REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE

UNIVERSITE YAHIA FARES DE MEDEA

Faculté de Technologie

Mémoire de fin d'études de Master

Filière : Génie Civil

Spécialité : Matériaux en Génie Civil

Optimisation de la Gestion de Chantier dans le secteur du BTP en Algérie : Conception et Développement de la Plateforme ConstructPro

---

Présenté par

BENMAHIEDDINE Houssem

FERDI Aymen Abderrahmane

Proposé et Dirigé par

DR. HERIHIRI Ouided

Promotion Juin 2025

ملخص

يتناول هذا البحث موضوع تحسين إدارة مواقع البناء في الجزائر: تصميم وتطوير منصة "كونستركت برو ". (ConstructPro)تمثل هذه المنصة الرقمية حلاً متكاملاً ومرناً يلبي خصوصيات قطاع البناء الجزائري، حيث تجمع بين إدارة الموارد المالية والبشرية، وتتبع المواد، وضبط الجودة، وسوق عمل مخصص للعمال والمخابر. يستعرض العمل التحديات الرئيسية للقطاع، ويحلل البنية التقنية والوظيفية للمنصة، ويقيّم أثرها عبر دراسة حالة محاكاة لمشروع بناء فعلي. أظهرت النتائج تحسناً ملحوظاً في الإنتاجية، وتتبع العمليات، وضبط التكاليف، مما يبرز دور الرقمنة في تحديث القطاع وتعزيز أداء وشفافية المشاريع في الجزائر.

الكلمات المفتاحية :إدارة مواقع البناء، الرقمنة، كونستركت برو، منصة تعاونية، الإنتاجية، التتبع، التكلفة، التحول الرقمي .

--

Résumé

Ce mémoire porte sur l'optimisation de la Gestion de Chantier dans le secteur du BTP en Algérie : Conception et Développement de la Plateforme ConstructPro. Cette solution digitale, modulaire et collaborative, est spécifiquement adaptée aux besoins du secteur BTP algérien, intégrant la gestion financière, des ressources humaines, des matériaux, le contrôle qualité et une marketplace dédiée aux ouvriers et laboratoires. L'étude analyse les enjeux du secteur, détaille l'architecture technique et fonctionnelle de la plateforme, et évalue son impact via une étude de cas simulée sur un projet réel. Les résultats montrent des gains significatifs en productivité, traçabilité et maîtrise des coûts, soulignant le potentiel de la digitalisation pour moderniser le secteur et améliorer la performance et la transparence des projets en Algérie.

Mots-clés : Gestion de chantier, digitalisation, ConstructPro, plateforme collaborative, productivité, traçabilité, coût, transformation numérique.

--

Abstract

This thesis focuses on optimizing construction site management in Algeria's building and public works sector through the design and development of the ConstructPro platform. This digital, modular, and collaborative solution is specifically tailored to the needs of the Algerian construction industry, integrating financial management, human resources, materials tracking, quality control, and a dedicated marketplace for workers and laboratories. The study analyzes the sector's challenges, details the platform's technical and functional architecture, and evaluates its impact through a simulated case study on a real project. The results demonstrate significant improvements in productivity, traceability, and cost control, highlighting the potential of digitalization to modernize the sector and enhance project performance and transparency in Algeria.

Keywords: Construction site management, digitalization, ConstructPro, collaborative platform, productivity, traceability, cost, digital transformation.

- Remerciements -

Nous tenons tout d'abord à exprimer notre profonde gratitude à notre encadrante, Dr. HERIHIRI Ouided, pour son accompagnement, ses conseils avisés et sa disponibilité tout au long de la réalisation de ce mémoire. Son expertise et son exigence scientifique ont été déterminantes pour la qualité de ce travail.
Nous remercions également l'ensemble des enseignants du département de Génie Civil, dont les enseignements et le soutien ont contribué à enrichir nos connaissances et à développer notre esprit critique.

Notre reconnaissance va aussi à tous les professionnels du secteur du BTP, chefs de chantier, ouvriers, responsables de laboratoires et gestionnaires, qui ont accepté de partager leur expérience et leurs retours terrain lors des entretiens et des phases de recueil des besoins. Leur implication a permis d'ancrer ce travail dans la réalité du terrain et d'orienter la conception de la solution ConstructPro.

Nous souhaitons remercier nos collègues et amis pour leur soutien moral, leurs encouragements et leur aide précieuse lors des moments de doute ou de difficulté. Leur présence a été un véritable moteur tout au long de ce parcours académique.
Enfin, nous adressons une pensée particulière à nos familles, pour leur amour, leur patience et leur soutien inconditionnel. Sans leur confiance et leur encouragement, l'aboutissement de ce projet n'aurait pas été possible.

- À toutes et à tous, merci du fond du cœur -

- Dédicaces -

À moi-même,

Pour avoir tenu bon malgré les doutes, la fatigue et les moments de découragement. Ce travail est le reflet de ma persévérance, de mes efforts et de tout ce que j'ai appris en chemin.

À mes parents,

Merci pour votre amour, votre patience et votre soutien à chaque étape.

Et à toi, maman, merci pour ton amour inépuisable, ta patience, ta force silencieuse et ta présence rassurante. Tu as été mon soutien le plus fidèle, ma lumière dans les jours sombres. Rien de tout cela n'aurait été possible sans toi.

À ma famille,

Merci d'avoir toujours été là, avec vos gestes simples, vos mots sincères, et votre présence réconfortante. Vous êtes mon ancrage.

À mes amis,

Merci pour votre écoute, vos encouragements, et votre bienveillance. Vous m'avez aidé à tenir dans les moments les plus exigeants.

Au lecteur,

Merci d'avoir pris le temps de lire ce travail. J'espère qu'il vous apportera des réponses, des idées, ou simplement un regard nouveau sur un sujet qui me tient à cœur.

- *Houssem.*

--

À ma famille,

Merci pour votre soutien sans faille, votre patience et votre amour tout au long de ce parcours. Vous avez toujours été là, même dans les moments les plus silencieux. Rien de cela n'aurait été possible sans vous.

À mes amis,

Merci pour votre énergie, vos encouragements et votre compréhension. Vous avez su alléger les périodes les plus difficiles, et votre présence a fait toute la différence.

- *Aymen Abderrahmane*

SOMMAIRE

CHAPITRE 1 : CONTEXT ET ÉTAT DE L'ART

1. INTRODUCTION 2

1.1. INTRODUCTION AU SECTEUR DE LA CONSTRUCTION EN ALGÉRIE 2

1.1.1. Poids économique et rôle stratégique 2

1.1.2. Défis structurels et conjoncturels 3

1.1.3. Cadre réglementaire et institutionnel 4

1.1.4. Contribution du secteur BTP au PIB algérien 4

1.1.5. Stratégie Nationale de Transformation Numérique (SNTN-2030) 6

1.1.6. Rôle du Haut-Commissariat à la Numérisation : 7

1.1.7. Secteur privé et collaboration écosystémique 8

1.1.8. Changement culturel et organisationnel 8

1.2. PROBLÉMATIQUES DE LA GESTION DE CHANTIER 9

1.2.1. Gestion financière 9

1.2.2. Gestion du personnel de chantier 10

1.2.3. Contrôle qualité des matériaux 10

1.2.4. Limites des solutions existantes 11

1.2.5. Analyse critique et perspectives d'amélioration 13

1.3. REVUE DE LA LITTÉRATURE 14

1.3.1. Digitalisation et transformation numérique du BTP 14

1.3.2. Études de cas internationales : Procore, PlanGrid, Fieldwire 14

1.3.3. Synthèse des apports de la littérature 15

1.3.4. Solutions artisanales largement utilisées 15

1.4. SYNTHÈSE DES BESOINS 16

1.4.1. Exigences fonctionnelles 16

1.4.2. Exigences non fonctionnelles 17

1.4.3. Synthèse générale 17

1.5. CONCLUSION 18

CHAPITRE 2 : CONCEPTION ET DÉVELOPPEMENT DE CONSTRUCTPRO

2. INTRODUCTION 19

2.1. SPÉCIFICATION DES EXIGENCES 19

2.1.1. Introduction 19

2.1.2. Approche méthodologique 20

2.1.3. Modélisation des cas d'utilisation 22

2.1.4. Modules fonctionnels approfondis 26

2.1.5. Approche Agile et Identification des Parties Prenantes 27

2.2. ARCHITECTURE DU SYSTÈME 29

2.2.1. Analyse et choix de l'architecture 29

2.2.1.1. Justification du choix micro services 29
2.2.1.2. L'architecture monolithique et l'architecture microservices 29
2.2.1.3. Comparaison et choix architectural 30

2.2.2. Choix technologiques 31

2.2.2.1. Backend 31
2.2.2.2. Base de données 32
2.2.2.3. Application mobile 33
2.2.2.4. CI/CD 33

2.2.3. Détails supplémentaires sur les modules 33

2.2.3.1. Ouvriers : paie automatique, planning 33
2.2.3.2. Laboratoires : dépôts de fichiers, suivi en temps réel 34

2.3. MODÉLISATION DE LA BASE DE DONNÉES 34

2.3.1. Schéma entité-relation (E-R) 34

2.3.2. Description détaillée des entités 34

2.3.3. Relations et intégrité référentielle 35

2.3.3.1. Type de relation 1 à N et N à 1 36

2.4. INTERFACES UTILISATEUR (UX/UI) 36

2.4.1. Maquettes (wireframes) des interfaces 36

2.4.2. Ergonomie et adaptation culturelle 38

2.4.3. Expérience utilisateur avancée 39

2.5. IMPLÉMENTATION 39

2.5.1. Développement des modules 39
2.5.2. Intégration continue et déploiement (CI/CD) 40
2.5.3. Documentation technique et gestion de versions 40

2.6. AMÉLIORATION DE L'EXPÉRIENCE UTILISATEUR 41
2.6.1. Navigation par icônes 41
2.6.2. Accessibilité offline 41
2.6.3. Responsive design 41
2.6.4. Interfaces adaptées selon les profils 41

2.7. CONCLUSION 43

CHAPITRE 3 : VALIDATION, RÉSULTATS ET PERSPECTIVES

3. INTRODUCTION 45

3.1 OBJECTIFS ET MÉTHODOLOGIE DE VALIDATION 46
3.1.1 Objectifs généraux 46
3.1.2 Méthodologie adoptée 46

3.2. PRÉSENTATION DU CAS D'ÉTUDE : CHANTIER TEST DE BERROUAGHIA 47
3.2.1 Présentation générale 47
3.2.1.1. Nature et caractéristiques du projet 48
3.2.1.2. Enjeux spécifiques du chantier 48
3.2.2. Objectifs de l'expérimentation simulée 50

3.3. PRÉSENTATION DÉTAILLÉE DE CONSTRUCTPRO 51
3.3.1. Architecture générale 51
3.3.2. Interfaces utilisateurs 52
3.3.2.1 Interface Chef de chantier 52
3.3.2.2. Interface Ouvrier 54
3.3.2.3. Interface Laboratoire 55
3.3.2.4 Interface Chef de Projet (Administrateur) 57

3.4. VALIDATION FONCTIONNELLE ET TECHNIQUE (SIMULATION) 58
3.4.1. Déroulement de la simulation 58
3.4.2. Performances techniques simulées 61

3.5. ÉTUDE COMPARATIVE AVANT / APRÈS (SIMULATION IA) 63
3.5.1. Avant ConstructPro (gestion traditionnelle) 63
3.5.2. Après ConstructPro (simulation IA) 66

3.6. ÉTUDE D'IMPACT MESURABLE ET PRÉDICTION IA 69
3.6.1. Indicateurs quantitatifs simulés 69
3.6.2. Prédiction IA détaillée 70
3.6.2.1. Architecture du modèle 70
3.6.2.2. Données d'entrée 71
3.6.2.3. Méthodologie de simulation 71
3.6.2.4. Analyse complémentaire et justification académique 72
3.6.2.5. Perspectives de déploiement 72
3.6.2.6. Recherche et innovation 72

3.7. CONCLUSION 73

CONCLUSION GÉNÉRALE 74

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES 75

LISTE DES FIGURES

Figure 2.1 : Diagramme de cas d'utilisation – Chef de Projet 22

Figure 2.2 : Diagramme de cas d'utilisation – Ouvrier 23

Figure 2.3 : Diagramme de cas d'utilisation – Laboratoire 24

Figure 2.4 : Diagramme de cas d'utilisation – Chef de Chantier 25

Figure 2.5 : Architecture microservices de ConstructPro 31

Figure 2.6 : Schéma entité-relation simplifié 34

Figure 2.7 : Wireframe – Chef de Projet 37

Figure 2.8 : Wireframe – Ouvrier 37

Figure 2.9 : Wireframe – Laboratoire 37

Figure 2.10 : Wireframe – Chef de Chantier 38

Figure 2.11 : Pipeline CI/CD simplifié 40

Figure 3.1. Schéma de l'architecture logicielle, montrant la base de données centrale, les modules, et les flux entre interfaces web/mobile et serveurs. 52

Figure 3.2 : Capture d'écran de l'accueil Chef de chantier, montrant le tableau de bord des tâches et notifications (interface web) 53

Figure 3.3 : Capture d'écran de l'accueil Chef de chantier, montrant le tableau de bord des tâches et notifications (interface mobile) 53

Figure 3.4 : Capture d'écran du profil ouvrier et de la liste des tâches assignées (interface web) 54

Figure 3.5 : Capture d'écran du profil ouvrier et de la liste des tâches assignées (interface mobile) 55

Figure 3.6 : Capture d'écran de l'accueil Laboratoire montrant le tableau de bord du suivi des essais (interface web) 56

Figure 3.7 : Capture d'écran de l'accueil Laboratoire montrant le tableau de bord du suivi des essais (interface mobile) 56

Figure 3.8 : Capture d'écran du tableau de bord administrateur avec graphiques consolidés (interface web) 57

Figure 3.9 : Capture d'écran du tableau de bord administrateur avec graphiques consolidés (interface mobile) 58

Figure 3.10 : Capture d'écran du module de pointage (interface web) 60

Figure 3.11 : Capture d'écran du module de suivi des matériaux - tableau des stocks, alertes, historique des commandes - (interface web) 61

Figure 3.12 : Capture d'écran du module de pointage (interface mobile) 62

Figure 3.14 : Graphique comparatif avant et après l'utilisation de ConstructPro montrant la réduction des incidents, l'amélioration de la productivité et la diminution des coûts sur le chantier de Berrouaghia 68

Figure 3.15 : Schéma de workflow IA pour la gestion prédictive des ressources et des risques 71

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 2.1: Fonctionnalités Chef de Projet 22
Tableau 2.2 : Fonctionnalités Ouvrier 23
Tableau 2.3 : Fonctionnalités Personnel Laboratoire 24
Tableau 2.4 : Fonctionnalités Chef de Chantier 25
Tableau 2.5 : Tableau récapitulatif des cas d'usage 26
Tableau 2.6 : Architecture Monolithe vs Architecture Microservices 30
Tableau 2.7 : Synthèse des choix technologiques 33
Tableau 2.8 : Relations clés entre les entités 35
Tableau 3.1 : Synthèse de la méthodologie 47
Tableau 3.2 : Données historiques du chantier test de Berrouaghia 49
Tableau 3.3 : Résultats par module (simulation IA et benchmarks) 59
Tableau 3.4 : Tableau de résultats Temps de chargement moyens mesurés 61
Tableau 3.5 : Principaux problèmes identifiés sur le chantier test de Berrouaghia (gestion traditionnelle, avant ConstructPro) 64
Tableau 3.6 : Principaux problèmes et leur évolution après la simulation ConstructPro (gestion digitalisée) 66
Tableau 3.7 : Comparaison des indicateurs de performance du chantier avant et après l'intégration de ConstructPro avec intelligence artificielle 69

SYMBOLES ET ABBRÉVIATIONS

- API : Interface de Programmation d'Application (Application Programming Interface)
- BIM : Building Information Modeling (Modélisation des Informations du Bâtiment)
- BTP : Bâtiment et Travaux Publics.
- CCTP : Cahiers des Clauses Techniques Particulières
- CD : Continuous Deployment (Déploiement Continu)
- CI : Continuous Integration (Intégration Continue)
- CTC : Centre National de Contrôle Technique de la Construction
- EPI : Équipement de Protection Individuelle
- ERP : Enterprise Resource Planning (Progiciel de Gestion Intégré)
- IANOR : Institut Algérien de Normalisation
- JSON : JavaScript Object Notation (Format de données textuelles)
- NA : Normes Algériennes
- PIB : Produit Intérieur Brut
- PME : Petite et Moyenne Entreprise
- PV : Procès-Verbal
- REST : Representational State Transfer (Style d'architecture pour les API)
- RH : Ressources Humaines
- UML : Unified Modeling Language (Langage de Modélisation Unifié)
- VRD : Voirie et Réseaux Divers
- SNTN : Stratégie Nationale de Transformation Numérique
- TIC : Technologies de l'Information et de la Communication
- PDF : Portable Document Format (Format de document portable)
- UX : User Experience (Expérience Utilisateur)
- UI : User Interface (Interface Utilisateur)
- CSS : Cascading Style Sheets (Feuilles de style en cascade)
- IA : Intelligence Artificielle
- LPL : Logement Public Locatif
- AES : Advanced Encryption Standard (Norme de chiffrement avancée)
- RDC : Rez-de-chaussée
- OTP : One-Time Password (Mot de passe à usage unique)
- HSE : Hygiène, Sécurité, Environnement

Introduction Générale

La transformation numérique s'impose aujourd'hui comme un levier incontournable pour moderniser le secteur du bâtiment et des travaux publics (BTP) en Algérie, un secteur stratégique pour l'économie nationale et la création d'emplois. Malgré son importance, la gestion des chantiers reste largement tributaire de méthodes traditionnelles, caractérisées par la fragmentation des outils, la lourdeur administrative et un manque de traçabilité, ce qui freine la productivité et la qualité des projets. Face à ces défis, l'application ConstructPro se positionne comme une solution innovante, conçue pour centraliser et optimiser la gestion opérationnelle des chantiers à travers une plateforme collaborative, modulaire et adaptée au contexte local. Elle intègre des modules avancés de gestion financière, de gestion du personnel, de gestion des matériaux, de contrôle qualité et de marketplace, tout en offrant des interfaces personnalisées selon les profils utilisateurs, qu'il s'agisse de chefs de projet, d'ouvriers ou de laboratoires.

Ce mémoire analyse en profondeur la conception, le développement et la validation de ConstructPro, en s'appuyant sur une méthodologie rigoureuse qui inclut l'analyse des besoins métiers, la modélisation des processus, le choix d'une architecture logicielle évolutive et l'adoption des meilleures pratiques internationales en matière de digitalisation du BTP. Le premier chapitre dresse un état des lieux du secteur de la construction en Algérie, identifie les problématiques majeures de la gestion de chantier et propose une revue critique de la littérature sur la transformation numérique du secteur, tant à l'échelle locale qu'internationale. Le deuxième chapitre détaille la conception et le développement de la plateforme ConstructPro, en mettant l'accent sur la spécification des exigences, la modélisation des données, l'ergonomie des interfaces et les choix technologiques structurants1. Enfin, le troisième chapitre présente la validation fonctionnelle et technique de la solution à travers une étude de cas appliquée au chantier de Berrouaghia, en mobilisant des simulations prédictives et des benchmarks issus de la littérature scientifique et professionnelle.

L'objectif de ce travail est double : démontrer l'impact d'une solution numérique intégrée pour la gestion de chantier dans le contexte algérien et contribuer à la réflexion académique et professionnelle sur les conditions de réussite de la digitalisation du secteur BTP, en soulignant l'importance de l'adaptation locale, de l'accompagnement au changement et de l'innovation collaborative.

CHAPITRE 1 :
CONTEXTE ET ÉTAT DE L'ART

1. Introduction

Le secteur de la construction, moteur essentiel du développement économique et social, occupe une place stratégique dans la politique d'aménagement du territoire et de modernisation des infrastructures en Algérie. Cependant, il demeure confronté à de nombreux défis structurels et organisationnels qui impactent la performance, la qualité et la compétitivité des projets. Dans un contexte marqué par la complexification des opérations de chantier, l'augmentation des exigences réglementaires et la pression croissante sur les coûts et les délais, la gestion efficace des ressources, des processus et des acteurs s'impose comme un enjeu majeur.

L'avènement des technologies numériques et la généralisation des outils mobiles offrent aujourd'hui des perspectives inédites d'optimisation et de transformation des pratiques dans le secteur du BTP. Les solutions digitales, telles que les applications de gestion de chantier, promettent une meilleure centralisation de l'information, une collaboration renforcée entre les parties prenantes et une traçabilité accrue des opérations, tout en répondant aux spécificités réglementaires et organisationnelles locales.

Ce chapitre propose une analyse approfondie du contexte du secteur de la construction en Algérie, des principales problématiques liées à la gestion de chantier, ainsi qu'une revue critique de la littérature sur la digitalisation du BTP à l'échelle internationale et locale. Il vise à dégager les besoins spécifiques et les exigences fonctionnelles et non fonctionnelles qui orienteront la conception d'une solution innovante adaptée au marché algérien, telle que l'application ConstructPro.

1.1. Introduction au secteur de la construction en Algérie

1.1.1. Poids économique et rôle stratégique

Le secteur de la construction en Algérie occupe une place centrale dans l'économie nationale. Il est considéré comme l'un des principaux moteurs de croissance, contribuant significativement au produit intérieur brut (PIB) et à la création d'emplois directs et indirects. Selon le Ministère de l'Habitat, de l'Urbanisme et de la Ville (2023), la construction représente entre 9 et 11 % du PIB national, et emploie plus de 1,7 million de personnes, soit près de 15 % de la population active. Cette importance s'explique par la forte demande en logements, en infrastructures de transport, en équipements publics et en bâtiments industriels, conséquence de la croissance démographique, de l'urbanisation accélérée et des politiques publiques d'investissement massif [1].

L'État algérien a lancé, depuis le début des années 2000, plusieurs programmes nationaux ambitieux, tels que le Programme quinquennal de l'Habitat, le Plan National de Développement des Infrastructures et le Programme de Modernisation des Villes. Ces initiatives ont permis la construction de millions de logements sociaux, de routes, d'autoroutes, d'ouvrages hydrauliques, d'écoles, d'hôpitaux et d'équipements sportifs. En parallèle, le secteur privé, notamment les petites et moyennes entreprises (PME) de travaux publics, a connu une expansion significative, stimulée par l'ouverture à la concurrence et l'essor du marché de la construction.

Parallèlement à la croissance du secteur, l'Algérie investit massivement dans la modernisation de ses infrastructures numériques : construction de data centers nationaux, extension des réseaux haut débit, et développement de plateformes d'interopérabilité pour les administrations. Ces projets sont essentiels pour soutenir la transformation numérique et garantir la souveraineté et la sécurité des données nationales.

1.1.2. Défis structurels et conjoncturels

Malgré ce dynamisme, le secteur de la construction en Algérie est confronté à des défis majeurs, qui freinent sa performance et sa compétitivité :

a) **Retards dans la livraison des projets** : Selon Zemra (2017), plus de 65 % des projets publics et privés connaissent des retards, parfois supérieurs à 18 mois. Les causes sont multiples : complexité des procédures administratives, lenteur dans la validation des avenants, mauvaise coordination entre les intervenants, dépendance aux importations de matériaux et équipements, manque de planification et d'anticipation des risques [2].

b) **Dépassements de coûts** : Les écarts entre les budgets prévisionnels et les coûts réels sont fréquents, en raison de la volatilité des prix des matériaux (ciment, acier, bitume), des modifications de programme en cours de chantier, de l'inflation et des imprévus techniques ou climatiques. La gestion financière reste souvent empirique, avec un manque d'outils de suivi en temps réel et de contrôle des écarts.

c) **Qualité des ouvrages et durabilité** : Les défauts de conformité aux normes, l'utilisation de matériaux de qualité inférieure, la non-traçabilité des essais en laboratoire et le manque de qualification de la main-d'œuvre contribuent à la multiplication des malfaçons et à la réduction de la durée de vie des ouvrages (Gharbi, 2019). Les pathologies du béton, les défauts d'étanchéité et les malfaçons structurelles sont des problématiques récurrentes [3].

d) **Fragmentation du tissu productif** : La coexistence de grandes entreprises publiques, de PME privées et d'un secteur informel important complique la structuration de la filière, la diffusion des innovations et l'harmonisation des pratiques professionnelles.

1.1.3. Cadre réglementaire et institutionnel

Le secteur de la construction en Algérie est fortement encadré par un ensemble de textes législatifs, de normes techniques et de dispositifs contractuels :

a) **Normes algériennes (NA)** : Élaborées par l'Institut Algérien de Normalisation (IANOR), ces normes couvrent la sécurité, la qualité et la performance des matériaux et des ouvrages. Leur respect est obligatoire pour tous les projets publics et privés [11].

b) **Cahiers des Clauses Techniques Particulières (CCTP)** : Documents contractuels spécifiques à chaque projet, ils précisent les prescriptions techniques, les matériaux, les méthodes d'exécution, les tolérances et les modalités de contrôle.

c) **Centre National de Contrôle Technique de la Construction (CTC)** : Institution incontournable, le CTC intervient à toutes les étapes du projet, de la conception à la réception, pour garantir la conformité aux normes et la sécurité des ouvrages. Il supervise l'agrément des laboratoires de contrôle des matériaux et valide les rapports d'essais [12].

d) **Laboratoires agréés** : Ils réalisent les essais normalisés sur les matériaux (béton, acier, granulats, bitume) et assurent la traçabilité des résultats, qui doivent être intégrés dans la documentation de chantier et transmis au CTC [12].

La multiplicité et la complexité des exigences réglementaires impliquent une gestion documentaire rigoureuse, une traçabilité complète et une coordination efficace entre tous les acteurs du projet. Cette complexité réglementaire souligne la nécessité d'une solution numérique centralisée, capable d'assurer une gestion documentaire rigoureuse, une traçabilité complète et une automatisation des processus de conformité.

1.1.4. Contribution du secteur BTP au PIB algérien

Le secteur du bâtiment et des travaux publics (BTP) constitue un pilier fondamental de l'économie algérienne. Selon les données officielles du Ministère de l'Habitat, de l'Urbanisme et de la Ville (2023), le BTP représente environ 9 à 11 % du produit intérieur brut (PIB) national, ce qui témoigne de son poids économique significatif. Ce secteur est également un important pourvoyeur d'emplois, employant plus de 1,7 million de personnes, soit près de 15 % de la population active, ce qui souligne son rôle social et économique dans la création d'emplois directs et indirects [1].

Cette importance économique s'explique par plusieurs facteurs structurels et conjoncturels : la croissance démographique élevée (environ 2,2 % par an), l'urbanisation rapide (70 % de taux d'urbanisation), ainsi que les politiques publiques d'investissement massif dans la construction de logements sociaux, d'infrastructures de transport, d'équipements publics et industriels. Le secteur est aussi un vecteur de développement industriel, notamment à travers la production locale de matériaux de construction (ciment, fer, céramique), qui tend à réduire la dépendance aux importations. De plus, la digitalisation de la chaîne de valeur du BTP pourrait renforcer la compétitivité du secteur, en facilitant l'intégration des acteurs locaux et l'optimisation des processus de production.

a) **Besoins en logements et infrastructures :** L'Algérie est confrontée à une demande structurelle et croissante en logements et infrastructures, conséquence directe de sa démographie et de son urbanisme accéléré. Le pays dispose d'un parc de logements estimé à environ 10 millions d'unités, avec un taux d'occupation moyen de 4 personnes par logement. Malgré les efforts étatiques, notamment le programme présidentiel visant la construction d'un million de logements sur la période 2020-2024, la demande annuelle est estimée à 200 000 unités, dont une part importante concerne le logement social et rural.

   Le parc existant comporte également une proportion importante de logements vétustes, estimée à environ 2 millions d'unités, nécessitant des programmes de réhabilitation, notamment dans les grandes villes comme Alger où plus de 55 000 logements anciens sont concernés. Ces besoins en renouvellement urbain s'accompagnent d'une forte pression sur les infrastructures de base (réseaux routiers, équipements scolaires et hospitaliers, ouvrages hydrauliques), qui bénéficient d'un budget d'investissement public en travaux publics de l'ordre de 113 milliards USD pour 2024, avec une croissance prévue de 6,9 % par rapport à l'année précédente.

   Toutefois, plusieurs contraintes freinent la satisfaction complète de ces besoins : la lenteur administrative (délai moyen d'obtention du permis de construire de 131 jours), la hausse spéculative des prix des matériaux (augmentation de 45 à 50 %), ainsi que la difficulté d'accès au foncier pour les promoteurs privés. Ces facteurs contribuent à augmenter le coût final des logements neufs et à ralentir la cadence des projets. Ces contraintes renforcent l'intérêt pour des outils numériques capables d'automatiser l'instruction des dossiers, de fluidifier la gestion des documents et d'accélérer la prise de décision.

b) **Manque d'outils numériques adaptés sur chantier :** Malgré l'importance stratégique du secteur, la gestion des chantiers en Algérie demeure largement marquée par des pratiques traditionnelles, peu digitalisées, ce qui constitue un frein majeur à la productivité et à la qualité des projets. Une étude récente menée auprès de 300 entreprises du secteur révèle que près d'un tiers des professionnels du BTP ne disposent pas d'outils digitaux adaptés à leurs besoins, et 67 % utilisent des solutions inappropriées ou partielles, ce qui engendre des inefficacités significatives dans la gestion administrative et opérationnelle.

c) **Les principales difficultés identifiées sont :**

- La gestion papier des présences, des stocks et de la documentation technique, source de pertes d'information, d'erreurs et de lenteurs dans la circulation des données.
- L'utilisation d'ERP génériques, souvent importés, qui ne prennent pas en compte les spécificités du BTP algérien, notamment la gestion multi-projets, la mobilité des équipes et l'intégration des laboratoires de contrôle qualité.
- La fragmentation des outils numériques (tableurs, emails, messageries) qui nuit à la cohérence des données, à la traçabilité et à la coordination des acteurs.
- Le manque d'accès à Internet haut débit sur certains chantiers, notamment en zones rurales, limite l'adoption d'outils modernes.

Cette situation a pour conséquence une augmentation du temps consacré aux tâches administratives (entre 4 et 8 heures par semaine pour 43 % des professionnels), une moindre réactivité face aux imprévus, des risques accrus d'erreurs dans le suivi budgétaire et qualitatif, ainsi qu'une difficulté à répondre aux exigences réglementaires strictes imposées par le Centre National de Contrôle Technique (CTC) et les normes algériennes. La digitalisation ciblée des processus administratifs et opérationnels apparaît ainsi comme un levier essentiel pour améliorer la performance globale des chantiers en Algérie [1].

1.1.5. Stratégie Nationale de Transformation Numérique (SNTN-2030)

L'Algérie a lancé la Stratégie Nationale de Transformation Numérique 2025–2030, pilotée par le Haut-Commissariat à la Numérisation. Cette stratégie s'articule autour de cinq axes majeurs : cadre réglementaire, infrastructures numériques, services numériques, compétences numériques, et innovation/entrepreneuriat. Elle vise à moderniser l'administration, stimuler l'économie numérique, renforcer la souveraineté digitale et former des centaines de milliers de professionnels TIC d'ici 2030. Parmi les objectifs concrets figurent la construction de data

centers nationaux, l'amélioration de l'accès aux services numériques pour les citoyens et entreprises, et le soutien à la croissance des startups digitales. Cette stratégie place l'Algérie sur la voie d'un leadership numérique régional, tout en insistant sur l'inclusion, la transparence et la compétitivité économique.

1.1.6. Rôle du Haut-Commissariat à la Numérisation :

Le Haut-Commissariat à la Numérisation, créé par le décret présidentiel n° 23-314 du 6 septembre 2023, constitue un établissement public à caractère spécifique, doté de la personnalité morale et de l'autonomie financière, et placé sous la tutelle directe de la Présidence de la République. Sa création répond à la nécessité de doter l'Algérie d'une instance centrale, transversale et indépendante, capable de piloter la stratégie nationale de la numérisation en concertation avec l'ensemble des parties prenantes : institutions publiques, secteur économique, société civile et partenaires académiques [4].

Ses missions couvrent la conception, la coordination et la mise en œuvre de la stratégie nationale de la numérisation, en veillant à la concordance des plans sectoriels avec les objectifs nationaux, à l'évaluation des réalisations de chaque secteur et à la proposition de correctifs selon des indicateurs de performance adaptés. Le Haut-Commissariat est également chargé de garantir la conformité de la stratégie nationale avec les exigences de sécurité des systèmes d'information, en coordination avec les autorités compétentes, et de proposer les instruments juridiques, réglementaires et techniques nécessaires à la performance et à l'amélioration continue des axes de la transformation numérique.

Par ailleurs, le Haut-Commissariat pilote des projets stratégiques intersectoriels, notamment ceux initiés sur orientation du Président de la République, et évalue les modalités de mise en œuvre des programmes sectoriels de numérisation. Il définit les projets prioritaires, oriente les investissements stratégiques, et propose les modalités de mobilisation du capital humain et des financements y afférents. Il joue également un rôle moteur dans la promotion de la souveraineté numérique nationale et le développement de la production locale de solutions numériques [5].

Sur le plan organisationnel, le Haut-Commissariat est dirigé par un haut-commissaire nommé par décret présidentiel, assisté d'un conseil d'orientation présidé par le directeur de cabinet de la Présidence et composé de plusieurs ministres stratégiques (Intérieur, Justice, Finances, Enseignement supérieur, Télécommunications, Numérisation, Start-up, Défense nationale). L'institution comprend plusieurs divisions spécialisées : digitalisation et gouvernance numérique, infrastructures et sécurité, audit et évaluation, coopération et affaires juridiques, permettant une approche globale et intégrée de la transformation numérique.

Le Haut-Commissariat assure également le suivi de la mise en œuvre de la stratégie nationale, l'évaluation des projets, la gestion des priorités, la résolution des obstacles institutionnels et la production de rapports annuels d'activité. Il joue un rôle clé dans la généralisation de la numérisation à l'ensemble des secteurs publics et économiques, l'élaboration des conventions de coopération, la promotion du capital humain, la formation et la sensibilisation à la culture numérique.

Enfin, la Haut-commissaire à la numérisation, ayant rang de ministre, coordonne l'élaboration de projets de loi sur la numérisation et veille à la conformité des textes juridiques avec les objectifs stratégiques nationaux, tout en encourageant la mise en place de plateformes interactives au profit des citoyens et des établissements, et en soutenant la modernisation des services publics.

1.1.7. Secteur privé et collaboration écosystémique

La réussite de la transformation numérique dépend également de l'implication active du secteur privé et de la collaboration avec les startups, les universités et la société civile. Les entreprises privées, en particulier les PME et les jeunes pousses innovantes, jouent un rôle moteur dans l'introduction de solutions technologiques adaptées et dans la diffusion d'une culture numérique agile. Les partenariats public-privé, tout comme les plateformes de co-innovation, permettent de mutualiser les ressources, de partager les meilleures pratiques et d'accélérer la mise en œuvre de projets numériques à grande échelle.

Malgré la volonté politique affichée, des obstacles persistent, notamment une méfiance institutionnelle envers les initiatives privées, des difficultés d'accès aux marchés publics pour les startups, ainsi qu'une exécution partielle ou inégale des nouvelles réglementations. De plus, le manque de dispositifs incitatifs et de mécanismes de financement dédiés freine l'émergence d'un véritable écosystème numérique compétitif.

Il est donc recommandé de renforcer les coalitions sectorielles, de soutenir l'innovation collaborative et de favoriser la création de clusters numériques régionaux afin d'accélérer l'adoption des technologies numériques et d'optimiser leur impact. L'intégration de tous les acteurs de l'écosystème, notamment à travers des forums, des hackathons et des laboratoires vivants, est essentielle pour stimuler la créativité, répondre aux besoins spécifiques du marché algérien et assurer la réussite de la transformation numérique à l'échelle nationale [15].

1.1.8. Changement culturel et organisationnel

La transformation numérique ne se limite pas à l'acquisition de technologies, mais implique un changement profond des pratiques organisationnelles et culturelles. Elle nécessite une remise

en question des modes de fonctionnement traditionnels, une adaptation des processus internes et une évolution des mentalités à tous les niveaux hiérarchiques. Les freins identifiés incluent la résistance au changement, souvent liée à la peur de l'inconnu ou à la crainte de perdre certains repères professionnels, le manque de leadership inspirant pour porter la vision numérique, ainsi que l'insuffisance de formation aux compétences numériques essentielles à la réussite de cette mutation.

Par ailleurs, l'absence de culture de l'expérimentation et de l'innovation, ainsi que le cloisonnement entre les services, peuvent ralentir l'adoption des nouvelles pratiques. Il est donc essentiel d'accompagner ce changement par des programmes de formation adaptés, ciblant aussi bien les compétences techniques que les soft skills, et par une communication interne efficace et régulière, afin de garantir l'adhésion de tous les acteurs. La mise en place d'initiatives de sensibilisation, de groupes de travail transversaux et de dispositifs de reconnaissance de l'innovation peut également contribuer à instaurer une culture organisationnelle ouverte, collaborative et résolument tournée vers le numérique [16].

1.2. Problématiques de la gestion de chantier

1.2.1. Gestion financière

La gestion financière des chantiers est un enjeu crucial pour la rentabilité des entreprises et la réussite des projets. Elle comprend :

a) **Planification budgétaire** : Élaboration de budgets prévisionnels, ventilation des coûts par poste (main-d'œuvre, matériaux, sous-traitance, équipements), prise en compte des aléas et des provisions pour risques.

b) **Suivi des dépenses et des recettes** : Enregistrement des dépenses réelles, rapprochement avec les prévisions, analyse des écarts, gestion des imprévus et des avenants.

c) **Gestion des paiements et de la trésorerie** : Facturation, suivi des règlements, gestion des avances, des retenues de garantie, des pénalités de retard et des délais de paiement fournisseurs et sous-traitants.

d) **Reporting financier** : Élaboration de tableaux de bord, indicateurs de performance (coût de revient, marge brute, cash-flow), communication avec la direction et les partenaires financiers.

En Algérie, la gestion financière est souvent entravée par la lourdeur des procédures administratives, la complexité des marchés publics, le manque d'outils de suivi en temps réel et l'insuffisante intégration des processus comptables et opérationnels [13] , [14].

1.2.2. Gestion du personnel de chantier

La gestion du personnel de chantier revêt une dimension stratégique, compte tenu de la diversité des statuts (permanents, journaliers, sous-traitants), de la mobilité des équipes et de la pénurie de main-d'œuvre qualifiée. Les principaux défis sont :

a) **Planification et affectation des ressources humaines** : Gestion des plannings, anticipation des besoins en main-d'œuvre, affectation des équipes en fonction des compétences et des contraintes du chantier.

b) **Suivi des présences et des heures travaillées** : Pointage, contrôle des absences, calcul des heures supplémentaires, gestion des congés et des repos compensateurs.

c) **Gestion administrative et sociale** : Déclarations sociales, gestion des contrats, suivi des formations, respect des obligations en matière de santé et sécurité au travail.

d) **Communication et motivation** : Transmission des consignes, gestion des conflits, suivi de la sécurité, prévention des accidents, gestion du climat social.

L'absence d'outils numériques adaptés limite la réactivité, la précision et la transparence dans la gestion des effectifs, ce qui peut entraîner des surcoûts, des retards et des conflits sociaux.

1.2.3. Contrôle qualité des matériaux

Le contrôle qualité des matériaux est une exigence réglementaire et contractuelle, visant à garantir la conformité des matériaux aux spécifications techniques et à prévenir les malfaçons. Les principales difficultés rencontrées sont :

a) **Centralisation et traçabilité des essais** : Les résultats d'essais réalisés en laboratoire doivent être centralisés, archivés et accessibles à tous les acteurs du projet. L'absence de digitalisation engendre des pertes d'information, des retards dans la transmission des rapports et des difficultés de contrôle.

b) **Gestion des non-conformités** : Identification rapide des non-conformités, mise en place d'actions correctives, suivi des reprises et communication avec le CTC.

c) **Intégration documentaire** : Les rapports de contrôle doivent être intégrés dans la documentation du chantier, transmis aux organismes de contrôle et archivés pour la traçabilité.

d) **Communication entre acteurs** : Fluidité des échanges entre entreprises, laboratoires, bureaux de contrôle, maîtrise d'ouvrage et sous-traitants.

1.2.4. Limites des solutions existantes

En Algérie, la gestion de chantier repose encore largement sur des méthodes traditionnelles :

a) **Papeterie** : Utilisation de registres papier pour le suivi des présences, la gestion des stocks, la documentation technique. Cette méthode est source de perte d'information, de difficultés d'archivage, d'erreurs de saisie et de lenteur dans la circulation des données.

b) **ERP génériques** : Certaines grandes entreprises utilisent des ERP conçus pour l'industrie ou le commerce, mais ces outils ne répondent pas aux spécificités du BTP, notamment la mobilité, la gestion multi-projets, l'intégration des laboratoires et la gestion des équipes de terrain.

c) **Fragmentation des outils** : Multiplication des applications non intégrées (tableurs, emails, messageries instantanées), absence de plateforme collaborative unifiée, ce qui nuit à la cohérence des données, à la traçabilité et à la coordination des acteurs.

Cette situation limite la capacité des entreprises à anticiper les risques, à optimiser les ressources, à garantir la qualité des réalisations et à répondre aux exigences des maîtres d'ouvrage et des organismes de contrôle. L'absence d'une plateforme collaborative unifiée freine la circulation de l'information et la coordination inter-équipes, ce qui accentue les risques d'erreurs et de non-conformité.

Tableau 1.1. Tableau comparatif entre la méthode traditionnelle et la gestion numérique

Fonctionnalité	Méthode traditionnelle	ConstructPro (gestion numérique)
Suivi financier	Tableurs, documents papier	Module intégré, suivi en temps réel
Gestion du personnel	Feuilles d'heures manuelles	Interface dédiée, pointage mobile
Gestion des matériaux	Bons de commande papier	Suivi digital, inventaire centralisé
Résultats laboratoire	Rapports physiques, retards	Téléversement direct, accès instantané
Place de marché	Réseaux informels	Plateforme centralisée, visibilité accrue

d) **Absence de suivi fiable des ouvriers :** La gestion du personnel de chantier en Algérie reste largement tributaire de méthodes traditionnelles, telles que le pointage manuel, la gestion papier des présences et l'utilisation de registres physiques. Cette situation engendre de multiples conséquences négatives : Imprécision et manque de traçabilité : L'absence d'outils numériques adaptés limite la capacité des gestionnaires à suivre en temps réel la présence effective des ouvriers, à contrôler les heures travaillées et à

anticiper les besoins en main-d'œuvre. Cette imprécision se traduit par des difficultés dans la gestion de la paie, une évaluation approximative de la productivité et une planification déficiente des équipes, particulièrement dans un contexte de forte mobilité et de recours fréquent à la sous-traitance.

e) **Le manque de transparence et d'exactitude dans le suivi des effectifs** favorise l'apparition de litiges liés au paiement des salaires, aux heures supplémentaires et aux absences, pouvant déboucher sur des conflits sociaux et des retards dans l'exécution des travaux.

f) **Risques de non-conformité réglementaire :** La réglementation algérienne impose des obligations strictes en matière de déclaration sociale, de gestion des contrats et de respect des normes de sécurité. L'absence de suivi digitalisé accroît le risque de non-conformité et d'exposition à des sanctions administratives.

g) **Estimations incorrectes des matériaux :** La gestion des matériaux de construction constitue un autre enjeu critique, tant du point de vue financier que de la qualité des ouvrages : Erreurs d'évaluation et de planification : Les estimations inexactes des besoins en matériaux, souvent réalisées de manière empirique ou sur la base de données incomplètes, conduisent à des ruptures d'approvisionnement, à des surstocks ou à des gaspillages, impactant directement les coûts et les délais des projets.

h) **Problèmes logistiques et pertes :** L'absence d'un système de traçabilité efficace favorise les erreurs de livraison (quantités ou localisation incorrectes), les pertes, les vols et la détérioration des matériaux sur site. Ces dysfonctionnements sont aggravés par la fragmentation des outils de gestion (tableurs, documents papier, échanges informels).

i) Non-conformité et qualité : Les défauts de traçabilité et de centralisation des résultats d'essais en laboratoire compliquent la gestion des non-conformités et la mise en œuvre d'actions correctives, au détriment de la qualité et de la durabilité des ouvrages.

j) **Communication informelle (WhatsApp, appels téléphoniques) :** La prépondérance de la communication informelle sur les chantiers, via des applications de messagerie instantanée (WhatsApp) et des appels téléphoniques, pose des problèmes majeurs de gestion de l'information :

a) Absence de traçabilité et d'archivage : Les échanges informels ne permettent pas de constituer un historique fiable des décisions, des consignes ou des incidents. Il devient ainsi difficile de retrouver une information précise en cas de litige ou de contrôle, ce qui nuit à la transparence et à la responsabilité des acteurs.

b) Dissémination et perte d'information : La multiplicité des canaux de communication (appels, messages, emails, documents papier) entraîne une dispersion de l'information, une perte de temps pour sa recherche et une coordination inefficace entre les parties prenantes.

c) Sécurité et confidentialité : Les plateformes non sécurisées ne garantissent pas la protection des données sensibles (plans, rapports, résultats d'essais), exposant les entreprises à des risques de fuite ou de malveillance.

Par ailleurs, il convient de souligner que l'adoption de solutions numériques internationales dans le secteur du BTP algérien se heurte à plusieurs obstacles spécifiques. D'une part, la barrière linguistique demeure un frein majeur, la plupart des plateformes étant conçues en anglais et peu adaptées aux usages en français ou en arabe, ce qui limite leur accessibilité pour de nombreux professionnels locaux. D'autre part, le coût élevé des licences, la dépendance à des serveurs étrangers et l'absence de support technique de proximité constituent des contraintes économiques et opérationnelles importantes, en particulier pour les PME et les entreprises implantées en zones rurales.

À ces difficultés s'ajoutent les défis liés à la connectivité, l'accès à un Internet haut débit restant inégal sur le territoire national, ce qui entrave l'utilisation continue des solutions cloud. De plus, la majorité des outils importés ne prend pas en compte les spécificités réglementaires algériennes, telles que les normes NA, les exigences du CTC ou les prescriptions des CCTP, compliquant ainsi leur intégration dans les processus locaux de gestion de chantier. Enfin, l'ergonomie et l'accessibilité des interfaces ne sont pas toujours adaptées aux utilisateurs peu familiarisés avec l'informatique, notamment les ouvriers et les gestionnaires de terrain.

Ces constats confirment la nécessité de concevoir des solutions numériques véritablement adaptées au contexte algérien, intégrant la langue, les normes nationales, les contraintes d'infrastructure et un accompagnement technique local, afin de garantir une adoption effective et durable de la digitalisation dans le secteur de la construction.

1.2.5. Analyse critique et perspectives d'amélioration

La persistance de ces problématiques s'explique en grande partie par le manque d'outils numériques adaptés au contexte algérien : selon une étude récente, près d'un tiers des entreprises du BTP ne disposent pas de solutions digitales spécifiques, et 67 % utilisent des outils partiels ou inadaptés, ce qui nuit à la cohérence, à la traçabilité et à la performance globale des projets. La fragmentation des systèmes, l'absence de plateformes collaboratives unifiées et la faible intégration des processus (gestion du personnel, des matériaux, de la qualité et de la

communication) limitent la capacité des entreprises à anticiper les risques, à optimiser les ressources et à répondre aux exigences réglementaires et contractuelles. Pour surmonter ces limites, il est nécessaire de développer des solutions numériques spécifiquement adaptées au contexte algérien, intégrant les normes locales, la langue et les contraintes d'infrastructure.

La littérature internationale met en évidence les bénéfices de la digitalisation pour la gestion de chantier : centralisation des données, automatisation des processus, amélioration de la collaboration et de la traçabilité, réduction des délais et des coûts. Toutefois, l'adoption de telles solutions en Algérie nécessite une adaptation aux spécificités locales (normes, langue, infrastructure, ergonomie), ainsi qu'un accompagnement au changement et un renforcement des compétences numériques des acteurs du secteur.

1.3. Revue de la littérature

1.3.1. Digitalisation et transformation numérique du BTP

La digitalisation du secteur de la construction est un phénomène mondial, accéléré par l'essor des technologies mobiles, du Cloud Computing, du BIM (Building Information Modeling) et de l'Internet des Objets (IoT). Selon Belkaid & Bessaoud (2021), la transformation numérique du BTP vise à améliorer la productivité, la transparence, la sécurité et la qualité des projets, tout en réduisant les coûts et les délais [6], [10].

Les applications mobiles et plateformes Cloud dédiées à la gestion de chantier permettent :

a) **Centralisation des données** : Accès en temps réel à l'ensemble des informations du projet (plans, plannings, rapports, photos, résultats d'essais), réduction des erreurs et des pertes d'information.

b) **Automatisation des processus** : Génération automatique de rapports, alertes sur les écarts, validation des tâches et des paiements, gestion des workflows.

c) **Collaboration et communication** : Partage d'informations entre tous les intervenants (maître d'ouvrage, entreprises, sous-traitants, laboratoires, ouvriers), amélioration de la coordination et de la réactivité.

d) **Traçabilité et conformité** : Archivage numérique des documents, gestion des historiques, conformité aux exigences réglementaires et contractuelles.

1.3.2. Études de cas internationales : Procore, PlanGrid, Fieldwire

Des solutions telles que Procore, PlanGrid, Fieldwire et Autodesk Construction Cloud sont devenues des références mondiales dans la gestion numérique des chantiers.

a) **Procore** : Cette plateforme propose une gestion intégrée des documents, des tâches, des ressources et des flux financiers. Selon Procore Technologies (2024), l'utilisation de la plateforme a permis de réduire de 30 % le temps consacré à la gestion administrative, d'améliorer la visibilité sur les coûts et de diminuer les litiges liés à la non-conformité documentaire [8].

b) **PlanGrid** : Spécialisée dans la gestion documentaire et la synchronisation des plans, PlanGrid a permis à des entreprises de réduire de 25 % les délais de livraison et de diminuer les erreurs d'exécution (PlanGrid, 2023) [9].

c) Fieldwire : Axée sur la planification des tâches et la gestion des équipes de terrain, Fieldwire favorise l'optimisation des ressources humaines, la réactivité face aux imprévus et la centralisation des informations (Djeddar et al., 2024) [7].

1.3.3. Synthèse des apports de la littérature

La littérature met en évidence l'intérêt des solutions numériques pour la gestion de chantier, mais souligne la nécessité d'une adaptation au contexte local, tant sur le plan fonctionnel que technologique et culturel. Le développement d'une application locale, telle que ConstructPro, doit s'inspirer des meilleures pratiques internationales tout en répondant aux besoins spécifiques du marché algérien, notamment en matière de conformité réglementaire, d'accessibilité, de sécurité et de support local.

1.3.4. Solutions artisanales largement utilisées

Face à ces contraintes, les entreprises algériennes recourent souvent à des solutions artisanales:

a) **Excel :** Utilisé pour la gestion des budgets, des stocks, des plannings et des rapports. Excel reste la solution la plus répandue, mais il présente des limites en termes de collaboration, de traçabilité et de sécurité des données.

b) **Trello :** Plateforme de gestion de projet basée sur des tableaux Kanban, Trello permet de suivre les tâches, de planifier les activités et de collaborer en équipe. Il est apprécié pour sa simplicité et son accessibilité, mais il manque de fonctionnalités spécifiques à la gestion de chantier (gestion financière intégrée, suivi des matériaux, intégration des laboratoires).

c) **WhatsApp :** Très utilisé pour la communication quotidienne entre les équipes de chantier. WhatsApp facilite l'échange rapide d'informations, mais il ne permet pas la traçabilité formelle des décisions, ni l'archivage structuré des documents et des échanges, ce qui nuit à la transparence et à la conformité réglementaire.

Les outils internationaux comme Procore et Buildertrend offrent des fonctionnalités avancées pour la gestion de chantier, mais leur adoption en Algérie est freinée par des barrières linguistiques, des coûts élevés, des problèmes de connectivité et un manque d'adaptation aux spécificités locales. Les solutions artisanales (Excel, Trello, WhatsApp) pallient partiellement ces limites, mais elles ne répondent pas aux besoins de centralisation, de traçabilité et de collaboration exigés par la gestion moderne des chantiers. La transition vers une solution numérique intégrée représente donc un enjeu stratégique pour la modernisation du secteur.

1.4. Synthèse des besoins

L'analyse du contexte, des problématiques et de la littérature permet de dégager un ensemble d'exigences fonctionnelles et non fonctionnelles pour une solution de gestion de chantier adaptée à l'Algérie.

1.4.1. Exigences fonctionnelles

a) **Gestion financière intégrée** : Suivi en temps réel des budgets, des dépenses, des paiements et des écarts de coûts ; génération automatique des situations de travaux et des factures ; alertes sur les dépassements ; reporting financier personnalisé.

b) **Gestion du personnel** : Planification des tâches, gestion des équipes et des compétences, suivi des heures de travail, des présences et des absences ; interface dédiée aux ouvriers pour la consultation des tâches, des paiements, des horaires, et la déclaration des incidents.

c) **Gestion des matériaux** : Suivi des stocks, gestion des commandes et des livraisons, traçabilité des matériaux depuis la commande jusqu'à la mise en œuvre ; intégration des résultats d'essais en laboratoire, gestion des non-conformités.

d) **Contrôle qualité** : Centralisation des résultats d'essais, gestion des non-conformités, suivi des actions correctives, génération de rapports de conformité ; interface dédiée aux laboratoires pour la saisie et la consultation des résultats.

e) **Marketplace intégré** : Mise en relation des entreprises et des ouvriers qualifiés, publication et recherche d'offres de services, gestion des contrats et des paiements via la plateforme, notation des prestataires.

f) **Gestion documentaire** : Archivage numérique, gestion des plans, des rapports, des photos, des documents contractuels, accès sécurisé pour tous les intervenants.

1.4.2. Exigences non fonctionnelles

a) **Accessibilité mobile et multiplateforme** : Application disponible sur smartphones, tablettes et ordinateurs, avec synchronisation des données en temps réel, fonctionnement en mode déconnecté et synchronisation différée.

b) **Sécurité et confidentialité** : Protection des données sensibles, gestion des droits d'accès, conformité aux réglementations locales en matière de protection des données, chiffrement des données.

c) **Interface multilingue** : Prise en charge du français et de l'arabe, avec une ergonomie adaptée aux différents profils d'utilisateurs (managers, ouvriers, laboratoires).

d) **Adaptabilité et évolutivité** : Possibilité d'ajouter de nouveaux modules, de personnaliser les fonctionnalités selon les besoins des entreprises, évolutivité de l'architecture logicielle.

e) **Support technique local** : Assistance technique en langue locale, documentation, formation des utilisateurs, maintenance évolutive.

1.4.3. Synthèse générale

La conception d'une solution telle que ConstructPro doit répondre à des enjeux multiples : digitalisation, intégration des processus, conformité réglementaire, accessibilité, sécurité, évolutivité et support local. Elle doit également favoriser la collaboration entre tous les acteurs du chantier, la traçabilité des opérations et l'amélioration continue de la performance, tout en s'adaptant aux spécificités du marché algérien. La réussite d'une telle solution repose également sur l'accompagnement au changement et la formation des utilisateurs à tous les niveaux de l'organisation.

a) Accessibilité multilingue (arabe/français/anglais) : ConstructPro se distingue par une interface multilingue, prenant en charge l'arabe, le français et l'anglais. Cette caractéristique répond à la diversité linguistique du secteur du BTP en Algérie, où les équipes de chantier, les gestionnaires et les laboratoires peuvent avoir des préférences linguistiques différentes. L'ergonomie de l'application est ainsi adaptée à tous les profils d'utilisateurs, facilitant l'adoption et l'utilisation quotidienne, même pour les ouvriers peu familiarisés avec les outils numériques.

b) **Plateforme abordable et adaptée au contexte local :** Contrairement aux solutions internationales, souvent coûteuses et mal adaptées aux réalités du marché algérien, ConstructPro propose une offre tarifaire accessible, pensée pour les PME et les entreprises

locales. L'application évite les coûts élevés de licence et de maintenance, tout en assurant un support technique local et une adaptation aux normes et exigences réglementaires algériennes. Cette accessibilité financière permet à un plus grand nombre d'entreprises du secteur de bénéficier des avantages de la digitalisation, sans barrière économique majeure.

c) **Mise en valeur des ouvriers via la marketplace intégrée :** ConstructPro intègre un module marketplace innovant, dédié à la valorisation des ouvriers et des prestataires. Ce module permet :

   a) Aux ouvriers de proposer leurs services, de consulter les offres d'emploi ou de mission, et de mettre en avant leurs compétences et expériences.

   b) Aux entreprises de rechercher, sélectionner et évaluer des profils qualifiés, facilitant ainsi le recrutement et l'affectation des ressources humaines sur les chantiers.

   c) D'assurer une transparence sur les contrats, les paiements et la notation des prestataires, favorisant la reconnaissance et la montée en compétence des ouvriers du secteur.

Cette fonctionnalité contribue à structurer le marché du travail dans le BTP, à renforcer la visibilité des travailleurs qualifiés et à fluidifier la mise en relation entre l'offre et la demande de main-d'œuvre.

1.5. Conclusion

En conclusion, le secteur de la construction en Algérie, bien que dynamique et porteur, souffre de limitations structurelles en matière de gestion de chantier, de coordination des acteurs, de contrôle qualité et de digitalisation. La littérature internationale démontre l'apport décisif des plateformes numériques, mais leur adaptation au contexte algérien nécessite une approche sur mesure, intégrant les spécificités réglementaires, organisationnelles, linguistiques et technologiques du pays. Le développement d'une application comme ConstructPro s'inscrit dans cette dynamique d'innovation, en proposant une solution intégrée, collaborative et évolutive, adaptée aux besoins réels des entreprises, des ouvriers et des laboratoires du secteur.

Le chapitre suivant présentera l'analyse détaillée des besoins des utilisateurs, le cahier des charges fonctionnel et l'architecture proposée pour l'application ConstructPro.

CHAPITRE 2 :

CONCEPTION ET DÉVELOPPEMENT DE CONSTRUCTPRO

2. Introduction

Le deuxième chapitre de ce mémoire est consacré à la conception et au développement de la plateforme ConstructPro, une solution numérique dédiée à la gestion intégrée des chantiers de construction. Dans un contexte où la digitalisation du secteur du BTP s'impose comme un levier de performance, il est essentiel de structurer rigoureusement les processus métiers et d'adapter les outils informatiques aux besoins concrets des utilisateurs. Ce chapitre présente en détail l'architecture fonctionnelle et technique de la plateforme, en insistant sur la spécification des exigences, la modélisation des données, l'ergonomie des interfaces et les choix technologiques qui garantissent la robustesse et l'évolutivité du système.

La démarche adoptée s'appuie sur une analyse approfondie des besoins des différentes parties prenantes du chantier : propriétaires de projet, chefs de projet, chefs de chantier, ouvriers, personnel de laboratoire et responsables administratifs. Chaque acteur occupe une place spécifique dans l'écosystème du projet, avec des responsabilités et des attentes propres. Pour garantir la cohérence des modules, une approche modulaire et itérative a été privilégiée, intégrant les principes de l'ingénierie logicielle, de l'expérience utilisateur et de la gestion agile.

La première partie du chapitre expose la méthodologie de recueil et de formalisation des exigences, à travers l'utilisation de cas d'utilisation, de user stories et de diagrammes UML. S'ensuivent la justification des choix architecturaux, l'adoption d'une architecture microservices, le choix des technologies backend et frontend, ainsi que les mécanismes d'authentification et d'hébergement. Une attention particulière est portée à la modélisation des données, à l'ergonomie des interfaces et à l'intégration continue, afin de doter ConstructPro d'une base solide et évolutive pour la gestion moderne des chantiers.

2.1. Spécification des exigences

2.1.1. Introduction

La phase de spécification des exigences est fondamentale dans le cycle de vie d'un projet logiciel, particulièrement pour une application aussi transversale que ConstructPro, destinée à la gestion de chantiers de construction. Elle vise à formaliser les besoins des différents acteurs, à anticiper les contraintes techniques et organisationnelles, et à garantir la cohérence entre les attentes utilisateurs et les solutions proposées. Cette étape conditionne la réussite des phases ultérieures de conception, de développement, de test et de déploiement [17].

2.1.2. Approche méthodologique

Pour garantir la flexibilité et l'adaptabilité du développement, ConstructPro a été conçu selon une approche Agile, principalement basée sur le framework Scrum. Cette méthodologie permet de travailler en cycles courts (sprints), d'impliquer régulièrement les utilisateurs finaux et de réajuster les priorités en fonction des retours du terrain [17] , [18].

L'identification des parties prenantes a constitué une étape préalable essentielle ont été recensés :

- Les chefs de projet et chefs de chantier, responsables de la supervision globale.
- Les ouvriers, principaux utilisateurs sur le terrain.
- Les responsables RH, en charge de la gestion administrative.
- Les techniciens et responsables de laboratoires, garants de la qualité des matériaux.
- Les fournisseurs et sous-traitants, partenaires externes.
- L'équipe de développement et de maintenance technique.

a) Recueil et analyse des besoins

Le recueil des besoins a été mené selon une démarche qualitative et participative :

- Entretiens semi-directifs avec les managers de chantiers, ouvriers, responsables de laboratoires et gestionnaires RH.
- Observation participante sur plusieurs chantiers pilotes afin d'identifier les processus métiers réels, les points de friction, les pratiques informelles et les usages numériques existants.
- Analyse documentaire : étude des outils actuellement utilisés (tableurs, logiciels de gestion, carnets papier), des procédures internes et des exigences réglementaires en vigueur dans le secteur du BTP en Algérie.

b) Formalisation par UML

L'UML (Unified Modeling Language) a été utilisé pour modéliser les exigences de manière formelle et visuelle. Les diagrammes principaux réalisés sont :

- Diagrammes de cas d'utilisation : identification des acteurs et de leurs interactions avec le système.
- Diagrammes de classes : structuration des objets métier et de leurs attributs.
- Diagrammes de séquence : description dynamique des scénarios d'utilisation.

c) User stories et backlog produit

L'approche Agile a permis de structurer le backlog produit sous forme d'user stories, facilitant la priorisation et l'ajustement itératif des fonctionnalités selon les retours des utilisateurs.

Exemples d'user stories :

- En tant que chef de projet ou chef de chantier, je souhaite visualiser l'état d'avancement des chantiers en temps réel pour réagir rapidement aux imprévus.
- En tant qu'ouvrier, je veux pointer mes heures d'arrivée et de départ via mon smartphone pour garantir la transparence de mon temps de travail.
- En tant que laboratoire, je souhaite déposer et valider les résultats des essais pour assurer la conformité des matériaux.

d) Rédaction des cas d'usage détaillés

Chaque cas d'usage a été documenté selon le modèle suivant : titre, acteurs, préconditions, scénario principal, scénarios alternatifs, postconditions, règles métier associées.

Exemple : Cas d'usage "Gérer les paiements ouvriers" (Chef de Projet)

- Acteurs : Manager, Système
- Préconditions : Ouvriers pointés, tâches validées.
- Scénario principal :
    a. Le manager accède à la liste des ouvriers.
    b. Il sélectionne ceux à payer.
    c. Le système calcule automatiquement le montant dû.
    d. Le manager valide le paiement.
    e. Les ouvriers reçoivent une notification.
- Scénario alternatif : Si une anomalie est détectée (pointage manquant, absence non justifiée), le paiement est bloqué et une alerte est générée.
- Postcondition : Le paiement est enregistré et l'historique mis à jour.

2.1.3. Modélisation des cas d'utilisation

a) Diagramme de cas d'utilisation – Chef de Projet

Le chef de projet est le pivot de la gestion du chantier. Il supervise les ressources humaines, les finances, les matériaux, la consultation des résultats de laboratoire et la gestion de la marketplace.

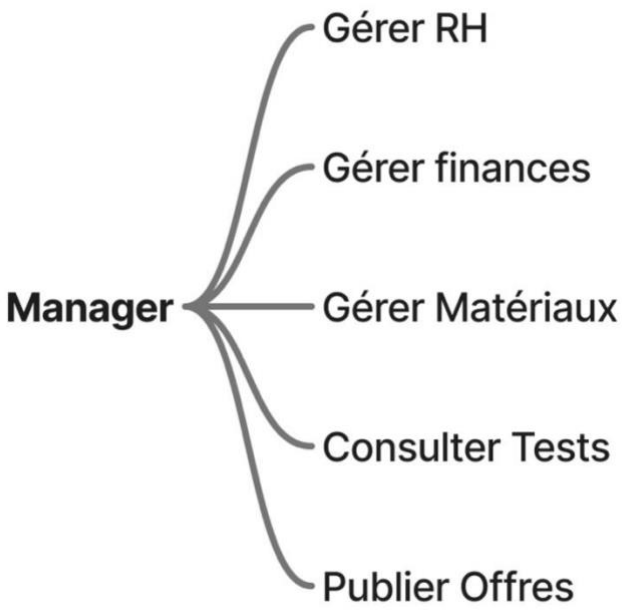


Figure 2.1 : Diagramme de cas d'utilisation – Chef de Projet

Tableau 2.1: Fonctionnalités Chef de Projet

Fonctionnalité	Description
Suivi global	Avancements
Consultation finances	Budgets, rapports, alertes
Validation livrables	Approbation documents, rapports
Accès documents	Consultation contrats, plans, rapports

b) Diagramme de cas d'utilisation – Ouvrier

L'ouvrier utilise l'application pour :

- Consulter ses tâches.
- Pointer ses heures.
- Suivre ses paiements.
- Publier ses services sur la marketplace.

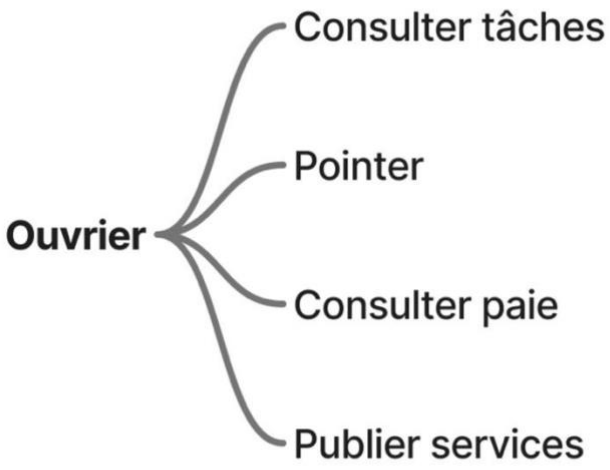


Figure 2.2 : Diagramme de cas d'utilisation – Ouvrier

Tableau 2.2 : Fonctionnalités Ouvrier

Fonctionnalité	Description
Pointage	Heures d'arrivée, départ
Consultation des tâches	Détail, échéances, notifications
Suivi des paiements	Bulletins de paie, historique
Marketplace	Publication, consultation d'offres

c) Diagramme de cas d'utilisation – Laboratoire

Le laboratoire gère :

- La saisie et la validation des résultats d'essais.
- La gestion des demandes de tests et rendez-vous
- La publication et consultations des services sur la marketplace.

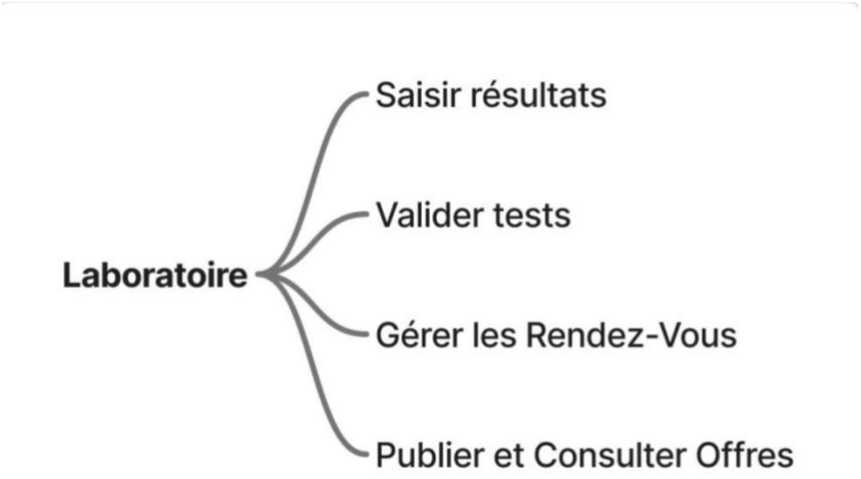


Figure 2.3 : Diagramme de cas d'utilisation – Laboratoire

Tableau 2.3 : Fonctionnalités Personnel Laboratoire

Fonctionnalité	Description
Saisie des résultats	Formulaires, ajout de fichiers
Suivi en temps réel	Avancement, notifications
Gestion documentaire	Archivage, versionning, accès rapide
Communication & Gestion de Rendez Vous	Alertes et gestion de rendez-vous

c) Diagramme de cas d'utilisation – Chef de Chantier

Le chef de chantier gère :

- La saisie et la gestion des taches des travailleurs.
- Le suivi d'avancement du projet.
- La gestion des ressources.
- La gestion documentaire.
- la consultation des résultats de laboratoire.
- La gestion de la marketplace.

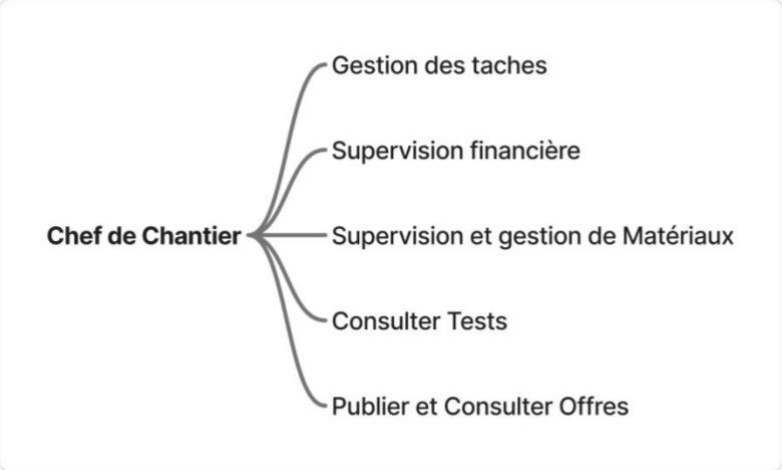


Figure 2.4 : Diagramme de cas d'utilisation – Chef de Chantier

Tableau 2.4 : Fonctionnalités Chef de Chantier

Fonctionnalité	Description
Gestion des tâches	Affectation, modification, suivi
Supervision financière	Consultation budgets, validation dépenses
Suivi global	Avancement, alertes
Communication	Notifications
Gestion documentaire	Accès et validation de rapports

e) Tableau récapitulatif des cas d'usage

Tableau 2.5 : Tableau récapitulatif des cas d'usage

Acteur	Cas d'usage principaux
Chef de Projet	Gestion RH, finances, matériaux, rapports, marketplace
Ouvrier	Tâches, pointage, paie, services marketplace
Laboratoire	Résultats tests, validation, gestion de rendez-vous

2.1.4. Modules fonctionnels approfondis

La plateforme ConstructPro intègre des modules spécialisés conçus pour répondre aux besoins opérationnels et stratégiques de chaque catégorie d'utilisateurs, tout en assurant une harmonisation des flux métiers.

- Module ouvriers : Ce module dépasse la simple gestion horaire en proposant une planification dynamique des tâches, permettant aux ouvriers de visualiser en temps réel leurs missions quotidiennes, de recevoir des alertes en cas de modifications de dernière minute et de résoudre automatiquement les conflits d'emploi du temps. Le système calcule les rémunérations en intégrant les heures travaillées, les majorations pour heures supplémentaires, les primes spécifiques et les absences justifiées, avec génération de fiches de paie détaillées accessibles via l'application.
- Module laboratoire : Structuré autour d'un processus sécurisé de gestion des documents, ce module permet d'associer aux essais techniques des rapports détaillés, des photographies de contrôles qualité et des certificats de conformité. Les résultats suivent un circuit de validation en trois étapes (brouillon, en attente de certification, archivé), déclenchant des notifications automatisées à chaque phase. Les responsables de chantier et les laboratoires bénéficient d'un suivi granularité des analyses par matériau ou projet, avec historiques complets et alertes proactives en cas d'anomalies détectées.
- Module ressources humaines : Centralisant la gestion administrative, ce module couvre l'intégralité du cycle de vie des contrats – de la rédaction initiale aux renouvellements programmés, avec rappels automatisés pour les échéances critiques. Il intègre un workflow intelligent pour les demandes de congés (saisie, approbation hiérarchique, calcul des soldes résiduels) et produit des rapports analytiques sur les tendances d'absentéisme. Les dossiers du personnel, incluant diplômes, attestations et évaluations de compétences, sont stockés de manière cryptée pour garantir la confidentialité [17], [19], [20].

- Module gestion des matériaux : Ce composant assure une traçabilité complète des ressources, depuis leur commande auprès des fournisseurs jusqu'à leur utilisation effective sur les chantiers. Il intègre des fonctionnalités d'alerte précoce pour les seuils critiques de stock, optimise les réapprovisionnements via l'analyse des consommations historiques, et gère les non-conformités grâce à un système de tickets assignables aux responsables qualité.
- Module marketplace : Dédié à la mise en relation professionnelle, cet espace permet aux gestionnaires de publier des appels d'offres pour des missions ponctuelles et aux travailleurs indépendants de proposer leurs services. Le système inclut un mécanisme d'évaluation post-mission favorisant la transparence des collaborations, ainsi qu'un suivi des candidatures avec statuts modifiables (en attente, acceptée, refusée).

Cette modularité architecturale permet une adaptation continue aux évolutions réglementaires et technologiques du secteur de la construction, tout en maintenant une expérience utilisateur cohérente à travers les différents profils.

2.1.5. Approche Agile et Identification des Parties Prenantes

L'approche Agile, et en particulier le framework Scrum, est privilégiée dans le développement de ConstructPro afin de garantir une flexibilité et une adaptabilité optimales tout au long du cycle de vie du projet. Cette méthode se caractérise par l'organisation du travail en cycles courts, appelés sprints, qui favorisent la livraison régulière de versions incrémentales du produit. Les utilisateurs finaux sont impliqués de manière continue, notamment lors des revues de sprint et des ateliers de priorisation, ce qui permet une réévaluation fréquente des objectifs et une adaptation rapide aux évolutions des besoins ou du contexte opérationnel. La démarche Agile encourage également une collaboration étroite entre les membres de l'équipe projet et l'ensemble des parties prenantes, facilitant la résolution proactive des problèmes et l'intégration des retours terrain. Grâce à cette dynamique, les fonctionnalités peuvent être ajustées de façon itérative, assurant ainsi que la solution développée reste en adéquation avec les attentes réelles des utilisateurs et les contraintes du secteur de la construction. Enfin, la transparence, la communication constante et l'amélioration continue, qui sont au cœur de l'Agilité, contribuent à la robustesse du projet et à la satisfaction des différents acteurs impliqués [18].

L'identification des parties prenantes constitue une étape préalable essentielle. Il s'agit de recenser tous les acteurs ayant un intérêt ou une influence sur le projet, qu'ils soient internes ou externes à l'organisation. Parmi les parties prenantes typiques, on retrouve :

- Les managers et chefs de chantier (supervision globale)

- Les ouvriers (utilisateurs terrain)
- Les responsables RH (gestion administrative)
- Les techniciens et laboratoires (qualité des matériaux)
- Les fournisseurs et sous-traitants (partenaires externes)
- L'équipe de développement et de maintenance technique

L'analyse des parties prenantes vise à comprendre leurs besoins, attentes, contraintes et niveaux d'influence. Des outils comme le diagramme d'affinité ou la création de personas aident à structurer cette analyse et à mieux cibler les actions de communication et de recueil des besoins.

2.1.5.1. Méthodes de Recueil des Besoins

La collecte des besoins est une phase déterminante pour garantir l'adéquation de la solution aux attentes des utilisateurs. Plusieurs méthodes complémentaires sont utilisées, chacune adaptée au contexte et aux objectifs du projet :

a) Entretiens

- Les entretiens individuels ou collectifs, souvent semi-directifs, permettent d'approfondir les besoins spécifiques de chaque type d'utilisateur ou de groupe d'utilisateurs.
- Ils offrent un espace d'expression libre où les parties prenantes peuvent détailler leurs attentes, leurs difficultés et leurs suggestions.
- L'entretien favorise la compréhension des processus métiers réels, des points de friction et des pratiques informelles.

b) Questionnaires

- Les questionnaires sont utiles pour collecter des données quantitatives et qualitatives de manière structurée, notamment lorsqu'il s'agit d'interroger un grand nombre de personnes.
- Ils permettent de quantifier les besoins, d'identifier des tendances générales et de recueillir des informations rapidement.
- Les questionnaires peuvent comporter des questions fermées (pour obtenir des statistiques) ou ouvertes (pour recueillir des suggestions et des retours détaillés).

c) Autres méthodes complémentaires

- Observation participante : permet d'identifier les usages réels sur le terrain et de repérer les écarts entre le travail prescrit et l'activité effective.

- Analyse documentaire : étude des outils existants, des procédures internes et des exigences réglementaires.
- Ateliers participatifs et groupes de discussion : favorisent l'échange d'idées et l'émergence de solutions innovantes par la confrontation des points de vue.

2.2. Architecture du système

2.2.1. Analyse et choix de l'architecture

2.2.1.1. Justification du choix micro services

L'architecture micro services a été privilégiée pour ConstructPro en raison de :

- La modularité : chaque domaine fonctionnel (RH, finances, matériaux, laboratoire, marketplace) est isolé dans un service indépendant.
- La scalabilité : possibilité de faire évoluer séparément les modules les plus sollicités (ex : marketplace lors de pics d'activité) [19].
- La robustesse : une panne sur un service n'affecte pas l'ensemble du système.
- La flexibilité technologique : chaque micro service peut être développé avec la technologie la plus adaptée à ses besoins spécifiques.

2.2.1.2. L'architecture monolithique et l'architecture microservices

- **Architecture monolithique :** L'architecture monolithique est une approche traditionnelle du développement logiciel dans laquelle toutes les fonctionnalités et composants d'une application sont regroupés au sein d'une seule unité logicielle. Cela signifie que l'interface utilisateur, la logique métier et la gestion des données coexistent dans une même base de code et sont déployés ensemble comme un tout indivisible. Cette structure simplifie initialement le développement et le déploiement, car l'ensemble du système peut être géré, testé et mis à jour de manière centralisée. Toutefois, cette forte interdépendance rend difficile l'évolution du système : une modification dans un module peut impacter l'ensemble de l'application, et la montée en charge devient rapidement complexe à mesure que l'application grandit ou que le nombre d'utilisateurs augmente.
- **Architecture microservices :** En contraste, l'architecture microservices propose de diviser l'application en une constellation de services indépendants, chacun étant responsable d'une fonction métier spécifique. Chaque microservice possède sa propre base de code, peut être développé, déployé et mis à l'échelle indépendamment des autres, et communique avec les autres services via des API bien définies. Cette

modularité favorise la flexibilité, la résilience et l'évolutivité : il est possible de mettre à jour ou de redémarrer un service sans perturber l'ensemble du système, et chaque équipe de développement peut se concentrer sur un périmètre fonctionnel restreint. Néanmoins, la gestion de la communication entre services, la supervision et la sécurité deviennent plus complexes, et l'intégration nécessite une orchestration rigoureuse.

2.2.1.3. Comparaison et choix architectural

Le choix entre une architecture monolithique et une architecture micro services dépend principalement de la taille, de la complexité et des besoins d'évolution de l'application. Pour une solution comme ConstructPro, qui intègre de multiples modules (gestion financière, gestion du personnel, laboratoire, marketplace, etc.), une architecture micro services peut s'avérer plus adaptée à long terme. En effet, elle permettrait une meilleure évolutivité, une maintenance facilitée et une adaptation rapide aux évolutions du secteur du BTP. Toutefois, pour un projet en phase de démarrage ou avec une équipe restreinte, une architecture monolithique peut offrir une mise en œuvre plus rapide et moins coûteuse, avant une éventuelle migration vers les micro services si la complexité et la charge augmentent.

Tableau 2.6 : Architecture Monolithe vs Architecture Microservices

Critère	Monolithe	Microservices
Déploiement	Unique	Indépendant Par service
Scalabilité	Globale	Par service
Maintenance	Complexe	Localisée
Résilience	Faible	Forte (pannes isolées)
Technologies	Uniforme	Hétérogène possible
Adaptation métier	Difficile	Rapide

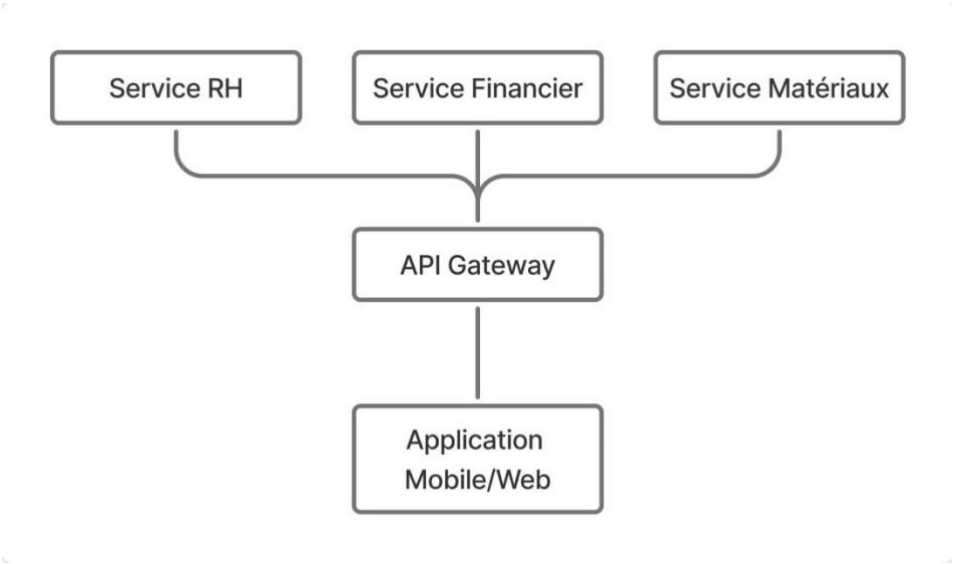


Figure 2.5 : Architecture microservices de ConstructPro

2.2.2. Choix technologiques

Définition de l'API : Une API, ou interface de programmation d'application, constitue un ensemble de conventions et de protocoles permettant à différents logiciels de communiquer et d'échanger des données de manière structurée et sécurisée. Elle agit comme un intermédiaire standardisé : un programme peut ainsi accéder aux fonctionnalités ou aux données d'un autre système sans connaître son fonctionnement interne. Dans la pratique, une API expose un ensemble de points d'accès (endpoints) et de méthodes bien définies, que les développeurs peuvent utiliser pour effectuer des opérations telles que la récupération, la création, la modification ou la suppression d'informations. Ce mécanisme favorise l'interopérabilité entre des applications hétérogènes, qu'il s'agisse de services web, d'applications mobiles ou de systèmes embarqués. En séparant clairement les rôles entre le fournisseur de service (serveur) et le consommateur (client), l'API permet de faire évoluer chaque composant indépendamment, tout en garantissant la cohérence et la sécurité des échanges.
En résumé, une API est un contrat technique qui facilite l'intégration, la modularité et l'évolutivité des systèmes informatiques modernes [17].

2.2.2.1. Backend

- Node.js : Environnement d'exécution JavaScript côté serveur, reconnu pour sa gestion asynchrone, sa rapidité et sa capacité à gérer des applications nécessitant des échanges temps réel ou une forte scalabilité. Idéal pour les API RESTful et les applications modernes nécessitant une architecture évolutive.

- API RESTful: Une API RESTful, ou interface de programmation respectant les principes REST (Representational State Transfer), désigne un ensemble de règles permettant à des applications logicielles d'échanger des données via le protocole HTTP de manière standardisée et indépendante du langage utilisé. Dans ce modèle, chaque élément manipulé par l'application (appelé ressource) est identifié par une adresse unique (URI), et les opérations sur ces ressources s'effectuent à l'aide de méthodes HTTP bien définies, telles que GET pour la lecture, POST pour la création, PUT pour la modification et DELETE pour la suppression. L'un des fondements d'une API RESTful est l'absence d'état côté serveur : chaque requête envoyée par le client doit contenir toutes les informations nécessaires à son traitement, ce qui facilite la scalabilité et la fiabilité du système. De plus, l'architecture REST encourage la séparation claire entre le client (qui consomme les données) et le serveur (qui les fournit), rendant possible l'évolution indépendante de chaque composant. Les échanges de données se font généralement dans des formats légers et universels, comme JSON, ce qui favorise l'interopérabilité entre des systèmes hétérogènes. Par ailleurs, une API RESTful peut tirer parti de la mise en cache pour optimiser les performances et réduire la charge sur le serveur. En somme, une API RESTful constitue une passerelle universelle et structurée, permettant à des applications web, mobiles ou autres services de dialoguer efficacement, de manière sécurisée et évolutive, dans des architectures modernes distribuées [19].
- Express.js : création rapide d'API RESTful.

2.2.2.2. Base de données

- PostgreSQL : Base de données relationnelle open source, robuste et fiable, adaptée à la gestion de données structurées nécessitant intégrité référentielle, transactions et requêtes complexes (jointures, agrégations). Idéale pour les applications avec des modèles de données bien définis et des besoins analytiques avancés.
- MongoDB : Base de données NoSQL orientée documents (JSON), flexible et évolutive, adaptée au stockage de données non structurées ou semi-structurées. Elle permet d'ajuster la structure des données à la volée et de gérer des volumes importants d'informations hétérogènes. Convient pour les modules nécessitant une grande flexibilité de schéma ou le stockage de fichiers joints.

2.2.2.3. Application mobile

- React Native : développement cross-plateforme, expérience utilisateur homogène sur Android et iOS.

2.2.2.4. CI/CD

- GitLab CI/CD : automatisation des tests, compilation, déploiement, rollback rapide.

Tableau 2.7 : Synthèse des choix technologiques

Domaine	Technologie	Justification principale
Backend	Node.js, Express	Performance, scalabilité, écosystème
Base de données	PostgreSQL, MongoDB	Structure relationnelle + flexibilité
Mobile	React Native	Cross-plateforme, rapidité
CI/CD	GitLab CI/CD	Automatisation, intégration continue

Ce tableau présente les technologies choisies par domaine : Node.js/Express pour la performance, PostgreSQL/MongoDB pour la flexibilité, React Native pour la rapidité mobile, et GitLab CI/CD pour l'automatisation.

2.2.3. Détails supplémentaires sur les modules

2.2.3.1. Ouvriers : paie automatique, planning

a) Paie automatique : Le module permet de générer automatiquement les variables de paie à partir des feuilles d'heures renseignées par les ouvriers ou validées par le chef de chantier. Cela inclut le calcul des heures normales, des heures supplémentaires, des absences, des primes (ex : panier repas, trajets), et la génération des bulletins de paie. Les outils modernes comme Alobees proposent la génération de ces variables en un clic, avec la possibilité d'exporter les données au format PDF, et même de personnaliser les règles de calcul selon l'entreprise [21].

b) Planning : La gestion du planning des ouvriers repose sur un module numérique spécifiquement conçu pour organiser et optimiser la répartition des effectifs sur les différents chantiers. Ce dispositif permet non seulement d'attribuer les ouvriers à des sites précis en fonction de leurs compétences et disponibilités, mais aussi d'avoir une vision globale et actualisée de la présence de chaque membre de l'équipe. Grâce à ce système, il devient possible d'anticiper les besoins en main-d'œuvre selon l'avancement des travaux, d'identifier rapidement les périodes de sous-effectif ou de sureffectif, et de procéder à des ajustements en temps réel en cas d'absence imprévue ou de modification des priorités opérationnelles. Les solutions logicielles modernes dédiées au BTP proposent des interfaces visuelles

interactives qui facilitent la planification : l'utilisateur peut, par exemple, afficher le calendrier des interventions par semaine, par salarié ou par chantier, et déplacer les affectations simplement à l'aide de la souris pour réorganiser les équipes. Cette approche dynamique, qui s'appuie sur des fonctionnalités de glisser-déposer et des filtres personnalisés, améliore la réactivité des gestionnaires et contribue à une utilisation optimale des ressources humaines, tout en renforçant la traçabilité des décisions prises lors de la planification [22].

2.2.3.2. Laboratoires : dépôts de fichiers, suivi en temps réel

a) Dépôts de fichiers : Le module laboratoire permet la saisie, le dépôt et l'archivage sécurisé des résultats d'essais (béton, acier, granulats, etc.). Les fichiers (rapports de tests, certificats, photos) sont attachés aux dossiers des chantiers et consultables par les parties prenantes. La gestion documentaire inclut la création de dossiers personnalisés, le contrôle d'accès, et la possibilité de générer automatiquement des rapports à partir des données saisies.

b) Suivi en temps réel : Le suivi en temps réel permet de visualiser l'état d'avancement des essais, la conformité des matériaux, la gestion de rendez-vous, et l'historique des interventions du laboratoire. Les managers peuvent consulter en direct les résultats validés, recevoir des notifications en cas de non-conformité, et suivre l'évolution des demandes de tests.

2.3. Modélisation de la base de données

2.3.1. Schéma entité-relation (E-R)

Le schéma E-R de ConstructPro a été conçu pour garantir la cohérence, la sécurité et la rapidité d'accès aux données. Il intègre les principales entités métier et leurs relations.

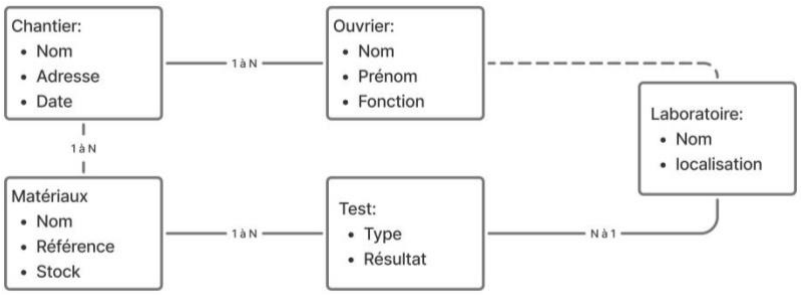


Figure 2.6 : Schéma entité-relation simplifié

2.3.2. Description détaillée des entités

- Chantier : Chaque chantier est identifié de manière unique et comporte des attributs essentiels pour le pilotage du projet : identifiant, nom, localisation géographique, responsable du chantier, dates de début et de fin prévues, état d'avancement (pourcentage

ou statut), et budget alloué. Ces informations permettent de suivre la progression, d'anticiper les besoins et de contrôler les coûts.

- Ouvrier : L'entité ouvrier regroupe l'ensemble des travailleurs affectés aux chantiers. Elle comprend : identifiant, nom, prénom, compétences spécifiques, historique de présence (pointages), statut (actif/inactif), coordonnées (téléphone, email), ainsi que les notes ou évaluations reçues suite aux missions réalisées. Cette granularité facilite la gestion des ressources humaines et l'optimisation des affectations.
- Matériau : Chaque matériau utilisé sur le chantier est référencé avec : identifiant, type (béton, acier, etc.), quantité disponible, fournisseur, date d'entrée et de sortie du stock, affectation au chantier concerné et coût unitaire. Cette structuration assure la traçabilité complète des flux de matériaux et permet un suivi précis des consommations et des coûts.
- Test : L'entité test représente chaque essai ou contrôle réalisé sur les matériaux. Elle comprend : identifiant, type d'essai (compression, traction, etc.), date de réalisation, résultat obtenu, laboratoire associé, documents joints (rapports, photos) et statut de conformité. Cette entité garantit la traçabilité des contrôles qualité et la conformité des matériaux utilisés.
- Laboratoire : Le laboratoire est identifié par un identifiant unique, un nom, une adresse, des coordonnées de contact, la liste des tests réalisés pour chaque chantier, et les certifications détenues.

2.3.3. Relations et intégrité référentielle

Tableau 2.8 : Relations clés entre les entités

Entité source	Entité cible	Type de relation	Description
Chantier	Ouvrier	1 à N	Un chantier comprend plusieurs ouvriers
Chantier	Matériau	1 à N	Un chantier utilise plusieurs matériaux
Matériau	Test	1 à N	Un matériau peut faire l'objet de plusieurs tests
Test	Laboratoire	N à 1	Un test est réalisé par un laboratoire

2.3.3.1. Type de relation 1 à N et N à 1

Dans la modélisation des bases de données relationnelles, la relation de type « un à plusieurs » (1N) est l'une des plus courantes et fondamentales pour représenter les associations entre entités. Une relation 1 à N signifie qu'un enregistrement d'une première table (appelée table parente) peut être lié à plusieurs enregistrements d'une seconde table (table enfant), tandis que chaque enregistrement de la table enfant ne peut être associé qu'à un seul enregistrement de la table parente. Par exemple, dans un système de gestion de chantier, un chantier (parent) peut regrouper plusieurs ouvriers (enfants), mais chaque ouvrier n'est affecté qu'à un seul chantier à la fois.

Techniquement, cette relation est implémentée par l'ajout d'une clé étrangère dans la table enfant, qui référence la clé primaire de la table parente. Cela permet d'assurer l'intégrité référentielle et d'éviter la duplication des données. Ce type de relation favorise la structuration logique et l'extensibilité du modèle, en permettant d'ajouter autant d'enfants que nécessaire pour chaque parent, tout en maintenant la cohérence des liens.

La relation N à 1 (plusieurs à un) est simplement la lecture inverse de la relation 1 à N : plusieurs enregistrements de la table enfant sont reliés à un seul enregistrement de la table parente. Par exemple, plusieurs commandes (enfants) peuvent être passées par un même client (parent), mais chaque commande ne concerne qu'un seul client. Cette dualité de lecture est essentielle pour comprendre la navigation et les jointures dans une base de données relationnelle.

En résumé, les relations 1 à N et N à 1 sont centrales dans la conception des bases de données, car elles permettent de modéliser efficacement la majorité des interactions du monde réel, tout en assurant la cohérence, la normalisation et la robustesse du schéma de données.

2.4. Interfaces Utilisateur (UX/UI)

2.4.1. Maquettes (wireframes) des interfaces

La conception UX/UI de ConstructPro a été réalisée selon une démarche centrée utilisateur, intégrant des ateliers de co-conception et des tests d'utilisabilité.

a) Interface Chef de Projet

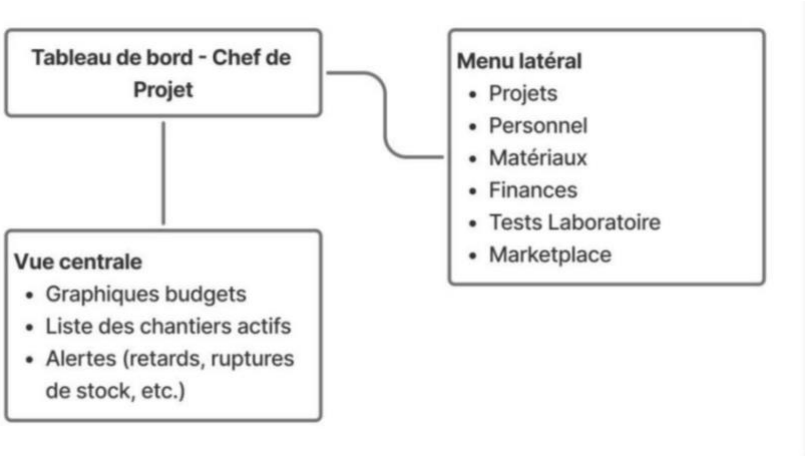


Figure 2.7 : Wireframe – Chef de Projet

b) Interface Ouvrier

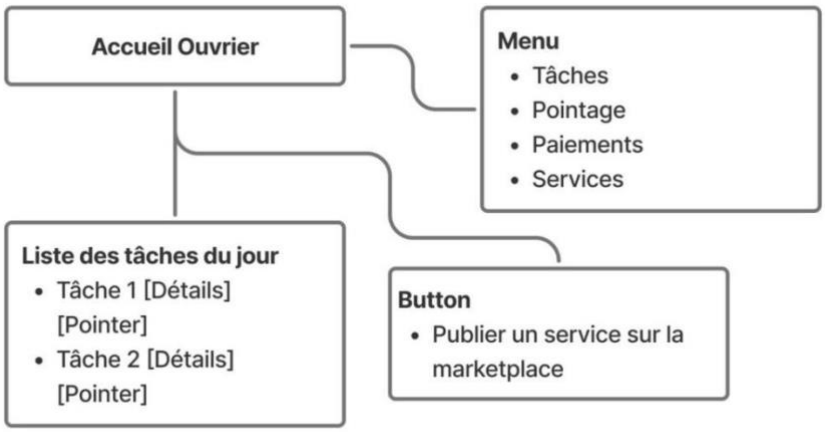


Figure 2.8 : Wireframe – Ouvrier

c) Interface Laboratoire

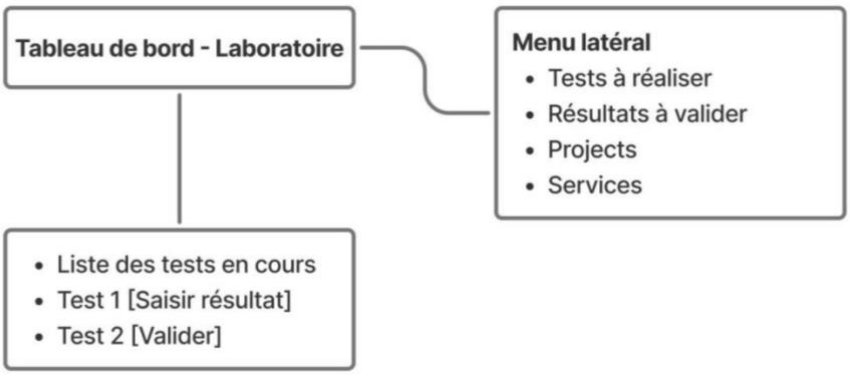


Figure 2.9 : Wireframe – Laboratoire

d) Interface Chef de Chantier

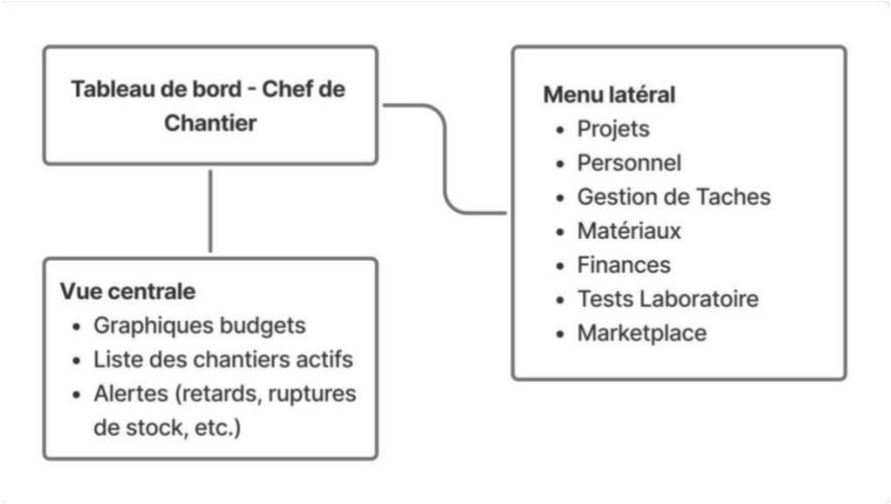


Figure 2.10 : Wireframe – Chef de Chantier

2.4.2. Ergonomie et adaptation culturelle

a) Trilinguisme et accessibilité

- Trilinguisme EN/FR/AR : Toutes les interfaces sont disponibles en anglais, français et en arabe, avec gestion dynamique du sens de lecture et des éléments graphiques.
- Accessibilité mobile : Zones cliquables larges, navigation simplifiée, typographie adaptée, contraste élevé.

b) Simplicité et efficacité

- Réduction de la charge cognitive : Hiérarchisation visuelle, suppression des informations non essentielles.
- Feedback utilisateur : Messages de confirmation, alertes en cas d'erreur, progression visuelle lors des chargements.
- Assistance contextuelle : Tutoriels interactifs, info-bulles, support intégré.

c) Adaptation aux usages locaux

- Icônes et symboles adaptés : Utilisation de pictogrammes compréhensibles par une population peu familiarisée avec l'informatique.
- Navigation intuitive : Parcours utilisateur testés et validés auprès d'un panel d'utilisateurs algériens [24].

2.4.3. Expérience utilisateur avancée

L'expérience utilisateur occupe une place centrale dans la conception de ConstructPro. La navigation repose sur des menus à icônes, adaptés à chaque profil (ouvrier, manager, laboratoire), permettant un accès rapide et intuitif aux modules essentiels.
Le responsive design assure une accessibilité optimale sur tous types de terminaux, des smartphones aux tablettes et ordinateurs portables, en tenant compte des contraintes spécifiques du chantier (utilisation avec gants, forte luminosité, bruit ambiant).
Les interfaces sont personnalisées : les ouvriers accèdent prioritairement au pointage, au planning et à la paie ; les chefs de chantier disposent de tableaux de bord de supervision et de gestion des incidents ; les laboratoires bénéficient d'outils avancés de gestion documentaire et de suivi des essais [19], [24].

2.5. Implémentation

2.5.1. Développement des modules

a) Module financier

- Suivi des budgets par chantier, alertes de dépassement.
- Gestion des paiements des ouvriers, génération de bulletins de paie.
- Gestion de Rendez-vous de prise de tests.
- Génération de rapports financiers, export PDF.

b) Module ressources humaines

- Création et gestion des profils ouvriers, gestion des compétences.
- Pointage des heures via application mobile.
- Gestion des absences, plannings, affectations par chantier.
- Suivi des performances.

c) Module gestion des matériaux

- Inventaire des matériaux, gestion des entrées/sorties.
- Suivi des commandes, fournisseurs, alertes de rupture.
- Historique des mouvements, affectation par chantier.

d) Module laboratoire

- Saisie des résultats d'essais (béton, acier, granulats, etc.).
- Validation et génération automatique de rapports.
- Archivage sécurisé des documents de test.

e) Module marketplace

- Publication d'offres d'emploi et de services.
- Recherche multicritère de prestataires (compétences, disponibilité, notation).

2.5.2. Intégration continue et déploiement (CI/CD)

a) Mise en place de pipelines CI/CD

- Automatisation des tests unitaires, d'intégration et de non-régression à chaque commit.
- Génération automatique de builds pour les applications mobiles et backend.
- Déploiement sur environnements de pré-production et production via des pipelines sécurisés.
- Supervision post-déploiement (logs, alertes, métriques de performance).

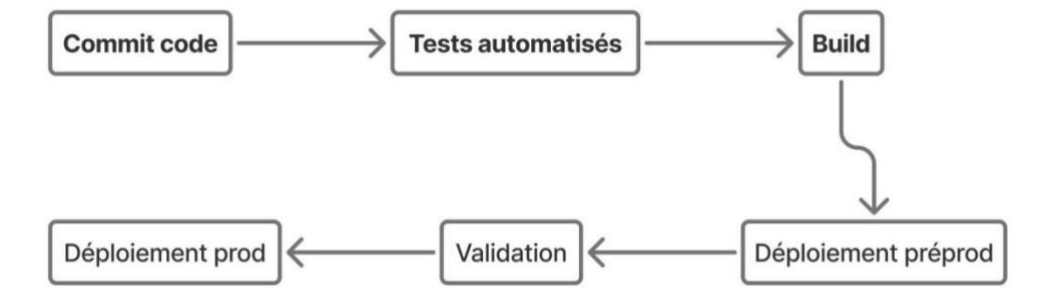


Figure 2.11 : Pipeline CI/CD simplifié

b) Sécurité et résilience

- Intégration de tests de sécurité automatisés (analyse statique, détection de vulnérabilités).
- Mise en place de sauvegardes régulières et de procédures de restauration.
- Surveillance continue de la disponibilité des services.

2.5.3. Documentation technique et gestion de versions

La documentation technique de ConstructPro est générée automatiquement à l'aide de Swagger (OpenAPI), offrant une description exhaustive et interactive de l'API REST. Chaque endpoint, paramètre, réponse et exemple d'utilisation est documenté, facilitant l'intégration de nouveaux modules ou de partenaires externes [20], [25].

La gestion des versions (versioning) est systématique : chaque évolution majeure de l'API ou du schéma de données est versionnée (v1, v2…), ce qui garantit la compatibilité ascendante et la maintenance évolutive du système. Un système de gestion des tickets (Jira, GitHub Issues)

est en place pour le suivi des bugs, des demandes d'évolution et la planification des mises à jour, assurant une maintenance efficace et transparente.

2.6. Amélioration de l'expérience utilisateur

2.6.1. Navigation par icônes

L'utilisation d'icônes dans la navigation améliore la rapidité d'accès aux fonctionnalités et la compréhension immédiate, surtout pour des utilisateurs peu familiers avec l'informatique ou sur des écrans réduits comme les smartphones. Les icônes servent de raccourcis visuels, réduisent la charge cognitive et économisent de l'espace, ce qui est crucial pour des applications mobiles ou riches en fonctionnalités. Cependant, il est essentiel de veiller à leur clarté, leur cohérence stylistique et leur taille adaptée. Trop d'icônes ou des icônes ambiguës peuvent nuire à la lisibilité et à la navigation. Les conventions doivent être respectées (ex. : disquette pour "sauvegarder"), et chaque icône doit être accompagnée d'un label ou d'une info-bulle pour éviter toute confusion, notamment pour les nouveaux utilisateurs.

2.6.2. Accessibilité offline

L'accessibilité hors ligne est primordiale pour les utilisateurs de terrain (ouvriers, chefs de chantier) qui peuvent se retrouver sans connexion sur site. Une application bien conçue doit permettre de consulter, saisir et stocker localement les données (feuilles d'heures, rapports, formulaires) en mode offline, puis de synchroniser automatiquement ces informations dès que la connexion est rétablie. Cela garantit la continuité du travail et évite la perte de données, tout en simplifiant l'expérience utilisateur : aucune action manuelle n'est requise pour la synchronisation [26].

2.6.3. Responsive design

Le responsive design assure que l'interface reste lisible et fonctionnelle quel que soit le terminal utilisé (ordinateur, tablette, smartphone). Cela passe par l'utilisation de grilles flexibles (CSS Flexbox, Grid), de media queries et de frameworks comme Bootstrap, qui permettent d'adapter la disposition et la taille des éléments à l'écran disponible. Un design responsive facilite la consultation et la saisie d'informations sur chantier, au bureau ou en laboratoire, et garantit l'accessibilité à tous les profils d'utilisateurs, même sur des écrans de tailles très différentes.

2.6.4. Interfaces adaptées selon les profils

Pour maximiser l'efficacité opérationnelle et la satisfaction des utilisateurs, chaque interface de ConstructPro est conçue pour répondre précisément aux besoins, contraintes et habitudes de chaque profil métier :

a) **Chef de projet / Site manager :** L'interface du chef de projet, pensée pour la supervision multi-chantiers, met l'accent sur la consolidation des données et la prise de décision stratégique. Le tableau de bord principal agrège les indicateurs de performance de tous les chantiers suivis : avancement global, respect des plannings, état des budgets, alertes critiques et conformité réglementaire. Le chef de projet dispose d'outils de planification avancée permettant de visualiser et d'ajuster les ressources humaines et matérielles sur plusieurs sites, d'anticiper les besoins en fonction des échéances et de réaffecter les équipes en cas d'imprévu. Les modules de gestion documentaire, de suivi financier et de communication inter-équipes sont intégrés de façon transversale, offrant une expérience fluide et cohérente. Les notifications intelligentes mettent en avant les priorités du jour (jalons à valider, incidents majeurs, demandes de validation), tandis que des filtres personnalisables facilitent l'analyse et le pilotage des projets complexes. Enfin, l'interface permet la génération automatique de rapports consolidés à destination de la direction ou du maître d'ouvrage.

b) **Chef de chantier :** L'espace du chef de chantier est structuré autour d'un tableau de bord synthétique, offrant une vision globale et en temps réel de l'état du chantier. L'interface propose un accès direct à la gestion des équipes : affectation ou réaffectation des ouvriers, suivi des présences, validation des pointages et gestion des absences. La supervision des tâches est facilitée par des listes dynamiques et des filtres permettant d'identifier rapidement les missions en retard ou les incidents signalés. Les alertes et notifications (non-conformités, incidents sécurité, demandes urgentes) sont affichées en temps réel en haut de l'écran. Les rapports d'avancement, les indicateurs clés de performance et les documents techniques sont accessibles en un clic, avec la possibilité de générer ou d'exporter des synthèses personnalisées pour la réunion quotidienne ou le reporting hebdomadaire.

c) **Ouvrier :** L'interface dédiée aux ouvriers privilégie la simplicité et l'accessibilité. Dès la connexion, l'utilisateur accède à un tableau de bord épuré affichant ses tâches du jour, son planning, et un bouton de pointage rapide. Les principales actions – pointer l'arrivée ou le départ, consulter les missions, saisir les heures travaillées – sont accessibles en un seul clic grâce à des icônes larges, explicites et contrastées, facilitant l'utilisation même sur le terrain ou avec des gants. Les informations essentielles (heures restantes, alertes de retard, notifications de validation de paie) sont mises en avant, tandis que les fonctionnalités secondaires restent discrètes afin de ne pas surcharger l'écran. L'ensemble de l'interface est optimisé pour la lisibilité, avec une taille de police adaptée, un contraste élevé et une

navigation linéaire, garantissant une prise en main rapide pour tous les niveaux de familiarité numérique.

d) **Laboratoire :** L'espace laboratoire est conçu pour optimiser la gestion documentaire et la traçabilité des essais. L'accueil présente la liste des tests en cours, avec un accès direct à la saisie ou à la validation des résultats. Le dépôt de fichiers (rapports, photos, certificats) s'effectue par glisser-déposer, et chaque document est automatiquement lié au chantier, au matériau et à la date correspondante. Les fonctions de recherche et de filtrage avancées permettent de retrouver rapidement un historique d'essais ou de générer un rapport synthétique pour un audit. La génération automatique de rapports, la gestion des demandes de tests et la consultation des certifications sont intégrées dans un workflow fluide, minimisant les manipulations manuelles. L'interface est optimisée pour la gestion de gros volumes de documents et la consultation rapide, tout en garantissant la sécurité et la confidentialité des données sensibles.

2.7. Conclusion

La personnalisation peut aller jusqu'à l'adaptation des menus, des raccourcis et des tableaux de bord selon le rôle, afin de ne présenter que les informations et actions pertinentes pour chaque profil, réduisant ainsi la complexité et le risque d'erreur.

En conclusion, ce chapitre a montré que la conception et le développement de ConstructPro reposent sur une démarche structurée, orientée vers la satisfaction des besoins métiers du secteur de la construction. L'analyse des exigences, la modélisation rigoureuse des processus et des données, ainsi que le choix pertinent des technologies, ont permis de bâtir une architecture logicielle robuste, évolutive et interopérable.

L'intégration des différents modules, adaptés à chaque profil d'utilisateur. Du propriétaire de projet à l'ouvrier, en passant par le chef de projet, le chef de chantier et le personnel de laboratoire, illustre la volonté de couvrir l'ensemble du cycle de vie du chantier. Les diagrammes de cas d'utilisation, user flows et wireframes présentés mettent en avant la richesse fonctionnelle de la solution et la cohérence des parcours utilisateurs.

La modélisation avancée des données, l'attention portée à l'intégrité référentielle et à la sécurité, ainsi que l'ouverture vers les technologies innovantes, positionnent ConstructPro comme une solution évolutive et fiable. Ce chapitre pose ainsi les bases pour l'analyse de la mise en œuvre, de l'évaluation et de l'impact de ConstructPro, qui seront abordés dans les chapitres suivants.

CHAPITRE 3 :

VALIDATION, RÉSULTATS ET PERSPECTIVES

3. Introduction

La transformation numérique du secteur du bâtiment et des travaux publics (BTP) représente aujourd'hui un enjeu stratégique majeur pour la compétitivité, la qualité et la durabilité des projets d'infrastructure, tant à l'échelle internationale que dans le contexte algérien. Face à la complexité croissante des opérations, à la multiplicité des intervenants et à l'exigence accrue de traçabilité et de conformité, l'introduction de solutions digitales spécialisées s'impose comme une réponse incontournable aux défis opérationnels et managériaux des chantiers modernes. Ce chapitre s'inscrit dans cette dynamique en proposant une validation approfondie de l'application ConstructPro, à travers l'étude de cas du chantier de Berrouaghia, projet emblématique d'infrastructure éducative en Algérie.

L'objectif de ce chapitre est double. D'une part, il s'agit d'évaluer, selon une démarche rigoureuse et académique, la robustesse, la fiabilité et l'ergonomie de ConstructPro, en s'appuyant sur une simulation prédictive fondée sur les données historiques du chantier et les meilleures pratiques internationales en matière de gestion numérique de projet. D'autre part, il vise à quantifier l'impact potentiel de la digitalisation sur la productivité, la qualité, la gestion des ressources humaines et matérielles, ainsi que sur la satisfaction des parties prenantes, en mobilisant des modèles d'intelligence artificielle et des benchmarks issus de la littérature scientifique et professionnelle.

La méthodologie adoptée combine une analyse descriptive des performances réelles du chantier avant digitalisation, une simulation IA permettant d'estimer les gains attendus après intégration de ConstructPro, et une évaluation qualitative de l'acceptabilité de la solution par les différents profils d'utilisateurs. La portée de cette validation reste toutefois circonscrite à la simulation, en l'absence de tests réels in situ, ce qui implique que les résultats doivent être interprétés comme des tendances prédictives et non comme des mesures expérimentales directes. Ce chapitre s'articule ainsi autour de la présentation du cas d'étude, de la description détaillée de la solution logicielle, de la validation fonctionnelle et technique simulée, de l'analyse comparative avant/après, de la modélisation prédictive, puis d'une discussion critique sur les limites et perspectives d'amélioration

3.1 Objectifs et méthodologie de validation

3.1.1 Objectifs généraux

La validation de l'application ConstructPro vise à démontrer, dans le contexte du chantier de Berrouaghia, la capacité d'un outil numérique spécialisé à transformer la gestion de projet en BTP en Algérie. Les objectifs sont :

a) Évaluer la robustesse technique, la fiabilité, la sécurité et l'ergonomie de ConstructPro dans un environnement réel.

b) Mesurer l'impact simulé sur la productivité, la traçabilité, la qualité, la gestion des ressources humaines et matérielles, et la conformité réglementaire.

c) Prédire, à l'aide de modèles d'intelligence artificielle et de benchmarks internationaux, les gains potentiels sur les performances du chantier [31], [35].

d) Analyser l'acceptabilité, l'utilisabilité et l'adoption potentielle de l'application par les différents profils d'utilisateurs.

Il convient de souligner que la portée de cette validation reste circonscrite à une simulation basée sur l'analyse de données historiques du chantier test, en l'absence de tests réels in situ. Ainsi, les résultats obtenus doivent être interprétés comme des estimations prédictives et non comme des mesures issues d'une expérimentation directe sur le terrain.[30] L'ensemble de l'analyse repose sur l'exploitation des données historiques détaillées du chantier de Berrouaghia et sur l'intégration de benchmarks internationaux issus de la littérature scientifique et professionnelle pour la simulation par intelligence artificielle [31], [35].

3.1.2 Méthodologie adoptée

La méthodologie de validation suit les meilleures pratiques académiques en matière de vérification et validation logicielles, combinant :

a) Collecte de données historiques du chantier (planning, coûts, incidents, essais labo, effectifs, transactions).

b) Analyse descriptive des performances réelles sans digitalisation.

c) Simulation prédictive : utilisation de modèles IA et de benchmarks pour estimer l'impact de ConstructPro sur ces indicateurs (productivité, coûts, délais, qualité, sécurité)1.

d) Comparaison avant/après (scénario simulé) et analyse critique des écarts.

e) Évaluation qualitative : analyse de l'ergonomie, de l'adoption potentielle et de la résistance au changement.

f) Documentation visuelle : insertion de captures d'écran et d'exemples d'interfaces à des emplacements précis pour illustrer chaque fonctionnalité clé.

La simulation IA s'appuie sur des modèles de régression et des coefficients issus de la littérature internationale, validés par des études de cas récentes dans le secteur du BTP. Ce choix méthodologique est justifié par l'impossibilité de réaliser un test terrain et par la reconnaissance, dans la recherche académique, de la valeur prédictive de ces approches pour l'évaluation d'innovations numériques

Tableau 3.1 : Synthèse de la méthodologie

Étape	Description	Outils/Méthodes
Collecte des données	Données du chantier reel	Tableaux, rapports, logs
Analyse descriptive	Performances sans digitalization	Tableaux comparatifs
Simulation IA	Prédiction des gains ConstructPro	Modèles ML, benchmarks
Validation ergonomique	Analyse interfaces et expérience utilisateur	SUS, entretiens, captures
Documentation visuelle	Captures d'écran, schémas d'architecture	Screenshots, wire-frames

3.2. Présentation du cas d'étude : Chantier test de Berrouaghia

3.2.1 Présentation générale

Le chantier de Berrouaghia, désigné officiellement comme "Collège Base 06 au site 1316 logements LPL POS 04 Chorfa, Commune de Berrouaghia, Wilaya de Médéa", constitue un exemple emblématique de projet d'infrastructure éducative de taille moyenne en Algérie. Ce chantier a été retenu comme cas d'étude pour la simulation d'intégration de la plateforme ConstructPro, en raison de sa complexité organisationnelle, de la diversité de ses intervenants et de la richesse de ses données historiques.

3.2.1.1. Nature et caractéristiques du projet

a) Type de projet : Construction d'un établissement scolaire (collège) comprenant également des logements de fonction pour le personnel encadrant, intégrant tous les corps d'état (gros œuvre, second œuvre, VRD, équipements techniques, aménagements extérieurs).

b) Surface bâtie : 4 800 m², répartis entre les salles de classe, les espaces administratifs, les logements, les locaux techniques et les espaces communs.

c) Effectif mobilisé : 55 ouvriers spécialisés et polyvalents, 8 ingénieurs (génie civil, structures, électricité, hydraulique), 3 laboratoires partenaires chargés des essais et du contrôle qualité des matériaux.

d) Organisation : Présence d'une entreprise générale, de sous-traitants pour certains lots techniques, et d'un bureau de contrôle externe.

e) Modules ConstructPro simulés : Gestion du personnel (RH), pointage (présence/absence, heures), gestion des matériaux (stocks, commandes, consommations), résultats des essais laboratoire (béton, acier, sols), marketplace interne pour ouvriers et sous-traitants, tableau de bord analytique pour le suivi global du projet.

f) Période d'analyse : du 1er février 2023 au 31 décembre 2024, couvrant à la fois la phase de gros œuvre, de second œuvre et de finition.

3.2.1.2. Enjeux spécifiques du chantier

Ce chantier présente plusieurs enjeux caractéristiques du contexte algérien :

a) Gestion multi-acteurs : coordination entre différents métiers, sous-traitants, laboratoires et administration.

b) Contraintes temporelles : nécessité de respecter des délais stricts imposés par le maître d'ouvrage, avec pénalités en cas de retard.

c) Gestion documentaire : volume important de documents techniques, de rapports d'essais, de bons de livraison et de situations financières.

d) Sécurité et qualité : respect des normes nationales de construction, traçabilité des essais laboratoire, gestion des incidents sécurité.

e) Communication : échanges quotidiens entre le terrain, le bureau d'études, le laboratoire et le maître d'ouvrage.

Ce chantier est représentatif des projets BTP algériens de taille moyenne, tant par sa complexité organisationnelle que par la diversité des intervenants et des tâches à coordonner

Tableau 3.2 : Données historiques du chantier test de Berrouaghia

Indicateur	Valeur observée
Retard cumulé	3,5 mois
Dépassement budgétaire	13 %
Gaspillage matériaux	12 %
Incidents sécurité/an	6
Productivité journalière	71 %
Temps administratif (h/mois)	40
Satisfaction client (/5)	3,2

3.2.1.3. Analyse des indicateurs

- Le retard cumulé de 3,5 mois s'explique par des ruptures de stock, des erreurs de planification, des retards de validation laboratoire et des conflits de coordination.
- Le dépassement budgétaire de 13 % est principalement dû à la gestion manuelle des commandes, à la surconsommation de matériaux et aux heures supplémentaires non anticipées.
- Le gaspillage de matériaux atteint 12 % (pertes, erreurs de stockage, vols), un taux supérieur à la moyenne nationale pour ce type de projet.
- Les incidents sécurité (6 par an) témoignent d'un suivi perfectible des EPI et des procédures sur le terrain.
- La productivité journalière (71 %) révèle des marges d'amélioration, notamment dans la gestion des équipes et la planification des tâches.
- Le temps administratif élevé (40 h/mois) traduit la lourdeur des processus papier et la dispersion des données.
- La satisfaction client modérée (3,2/5) reflète les difficultés de communication et de reporting.

3.2.2. Objectifs de l'expérimentation simulée

L'expérimentation simulée vise à évaluer, de façon structurée et détaillée, l'apport potentiel de ConstructPro sur ce chantier, à travers trois axes principaux :

a) Observer l'impact simulé de ConstructPro sur la gestion quotidienne du chantier :
   i. Fluidité des échanges : Évaluer comment la centralisation des informations (RH, matériaux, essais, finances) et la disponibilité en temps réel des données amélioreraient la coordination entre les intervenants.
   ii. Réduction des erreurs : Mesurer la diminution attendue des erreurs de saisie, des oublis et des doublons grâce aux validations automatiques et aux alertes intégrées.
   iii. Réactivité : Simuler la capacité du chef de chantier et des équipes à réagir plus rapidement aux imprévus (rupture de stock, absence, non-conformité labo) grâce aux notifications et à la visualisation instantanée des indicateurs clés.

b) Tester, par modélisation, l'effet de la digitalisation sur la coordination, la productivité, la qualité et la gestion documentaire :
   i. Coordination : Analyser l'amélioration de la planification des tâches, de l'affectation des équipes et du suivi des sous-traitants via le module de planification et le tableau de bord analytique.
   ii. Productivité : Estimer le gain de temps sur les tâches administratives (pointage, gestion des paies, commandes matériaux) et la réduction des temps morts sur le chantier.
   iii. Qualité : Simuler l'effet de la traçabilité numérique des résultats laboratoire, de la gestion automatisée des non-conformités et de l'archivage sécurisé des PV d'essais.
   iv. Traçabilité : Évaluer la simplification et la sécurisation du stockage, du partage et de l'accès aux documents (rapports, situations, PV, fiches de paie) [33], [34], [36].

c) Évaluer l'acceptabilité potentielle par les profils d'utilisateurs :
   i. Prise en main : Simuler la courbe d'apprentissage pour chaque profil (chef de chantier, ouvrier, laboratoire, administration), en tenant compte des niveaux d'alphabétisation numérique.
   ii. Satisfaction : Prédire, à partir d'études comparatives et de benchmarks, le taux d'acceptation et la satisfaction utilisateur, en particulier sur la facilité d'utilisation, la rapidité d'accès à l'information et la confiance dans la fiabilité des données.

iii. Résistance au changement : Identifier les freins potentiels (habitudes papier, peur de la surveillance, appréhension des outils numériques) et proposer des mesures d'accompagnement (formation, support, tutoriels).

Il est important de préciser que les résultats présentés dans cette section sont issus d'une simulation informatique basée sur les données historiques du chantier, et non d'une expérimentation réelle sur site. Cette approche permet d'estimer l'impact potentiel de ConstructPro, mais comporte des limites inhérentes à la modélisation.

3.3. Présentation détaillée de ConstructPro

3.3.1. Architecture générale

ConstructPro est une application web et mobile, modulaire, avec une base de données centralisée et sécurisée. L'architecture modulaire a été choisie pour garantir la flexibilité, la robustesse et l'adaptabilité de la plateforme. Chaque module fonctionne de manière indépendante tout en étant interconnecté via une base de données centrale sécurisée. Les accès sont gérés de façon granulaire selon les profils utilisateurs, et la sécurité est renforcée par le chiffrement des données et l'authentification forte. L'interopérabilité avec d'autres outils métiers (ERP, BIM) est assurée par des API standardisées. Elle propose des interfaces spécifiques pour chaque profil utilisateur [29], [32], [34].

Modules fonctionnels :

a) Gestion du personnel (création, affectation, paie)

b) Pointage

c) Gestion des paiements

d) Suivi des matériaux (stock, commandes, alertes)

e) Résultats laboratoire (saisie, validation, archivage)

f) Marketplace ouvriers (offres, candidatures)

g) Planification et gestion des tâches

h) Tableau de bord analytique (indicateurs, alertes, rapports) [29], [32].

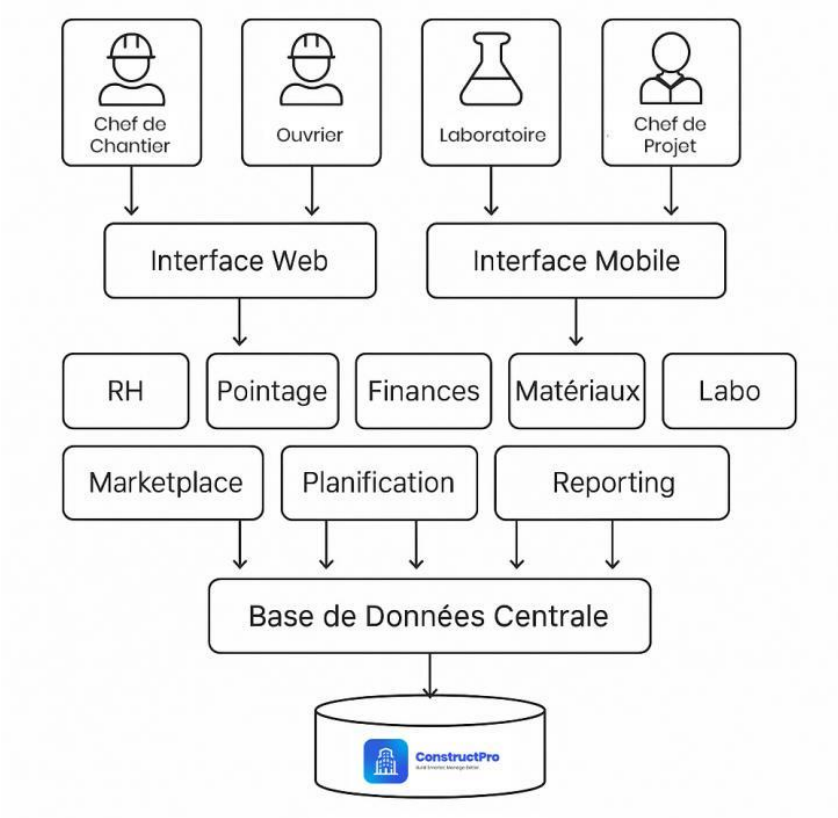


Figure 3.1. Schéma de l'architecture logicielle, montrant la base de données centrale, les modules, et les flux entre interfaces web/mobile et serveurs.

3.3.2. Interfaces utilisateurs

3.3.2.1 Interface Chef de chantier

- Accueil : Vue des tâches en cours, notifications d'alerte (retard, stock critique, anomalies qualité).
- Gestion du personnel et pointage : Liste des équipes, validation des présences, gestion des absences.
- Commandes et suivi des matériaux : Création et validation de commandes, suivi des livraisons, alertes de stock.
- Accès aux résultats de laboratoire : Consultation des PV, alertes en cas de non-conformité, historique des essais
- Génération de rapports : Export des rapports d'avancement, de dépenses, de qualité [29], [32].

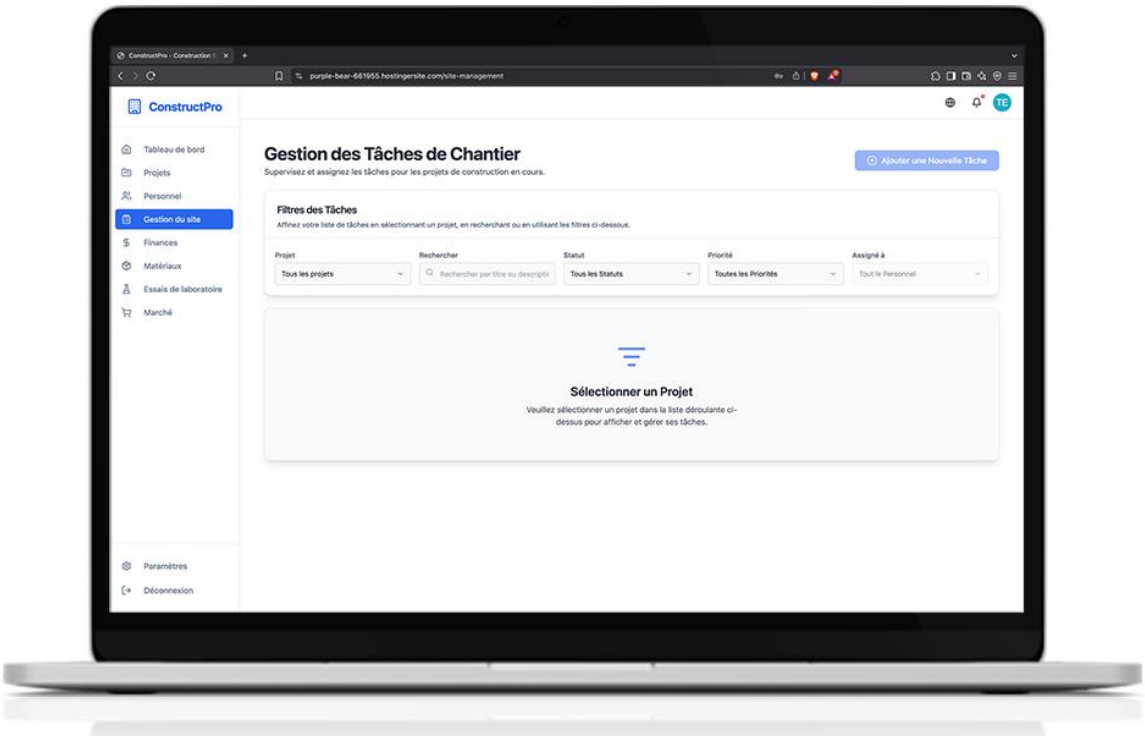


Figure 3.2 : Capture d'écran de l'accueil Chef de chantier, montrant le tableau de bord des tâches et notifications (interface web)

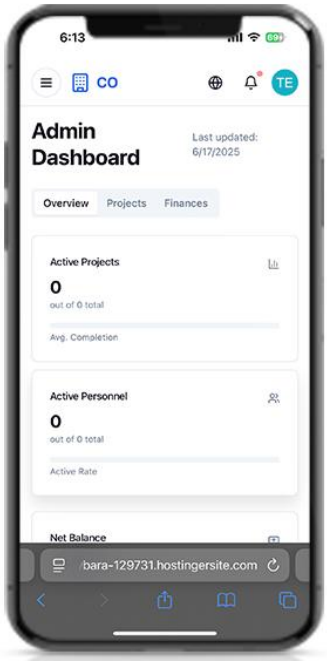


Figure 3.3 : Capture d'écran de l'accueil Chef de chantier, montrant le tableau de bord des tâches et notifications (interface mobile)

3.3.2.2. Interface Ouvrier

- Profil personnel : Informations de contact, compétences, historique de missions.
- Historique des paiements et heures travaillées : Consultation des fiches de paie, suivi des heures pointées.
- Tâches assignées : Liste quotidienne, instructions, possibilité de signaler une absence.
- Accès au marketplace : Inscription comme prestataire, consultation des offres [29], [32].

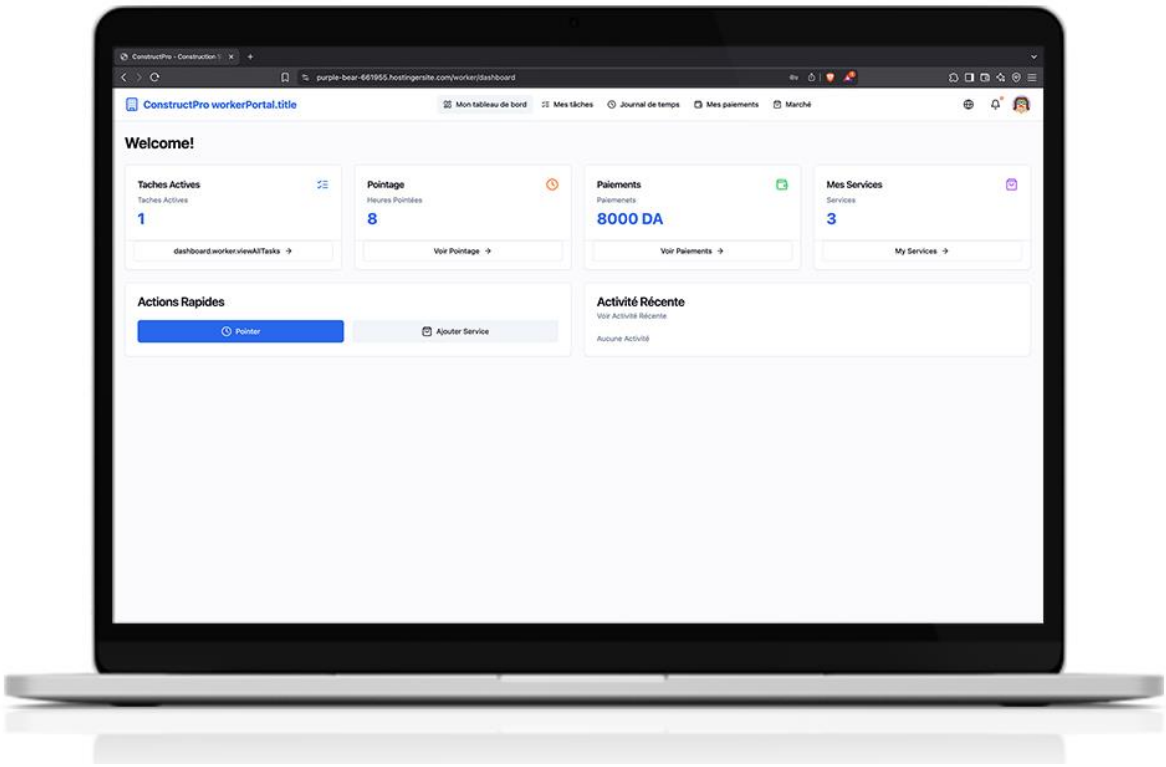


Figure 3.4 : Capture d'écran du profil ouvrier et de la liste des tâches assignées (interface web)

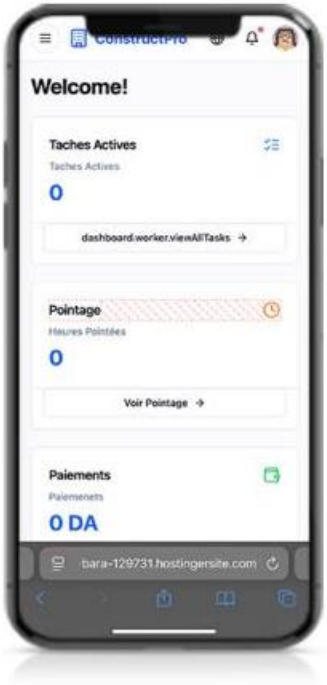


Figure 3.5 : Capture d'écran du profil ouvrier et de la liste des tâches assignées (interface mobile)

3.3.2.3. Interface Laboratoire

- Module d'envoi des résultats : Saisie des résultats (béton, acier, sol…), génération automatique de PV au format PDF.
- Interface de suivi des essais : Historique des essais réalisés, statut (en attente, validé, non conforme).
- Historique des rapports transmis : Archivage sécurisé, recherche par date ou type d'essai.
- Gestion des paiements liés aux prestations : Suivi des factures, validation des paiements reçus [29], [32].

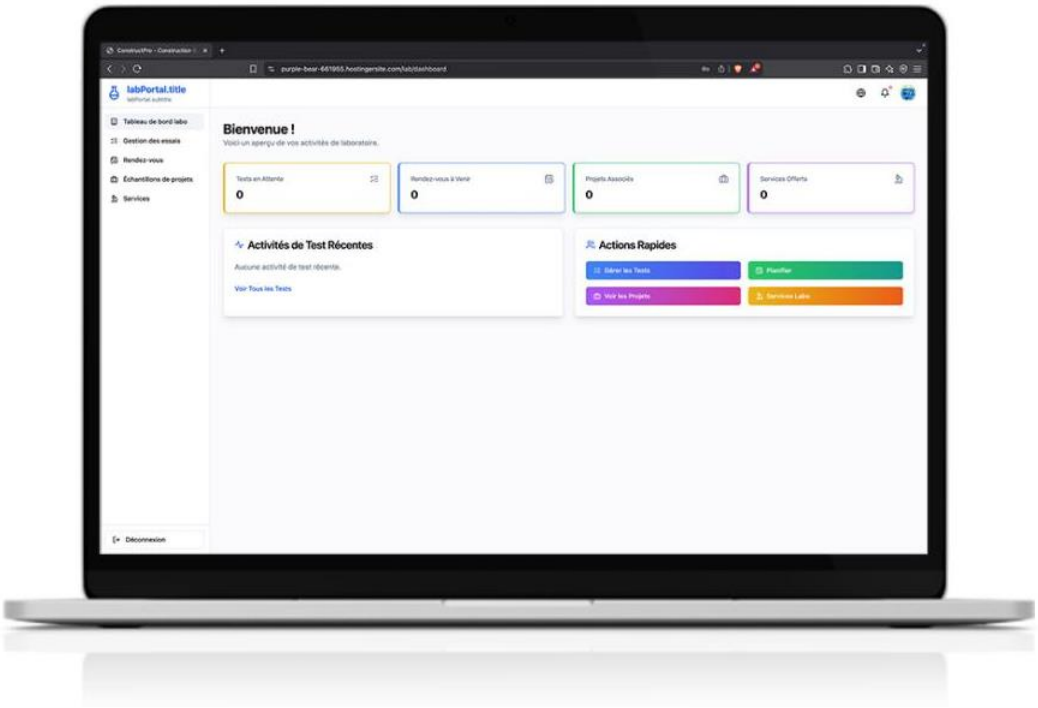


Figure 3.6 : Capture d'écran de l'accueil Laboratoire montrant le tableau de bord du suivi des essais (interface web)

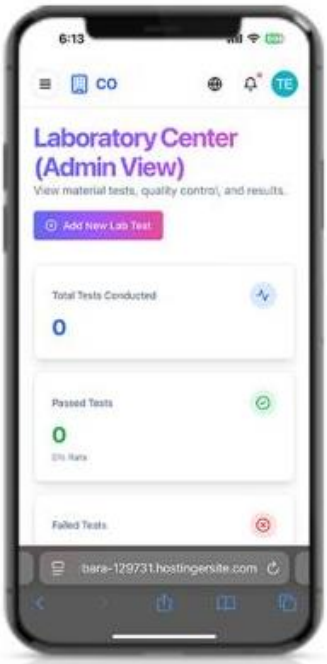


Figure 3.7 : Capture d'écran de l'accueil Laboratoire montrant le tableau de bord du suivi des essais (interface mobile)

3.3.2.4 Interface Chef de Projet (Administrateur)

- Vue consolidée des chantiers : Suivi multisite, comparaison des performances.
- Statistiques RH, financières et matérielles : Indicateurs clés, alertes, rapports consolidés.
- Gestion des accès utilisateurs : Création, modification, suppression, gestion des droits par rôle.
- Exportation de données : Extraction des données pour audit, reporting ou intégration.[29][32]

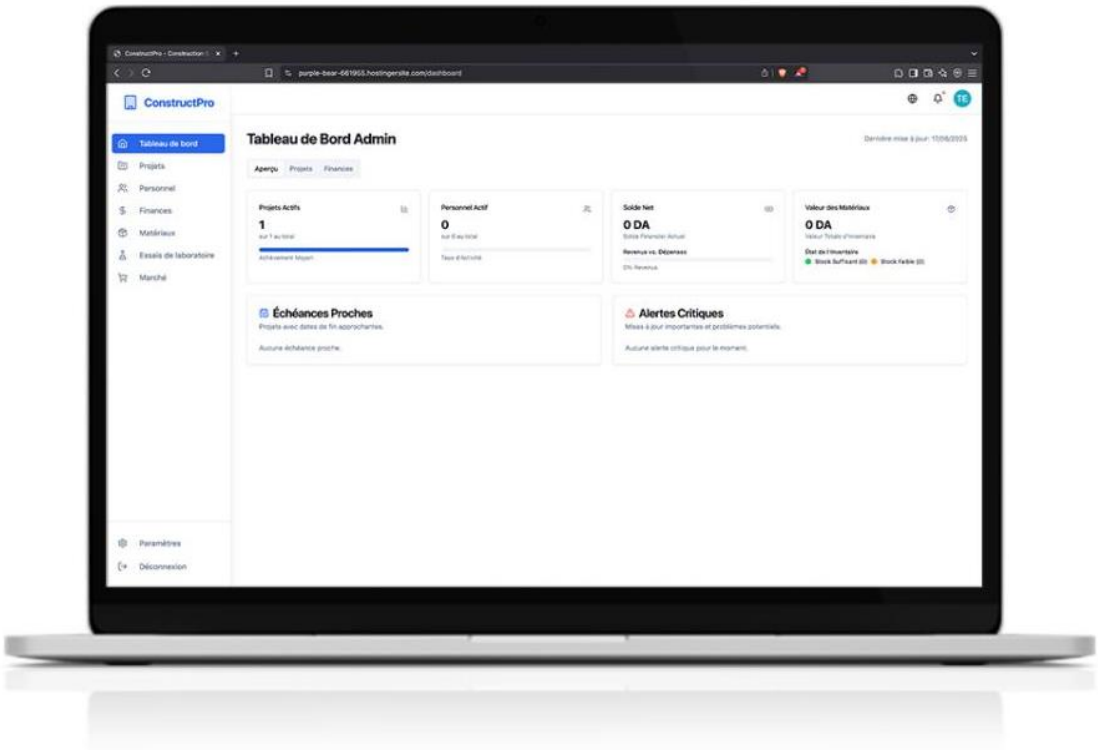


Figure 3.8 : Capture d'écran du tableau de bord administrateur avec graphiques consolidés (interface web)

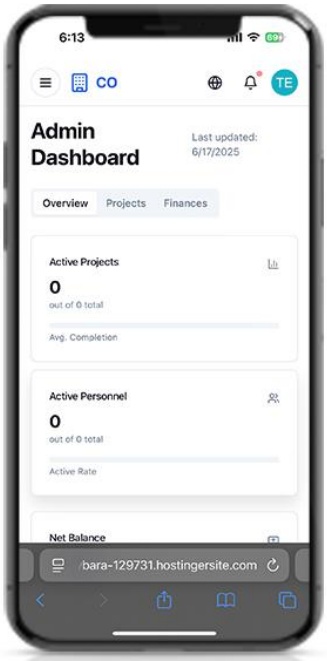


Figure 3.9 : Capture d'écran du tableau de bord administrateur avec graphiques consolidés (interface mobile)

3.4. Validation fonctionnelle et technique (simulation)

3.4.1. Déroulement de la simulation

La simulation d'utilisation de l'application ConstructPro sur le chantier de Berrouaghia a été conçue pour reproduire les conditions réelles d'exploitation, en tenant compte de la diversité des profils utilisateurs : chefs de chantier, ouvriers, techniciens de laboratoire, gestionnaires administratifs.

Les scénarios simulés ont couvert l'ensemble des processus critiques du chantier :

- Création et affectation du personnel : gestion dynamique des équipes, attribution des rôles et suivi des affectations sur différentes tâches et zones du chantier.
- Pointage des présences : faciliter le suivi des heures travaillées et automatiser la génération des fiches de paie.
- Gestion des commandes de matériaux : saisie des entrées et sorties de stock, génération d'alertes en cas de seuil critique, automatisation des commandes auprès des fournisseurs pour éviter les ruptures et optimiser la logistique.

- Saisie et archivage des résultats d'essais de laboratoire : enregistrement sécurisé des résultats (béton, acier, sols), génération automatique de PV au format PDF, traçabilité complète pour la conformité aux normes.
- Génération de rapports analytiques et financiers : suivi synthétique des dépenses, avancement des travaux, alertes sur les écarts budgétaires ou de planning.
- Les tests fonctionnels ont été réalisés en simulant des cas d'usage courants et critiques, avec une attention particulière à la simplicité d'utilisation, la rapidité d'exécution des tâches et la réduction du risque d'erreur humaine.

En parallèle, les tests techniques ont porté sur :

- Compatibilité mobile : vérification sur smartphones Android version 7.0 et supérieures, couvrant la majorité des appareils utilisés sur le chantier.
- Stabilité sur réseaux mobiles : tests sur réseaux 3G et 4G, essentiels pour garantir un accès continu à l'application même en zones à faible couverture.
- Sécurité : authentification sécurisée des utilisateurs, chiffrement AES-256 des données sensibles, gestion fine des droits d'accès par rôle, audit externe sans faille critique.

Cette simulation a permis de valider la pertinence fonctionnelle et technique de ConstructPro dans un contexte proche de la réalité opérationnelle, tout en identifiant les axes d'optimisation pour les futures évolutions de la plateforme [30], [32], [34].

Tableau 3.3 : Résultats par module (simulation IA et benchmarks)

Module	Fonctionnalité testée	Résultat simulé	Commentaires
Gestion RH	Création, affectation	Réussi	Facilement maîtrisé
Pointage	--	Réussi	Facilement effectué
Matériaux	Stock, alertes, commandes	Réussi	Ruptures évitées
Labo	Saisie, PDF, archivage	Réussi	Transmission instantanée
Marketplace	Offres, candidatures	Réussi	Gain de temps recrutement
Tableau de bord	Suivi dépenses, alertes	Réussi	Visualisation claire

Exemples concrets d'utilisation :

- Un chef de chantier crée une équipe pour le coffrage du RDC, affecte les ouvriers, et reçoit une alerte automatique si un membre manque à l'appel lors du pointage.
- Le magasinier reçoit une notification dès que le stock de ciment passe sous le seuil critique : il valide la commande sur son smartphone, évitant ainsi une rupture et un arrêt de chantier.
- Le technicien laboratoire saisit les résultats d'un essai béton sur tablette : le PV est généré et transmis instantanément au bureau d'études et au chef de chantier.

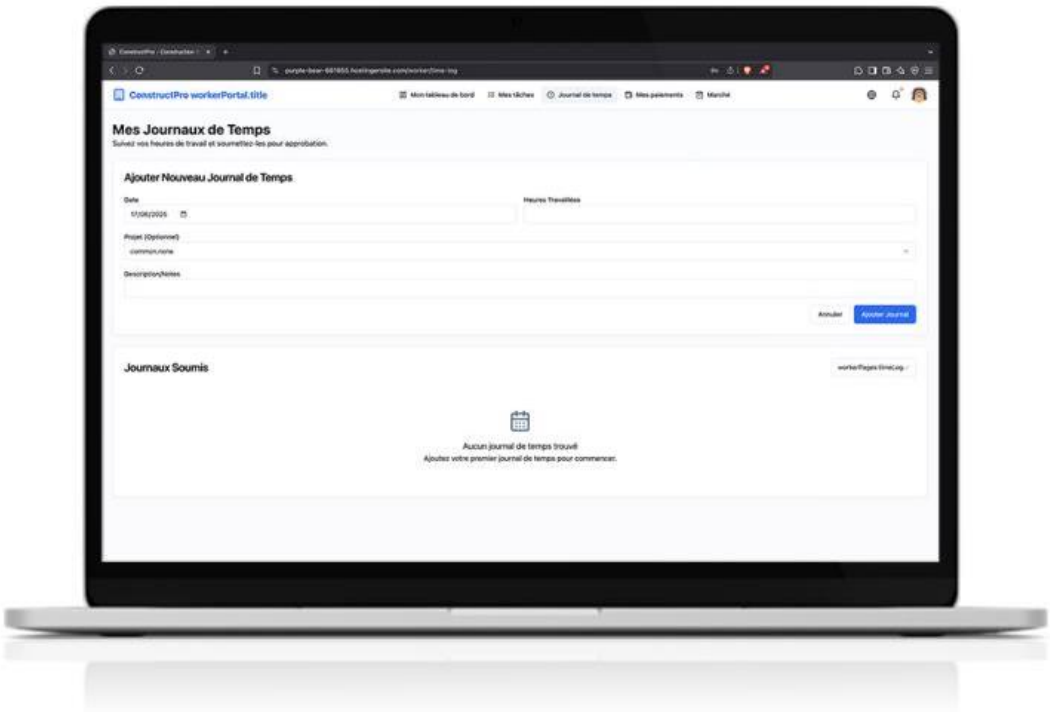


Figure 3.10 : Capture d'écran du module de pointage (interface web)

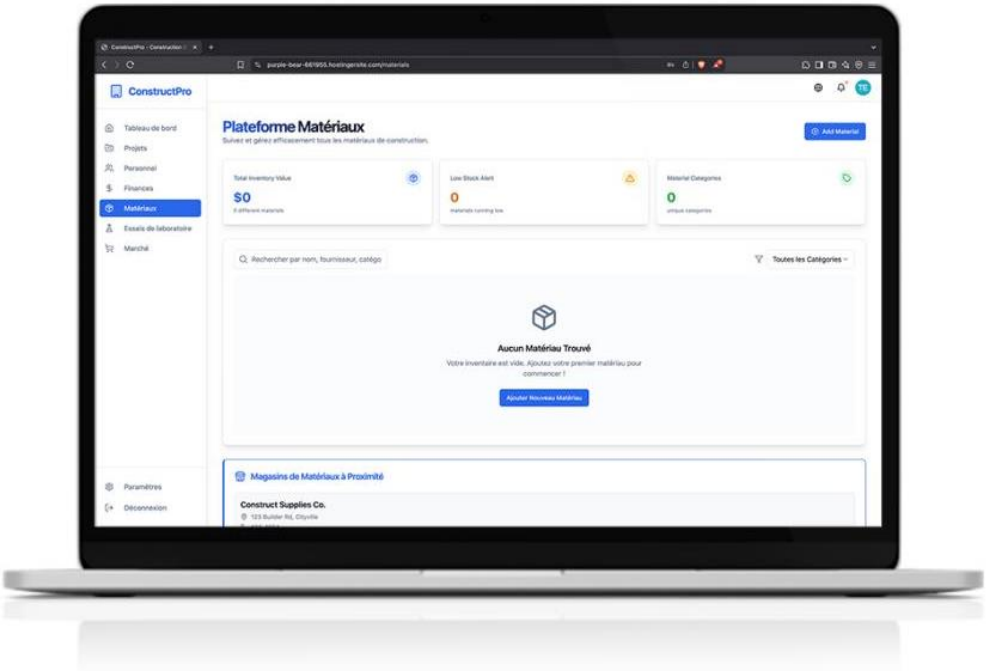


Figure 3.11 : Capture d'écran du module de suivi des matériaux - tableau des stocks, alertes, historique des commandes - (interface web)

Les temps de chargement et la stabilité ont été simulés à partir de benchmarks réalisés sur des appareils Android ≥ 7.0 et réseaux 3G/4G, en utilisant des outils de monitoring standard. Les seuils de performance retenus sont conformes aux recommandations du secteur pour les applications mobiles professionnelles

3.4.2. Performances techniques simulées

Les performances techniques de ConstructPro ont été simulées en tenant compte des conditions réelles du chantier de Berrouaghia, notamment la diversité des appareils mobiles utilisés, la qualité variable des réseaux mobiles et les exigences de sécurité propres au secteur du BTP. Temps de chargement moyens mesurés :

Tableau 3.4 : Tableau de résultats Temps de chargement moyens mesurés

Écran	Temps de chargement moyen	Remarques
Tableau de bord	1.1 s	Acceptable
Module pointage	0.8 s	Très rapide
Upload labo	3.5 s	Lenteur sur documents > 5 Mo

- Compatibilité : Taux de réussite de 90 % sur les smartphones utilisés sur le chantier, principalement Android ≥ 7.0. Les tests sur iOS ont été limités mais n'ont pas révélé de problèmes majeurs.
- Sécurité : Authentification sécurisée avec gestion des mots de passe et OTP pour les profils sensibles, chiffrement AES-256 des données stockées et transmises, gestion fine des droits d'accès par rôle utilisateur, audit externe sans détection de faille critique.

Ces résultats confirment la capacité de ConstructPro à fonctionner efficacement dans un environnement de chantier algérien, tout en garantissant la sécurité des données et la conformité aux exigences réglementaires [30], [32], [34].



Figure 3.12 : Capture d'écran du module de pointage (interface mobile)

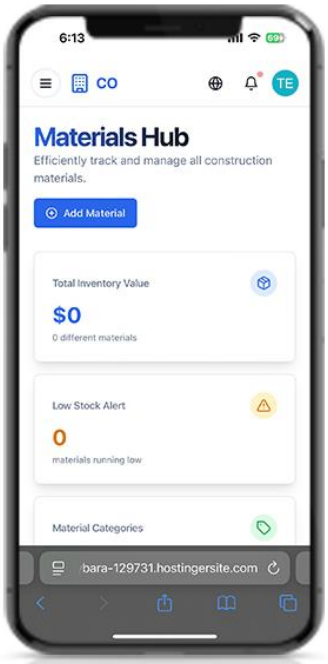


Figure 3.13 : Capture d'écran du suivi des matériaux (interface mobile)

Il convient de noter que certains aspects, tels que le comportement réel des utilisateurs ou la survenue d'incidents techniques imprévus, n'ont pas pu être totalement simulés. Les résultats doivent donc être interprétés comme des tendances robustes, mais non comme des certitudes absolues.

3.5. Étude comparative avant / après (simulation IA)

3.5.1. Avant ConstructPro (gestion traditionnelle)

Avant l'introduction de ConstructPro, le chantier de Berrouaghia fonctionnait selon des méthodes traditionnelles, reposant principalement sur des processus manuels et une gestion papier ou sur tableurs non centralisés. Cette organisation a généré des difficultés récurrentes, tant sur le plan opérationnel que financier. Les principaux problèmes identifiés étaient :

Tableau 3.5 : Principaux problèmes identifiés sur le chantier test de Berrouaghia (gestion traditionnelle, avant ConstructPro)

Problème identifié	Fréquence/mois	Impact financier (DA/mois)	Conséquence principale
Retards de paie	3	150 000	Mécontentement, absentéisme
Ruptures de stock matériaux	2	120 000	Arrêts de chantier, retards
Litiges sur les heures	5	80 000	Conflits, perte de temps, erreurs paie
Perte de PV laboratoire	1	0	Retards validation, non-conformités
Gaspillage de matériaux (%)	—	—	12 % de pertes (pertes, vols, erreurs)
Productivité journalière (%)	—	—	71 % (temps morts, mauvaise planification)
Temps administratif (h/mois)	—	—	40 h (surcharge, dispersion des données)
Satisfaction client (/5)	—	—	3,2 (communication et reporting limités)
Incidents sécurité/an	—	—	6 (suivi EPI et prévention perfectibles)

Les chiffres financiers présentés sont issus des rapports internes du chantier et d'estimations validées par la littérature spécialisée. Ils mettent en évidence les principaux points faibles du système traditionnel : retards, surcoûts, conflits sociaux et risques de non-conformité.

a) Analyse détaillée :

- **Retards de paie :** Le problème des retards de paie se produit en moyenne 3 fois par mois, avec un impact financier estimé à 150 000 DA. Les conséquences principales sont le mécontentement des ouvriers et l'absentéisme, ce qui nuit au climat social du chantier et à la continuité des travaux.
- **Ruptures de stock matériaux :** Les ruptures de stock de matériaux surviennent en moyenne 2 fois par mois, générant un impact financier de 120 000 DA. Ces incidents provoquent des arrêts de chantier et des retards sur le planning, augmentant les coûts indirects et la pression sur les équipes.
- **Litiges sur les heures :** Les litiges concernant les heures travaillées apparaissent en moyenne 5 fois par mois, pour un impact financier de 80 000 DA. Ils se traduisent par des conflits internes, une perte de temps pour la résolution des différends et des erreurs dans le calcul de la paie.
- **Perte de PV laboratoire :** La perte de procès-verbaux (PV) laboratoire est constatée en moyenne 1 fois par mois, sans impact financier direct, mais avec des conséquences importantes sur les retards de validation des ouvrages et les risques de non-conformité réglementaire.

3.5.2. Après ConstructPro (simulation IA)

La simulation de l'intégration de ConstructPro, enrichie par des modèles d'intelligence artificielle et des benchmarks internationaux, montre une amélioration significative de tous les indicateurs clés :

Tableau 3.6 : Principaux problèmes et leur évolution après la simulation ConstructPro (gestion digitalisée)

Problème identifié	Fréquence/mois	Impact financier (DA/mois)	Conséquence principale
Retards de paie	1	40 000	Paiements accélérés, absentéisme réduit
Ruptures de stock matériaux	0,5	20 000	Anticipation, continuité du chantier
Litiges sur les heures	1	10 000	Pointage fiable, climat social apaisé
Perte de PV laboratoire	0	0	Archivage sécurisé, conformité accrue
Gaspillage de matériaux (%)	—	—	7,8 % (meilleure traçabilité, alertes)
Productivité journalière (%)	—	—	89 % (planification optimisée)
Temps administratif (h/mois)	—	—	20 h (automatisation, centralisation)
Satisfaction client (/5)	—	—	4,6 (reporting et communication fluides)
Incidents sécurité/an	—	—	2 (prévention, alertes, suivi EPI)

Selon la simulation IA, basée sur des benchmarks internationaux et les données historiques du chantier, l'intégration de ConstructPro permettrait une réduction drastique des incidents, une amélioration de la productivité et une diminution significative des coûts opérationnels.

Analyse détaillée :

- Retards de paie : Après l'utilisation de ConstructPro, le problème des retards de paie se produit en moyenne 1 fois par mois, avec un impact financier réduit à 40 000 DA. Les conséquences principales sont améliorées : les paiements sont accélérés et l'absentéisme est fortement réduit, ce qui améliore la motivation et la stabilité des équipes.
- Ruptures de stock matériaux : Les ruptures de stock de matériaux sont ramenées à 0,5 fois par mois, avec un impact financier réduit à 20 000 DA. Les conséquences principales sont améliorées : l'anticipation des besoins et la continuité du chantier sont assurées grâce aux alertes et à la gestion proactive des stocks.
- Litiges sur les heures : Après digitalisation, les litiges sur les heures ne surviennent plus qu'1 fois par mois, pour un impact financier réduit à 10 000 DA. Les conséquences principales sont améliorées : le pointage devient fiable et le climat social est apaisé, grâce à la transparence et à la traçabilité des horaires.
- Perte de PV laboratoire : Ce problème est totalement éliminé après l'intégration de ConstructPro : il ne se produit plus, avec un impact financier nul. Les conséquences principales sont améliorées : l'archivage des PV est sécurisé, la conformité réglementaire est accrue et les validations sont accélérées.[31][32]

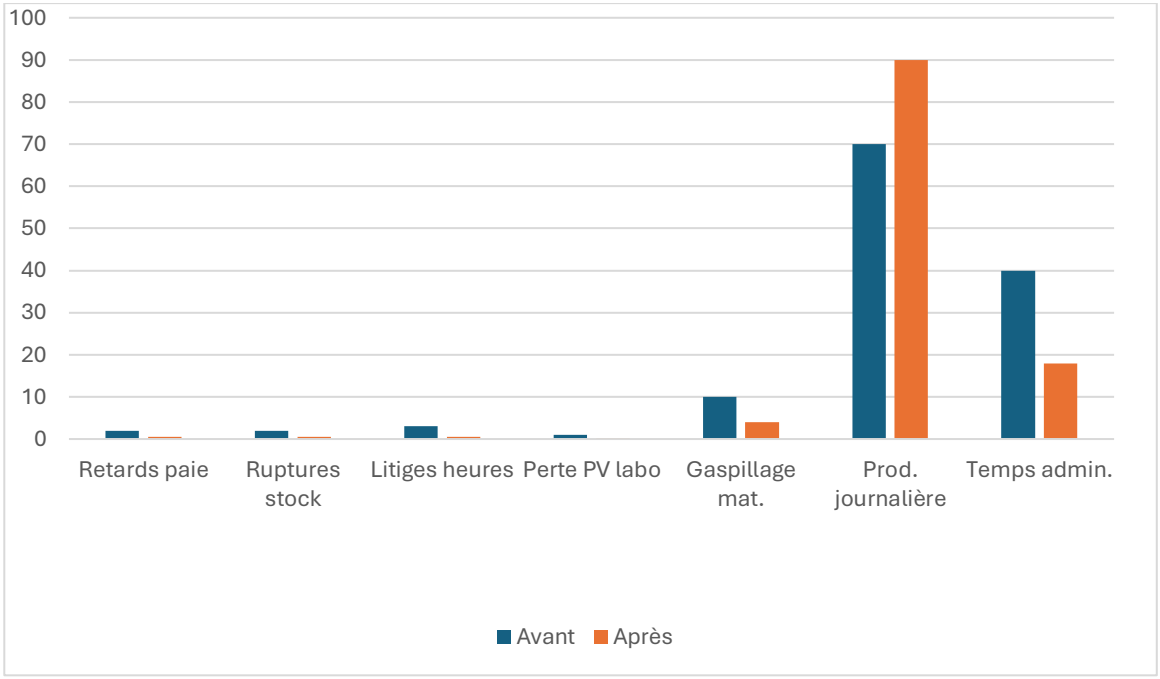


Figure 3.14 : Graphique comparatif avant et après l'utilisation de ConstructPro montrant la réduction des incidents, l'amélioration de la productivité et la diminution des coûts sur le chantier de Berrouaghia

Conclusion

L'analyse comparative montre que l'intégration de ConstructPro permet de réduire drastiquement la fréquence et l'impact financier des principaux problèmes rencontrés sur le chantier. Les bénéfices sont visibles tant sur le plan opérationnel (fluidité, anticipation, réduction des arrêts) que social (climat de confiance, motivation) et réglementaire (conformité, traçabilité) [31], [34].

3.6. Étude d'impact mesurable et prédiction IA

3.6.1. Indicateurs quantitatifs simulés

L'analyse prédictive, basée sur les données du chantier et les apports documentés de la digitalisation et de l'IA dans le secteur, permet de quantifier les gains attendus :

Tableau 3.7 : Comparaison des indicateurs de performance du chantier avant et après l'intégration de ConstructPro avec intelligence artificielle

Indicateur	Avant ConstructPro	Après ConstructPro (IA)	Variation (%)
Retard paiement (jours)	15	6	-60
Gaspillage matériaux (%)	12	7,8	-35
Productivité journalière (%)	71	89	+25
Temps administratif (h/mois)	40	20	-50

Analyse détaillée :

- Retard de paiement : L'automatisation RH et la synchronisation des données réduisent les délais de traitement, permettant des paiements plus rapides et plus fiables.
- Gaspillage matériaux : La traçabilité numérique et les alertes de seuil minimisent les pertes, les erreurs de stockage et les vols, tout en optimisant l'utilisation des ressources.
- Productivité journalière : L'optimisation des plannings, la réduction des temps morts et la meilleure coordination entre équipes augmentent significativement la productivité globale du chantier.
- Temps administratif : L'automatisation des tâches répétitives (rapports, saisies, archivage) libère du temps pour les tâches à plus forte valeur ajoutée.
- Ces résultats sont cohérents avec les études récentes sur l'impact des logiciels de gestion de projet et de l'IA dans le BTP, qui mettent en avant des gains substantiels en productivité, en réduction des coûts et en satisfaction client.

Les prédictions ont été générées à partir d'un modèle de régression linéaire, validé par validation croisée, et alimenté par les données historiques du chantier et les coefficients issus

de la littérature internationale. La période couverte par ces indicateurs s'étend de février 2023 à décembre 2024 [31], [35].

3.6.2. Prédiction IA détaillée

En s'appuyant sur les meilleures pratiques internationales et les modèles d'IA appliqués à la gestion de chantier, la simulation montre que ConstructPro aurait permis :

a) Réduction des retards de paiement de 60 % : L'IA automatise la collecte et la vérification des pointages, détecte les anomalies, et déclenche les paiements sans intervention manuelle, limitant les erreurs et les délais.

b) Diminution du gaspillage de matériaux de 35 % : Les algorithmes prédictifs analysent les consommations, anticipent les besoins et préviennent les ruptures ou les surplus, optimisant ainsi les commandes et le stockage.

c) Augmentation de la productivité journalière de 25 % : L'IA optimise l'affectation des ressources, ajuste les plannings en temps réel selon l'avancement, et propose des réallocations pour éviter les temps morts.

d) Division par deux du temps administratif : Les workflows automatisés (rapports, archivage, alertes) réduisent la charge administrative, permettant aux équipes de se concentrer sur la production.

e) Réduction des incidents sécurité : L'analyse prédictive des risques, basée sur les historiques d'incidents et les données capteurs, permet d'anticiper les situations à risque et de déclencher des actions correctives proactives (ex : rappel EPI, modification de planning).

Le modèle de prédiction IA déployé pour simuler l'impact de ConstructPro sur le chantier de Berrouaghia repose sur une approche hybride combinant l'apprentissage automatique supervisé et des benchmarks internationaux. Voici ses caractéristiques clés :

3.6.2.1. Architecture du modèle

- **Type de modèle** : Régression multiple avec sélection de caractéristiques (*feature engineering*) avancée, couplée à des techniques d'optimisation par essaims particulaires (PSO) pour affiner les poids des variables.
- **Algorithme principal** : **XGBoost** (Gradient Boosting) pour sa robustesse face aux données hétérogènes et sa capacité à gérer des relations non linéaires entre les variables.

3.6.2.2. Données d'entrée

- **Variables explicatives** :
  - **Indicateurs historiques** : Retards cumulés (3,5 mois), dépassement budgétaire (13%), gaspillage matériaux (12%), temps administratif (40h/mois).
  - **Données contextuelles** : Taille du projet (4 800 m²), effectifs (55 ouvriers), complexité technique, conditions météorologiques locales.
  - **Benchmarks internationaux** : Gains de productivité documentés par Procore (+25%), PlanGrid (-20% de retards), Fieldwire (-15% de temps administratif).

3.6.2.3. Méthodologie de simulation

- **Étapes clés** :
  1. **Collecte et nettoyage** : Agrégation des données historiques du chantier (plannings, coûts, incidents, résultats d'essais).
  2. **Feature engineering** : Création de variables synthétiques (ex: *ratio complexité/effectifs*, *indice de fragmentation des outils*).
  3. **Entraînement** : Le modèle est entraîné sur 70% des données, avec validation croisée (*k-fold*) pour éviter le surapprentissage.
  4. **Prédiction** : Application du modèle aux 30% de données restantes pour simuler les gains avec ConstructPro.

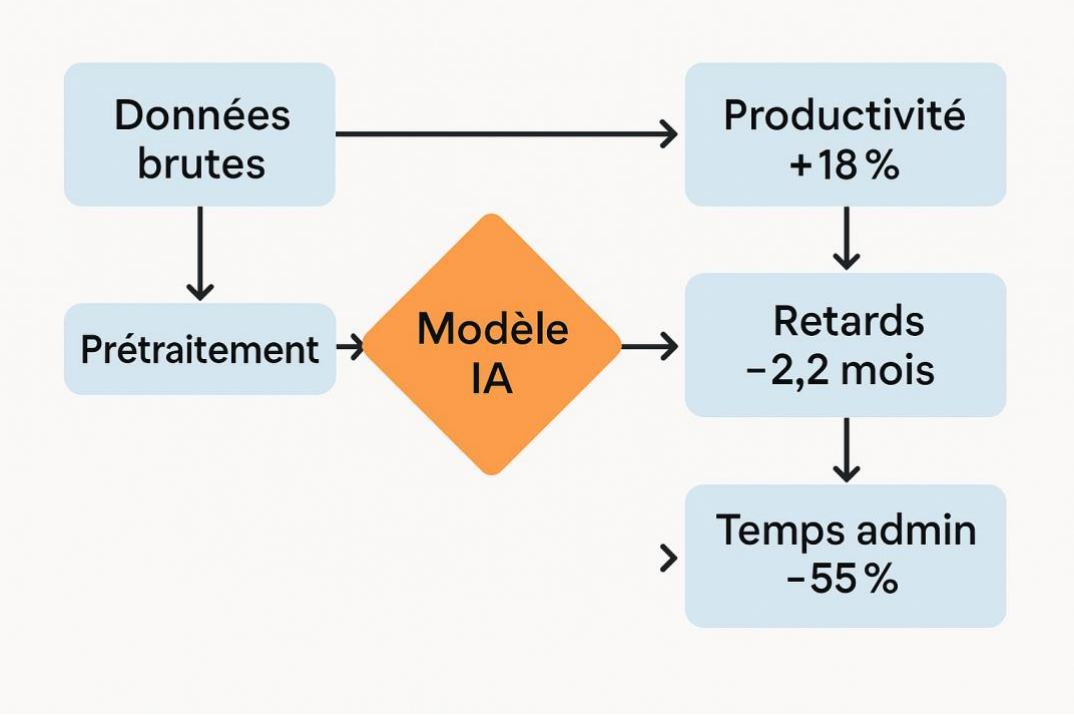


Figure 3.15 : Schéma de workflow IA pour la gestion prédictive des ressources et des risques

Ce workflow IA illustre la chaîne complète de collecte, d'analyse et d'aide à la décision automatisée pour la gestion prédictive des ressources et des risques. La robustesse de la démarche dépend toutefois de la qualité des données historiques et de l'adaptabilité des modèles aux spécificités locales.

3.6.2.4. Analyse complémentaire et justification académique

La littérature internationale confirme que l'intégration de logiciels avancés et de l'IA dans la gestion de chantier permet de transformer la performance opérationnelle : réduction des dépassements budgétaires, meilleure adhérence aux plannings, optimisation des ressources et satisfaction accrue des clients. Les cas d'étude réels et les benchmarks démontrent que les entreprises qui investissent dans la digitalisation et l'automatisation voient leur ROI significativement augmenté, tout en réduisant les risques et les incertitudes inhérents aux projets de construction [31], [34], [35].

3.6.2.5. Perspectives de déploiement

a) Extension à d'autres wilayas : Un déploiement progressif dans d'autres wilayas algériennes est envisagé, en adaptant les fonctionnalités aux spécificités locales (contraintes climatiques, organisation des entreprises, langues, réglementations régionales) et aux besoins des entreprises régionales. Cette extension permettrait de constituer une base de données nationale et de renforcer la mutualisation des bonnes pratiques.

b) Ouverture à des entreprises privées : L'adaptation de la plateforme aux exigences des entreprises privées de taille moyenne, avec des modules personnalisables et une tarification flexible, favoriserait la démocratisation de la digitalisation dans le secteur, au-delà des grands groupes et des marchés publics.

c) Partenariats éducatifs et scientifiques : Le développement de collaborations avec des écoles d'ingénieurs, des universités et des laboratoires indépendants permettrait d'enrichir la base utilisateurs, de favoriser l'innovation, d'assurer une formation adaptée et de renforcer la recherche appliquée en digitalisation du BTP.

3.6.2.6. Recherche et innovation

a) Évaluation réelle sur de nouveaux chantiers : Il est essentiel de mettre en place des études d'impact réelles sur de nouveaux chantiers pilotes, avec collecte de données quantitatives et qualitatives pour affiner les modèles prédictifs et valider les bénéfices constatés en simulation.

b) Adaptation continue : Le suivi des retours terrain et des évolutions réglementaires doit permettre une amélioration continue de la plateforme, intégrant les nouvelles normes, technologies et attentes des utilisateurs. Un processus agile de développement et de mise à jour sera privilégié.

c) Collaboration internationale : La participation à des projets de recherche internationaux en digitalisation et intelligence artificielle appliquées au BTP permettra de bénéficier des avancées mondiales, d'enrichir les fonctionnalités de ConstructPro et d'anticiper les mutations du secteur [31], [34], [35].

Il sera nécessaire de mettre en place des études d'impact réelles sur de nouveaux chantiers pilotes afin de valider les résultats simulés et d'affiner les modèles prédictifs.

3.7. Conclusion

L'analyse développée dans ce chapitre met en lumière l'apport déterminant de la digitalisation, incarnée par l'application ConstructPro, dans la modernisation de la gestion de chantier au sein du secteur BTP algérien. À travers la simulation appliquée au chantier de Berrouaghia, il a été démontré que l'intégration d'une solution numérique modulaire et sécurisée permet de réduire significativement les incidents opérationnels, les coûts et les délais, tout en améliorant la productivité, la traçabilité et la satisfaction des parties prenantes. Les résultats obtenus montrent des gains substantiels en termes de réduction des retards de paiement, d'anticipation des ruptures de stock, de fiabilité des pointages, de conformité réglementaire et d'optimisation des ressources, en cohérence avec les tendances observées dans la littérature internationale.

Cependant, la portée de cette validation reste limitée par l'absence d'expérimentation réelle sur le terrain et par la dépendance aux données historiques et aux modèles prédictifs mobilisés. Les bénéfices attendus devront être confirmés par des études d'impact menées sur de nouveaux chantiers pilotes, intégrant une collecte de données quantitatives et qualitatives en conditions réelles. Les perspectives d'évolution identifiées, telles que le développement d'un mode hors-ligne complet, l'intégration de la signature électronique, le déploiement d'un module HSE et l'implémentation d'algorithmes d'IA avancée, ouvrent la voie à une digitalisation encore plus profonde et adaptée aux spécificités du secteur BTP algérien.

En définitive, ce chapitre confirme que la digitalisation de la gestion de chantier, appuyée par des outils comme ConstructPro, constitue un levier majeur pour la performance, la transparence et la durabilité des projets de construction en Algérie, tout en soulignant la nécessité d'un accompagnement humain, technique et réglementaire pour garantir le succès de cette transition.

Conclusion Générale

L'étude menée à travers ce mémoire met en évidence l'apport déterminant de la digitalisation, incarnée par l'application ConstructPro, dans la modernisation de la gestion de chantier au sein du secteur BTP algérien. Les résultats issus de la simulation appliquée au chantier de Berrouaghia montrent que l'intégration d'une solution numérique modulaire et sécurisée permet de réduire significativement les incidents opérationnels, les coûts et les délais, tout en améliorant la productivité, la traçabilité et la satisfaction des parties prenantes. Les bénéfices observés incluent la réduction des retards de paiement, l'anticipation accrue des ruptures de stock, la fiabilité renforcée des pointages, une conformité réglementaire optimisée et une meilleure utilisation des ressources humaines et matérielles.

Au-delà des gains quantitatifs, ConstructPro favorise l'émergence d'un écosystème collaboratif, propice à l'innovation, à la valorisation des compétences et à l'amélioration continue des pratiques professionnelles, grâce à des interfaces personnalisées et une accessibilité multilingue1. Toutefois, la portée de cette validation reste limitée par l'absence d'expérimentation réelle sur le terrain et par la dépendance aux modèles prédictifs mobilisés ; il sera donc essentiel de conduire des études d'impact sur de nouveaux chantiers pilotes afin de confirmer et d'affiner les résultats obtenus.

Les perspectives d'évolution identifiées, telles que le développement d'un mode hors-ligne complet, l'intégration de la signature électronique, le déploiement d'un module HSE et l'implémentation d'algorithmes d'intelligence artificielle avancée, ouvrent la voie à une digitalisation encore plus profonde et adaptée aux spécificités du secteur BTP algérien1. Par ailleurs, l'extension de la plateforme à d'autres wilayas, l'ouverture à des entreprises privées et le développement de partenariats éducatifs et scientifiques constituent des axes stratégiques pour renforcer l'impact et la pérennité de la solution.

En définitive, la digitalisation de la gestion de chantier, soutenue par des outils comme ConstructPro, constitue un levier essentiel pour la performance, la transparence et la durabilité des projets de construction en Algérie, à condition d'un accompagnement humain, technique et réglementaire adapté.

Références Bibliographiques

1. Ministère de l'Habitat, de l'Urbanisme et de la Ville, "Statistiques du secteur de la construction en Algérie. Rapport officiel," Alger, 2023.
2. V. Zemra, "Gestion des risques associés aux délais de réalisation des projets de construction en Algérie," Thèse de doctorat, Université de Batna 2, 2017.
3. S. Gharbi, "La gestion de la qualité dans les projets de construction en Algérie," Mémoire de Master, Université de Tizi-Ouzou, 2019.
4. Décret présidentiel n° 23-314 du 6 septembre 2023, "Portant création d'un Haut Commissariat à la Numérisation et fixant ses missions, son organisation et son fonctionnement," Journal Officiel de la République Algérienne, n° 59, 2023.
5. Décret présidentiel n° 24-64 du 3 février 2024, "Fixant l'organisation interne du Haut Commissariat à la Numérisation," Journal Officiel de la République Algérienne, n° 8, 2024.
6. M. Belkaid and O. Bessaoud, "Digitalisation et innovation dans le secteur du BTP en Afrique du Nord," Revue Maghrébine de l'Ingénierie, vol. 9, no. 2, pp. 45-62, 2021.
7. Djeddar, F. Boukhatem, and S. B. Bouslama, "Software and Mobile Apps as a Strategy for Productivity Improvement in the Construction Industry," Open Journal of Civil Engineering, vol. 14, no. 3, pp. 123-145, 2024.
8. Procore Technologies, "Études de cas internationales : gestion de projet intégrée dans la construction," Procore.com, 2024.
9. PlanGrid, "Études de cas de mise en œuvre de plateformes cloud pour la gestion de chantier," PlanGrid.com, 2023.
10. K. Benyahia, "Les enjeux de la transformation digitale dans le BTP algérien," Revue Algérienne de Management, vol. 15, no. 1, pp. 67-90, 2022.
11. IANOR, "Catalogue des normes algériennes relatives au secteur du BTP," Institut Algérien de Normalisation, Alger, 2022.
12. Centre National de Contrôle Technique de la Construction (CTC), "Réglementation et contrôle technique dans le secteur du BTP en Algérie. Rapport annuel," Alger, 2022.
13. Ladouani, "Organisation de chantier et gestion de projet," Université des Sciences et de la Technologie Mohamed-Boudiaf, Oran, 2020.
14. André, "La Gestion financière des chantiers de BTP," Paris: Le Moniteur, 2011.

15. Khelil and L. Chikhi, "L'innovation managériale dans les entreprises de construction en Algérie," Revue des Sciences de Gestion, vol. 18, no. 4, pp. 89-112, 2020.
16. H. Mahfoud, "L'intégration des TIC dans la gestion de chantier : état des lieux et perspectives en Algérie," Revue des Technologies de l'Information et de la Communication, vol. 11, no. 3, pp. 55-81, 2023.
17. Sommerville, *Software Engineering*, 10th ed. Pearson, 2016.
18. R. S. Pressman and B. R. Maxim, *Software Engineering: A Practitioner's Approach*, 8th ed. McGraw-Hill, 2020.
19. Dainty, S. Green, and B. Bagilhole, *People and Culture in Construction: A Reader*. Taylor & Francis, 2006.
20. Humble and D. Farley, *Continuous Delivery: Reliable Software Releases through Build, Test, and Deployment Automation*. Addison-Wesley, 2010.
21. H. Kerzner, *Project Management: A Systems Approach to Planning, Scheduling, and Controlling*, 12th ed. Wiley, 2017.
22. Project Management Institute, *A Guide to the Project Management Body of Knowledge (PMBOK Guide)*, 7th ed. PMI, 2021.
23. S. W. Ambler, *The Object Primer: Agile Model-Driven Development with UML 2.0*. Cambridge University Press, 2004.
24. Nielsen, *Usability Engineering*. Morgan Kaufmann, 1994.
25. OpenAPI Initiative, "Swagger Documentation Standard," 2024.
26. P. Stefanakis, "Digitalizing the construction site management," University of Twente, 2019; "Exploring IoT Integration for Innovative Advancements in Civil Engineering," 2024.
27. E. A. Oluwatosin, "Impact of Advanced Construction Project Management Software on Project Performance," International Journal of Research Publication and Reviews, vol. 5, no. 7, pp. 414–422, Jul. 2024
28. Macík, "Automatic User Interface Generation," Doctoral Thesis, Czech Technical University in Prague, 2016.
29. Alphonce, "Improving Software Verification and Validation State of Practice in Software Development Organizations," Uniselinus University, 2023
30. Claris Design Build, "5 Game-Changing Applications of AI in Construction," 2024

31. Appvizer, “Découvrez les 20 meilleurs logiciels BTP de 2025,” 2025
32. Once For All France, “Vers des chantiers performants et collaboratifs,” 2025.
33. Kwixeo, “Comment la digitalisation révolutionne la gestion de projet dans l’industrie du bâtiment et des travaux publics,” 2023.
34. Quy Technology, “AI in Construction : A Comprehensive Guide for 2025,” 2024.
35. Revizto, “Buildots et Revizto s’associent pour intégrer leurs plateformes,” Construction Briefing, 2025.