

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

MINISTRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR
ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE

ECOLE SUPERIEURE EN SCIENCES APPLIQUEES
TLEMCEEN



المدرسة العليا للعلوم التطبيقية
Ecole Supérieure en
Sciences Appliquées

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

المدرسة العليا في العلوم التطبيقية
تلمسان

Mémoire de fin d'étude

Pour l'obtention du diplôme d'Ingénieur d'état

Filière : Electronique

Spécialité : Informatique Industrielle

Présenté par : Mohammed Youcef BEMRAH

Mohammed Yacine BEMRAH

Thème

Conception et Déploiement d'un Système de Jumeau
Numérique (Digital Twin) pour la Supervision Temps
Réel d'une Usine de Production de Poterie

Soutenu publiquement, le 20 / 06 / 2026, devant le jury composé de :

Dr. KARAOUZENE Zoheir	MCB	ESSA. Tlemcen	Président
Dr. M'HAMEDDI Mohamed	MCB	ESSA. Tlemcen	Encadrant
Dr. NEDJAR Imane	MCA	ESSA. Tlemcen	Co-Encadrant
Dr. BEREKSI REGUIG Nassima	MCB	ESSA. Tlemcen	Examinatrice
Mr. ABDUL-RAHUMAN Ahmed	Docteur	HEXALOGY Tlemcen	Examineur

Année Universitaire : 2025 / 2026

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

Remerciements

Au terme de ce travail, nous tenons à adresser nos sincères remerciements à toutes les personnes qui ont contribué à la réalisation de ce projet de fin d'études et qui nous ont accompagnés tout au long de cette expérience enrichissante.

Nous exprimons tout d'abord notre profonde gratitude à nos encadrants, **M. M'HAMEDI Mohammed** et **Mme. Nedjar Imane** pour leur disponibilité, leurs conseils avisés, leur suivi rigoureux ainsi que leurs orientations pertinentes.

Nous adressons également nos plus vifs remerciements à l'entreprise **Tlemcen Faïence SARL** pour nous avoir accueillis au sein de sa structure et nous avoir offert un cadre propice à la réalisation de ce projet. Cette expérience nous a permis de découvrir le monde industriel, de mettre en pratique nos connaissances académiques et d'acquérir une expérience professionnelle particulièrement enrichissante.

Nous tenons à remercier tout particulièrement le gérant de l'entreprise, **M. MERABET Abdennour**, pour son accueil chaleureux, sa confiance, sa disponibilité ainsi que les moyens mis à notre disposition durant toute la période du stage. Son soutien et son intérêt pour notre travail ont grandement contribué à la réussite de ce projet.

Nous exprimons également notre gratitude aux honorables membres du jury qui ont accepté d'examiner et d'évaluer ce travail. Nous les remercions pour l'intérêt porté à notre mémoire ainsi que pour leurs remarques, observations et recommandations qui contribueront à enrichir notre réflexion et notre expérience.

Pour terminer, nous adressons une pensée reconnaissante à nos familles, à nos proches ainsi qu'à toutes les personnes qui nous ont soutenus, encouragés et accompagnés durant notre parcours universitaire.

À toutes celles et tous ceux qui ont contribué, de près ou de loin, à l'aboutissement de ce travail, nous adressons nos plus sincères remerciements.

Dédicace

Nous dédions ce travail...

À nos parents, À ceux qui ont tout sacrifié pour nous, qui ont veillé tard pour que nous dormions sereinement, qui ont renoncé à leurs rêves pour que les nôtres deviennent réalité. Aucun mot, aucune page, aucun diplôme ne pourra jamais exprimer la profondeur de notre gratitude et de notre amour. Ce travail est avant tout le vôtre.

À notre sœur, Pour sa présence, son soutien discret mais sincère, et pour tous ces petits moments du quotidien qui nous ont donné la force d'avancer. Qu'elle trouve dans ces pages un témoignage de notre affection et de notre fierté de l'avoir à nos côtés.

À toute notre famille et nos proches, À chacun d'entre eux qui, de près ou de loin, nous a encouragés, cru en nous et porté dans ses prières. Leur soutien silencieux a été une lumière dans les moments de doute.

Une dédicace spéciale à notre **cousin Hachemi, notre chère cousine,** et à notre **khalou Chouaib.** Pour leur chaleur, leur humour et leur présence qui a toujours su nous redonner le sourire aux moments où on en avait le plus besoin. Ils savent ce qu'ils représentent pour nous.

À nos amis, nos frères de vie, À ceux qui ont partagé nos fous rires, nos galères, et nos victoires :

Guebrili Aboubaker, Rezig Ahmed, Lakehal Sidahmed, Boukhendeg Aissameddine, Embouazza Habib, Laib Amine, Sebaa Zinou, Razali Abderahman, Hammadi Salah.

Merci d'avoir été là, tout simplement. Certaines amitiés ne s'expliquent pas, elles se vivent, et nous avons eu la chance de vivre la nôtre avec vous.

À toute la promotion Électronique 2026, À cette promotion que nous avons eu l'honneur de partager, avec ses moments de solidarité, ses défis collectifs et ses souvenirs qui resteront gravés. Que chacun trouve sa voie et y brille.

À tous les membres du club scientifique Tex Squad, À cette équipe qui nous a appris que la passion peut devenir un projet, et qu'un projet peut devenir quelque chose de grand. Une dédicace toute particulière à **Tessoumi Mohammed** et **Bettahar Abderrahmane,** pour leur engagement, leur esprit d'équipe et tout ce que nous avons construit ensemble au sein de ce club.

Résumé

Ce projet de fin d'études consiste à concevoir un système de jumeau numérique pour la supervision temps réel d'une usine de production de poterie. Le système récupère les états des machines à l'aide de contacteurs, de modules optocoupleurs et de microcontrôleurs connectés au réseau WiFi. Une application web interactive intégrant une scène 3D avec Three.js a été développée afin de visualiser les machines, consulter leurs historiques et gérer les opérations de maintenance. Les résultats obtenus montrent la faisabilité d'une solution de supervision flexible adaptée aux environnements industriels peu numérisés.

Mots clés : Jumeau numérique, Industrie 4.0, IoT, Supervision temps réel, Historisation, Industrie

Abstract

This project focuses on the design and deployment of a digital twin system for the real-time supervision of a pottery production factory. The developed system collects machine states through industrial contactors and transmits the data to a local server using microcontrollers and a WiFi network. An interactive web application integrating a 3D scene developed with Three.js was implemented to visualize the virtual factory, supervise industrial equipment, and display machine history data. The system also includes a database for industrial event logging and a maintenance management module. The obtained results validated the feasibility of a flexible digital twin solution adapted to industrial environments using low-digitized machines.

Key words: Digital Twin, Industry 4.0, IoT, Real-time supervision, Data logging, Manufacturing

ملخص

يتمحور مشروع التخرج هذا حول تصميم وتطوير نظام توائم رقمي مخصص للمراقبة الآنية لمصنع إنتاج الفخار. يسمح النظام المطور باسترجاع حالات تشغيل الآلات الصناعية انطلاقاً من الكونتاكتورات الكهربائية ثم إرسال كما تم تطوير تطبيق ويب تفاعلي يحتوي على مشهد WiFi وشبكة البيانات إلى خادم محلي باستعمال متحكمات من أجل عرض المصنع الافتراضي ومراقبة المعدات الصناعية Three.js ثلاثي الأبعاد باستخدام مكتبة واستعراض سجل التشغيل الخاص بالآلات. يتضمن النظام أيضاً قاعدة بيانات لتخزين الأحداث الصناعية بالإضافة إلى وحدة لإدارة عمليات الصيانة. وقد أثبتت النتائج المحصل عليها إمكانية إنشاء حل توائم رقمي مرن ومناسب للبيئات الصناعية التي تعتمد على آلات قليلة الرقمنة.

الكلمات المفتاحية: التوائم الرقمي، الصناعة 4.0، المراقبة الآنية، تخزين البيانات، الصيانة، إنترنت الأشياء

Sommaire

Remerciements.....	3
Dédicace.....	4
Résumé	5
Sommaire	6
Liste d’Abréviations	9
Liste des figures	10
Introduction	12
Chapitre 1 : Concepts généraux et état de l’art des jumeaux numériques	14
Introduction.....	15
1.1 Définition du Jumeau Numérique	15
1.2 Historique et évolution.....	16
1.3 Types de Jumeaux numériques	17
1.3.1 Jumeau de Composant (Component Twin).....	17
1.3.2 Jumeau d’équipement (Asset Twin).....	17
1.3.3 Jumeau de Système (System Twin)	18
1.3.4 Jumeau de Processus (Process Twin)	18
1.4 Concepts Fondamentaux.....	18
1.4.1 Système physique et Système numérique	18
1.4.2 Synchronisation des Données	18
1.5 Domaines d’application.....	19
1.6 Avantages et limites	20
Conclusion	20
Chapitre 2 : Etude Comparative et Analyse des Solutions Existantes	21
Introduction.....	22
2.1 Jumeaux Numériques dans l’industrie	22
2.2 Comparaison et limites des systèmes actuels.....	24
2.3 Exemples de solutions existantes dans l’industrie	24
2.3.1 L’usine d’Amberg de Siemens	25
2.3.2 Industrie Automobile (Tesla)	25
2.3.3 PTC ThingWorx	26
2.3.4 Ansys Twin Builder	27
2.3.5 Contributions scientifiques.....	28
2.4 Applications dans d’autres domaines	28

2.4.1 Domaine de la Santé.....	28
2.4.2 Domaine du Transport	29
2.4.3 Domaine de l'Energie	30
Conclusion	30
Chapitre 3 : Présentation de l'entreprise	32
Introduction.....	33
3.1 Présentation de l'entreprise.....	33
3.2 Fiche technique de l'entreprise.....	33
3.3 Activités de l'entreprise.....	34
3.4 Organisation et fonctionnement.....	34
3.5 Processus de production	34
3.6 Principaux produits.....	35
3.7 Fournisseurs et clients.....	36
Conclusion	36
Chapitre 4 : Conception et Réalisation du Système de Jumeau Numérique	37
Introduction.....	38
4.1 Méthodologie	38
4.2 Conception de la partie IoT	40
4.2.1 L'architecture électrique des machines	40
4.2.2 Acquisition des états de machine à partir du contacteur	41
4.2.3 Isolation Electrique.....	41
4.2.4 Module Optocoupleur.....	41
4.2.5 Intégration du Microcontrôleur ESP32.....	42
4.2.6 Schéma de Branchement du système	44
4.3 Conception de l'Application web	45
4.3.1 Architecture Logicielle du système	45
4.3.2 Outils de développement	46
4.3.3 Conception de la Base de Données	50
4.3.4 Développement du backend	50
4.3.5 Modélisation 3D des machines	51
4.3.6 Développement de l'interface de l'application web	52
4.3.7 Synchronisation Temps réel	53
4.4 Description de l'application web.....	53
4.4.1 Page Vue de l'usine	53
4.4.2 Page Historique des machines	55
4.4.3 Page Maintenance.....	55

4.5 Réalisation et validation d'un prototype expérimental	56
4.6 Perspectives Futures et Améliorations possibles	58
Conclusion	58
Conclusion	60
Bibliographie	62

Liste d'Abbreviations

Abréviation	Signification
IoT	Internet of Things
WiFi	Wireless Fidelity
3D	Three-Dimensional
Web	World Wide Web
API	Automate Programmable Industriel
API	Application Programming Interface
HTTP	HyperText Transfer Protocol
JSON	JavaScript Object Notation
SQL	Structured Query Language
WebGL	Web Graphics Library
LED	Light Emitting Diode
HTML	HyperText Markup Language
CSS	Cascading Style Sheets
JS	JavaScript
IDE	Integrated Development Environment
BDD	Base de Données
REST	Representational State Transfer
ORM	Object Relational Mapping

Liste des figures

Figure 1.1 – Principe d'un jumeau numérique

Figure 1.2 – Applications des jumeaux numériques dans différents secteurs

Figure 2.1 – Principe d'un jumeau numérique industriel

Figure 2.2 – Architecture typique d'un Digital Twin industriel

Figure 2.3 – Siemens Digital Twin

Figure 2.4 – Configuration de jumeau numérique dans l'industrie automobile

Figure 2.5 – Plateforme PTC ThingWorx

Figure 2.6 – Environnement de modélisation Ansys Twin Builder

Figure 2.7 – Architecture d'un jumeau numérique du corps humain

Figure 2.8 – Architecture d'un jumeau numérique pour le transport urbain

Figure 2.9 – Jumeau numérique sur des installations de production d'énergie

Figure 3.1 – Exemple de produit fini (Tuile egorgé)

Figure 4.1 – Vue globale de la méthodologie

Figure 4.2 – Contacteur (Exemple :CHINT série NC1 3P)

Figure 4.3 – Schéma représentatif de l'intérieur du contacteur

Figure 4.4 – Module Optocoupleur

Figure 4.5 – ESP32 (WiFi + Bluetooth)

Figure 4.6 – Le programme du ESP32

Figure 4.7 – Branchement général du système

Figure 4.8 – Architecture logicielle du système

Figure 4.9 – Logo Python

Figure 4.10 – Logo Flask

Figure 4.11 – Logo Socket IO

Figure 4.12 – Logo WampServer

Figure 4.13 – Logo MySQL

Figure 4.14 – Logo HTML

Figure 4.15 – Logo CSS

Figure 4.16 – Logo JavaScript

Figure 4.17 – Logo Three JS

Figure 4.18 – Logo Pycharm

Figure 4.19 – Logo Blender

Figure 4.20 – Strucutre de la base de données

Figure 4.21 – Exemple d'un Broyeur 3D sur Blender

Figure 4.22 – Exemple d'un Filtre Par Presse 3D sur Blender

Figure 4.23 – Page Vue de L'usine

Figure 4.24 – Fenêtre contextuelle a la selection de machine

Figure 4.25 – Page Historique des machines

Figure 4.26 – Page Maintenance

Figure 4.27 – Image du prototype de test

Introduction

Au cours des dernières années, les technologies numériques ont connu une évolution considérable et ont profondément transformé le fonctionnement des systèmes industriels. Les entreprises ne se limitent plus uniquement à automatiser leurs chaînes de production, elles cherchent désormais à exploiter les données générées par les équipements afin d'améliorer la supervision, d'optimiser les performances et de réduire les coûts liés aux pannes et aux arrêts de production. Cette transformation progressive s'inscrit dans le cadre de l'industrie 4.0, qui repose sur l'intégration des technologies intelligentes, des systèmes connectés et de l'échange des données en temps réel.

Parmi les technologies émergentes de cette nouvelle révolution industrielle, le jumeau numérique occupe une place particulièrement importante. Ce concept consiste à créer une représentation virtuelle d'un système physique capable de reproduire son comportement grâce à des données collectées en temps réel. Le jumeau numérique permet ainsi d'observer, d'analyser et de superviser un équipement ou un processus industriel à distance, tout en facilitant la prise de décision et l'anticipation des dysfonctionnements. Cette technologie est aujourd'hui utilisée dans plusieurs secteurs tels que l'industrie manufacturière, l'automobile, l'énergie, le transport ou encore la santé [1].

L'intérêt croissant porté aux jumeaux numériques s'explique notamment par les nombreux avantages qu'ils offrent aux entreprises industrielles. En effet, ils permettent d'améliorer le suivi des équipements, d'optimiser la maintenance, de réduire les temps d'arrêt et d'augmenter la productivité globale des systèmes de production. Par ailleurs, l'évolution des technologies IoT, des réseaux de communication et des plateformes web a rendu leur mise en œuvre plus accessible et plus efficace qu'auparavant.

C'est dans ce contexte que s'inscrit notre projet de fin d'études, réalisé au sein de l'entreprise Tlemcen Faïence. Ce travail a pour objectif principal la conception et la réalisation d'un système de jumeau numérique destiné à la supervision d'un environnement industriel. L'idée principale consiste à mettre en place une solution capable de collecter les états de fonctionnement des machines de production, de

transmettre ces données en temps réel et de les représenter à travers une interface interactive intégrant des modèles des équipements industriels.

Au-delà de l'aspect technique, ce projet répond également à un besoin concret de digitalisation et de modernisation des systèmes de supervision industrielle. En effet, les méthodes classiques de suivi des équipements présentent souvent certaines limites en matière de visualisation, de centralisation des données et de réactivité face aux anomalies. Le développement d'un jumeau numérique représente ainsi une solution innovante permettant une meilleure exploitation des informations de production et une amélioration globale du processus de supervision.

Afin de présenter l'ensemble des travaux réalisés, ce mémoire est structuré en quatre chapitres principaux. Le premier chapitre est consacré aux concepts généraux des jumeaux numériques, à leur évolution ainsi qu'aux différentes catégories et domaines d'application. Le deuxième chapitre présente une étude comparative des solutions existantes ainsi qu'une analyse des applications industrielles actuelles des jumeaux numériques. Le troisième chapitre est dédié à la présentation de l'entreprise d'accueil, de son organisation et de son processus de production. Enfin, le quatrième chapitre détaille la conception et la réalisation du système proposé, en décrivant aussi bien l'architecture matérielle et logicielle que les différentes étapes de développement du prototype expérimental.

À travers ce travail, nous avons cherché à développer une solution moderne, évolutive et adaptée au contexte industriel étudié. Ce projet représente également une opportunité de mettre en pratique les connaissances acquises durant notre formation dans plusieurs domaines tels que les systèmes embarqués, l'IoT, le développement web, les bases de données et la modélisation 3D.

Chapitre 1 : Concepts généraux et état de l'art des jumeaux numériques



Introduction

Avec l'évolution rapide des technologies numériques et l'émergence de l'industrie 4.0, les entreprises industrielles cherchent continuellement à améliorer la supervision, l'optimisation et la maintenance de leurs systèmes de production. Dans ce contexte, le concept de jumeau numérique est devenu l'une des technologies les plus importantes dans le domaine de la transformation numérique industrielle.

Le jumeau numérique permet de créer une représentation virtuelle dynamique d'un système physique réel à partir des données collectées en temps réel. Grâce à cette approche, il devient possible de surveiller le comportement des équipements industriels, analyser leurs performances et anticiper certaines anomalies sans intervenir directement sur le système physique.

Au fil des années, cette technologie s'est progressivement développée dans plusieurs secteurs tels que l'industrie, la santé, le transport ou encore l'énergie. Les progrès réalisés dans les domaines de l'Internet des objets, des réseaux de communication et du traitement des données ont fortement contribué à l'évolution des systèmes de jumeaux numériques modernes.

Dans ce chapitre, nous allons présenter les principales notions liées aux jumeaux numériques. Nous aborderons d'abord leur définition ainsi que leur historique, puis nous présenterons les différents types de jumeaux numériques existants. Ensuite, nous étudierons les concepts fondamentaux associés à cette technologie avant de présenter ses principaux domaines d'application ainsi que ses avantages et ses limites.

1.1 Définition du Jumeau Numérique

Le jumeau numérique, également appelé *Digital Twin*, désigne une représentation virtuelle d'un objet, d'un système ou d'un processus physique réel. Cette représentation numérique évolue continuellement grâce aux données collectées depuis l'environnement physique à travers différents dispositifs de communication et de mesure.

Le principe du jumeau numérique repose sur la connexion permanente entre le système réel et son équivalent numérique. Les informations provenant des capteurs installés sur le système physique sont transmises vers le modèle virtuel afin de reproduire

son état de fonctionnement en temps réel. Ainsi, le digital Twin devient capable de refléter le comportement du système réel avec un niveau de précision relativement élevé [1].

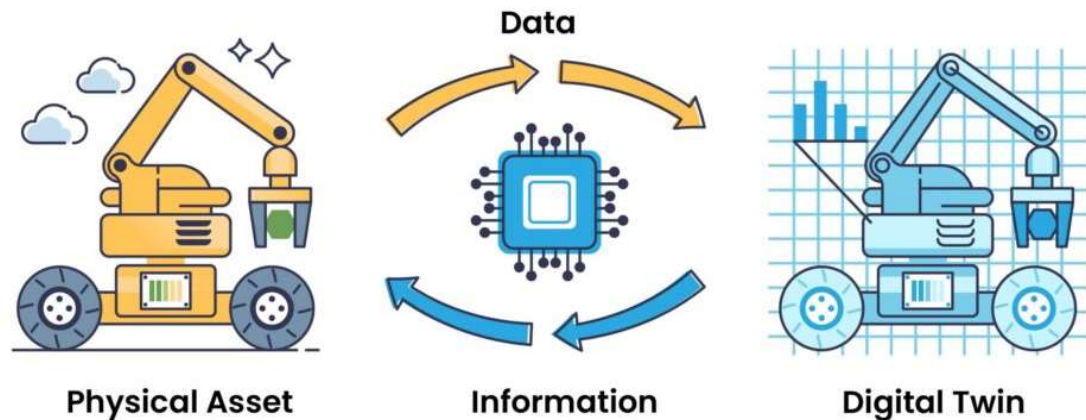


Figure 1.1 – Principe d'un jumeau numérique

Contrairement aux simples modèles de simulation statiques, le jumeau numérique possède une interaction dynamique avec le système physique. Il ne se limite pas uniquement à représenter un objet virtuel, mais permet également de superviser, analyser et parfois même prédire certains comportements du système réel.

Il convient également de noter que le concept de jumeau numérique s'inscrit directement dans la logique de l'industrie 4.0, où les équipements industriels deviennent progressivement interconnectés grâce aux technologies numériques modernes [2].

1.2 Historique et évolution

Le concept de jumeau numérique est apparu avec l'évolution des technologies de simulation et des systèmes numériques industriels. Les premières idées associées aux jumeaux numériques remontent aux travaux réalisés dans le domaine aérospatial, notamment au sein de la NASA durant les programmes spatiaux des années 1960 [3].

À cette période, les ingénieurs utilisaient déjà des répliques physiques des équipements spatiaux afin de reproduire certaines situations rencontrées lors des missions. Toutefois, le véritable concept de jumeau numérique tel qu'il est connu aujourd'hui a commencé à émerger au début des années 2000.

Le terme *Digital Twin* a été popularisé par Michael Grieves dans le cadre de ses travaux sur la gestion du cycle de vie des produits (*Product Lifecycle Management*).

L'objectif était de créer un lien permanent entre un produit physique et sa représentation numérique tout au long de son cycle de vie.

Par la suite, les progrès réalisés dans les domaines de l'Internet des objets, du cloud computing et de l'intelligence artificielle ont considérablement accéléré le développement des jumeaux numériques. Les industries ont progressivement commencé à intégrer cette technologie dans les systèmes de production afin d'améliorer la supervision des équipements et optimiser les opérations industrielles [4].

Aujourd'hui, les jumeaux numériques sont utilisés dans de nombreux secteurs et représentent l'une des technologies les plus importantes associées à la transformation numérique des entreprises.

1.3 Types de Jumeaux numériques

Les jumeaux numériques peuvent être classés selon le niveau de complexité du système représenté. Cette classification permet de mieux comprendre les différentes approches utilisées dans les environnements industriels modernes [5].

1.3.1 Jumeau de Composant (Component Twin)

Le jumeau numérique représente le niveau le plus simple du jumeau numérique. Il correspond à la représentation virtuelle d'un composant individuel appartenant à un système plus complexe, comme un capteur, un moteur ou une pièce mécanique.

Ce type de jumeau est principalement utilisé pour surveiller l'état de fonctionnement d'un élément précis et analyser son comportement au cours du temps.

1.3.2 Jumeau d'équipement (Asset Twin)

Le jumeau d'équipement représente un équipement industriel complet composé de plusieurs composants interconnectés. Il peut s'agir d'une machine industrielle, d'une turbine ou d'un robot de production

Ce type de jumeau permet de superviser le fonctionnement global de l'équipements ainsi que les interactions entre ses différents composants

1.3.3 Jumeau de Système (System Twin)

Le jumeau de système représente un ensemble d'équipements fonctionnant ensemble dans un même environnement industriel. Il permet d'analyser les interactions entre plusieurs machines ou sous-systèmes afin d'optimiser les performances globales du système. Les lignes de production intelligentes constituent un exemple courant de ce type de jumeau numérique.

1.3.4 Jumeau de Processus (Process Twin)

Le jumeau de processus représente le niveau le plus complexe. Il modélise l'ensemble d'un processus industriel complet intégrant plusieurs systèmes, équipements et flux de production.

Ce type de jumeau est utilisé afin d'optimiser les opérations industrielles à grande échelle et améliorer la prise de décision stratégique.

1.4 Concepts Fondamentaux

1.4.1 Système physique et Système numérique

Le fonctionnement d'un jumeau numérique repose principalement sur l'interaction entre deux éléments complémentaires : le système physique et le système numérique. Le système physique correspond à l'équipement réel présent dans l'environnement industriel. Celui-ci peut être une machine, une ligne de production ou même une usine complète.

Le système numérique représente quant à lui la version virtuelle du système physique. Il reproduit son comportement à partir des données collectées en temps réel. Cette relation permanente entre le monde physique et le monde numérique constitue la base du fonctionnement des jumeaux numériques modernes [6].

1.4.2 Synchronisation des Données

La synchronisation des données représente un élément essentiel dans les systèmes de jumeaux numériques. Les informations provenant des capteurs doivent être transmises continuellement vers le modèle numérique afin de maintenir une représentation fidèle du système réel.

Cette synchronisation peut être réalisée à travers différents réseaux de communication tels que le WiFi, Ethernet ou les réseaux industriels spécialisés. Une synchronisation efficace permet d'obtenir une supervision temps réel des équipements et d'améliorer la précision des analyses réalisées par le système numérique.

1.5 Domaines d'application

Les technologies de jumeaux numériques sont aujourd'hui utilisées dans plusieurs secteurs d'activité. L'industrie demeure le principal domaine d'application, notamment pour la supervision des équipements, la maintenance prédictive et l'optimisation des processus de production. Toutefois, les applications des jumeaux numériques se sont progressivement étendues vers d'autres secteurs tels que la santé, le transport, l'énergie et les villes intelligentes.

Dans le domaine médical, les jumeaux numériques permettent de modéliser certains organes ou équipements médicaux afin de simuler différentes situations cliniques. Dans le transport, ils sont utilisés pour superviser les véhicules et optimiser les infrastructures de circulation. Le secteur énergétique utilise également cette technologie pour surveiller les réseaux électriques, les centrales de production et les installations d'énergies renouvelables [7].

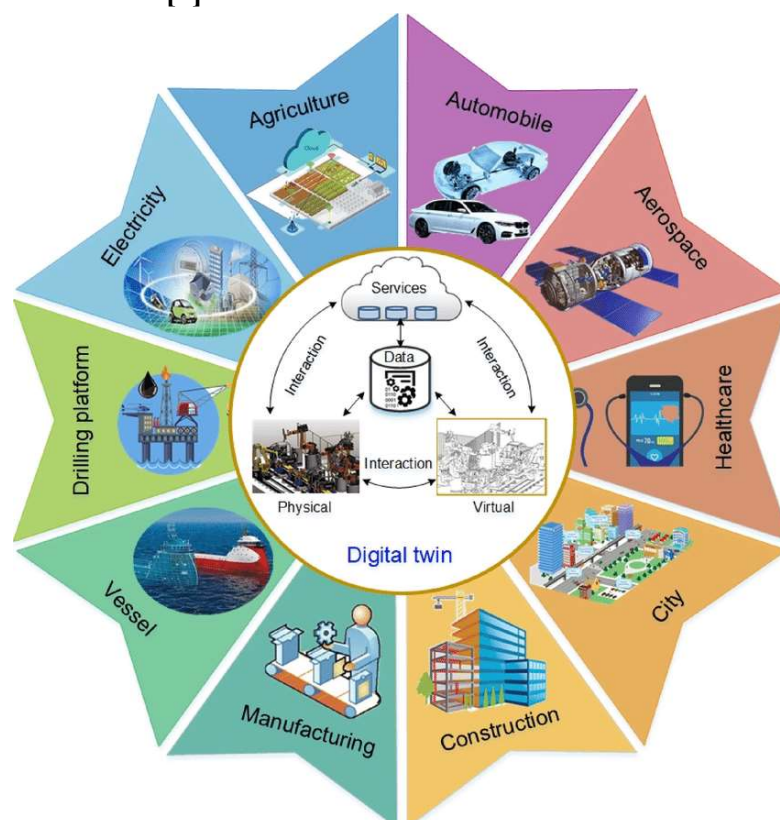


Figure 1.2 – Applications des jumeaux numériques dans différents secteurs

1.6 Avantages et limites

Les jumeaux numériques présentent plusieurs avantages importants dans les environnements industriels modernes. Ils permettent notamment d'améliorer la supervision des équipements, réduire les temps d'arrêt et optimiser les opérations de maintenance.

Cependant, malgré leurs nombreux avantages, les jumeaux numériques possèdent également certaines limites. Leur mise en place nécessite souvent des infrastructures matérielles importantes ainsi que des compétences techniques avancées.

Par ailleurs, les coûts liés aux capteurs, aux serveurs et aux systèmes de communication peuvent représenter un obstacle pour certaines entreprises, notamment les petites structures industrielles [8].

La cyber sécurité constitue également un défi majeur puisque les systèmes de jumeaux numériques reposent fortement sur les échanges de données entre les équipements physiques et les plateformes numériques.

Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté les principales notions liées aux jumeaux numériques ainsi que leur évolution au cours des dernières années. Nous avons étudié leur définition, leur historique ainsi que les différents types de jumeaux numériques utilisés dans les environnements industriels modernes.

Les concepts fondamentaux présentés ont permis de mieux comprendre le fonctionnement des systèmes de jumeaux numériques ainsi que l'importance de la synchronisation entre le système physique et sa représentation virtuelle.

Nous avons également constaté que cette technologie possède de nombreuses applications dans différents domaines tels que l'industrie, la santé, le transport et l'énergie. Malgré certaines contraintes techniques et économiques, les jumeaux numériques représentent aujourd'hui une solution importante dans le cadre de la transformation numérique et de l'industrie 4.0.

Chapitre 2 : Etude Comparative et Analyse des Solutions Existantes



Introduction

L'évolution des technologies numériques et des systèmes connectés a profondément transformé le secteur industriel au cours des dernières années. Dans ce contexte, le concept de jumeau numérique s'est progressivement imposé comme l'un des piliers majeurs de l'industrie 4.0. Grâce à l'intégration des capteurs, de l'Internet des Objets (IoT), du cloud computing et des systèmes de simulation, les entreprises industrielles peuvent désormais créer des représentations virtuelles dynamiques de leurs équipements et processus de production.

Le jumeau numérique constitue aujourd'hui une plateforme intelligente capable de superviser, analyser et prédire le comportement des équipements industriels en temps réel. Cette technologie permet notamment d'améliorer la maintenance, réduire les temps d'arrêt, optimiser les performances de production et faciliter la prise de décision.

C'est dans ce contexte que de nombreuses entreprises industrielles ont commencé à intégrer des solutions de jumeaux numériques dans leurs infrastructures. Toutefois, les architectures utilisées varient considérablement selon les domaines d'application, les besoins industriels et les moyens techniques disponibles.

Dans ce chapitre, nous allons étudier les principales applications des jumeaux numériques dans l'industrie, analyser plusieurs solutions existantes déjà déployées dans différents secteurs puis comparer leurs caractéristiques et leurs limites. Enfin, nous présenterons quelques applications des jumeaux numériques dans d'autres domaines tels que la santé, le transport et l'énergie.

2.1 Jumeaux Numériques dans l'industrie

L'industrie représente aujourd'hui l'un des principaux domaines d'application des jumeaux numériques. L'intégration des technologies IoT, des systèmes cyber-physiques ainsi que des réseaux de communication industriels a fortement contribué au développement de ces solutions au sein des environnements de production modernes.

Le principe du jumeau numérique industriel repose sur la création d'une représentation virtuelle d'une machine, d'une ligne de production ou même d'une usine complète. Cette représentation est continuellement alimentée par des données provenant du système physique réel grâce à différents capteurs et dispositifs d'acquisition. Ainsi, le

système numérique évolue simultanément avec l'environnement réel, permettant une supervision continue des équipements industriels [9].

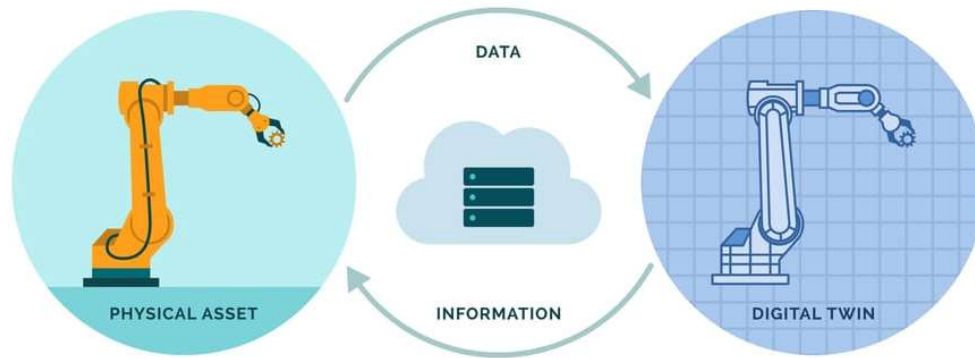


Figure 2.1 – Principe d'un jumeau numérique industriel

Dans les environnements industriels modernes, les jumeaux numériques sont principalement utilisés pour la surveillance temps réel, l'analyse des performances, la maintenance prédictive et l'optimisation des processus de production. Ils permettent également de réaliser des simulations virtuelles afin de tester différents scénarios sans intervenir directement sur les équipements physiques.

Par ailleurs, les jumeaux numériques jouent un rôle important dans la réduction des coûts de maintenance et des arrêts de production. Grâce à l'analyse des données collectées en temps réel, il devient possible de détecter certaines anomalies avant l'apparition d'une panne critique. Cette approche améliore considérablement la disponibilité des équipements industriels.

Il convient également de noter que l'évolution des technologies de communication et du cloud computing a fortement accéléré le développement des solutions de jumeaux numériques industriels. Aujourd'hui, plusieurs entreprises utilisent ces systèmes afin de superviser des usines complètes à travers des plateformes numériques interactives intégrant des visualisations 3D et des outils d'analyse avancés.

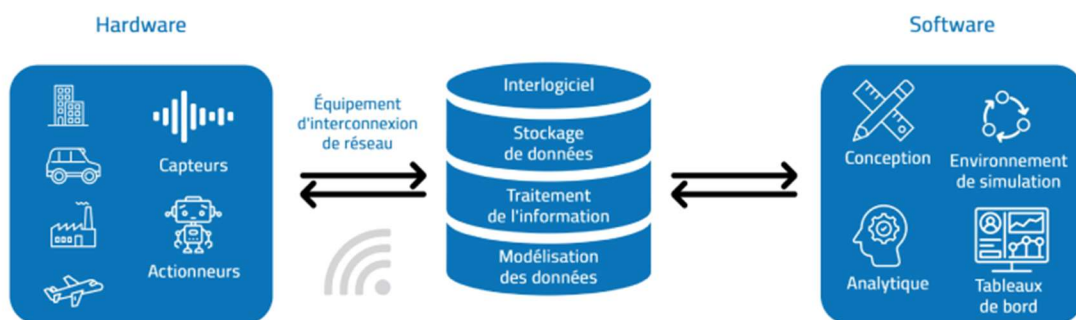


Figure 2.2 – Architecture typique d'un Digital Twin industriel [9]

2.2 Comparaison et limites des systèmes actuels

Les solutions de jumeaux numériques actuellement disponibles présentent de nombreux avantages dans les environnements industriels modernes. Elles permettent une supervision avancée des équipements, une amélioration de la maintenance ainsi qu'une meilleure optimisation des processus de production.

Toutefois, l'analyse des différentes solutions existantes montre que plusieurs contraintes limitent encore leur déploiement à grande échelle. L'une des principales difficultés concerne le coût élevé des infrastructures nécessaires à la mise en place de ces systèmes. En effet, les plateformes industrielles avancées nécessitent généralement des capteurs spécialisés, des serveurs puissants ainsi que des logiciels souvent coûteux.

Par ailleurs, certaines solutions nécessitent des équipements industriels récents capables de communiquer directement avec les systèmes numériques. Cette contrainte pose un problème important dans les industries utilisant encore des machines anciennes ou entièrement mécaniques ne disposant pas d'interfaces numériques intégrées.

La complexité des architectures de jumeaux numériques représente un défi majeur pour de nombreuses entreprises. L'intégration des données provenant de plusieurs équipements hétérogènes peut rapidement devenir difficile à gérer, notamment dans les grandes installations industrielles. D'autres limites concernent la cyber sécurité, la gestion des données temps réel ainsi que la maintenance des infrastructures numériques. Plus le système devient complexe, plus les besoins en calcul, en stockage et en communication augmentent [10].

Ainsi, malgré les nombreuses avancées observées dans le domaine, il apparaît que certaines industries ont encore besoin de solutions plus simples, flexibles et économiques permettant de superviser efficacement leurs équipements sans nécessiter une transformation complète de leur infrastructure industrielle.

2.3 Exemples de solutions existantes dans l'industrie

Le développement des jumeaux numériques a conduit plusieurs grandes entreprises industrielles à intégrer ces systèmes dans leurs processus de production et de supervision. Aujourd'hui, les applications des jumeaux numériques concernent différents secteurs industriels tels que l'automobile, l'aéronautique, l'énergie ou encore la

fabrication industrielle. Ces solutions permettent principalement d'améliorer la surveillance des équipements, d'optimiser les performances de production et de réduire les coûts liés à la maintenance.

2.3.1 L'usine d'Amberg de Siemens

Le jumeau numérique de l'usine d'Amberg chez Siemens est l'un des exemples les plus aboutis des jumeaux de production (Production Twin). L'usine fabrique des automates programmables industriels (SIMATIC) avec un taux de qualité de 99%. Chaque produit, chaque machine et chaque processus de la chaîne possède une réplique virtuelle en temps réel, synchronisée via le système MindSphere (IoT industriel) et le logiciel Tecnomatix. Cela permet de simuler des changements de production sans arrêter la ligne physique, de détecter des anomalies avant qu'elles ne provoquent des défauts et d'optimiser les flux. Grâce à ça, Siemens réduit de 50% les coûts de prototypage et gagne chaque année environ 6% d'efficacité opérationnelle supplémentaire [11].

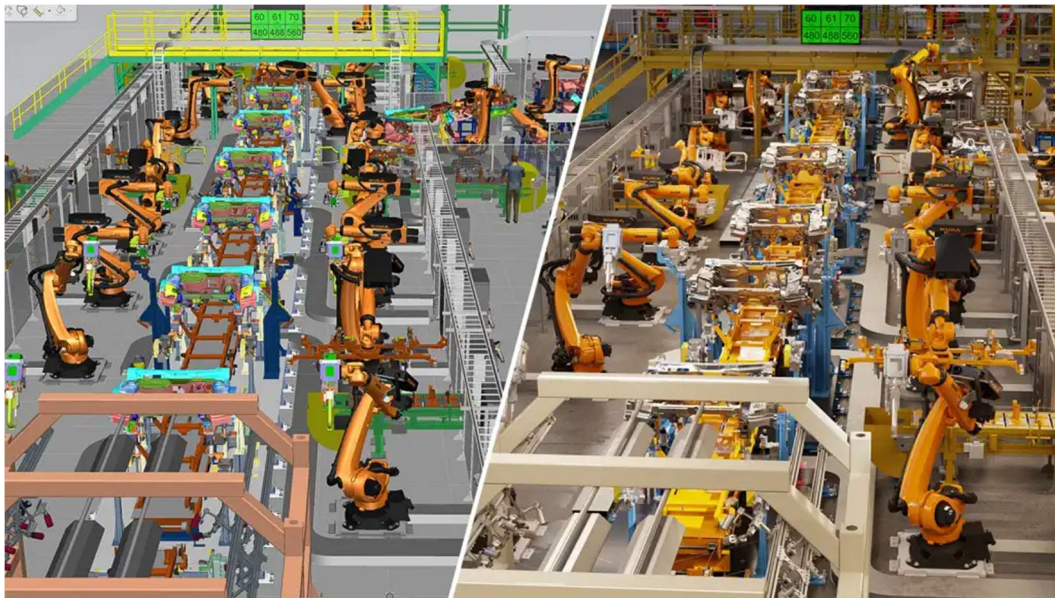


Figure 2.3 – Siemens Digital Twin

2.3.2 Industrie Automobile (Tesla)

Tesla constitue aujourd'hui l'un des exemples les plus connus de l'utilisation des jumeaux numériques dans l'industrie automobile. Chaque véhicule produit par l'entreprise possède une réplique numérique connectée en permanence grâce aux capteurs IoT intégrés au véhicule. Les données collectées en temps réel permettent de surveiller l'état mécanique, d'analyser les performances du véhicule et de détecter précocement les anomalies. Cette technologie permet également à Tesla d'effectuer des mises à jour logicielles à distance afin de corriger certains problèmes sans intervention physique du

conducteur. Le jumeau numérique est aussi utilisé pour optimiser la maintenance prédictive, améliorer la sécurité des systèmes d'assistance à la conduite et analyser le comportement des véhicules dans différentes conditions de fonctionnement. Grâce à cette approche, Tesla améliore continuellement les performances et la fiabilité de ses véhicules tout en réduisant les coûts de maintenance et les risques de défaillance [11].

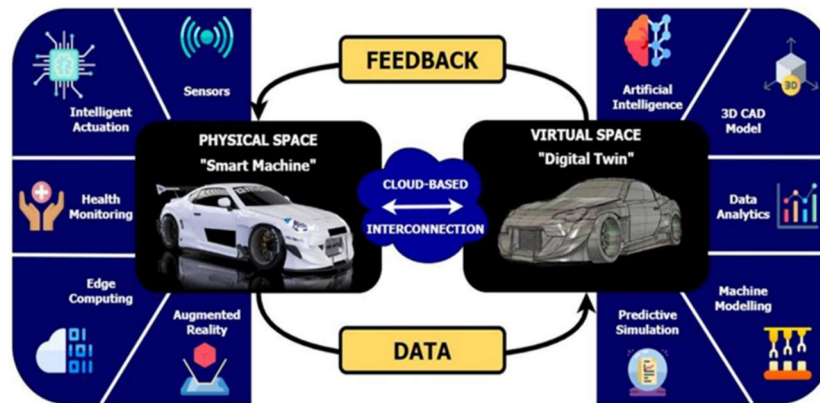


Figure 2.4 – Configuration de jumeau numérique dans l'industrie automobile

2.3.3 PTC ThingWorx

PTC ThingWorx est une plateforme industrielle IoT et de jumeau numérique largement déployée dans les environnements de fabrication modernes. Elle permet de connecter les équipements physiques, de collecter leurs données en temps réel et de créer des représentations numériques interactives accessibles depuis des interfaces web ou mobiles. ThingWorx intègre des outils d'analyse avancés, de visualisation de données et de maintenance prédictive, ce qui en fait une solution complète pour la supervision industrielle. Elle est notamment utilisée dans les secteurs de la fabrication, de l'énergie et des équipements médicaux. La plateforme facilite également l'intégration avec différents systèmes industriels tels que les automates programmables industriels (API), les capteurs IoT et les systèmes MES ou ERP, assurant ainsi une continuité des flux d'information à travers l'usine. Elle permet aussi de simuler le comportement des équipements et d'anticiper les défaillances potentielles. Cependant, son déploiement nécessite une infrastructure matérielle importante ainsi que des licences logicielles, ce qui la rend peu accessible pour les petites et moyennes industries [25].

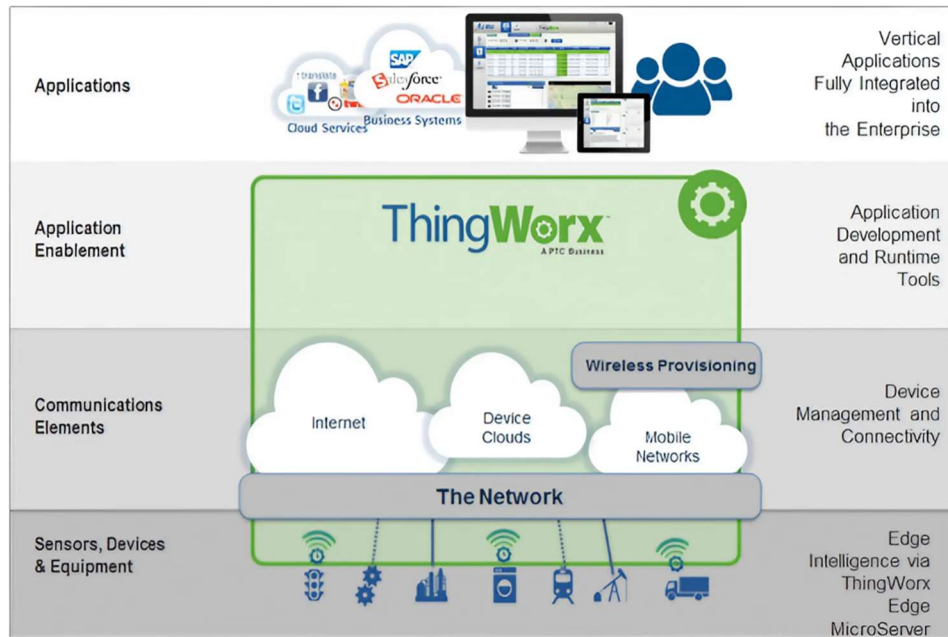


Figure 2.5 – Plateforme PTC ThingWorx [25]

2.3.4 Ansys Twin Builder

Ansys Twin Builder est un outil commercial spécialisé dans la création de jumeaux numériques pour les systèmes mécaniques, électriques et multi physiques. Il permet de modéliser le comportement dynamique des équipements industriels, de réaliser des simulations de fonctionnement et de valider des scénarios de maintenance prédictive. La plateforme est particulièrement utilisée dans les secteurs de l'aéronautique, de l'automobile et de l'énergie pour optimiser les performances. Ansys Twin Builder se distingue par sa capacité à combiner des modèles de simulation haut fidélité avec des données temps réel provenant de capteurs physiques [26].

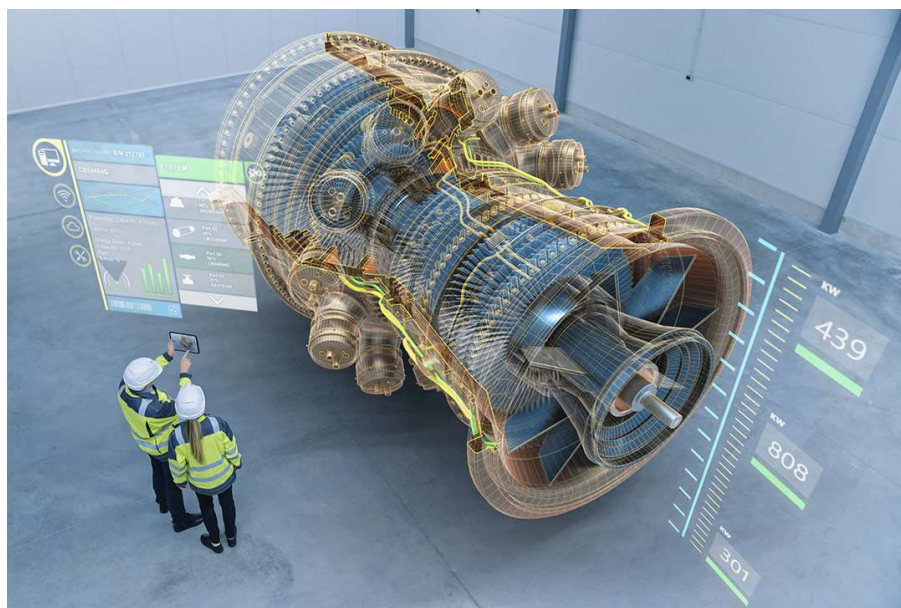


Figure 2.6 – Environnement de modélisation Ansys Twin Builder

2.3.5 Contributions scientifiques

Au-delà des solutions commerciales, plusieurs travaux de recherche récents ont contribué au développement de jumeaux numériques adaptés à des contextes industriels variés.

Tao et al. [27] ont proposé une architecture complète de jumeau numérique orientée vers la fabrication intelligente, intégrant la collecte de données multi-sources, la modélisation numérique et les outils d'analyse prédictive. Leurs travaux ont montré que les jumeaux numériques peuvent significativement améliorer la flexibilité et la réactivité des systèmes de production industrielle.

D'autres travaux ont porté sur le développement de systèmes de jumeaux numériques à faible coût, destinés aux industries peu numérisées. Ces approches exploitent des microcontrôleurs connectés, des protocoles de communication légers et des interfaces web open source afin de rendre la technologie accessible aux petites structures industrielles. Ces recherches mettent en évidence la faisabilité de solutions de supervision numérique économiques et modulaires, capables de s'adapter à des équipements industriels anciens ne disposant pas d'interfaces numériques intégrées [28].

2.4 Applications dans d'autres domaines

Bien que les jumeaux numériques soient fortement associés au domaine industriel, leurs applications se sont progressivement étendues vers plusieurs autres secteurs. Cette évolution s'explique principalement par les progrès réalisés dans les technologies IoT, l'intelligence artificielle ainsi que les systèmes de traitement des données.

2.4.1 Domaine de la Santé

Dans le secteur médical, les jumeaux numériques sont utilisés afin de créer des représentations virtuelles de patients ou d'équipements médicaux. Ces modèles permettent d'analyser certaines données biologiques et de simuler différents scénarios médicaux avant la réalisation d'interventions réelles.

Certaines applications permettent notamment de réaliser des simulations chirurgicales à partir d'images médicales telles que les scanners ou les IRM. Cette approche améliore la préparation des opérations complexes et réduit les risques médicaux. Les jumeaux numériques sont également utilisés dans le suivi personnalisé des patients grâce à l'analyse continue des données de santé [12].

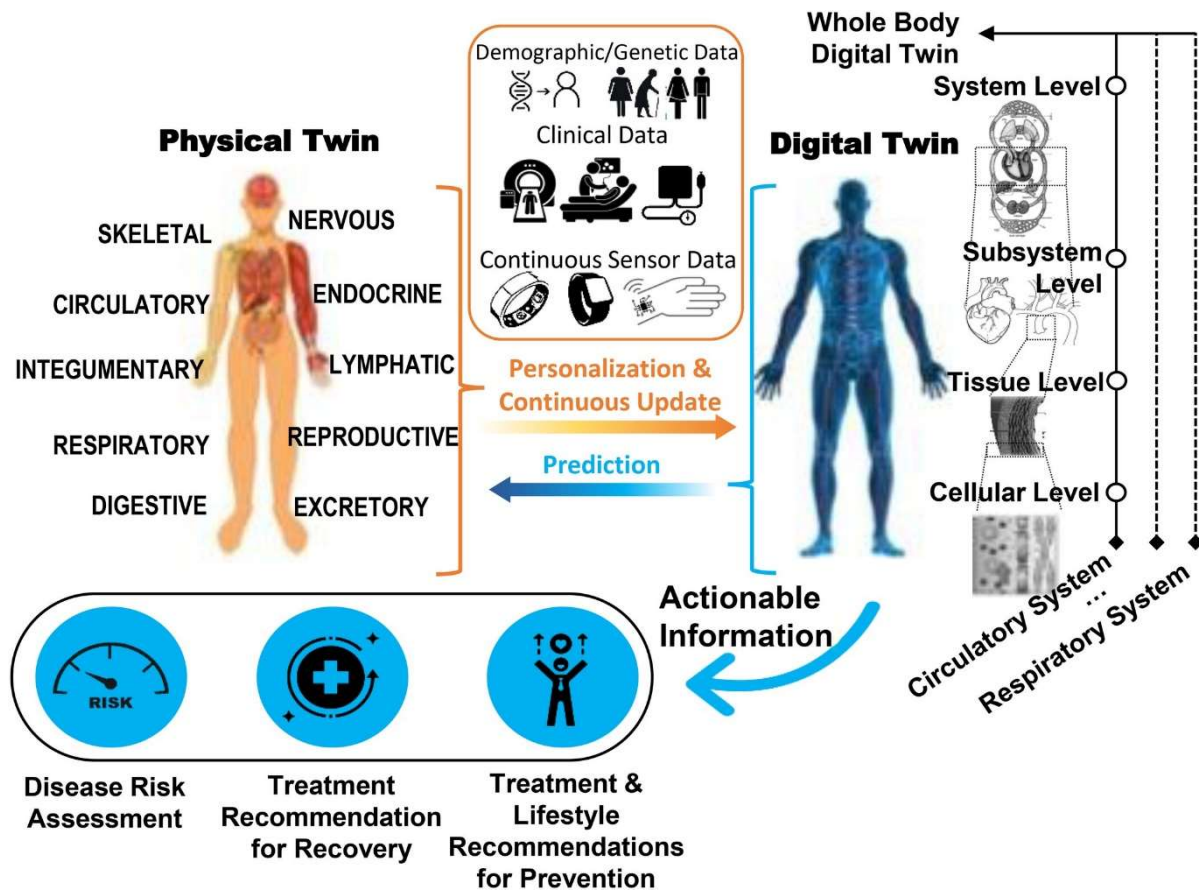


Figure 2.7 – Architecture d'un jumeau numérique du corps humain [12]

2.4.2 Domaine du Transport

Le secteur du transport utilise également les technologies de jumeaux numériques afin de superviser les véhicules, les infrastructures ferroviaires ainsi que les systèmes de circulation intelligents. Certaines entreprises utilisent également ces technologies pour surveiller les performances des moteurs, optimiser la consommation énergétique et améliorer les opérations de maintenance. Les villes intelligentes (Smart cities) utilisent quant à elles des jumeaux numériques afin de modéliser les flux de circulation et optimiser les réseaux de transport urbain [13].

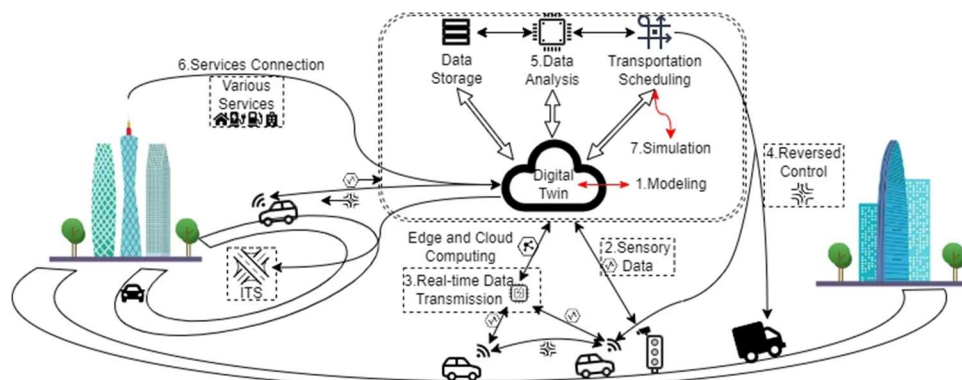


Figure 2.8 – Architecture d'un jumeau numérique pour le transport urbain [13]

2.4.3 Domaine de l'Energie

Dans le secteur énergétique, les jumeaux numériques sont utilisés afin de superviser les réseaux électriques, les centrales de production ainsi que les installations d'énergies renouvelables.

Les parcs éoliens représentent l'une des applications les plus connues dans ce domaine. Chaque éolienne possède une représentation numérique alimentée en permanence par les données provenant des capteurs installés sur les équipements physiques. Cette approche permet d'optimiser la production énergétique et de détecter rapidement les anomalies techniques [14].

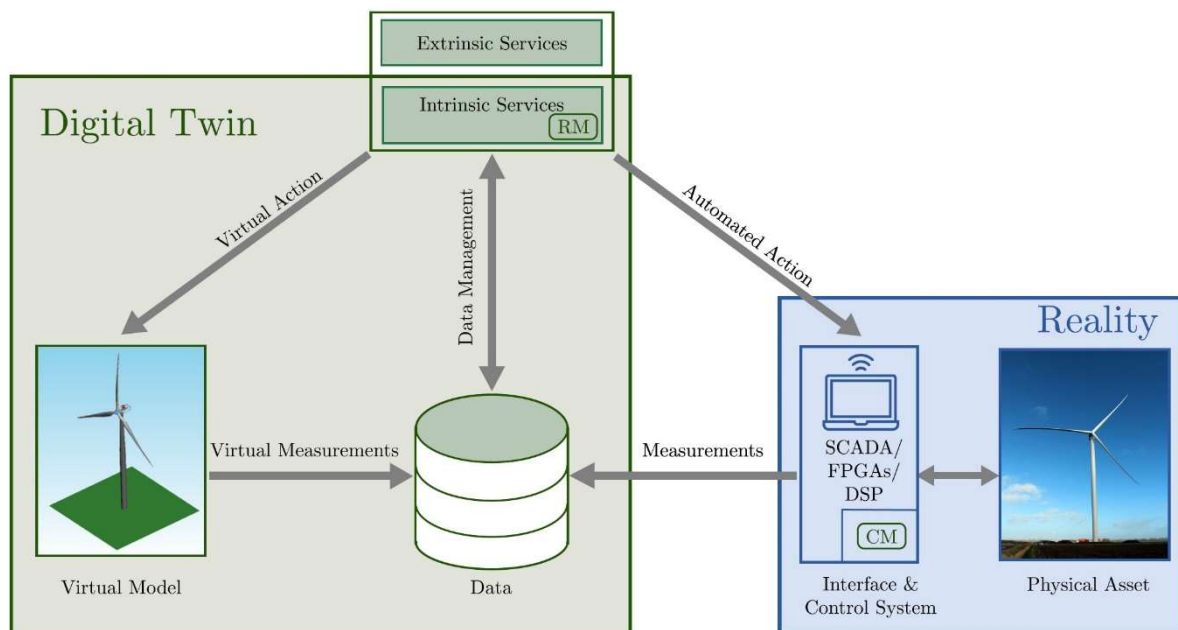


Figure 2.9 – Jumeau numérique sur des installations de production d'énergie [14]

Conclusion

À travers cette étude comparative, nous avons constaté que les technologies de jumeaux numériques occupent aujourd'hui une place importante dans plusieurs secteurs industriels et scientifiques. Les solutions existantes permettent une supervision avancée des systèmes physiques, une amélioration des performances industrielles ainsi qu'une optimisation des opérations de maintenance.

L'analyse des différentes plateformes étudiées montre néanmoins que ces solutions restent souvent complexes et coûteuses. Cette situation met en évidence le besoin de développer des architectures plus flexibles et accessibles capables de s'adapter à des infrastructures industrielles variées.

Les applications observées dans les domaines de la santé, du transport et de l'énergie démontrent également le potentiel considérable des jumeaux numériques dans de nombreux secteurs d'activité.

Cette étude des solutions existantes nous a ainsi permis de mieux comprendre les approches actuelles utilisées dans les systèmes de jumeaux numériques et constitue une base importante pour la conception du système développé dans le cadre de notre projet.

Chapitre 3 : Présentation de l'entreprise



Introduction

Ce chapitre est consacré à la présentation générale de l'entreprise d'accueil Tlemcen Faïence SARL, dans laquelle s'est déroulé ce projet. Il permet de situer le contexte industriel et organisationnel de l'étude à travers une description de l'entreprise, de ses activités ainsi que de son mode de fonctionnement.

Une présentation générale et une fiche technique de l'entreprise sont exposées afin de mettre en évidence son identité. Ensuite, les différentes activités ainsi que l'organisation interne de l'entreprise sont détaillées afin de mieux comprendre son fonctionnement industriel.

Ce chapitre aborde également le processus de production adopté par l'entreprise, depuis la préparation de la matière première jusqu'au produit fini. Enfin, une présentation des principaux produits fabriqués ainsi que des fournisseurs et des clients de l'entreprise est réalisée afin d'avoir une vision globale de son environnement industriel et commercial.

3.1 Présentation de l'entreprise

Tlemcen Faïence SARL est une entreprise industrielle algérienne spécialisée dans la transformation de l'argile et la fabrication de produits en céramique. Implantée dans la région de Tlemcen, elle occupe une place importante dans le secteur des matériaux de construction et des produits artisanaux en faïence. Créée dans les années 1970, l'entreprise a su évoluer au fil du temps en modernisant ses équipements et en améliorant ses procédés de production afin de répondre aux exigences du marché.

3.2 Fiche technique de l'entreprise

Nature : Siège

Année de création : 1975

Forme juridique : SARL

Activités : Producteur & Distributeur de produits en céramique et Faïence artistiques

Capital : 83 000 000 DZD

Effectifs de l'entreprise : de 50 à 99 employés

Adresse de l'entreprise : Zone Industrielle Dessert n°4 Chetouane Algérie

Tel : +213 043 27 32 47

3.3 Activités de l'entreprise

L'activité principale de l'entreprise repose sur la valorisation des matières premières naturelles, notamment l'argile, pour la fabrication de différents produits. Elle produit principalement :

- ❖ Des matériaux de construction (tuiles, briques, etc.),
- ❖ Des produits en céramique,
- ❖ Des articles en faïence destinés à un usage domestique (vaisselle, objets décoratifs).

Grâce à cette diversité, l'entreprise répond à la fois aux besoins du secteur du bâtiment et à ceux des particuliers.

3.4 Organisation et fonctionnement

L'entreprise fonctionne selon une organisation industrielle structurée, comprenant plusieurs services essentiels tels que la production, la maintenance, le contrôle qualité et la gestion administrative. Le processus de fabrication est continu et repose sur différentes étapes techniques, allant de la préparation de la matière première jusqu'à la cuisson et au conditionnement du produit fini.

Le contrôle qualité occupe une place importante dans le fonctionnement de l'entreprise, garantissant que les produits commercialisés respectent les normes exigées en termes de résistance, de finition et d'aspect.

Tlemcen Faïence SARL contribue au développement économique local en générant des emplois et en valorisant les ressources naturelles de la région. Par ailleurs, l'entreprise adopte certaines pratiques visant à réduire son impact environnemental, notamment à travers le recyclage des déchets de production et la récupération de chaleur dans ses procédés industriels.

3.5 Processus de production

La fabrication de tuiles et de briques en terre cuite repose sur un principe fondamental vieux de plusieurs millénaires : façonner l'argile, la sécher, puis la cuire à haute température pour lui conférer sa dureté, sa résistance et sa durabilité définitives. Cependant, derrière cette apparente simplicité se cache un processus industriel d'une grande complexité, où chaque paramètre granulométrie de la poudre, teneur en eau de la

pâte, température et durée de cuisson doit être contrôlé avec précision pour obtenir un produit conforme aux exigences du marché.

Dans cette usine, le processus se déroule en huit grandes étapes successives, regroupées en trois phases distinctes :

Phase 1 Préparation de la matière :

- Stockage de l'argile brute
- Broyage à boulets
- Tamisage et agitation
- Filtration sous pression (FFP)

Phase 2 Façonnage :

- Extrusion simple (boudineuse) → cylindres pour potiers
- Façonnage industriel (extrudeuse + roto-presse) → tuiles et briques

Phase 3 Traitement thermique et finition :

- Séchage à contre-courant
- Cuisson en four tunnel
- Triage, émaillage et recyclage des rebuts

3.6 Principaux produits

L'entreprise produit des matériaux de construction et des produits en céramique ainsi que des articles en faïence. La plus grosse partie de production repose principalement sur les tuiles en terre cuite sous format de plusieurs types.



Figure 3.1 – Exemple de produit fini (Tuile egorgé)

3.7 Fournisseurs et clients

- Fournisseurs : Carrières d'argile ou Argilières (Principalement des fournisseurs de la matière première d'argile)
- Clients : Entreprise de construction, artisans du bâtiment, Particuliers, Pour la poterie et terre cuite (petit atelier, jardinier, magasin de décoration)

Conclusion

À travers ce chapitre, nous avons présenté l'entreprise Tlemcen Faïence SARL, son historique, ses activités ainsi que son organisation interne. Cette étude a permis de mieux comprendre le fonctionnement global de l'entreprise et l'importance de son rôle dans le domaine de la fabrication des produits en céramique et des matériaux de construction.

L'analyse du processus de production a également mis en évidence les différentes étapes techniques intervenant dans la transformation de l'argile jusqu'à l'obtention du produit fini, ainsi que les moyens industriels utilisés pour assurer la qualité de la production.

L'ensemble de ces informations constitue une base essentielle pour la compréhension du cadre industriel du projet et facilite l'étude des aspects techniques qui seront développés dans les chapitres suivants.

Chapitre 4 : Conception et Réalisation du Système de Jumeau Numérique



Introduction

Ce chapitre constitue l'ensemble des travaux de conception et développement réalisés dans le cadre du projet de jumeau numérique pour la supervision temps réel d'une usine de production de poterie. La réalisation d'un tel système nécessite de combiner l'électronique industrielle, systèmes embarqués, réseaux de communication, développement logiciel et visualisation 3D interactive.

Dans le contexte d'une usine de production de poterie, les machines industrielles constituent les actifs critiques dont la disponibilité conditionne directement le rendement de production. Or, la supervision de ces équipements repose encore, dans de nombreux établissements de taille moyenne, sur une observation humaine directe, ce qui empêche toute historisation systématique des données d'exploitation. Le système développé dans ce projet vise précisément à combler ce déficit technologique en offrant une solution de supervision numérique temps réel, économique et déployable dans un environnement industriel existant.

L'architecture du système repose sur une chaîne d'acquisition et de traitement structurée en quatre couches fonctionnelles : la couche d'acquisition des données industriels, la couche de communication, la couche de traitement et enfin la couche de visualisation et de supervision, matérialisée par un dashboard web interactif intégrant une modélisation 3D.

4.1 Méthodologie

La réalisation du système de jumeau numérique développé dans le cadre de ce projet a suivi une démarche méthodologique progressive visant à répondre aux besoins de supervision temps réel de l'usine. Cette démarche a consisté à concevoir une solution complète capable de collecter les données, puis de les restituer sous la forme d'un jumeau numérique interactif accessible depuis une interface web.

La première étape a consisté à analyser l'environnement industriel de l'usine afin d'identifier les équipements à superviser ainsi que les informations disponibles sur les machines existantes. Cette étude a mis en évidence que la majorité des équipements ne disposent pas d'interfaces de communication numériques permettant l'acquisition directe des données. Il a donc été nécessaire de rechercher une méthode de récupération des états de fonctionnement compatible avec les infrastructures déjà en place.

La deuxième étape a porté sur la conception de la chaîne d'acquisition des données. Les contacteurs présents dans les armoires électriques ont été retenus comme source d'information permettant de déterminer l'état de fonctionnement des machines. Afin d'assurer une isolation électrique entre les circuits industriels et les équipements électroniques, un module optocoupleur a été intégré au système. Les signaux ainsi récupérés sont ensuite traités par des microcontrôleurs ESP32 chargés de transmettre les informations vers le serveur à travers le réseau WiFi de l'entreprise.

La troisième étape a concerné la mise en place de l'infrastructure logicielle du système. Un serveur backend développé avec Flask a été conçu afin de recevoir les données provenant des ESP32, de traiter les événements détectés et d'assurer leur historisation dans une base de données MySQL. Cette architecture permet de centraliser l'ensemble des informations et de conserver un historique détaillé de leur fonctionnement.

La quatrième étape a consisté à développer l'interface de supervision et le jumeau numérique de l'usine. Une application web interactive a été réalisée à l'aide des technologies HTML, CSS et JavaScript. La bibliothèque Three.js a été utilisée pour créer une représentation tridimensionnelle des équipements industriels, permettant à l'utilisateur de visualiser en temps réel l'état des machines et d'accéder à leurs informations de fonctionnement.

Enfin, une phase de validation a été réalisée à travers le déploiement d'un prototype expérimental. Cette étape a permis de vérifier le bon fonctionnement de l'ensemble de la chaîne de supervision, depuis l'acquisition des données au niveau des machines jusqu'à leur visualisation dans l'interface du jumeau numérique. Les résultats obtenus ont confirmé la faisabilité et l'efficacité de la solution proposée dans le contexte industriel étudié.

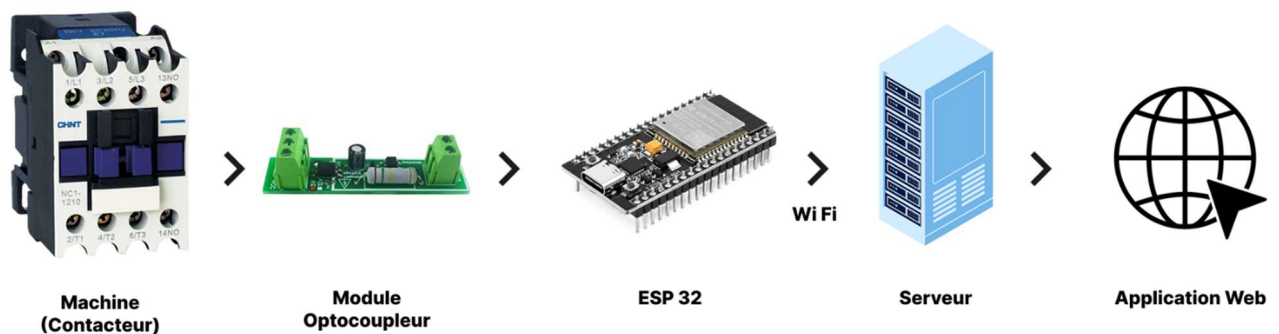


Figure 4.1 – Vue globale de la méthodologie

4.2 Conception de la partie IoT

La mise en œuvre du système nécessite une acquisition fiable et continue des états de fonctionnement des machines. Cependant, la majorité des équipements de l'usine étudié sont des machines en majorité mécaniques anciennes ne disposant pas d'automates programmables industriels (API) ni d'interfaces de communication numériques permettant l'extraction directe des données de fonctionnement.

4.2.1 L'architecture électrique des machines

Les machines reposent principalement sur une architecture électromécaniques classique utilisant une armoire électrique pour regrouper tous les équipements.

Chaque armoire dispose néanmoins d'un contacteur principal chargé d'alimenter le système de puissance lors de la mise en marche de la machine. L'état du contacteur constitue donc une représentation directe de l'état de la machine.

- **Contacteur :**

Un contacteur est un dispositif électromécanique utilisé dans les installations industrielles pour commander l'alimentation électrique des équipements de puissance, notamment les moteurs électriques. Il fonctionne grâce à une bobine électromagnétique qui, lorsqu'elle est alimentée, provoque la fermeture ou l'ouverture de contacts électriques permettant le passage du courant vers la charge. Les contacteurs sont largement utilisés dans les systèmes industriels en raison de leur capacité à commuter des courants élevés tout en assurant une commande à distance des équipements [15].



Figure 4.2 – Contacteur (Exemple :CHINT série NC1 3P) [15]

4.2.2 Acquisition des états de machine à partir du contacteur

Afin de récupérer les états de fonctionnement des machines, les contacteurs ont des sorties auxiliaires qui peuvent être exploitées. Plus précisément, les bornes normalement ouvertes 13NO et 14NO pour détecter l'activation du contacteur.

Le principe de fonctionnement repose sur le fait que les contacts auxiliaires changent d'état simultanément avec l'activation du contacteur. Lorsque la machine est mise en marche, le contact auxiliaire se ferme, ce qui permet de générer un signal exploitable.

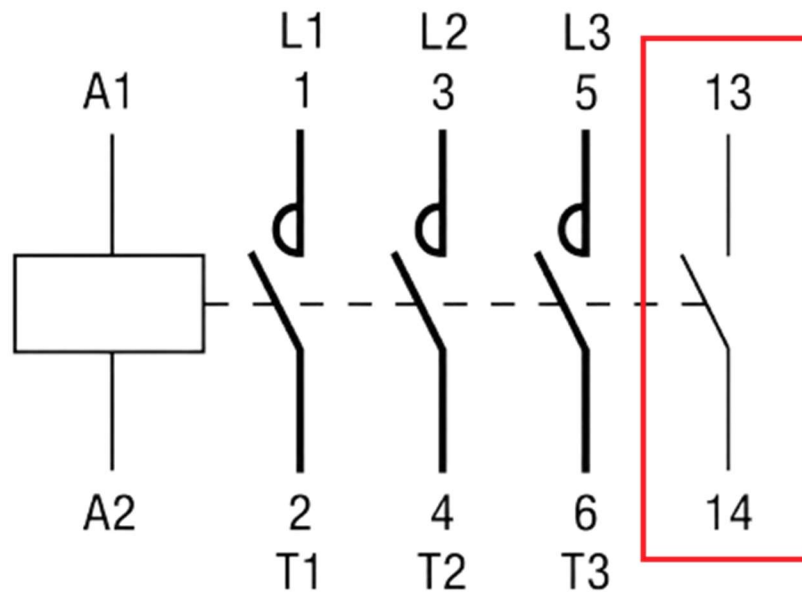


Figure 4.3 – Schéma représentatif de l'intérieur du contacteur

4.2.3 Isolation Electrique

Le courant délivré par le contacteur ne peut pas être directement connecté à l'ESP, en raison des différences de niveau de tension (Haute tension et Basse tension) et des perturbations électriques présentes dans l'environnement industriel.

Pour remédier à ce problème de haute tension, le module optocoupleur est utilisé. Ce dernier constitue un composant électronique permettant la transmission d'un signal électrique entre deux circuits isolés, électriquement grâce à un couplage optique.

Cette isolation permet de protéger la partie embarquées contre les surtensions et d'éviter les perturbations électriques industrielle.

4.2.4 Module Optocoupleur

Ce module est l'élément principal dans l'isolation entre la haute tension des machines et la basse tension de la partie embarquée.

Son fonctionnement repose généralement sur l'association d'une diode électroluminescente (LED) et d'un phototransistor. Lorsque le signal d'entrée active la LED interne, la lumière produite déclenche le phototransistor du côté sorti sans connexion électrique directe entre les deux circuits. Ce qui permet de relier électriquement deux circuits sans qu'ils soient physiquement connectés.

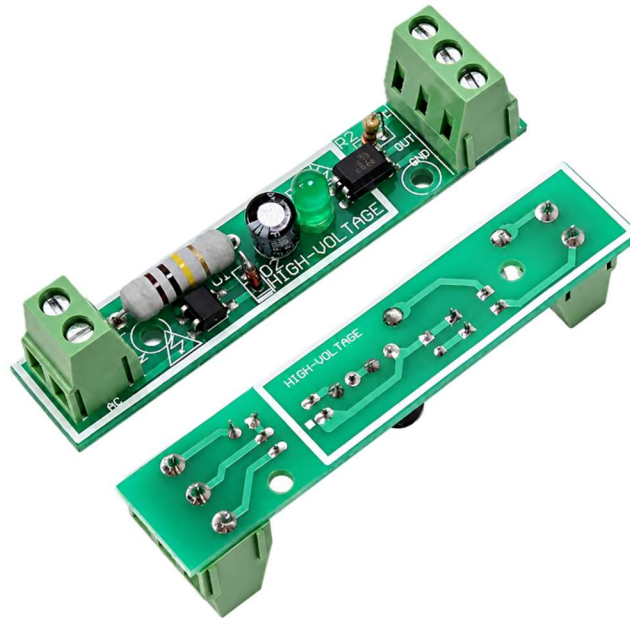


Figure 4.4 – Module Optocoupleur

La partie basse tension du module doit être alimentée par du 3.3V. C'est parfait pour être relié avec un ESP32.

4.2.5 Intégration du Microcontrôleur ESP32

Le microcontrôleur ESP32 constitue l'élément central du système d'acquisition et transmission des données. Son rôle principal consiste à récupérer l'information provenant du module optocoupleur puis transmettre ces données vers le serveur à travers le réseau WiFi local de l'entreprise.

- **ESP32 :**

L'ESP32 est un microcontrôleur développé par la société Espressif Systems destiné aux applications embarquées et à l'Internet des Objets (IoT). Il intègre un processeur performant ainsi que plusieurs fonctionnalités de communication telles que le WiFi et le Bluetooth. Grâce à ses nombreuses entrées/sorties numériques et analogiques, l'ESP32 permet l'acquisition, le traitement et la transmission de données provenant de différents capteurs ou équipements électroniques. Son faible coût, sa faible consommation énergétique, et surtout son adaptabilité dans le milieu industriel en fait

une solution largement utilisée dans les systèmes de supervision et les applications connectées.

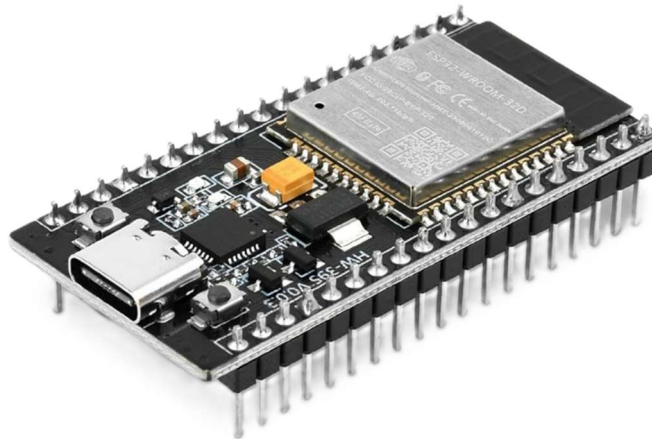


Figure 4.5 – ESP32 (WiFi + Bluetooth)

Avant le développement, une phase de préparation est réalisée. L'ensemble du firmware présent par défaut a été réinitialisé afin de le préparer à recevoir un nouvel environnement d'exécution. Une version de MicroPython a été installée sur la carte ESP à l'aide d'une opération de flashage.

- **MicroPython** : constitue une implémentation légère du langage Python destinée aux microcontrôleurs et systèmes embarqués. Son utilisation permet de simplifier le développement des programmes tout en offrant une bonne lisibilité du code [16].

Après l'installation du MicroPython, le programme est transféré vers l'ESP32. Ce programme assure :

- La connexion automatique au réseau WiFi local
- La surveillance continue de l'entrée du module optocoupleur (via GPIO)
- L'envoi des informations vers le serveur

Le fonctionnement du programme repose sur une surveillance permanente de l'état logique d'une entrée GPIO configurée en mode lecture (en LOW). Dans le système développé, la sortie du module optocoupleur est connectée au GPIO 23 de l'ESP32. Lorsqu'un changement d'état est détecté au niveau du contacteur industriel, le signal transmis par l'optocoupleur modifie l'état logique de l'entrée numérique.

Le programme compare en permanence l'état actuel de l'entrée GPIO 23 avec l'état précédent pour éviter les transmissions inutiles. Lorsqu'une transition est détectée, l'ESP32 envoie une requête http POST au serveur afin de mettre à jour l'état de la machine.

Le programme embarqué développé sur l'ESP32 est présenté dans la figure suivante :

```
from machine import Pin
import network
import urequests
import time

# Initialisation de la connexion
SSID = "Wifi"
PASSWORD = "*****"
wifi = network.WLAN(network.STA_IF)
wifi.active(True)

# Connexion au WiFi
if not wifi.isconnected():
    wifi.connect(SSID, PASSWORD)
    while not wifi.isconnected():
        time.sleep(1)

PIN_OPTO = 23
opto = Pin(PIN_OPTO, Pin.IN)
etat_precedent = None

while True:
    etat = opto.value()
    machine = (etat == 0) # actif LOW : 0 = Machine en marche
    if machine != etat_precedent:
        if machine: # Machine Eteinte
            try:
                r = urequests.post("http://192.168.1.4:5000/api/machines/update/1/0")
                print("Réponse :", r.status_code, " " + str(r.text))
                r.close()
            except Exception as e:
                print("Erreur HTTP :", e)
        else: # Machine en marche
            try:
                r = urequests.post("http://192.168.1.4:5000/api/machines/update/1/1")
                print("Réponse :", r.status_code, " " + str(r.text))
                r.close()
            except Exception as e:
                print("Erreur HTTP :", e)
        etat_precedent = machine

    time.sleep(0.1)
```

Figure 4.6 – Le programme du ESP32

Le programme repose sur une logique dite « actif LOW », dans cette configuration, la valeur logique 0 au niveau du GPIO correspond à un état actif. Cette logique est dictée par le comportement du contacteur : lorsque la machine est éteinte, le circuit entre les bornes 13 et 14 est fermé (laissant passer le courant), en revanche, lorsque la machine est en marche, ce circuit est ouvert et aucun courant ne circule.

4.2.6 Schéma de Branchement du système

Après l'intégration des différents composants matériels, le système final a été mis en place en reliant le contacteur, le module optocoupleur et l'ESP32.

Le schéma général de branchement réalisé dans le cadre du projet est présenté dans la figure suivante :

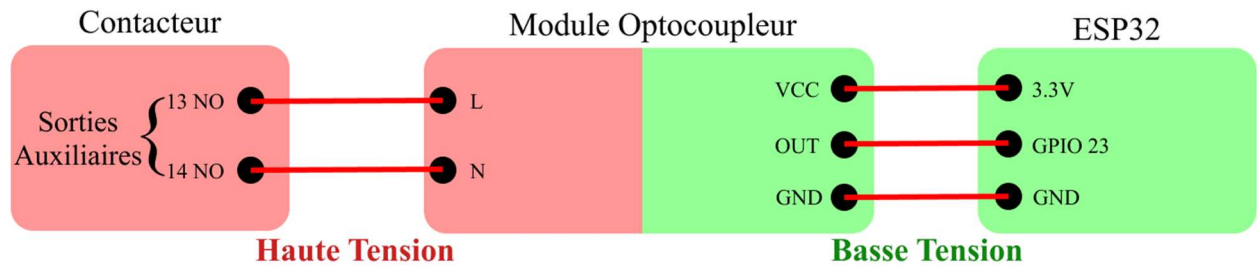


Figure 4.7 – Branchement général du système

4.3 Conception de l'Application web

La partie web constitue la base du système de jumeau numérique. Elle assure la réception des données provenant de l'ESP32, leur traitement en temps réel, leur stockage ainsi que leur visualisation.

L'objectif de l'application web est de fournir une plateforme de supervision centralisée permettant de surveiller l'état des machines, consulter leur historique de fonctionnement et gérer les opérations de maintenance.

4.3.1 Architecture Logicielle du système

L'architecture logicielle développée repose sur une structure client-serveur permettant d'assurer la communication entre le serveur et l'interface de supervision. Cette architecture garantit la circulation des données en temps réel.

Le fonctionnement global débute au niveau de l'ESP32, connecté au réseau WiFi local de l'usine, assure l'envoi d'informations vers le serveur.

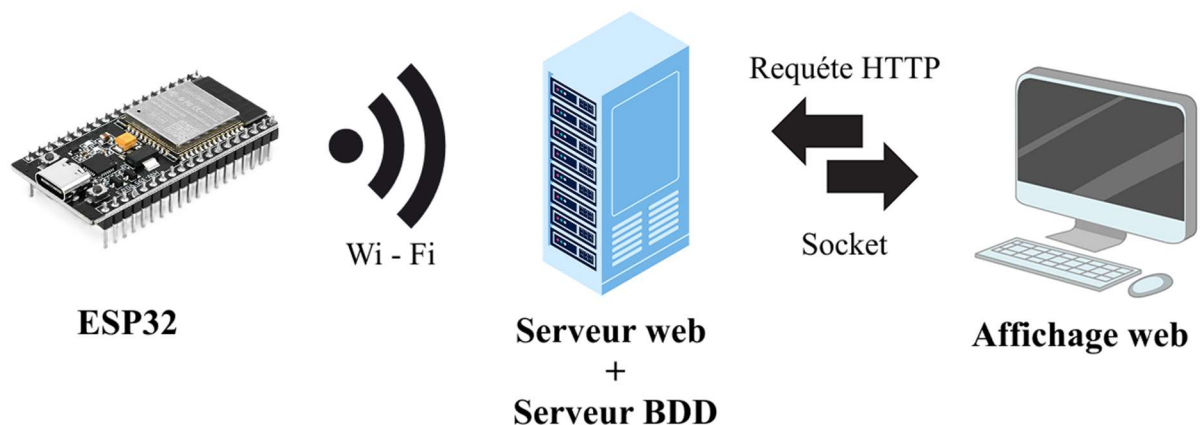


Figure 4.8 – Architecture logicielle du système

Le serveur web assure la réception des données, le traitement des événements, la gestion des opérations de maintenance ainsi que l'historisation des données dans la base de données. Le serveur Base de données permet de stocker l'ensemble des informations du système ainsi que l'historique de tous les événements passés.

Du côté client, l'utilisateur de l'interface de supervision accède à travers l'application web exécutée depuis un ordinateur connecté au même réseau local de l'entreprise.

4.3.2 Outils de développement

Chaque développement d'application informatique nécessite des technologies adéquates à son implémentation.

- **Python :**

Python est un langage de programmation interprété, puissant et facile à apprendre. Il est largement utilisé dans le développement web, l'intelligence artificielle, l'analyse de données et l'automatisation grâce à sa syntaxe simple et ses nombreuses bibliothèques.



Figure 4.9 – Logo Python

- **Flask :**

Flask est un micro-framework web développé en Python. Il permet de créer des applications web et des API de manière simple et légère. Flask est très utilisé pour le développement backend grâce à sa flexibilité et sa facilité d'intégration avec différentes bibliothèques et bases de données [17].



Figure 4.10 – Logo Flask

- **SocketIO :**

Socket.IO est une bibliothèque permettant la communication en temps réel entre un serveur et des clients web. Elle fonctionne principalement avec les WebSockets et permet d'échanger des données instantanément, ce qui est utile pour les notifications, les systèmes de surveillance et les applications interactives [18].



Figure 4.11 – Logo Socket IO

- **WampServer :**

WampServer est un environnement de développement pour Windows qui regroupe plusieurs outils nécessaires à l'hébergement local d'applications web, notamment Apache, MySQL et PHP. Wamp peut être utilisé pour gérer et héberger une base de données MySQL localement.



Figure 4.12 – Logo WampServer

- **MySQL :**

MySQL est un système de gestion de base de données relationnelle (SGBDR) utilisant le langage SQL pour stocker, organiser et manipuler les données. Il est largement utilisé dans les applications web pour assurer la gestion efficace des informations et peut être intégré avec des frameworks comme Flask afin de sauvegarder et récupérer les données depuis le serveur.



Figure 4.13 – Logo MySQL

- **HTML :**

HTML (HyperText Markup Language) est le langage standard utilisé pour structurer le contenu des pages web. Il permet de définir les différents éléments d'une interface tels que les titres, paragraphes, images, tableaux et formulaires.



Figure 4.14 – Logo HTML

- **CSS :**
CSS (Cascading Style Sheets) est un langage utilisé pour la mise en forme des pages web. Il permet de personnaliser l'apparence des éléments HTML, notamment les couleurs, les polices, les espacements et les animations.



Figure 4.15 – Logo CSS

- **JavaScript :**
JavaScript est un langage de programmation utilisé principalement pour rendre les pages web interactives et dynamiques. Il permet de gérer les événements, les animations, les mises à jour en temps réel et la communication avec le serveur.



Figure 4.16 – Logo JavaScript

- **Three JS :**

Three.js est une bibliothèque JavaScript open source qui facilite la création et l’affichage de graphiques 3D dans un navigateur web à l’aide de la technologie WebGL. Elle permet de développer des scènes interactives, des animations et des visualisations 3D de manière plus simple et efficace [19].

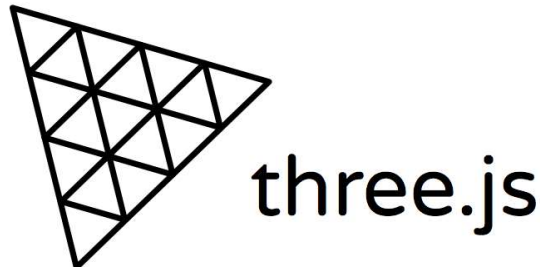


Figure 4.17 – Logo Three JS

- **PyCharm :**

PyCharm est un environnement de développement intégré (IDE) développé par JetBrains et spécialement conçu pour le langage Python. Il offre plusieurs fonctionnalités telles que l’édition intelligente du code, le débogage, l’auto complétion et la gestion des projets afin de faciliter le développement des applications Python [20].

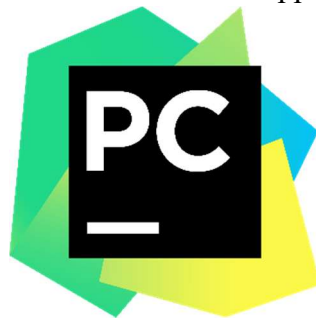


Figure 4.18 – Logo Pycharm

- **Blender :**

Blender est un logiciel libre et open source de création 3D utilisé pour la modélisation, l’animation, le rendu, la simulation et la conception d’objets tridimensionnels. Il permet également de créer des scènes interactives et des modèles 3D pouvant être utilisés dans des applications web, des jeux vidéo et des projets de visualisation.



Figure 4.19 – Blender

4.3.3 Conception de la Base de Données

La base de données mis en place à l'aide de MySQL, assure l'historisation des données et la gestion des informations du système.

La base de données repose sur trois tables principales :

- **machine** : contient les informations des machines (nom, catégorie, état actuel)
- **category** : contient tous les catégories des machines
- **machine_logs** : regroupe tous les évènements des états de machine.

Les tables sont reliées entre elles par des clés étrangères afin de garantir l'intégralité des données. Voici un schéma conceptuel qui regroupe tous les tables de la BDD ainsi que les relations entre les tables :

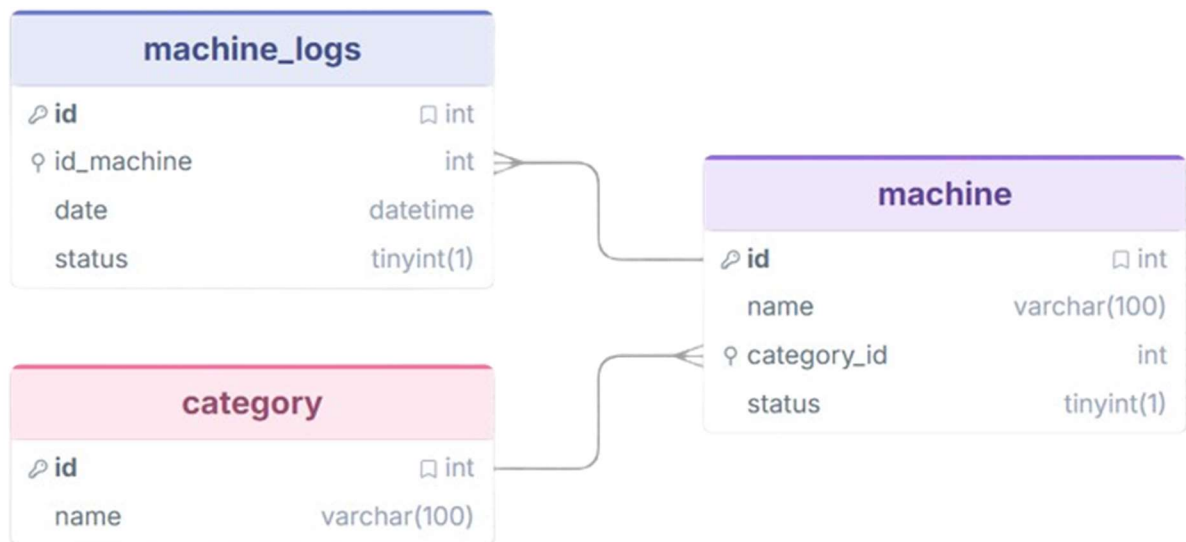


Figure 4.20 – Structure de la base de données

4.3.4 Développement du backend

Développé avec le framework Flask, le système repose sur une architecture API REST permettant aux EPS32 de communiquer avec le serveur via des requêtes HTTP POST.

Les routes API utilisent **render_template** pour afficher les pages HTML (ex : /dashboard, /maintenance, /historique), mais quelques routes API sont pour d'autres utilisations par exemple :

- **/api/machines/update/<int :id>/<int : state>** : pour la communication entre l'ESP32 et le serveur pour mettre à jour l'état de la machine (mise en marche / mise à l'arrêt).
- **/api/machines/history** : pour charger dynamiquement l'historique des machines avec la date en arguments.
- **/api/machines** : pour charger dynamiquement toutes les informations des machines.

SQLAlchemy, un ORM (Object Relational Mapping) puissant pour Python, qui est également utilisé afin de simplifier les interactions avec la base de données. Cette approche permet de manipuler les données sous forme d'objets Python tout en réduisant la complexité des requêtes SQL.

Grace à l'ORM directement connecter avec le serveur MySQL, le système d'historisation développé permet d'enregistrer automatiquement chaque changement d'état des machines. Cette fonctionnalité constitue un élément essentiel puisqu'elle permet de conserver une trace complète des événements.

Socket IO permet d'établir une connexion socket entre le serveur et l'interface web ce qui permet le changement d'état de la machine en temps réel.

4.3.5 Modélisation 3D des machines

L'objectif principale était de créer une représentation visuelle réaliste des différentes machines de l'usine, vue que l'étude comporte plusieurs types de machines industrielles possédant des formes et structures mécaniques variées, la modélisation complète de ces équipements nécessite un temps de conception très important ainsi qu'une expertise avancée en modélisation.

Face à cette contrainte, une approche basée sur la réutilisation de modèles 3D existants a été adoptée. Plusieurs plateformes spécialisées proposant des modèles 3D gratuits ont été utilisées afin de récupérer des représentations proches des machines réelles de l'usine [21], [22], [23], [24].

Cependant, les modèles récupérés, sous plusieurs formats de fichiers, nécessitent plusieurs modifications avant leur intégration dans l'environnement Three.js.

Le logiciel Blender a été utilisé pour effectuer plusieurs opérations de préparation, principalement le redimensionnement des machines afin d'obtenir des proportions cohérentes dans la scène 3D ainsi que l'ajustement des positions et recentrage des modèles par rapport à leur axe d'origine.

Ces ajustements étaient nécessaires afin d'assurer deux points principales :

- Réduction de la taille des fichiers pour diminuer le travail de la technologie WebGL et obtenir plus de performance.
- L'exportation des modèles 3D sous format de fichier **glb** en raison de sa compatibilité avec la bibliothèque Three.js.

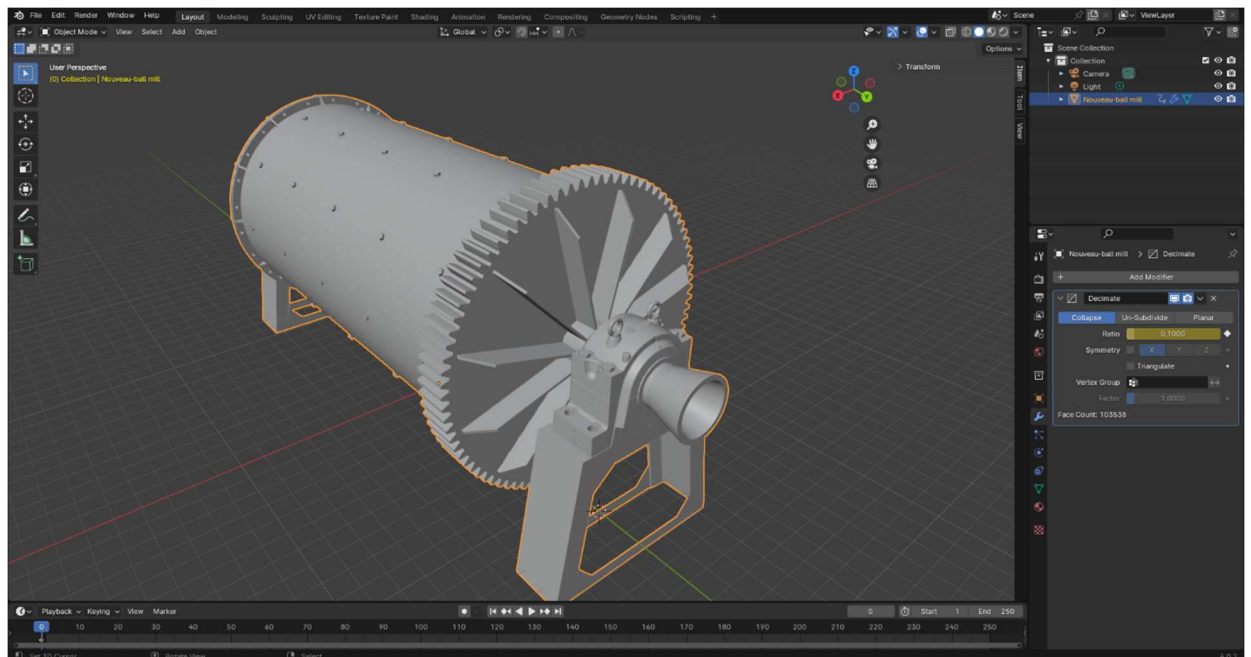


Figure 4.21 – Exemple d'un Broyeur 3D sur Blender

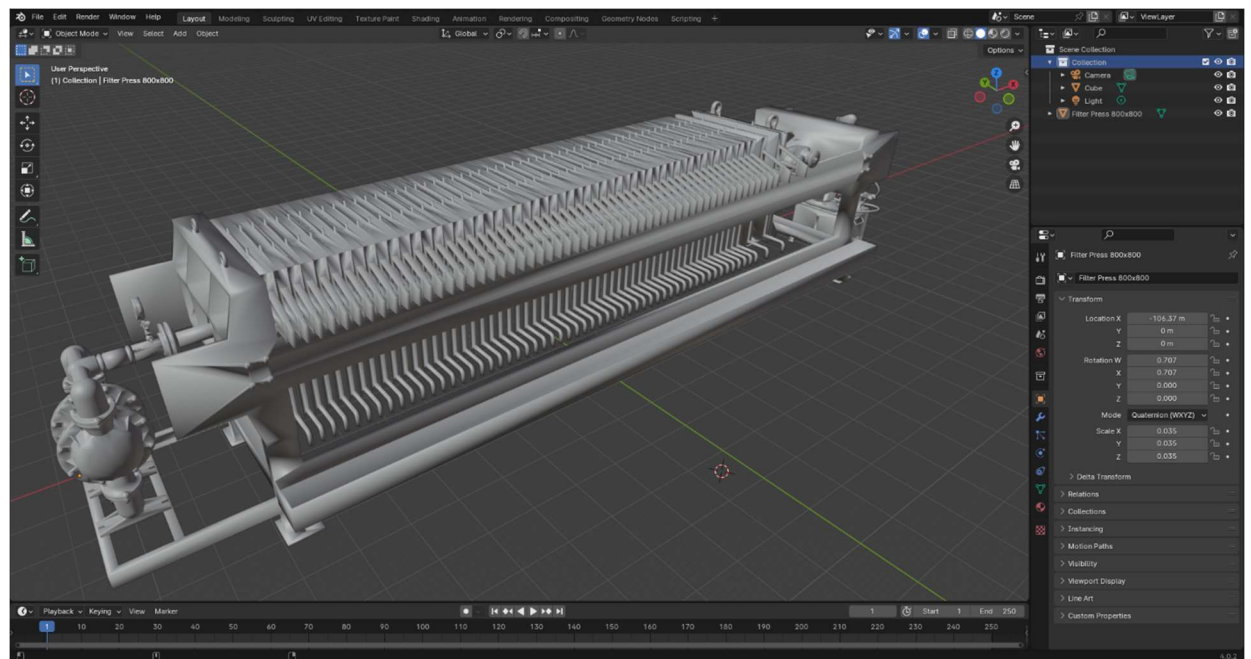


Figure 4.22 – Exemple d'un Filtre Par Presse 3D sur Blender

4.3.6 Développement de l'interface de l'application web

L'interface de l'application a été développée à l'aide des technologies HTML, CSS et JavaScript. La bibliothèque Three.js a été utilisée pour la création de la scène 3D. L'organisation des fichiers du projet a suivi une architecture classique d'une application Flask.

Vue que l'application sera en réseau local de l'usine et parfois sans accès à internet, les bibliothèques JavaScript externes ont été téléchargées et ajoutées aux fichiers JavaScript du projet.

Trois fonctionnalités principale ont été développée :

- **Vue de l'usine** : La fonctionnalité principale qui contient la scène 3D interactive de la bibliothèque Three.js et chaque machine peut être sélectionner pour afficher des informations détaillées sur son historique.
- **Historique des machines** : L'historique de toute les machines durant une date précise et le temps de travail de chaque machine.
- **Maintenance** : La possibilité de déclarer une machine en maintenance et la finir.

4.3.7 Synchronisation Temps réel

La synchronisation temps réel est basée sur les sockets mis en place entre le backend Flask et l'interface de l'application.

Lorsqu'un ESP32 détecte un changement d'état de la machine, l'information est envoyée au serveur backend Flask puis immédiatement transmise à l'interface de l'application à travers le socket. Cela permet de mettre à jour dynamiquement l'état de la machine en changeant sa couleur selon l'état et son historisation.

4.4 Description de l'application web

L'interface web développée constitue l'interface principale du système de jumeau numérique. Elle permet de superviser en temps réel l'état des machines. Les sections suivantes présentent les différentes pages ainsi que leurs principales fonctionnalités.

4.4.1 Page Vue de l'usine

La page de vue de l'usine constitue l'interface principale du jumeau numérique développé. Cette page permet de superviser en temps réel l'ensemble des machines et leurs états à travers une représentation tridimensionnelle interactive de l'usine.

L'interface repose sur une scène 3D développée à l'aide la bibliothèque JavaScript Three.js. Cette scène représente virtuellement l'environnement industriel de l'usine, ou les machines sont organisés et regroupés par catégories afin de faciliter à l'identification des différentes zones de production.

La scène intègre une caméra dynamique qui permet une visualisation globale. Celle-ci peut effectuer une rotation autour du centre de la scène tout en permettant à l'utilisateur de manipuler la vue grâce à la rotation et zoom avant/arrière de la caméra.



Figure 4.23 – Page Vue de L'usine

Le système assure une synchronisation temps réel des états des machines, chaque modèle 3D change dynamiquement de couleur selon le changement d'état :

- Vert : machine en marche
- Rouge : machine à l'arrêt
- Sans couleur : machine en maintenance

Une fonctionnalité de sélection des machines est intégrée à la scène, au clique sur une machine, une fenêtre contextuelle (pop-up) apparaît afin d'afficher l'historique de la machine concerné.

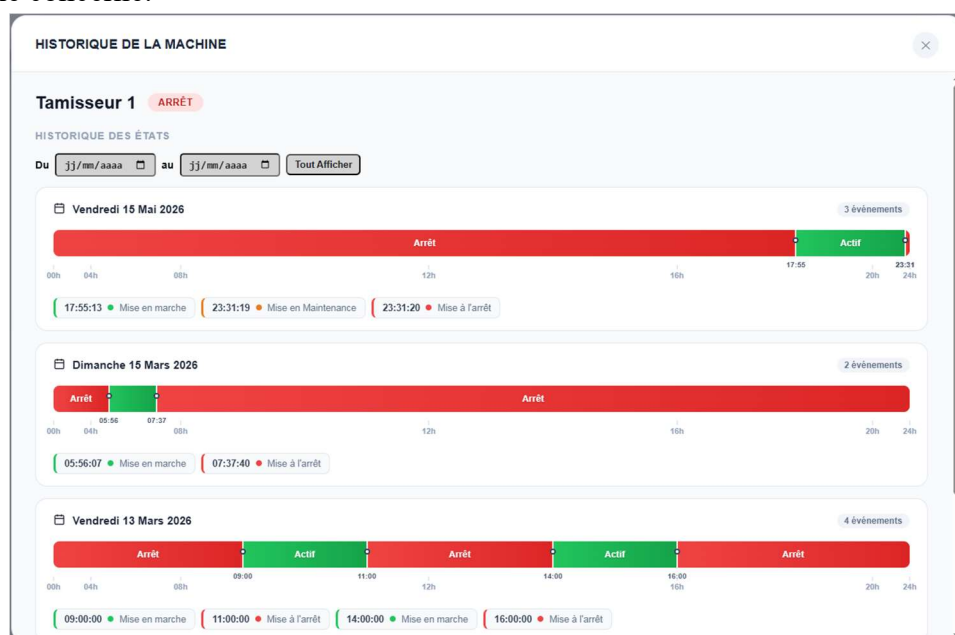


Figure 4.24 – Fenêtre contextuelle à la selection de machine

4.4.2 Page Historique des machines

La page d'historique des machines permet de consulter l'ensemble des événements enregistrés par le système durant une journée spécifique de production.

Cette interface a été conçue afin d'offrir une visualisation claire et structurée des activités des machines. Les données affichées sont récupérées directement depuis la base de données d'historisation.

Regroupé par catégorie, chaque machine possède sa propre ligne chronologique affichant les différents changements d'état enregistrés durant la journée sélectionnée. Cette représentation permet d'identifier les périodes de fonctionnement, les temps d'arrêt et les interruptions de production.

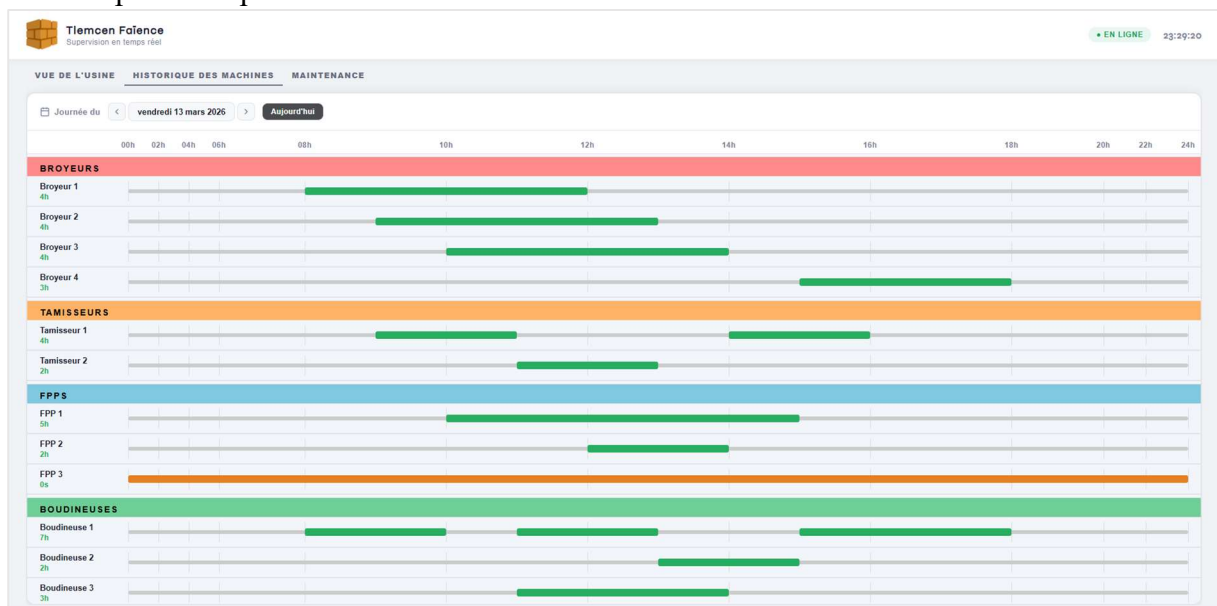


Figure 4.25 – Page Historique des machines

4.4.3 Page Maintenance

La page de maintenance a été développée afin de permettre la gestion des machines en panne ou en cours de réparation. Durant une opération de maintenance, une machine peut être mise en marche et arrêtée plusieurs fois afin de vérifier son bon fonctionnement durant ou après son intervention. Cependant, ces changements d'état ne reflètent pas une activité réelle de production et peuvent perturber le système de jumeau numérique en générant des informations erronées ou des historiques de fonctionnement inexacts.

Cette interface affiche l'ensemble des machines groupée par catégorie. Elle permet de déclarer une machine en maintenance, l'équipement est automatiquement considéré comme indisponible par le système jumeau numérique.

Lorsqu'une machine est en mode maintenance :

- Son état visuel devient sans couleur (gris) dans la scène 3D,
- Les données provenant de l'EPS32 ne sont plus prises en comptes,
- Les changements d'état sont ignorés par le serveur.

Après la fin de l'intervention, la machine peut être rétabli a son état normal depuis l'interface de maintenance. Le système reprend alors automatiquement la surveillance de la machine.

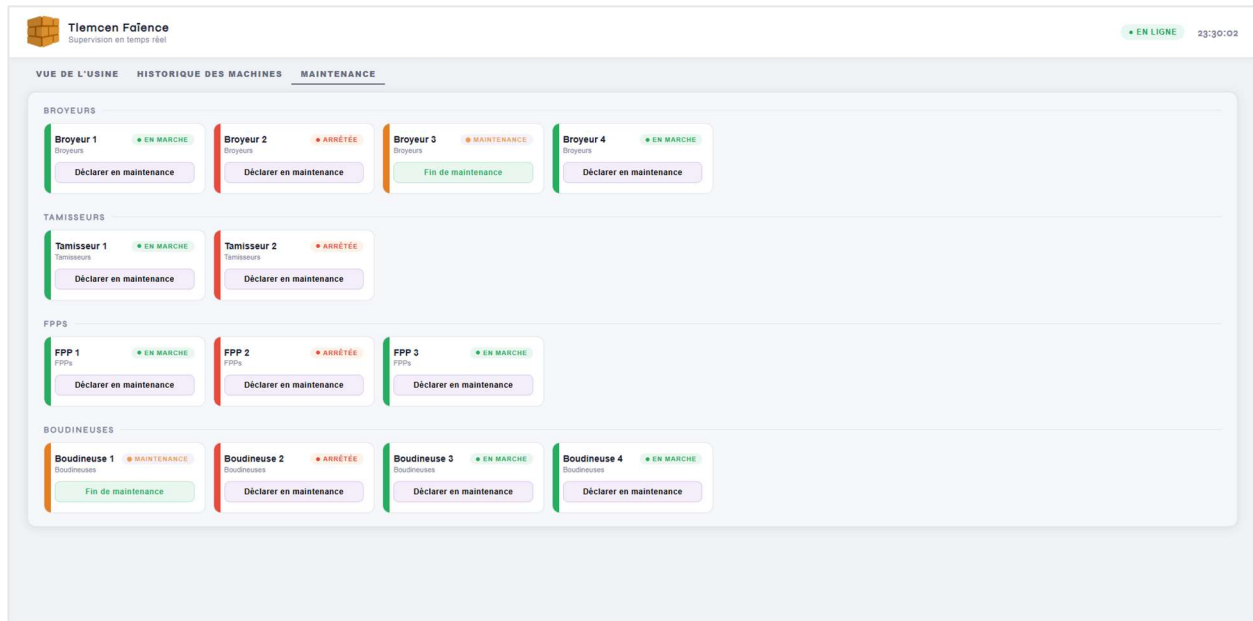


Figure 4.26 – Page Maintenance

4.5 Réalisation et validation d'un prototype expérimental

Avant le déploiement du système au sein de l'environnement industriel réel, une phase de prototypage et de validation expérimentale a été réalisée afin de tester l'ensemble de l'architecture matérielle et logicielle développée. Cette étape avait pour objectif de vérifier le bon fonctionnement des différents composants du système ainsi que la fiabilité de la communication entre la partie électrique, le système d'acquisition et le dashboard de supervision.

Pour cette phase de test, un prototype reproduisant le fonctionnement réel d'une machine industrielle a été conçu et assemblé. Le montage réalisé intègre l'ensemble des composants présents dans une architecture industrielle classique, notamment un disjoncteur de protection, un contacteur de puissance, des boutons de commande marche/arrêt ainsi qu'une lampe de signalisation utilisée pour simuler le comportement de l'état d'une machine.

Le contacteur constitue l'élément principal du système de commande et permet l'alimentation ou la coupure de la lampe. Deux boutons poussoirs utilisés, un bouton de mise en marche qui permet d'activer le contacteur et un bouton d'arrêt permettant sa désactivation.

Le fonctionnement du prototype repose également sur un système d'auto-maintien du contacteur, largement utilisé dans les installations industrielles. Ce principe permet de maintenir le contacteur alimenté après l'appui sur le bouton de mise en marche, sans avoir besoin de maintenir le bouton enfoncé en permanence.

Lors de l'activation du contacteur, la lampe du prototype s'allume en simulant le fonctionnement d'une machine industrielle. Les sorties auxiliaires du contacteur sont reliées à un module optocoupleur assurant l'isolation électrique avant la transmission des signaux vers l'ESP32. Le microcontrôleur analyse ensuite les états détectés et envoie les informations au serveur backend via le réseau WiFi, permettant leur affichage en temps réel sur le dashboard du jumeau numérique. Cette phase a permis de valider le bon fonctionnement global du système développé.

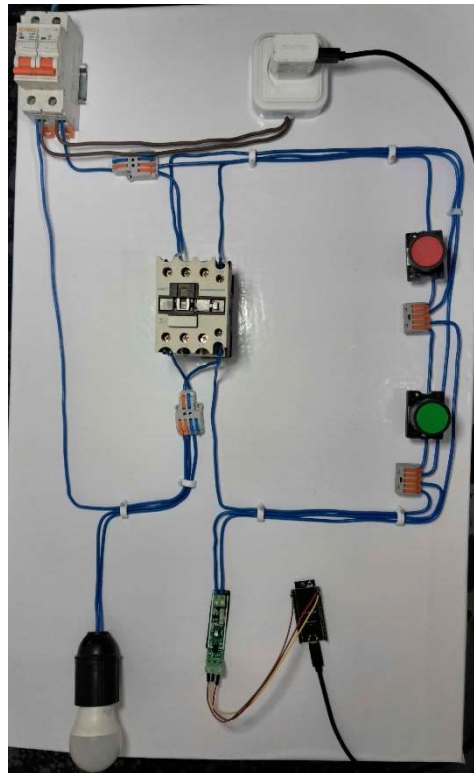


Figure 4.27 – Image du prototype de test

Cette phase de test a permis de valider plusieurs aspects essentiels du système développé, notamment :

- Le bon fonctionnement du contacteur et des commandes marche/arrêt
- La fiabilité de l'isolation électrique (haute et basse tension)
- La lecture correcte des signaux par l'ESP32

- La transmission des données vers le serveur via le WiFi
- La mise à jour temps réel du dashboard

4.6 Perspectives Futures et Améliorations possibles

Bien que le système développé répond aux principaux objectifs fixés dans le cadre de ce projet, plusieurs perspectives d'amélioration et d'évolution peuvent être envisagées afin d'enrichir les fonctionnalités proposées et d'augmenter les capacités du système.

Le système actuel repose principalement sur la détection des états marche/arrêt des machines à travers les contacteurs. Une approche plus avancée pourrait consister à intégrer des capteurs industriels afin de récupérer des informations plus détaillées concernant les équipements, telles que la consommation électrique et plus de données sur la production (nombre de pièces produites, pièces défectueuses, pertes sur la matière première par jour de travail). L'intégration de ces données permettrait d'obtenir un jumeau numérique plus complet et plus représentatif du comportement réel des machines.

Une autre perspective importante, concerne l'intégration l'évolution de l'application web vers un logiciel desktop dédiée. Une telle approche permettrait d'obtenir de meilleure intégration dans les systèmes industriels locaux et d'améliorer les performances globales de l'interface.

Enfin, le projet pourrait être généralisé afin de s'adapter à d'autres environnements industriels et d'autres entreprises. L'architecture développée repose sur des technologies relativement flexibles ce qui facilite son adaptation à différents types d'entreprises industrielles.

Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté les différentes étapes de conception et de réalisation du système de jumeau numérique développé pour la supervision temps réel d'une usine de production de poterie. Nous avons étudié d'abord l'architecture générale du système ainsi que les différentes couches assurant l'acquisition, la transmission, le traitement et la visualisation des données industrielles.

La partie IoT a permis de mettre en place une solution d'acquisition basée sur les contacteurs industriels, les modules optocoupleurs et les microcontrôleurs ESP32 afin de récupérer les états des machines et les transmettre vers le serveur via le réseau WiFi. En

parallèle, une application web interactive intégrant une scène 3D développée avec Three.js a été réalisée afin d'assurer la supervision temps réel des équipements industriels.

Le système développé permet également la consultation des historiques, le suivi des temps de fonctionnement ainsi que la gestion des opérations de maintenance. Enfin, la réalisation d'un prototype expérimental a permis de valider le bon fonctionnement global du système ainsi que la cohérence entre le comportement physique des équipements et leur représentation numérique au sein du jumeau numérique.

Conclusion

Au terme de ce travail, nous avons pu étudier, concevoir et réaliser un système de jumeau numérique appliqué à un environnement industriel réel. Ce projet nous a permis de mieux comprendre les principes fondamentaux des jumeaux numériques ainsi que leur rôle dans la transformation numérique des entreprises industrielles. Il nous a également offert l'opportunité d'explorer plusieurs technologies modernes liées à l'IoT, aux systèmes embarqués, aux applications web et à la visualisation en temps réel.

L'étude théorique menée dans les premiers chapitres a montré que les jumeaux numériques représentent aujourd'hui une technologie essentielle dans le cadre de l'industrie 4.0. Grâce à leur capacité à reproduire virtuellement le comportement des systèmes physiques, ils permettent d'améliorer la supervision des équipements, d'optimiser les opérations de maintenance et de faciliter la prise de décision. Les différents exemples étudiés dans plusieurs secteurs industriels ont démontré l'importance de cette technologie dans l'amélioration des performances et dans la réduction des coûts d'exploitation.

Par ailleurs, l'analyse des solutions existantes nous a permis d'identifier les principales caractéristiques des systèmes de jumeaux numériques actuels, ainsi que certaines limites liées à leur complexité, leur coût ou encore leur niveau d'intégration. Cette étude comparative a constitué une étape importante dans la définition des besoins et dans le choix de l'architecture adoptée pour notre projet.

Dans le cadre pratique, nous avons développé une solution adaptée à l'environnement industriel de l'entreprise Tlemcen Faïence. Le système réalisé repose sur l'acquisition des états des machines industrielles à partir de contacteurs électriques reliés à des modules utilisant le microcontrôleur ESP32. Les données collectées sont ensuite transmises vers une application web permettant la supervision et la visualisation en temps réel des équipements de production.

La réalisation de ce projet nous a également permis de renforcer nos compétences techniques et méthodologiques dans plusieurs domaines. Nous avons notamment acquis une meilleure maîtrise du développement backend et frontend, de la

gestion des bases de données, des systèmes IoT, de la communication réseau ainsi que des outils de modélisation 3D. Ce travail nous a aussi confrontés à différentes contraintes techniques nécessitant des phases d'analyse, de test et de résolution de problèmes, ce qui a constitué une expérience très enrichissante sur le plan professionnel et personnel.

Malgré les résultats satisfaisants obtenus, certaines améliorations peuvent encore être envisagées afin d'enrichir les fonctionnalités du système développé. Parmi les perspectives futures, il serait intéressant d'intégrer davantage de capteurs afin de collecter des données plus détaillées sur les performances des machines, telles que la température, la consommation énergétique ou les vibrations. L'ajout d'algorithmes d'intelligence artificielle et de maintenance prédictive pourrait également permettre d'anticiper les pannes et d'optimiser les interventions techniques. Par ailleurs, le développement d'une application mobile ou l'intégration de tableaux de bord analytiques avancés représenterait une amélioration importante pour les utilisateurs du système.

En définitive, ce projet constitue une contribution à la mise en œuvre des concepts de l'industrie 4.0 au sein de l'entreprise Tlemcen Faïence. Il met en évidence l'importance des jumeaux numériques dans la modernisation des systèmes industriels et démontre qu'il est possible de développer des solutions efficaces et accessibles en combinant les technologies IoT, les applications web et la modélisation numérique. Ce travail ouvre ainsi la voie à de nouvelles perspectives de développement et d'amélioration dans le domaine des systèmes industriels intelligents et connectés.

Bibliographie

- [1] GRIEVES, Michael. *Digital Twin: Manufacturing Excellence through Virtual Factory Replication*. White Paper, 2014.
- [2] GALLAGHER, Noel. *What is a Digital Twin?* IBM. [en ligne]. Disponible sur : <https://www.ibm.com/topics/what-is-a-digital-twin> (consulté le 15 avril 2026).
- [3] NASA. *Apollo Program and Simulation Systems*. [en ligne]. Disponible sur : <https://www.nasa.gov/> (consulté le 15 avril 2026).
- [4] GRIEVES, Michael. *Product Lifecycle Management*. New York : McGraw-Hill, 2005.
- [5] IBM. *Types of Digital Twins*. [en ligne]. Disponible sur : <https://www.ibm.com/topics/what-is-a-digital-twin> (consulté le 15 avril 2026).
- [6] SIEMENS. *Digital Twin Technology*. [en ligne]. Disponible sur : <https://www.siemens.com/> (consulté le 15 avril 2026).
- [7] GENERAL ELECTRIC. *Digital Twin Applications*. [en ligne]. Disponible sur : <https://www.ge.com/digital/> (consulté le 15 avril 2026).
- [8] DELOITTE. *Digital Twin Technologies*. [en ligne]. Disponible sur : <https://www2.deloitte.com/> (consulté le 15 avril 2026).
- [9] IOT INDUSTRIEL. *Digital Twin : Le guide ultime*. [en ligne]. Disponible sur : <https://iotindustriel.com/autres/technologies/digital-twin-le-guide-ultime/> (consulté le 17 mai 2026).
- [10] TAO, Fei ; QI, Qinglin ; LIU, A. ; KUSIAK, Andrew. *Digital Twin Driven Smart Manufacturing*. Academic Press, 2019.
- [11] MANUFACTURING DIGITAL. *Top 10 Manufacturers Using Digital Twins*. [en ligne]. Disponible sur : <https://manufacturingdigital.com/top10/top-10-manufacturers-using-digital-twins> (consulté le 17 mai 2026).
- [12] MEDICAL XPRESS. *Digital Twins Hearts Technology Health*. [en ligne]. Disponible sur : <https://medicalxpress.com/news/2025-01-digital-twins-hearts-technology-health.html> (consulté le 15 mai 2026).
- [13] RESEARCHGATE. *An Example of a Digital Twin of an Urban Transportation System*. [en ligne]. Disponible sur : https://www.researchgate.net/figure/An-example-of-a-digital-twin-of-an-urban-transportation-system-which-can-transcend-some_fig13_364814083 (consulté le 5 mai 2026).
- [14] POWER ELECTRONIC TIPS. *How Can Digital Twins Improve Power and Motion System Performance and Sustainability?* [en ligne]. Disponible sur : <https://www.powerelectrontips.com/how-can-digital-twins-improve-power-and-motion-system-performance-and-sustainability/> (consulté le 5 mai 2026).

- [15] CHINT GLOBAL. *NCI Contactor Series*. [en ligne]. Disponible sur : <https://www.chintglobal.com/global/en/products/low-voltage/iec/industrial-control/nc1.html> (consulté le 20 avril 2026).
- [16] MICROPYTHON. *MicroPython Official Website*. [en ligne]. Disponible sur : <https://micropython.org/> (consulté le 20 avril 2026).
- [17] PALLETS PROJECTS. *Flask Documentation*. [en ligne]. Disponible sur : <https://flask.palletsprojects.com/en/stable/> (consulté le 20 avril 2026).
- [18] FLASK-SOCKETIO. *Flask-SocketIO Documentation*. [en ligne]. Disponible sur : <https://flask-socketio.readthedocs.io/en/latest/> (consulté le 20 avril 2026).
- [19] THREE.JS. *Three.js Documentation*. [en ligne]. Disponible sur : <https://threejs.org/> (consulté le 20 avril 2026).
- [20] JETBRAINS. *PyCharm IDE*. [en ligne]. Disponible sur : <https://www.jetbrains.com/pycharm/> (consulté le 20 avril 2026).
- [21] GRABCAD. *Ball Mill Crusher Machine 3D Model*. [en ligne]. Disponible sur : <https://grabcad.com/library/ball-mill-crusher-machine-1> (consulté le 15 février 2026).
- [22] GRABCAD. *Vibrating Sieve 3D Model*. [en ligne]. Disponible sur : <https://grabcad.com/library/vibrating-sieve--1> (consulté le 15 février 2026).
- [23] GRABCAD. *Filter Press 800x800 3D Model*. [en ligne]. Disponible sur : <https://grabcad.com/library/filter-press-800-x-800-1> (consulté le 15 février 2026).
- [24] PRINTABLES. *Industrial Single Screw Polymer Extruder 3D Model*. [en ligne]. Disponible sur : <https://www.printables.com/model/821996-industrial-single-screw-polymer-extruder> (consulté le 15 février 2026).
- [25] PTC INC. *ThingWorx Industrial IoT Platform*. [en ligne]. Disponible sur : <https://www.ptc.com/en/products/thingworx> (consulté le 05 juin 2026).
- [26] ANSYS INC. *Ansys Twin Builder – Digital Twin Software*. [en ligne]. Disponible sur : <https://www.ansys.com/products/digital-twin/ansys-twin-builder> (consulté le 05 juin 2026).
- [27] TAO, Fei ; ZHANG, He ; LIU, Ang ; NEE, Andrew Y. C. Digital Twin in Industry: State-of-the-Art. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, 2019, vol. 15, n° 4, p. 2405–2415.
- [28] LIU, Mengnan ; FANG, Shuilong ; DONG, Huiyue ; XU, Cunzhi. Review of Digital Twin about Concepts, Technologies, and Industrial Applications. *Journal of Manufacturing Systems*, 2021, vol. 58, p. 346–361.