

CAHIER DES CHARGES

Projet de fin d'études

Jumeau numérique d'une plateforme
de production éducative

Étudiants :

Paul Roost
Axelle Destombes
Alexis Bruneteau

Encadrant :

Bruno CHAVAGNEUX
Responsable plateforme pour DIWII

09/09/2025

1. Table des matières

Table des matières

1.	Table des matières	2
2.	Introduction	4
2.1.	Contexte du projet	4
2.2.	Problématique	4
2.3.	Objectifs généraux	4
3.	Analyse de l'existant	4
3.1.	État de l'art	4
3.1.1.	Jumeaux numériques industriels	4
3.1.2.	Plateformes éducatives industrielles	5
3.1.3.	Technologies de simulation 3D industrielle	5
3.1.4.	Extraction et analyse de données industrielles	5
3.1.5.	Limitations identifiées	5
3.2.	Analyse critique	6
3.2.1.	Forces des solutions existantes	6
3.2.2.	Faiblesses et lacunes identifiées	6
3.2.3.	Opportunités d'amélioration	7
3.3.	Positionnement du projet	7
3.3.1.	Valeur ajoutée distinctive	7
3.3.2.	Différenciation par rapport à l'existant	7
3.3.3.	Apports innovants	7
3.3.4.	Impact attendu	8
4.	Spécifications fonctionnelles	8
4.1.	Fonctionnalités principales	8
4.2.	Cas d'utilisation	10
4.2.1.	Acteurs du système	10
4.2.2.	Cas d'utilisation principaux	10
4.2.3.	Cas d'utilisation secondaires	11
4.3.	Interface utilisateur	12
4.3.1.	Principes de conception	12
4.3.2.	Interfaces principales	12
4.3.3.	Exigences ergonomiques	13
4.3.4.	Exigences techniques UI/UX	13
4.3.5.	Maquettes et prototypes	14
5.	Spécifications techniques	14
5.1.	Architecture système	14
5.2.	Technologies envisagées	15
5.3.	Contraintes techniques	15
5.4.	Intégrations	15
5.4.1.	Intégration avec la plateforme physique DIWII	15
5.4.2.	Intégration avec les systèmes éducatifs	16

5.4.3. Intégrations techniques	16
5.4.4. Intégrations futures (perspective téléopération)	16
5.4.5. Contraintes d'intégration	17
6. Contraintes et exigences	17
6.1. Contraintes temporelles	17
6.1.1. Jalons importants	17
6.1.2. Planning détaillé par phase	18
6.1.3. Contraintes critiques	18
6.1.4. Stratégies d'atténuation des risques	19
6.2. Contraintes budgétaires	19
6.3. Contraintes réglementaires	19
6.4. Contraintes de sécurité	19
7. Livrables	20
7.1. Livrables techniques	20
7.2. Livrables académiques	20
7.3. Critères de qualité	20
8. Planification	20
8.1. Méthodologie	20
8.2. Planning prévisionnel	21
8.3. Risques identifiés	21
9. Critères de réussite	21
9.1. Critères techniques	21
9.2. Critères académiques	22
10. Conclusion	22
11. Annexes	22
11.1. Annexe A : Glossaire	22
11.2. Annexe B : Références	22
11.3. Annexe C : Maquettes	22

2. Introduction

2.1. Contexte du projet

Dans le cadre de l'industrie 4.0, les plateformes de production éducatives jouent un rôle crucial dans la formation des futurs ingénieurs et techniciens. Ces plateformes permettent d'enseigner les concepts de l'automatisation, de l'IoT et des systèmes cyber-physiques. Le développement d'un jumeau numérique de ces plateformes éducatives ouvre de nouvelles possibilités pédagogiques : simulation en temps réel, expérimentation sans risque, et formation à distance.

2.2. Problématique

Les plateformes de production éducatives actuelles présentent plusieurs limitations :

- Accès limité aux équipements physiques pour tous les étudiants
- Difficultés d'extraction et de standardisation des données des capteurs industriels
- Manque d'outils d'analyse temps réel pour l'apprentissage
- Absence de visualisation 3D pour comprendre les processus complexes
- Besoin d'agrégation de données pour une vue d'ensemble pédagogique
- Préparation insuffisante aux enjeux de la téléopération industrielle

2.3. Objectifs généraux

- Créer un jumeau numérique fidèle de la plateforme de production éducative
- Développer un système d'extraction de données capteurs en temps réel
- Implémenter une analyse temps réel pour l'amélioration des KPI
- Construire un environnement de simulation 3D interactif
- Préparer l'infrastructure pour la téléopération future

3. Analyse de l'existant

3.1. État de l'art

3.1.1. Jumeaux numériques industriels

Les jumeaux numériques représentent une évolution majeure dans l'industrie 4.0. Selon Gartner, un jumeau numérique est « une représentation numérique d'une entité ou d'un système du monde réel ». Les principales entreprises comme Siemens avec leur plateforme MindSphere, General Electric avec Predix, ou encore PTC avec ThingWorx, proposent des solutions de jumeaux numériques pour l'industrie.

Siemens Digital Twin : Intègre la conception CAO, la simulation et les données IoT pour créer des modèles prédictifs. Utilisé dans l'automobile et l'aéronautique.

Azure Digital Twins (Microsoft) : Plateforme cloud permettant de créer des graphiques de connaissances d'environnements physiques entiers.

ANSYS Twin Builder : Spécialisé dans la simulation multi-physique temps réel pour les systèmes complexes.

3.1.2. Plateformes éducatives industrielles

Festo Didactic : Leader mondial des plateformes de formation industrielle avec des systèmes comme CP Factory et MPS (Modular Production System). Leurs solutions intègrent des technologies Industry 4.0 mais manquent de capacités de jumeau numérique avancées.

Schneider Electric EcoStruxure : Propose des solutions IoT industrielles avec des capacités d'analyse mais principalement orientées production réelle.

Rockwell Automation Connected Components Workbench : Environnement de développement pour l'automatisation mais limité en termes de simulation 3D immersive.

3.1.3. Technologies de simulation 3D industrielle

Unity Reflect : Plateforme de réalité mixte pour l'industrie permettant la visualisation 3D de données BIM et CAO.

Unreal Engine pour l'industrie : Utilisé par BMW, Audi pour la visualisation de chaînes de production et la formation.

NVIDIA Omniverse : Plateforme de collaboration 3D temps réel intégrant simulation physique et rendu photoréaliste.

3.1.4. Extraction et analyse de données industrielles

OPC UA (Open Platform Communications Unified Architecture) : Standard industriel pour l'interopérabilité machine-to-machine, adopté par la majorité des équipementiers.

MQTT et Apache Kafka : Protocoles de messagerie temps réel largement utilisés pour l'IoT industriel.

InfluxDB et TimescaleDB : Bases de données temporelles optimisées pour les données de capteurs industriels.

Grafana et Kibana : Solutions de visualisation temps réel des données industrielles.

3.1.5. Limitations identifiées

Bien que ces technologies soient matures individuellement, leur intégration dans un contexte éducatif présente des défis :

- Coût élevé des solutions commerciales pour l'éducation
- Complexité d'intégration entre les différentes briques technologiques
- Manque de solutions spécifiquement conçues pour l'apprentissage

- Absence de scénarios pédagogiques intégrés dans les jumeaux numériques
- Difficultés d'accès aux données en temps réel sur les plateformes éducatives existantes

3.2. Analyse critique

3.2.1. Forces des solutions existantes

Solutions industrielles matures :

- Technologies éprouvées en environnement industriel réel
- Standards ouverts bien établis (OPC UA, MQTT)
- Écosystèmes riches avec de nombreux fournisseurs
- Capacités de traitement temps réel démontrées à grande échelle

Plateformes éducatives robustes :

- Matériel pédagogique de qualité industrielle (Festo, Schneider)
- Programmes de formation structurés et validés
- Support technique et documentation extensive
- Intégration avec les cursus de formation technique

Outils de simulation avancés :

- Moteurs 3D performants (Unity, Unreal Engine)
- Capacités de rendu photoréaliste
- Support VR/AR pour l'immersion
- Interfaces utilisateur sophistiquées

3.2.2. Faiblesses et lacunes identifiées

Coût et accessibilité :

- Solutions commerciales prohibitives pour les établissements d'enseignement
- Licensing complexe et frais de maintenance élevés
- Formation requise pour les enseignants sur des outils propriétaires
- Dépendance vis-à-vis de fournisseurs spécifiques

Intégration et interopérabilité :

- Silos technologiques entre les différentes briques
- Protocoles de communication non standardisés entre certains équipements
- Complexité d'intégration des données hétérogènes
- Absence d'API unifiées pour l'accès aux données

Adaptation pédagogique :

- Solutions conçues pour la production, pas pour l'apprentissage
- Manque de scénarios pédagogiques progressifs
- Absence d'outils d'évaluation intégrés
- Interface souvent trop complexe pour des étudiants débutants

Limitations techniques spécifiques :

- Latence élevée dans certaines solutions cloud
- Scalabilité limitée pour des sessions multi-utilisateurs
- Capacités de simulation temps réel insuffisantes

- Manque de flexibilité pour des configurations personnalisées

3.2.3. Opportunités d'amélioration

- Développement de solutions open-source adaptées à l'éducation
- Intégration native de fonctionnalités pédagogiques
- Optimisation pour des environnements multi-utilisateurs
- Réduction des coûts par une approche modulaire et évolutive

3.3. Positionnement du projet

3.3.1. Valeur ajoutée distinctive

Notre projet se positionne comme une solution innovante qui comble les lacunes identifiées dans l'état de l'art, en proposant un jumeau numérique spécifiquement conçu pour l'enseignement industriel.

3.3.2. Différenciation par rapport à l'existant

Approche pédagogique intégrée :

- Conception centrée sur l'apprentissage plutôt que sur la production
- Scénarios pédagogiques progressifs intégrés dans la plateforme
- Interface adaptée aux différents niveaux d'expertise des étudiants
- Outils d'évaluation et de suivi de progression des apprentissages

Architecture ouverte et modulaire :

- Utilisation de technologies open-source pour réduire les coûts
- Architecture microservices permettant une évolutivité flexible
- Standards ouverts pour garantir l'interopérabilité
- Capacité d'intégration avec les équipements existants de l'établissement

Innovation technique :

- Synchronisation temps réel entre le jumeau numérique et la plateforme physique
- Analyse prédictive des données pour l'optimisation pédagogique
- Interface 3D immersive optimisée pour l'apprentissage collaboratif
- Système d'extraction de données unifié et standardisé

Optimisation pour l'éducation :

- Support multi-utilisateurs pour les travaux pratiques en groupe
- Gestion des sessions d'apprentissage avec sauvegarde d'état
- Bibliothèque de cas d'usage pédagogiques préétablis
- Documentation et tutoriels intégrés

3.3.3. Apports innovants

Convergence technologique : Le projet fait converger pour la première fois les technologies de jumeau numérique, l'IoT industriel, et la pédagogie interactive dans une solution unifiée et accessible.

Démocratisation de l'industrie 4.0 : En rendant ces technologies accessibles dans un contexte éducatif, le projet contribue à former la nouvelle génération d'ingénieurs aux enjeux de l'industrie 4.0.

Approche expérimentale sécurisée : Le jumeau numérique permet aux étudiants d'expérimenter sans risque sur des scénarios complexes ou dangereux, impossible à reproduire sur la plateforme physique.

Préparation à la téléopération : Le projet pose les bases technologiques pour l'évolution future vers la téléopération industrielle, préparant les étudiants aux métiers de demain.

3.3.4. Impact attendu

- Amélioration de la qualité de l'apprentissage par la simulation interactive
- Réduction des coûts de formation par la mutualisation des ressources
- Accessibilité élargie aux technologies industrielles avancées
- Contribution à la recherche en pédagogie numérique industrielle

4. Spécifications fonctionnelles

4.1. Fonctionnalités principales

Fonctionnalité 1 : Extraction de données capteurs

Description : Système d'extraction et de standardisation des données provenant des capteurs de la plateforme physique (température, pression, position, vitesse, etc.) via les systèmes de contrôle existants.

Critères d'acceptation :

- Connexion aux systèmes de contrôle de la plateforme DIWII
- Extraction temps réel des données capteurs
- Formatage standard des données (JSON, OPC UA, ou protocole spécifique)
- Gestion des erreurs de communication
- Log des données pour traçabilité

Priorité : Haute

Fonctionnalité 2 : Analyse temps réel et KPI

Description : Module d'analyse des données en temps réel pour calculer et améliorer les indicateurs de performance clés (KPI) de la chaîne de production.

Critères d'acceptation :

- Calcul automatique des KPI (efficacité, disponibilité, qualité)
- Détection d'anomalies en temps réel
- Alertes configurables
- Dashboard de visualisation
- Historique des performances

Priorité : Haute

Fonctionnalité 3 : Environnement de simulation 3D

Description : Jumeau numérique 3D de la plateforme de production permettant la visualisation, la simulation et les tests sans impact sur le système physique.

Critères d'acceptation :

- Modélisation 3D fidèle de la plateforme physique
- Synchronisation avec les données réelles
- Interface utilisateur intuitive
- Simulation de scénarios de test
- Exportation de résultats

Priorité : Moyenne

Fonctionnalité 4 : Agrégation et vue globale

Description : Système d'agrégation des données provenant de multiple sources pour fournir une vue d'ensemble complète de la chaîne de production.

Critères d'acceptation :

- Collecte de données multi-sources
- Base de données temporelle
- API de requête de données
- Rapports automatisés
- Interface de visualisation globale

Priorité : Moyenne

Fonctionnalité 5 : Infrastructure téléopération

Description : Préparation de l'architecture système pour permettre la téléopération future de la plateforme (contrôle à distance, maintenance prédictive).

Critères d'acceptation :

- Architecture modulaire et extensible
- Protocoles de communication sécurisés
- Interface de contrôle à distance (prototype)
- Documentation d'intégration
- Tests de latence et fiabilité

Priorité : Basse (Perspective future)

4.2. Cas d'utilisation

4.2.1. Acteurs du système

Étudiant : Utilisateur principal qui interagit avec le jumeau numérique pour apprendre les concepts de l'industrie 4.0.

Enseignant : Supervise les sessions d'apprentissage, configure les scénarios pédagogiques et évalue les performances.

Administrateur technique : Gère la configuration du système, maintient la connexion avec la plateforme physique.

Plateforme physique : Système automatisé réel qui fournit les données capteurs en temps réel.

4.2.2. Cas d'utilisation principaux

CU1 : Supervision temps réel de la production

- **Acteur principal :** Étudiant
- **Objectif :** Observer et analyser le fonctionnement de la chaîne de production
- **Préconditions :** Plateforme physique en fonctionnement, connexion établie
- **Scénario nominal :**
 1. L'étudiant se connecte au jumeau numérique
 2. Il visualise la représentation 3D de la plateforme
 3. Il observe les données capteurs en temps réel
 4. Il analyse les KPI affichés sur le dashboard
 5. Il identifie les anomalies ou optimisations possibles
- **Extensions :** Simulation de pannes, modification de paramètres

CU2 : Simulation de scénarios pédagogiques

- **Acteur principal :** Étudiant
- **Acteur secondaire :** Enseignant
- **Objectif :** Expérimenter différents scénarios sans impact sur la production réelle
- **Préconditions :** Scénarios pré-configurés par l'enseignant

- **Scénario nominal :**
 1. L'enseignant sélectionne un scénario pédagogique
 2. L'étudiant lance la simulation
 3. Il observe l'évolution des paramètres
 4. Il prend des décisions d'optimisation
 5. Il analyse les résultats obtenus
- **Extensions :** Travail collaboratif, comparaison de stratégies

CU3 : Analyse historique des données

- **Acteur principal :** Étudiant
- **Objectif :** Analyser les tendances et performances passées
- **Préconditions :** Données historiques disponibles
- **Scénario nominal :**
 1. L'étudiant accède à l'interface d'analyse
 2. Il sélectionne une période d'analyse
 3. Il choisit les métriques à étudier
 4. Il génère des graphiques et rapports
 5. Il identifie des patterns et corrélations
- **Extensions :** Export de données, création de rapports personnalisés

CU4 : Configuration de scénarios pédagogiques

- **Acteur principal :** Enseignant
- **Objectif :** Créer des exercices adaptés aux objectifs pédagogiques
- **Préconditions :** Droits d'administration accordés
- **Scénario nominal :**
 1. L'enseignant accède au module de configuration
 2. Il définit les paramètres du scénario
 3. Il configure les objectifs d'apprentissage
 4. Il teste le scénario en simulation
 5. Il valide et publie pour les étudiants
- **Extensions :** Duplication de scénarios, partage entre enseignants

CU5 : Maintenance prédictive

- **Acteur principal :** Administrateur technique
- **Objectif :** Anticiper les besoins de maintenance de la plateforme
- **Préconditions :** Modèles prédictifs configurés
- **Scénario nominal :**
 1. Le système analyse les données capteurs
 2. Il détecte des anomalies de fonctionnement
 3. Il génère des alertes de maintenance
 4. L'administrateur planifie les interventions
 5. Il documente les actions correctives
- **Extensions :** Maintenance automatisée, historique des interventions

4.2.3. Cas d'utilisation secondaires

CU6 : Formation à la téléopération

- Simulation de contrôle à distance

- Formation aux protocoles de sécurité
- Gestion de la latence réseau

CU7 : Évaluation des compétences

- Tests pratiques automatisés
- Mesure des performances étudiantes
- Génération de certificats de compétences

CU8 : Collaboration multi-sites

- Sessions partagées entre établissements
- Échange de bonnes pratiques
- Projets collaboratifs inter-écoles

4.3. Interface utilisateur

4.3.1. Principes de conception

Approche centrée utilisateur :

- Interface intuitive adaptée aux différents niveaux d'expertise
- Navigation claire et cohérente entre les modules
- Feedback visuel immédiat pour toutes les interactions
- Accessibilité pour les utilisateurs en situation de handicap

Design responsive :

- Adaptation automatique aux différentes tailles d'écran
- Support tablettes et écrans tactiles industriels
- Optimisation pour les sessions multi-utilisateurs
- Interface scalable selon le nombre de participants

4.3.2. Interfaces principales

Dashboard principal :

- Vue d'ensemble temps réel de la plateforme de production
- Indicateurs KPI avec alertes visuelles (vert/orange/rouge)
- Graphiques interactifs des données capteurs
- Timeline des événements et anomalies
- Menu de navigation vers les modules spécialisés

Environnement de simulation 3D :

- Représentation 3D photoréaliste de la plateforme physique
- Contrôles de caméra intuitifs (zoom, rotation, panoramique)
- Annotations contextuelles sur les équipements
- Overlay d'informations temps réel sur les éléments 3D
- Mode immersif plein écran pour la présentation

Interface d'analyse :

- Outils de requête graphique pour l'exploration des données
- Générateur de graphiques drag-and-drop
- Tableau de bord personnalisable par l'utilisateur

- Export facile vers formats standards (PDF, Excel, CSV)
- Système de favoris pour les analyses récurrentes

Module de configuration pédagogique :

- Assistant de création de scénarios guidé par étapes
- Bibliothèque de templates pré-configurés
- Preview temps réel des modifications
- Système de versioning des scénarios
- Interface de test et validation

4.3.3. Exigences ergonomiques

Navigation et organisation :

- Menu principal persistant avec icônes explicites
- Fil d'Ariane pour situer l'utilisateur dans l'arborescence
- Raccourcis clavier pour les actions fréquentes
- Système d'onglets pour le multitâche
- Recherche globale intelligente

Visualisation des données :

- Choix de thèmes visuels (clair/sombre/contraste élevé)
- Codage couleur cohérent selon les standards industriels
- Graphiques interactifs avec zoom et filtrage
- Animation fluide des transitions d'état
- Gestion intelligente de la densité d'information

Collaboration et communication :

- Système de chat intégré pour les sessions de groupe
- Partage d'écran pour les démonstrations
- Annotations collaboratives sur les vues 3D
- Système de notifications non-intrusives
- Historique des actions utilisateur pour le débogage

4.3.4. Exigences techniques UI/UX

Performance :

- Temps de réponse < 100ms pour les interactions critiques
- Chargement progressif des éléments 3D complexes
- Mise en cache intelligente des ressources fréquentes
- Optimisation pour les connexions réseau variables

Compatibilité :

- Support navigateurs modernes (Chrome, Firefox, Edge, Safari)
- Progressive Web App pour installation native
- API responsive pour intégration dans des LMS existants
- Support WebGL 2.0 pour le rendu 3D accéléré

Sécurité et authentification :

- Connexion SSO avec les systèmes éducatifs existants
- Gestion des rôles et permissions granulaire

- Session timeout configurable
- Audit trail des actions sensibles

Accessibilité :

- Conformité WCAG 2.1 niveau AA
- Support lecteurs d'écran
- Navigation clavier complète
- Contraste suffisant pour la malvoyance
- Sous-titres pour les contenus audiovisuels

4.3.5. Maquettes et prototypes

Les maquettes détaillées seront développées en Phase 1 du projet, incluant :

- Wireframes basse fidélité pour la validation des concepts
- Prototypes interactifs pour les tests utilisateur
- Design system complet avec composants réutilisables
- Guide de style pour assurer la cohérence visuelle

5. Spécifications techniques

5.1. Architecture système

L'architecture proposée suit un modèle en couches :

Couche Physique :

- Plateforme de production éducative avec capteurs et actionneurs
- Systèmes de contrôle (PLCs, contrôleurs industriels)
- Réseau industriel (Ethernet/IP, Profinet)

Couche Communication :

- Gateway OPC UA pour standardisation des protocoles
- Collecteur de données temps réel
- File d'attente de messages (MQTT/Redis)

Couche Traitement :

- Service d'agrégation et normalisation des données
- Moteur d'analyse temps réel et calcul des KPI
- Base de données temporelle pour l'historisation

Couche Application :

- API REST pour l'accès aux données
- Moteur de simulation 3D (jumeau numérique)
- Interface web pour visualisation et contrôle

Couche Présentation :

- Dashboard web interactif
- Interface de simulation 3D
- Application mobile (optionnel)

5.2. Technologies envisagées

- **Langages de programmation** : Python (backend), JavaScript/TypeScript (frontend), C++ (simulation temps réel)
- **Frameworks** :
 - Backend : FastAPI, Flask, ou Django
 - Frontend : React.js ou Vue.js pour les dashboards
 - Simulation 3D : Unity 3D, Unreal Engine, ou Three.js
 - Communication : OPC UA, MQTT, WebSocket
- **Base de données** :
 - Temporelle : InfluxDB ou TimescaleDB
 - Relationnelle : PostgreSQL
 - Cache : Redis
- **Outils de développement** : Docker, Git, CI/CD (GitLab/GitHub Actions)
- **Protocoles de communication** : OPC UA, Modbus TCP, Ethernet/IP
- **Formats d'échange** : JSON, XML, Protocol Buffers

5.3. Contraintes techniques

- Performance : Latence < 100ms pour l'analyse temps réel, support de 1000+ points de données/seconde
- Scalabilité : Architecture microservices, support multi-utilisateurs (50+ utilisateurs simultanés)
- Sécurité : Authentification robuste, chiffrement des communications, isolation réseau
- Compatibilité : Navigateurs modernes, Windows/Linux, intégration avec systèmes industriels existants

5.4. Intégrations

5.4.1. Intégration avec la plateforme physique DIWII

Systèmes de contrôle industriel :

- Connexion aux automates programmables (PLCs) via protocoles industriels
- Interface avec les systèmes SCADA existants
- Intégration des capteurs IoT (température, pression, position, vitesse)
- Synchronisation avec les actionneurs et variateurs de vitesse

Protocoles de communication :

- OPC UA pour l'interopérabilité standardisée
- Modbus TCP/IP pour les équipements legacy
- Ethernet/IP pour les composants Rockwell/Allen-Bradley
- MQTT pour les capteurs IoT et la telemetrie

Collecte de données temps réel :

- Gateway industriel pour l'agrégation des protocoles
- Buffering local en cas de déconnexion réseau
- Horodatage précis des événements (< 1ms)

- Gestion des erreurs de communication et reconnexion automatique

5.4.2. Intégration avec les systèmes éducatifs

Learning Management System (LMS) :

- Authentification SSO avec les comptes étudiants existants
- Export automatique des résultats vers Moodle/Canvas
- Intégration dans les parcours pédagogiques
- Suivi des progressions et évaluations

Systèmes d'information de l'établissement :

- Synchronisation avec l'annuaire LDAP/Active Directory
- Gestion des groupes et classes
- Planning des sessions de travaux pratiques
- Rapports d'utilisation pour l'administration

Outils collaboratifs :

- Intégration Microsoft Teams/Discord pour la communication
- Partage de documents via SharePoint/Google Drive
- Visioconférence intégrée pour le support à distance
- Système de notifications vers les applications mobiles

5.4.3. Intégrations techniques

Infrastructure cloud :

- Déploiement sur AWS/Azure/Google Cloud Platform
- Intégration avec les services de base de données managés
- Utilisation des services de machine learning cloud
- CDN pour la distribution des contenus 3D statiques

Outils de développement :

- Intégration continue avec GitLab CI/CD
- Monitoring avec Prometheus/Grafana
- Logging centralisé avec ELK Stack
- Tests automatisés avec Jenkins/GitHub Actions

APIs et microservices :

- API REST standardisée OpenAPI 3.0
- Message broker (RabbitMQ/Apache Kafka)
- Service discovery et load balancing
- Gateway API pour la sécurité et le routage

5.4.4. Intégrations futures (perspective téléopération)

Systèmes de contrôle avancés :

- Interface avec systèmes de vision industrielle
- Intégration robotique collaborative (cobots)
- Systèmes de réalité augmentée pour la maintenance
- Jumeaux numériques de niveau entreprise (PLM/ERP)

Technologies émergentes :

- Edge computing pour le traitement local
- 5G pour la communication ultra-faible latence
- Blockchain pour la traçabilité des données
- Intelligence artificielle pour l'optimisation autonome

5.4.5. Contraintes d'intégration

Sécurité industrielle :

- Isolation réseau entre environnement pédagogique et production
- Chiffrement end-to-end des communications critiques
- Audit trail de toutes les interactions système
- Compliance avec les standards IEC 62443

Performance et fiabilité :

- Tolérance aux pannes avec basculement automatique
- Synchronisation de données en mode dégradé
- Gestion des pics de charge lors des sessions étudiantes
- SLA de disponibilité 99.5% sur les heures de cours

Maintenance et évolutivité :

- Versioning des APIs pour la compatibilité ascendante
- Documentation technique automatisée
- Tests d'intégration automatisés
- Procédures de rollback en cas de problème

6. Contraintes et exigences

6.1. Contraintes temporelles

- **Durée du projet :** 5 mois (Septembre 2025 - Janvier 2026)
- **Date de début :** 9 septembre 2025
- **Date de fin :** 31 janvier 2026
- **Soutenance prévue :** Fin janvier 2026

6.1.1. Jalons importants

Jalon 1 : 15 octobre 2025 - Analyse et conception terminées

- Spécifications techniques détaillées validées
- Architecture système finalisée
- Maquettes d'interface validées par l'encadrant
- Environnement de développement configuré
- Première connexion à la plateforme DIWII établie

Jalon 2 : 30 novembre 2025 - MVP (Minimum Viable Product) fonctionnel

- Extraction de données capteurs opérationnelle
- Interface web de base déployée

- Visualisation 3D basique de la plateforme
- Premières métriques KPI calculées
- Tests d'intégration réussis

Jalon 3 : 20 décembre 2025 - Version bêta complète

- Toutes les fonctionnalités principales implémentées
- Interface utilisateur finalisée et testée
- Système d'analyse temps réel opérationnel
- Documentation technique rédigée
- Tests de charge et de performance validés

Jalon 4 : 15 janvier 2026 - Finalisation et documentation

- Correction des bugs critiques
- Documentation utilisateur complète
- Mémoire de fin d'études finalisé
- Préparation de la présentation de soutenance
- Déploiement de la version finale

6.1.2. Planning détaillé par phase

Phase 1 : Analyse et conception (6 semaines - Sept-Oct 2025)

- Semaine 1-2 : Étude approfondie de la plateforme DIWII
- Semaine 3-4 : Conception de l'architecture technique
- Semaine 5-6 : Spécifications détaillées et validation

Phase 2 : Développement core (8 semaines - Oct-Déc 2025)

- Semaine 7-8 : Infrastructure de base et connexions
- Semaine 9-10 : Module d'extraction de données
- Semaine 11-12 : Interface web et visualisation
- Semaine 13-14 : Système d'analyse et KPI

Phase 3 : Intégration et tests (4 semaines - Déc 2025-Jan 2026)

- Semaine 15-16 : Tests d'intégration et optimisation
- Semaine 17-18 : Tests utilisateur et corrections

Phase 4 : Finalisation (2 semaines - Jan 2026)

- Semaine 19 : Documentation et mémoire
- Semaine 20 : Préparation soutenance

6.1.3. Contraintes critiques

Disponibilité de la plateforme DIWII :

- Accès garanti pendant les heures ouvrables
- Fenêtres de maintenance programmées
- Coordination avec les autres utilisateurs de la plateforme

Ressources humaines :

- Disponibilité de l'équipe de 3 étudiants
- Support technique de l'encadrant
- Accès aux experts techniques de DIWII

Contraintes académiques :

- Respect du calendrier de remise du mémoire
- Coordination avec les autres projets étudiants
- Disponibilité des salles et équipements

Risques temporels identifiés :

- Complexité technique sous-estimée (probabilité moyenne)
- Problèmes d'accès à la plateforme physique (probabilité faible)
- Difficultés d'intégration des technologies (probabilité moyenne)
- Surcharge de travail en fin de période (probabilité élevée)

6.1.4. Stratégies d'atténuation des risques

Approche itérative :

- Développement par sprints de 2 semaines
- Validation continue avec l'encadrant
- Tests précoces et fréquents

Plan de contingence :

- Priorisation des fonctionnalités essentielles
- Solutions de fallback pour chaque composant critique
- Flexibilité dans le scope selon l'avancement

Gestion de projet :

- Réunions hebdomadaires de suivi
- Tracking quotidien de l'avancement
- Communication proactive sur les blocages

6.2. Contraintes budgétaires

Pas de budget alloué pour ce projet étudiant. Toutes les ressources utilisées sont gratuites ou déjà disponibles via l'établissement ou DIWII.

6.3. Contraintes réglementaires

Aucune contrainte réglementaire spécifique pour ce projet. Le développement et l'expérimentation se font dans le cadre académique et pédagogique.

6.4. Contraintes de sécurité

Aucune contrainte de sécurité particulière au-delà des bonnes pratiques standards (gestion des accès, confidentialité des données pédagogiques, respect de la vie privée des utilisateurs).

7. Livrables

7.1. Livrables techniques

- ☐ Code source documenté
- ☐ Documentation technique
- ☐ Guide d'installation
- ☐ Tests unitaires et d'intégration
- ☐ Documentation utilisateur

7.2. Livrables académiques

- ☐ Mémoire de fin d'études
- ☐ Présentation de soutenance
- ☐ Poster de présentation (si requis)

7.3. Critères de qualité

Les livrables seront évalués selon les critères suivants :

- Fonctionnalités principales opérationnelles et conformes au cahier des charges
- Documentation technique et utilisateur complète
- Qualité du code (clarté, modularité, commentaires)
- Couverture des tests (unitaires et d'intégration)
- Respect des délais et jalons
- Facilité d'utilisation et ergonomie de l'interface
- Respect des standards académiques pour le mémoire

8. Planification

8.1. Méthodologie

Nous adopterons une méthodologie de développement **Agile** adaptée au contexte académique :

Approche itérative :

- Sprints de 2 semaines avec livrables fonctionnels
- Validation continue avec l'encadrant à chaque sprint
- Adaptation du scope selon les retours et contraintes

Gestion de projet collaborative :

- Répartition des tâches selon les compétences de chaque étudiant
- Réunions hebdomadaires de synchronisation de l'équipe
- Suivi d'avancement avec outils de gestion de projet (Trello/Jira)

Assurance qualité :

- Tests continus et intégration automatisée
- Reviews de code entre membres de l'équipe
- Documentation incrémentale au fil du développement

Communication :

- Points réguliers avec l'encadrant Bruno CHAVAGNEUX
- Démonstrations fonctionnelles à chaque jalon majeur
- Retours utilisateur via tests avec d'autres étudiants

8.2. Planning prévisionnel

Phase	Tâches	Durée	Échéance
Phase 1	Analyse et conception	6 semaines	15 octobre 2025
Phase 2	Développement core	8 semaines	30 novembre 2025
Phase 3	Intégration et tests	4 semaines	20 décembre 2025
Phase 4	Finalisation et documentation	2 semaines	15 janvier 2026

8.3. Risques identifiés

Risque	Probabilité	Impact	Mitigation
Complexité technique sous-estimée	Moyenne	Retard dans le planning	Décomposition en tâches plus petites
Indisponibilité des ressources	Faible	Blocage temporaire	Identification d'alternatives
Changement des exigences	Faible	Refonte partielle	Communication régulière avec l'encadrant

9. Critères de réussite

9.1. Critères techniques

- [] Toutes les fonctionnalités principales implémentées
- [] Performance conforme aux spécifications
- [] Tests couvrant au moins 80% du code
- [] Aucun bug critique en production

9.2. Critères académiques

- [] Mémoire respectant les standards académiques
- [] Démonstration fonctionnelle lors de la soutenance
- [] Respect des délais de livraison
- [] Innovation et originalité de l'approche

10. Conclusion

Ce cahier des charges définit les objectifs, les spécifications et le cadre de réalisation du jumeau numérique pour la plateforme DIWII. Ce projet vise à offrir une solution pédagogique innovante, accessible et adaptée à l'enseignement de l'industrie 4.0. L'intégration de technologies avancées, la modularité et l'approche centrée utilisateur permettront de répondre aux besoins des étudiants et enseignants tout en préparant l'avenir de la formation industrielle. Le respect des jalons et la validation continue garantiront la qualité et la pertinence des livrables.

11. Annexes

11.1. Annexe A : Glossaire

Liste des principaux termes techniques utilisés dans le projet (IoT, jumeau numérique, OPC UA, KPI, etc.)

11.2. Annexe B : Références

Articles, sites web, documentations et ouvrages utilisés pour l'état de l'art et la conception du projet.

11.3. Annexe C : Maquettes

Maquettes d'interface utilisateur réalisées lors de la phase de conception (wireframes, prototypes interactifs, etc.)