommande des actions à entreprendre en fonction des analyses réalisées. Les outils employés pour le Big Data Analytics comprennent les bases de données NoSQL, les frameworks de traitement distribué comme Hadoop et Spark, les langages de programmation comme Python et divers outils de visualisation et de Business Intelligence. Cette approche permet aux entreprises de prendre des décisions plus éclairées, d'optimiser leurs opérations, d'innover et de créer des avantages concurrentiels. [3] [2]

Comme illustré dans la Figure 3, cette approche permet aux entreprises de prendre des décisions plus éclairées, d'optimiser leurs opérations, d'innover et de créer des avantages concurrentiels.

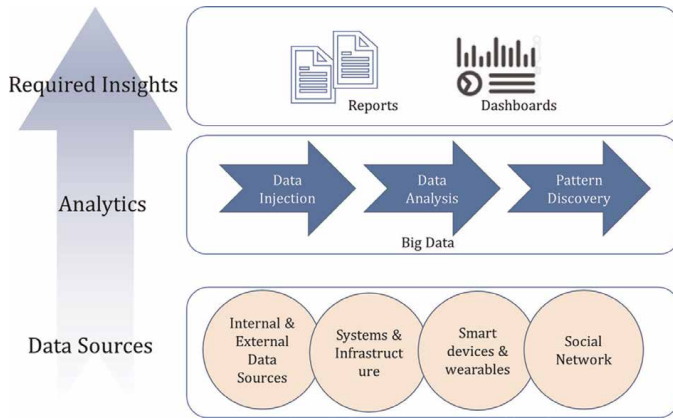


Fig. 3. Vue d'ensemble de l'analyse des Big Data [6]

D. Intelligence Artificielle (IA):

L'intelligence artificielle (IA) désigne la simulation de l'intelligence humaine par des machines, en particulier des systèmes informatiques. Cette technologie englobe divers domaines tels que l'apprentissage automatique (machine learning), le traitement du langage naturel et la reconnaissance des formes. Dans le contexte de la supervision des processus industriels, l'IA joue un rôle crucial en optimisant les opérations, améliorant l'efficacité et augmentant la sécurité. Grâce à l'IA, les systèmes de supervision peuvent analyser d'énormes volumes de données en temps réel, prédire les pannes d'équipement avant qu'elles ne surviennent, et automatiser la prise de décision pour des réponses plus rapides et plus précises aux problèmes. En intégrant des technologies telles que les réseaux neuronaux et les algorithmes d'apprentissage, l'IA permet une surveillance proactive et une maintenance prédictive, réduisant ainsi les temps d'arrêt et les coûts opérationnels. De plus, elle facilite la gestion des ressources et l'optimisation des processus en adaptant continuellement les paramètres de production en fonction des données recueillies, ce qui se traduit par une amélioration globale de la productivité et de la qualité des produits. [8]

E. Cloud Computing

Le cloud computing, également appelé informatique en nuage, désigne la fourniture de services informatiques (serveurs, stockage, bases de données, réseaux, logiciels, analyses, etc.) via Internet ("le cloud") [9]. Cette technologie permet aux entreprises de bénéficier de ressources évolutives et flexibles, accessibles à la demande, ce qui est essentiel pour répondre aux besoins dynamiques et en constante évolution de l'Industrie 4.0. En facilitant l'intégration des technologies numériques dans les processus industriels, le cloud computing contribue à la création d'usines intelligentes et interconnectées. Il permet la maintenance prédictive, la gestion optimisée de la chaîne d'approvisionnement, et l'automatisation des opérations industrielles, tout en réduisant les coûts et en augmentant l'efficacité opérationnelle [10]. La figure 4 montre les différents composants du cloud computing, tels que les

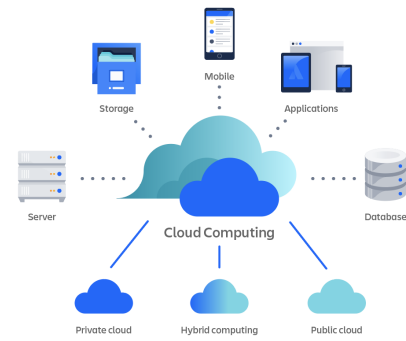


Fig. 4. les composants du cloud computing

serveurs, les applications, le stockage, les bases de données, et leur interaction dans différents types de cloud (cloud privé, cloud hybride et cloud public), illustrant ainsi la flexibilité et la connectivité offertes par cette technologie [11] [12].

F. Cyber Sécurité

Dans l'Industrie 4.0, la cybersécurité est essentielle en raison de l'intégration des systèmes cyber-physiques (CPS) avec des technologies avancées comme l'Internet des objets (IoT), les mégadonnées et l'informatique en nuage. Cette interconnexion crée des réseaux intelligents mais expose également les systèmes à diverses cyberattaques. Kim et al. (2017) soulignent que les CPS sont vulnérables à une large gamme d'attaques pouvant affecter à la fois les domaines cyber et physiques. Lezzi et al. (2018) insistent sur la nécessité de mesures de cybersécurité robustes pour protéger contre les violations de données et les accès non autorisés, essentielles pour maintenir la sécurité et l'efficacité des systèmes de production décentralisés [13]. Cela implique la mise en œuvre de techniques de chiffrement avancées, de systèmes de détection des intrusions et d'une surveillance continue (voir Figure 5).



Fig. 5. Cybersécurité dans l'Industrie 4.0

IV. IHM INDUSTRIELLE

A. Composants Internes de l'HMI

Les interfaces homme-machine (HMI) industrielles sont composées de divers éléments techniques essentiels pour garantir un fonctionnement optimal :

Processeur : Le processeur, souvent basé sur une architecture ARM ou x86, est le cerveau du système HMI. Il exécute les algorithmes de traitement des données, les tâches de communication et les interfaces utilisateur. [14]

Écran : Les écrans LCD ou LED tactiles haute résolution permettent une interaction directe avec le système. Ils peuvent varier en taille selon les besoins spécifiques de l'application. [15]

Ports de Communication : Les HMI disposent de multiples ports, tels que Ethernet, USB, RS-232/485, et parfois des interfaces sans fil (Wi-Fi, Bluetooth), pour assurer la connectivité avec des contrôleurs logiques programmables (PLC), des capteurs et d'autres dispositifs.

B. Architecture de Traitement des Données

L'architecture de traitement des données d'une HMI industrielle est structurée de manière à optimiser la collecte, le traitement et l'affichage des informations [16]:

Acquisition des données : Les données sont collectées en temps réel depuis les PLC (Programmable Logic Controllers) via des protocoles standardisés comme Modbus, Profibus, et OPC UA. Ces données sont essentielles pour la surveillance et le contrôle des processus industriels.

Traitement des données : Les données brutes sont traitées par le processeur pour générer des informations pertinentes. Ce traitement peut inclure le filtrage, l'agrégation, et l'analyse des données pour détecter des anomalies ou des tendances.

Affichage des données : Les données traitées sont présentées sur l'écran de l'HMI sous forme de graphiques, de tableaux et d'autres visualisations interactives pour faciliter la prise de décision par les opérateurs.

C. Intégration

L'intégration des HMI dans les environnements industriels peut se faire de plusieurs manières pour répondre aux différents besoins d'installation [17]:

Intégration Centralisée : Les HMI peuvent être centralisées dans une salle de contrôle, permettant aux opérateurs de surveiller et gérer les opérations à partir d'un emplacement unique. Cette méthode est souvent utilisée dans les systèmes SCADA pour une surveillance à grande échelle.

Intégration Locale : Les HMI peuvent être installées directement sur les armoires de contrôle situées à proximité des machines ou des processus. Cette approche permet un accès rapide et local aux données et aux commandes.

Intégration Distribuée : Les HMI peuvent être intégrées directement avec les systèmes de contrôle distribués (DCS) et les systèmes de gestion de la production (MES). Cela permet une interaction harmonieuse et une automatisation accrue, avec une connectivité à travers l'ensemble du site industriel (voir Figure 6)..

D. Contrôle

Le contrôle des HMI peut être effectué localement ou à distance pour une flexibilité accrue [18]:

Contrôle Tactile : Les opérateurs peuvent interagir directement avec le système via l'écran tactile de l'HMI, permettant une manipulation intuitive et rapide des commandes.

Contrôle à Distance : Le contrôle des HMI peut se faire à distance pour plus de flexibilité. Grâce à des réseaux sécurisés

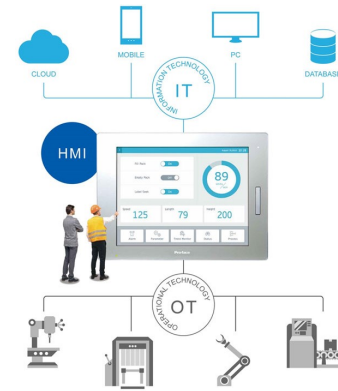


Fig. 6. Architecture et intégration d'une HMI dans les systèmes IT et OT.

et des protocoles comme HTTPS et MQTT, un technicien peut accéder aux HMI via une application mobile. Cela permet d'ajuster les paramètres de production, réduisant ainsi les temps d'arrêt et améliorant l'efficacité opérationnelle.

E. Sécurité

La sécurité est cruciale pour protéger les données et les opérations des HMI industrielles [19]:

Accès au HMI : L'accès aux HMI est strictement contrôlé pour garantir que seuls les utilisateurs autorisés peuvent interagir avec les systèmes critiques. De plus, des méthodes d'authentification multi-facteurs (MFA) ajoutent une couche supplémentaire de sécurité en demandant plusieurs formes de vérification avant de permettre l'accès.

Modification des Données : Les modifications sont protégées par des combinaisons de nom d'utilisateur et de mot de passe (username/password) et des signatures électroniques, avec des journaux de modification pour assurer la traçabilité.

F. Avancées Récentes et Défis

Les HMI industrielles ont évolué, mais elles font face à des défis persistants [20]:

Avancées récentes : Intégration de technologies IoT, amélioration de l'interface utilisateur avec des écrans tactiles capacitifs multi-touch, et utilisation de l'intelligence artificielle pour l'analyse prédictive et la maintenance proactive.

Défis et limitations : Gestion des cyber-menaces, complexité de l'intégration avec des systèmes hétérogènes, et traitement efficace de grandes quantités de données en temps réel.

G. Perspectives Futures

Les technologies émergentes offrent de nouvelles possibilités pour les HMI industrielles :

Réalité Augmentée (AR) : La réalité augmentée permettra aux opérateurs d'interagir avec les systèmes industriels via des dispositifs AR, superposant des informations contextuelles sur les environnements physiques pour une maintenance plus intuitive et une formation immersive (voir Figure 7). [21], [22]



Fig. 7. Application de la réalité augmentée pour l'interaction avec les systèmes industriels [23]

V. INTÉGRATION ET MISE EN ŒUVRE

Étude de Cas 1: Automatisation et Supervision d'un Séparateur de Test Mobile avec l'IoT et le Cloud:

L'automatisation et la supervision d'un séparateur de test triphasique jouent un rôle crucial dans l'optimisation du rendement des puits de pétrole en séparant efficacement le pétrole, le gaz et l'eau. Ce projet vise à automatiser le processus de séparation à l'aide du PLC ET200SP, à assurer une supervision en temps réel grâce à une interface homme-machine (IHM), et à collecter et publier les données dans le Cloud MindSphere en utilisant l'IoT Box 'MindConnect NANO'. Cette approche offre une vue managériale pour une prise de décision informée.

Les technologies utilisées incluent divers capteurs connectés au PLC ET200SP pour la collecte de données, et le PLC lui-même qui automatise les processus de séparation et de régulation. L'IHM TP1500 fournit une interface utilisateur permettant la supervision et le contrôle en temps réel, tandis que le MindConnect NANO collecte les données du PLC et les publie dans le Cloud MindSphere pour l'analyse et la visualisation.

L'architecture du système se déroule en plusieurs étapes. D'abord, les capteurs connectés au PLC ET200SP collectent les données nécessaires. Ensuite, le PLC contrôle les vannes pour réguler le processus de séparation. La supervision en temps réel est assurée par l'IHM TP1500, permettant aux opérateurs de surveiller les opérations et de réagir rapidement aux alarmes. Les données collectées sont ensuite envoyées au Cloud MindSphere via le MindConnect NANO, où elles sont analysées et visualisées sur des tableaux de bord accessibles de n'importe où via internet (voir Figure 8). Ce projet met en œuvre une des techniques fondamentales de l'industrie 4.0 dans le secteur de la supervision, à savoir l'Internet des objets (IoT). En intégrant l'IoT, nous pouvons connecter les équipements physiques, tels que les capteurs et les PLC, à un réseau numérique global, facilitant ainsi la collecte, le traitement et l'analyse des données en temps réel. Cette connectivité améliore considérablement la capacité de supervision, permettant une prise de décision plus rapide et plus informée, ainsi qu'une meilleure optimisation des

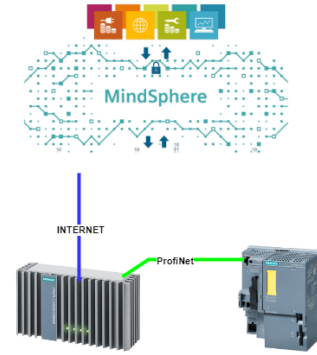


Fig. 8. Architecture du système intégrant le MindConnect NANO et le Cloud MindSphere.

processus industriels. L'utilisation de l'IoT dans ce projet illustre parfaitement comment les nouvelles technologies de l'industrie 4.0 transforment les pratiques de supervision pour offrir des solutions plus intelligentes et plus efficaces.

Étude de Cas 2: Utilisation d'un Modèle d'IA avec la Solution SIPAT de Siemens dans l'Industrie Pharmaceutique:

La solution SIPAT de Siemens permet d'intégrer des modèles prédictifs d'intelligence artificielle (IA) dans le processus de fabrication pharmaceutique pour améliorer la qualité et l'efficacité. Avant l'intégration de SIPAT, le processus de fabrication était fixe, nécessitant une inspection en laboratoire pour valider ou rejeter les produits. Après l'intégration, le processus devient ajustable en temps réel, basé sur les analyses des variables critiques et les règles du laboratoire.

Processus de Fabrication Avant SIPAT:

Avant l'intégration de SIPAT, le processus de fabrication était fixe, et chaque produit devait passer par une inspection en laboratoire pour être validé ou rejeté. Les variations dans des paramètres critiques, comme la température, pouvaient entraîner le rejet de lots entiers.



Fig. 9. Processus Avant SIPAT

Intégration de la Solution SIPAT:

La solution SIPAT intègre des analyseurs de processus et des modèles prédictifs basés sur l'IA pour ajuster le processus de fabrication en temps réel. Les paramètres tels que la température et la vitesse d'agitation sont surveillés et ajustés automatiquement, garantissant une qualité constante des produits.

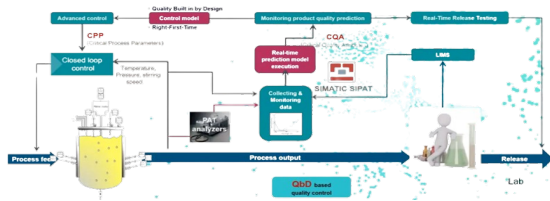


Fig. 10. Processus avec SIPAT

Résultats et Bénéfices:

Optimisation de la Qualité:

Réduction significative des rejets de lots grâce à une surveillance et un ajustement en temps réel des paramètres critiques.

Efficacité Accrue:

Amélioration de l'efficacité opérationnelle en réduisant les temps d'arrêt et en optimisant l'utilisation des ressources.

Prise de Décision Informée:

Les décisions sont basées sur des données en temps réel, permettant une réponse rapide aux variations du processus.

VI. TENDANCES ÉMERGENTES ET ORIENTATIONS FUTURES

A. Le Jumeau Numérique (Digital Twin)

Le jumeau numérique (Digital Twin) est une technologie clé de l'Industrie 4.0 qui crée une copie virtuelle d'un système physique pour optimiser les processus de production, effectuer des maintenances proactives et analyser les données en temps réel. Cette technologie permet d'optimiser les cycles de production, de réduire les délais d'introduction de nouveaux produits et de détecter les inefficacités des processus. Elle permet également une maintenance proactive en prévoyant et en prévenant les pannes, minimisant ainsi les temps d'arrêt et les coûts. En simulant différents scénarios dans l'environnement virtuel, les entreprises peuvent planifier efficacement et réduire les risques financiers. L'analyse continue des données aide à prendre des décisions stratégiques en temps réel, améliorant ainsi la réactivité aux changements du marché. À l'avenir, le jumeau numérique jouera un rôle crucial dans divers secteurs industriels, y compris les villes intelligentes et la santé, avec des défis tels que l'intégration de l'intelligence artificielle pour la modélisation virtuelle et la synchronisation en temps réel. [24], [25], [26].

Comme illustré dans la Figure 11, le jumeau numérique (Digital Twin) est une technologie clé de l'Industrie 4.0 qui crée une copie virtuelle d'un système physique pour optimiser les processus de production, effectuer des maintenances proactives et analyser les données en temps réel.

B. Connectivité 5G

La 5G joue un rôle crucial dans la transformation des processus industriels en fournissant des solutions de connectivité avancées, ce qui est fondamental pour l'industrie 4.0. Cette technologie améliore significativement l'efficacité, la fiabilité et les capacités des processus industriels grâce à des communications ultra-fiables à faible latence (URLLC),

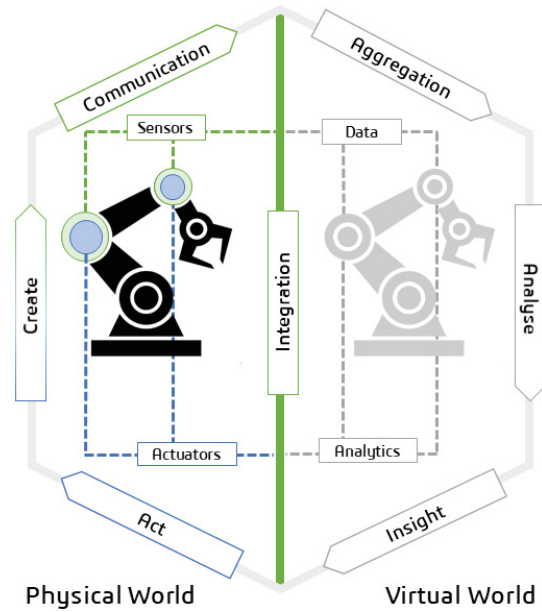


Fig. 11. Diagramme de fonctionnalités du jumeau numérique [25]

indispensables pour des applications comme le contrôle de mouvement et l'automatisation des usines. La 5G réduit la latence par des techniques de traitement rapide et de transmission immédiate des paquets, et renforce la fiabilité en utilisant la multi-connectivité. Ces améliorations permettent un échange de données en temps réel, essentiel pour les opérations industrielles modernes. En facilitant l'automatisation intelligente dans des secteurs variés, y compris l'Internet des objets (IoT) et les usines intelligentes, la 5G supporte un grand nombre de dispositifs avec des connexions rapides et fiables. De plus, sa capacité réseau stimule la numérisation et l'automatisation des processus industriels, aidant les entreprises à répondre aux exigences d'efficacité et de personnalisation dans un marché concurrentiel. [27] [28] [29]

VII. CONCLUSION

L'Industrie 4.0 marque une transformation significative du secteur industriel par l'intégration de technologies avancées telles que l'Internet des objets (IoT), les systèmes cyber-physiques (CPS), le Big Data et l'intelligence artificielle (IA). Ces technologies permettent de créer des usines intelligentes et interconnectées, optimisant ainsi l'efficacité opérationnelle et réduisant les temps d'arrêt.

Dans ce mémoire, nous avons examiné les technologies de supervision essentielles pour l'Industrie 4.0, illustrées par des études de cas sur l'automatisation et la supervision industrielles. Ces exemples démontrent les avantages concrets en termes de qualité, d'efficacité et de prise de décision informée.

Les innovations telles que le jumeau numérique et la connectivité 5G continueront à transformer les processus industriels, offrant des possibilités accrues pour l'optimisation et la résilience des systèmes de production. Pour rester compétitives, les entreprises doivent adopter ces technologies

et exploiter leurs bénéfices pour répondre aux exigences d'un monde de plus en plus digitalisé.

REFERENCES

- [1] C. Santos, A. Mehraei, A. Barros, M. Araújo, and E. Ares, "Towards industry 4.0: an overview of european strategic roadmaps," *Procedia manufacturing*, vol. 13, pp. 972–979, 2017.
- [2] K. Zhou, T. Liu, and L. Zhou, "Industry 4.0: Towards future industrial opportunities and challenges," in *2015 12th International conference on fuzzy systems and knowledge discovery (FSKD)*. IEEE, 2015, pp. 2147–2152.
- [3] S. Z. Gábor *et al.*, "Cloud computing and big data in the context of industry 4.0: opportunities and challenges," in *Proceedings of International Academic Conferences*, no. 7508667. International Institute of Social and Economic Sciences, 2018.
- [4] C. Gomez, A. Guardini, J. Martani, A. Coronado, and J. Reddy, "A contemporary approach to the mse paradigm powered by artificial intelligence from a review focused on polymer matrix composites," *Mechanics of Advanced Materials and Structures*, vol. March, 2021.
- [5] G. Lampropoulos, K. Siakas, and T. Anastasiadis, "Internet of things in the context of industry 4.0: An overview," *International Journal of Entrepreneurial Knowledge*, pp. 4–19, 2019.
- [6] M. Gordan, K. Ghaedi, and V. Saleh, Eds., *Industry 4.0 - Perspectives and Applications*, ser. IntechOpen Series Artificial Intelligence, Volume 16. London, United Kingdom: IntechOpen, 2021.
- [7] K. Kumar, D. Zindani, and J. P. Davim, *Industry 4.0: Developments towards the Fourth Industrial Revolution*, ser. SpringerBriefs in Applied Sciences and Technology. Berlin, Germany: Springer, 2019.
- [8] J. Lee, H. Davari, J. Singh, and V. Pandhare, "Industrial artificial intelligence for industry 4.0-based manufacturing systems," *Manufacturing Letters*, vol. 18, pp. 20–23, 2018.
- [9] L. Qian, Z. Luo, Y. Du, and L. Guo, "Cloud computing: An overview," *CloudCom 2009, LNCS 5931*, pp. 626–631, 2009.
- [10] Y. Wei and M. B. Blake, "Service-oriented computing and cloud computing: Challenges and opportunities," *IEEE Internet Computing*, vol. 14, no. 6, pp. 72–75, 2010.
- [11] W. Kim, "Cloud computing: Today and tomorrow," *Journal of Object Technology*, vol. 11, no. 1, pp. 2:1–2:8, 2017.
- [12] "Edge computing vs cloud computing: Challenges and opportunities."
- [13] M. Lezzi, M. Lazoi, and A. Corallo, "Cybersecurity for industry 4.0 in the current literature: A reference framework," *Computers in Industry*, vol. 103, pp. 97–110, 2018.
- [14] B. A. G. . C. KG. (2019) Embedded pc cx series: Embedded pcs with arm and x86 architecture. Beckhoff Documentation. [Online]. Available: <https://www.beckhoff.com/fr-fr/products/ipc/pcs/>
- [15] Siemens, "Simatic hmi panels: Efficient to a new level," 2024, accessed: 2024-06-08. [Online]. Available: <https://docs.rs-online.com/aa78/0900766b81427f93.pdf>
- [16] F. Palm, S. Grüner, J. Pfrommer, M. Graube, and L. Urbas, "Open source as enabler for opc ua in industrial automation," in *2015 IEEE 20th Conference on Emerging Technologies & Factory Automation (ETFA)*. Luxembourg, Luxembourg: IEEE, Sep 2015, pp. 1–6.
- [17] COPA-DATA, "Qu'est-ce qu'une ihm (interface homme-machine)?" 2024, accessed: 2024-06-08. [Online]. Available: <https://www.copadata.com/fr/produits/zenon-software-platform/visualisation-contrôle/quest-ce-qu-une-ihm-interface-homme-machine-copa-data/>
- [18] HMS Networks, "Remote access of industrial equipment," 2024, accessed: 2024-06-08. [Online]. Available: <https://www.hms-networks.com/industrial-remote-access>
- [19] Rockwell Automation, "5 ways to make your hmi secure," 2024, accessed: 2024-06-08. [Online]. Available: <https://www.rockwellautomation.com/en-us/company/news/the-journal/5-ways-make-your-hmi-secure.html>
- [20] Nevatio, "The future human-machine interfaces (hmi) and the iot," 2024, accessed: 2024-06-08. [Online]. Available: <https://www.nevatio.com/learn/automation-and-controls/the-future-human-machine-interfaces-hmi-and-the-iot>
- [21] L. Damiani, M. Demartini, G. Guizzi, R. Revetria, and F. Tonelli, "Augmented and virtual reality applications in industrial systems: A qualitative review towards the industry 4.0 era," *IFAC PapersOnLine*, vol. 51, no. 11, pp. 624–630, 2018. [Online]. Available: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2405896318314817>
- [22] Airline Hydraulics, "Human-machine interfaces (hmis): Trends and future directions," 2024, accessed: 2024-06-08. [Online]. Available: <https://blog.airlinehyd.com/human-machine-interfaces-hmis-trends-and-future-directions>
- [23] Emerson, "How augmented reality hmi systems improve plant management," 2021, consulté le 8 juin 2024. [Online]. Available: <https://www.iem.eu/article/how-augmented-reality-hmi-systems-improve-plant-management/>
- [24] J. Vachálek, L. Bartaliský, O. Rovný, D. Šišmišová, M. Morháč, and M. Lokšík, "The digital twin of an industrial production line within the industry 4.0 concept," in *2017 21st International Conference on Process Control (PC)*. Štrbské Pleso, Slovakia: Institute of Automation, Measurement and Applied Informatics, Faculty of Mechanical Engineering, Slovak University of Technology in Bratislava, 2017.
- [25] F. Pires, A. Cachada, J. Barbosa, A. P. Moreira, and P. Leitão, "Digital twin in industry 4.0: Technologies, applications and challenges," *Research Centre in Digitalization and Intelligent Robotics (CeDRI), Instituto Politécnico de Bragança*, 2020.
- [26] R. S. Kenett and J. Bortman, "The digital twin in industry 4.0: A wide-angle perspective," *Quality and Reliability Engineering International*, 2021.
- [27] M. Attaran, "The impact of 5g on the evolution of intelligent automation and industry digitization," *Journal of Ambient Intelligence and Humanized Computing*, 2020. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1007/s12652-020-02521-x>
- [28] D. Mourtzis, J. Angelopoulos, and N. Panopoulos, "Smart manufacturing and tactile internet based on 5g in industry 4.0: Challenges, applications and new trends," *Electronics*, 2020. [Online]. Available: <https://www.mdpi.com/journal/electronics>
- [29] Čedomir Stefanović, "Industry 4.0 from 5g perspective: Use-cases, requirements, challenges and approaches," *Department Electronic Systems, Aalborg University*, 2020. [Online]. Available: <mailto:cs@cmi.aau.dk>