OpSee : Étude de faisabilité, viabilité et désirabilité de la conception d'un MES open-core pour les PME industrielles

Année académique 2025-2026

Auteur : Nathan Moreau
Promoteur : Charles Pecheur
Master en Ingénieur informatique

Auteur : Adam Bernard
Promoteur : Charles Pecheur
Master en Ingénieur électromécanique

Auteur : Juliette Marchand
Promoteur : Frank Janssen
Master en science de gestion

Auteur : Louis Verbeeren
Promoteur : Frank Janssen
Master en science de gestion

Déclaration relative à l'utilisation d'outils d'intelligence artificielle (IA)

Dans le cadre de la rédaction de ce mémoire, les auteurs ont eu recours à des outils d'intelligence artificielle générative, notamment ChatGPT, afin d'assister certaines tâches de rédaction, de reformulation, de correction linguistique, de structuration du contenu ainsi que de recherche exploratoire.

Les analyses, réflexions, conclusions, choix méthodologiques et décisions présentés dans ce mémoire demeurent toutefois le résultat du travail personnel des auteurs. Les outils d'intelligence artificielle ont été utilisés comme outils d'assistance et n'ont en aucun cas remplacé le jugement critique, la vérification des informations, ni la responsabilité académique des auteurs.

Par la présente déclaration, nous attestons que le contenu de ce mémoire constitue le fruit de notre travail personnel, enrichi par une utilisation réfléchie, critique et responsable des outils d'intelligence artificielle.

Juliette Marchand

Louis Verbeeren

Nathan Moreau

Adam Bernard

Remerciements

Au terme de ce mémoire, nous souhaitons adresser nos sincères remerciements à toutes les personnes qui ont contribué à la réalisation du projet OpSee et qui nous ont accompagnés tout au long de cette aventure entrepreneuriale.

Nous remercions tout particulièrement nos promoteurs, Monsieur Frank Janssen et Monsieur Charles Pecheur, pour leur disponibilité, leurs conseils et leur accompagnement tout au long de ce travail. Leurs remarques et leurs questionnements nous ont permis d'approfondir notre réflexion et de renforcer la qualité de nos analyses.

Nous adressons également nos chaleureux remerciements à notre mentor, Maxime Schreck, pour son implication, son soutien et les nombreux conseils qu'il nous a prodigués tout au long du projet. Son expérience entrepreneuriale et sa capacité à nous challenger ont constitué une aide précieuse dans le développement d'OpSee.

Nous souhaitons remercier tout particulièrement Christophe Camerlynck et Peter Mees de l'entreprise Agintech. Leur expertise du secteur industriel, leur connaissance approfondie des systèmes MES et leur disponibilité ont joué un rôle déterminant dans la construction du projet. Leurs retours d'expérience, leurs conseils techniques et leur confiance nous ont permis de mieux comprendre les réalités du terrain et d'affiner notre vision d'OpSee.

Nous remercions également l'ensemble des entreprises, professionnels et experts qui ont accepté de participer à nos entretiens et à nos échanges. Leur temps, leurs retours et leur intérêt pour le projet ont largement contribué à la validation de nos hypothèses et à l'enrichissement de notre réflexion.

Enfin, nous adressons nos remerciements les plus sincères à nos familles, nos amis et nos proches pour leur soutien constant, leurs encouragements et leur patience durant ces deux années de travail.

Executive summary

OpSee est un projet entrepreneurial porté par Juliette Marchand, Adam Bernard, Nathan Moreau et Louis Verbeeren dans le cadre du master INEO de l'UCLouvain, en partenariat avec AgiNtech. Le constat de départ est double, théorique et terrain : les PME manufacturières européennes, soit 2,18 millions d'entreprises dont 65 % restent sous le seuil minimum d'intensité numérique mesuré par Eurostat, n'ont pas de système MES (*Manufacturing Execution Systems*) à leur portée. Les trois catégories d'offres existantes (Tier 1 propriétaires à 150-500 k€ par site, mid-market, SaaS OEE à périmètre partiel) ne couvrent pas le segment des PME ayant besoin d'un MES complet à coût d'entrée nul.

OpSee combine trois éléments qu'aucun concurrent européen n'associe : un modèle *open-core* (noyau AGPLv3 publié sous licence libre, modules avancés sous licence propriétaire), une facturation par équipement (Premium 59 €/mois ou Entreprise 95 €/mois par équipement) et un déploiement *on-premise* sur un boîtier matériel OpEdge dédié. Le mémoire couvre sept dimensions du projet : analyse stratégique, architecture technique, juridique, marketing, gouvernance, plan financier et analyse des risques.

Le marché européen du MES atteint 3,5 milliards d'euros en 2025 et est projeté à 5,88 milliards à horizon 2030 (CAGR 9,1 %). La zone d'amorçage (Belgique, France, Allemagne, Pays-Bas, extension Tchéquie) concentre environ 105 000 PME cibles de 10 à 249 salariés. Plus de 30 entretiens semi-directifs confirment quatre douleurs récurrentes (absence de visibilité temps réel, données peu fiables, saisie manuelle persistante, rejet du tarif *per user*) et plusieurs signaux d'achat explicites.

Côté technique, OpSee tient dans un monorepo GitHub d'environ 295 000 lignes organisé en services Docker (NGINX, FastAPI, TimescaleDB, Keycloak, Mosquitto, React/Vite), conforme aux standards industriels ISA-95 et ISA-88. La configuration retenue tient environ 195 équipements à 1 Hz par nœud OpEdge sous charge réelle. Une couche *AI Assistant* (cinq agents experts, contrôle d'accès RBAC propagé) est la seule composante qui sort du réseau local du client à ce jour : elle appelle l'API Anthropic en dehors de l'OpEdge,

alors que tous les autres services restent intégralement *on-premise*.

La structure juridique est une SRL belge, retenue pour la flexibilité offerte par le CSA de 2019. Un audit licenciaire confirme que 98 % des composants tiers de la *stack* sont compatibles avec le modèle open-core ; les quatre cas de vigilance (Grafana AGPLv3, Redis SSPL, TimescaleDB Apache+TSL, Psycopg LGPL) sont neutralisés par des choix d'architecture déjà appliqués. Les régimes RGPD, NIS 2, CRA et FSMA sont déclinés au cas par cas, et la sortie de données vers l'API Anthropic est encadrée par DPA, SCCs et obligations AI Act.

Le plan financier couvre 2026-2030 en trois scénarios. Le chiffre d'affaires 2030 atteint 579 k€ en *worst*, 1,57 M€ en *expected* et 2,77 M€ en *best*. L'EBITDA bascule en territoire positif dès 2028 en *best* et 2029 en *expected* ; il reste négatif en *worst* sur l'horizon du plan. Le financement combine apport AgiNtech (200 k€ en 2026), subventions wallonnes et fédérales (180 k€ cumulés) et tour de capital risque externe (150 k€ en 2027), soit 530 k€ qui couvrent l'intégralité du besoin en scénarios médian et optimiste. La VAN actualisée à 12,5 % atteint +182 k€ en *expected* et +1,36 M€ en *best* ; la valorisation pré-money 2027 au multiple de 5x ARR ressort à 1,28 M€ en *expected* (89,5 % AgiNtech après dilution).

La gouvernance repose sur une structure bi-pôle légère (technique sous Peter Mees, business sous Christophe Camerlynck, CEO d'AgiNtech), encadrée par un pacte d'actionnaires couvrant *vesting*, droits de préemption et procédure de récusation sur le conflit d'intérêts OpSee–AgiNtech. Quatre risques majeurs sont identifiés (licenciaire sur la chaîne open source, cybersécurité, adoption commerciale lente, dépendance aux intégrateurs partenaires), chacun avec une mitigation explicite.

Les deux paramètres à valider en priorité sur le terrain sont la conversion Free→payant (10-20 % selon le scénario) et le churn équipement (1-5 %). Ils conditionnent à la fois la trajectoire commerciale et la valorisation lors de tours de financement ultérieurs.

Acronymes

AGPLv3 : Affero General Public License version 3

AIPD : Analyse d'Impact relative à la Protection des Données

API : Application Programming Interface

ARR : Annual Recurring Revenue

BFR : Besoin en Fonds de Roulement

BMC : Business Model Canvas

BNB : Banque Nationale de Belgique

BYO : Bring Your Own (key)

CAGR : Compound Annual Growth Rate

CIR 92 : Code des Impôts sur les Revenus de 1992

CLA : Contributor License Agreement

COSS : Commercial Open Source Software

CP-SAT : Constraint Programming – SAT solver

CPS : Cyber-Physical Systems

CRA : Cyber Resilience Act

CSA : Code des Sociétés et des Associations

CSRD : Corporate Sustainability Reporting Directive

D&O : Directors and Officers (insurance)

DII : Digital Intensity Index

DPA : Data Processing Addendum

DPP : Digital Product Passport

EBITDA : Earnings Before Interest, Taxes, Depreciation and Amortization

ERP : Enterprise Resource Planning

ETP : Équivalent Temps Plein

FPY : First Pass Yield

FSMA : Food Safety Modernization Act (FDA)

IIoT : Industrial Internet of Things

IoT : Internet of Things

IPC : Indice des Prix à la Consommation

ISA-88 : International Society of Automation – Standard 88 (procédés *batch*)

ISA-95 : International Society of Automation – Standard 95 (intégration entreprise-production)

ISOC : Impôt des Sociétés (Belgique)

JWT : JSON Web Token

KPI : Key Performance Indicator

LLM : Large Language Model

MCP : Model Context Protocol

MES : Manufacturing Execution System

MESA : Manufacturing Enterprise Solutions Association

MQTT : Message Queuing Telemetry Transport

MTBF : Mean Time Between Failures

MTTR : Mean Time To Repair

MVP : Minimum Viable Product

NIS 2 : Network and Information Security Directive (révisée)

NPS : Net Promoter Score

OEE : Overall Equipment Effectiveness

OIDC : OpenID Connect

ONSS : Office National de Sécurité Sociale

OPC-UA : Open Platform Communications – Unified Architecture

OSI : Open Source Initiative

OT : Operational Technology

PCMN : Plan Comptable Minimum Normalisé

PESTEL : Politique, Économique, Socioculturel, Technologique, Écologique, Légal

PLC : Programmable Logic Controller

PME : Petite ou Moyenne Entreprise

POC : Proof of Concept

RBAC : Role-Based Access Control

RC Pro : Responsabilité Civile Professionnelle

RGPD : Règlement Général sur la Protection des Données

SaaS : Software as a Service

SAM : Serviceable Available Market

SCADA : Supervisory Control and Data Acquisition

SCC : Standard Contractual Clauses (RGPD)

SLA : Service Level Agreement

SOM : Serviceable Obtainable Market

SPF : Service Public Fédéral

SQL : Structured Query Language

SRL : Société à Responsabilité Limitée

SSPL : Server Side Public License

STP : Segmentation, Targeting, Positioning

SWOT : Strengths, Weaknesses, Opportunities, Threats

TAM : Total Addressable Market

TEEP : Total Effective Equipment Performance

TLS : Transport Layer Security

TRS : Taux de Rendement Synthétique (équivalent francophone de l'OEE)

TSL : Timescale License

TVA : Taxe sur la Valeur Ajoutée

VAN : Valeur Actuelle Nette

VC : Venture Capital

VRIN : Valuable, Rare, Inimitable, Non-substitutable

WIP : Work In Progress

Glossaire

AGPLv3 : Licence libre *copyleft* fort imposant la divulgation du code source de toute version dérivée mise à disposition par réseau ; retenue pour le noyau d'OpSee.

BFR : Besoin en fonds de roulement, décalage de trésorerie entre les encaissements clients et les décaissements fournisseurs ; estimé chez OpSee à environ un mois de chiffre d'affaires.

Bus factor : Nombre minimal de personnes dont la perte simultanée bloquerait la continuité d'un projet ; risque clé pour les équipes réduites.

Business Model Canvas : Modèle visuel d'Osterwalder en neuf blocs synthétisant un modèle économique (segments, proposition de valeur, canaux, relations, revenus, ressources, activités, partenaires, coûts).

COSS : *Commercial Open Source Software* ; modèle d'éditeur monétisant un projet open source via des compléments commerciaux (modules premium, services, garanties).

CSRD : *Corporate Sustainability Reporting Directive*, directive européenne 2022 imposant un reporting extra-financier détaillé.

DII : *Digital Intensity Index*, indice composite Eurostat mesurant l'intensité numérique des entreprises selon douze dimensions.

Drag-along / Tag-along : Clauses standards de pacte d'actionnaires : la première oblige les minoritaires à céder en cas d'offre globale, la seconde leur ouvre symétriquement un droit de suite.

EBITDA : Résultat avant intérêts, impôts, dépréciations et amortissements ; indicateur de performance opérationnelle.

Edge computing : Traitement des données au plus près de leur source (atelier, équipement), par opposition à un traitement centralisé en *cloud*.

ERP : Logiciel de gestion intégré couvrant la planification des ressources de l'entreprise (finances, ventes, achats, RH).

Freemium : Modèle commercial combinant une offre gratuite (entrée du *funnel*) et des

offres payantes proposant des fonctionnalités avancées.

Industrie 4.0 : Quatrième révolution industrielle marquée par la connectivité des équipements, les systèmes cyber-physiques et la décentralisation de la décision.

IoT : Réseau d'objets physiques connectés capables de collecter et d'échanger des données.

ISA-88 : Standard IEC 61512 structurant la gestion des procédés *batch* : hiérarchie d'équipements, modèle de recettes, allocation au niveau *Unit*.

ISA-95 : Standard IEC 62264 définissant l'intégration verticale entreprise-production en cinq niveaux et formalisant l'interface ERP-MES.

LLM : *Large Language Model*, modèle de langage de grande taille capable de générer du texte et d'interagir avec son environnement via des outils.

MCP : *Model Context Protocol*, standard ouvert d'intégration entre LLM et outils, gouverné depuis 2025 par la Linux Foundation.

MES : Système informatique de niveau 3 (au sens d'ISA-95) assurant le pilotage et le suivi de la production en temps réel, entre l'ERP et le SCADA.

MQTT : Protocole léger de messagerie publication/souscription utilisé pour la collecte de données IIoT.

NIS 2 : Directive européenne 2022 étendant les obligations de cybersécurité à un large périmètre d'entreprises critiques.

OEE : Indicateur de *Total Productive Maintenance* mesurant l'efficacité globale d'un équipement comme produit de la disponibilité, de la performance et de la qualité.

Offline-first : Architecture conçue pour fonctionner sans connexion Internet permanente ; toutes les données restent sur site, l'accès externe est l'exception.

OPC UA : *Open Platform Communications Unified Architecture*, protocole orienté services pour l'interopérabilité industrielle entre équipements, SCADA et MES.

Open-core : Modèle hybride où le noyau du logiciel est distribué en open source et où des modules avancés restent propriétaires et payants. C'est le modèle suivi par Odoo (ERP) ou GitLab (DevOps).

OpEdge : Appliance industrielle livrée par OpSee, embarquant la plateforme préinstallée et prête à brancher au réseau de l'atelier client.

PESTEL : Cadre d'analyse macro-environnementale en six dimensions : politique, économique, socioculturelle, technologique, écologique et légale.

PLC : Automate programmable utilisé pour le contrôle des processus industriels au niveau 2 de la pyramide ISA-95.

PME : Petite ou moyenne entreprise au sens européen (effectif inférieur à 250 salariés, CA $\leq$ 50 M€ ou bilan $\leq$ 43 M€).

RBAC : *Role-Based Access Control*, modèle de droits introduit par Sandhu (1996) qui assigne les permissions à des rôles plutôt qu'à des utilisateurs individuels.

SCADA : Système de supervision et de contrôle des processus industriels au niveau 2 de la pyramide ISA-95.

Single-vendor open source : Modèle d'éditeur unique propriétaire du code, le publiant sous licence open source tout en monétisant des compléments commerciaux (*dual licensing* ou *open core*).

SRL : Société à Responsabilité Limitée belge, forme issue de la réforme du CSA de 2019 ; pas de capital minimum, responsabilité des associés limitée aux apports.

SWOT : Matrice croisant forces et faiblesses (analyse interne) avec opportunités et menaces (analyse externe).

TAM, SAM, SOM : *Total / Serviceable Available / Serviceable Obtainable Market* ; segmentation chiffrée du marché adressable du plus large (mondial) au plus restreint (zone et segment cible).

TimescaleDB : Extension PostgreSQL ajoutant le concept d'*hypertable* (partitionnement temporel automatique) pour le stockage de séries temporelles à haut débit.

VAN : Valeur actuelle nette, somme actualisée des flux de trésorerie futurs d'un projet à un taux d'actualisation reflétant le risque.

Vesting : Mécanisme contractuel conditionnant l'attribution effective de parts sociales à un fondateur à son engagement opérationnel dans la société pendant une période mini-

male.

VRIN : Critères de Barney (1991) pour qualifier un avantage concurrentiel durable : valeur, rareté, inimitabilité, non-substituabilité.

Table des matières

Déclaration relative à l'utilisation d'outils d'intelligence artificielle (IA) i
Remerciements ii
Executive summary iii
Acronymes v
Glossaire viii
Table des matières xii

Introduction **1**

1 Présentation du projet OpSee **3**
1.1 Défis et besoins actuels 3
1.2 Notre solution : OpSee 4
1.2.1 Origine et concept du projet 4
1.3 Membres de l'équipe et leurs rôles 6
1.3.1 Collaboration avec AgiNtech 10

2 Opportunité et Analyse Stratégique **12**
2.1 Opportunité 13
2.1.1 Le contexte des PME industrielles européennes 13
2.1.2 La dynamique de l'open source dans le logiciel industriel 15
2.1.3 Positionnement du MES dans la chaîne industrielle 16
2.2 Analyse de la demande à travers l'étude de marché 17
2.2.1 Méthodologie 17

2.2.2 Définition du marché 19
2.2.2.1 Taille du marché 19
2.2.2.2 Structure des prix 21
2.2.3 Étude de marché qualitative 23
2.2.3.1 Méthodologie et échantillon 23
2.2.3.2 État des outils en place chez les prospects 24
2.2.3.3 Douleurs récurrentes 25
2.2.3.4 Sensibilité tarifaire et signaux budgétaires 26
2.2.3.5 Fonctionnalités prioritaires 26
2.2.3.6 Signaux d'achat 27
2.2.3.7 Synthèse 27
2.3 Analyse de l'environnement externe 28
2.3.1 Macro-environnement : analyse PESTEL 28
2.3.1.1 Environnement politique 28
2.3.1.2 Environnement économique 29
2.3.1.3 Environnement socioculturel 30
2.3.1.4 Environnement technologique 32
2.3.1.5 Environnement écologique 33
2.3.1.6 Environnement législatif 34
2.3.1.7 Synthèse PESTEL 36
2.3.1.8 Méthode des scénarios 37
2.3.2 Micro-environnement : forces de Porter 40
2.3.2.1 Intensité de la concurrence 40
2.3.2.2 Pouvoir de négociation des clients 41
2.3.2.3 Pouvoir de négociation des collaborateurs 41
2.3.2.4 Menace des produits de substitution 42
2.3.2.5 Menace des nouveaux entrants 43
2.3.2.6 Synthèse 43

2.4 Analyse interne 44
2.4.1 Modèle VRIN 44
2.4.1.1 Valeur 45
2.4.1.2 Rareté 45
2.4.1.3 Inimitabilité 46
2.4.1.4 Non-substituabilité 47
2.4.1.5 Synthèse VRIN 48
2.4.2 Analyse de la chaîne de valeur 49
2.4.2.1 Activités primaires 51
2.4.2.2 Activités de soutien 53
2.4.2.3 Synthèse 54
2.5 Choix de positionnement stratégique 57
2.5.1 Stratégie concurrentielle : horloge de Bowman 57
2.5.2 Synthèse de la proposition de valeur 59
2.6 Diagnostic global : matrice SWOT 60
2.7 Identité stratégique d'OpSee 62
2.7.1 Mission 62
2.7.2 Vision 62
2.7.3 Culture d'entreprise 63
2.8 Business Model Canvas 63
2.8.1 Segments de clientèle 64
2.8.2 Proposition de valeur 64
2.8.3 Canaux et relations clients 66
2.8.4 Activités clés et ressources 66
2.8.5 Sources de revenus et structure de coûts 67

3 Analyse technique **68**
3.1 État de l'art des systèmes MES 69
3.1.1 Définition et rôles d'un MES 69

3.1.2 Le formalisme MESA-11 70
3.1.3 Smart Manufacturing et Industrie 4.0 71
3.1.3.1 Fabrication intelligente : définition, technologies et objectifs 73
3.1.3.2 Le MES comme jumeau numérique de l'usine 74
3.1.3.3 Enjeux pour les PME industrielles 74
3.1.4 Standards industriels 75
3.1.4.1 ISA-95 : intégration entreprise-production 75
3.1.4.2 ISA-88 : gestion des processus batch 76
3.1.4.3 OPC-UA et MQTT : protocoles de communication industrielle 77
3.1.5 L'indicateur OEE : disponibilité, performance, qualité 80
3.2 Définition formelle de l'équipement 82
3.3 Cahier des charges d'OpSee 83
3.3.1 Exigences fonctionnelles 83
3.3.1.1 EF-01 Collecte et ingestion de données industrielles 83
3.3.1.2 EF-02 Modélisation hiérarchique des équipements 84
3.3.1.3 EF-03 Gestion des procédés de fabrication 84
3.3.1.4 EF-04 Gestion des matériaux, recettes et batches 84
3.3.1.5 EF-05 Ordonnancement automatique par programmation par contraintes 85
3.3.1.6 EF-06 Gestion du personnel, compétences et planification 85
3.3.1.7 EF-07 Suivi de la performance de production et indicateurs industriels 86
3.3.1.8 EF-08 Traçabilité de production et conformité réglementaire 86
3.3.1.9 EF-09 Alertes automatiques et détection d'anomalies . . . 87
3.3.1.10 EF-10 Reporting normé et exports 88
3.3.1.11 EF-11 Cockpit de visualisation personnalisable 88
3.3.1.12 EF-12 Assistant conversationnel 88

3.3.1.13 EF-13 Système de *licensing* modulaire 88
3.3.1.14 EF-14 Localisation multilingue 89
3.3.1.15 EF-15 Gestion et suivi d'exécution des ordres de production 89
3.3.1.16 EF-16 Reporting environnemental et durabilité 90
3.3.2 Exigences non fonctionnelles 90
3.3.2.1 ENF-01 Simplicité d'usage 90
3.3.2.2 ENF-02 Modularité et architecture open-core 92
3.3.2.3 ENF-03 Fonctionnement hors ligne 92
3.3.2.4 ENF-04 Déployabilité 92
3.3.2.5 ENF-05 Performance et passage à l'échelle 92
3.3.2.6 ENF-06 Interopérabilité 93
3.3.2.7 ENF-07 Sécurité et audit 93
3.3.2.8 ENF-08 Sauvegarde et reprise sur incident 93
3.3.2.9 ENF-09 Documentation 93
3.3.3 Alignement avec les standards ISA-95 et ISA-88 94
3.3.3.1 Alignement avec ISA-95 94
3.3.3.2 Alignement avec ISA-88 94
3.4 Présentation de l'application OpSee 96
3.4.1 Modéliser l'atelier : de la hiérarchie d'équipements à la recette . . . 97
3.4.2 Planifier et lancer la production 99
3.4.3 Piloter la performance en temps réel 101
3.4.4 Être assisté : l'agent conversationnel 104
3.5 Architecture et choix technologiques 106
3.5.1 Vue d'ensemble et conteneurisation (Docker) 106
3.5.2 Pipeline de données : ingestion directe et inventaire de serveurs . . 110
3.5.3 Base de données (TimescaleDB et modèle de données ISA-95) . . . 112
3.5.4 Serveur API (FastAPI) 115
3.5.5 Interface utilisateur (React/Vite) 117

3.5.6 Authentification et sécurité (Keycloak) . . . 119
3.5.7 L'AI Assistant et la frontière du réseau local . . . 121
3.5.8 Synthèse architecturale et interactions entre composants . . . 122
3.6 Environnement de développement . . . 124
3.6.1 Organisation de l'équipe et méthodologie . . . 124
3.6.2 Gestion du code et déploiement continu . . . 125
3.6.3 Déploiement sur OpEdge . . . 126
3.6.4 Stratégie de tests . . . 127
3.6.5 Documentation . . . 129
3.6.6 Utilisation de l'IA dans le processus de développement . . . 130
3.7 Analyse critique des performances et des capacités . . . 131
3.7.1 Méthodologie et environnement de test . . . 131
3.7.2 Performance de la configuration de référence . . . 132
3.7.3 Optimisations et gains mesurés . . . 133
3.7.3.1 Couche HTTP : cache et dimensionnement du pool . . . 133
3.7.3.2 Couche ingestion : collecteur Python direct . . . 135
3.7.3.3 Architecture finale : isolation du collecteur et redécoupage CPU . . . 136
3.7.3.4 Répartition de la charge CPU . . . 137
3.7.3.5 Synthèse comparative des quatre configurations . . . 137
3.7.4 Capacité de production atteignable . . . 140
3.7.5 Goulots résiduels et pistes d'amélioration . . . 141

4 Aspects juridiques **143**
4.1 Véhicule juridique de la société . . . 144
4.2 Constitution de la société . . . 145
4.3 Gouvernance et administration . . . 147
4.4 Obligations comptables . . . 149
4.5 Principaux contrats . . . 151

4.6 Considérations juridiques liées aux ressources humaines 153
4.7 Responsabilité et assurances 155
4.8 Propriété intellectuelle 157
4.9 Compatibilité de la stack technique avec le modèle open-core 159
4.9.1 Positionnement théorique : *single-vendor open source* et *IP modularity* 160
4.9.2 Audit appliqué à la stack OpSee 160
4.9.3 Synthèse 162
4.10 Réglementations liées aux MES 163
4.11 Confidentialité et souveraineté des données dans l'AI Assistant 165
4.11.1 Qualification juridique de la relation OpSee–Anthropic 166
4.11.2 Données transmises et qualification au regard du RGPD 166
4.11.3 Risques résiduels et obligations dérivées 167
4.11.4 Cadre contractuel client et mode BYO 168
4.12 Synthèse 169

5 Marketing **171**
5.1 Marketing stratégique 172
5.1.1 Segmentation 172
5.1.2 Ciblage 173
5.1.3 Positionnement 174
5.2 Marketing opérationnel 176
5.2.1 Politique de produit 176
5.2.2 Politique de prix 179
5.2.3 Politique de distribution 180
5.2.4 Politique de communication 184

6 Gouvernance **188**
6.1 Structure organisationnelle et processus décisionnels 189
6.1.1 Processus décisionnels et coordination interne 189

6.1.2 Évolution organisationnelle et advisory board 190
6.2 Gouvernance actionnariale 191
6.2.1 Pacte d'actionnaires 191
6.2.2 Gestion des conflits d'intérêts OpSee–AgiNtech 193
6.3 Gouvernance opérationnelle 194
6.3.1 Gouvernance produit et roadmap 195
6.3.2 Gouvernance de la communauté open source 195
6.3.3 Veille licenciaire opérationnelle 197
6.3.4 Continuité opérationnelle et *bus factor* 197
6.4 Pilotage et indicateurs 198
6.5 Synthèse 199

7 Plan financier **202**
7.1 Hypothèses fixées pour établir notre plan financier 203
7.2 Estimations des ventes 207
7.3 Prévisions du chiffre d'affaires 208
7.4 Coûts fixes annuels 210
7.5 Coûts variables annuels 211
7.6 Besoin en fonds de roulement au lancement de l'entreprise 213
7.7 Trésorerie avant les apports en capital 214
7.8 Compte de résultat prévisionnel 214
7.9 Bilan prévisionnel 216
7.10 Plan de trésorerie prévisionnel 217
7.11 Ratios de rentabilité 218
7.12 Ratios de structure financière 220
7.13 Sources de financement 221
7.14 Valorisation et cap table 224
7.15 Conclusion du plan financier 226

8 Analyse des risques, limites et pistes d'amélioration 227

8.1 Analyse des risques 228

8.1.1 Risque licenciaire sur la chaîne d'approvisionnement open source . . 228

8.1.2 Risque de cybersécurité et de protection des données industrielles . 229

8.1.3 Risque d'adoption commerciale lente 230

8.1.4 Risque de dépendance aux partenaires intégrateurs 231

8.2 Limites et pistes d'amélioration 232

8.2.1 Limites fonctionnelles actuelles du prototype 232

8.2.2 Limites méthodologiques de l'étude 232

8.2.3 Pistes d'amélioration techniques 233

8.2.4 Pistes d'amélioration organisationnelles et commerciales 233

9 Conclusion 235

9.1 Perspectives futures 237

A Annexes 239

A.1 Curriculum vitae 240

A.1.1 Nathan Moreau 240

A.1.2 Adam Bernard 241

A.1.3 Juliette Marchand 242

A.1.4 Louis Verbeeren 243

A.2 Opportunité et Analyse Stratégique (chapitre 2) 244

A.2.1 Interviews 244

A.2.1.1 Interview 1 244

A.2.1.2 Interview 2 247

A.2.1.3 Interview 3 252

A.2.1.4 Interview 4 256

A.2.1.5 Interview 5 (Cemix – Tesar David, session 1) 261

A.2.1.6 Interview 6 (Dequachim) 268

A.2.1.7 Interview 7 (Diarotech) 274
A.2.1.8 Interview 8 (Cemix Štramberk – Tesar David, session 2) . 279
A.2.1.9 Interview 9 (GreenBuddies – Tomasek Jaroslav) 285
A.2.1.10 Interview 10 (Vinventions – Pirard) 288
A.2.1.11 Interview 11 (Sonaca – Joël Crappe, GPO Qualité) 294
A.2.2 Synthèse des concurrents directs et indirects 301
A.3 Analyse technique (chapitre 3) 305
A.3.1 Alignement d'OpSee avec ISA-95 et ISA-88 305
A.3.2 Outils exposés à l'AI Assistant 306
A.3.3 Captures d'écran du logiciel OpSee 308
A.3.3.1 Accueil et connexion 308
A.3.3.2 Cockpits personnalisables 309
A.3.3.3 Administration — Équipements 310
A.3.3.4 Administration — Matières 311
A.3.3.5 Administration — Personnel 311
A.3.3.6 Administration — Procédures (ISA-88) 312
A.3.3.7 Administration — Recettes 313
A.3.3.8 Configuration OEE 314
A.3.3.9 Administration plateforme 315
A.3.3.10 Production 316
A.3.3.11 Vue opérateur et assistant IA 318
A.3.3.12 Profil utilisateur 319
A.3.4 Cahier des charges sécurité détaillé 319
A.3.5 Feuille de route détaillée du cahier des charges 323
A.3.6 Définition formelle de l'équipement 325
A.3.6.1 Le besoin d'une définition non ambiguë 325
A.3.6.2 Ancrage normatif : la hiérarchie ISA-88/95 325

A.3.6.3 Ancrage technique : connexion à un automate ou à un capteur . . . 328
A.3.6.4 Définition retenue par OpSee . . . 328
A.3.6.5 Cas types et arbitrages . . . 329
A.3.6.6 Articulation avec la chaîne de licensing . . . 330
A.3.7 Intégration des modèles de langage (LLM) dans OpSee . . . 330
A.3.7.1 Architecture de l'AI Assistant : agents experts et appels d'outils . . . 331
A.3.7.2 Sortie de données vers l'API Anthropic . . . 335
A.3.7.3 Perspectives : LLM local et protocole MCP . . . 336
A.4 Aspects juridiques (chapitre 4) . . . 338
A.4.1 Audit complet des licences de la stack OpSee . . . 338
A.4.1.1 Infrastructure et services (images Docker) . . . 339
A.4.1.2 Backend Python (FastAPI) . . . 340
A.4.1.3 Streamlit (chatbot LLM) . . . 340
A.4.1.4 Frontend (React + MUI) . . . 341
A.4.1.5 Composants Node-RED additionnels . . . 342
A.4.1.6 Services externes (SaaS) . . . 342
A.5 Plan opérationnel détaillé (chapitre 5) . . . 342
A.5.1 Vue d'ensemble du modèle opérationnel open-core . . . 343
A.5.2 Cycle de vie du produit et déploiement client . . . 345
A.5.3 Programme partenaires intégrateurs et revendeurs . . . 346
A.5.4 Infrastructure, fournisseurs et chaîne de licensing . . . 349
A.5.5 Support et qualité de service . . . 351
A.5.6 Pilotage et trajectoire opérationnelle . . . 352
A.5.6.1 Indicateurs de pilotage . . . 352
A.5.6.2 Trajectoire d'évolution opérationnelle . . . 353
A.6 Plan financier (chapitre 7) . . . 354

A.6.1 Synthèse du scénario *Worst* 355
A.6.2 Synthèse du scénario *Expected* 356
A.6.3 Synthèse du scénario *Best* 357
A.6.4 Compte de résultats prévisionnel 358
A.6.5 Bilan prévisionnel 360
A.6.6 Plan de financement détaillé 361
A.6.7 Indicateurs financiers : VAN, ratios, valorisation 363
A.7 Analyse des risques (chapitre 8) 364

Bibliographie **365**

Table des figures

2.1 Distribution de l'intensité numérique des entreprises manufacturières de l'UE en 2025 14
2.2 Funnel TAM-SAM-SOM du marché MES adressé par OpSee 20
2.3 Comparaison du coût d'entrée et du délai de mise en service par catégorie de fournisseur MES 23
2.4 Matrice 2×2 des scénarios PESTEL pour OpSee à horizon 2030 38
2.5 Évaluation des cinq forces de Porter appliquées au marché MES pour PME industrielles. 44
2.6 Chaîne de valeur d'OpSee adaptée du modèle de Porter (1985). 51
2.7 Positionnement concurrentiel sur l'horloge stratégique de Bowman 58
2.8 Value Proposition Canvas d'OpSee 59
2.9 Matrice SWOT du projet OpSee. 61
2.10 Business Model Canvas d'OpSee. 65

3.1 Structure du formalisme MESA-11 ("History of the MESA Models", 2025) . 72
3.2 Chronologie des révolutions industrielles ("Industrie 4.0", 2025) 72
3.3 Pyramide de l'automatisation ISA-95 (Lachance, 2021). 75
3.4 Descente dans la hiérarchie ISA-95/88 de la brasserie, de l'entreprise à l'équipement. À chaque niveau, le fil d'Ariane situe la position dans l'arborescence. Concrétise l'exigence EF-02. 98

3.5 Onglet « formule » d'une recette : nomenclature des matières avec quantités, criticité et tolérances. Concrétise l'exigence EF-04. 99
3.6 Descente dans le modèle procédural ISA-88 : de la procédure à ses procédures unitaires (a), puis aux opérations d'une procédure unitaire (b), jusqu'aux phases d'une opération (c). Concrétise l'exigence EF-03. 100
3.7 Liste des ordres de fabrication : recette, équipement cible, quantité et statut. Concrétise EF-15. 100
3.8 À gauche, l'arbre de raisons configuré côté administrateur (chaque cause rattachée à un type de perte OEE, qui détermine sa catégorie). À droite, sa restitution côté opérateur, qui sélectionne la raison de l'arrêt. Alimente EF-07 et EF-08. 102
3.9 Lecture de l'OEE pour la ligne suivie. En haut, les quatre jauges (efficacité globale décomposée en disponibilité, performance et qualité, situées par rapport aux objectifs). En bas, la cascade des pertes, du temps planifié au temps réellement productif. Concrétise EF-07. 103
3.10 Frise chronologique des arrêts (vue sur une heure) : en rouge, les arrêts encore à justifier, en vert ceux déjà justifiés (dont les micro-arrêts auto-justifiés). 103
3.11 Cockpit personnalisable : widgets OEE, audit et données agrégés sur un tableau de bord composable. Concrétise EF-11. 104
3.12 Assistant conversationnel : réponse en langage naturel à une demande de l'utilisateur (ici, l'inventaire hiérarchique des équipements). Concrétise EF-12. 105
3.13 Architecture conteneurisée d'OpSee 106
3.14 Débit HTTP en fonction de la concurrence pour les quatre configurations testées 134
3.15 Latence médiane par *endpoint* à concurrence 10 pour les quatre configurations 135

3.16 Débit d'ingestion (valeurs résolues écrites en base de données) pour les quatre configurations 136
3.17 Consommation CPU pic par conteneur à 1 000 msg/s, par configuration . . 138
3.18 Carte de performance comparée des quatre configurations sur cinq indicateurs 138
3.19 Débit HTTP sous charge combinée MQTT + HTTP pour les quatre configurations 139

5.1 Modèle opérationnel d'OpSee : trois flux opérationnels articulés autour de l'offre open-core et de ses deux extensions propriétaires. 181

7.1 Chiffre d'affaires annuel par scénario (k€ HT). 209
7.2 Effectif d'OpSee 2026-2030 (ETP en fin d'année). 211
7.3 Répartition des charges d'exploitation 2030 (754 k€). 212
7.4 EBITDA annuel par scénario (k€). 215
7.5 Trésorerie cumulée annuelle par scénario (k€, après apports). 217

Liste des tableaux

2.1 Entreprises manufacturières par taille dans la zone géographique cible d'OpSee (2020) 21
2.2 Synthèse PESTEL : opportunités et menaces pour OpSee. 36
2.3 Synthèse VRIN des principales ressources et compétences d'OpSee. 49
2.4 Chaîne de valeur OpSee : différenciation et capture de valeur par activité. . 56

3.1 Comparaison OPC UA et MQTT (Leitner & Mahnke, 2006 ; Silva et al., 2021) 79
3.2 Exigences fonctionnelles d'OpSee 91
3.3 Exigences non fonctionnelles d'OpSee 95
3.4 Services Docker composant l'architecture d'OpSee 107
3.5 Interactions principales entre composants d'OpSee 123
3.6 Synthèse comparative des quatre configurations testées 138

4.1 Composants de la stack OpSee à licence atypique ou récemment modifiée. La colonne « Mesure adoptée » décrit l'état d'implémentation actuel dans la stack, pas une recommandation théorique. 163

5.1 Objectifs de développement du réseau de partenaires 182

6.1 Instances de gouvernance d'OpSee : cadence, participants et périmètre décisionnel. 190

6.2 Indicateurs de gouvernance non-financière : source de mesure, cadence, seuil d'alerte. 201

7.1 Résultat net après impôts par scénario (€), incluant les subventions perçues en 2026 et 2027 et l'équipe élargie à partir de septembre 2029. 215

7.2 Cap table post tour de capital risque 2027 (montants en €, multiple central 5x ARR). 225

Introduction

L'industrie manufacturière connaît depuis plusieurs années une transformation importante portée par la digitalisation des processus industriels, l'automatisation et l'intégration croissante des systèmes d'information. Cette évolution s'inscrit dans le cadre plus large de l'Industrie 4.0, concept qui désigne l'utilisation des technologies numériques connectées afin d'améliorer la flexibilité, la productivité et la performance des entreprises industrielles Kagermann et al., 2013. Pour les acteurs industriels, cette transition représente désormais un enjeu stratégique majeur dans un contexte marqué par une concurrence internationale accrue, des exigences de traçabilité plus importantes et une nécessité croissante d'optimiser les opérations en temps réel.

Cette transformation reste toutefois inégalement accessible selon la taille des entreprises. Les grandes structures industrielles disposent généralement des ressources humaines, financières et techniques nécessaires pour intégrer des solutions numériques avancées. Les PME manufacturières, en revanche, rencontrent encore de nombreuses difficultés liées aux coûts d'implémentation, à la complexité des solutions disponibles, au manque de compétences internes ou encore à la dépendance envers des logiciels propriétaires souvent peu flexibles. Il existe ainsi un décalage important entre les besoins opérationnels des PME industrielles et les solutions réellement accessibles sur le marché.

Dans ce contexte, les systèmes MES (*Manufacturing Execution Systems*) occupent une place centrale dans la digitalisation des ateliers de production. Situés entre les équipements industriels et les systèmes de gestion tels que les ERP, ils permettent notamment de suivre la production en temps réel, de collecter des données issues des machines, d'améliorer la

traçabilité, de calculer des indicateurs de performance et de faciliter le pilotage opérationnel. Malgré leur utilité, les solutions MES traditionnelles restent souvent complexes à déployer et financièrement difficiles d'accès pour de nombreuses PME.

C'est dans ce contexte qu'est né OpSee, un projet entrepreneurial développé dans le cadre du master INEO à l'Université catholique de Louvain à Louvain-la-Neuve. Le projet est porté par quatre étudiants : Juliette Marchand, Adam Bernard, Nathan Moreau et Louis Verbeeren. À travers OpSee, l'équipe souhaite proposer une alternative plus accessible aux solutions MES existantes, en s'appuyant sur une approche modulaire et sur un modèle open-core combinant un noyau logiciel ouvert et des modules avancés propriétaires.

Le projet ne se limite pas à la conception d'un logiciel industriel. Il s'inscrit dans une réflexion plus large autour de l'accessibilité des outils numériques industriels, de la souveraineté technologique, de la flexibilité des architectures logicielles et des nouveaux modèles économiques liés à l'open source. Le mémoire adopte ainsi une approche multidisciplinaire en étudiant les dimensions stratégiques, techniques, marketing, juridiques et financières nécessaires au développement du projet.

Chapitre 1

Présentation du projet OpSee

1.1 Défis et besoins actuels

Les PME manufacturières évoluent aujourd'hui dans un environnement industriel de plus en plus complexe et concurrentiel. Elles doivent répondre à des exigences croissantes en matière de productivité, de qualité, de traçabilité et de réactivité, tout en maintenant des coûts maîtrisés. Dans ce contexte, la transformation numérique devient progressivement un enjeu stratégique pour améliorer la performance industrielle et la prise de décision en temps réel Kagermann et al., 2013.

Malgré cette évolution, de nombreuses PME industrielles rencontrent encore des difficultés importantes dans leur transition numérique. Selon Mittal et al. (2018), les petites et moyennes entreprises font face à plusieurs freins majeurs liés notamment au manque de ressources financières, au déficit de compétences techniques internes, à la complexité des technologies industrielles avancées et à la difficulté d'intégrer de nouveaux systèmes dans des infrastructures existantes Mittal et al., 2018b.

Dans la pratique, de nombreuses entreprises continuent de fonctionner avec des outils fragmentés ou peu adaptés à leurs besoins opérationnels. Les informations de production sont souvent réparties entre des fichiers Excel, des documents papier, des ERP partiellement exploités ou des outils développés en interne. Cette fragmentation des données

réduit la visibilité sur les opérations, complique le suivi des performances et augmente le risque d'erreurs ou de pertes d'informations.

Les systèmes MES traditionnels permettent théoriquement de répondre à une partie de ces problématiques en centralisant les données de production et en améliorant le pilotage industriel. Cependant, ces solutions restent fréquemment coûteuses, complexes à déployer et fortement dépendantes de fournisseurs propriétaires Sáenz de Ugarte et al., 2009. Pour de nombreuses PME, les investissements nécessaires ainsi que les contraintes techniques associées constituent des freins importants à leur adoption.

Les entreprises industrielles expriment dès lors un besoin croissant pour des solutions plus accessibles, modulaires et interopérables, capables de s'intégrer progressivement dans leur environnement existant. Elles recherchent également des outils plus flexibles, simples d'utilisation et mieux adaptés à leurs contraintes opérationnelles spécifiques. Ces différents constats mettent en évidence l'existence d'un réel besoin de solutions industrielles plus ouvertes et davantage centrées sur les réalités des PME manufacturières.

1.2 Notre solution : OpSee

1.2.1 Origine et concept du projet

Face aux difficultés rencontrées par les PME industrielles dans leur transition numérique, le projet OpSee a été lancé afin d'apporter une réponse spécifique à un besoin encore peu couvert par les solutions existantes. Le constat de départ est simple : les systèmes MES disponibles sur le marché sont souvent puissants, mais leur coût, leur complexité et leur manque de flexibilité limitent leur adoption par les petites et moyennes entreprises manufacturières.

Cette problématique a été confirmée par plusieurs échanges avec des acteurs industriels, ainsi que par l'étude qualitative menée dans le cadre de ce mémoire, présentée plus en détail au point 2.2.3. Ces retours mettent surtout en évidence un besoin d'outils plus accessibles, plus progressifs et mieux adaptés aux contraintes opérationnelles des PME

industrielles.

OpSee a donc été imaginé comme une solution MES ouverte, modulaire et intuitive. L'objectif est de permettre aux entreprises de digitaliser leur production étape par étape, sans devoir supporter immédiatement la lourdeur d'un projet MES traditionnel. Le projet cherche ainsi à proposer une alternative capable d'apporter les bénéfices essentiels d'un MES, tout en restant compatible avec les moyens et le niveau de maturité numérique des PME.

Le projet est développé en collaboration avec AgiNtech, une société spécialisée dans l'automatisation industrielle et l'intégration de solutions numériques. Cette collaboration permet d'ancrer OpSee dans des problématiques concrètes de terrain et de confronter les choix techniques aux réalités des environnements de production.

Le concept d'OpSee repose sur un modèle open-core. Le noyau du logiciel est ouvert, tandis que certains modules avancés peuvent être proposés sous forme propriétaire et payante. Cette approche permet de combiner l'accessibilité et la transparence de l'open source avec un modèle économique capable de soutenir le développement, la maintenance et l'évolution de la solution.

OpSee repose sur trois principes fondateurs :

1. **Open-core** – le noyau du logiciel est ouvert, tandis que certains modules avancés peuvent être proposés sous forme propriétaire et payante. Ce modèle permet de combiner accessibilité, transparence et viabilité économique ;
2. **Modularité** – chaque entreprise peut adopter progressivement les modules dont elle a besoin, selon ses priorités, son budget et son niveau de maturité numérique ;
3. **Fonctionnement sans Internet** – la solution est pensée pour pouvoir fonctionner localement, directement dans l'environnement industriel du client, afin de garantir la continuité d'utilisation, la maîtrise des données et une meilleure adaptation aux contraintes de sécurité des entreprises.

Ainsi, OpSee ne se limite pas à un projet logiciel. Il s'inscrit dans une réflexion plus large sur la démocratisation des outils industriels numériques et sur la possibilité de

proposer aux PME une alternative crédible aux MES propriétaires traditionnels.

1.3 Membres de l'équipe et leurs rôles

L'équipe à l'origine du projet OpSee est composée de quatre étudiants de l'Université catholique de Louvain : Nathan, Adam, Louis et Juliette. Cette section a pour objectif de présenter chacun des membres de l'équipe, de mettre en évidence leurs parcours, leurs compétences complémentaires ainsi que leurs rôles respectifs dans le développement du projet. La diversité des profils réunis au sein de l'équipe constitue un élément central d'OpSee, en combinant des compétences techniques, stratégiques, entrepreneuriales et industrielles nécessaires à la conception et au développement d'une solution MES destinée aux PME manufacturières.

Nathan Moreau

Diplômé d'un bachelier d'ingénieur civil à l'UCLouvain (majeure informatique, mineure électricité), Nathan poursuit un master en ingénieur civil informatique orienté intelligence artificielle à l'École polytechnique de Louvain, dans le cadre du programme INEO. Au sein d'OpSee, il est responsable de l'architecture logicielle globale, de la sécurité, du développement des API et de l'ensemble de l'environnement serveur.

Dans le cadre associatif, il a été chef scout pendant six ans auprès d'animés de six à dix-huit ans, comme trésorier puis chef responsable d'unité. Il est aujourd'hui trésorier du kot-à-projet Sang12, consacré à la santé et à la santé mentale. Pendant deux ans, il a également encadré des étudiants en tant que tuteur universitaire en informatique et en économie.

Sur le plan technique, il maîtrise Python, Java, C, Bash, SQL et PostgreSQL, ainsi que les environnements Linux, Docker, GitHub et SSH, compétences mobilisées au quotidien dans le développement de la plateforme. Ses centres d'intérêt professionnels (apprentissage automatique, algorithmique, développement logiciel, cybersécurité) recouvrent les enjeux

techniques d'un MES open source destiné aux PME industrielles.

Son profil combine une formation d'ingénieur civil orientée intelligence artificielle, une expérience pédagogique et un engagement associatif de long terme, mobilisés à la fois sur la conception technique d'OpSee et la coordination de l'équipe pluridisciplinaire. Son curriculum vitae complet figure en annexe A.1.1.

Adam Bernard

Diplômé d'un bachelier en sciences de l'ingénieur orientation ingénieur civil avec spécification électricité et mécanique à l'UCLouvain, Adam poursuit en parallèle un master d'ingénieur civil électromécanicien à finalité spécialisée en mécatronique à l'École polytechnique de Louvain et le master interdisciplinaire INEO. Au sein d'OpSee, il est responsable du développement frontend dans son ensemble, de la conception UX/UI, de l'intégration avec le back-end et des tests utilisateurs. Il a notamment conçu le cockpit, un tableau de bord personnalisable où l'utilisateur compose ses indicateurs à partir des données remontées des automates programmables. Sa formation en électromécanique, complétée par ses cours d'automatisation industrielle, lui apporte une compréhension fine des automates, des machines d'atelier et de leurs contraintes opérationnelles. Conjuguée à sa pratique du développement logiciel, cette double compétence le positionne comme passerelle entre le client industriel et la plateforme : tout en poursuivant le développement de l'interface aux côtés de Nathan, il assurera le contact terrain avec les entreprises clientes et leurs utilisateurs, afin de faire remonter les besoins et d'alimenter l'évolution d'OpSee.

Dans le cadre associatif, il a été scout pendant l'ensemble de sa jeunesse, puis chef au 25SV Petit-Ry où il a encadré une cinquantaine d'animés pendant deux ans (2021-2023). Il pratique le hockey en club depuis plus de dix ans, est arbitre certifié et bénévole auprès d'une équipe de para-hockey. Son parcours extra-académique inclut également six années de saxophone à l'académie d'Ottignies et trois années de formation pluridisciplinaire à l'académie des Beaux-Arts de Wavre. En master 1, il a participé au projet Eurobot, un défi d'un an consacré à la conception et au pilotage d'un robot autonome pour les com-

pétitions belge et européenne. AgiNtech, partenaire industriel actuel du mémoire OpSee, sponsorisait alors l'équipe, et c'est dans ce cadre que s'est nouée la collaboration à l'origine du projet.

Sur le plan professionnel, Adam a cumulé plusieurs jobs étudiants dans la distribution (Colruyt, Brico, Carrefour) et l'événementiel (Walibi-Belgium). Étudiant indépendant depuis 2023, il opère aujourd'hui dans la vente au détail de jeux de société et est co-créateur de la marque Hazap Acryl, spécialisée dans la production de protections en acrylique destinées aux items Pokémon, distribuée notamment par la chaîne de magasins Le Zèbre à Pois. Côté technique, il maîtrise React, JavaScript, TypeScript, Python, Java et C/C++ en programmation, SolidWorks, Fusion360 et l'impression 3D en conception, ainsi que Git, VS Code, LaTeX et la suite Adobe (Illustrator, Photoshop).

Son profil combine une formation d'ingénieur électromécanicien, une expérience entrepreneuriale concrète et un intérêt fort pour le design et l'expérience utilisateur, mobilisés à la fois sur le développement de l'interface d'OpSee et sur le contact terrain avec les PME industrielles destinataires de la solution. Son curriculum vitae complet figure en annexe A.1.2.

Juliette Marchand

Après avoir obtenu un bachelier en sciences économiques et de gestion à l'UCLouvain, Juliette poursuit actuellement un master en sciences de gestion à finalité entrepreneuriale dans le cadre du programme INEO. Passionnée par l'entrepreneuriat et l'innovation, elle s'intéresse particulièrement au développement stratégique de projets technologiques et à la digitalisation des entreprises industrielles.

Au sein du projet OpSee, Juliette est responsable des aspects liés à l'analyse de marché, au positionnement stratégique, au marketing ainsi qu'au développement commercial du projet. Elle participe également à la structuration du modèle économique et à la coordination globale de certaines dimensions organisationnelles.

Dans le cadre de ses expériences professionnelles, Juliette travaille depuis plusieurs

années chez Agidrive, une agence de téléprospection spécialisée dans la génération de rendez-vous commerciaux qualifiés. Après avoir débuté comme business developer, elle a ensuite évolué vers un rôle de team leader, lui permettant de développer des compétences en prospection commerciale, gestion d'équipe, communication et développement business.

En parallèle de ses activités académiques et entrepreneuriales, Juliette s'investit activement dans le milieu associatif. Elle fait partie du kot-à-projet Kot Planète Terre, centré sur la durabilité et la sensibilisation à des modes de vie plus responsables. Après avoir occupé le poste de trésorière, elle en assure aujourd'hui la présidence. Cet engagement lui a permis de renforcer ses compétences en gestion de projet, coordination d'équipe et organisation.

Son parcours est également marqué par un engagement de longue date dans les mouvements de jeunesse. Après avoir été animée pendant plusieurs années, elle a ensuite exercé différentes responsabilités en tant que cheffe scoute, notamment dans la communication et la gestion de section. Ces expériences lui ont permis de développer des qualités de leadership, d'organisation et de gestion humaine qu'elle mobilise aujourd'hui dans le cadre du développement d'OpSee.

Grâce à ces expériences variées et complémentaires, Juliette met à profit sa vision stratégique, ses compétences relationnelles et son esprit entrepreneurial afin de contribuer au développement et à la structuration du projet OpSee. Son curriculum vitae complet figure en annexe A.1.3.

Louis Verbeeren

Après un bachelier en sciences humaines et sociales à l'UCLouvain assorti d'une mineure en sciences de gestion, Louis poursuit actuellement un master en sciences de gestion dans le cadre du programme INEO à la Louvain School of Management. Son parcours académique a été complété en 2025 par un séjour Erasmus à l'Athens University of Economics and Business, qui a élargi sa perspective sur les pratiques de gestion en environnement international.

Au sein du projet OpSee, Louis est responsable du plan financier, de la structuration des hypothèses économiques, de l'analyse des coûts et des aspects juridiques liés au développement de la solution. Il participe également à la construction du modèle commercial et à la formalisation des projections de revenus présentées dans le mémoire.

Son parcours est marqué par une année passée à l'École royale militaire en tant qu'élève-officier de l'armée belge (2019-2020), dans un environnement à forte exigence de discipline et de responsabilité. Cette expérience, suivie d'une année sabbatique consacrée au volontariat et à une formation académique complémentaire (EDV), lui a apporté un sens marqué des responsabilités, de la rigueur et du travail d'équipe sous pression. En 2025, il a complété son parcours par une expérience de prospection commerciale chez Agidrive, où il a développé ses compétences en communication, négociation et atteinte d'objectifs chiffrés.

Sur le plan associatif, Louis est chef scout depuis 2021 et encadre les animés d'une unité locale. Il pratique également plusieurs sports en parallèle, dont le cyclisme, le football, le padel, le tennis et l'ultimate frisbee au sein d'une équipe universitaire, et joue de la trompette depuis plusieurs années. Trilingue (français langue maternelle, anglais et néerlandais courants), il conjugue une aisance relationnelle solide avec une approche méthodique et organisée des projets.

Son profil mêle expérience militaire, parcours académique en management, engagements associatifs de longue date et premières expériences commerciales, mobilisés au sein d'OpSee sur la viabilité économique et juridique du projet ainsi que sur l'interface avec les parties prenantes externes. Son curriculum vitae complet figure en annexe A.1.4.

1.3.1 Collaboration avec AgiNtech

Dans le cadre du développement du projet OpSee, l'équipe collabore étroitement avec AgiNtech, une entreprise spécialisée dans l'automatisation industrielle, l'intégration de systèmes et les technologies liées à l'industrie connectée. Cette collaboration permet d'ancrer le projet dans des problématiques industrielles concrètes et de confronter les choix

techniques et stratégiques aux réalités du terrain manufacturier.

Le projet bénéficie plus particulièrement de l'accompagnement de Christophe Camerlynck, CEO d'AgiNtech, ainsi que de Peter Mees, expert dans le domaine des systèmes MES et de la digitalisation industrielle. Leur expérience apporte à l'équipe une vision concrète des besoins des entreprises manufacturières ainsi qu'une meilleure compréhension des contraintes techniques et opérationnelles liées aux environnements de production.

À travers leurs échanges réguliers avec l'équipe, Christophe Camerlynck et Peter Mees contribuent notamment à orienter certains choix technologiques, à challenger les hypothèses du projet et à valider la pertinence des fonctionnalités envisagées. Leur expertise permet également d'identifier les problématiques réelles rencontrées par les PME industrielles en matière de suivi de production, d'interopérabilité des systèmes, de collecte de données industrielles et d'intégration des outils numériques dans les ateliers.

Au-delà de l'aspect technique, cette collaboration constitue également un élément important dans le développement stratégique du projet. Elle permet à l'équipe de bénéficier d'un retour terrain constant et de construire une solution davantage alignée avec les besoins industriels actuels.

Chapitre 2

Opportunité et Analyse Stratégique

Résumé exécutif. Le marché européen du MES atteint 3,5 milliards d'euros en 2025 et est projeté à 5,88 milliards à horizon 2030 (CAGR 9,1 %), pour un tissu de 2,18 millions de PME industrielles dont 65 % restent sous le seuil minimum d'intensité numérique mesuré par Eurostat. La zone cible initiale (Belgique, France, Allemagne, Pays-Bas, extension Tchéquie) compte environ 105 000 PME de 10 à 249 salariés. L'analyse de l'offre identifie une fenêtre vide : les trois catégories concurrentes (*Tier 1* propriétaires à 150-500 k€ par site, *mid-market*, SaaS OEE à périmètre partiel) ne couvrent pas les PME ayant besoin d'un MES complet à coût d'entrée nul. L'étude qualitative (plus de 30 entretiens semi-directifs) confirme quatre douleurs récurrentes (absence de visibilité temps réel, données peu fiables, saisie manuelle persistante, rejet du tarif *per user*) et plusieurs signaux d'achat explicites. Les analyses PESTEL (quatre scénarios à 2030, médian « adoption progressive » 40-50 %), Porter, VRIN, chaîne de valeur, Bowman (zone P3-P4 entre hybride et différenciation), SWOT et le Business Model Canvas convergent sur un positionnement qui combine *open-core*, facturation par équipement et déploiement *on-premise*.

Ce chapitre situe OpSee dans son environnement de marché et justifie le choix d'un positionnement open-core. Le raisonnement part du retard de numérisation des PME

industrielles européennes, puis examine comment une licence libre articulée à une offre commerciale peut répondre à cette demande sans reproduire les écueils des MES propriétaires. Les diagnostics PESTEL, Porter, VRIN, Bowman et SWOT viennent ensuite étayer ce positionnement et délimiter la fenêtre concurrentielle ouverte sur le segment.

2.1 Opportunité

2.1.1 Le contexte des PME industrielles européennes

L'industrie manufacturière européenne intègre les technologies d'automatisation, de supervision et de collecte de données associées à l'Industrie 4.0 (Hermann et al., 2016 ; Lasi et al., 2014). Le tissu économique européen est dominé par les PME : 25,8 millions d'entre elles étaient actives dans le secteur marchand non financier de l'Union en 2023, soit 99,8 % des entreprises, pour 65,2 % de l'emploi et 53,1 % de la valeur ajoutée (Katsinis et al., 2024). OpSee s'adresse spécifiquement aux PME industrielles, qui composent plus de 99 % des 2,2 millions d'entreprises manufacturières de l'UE-27 et dominent chacun des quatorze écosystèmes industriels (Eurostat, 2024 ; Katsinis et al., 2024). La taille précise de la zone géographique de déploiement initial est détaillée en 2.2.2.1.

La maturité numérique du secteur reste faible. D'après les statistiques d'Eurostat sur l'intensité numérique par activité, 65,1 % des entreprises manufacturières européennes d'au moins dix salariés se situaient en 2025 sous le seuil « basic » du *Digital Intensity Index*, dont 28,2 % en intensité très faible et 36,9 % en intensité faible ; seules 27,3 % atteignaient une intensité élevée et 7,5 % une intensité très élevée (figure 2.1) (Eurostat, 2025a). L'enquête EIBIS classe par ailleurs le manufacturier parmi les leaders européens de l'adoption numérique (European Investment Bank, 2024), mais près des deux tiers des entreprises industrielles européennes restent sous le seuil minimum : c'est ce gisement-là qu'un MES à faible coût d'entrée peut servir.

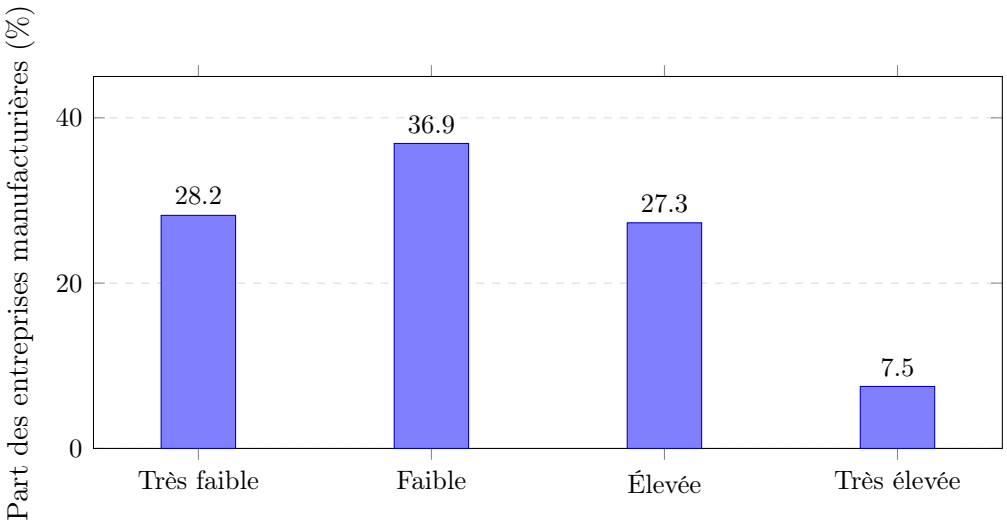


FIGURE 2.1 – Distribution de l'intensité numérique des entreprises manufacturières de l'Union européenne (au moins dix salariés) en 2025 selon le *Digital Intensity Index*. Les deux premiers segments (très faible et faible) cumulent 65,1 % des entreprises. Source : Eurostat (2025a).

Les causes de ce retard sont bien identifiées. Masood et Sonntag (2020), sur un échantillon de 271 PME manufacturières britanniques, désignent les contraintes financières et le manque de connaissances internes comme les deux freins dominants ; les bénéfices attendus, eux, couvrent la flexibilité, le coût, l'efficience, la qualité et l'avantage compétitif. Dutta et al. (2022) recensent dans la littérature une liste de barrières de *readiness* qui se recoupent largement : disponibilité des financements, expertise interne, compatibilité avec les systèmes existants, priorité managériale, contraintes de capacité et de sécurité, culture organisationnelle. Les barrières techniques que les mêmes auteurs identifient en propre (boucle fermée, intégration interfonctionnelle, connectivité cloud, contextualisation des données) seront traitées dans l'analyse technique (chapitre 3). L'enquête D4SME de l'OCDE en 2024 confirme le diagnostic : plus d'une PME sur quatre cite les coûts et la pénurie de compétences (y compris le manque de temps pour former le personnel) comme freins majeurs à la numérisation (M. Bianchini et al., 2024).

Faute d'outils calibrés à leur taille, ces entreprises s'appuient sur des solutions partielles

qui ne couvrent qu'une fraction du périmètre attendu (Gomes et al., 2024) ; le détail figure en 2.1.3. C'est cet écart qu'OpSee cherche à adresser.

2.1.2 La dynamique de l'open source dans le logiciel industriel

L'open source occupe aujourd'hui une place centrale dans le logiciel, y compris dans des domaines longtemps dominés par le propriétaire (Kula et al., 2025). Shahrivar et al. (2018) ont passé en revue la littérature sur les *Commercial Open Source Software* (COSS) et y identifient trois leviers de monétisation qui reviennent presque toujours : combiner un noyau libre et des modules propriétaires payants (*monetary software complementarities*), pratiquer le double licensing, ou vendre des prestations associées. Une licence permissive seule ne suffit plus à financer un projet logiciel B2B sur la durée ; les éditeurs articulent désormais leur offre libre et leur offre commerciale de manière explicite. Dans un contexte B2B, l'enjeu ne réside donc plus uniquement dans l'ouverture du code, mais dans la capacité à articuler cette ouverture avec une proposition de valeur commerciale durable.

Kula et al. (2025) actualisent ce diagnostic. Les licences hybrides (*Business Source License*, *Server Side Public License*), les relicensings et les mécanismes de monétisation se sont généralisés. L'open source a passé un cap : la viabilité économique d'un projet dépend désormais du choix d'un modèle commercial explicite. Dans l'industrie, Robles et al. (2026) ont analysé les écosystèmes logiciels de quatre standards IoT (LwM2M, NB-IoT, CoAP, Zigbee) sur GitHub. Trois résultats : les projets les plus actifs sont fortement soutenus par des entreprises, les licences permissives (Apache-2.0, MIT) dominent quand une licence est déclarée, et beaucoup de projets n'en déclarent aucune, ce que les auteurs signalent comme un angle mort à corriger.

Pour le MES, le mouvement reste émergent. Besutti et al. (2019) ont décrit les premières expériences académiques de MES open-source : un point d'entrée vers l'Industrie 4.0 pour les PME, mais sans modèle économique stabilisé. Les projets MES publics qu'ils recensent étaient soit gratuits, soit monétisés via des prestations de service. OpSee choisit un autre cadre, l'**open-core** : le noyau est publié sous licence libre, certains mo-

dules avancés relèvent d'une licence propriétaire payante. Cette articulation reprend ce que Shahrivar et al. (2018) et Kula et al. (2025) décrivent comme les pratiques durables du secteur, et sert de base au positionnement détaillé en 5.1.3.

2.1.3 Positionnement du MES dans la chaîne industrielle

Le MES se situe entre les couches opérationnelles (capteurs, automates, supervision SCADA) et les couches de gestion (*Enterprise Resource Planning*, ERP). Il exécute et optimise les processus de production en temps réel (Kletti, 2007 ; Mantravadi & Møller, 2019) : pilotage des ordres de fabrication, supervision des équipements, suivi qualité et traçabilité, calcul des indicateurs et remontée vers l'ERP. Tant qu'une PME ne franchit pas cette couche, son pilotage reste dépendant des feuilles de calcul.

Gomes et al. (2024) ont mené une étude qualitative sur l'adoption du MES en PME manufacturières. Les dirigeants interrogés veulent intégrer verticalement leurs données de production, mais peinent à s'engager faute d'offres calibrées à leur taille. La plupart bricolent avec un patchwork de tableurs, de modules de production d'ERP et de SCADA détournés ; cette pile composite ne couvre qu'une partie du périmètre attendu et produit des données incohérentes d'un outil à l'autre. A. Bianchini et al. (2024) documentent à l'inverse un cas où le déploiement d'un MES en PME a structuré un cadre d'indicateurs clés et a permis d'exploiter pleinement les données collectées, avec des gains mesurés sur l'efficience opérationnelle et la maîtrise des coûts. Combiné aux barrières recensées par Dutta et al. (2022), ce diagnostic laisse un espace de marché pour une solution pensée pour les PME, modulaire et abordable à l'entrée.

2.2 Analyse de la demande à travers l'étude de marché

2.2.1 Méthodologie

Afin d'évaluer la pertinence du positionnement d'OpSee sur le marché des systèmes MES (*Manufacturing Execution Systems*), une étude de marché a été réalisée en combinant plusieurs approches complémentaires. Cette démarche méthodologique vise à identifier les besoins des entreprises industrielles, comprendre les problématiques opérationnelles rencontrées sur le terrain et analyser la dynamique du marché européen du MES.

Notre approche méthodologique s'appuie sur les recommandations en matière de recherche marketing proposées par Malhotra et Birks (2006) ainsi que par Saunders et al. (2023), qui préconisent une combinaison d'analyses documentaires, d'études qualitatives et de données quantitatives secondaires afin d'obtenir une compréhension plus complète d'un marché complexe. Comme le soulignent ces auteurs, l'utilisation d'une méthodologie mixte permet de croiser différentes sources d'informations et d'améliorer la validité des résultats obtenus.

La première phase de cette recherche repose sur une analyse documentaire et une revue de littérature critique portant sur la transformation numérique de l'industrie manufacturière, les systèmes MES, les modèles open-core et les problématiques de digitalisation des PME industrielles. Les données exploitées proviennent principalement de rapports sectoriels, d'études de marché spécialisées, de statistiques Eurostat ainsi que de publications académiques récentes. Cette approche rejoint les recommandations de Malhotra et Birks (2006) concernant l'analyse de données externes afin de mieux comprendre la structure et l'évolution d'un marché.

Dans le cadre de cette revue de littérature, une attention particulière a été portée à la sélection de sources académiques récentes et évaluées par des pairs, conformément aux principes méthodologiques présentés par Saunders et al. (2023). Cette démarche vise à garantir la fiabilité scientifique des informations mobilisées dans l'analyse stratégique et marketing du projet.

Ensuite, une étude qualitative a été menée au travers d'entretiens semi-directifs réalisés auprès de dirigeants industriels, responsables production, responsables qualité, experts techniques et intégrateurs industriels. Selon Malhotra et Birks (2006), les entretiens semi-directifs permettent d'obtenir une compréhension approfondie des perceptions, des usages et des attentes des acteurs interrogés tout en conservant une certaine flexibilité dans les échanges. Ce choix méthodologique était particulièrement pertinent dans le cadre d'OpSee, les problématiques liées à la gestion de production et aux outils MES variant fortement selon la taille des entreprises, le secteur industriel et le niveau de maturité numérique.

Au total, plus de trente échanges ont été réalisés avec des acteurs industriels actifs dans différents secteurs tels que l'agroalimentaire, l'aéronautique, la cimenterie, l'industrie manufacturière spécialisée ou encore l'intégration industrielle. Parmi ces entretiens, onze ont été retenus pour une analyse approfondie dans le cadre de cette étude de marché. Les discussions portaient principalement sur les outils actuellement utilisés, les difficultés de suivi de production, les problématiques de traçabilité, les erreurs organisationnelles récurrentes ainsi que les attentes vis-à-vis d'une solution MES moderne et accessible.

Les entretiens duraient généralement entre quarante minutes et deux heures et suivaient un guide thématique structuré autour des principaux axes de recherche identifiés lors de la phase documentaire. Les transcriptions complètes des entretiens exploités figurent en annexe A.2.1.

Une étude quantitative primaire a également été envisagée afin d'obtenir des données statistiques complémentaires concernant les besoins du marché. Dans cette optique, plus de 400 prises de contact ont été effectuées par courrier électronique auprès de dirigeants industriels, responsables production, responsables qualité et responsables IT actifs dans des entreprises manufacturières européennes. Plusieurs campagnes de relance ont également été réalisées.

Cependant, malgré cette démarche, seules trois réponses exploitables ont été obtenues. Ce faible taux de participation peut notamment s'expliquer par la difficulté d'accéder à des décideurs industriels sur des sujets techniques et stratégiques liés aux outils de production

ainsi que par la disponibilité limitée des profils ciblés. En raison du nombre insuffisant de réponses, cette enquête quantitative n'a pas pu être exploitée comme base statistique représentative du marché.

Par conséquent, l'analyse repose principalement sur les résultats qualitatifs ainsi que sur des données quantitatives secondaires issues de rapports sectoriels et d'organismes institutionnels. Cette approche permet néanmoins d'identifier des tendances récurrentes, des problématiques communes et des signaux de marché pertinents pour évaluer le potentiel commercial d'OpSee auprès des PME industrielles européennes.

2.2.2 Définition du marché

2.2.2.1 Taille du marché

Le marché adressable se décompose en trois cercles emboîtés (figure 2.2) : monde (TAM), Europe (SAM), zone de déploiement initial (SOM).

Au niveau mondial, MarketsandMarkets (2025) chiffre le marché du MES à 16 milliards de dollars en 2025 et projette 25,8 milliards en 2030, soit une croissance annuelle composée de 10,1 %. Fortune Business Insights (2026) donne une estimation plus haute : 18,6 milliards en 2026 et 56,6 milliards en 2034 (croissance annuelle composée de 14,9 %). Les deux périmètres incluent MES et MOM mais excluent les solutions purement OEE, ce qui explique une partie de l'écart. La croissance est tirée par la digitalisation des opérations industrielles, l'intégration des données capteurs et la pression réglementaire sur la traçabilité. Le TAM retenu vaut donc environ 15 milliards d'euros au taux courant.

Au niveau européen, MarketsandMarkets (2026) chiffre le marché à 3,80 milliards de dollars en 2025 (environ 3,5 milliards d'euros) et projette 5,88 milliards en 2030, soit une croissance annuelle composée de 9,1 %. En population, l'UE-27 compte 2,2 millions d'entreprises manufacturières en 2023 (Eurostat, 2024), dont plus de 99 % de PME (Katsinis et al., 2024), soit environ 2,18 millions de PME industrielles. Le secteur pèse 18,5 % de l'emploi et 23,1 % de la valeur ajoutée de l'économie marchande européenne.

Au niveau de la zone cible (Belgique, France, Allemagne, Pays-Bas : Ce périmètre

est retenu car il combine proximité géographique, densité industrielle, potentiel de déploiement en Europe occidentale et accessibilité commerciale pour une jeune entreprise belge.), Eurostat dénombre 553 963 entreprises manufacturières en 2020 (Eurostat, 2020), soit environ 25 % du parc européen. Appliquée au SAM, cette part donne un SOM d'environ 0,88 milliard d'euros (table 2.1). En population, 105 000 PME industrielles de la tranche 10 à 249 salariés sont recensées sur la zone. Cette tranche est la cible privilégiée d'OpSee : son parc d'équipements typique rend un MES directement utile à l'entreprise, alors qu'elle en est rarement équipée aujourd'hui. La Tchéquie ajoute environ 11 300 PME supplémentaires dans la même tranche : c'est l'extension naturelle au-delà du périmètre initial, soutenue par des contacts terrain déjà engagés en cimenterie (cf. annexe A.2.1).

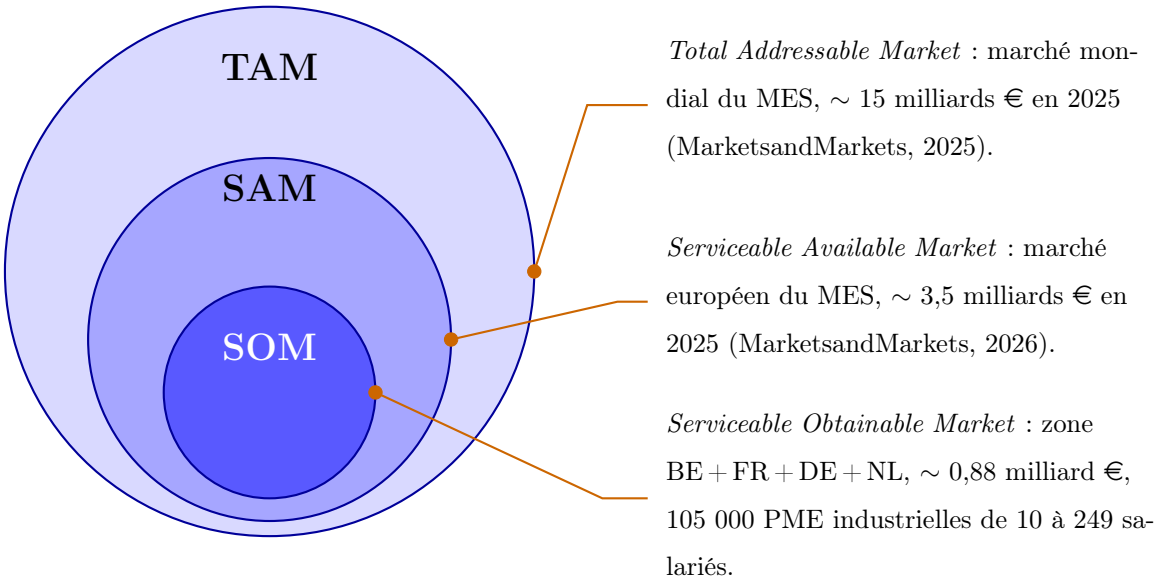


FIGURE 2.2 – Funnel TAM-SAM-SOM du marché MES adressé par OpSee. Le SOM est estimé en première approximation par la part des quatre pays cibles dans le compte d'entreprises manufacturières européennes (25 %, Eurostat (2020)) appliquée au SAM monétaire.

La tarification d'OpSee s'effectuant par équipement (cf. 5.1.3 ; la notion d'équipement est définie formellement en 3.2), il faut rapporter ces volumes au parc moyen de chaque entreprise. Le plan financier (7.1) retient une hypothèse centrale de seize équipements

par client (deux lignes de production de huit équipements chacune), encadrée par dix équipements en scénario *worst* et vingt en scénario *best*.

Pays	**Total**	**0–9 sal.**	**10–249 sal.**
Belgique (BE)	39 630	34 365	4 946
France (FR)	217 379	190 058	25 861
Allemagne (DE)	220 608	149 583	66 722
Pays-Bas (NL)	76 346	67 876	8 101
Sous-total SOM	**553 963**	**441 882**	**105 630**
Tchéquie (CZ, extension)	179 163	167 026	11 286
Total zone cible	**733 126**	**608 908**	**116 916**

TABLE 2.1 – Entreprises du secteur manufacturier par classe de taille en 2020, pour les pays de la zone géographique de déploiement initial d'OpSee. Source : Eurostat (2020).

Trois constats convergent : une croissance globale soutenue du marché MES, un parc important de PME industrielles dans la zone cible, et une sous-pénétration documentée des outils MES sur ce segment (cf. 2.1.1). L'opportunité pour OpSee ne réside donc pas uniquement dans la taille du marché, mais dans l'écart entre les besoins opérationnels des PME industrielles et l'accessibilité réelle des solutions MES existantes.

2.2.2.2 Structure des prix

La grille tarifaire des acteurs établis confirme la barrière d'accès pour les PME. Le marché se répartit en trois tiers (figure 2.3).

Les MES Tier 1 *(Siemens Opcenter, SAP Digital Manufacturing)* occupent le haut de gamme. Symestic (2026) chiffre les déploiements traditionnels entre 150 et 500 k€ par site sur 12 à 24 mois, et Factory AI Group (2026) place l'offre Siemens dans le segment à sept chiffres. Macaulay (2023) note qu'une implémentation SAP pour une grande entreprise demande couramment 12 à 18 mois, et davantage selon la complexité.

Les éditeurs spécialisés sur le segment mid-market *(Astrée Software, Productys, Proxia Software AG, SmartYou, Teeptrak)* demandent un investissement initial de 375 k$ à 1,2 M$ selon Shoplogix (2025), dont 15 à 25 % en licences logicielles et 25 à 40 % en services d'intégration ; les coûts cachés (intégration, validation, formation) font fréquemment monter le projet à 500 k$ ou 2 M$. TeepTrak (2026) chiffre à 12–18 mois le délai moyen avant la moindre amélioration mesurable de l'OEE, et iBase-t Experts (2021) pointe que les personnalisations imposées par ces plateformes généralistes installent une dette technique durable.

Les outils SaaS IIoT et OEE *(Tulip, Evocon, Factry)* se déploient en quelques jours pour des dizaines à quelques centaines d'euros par équipement et par mois (G2, 2026), mais ne couvrent qu'une fraction des fonctions MESA-11.

Aucun tier ne combine donc le périmètre MES complet et un coût d'entrée compatible avec une PME. C'est cet espace qu'OpSee occupe, en associant open-core, tarification par équipement et déploiement local (cf. 5.1.3).

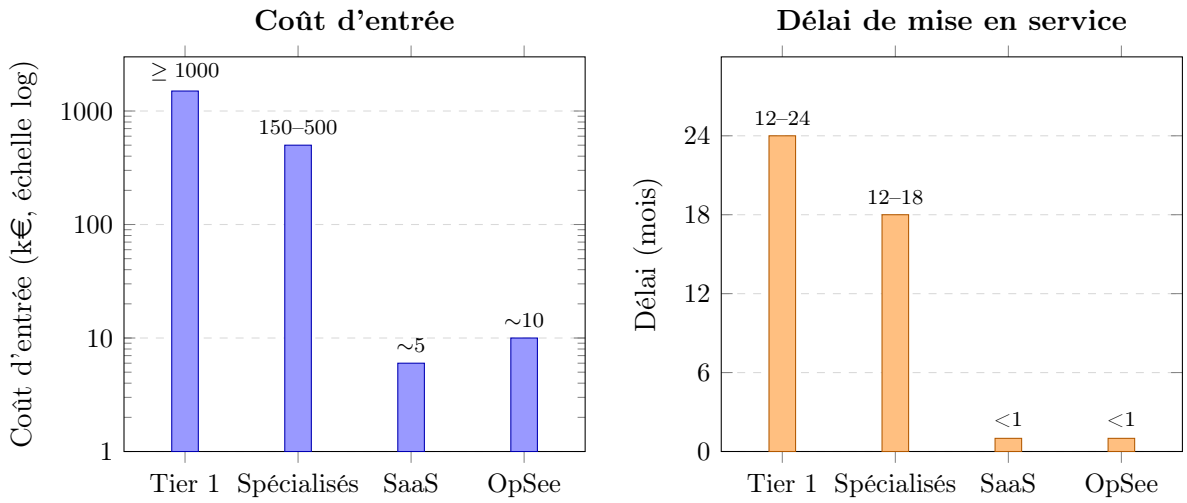


FIGURE 2.3 – Comparaison du coût d'entrée et du délai de mise en service par catégorie de fournisseur MES (haut de fourchette). **Tier 1** : Siemens Opcenter, SAP Digital Manufacturing. **Spécialisés** : éditeurs mid-market propriétaires. **SaaS** : outils IIoT et OEE à périmètre fonctionnel partiel. **OpSee** : noyau open-core gratuit, modules avancés à 59 à 95 €/équipement/mois ; le coût année 1 affiché correspond à un parc de dix équipements en formule Entreprise. Le coût d'entrée est en échelle logarithmique pour rendre les ordres de grandeur lisibles. Sources : Factory AI Group (2026), G2 (2026), Macaulay (2023), Shoplogix (2025), Symestic (2026) et TeepTrak (2026).

2.2.3 Étude de marché qualitative

2.2.3.1 Méthodologie et échantillon

L'étude qualitative s'appuie sur plus de 30 entretiens semi-directifs conduits avec des décideurs industriels et un intégrateur partenaire, dont certaines transcriptions complètes figurent en annexe A.2.1. Les interlocuteurs interviennent dans des secteurs et tailles variés : agroalimentaire (Colona, Dequachim), cimenterie (Cemix, sites slovaque et tchèque dirigés par David Tesař), outils diamantés sur mesure (Diarotech), bouchons synthétiques (Vinventions), aéronautique de défense (Sonaca, GPO qualité), PME slovaque (GreenBuddies, Jaroslav Tomášek), ainsi que deux interlocuteurs technologiques (Indao, intégrateur

Camerlynck). L'échantillon couvre des effectifs de moins de cinquante à plusieurs milliers de salariés, et représente à la fois des PME au sens européen (Diarotech, Dequachim, Vinventions, Colona) et de plus grandes structures (cimenteries, aéronautique) dont les retours d'expérience documentent l'état de l'art au-delà du cœur de cible. Chaque entretien dure de quarante minutes à deux heures et porte sur la stack d'outils en place, les difficultés rencontrées, les attentes en matière de MES et la sensibilité aux modèles tarifaires. L'ensemble de ces échanges n'a pas vocation à être statistiquement représentatif du marché MES européen. Il permet toutefois de confronter les données secondaires à des retours terrain concrets, d'identifier des douleurs récurrentes et de valider l'existence d'une demande pour une solution MES plus accessible, modulaire et adaptée au rythme de digitalisation des PME industrielles.

2.2.3.2 État des outils en place chez les prospects

Aucun des prospects rencontrés ne dispose d'un MES couvrant la totalité de son périmètre opérationnel. Trois configurations dominent. Plusieurs pilotent encore tout ou partie de leur atelier sur papier et Excel : Colona estime à 75 % la fiabilité de son calcul de TRS construit en feuille de calcul, Diarotech compile manuellement ses stocks et son prix de revient. Chez Diarotech, les machines fonctionnent par doublons et les opérateurs passent de l'une à l'autre selon les lots : chaque machine a un ou deux backups, et cette polyvalence rend impraticable toute instrumentation rigide par poste. Deux entreprises s'appuient sur leur ERP seul, sans couche d'exécution productive : Colona et Diarotech utilisent Odoo, mais aucune des deux n'a réussi à y greffer un module de production exploitable. D'autres ont superposé des outils disparates (ERP, GMAO, supervision SCADA, historian, MES propriétaire) sans intégration fluide : Vinventions combine NetSuite, la GMAO Ultimo et Wonderware, et Sonaca articule SAP, le MES Apriso de Dassault, l'historian DigiPox et des applications Mendix développées en interne. Chez Sonaca, l'intégration va plus loin : Apriso est relié au PLM Teamcenter, ce qui permet de propager automatiquement les fiches techniques mises à jour vers la bonne gamme de travail en atelier, et d'arrêter une

opération tant qu'un défaut qualité ouvert n'est pas traité. Deux prospects, enfin, ont déjà acheté un MES clé en main et l'ont abandonné : Colona pour un éditeur américain jugé trop coûteux, Vinventions pour Redzone, avec une augmentation annuelle de 6 % sur les licences d'utilisation.

2.2.3.3 Douleurs récurrentes

Quatre douleurs reviennent sur l'ensemble de l'échantillon. D'abord, l'absence de visibilité en temps réel sur la production : Colona pilote « après coup, à la maille du jour au lendemain », la cimenterie Cemix gère cinq salles de contrôle isolées sans vue centralisée, Vinventions a une visualisation correcte de l'extrusion mais aucune sur la cinquantaine d'autres machines, et Sonaca peine à corréler les paramètres machine remontés par DigiPox avec les exigences qualité tracées dans Apriso. Ensuite, la fiabilité dégradée des données : les calculs Excel de Colona perdent un quart de leur précision, et le prix de revient de Diarotech est reconstitué « par expérience »plutôt qu'à partir de mesures ; Sonaca cite par ailleurs l'incident rançongiciel survenu chez un acteur du secteur (production interrompue deux mois, retour aux papiers) comme illustration du risque d'intégration. Troisièmement, la quantité de saisie manuelle persistante : Diarotech remplit des fiches papier reportées ensuite dans Excel, et Vinventions scanne les caisses terminées sans flux automatique vers l'ERP. Enfin, le coût récurrent des licences MES propriétaires bloque les déploiements : Vinventions a abandonné Redzone pour cette raison, Colona pour un éditeur américain, et la direction de Sonaca pousse explicitement à développer en Mendix pour éviter toute facturation *per user* d'Apriso. La citation la plus directe revient à ce dernier interlocuteur : « le patron veut une solution qui ne coûte rien, vous prenez du C, du Python, ce que vous voulez, mais aucune licence récurrente ». L'incompatibilité des MES Tier 1 avec les PME apparaît aussi dès la phase POC. À Carmeuse, où Christophe Camerlynck a dirigé l'automatisation pendant quinze ans, le POC de Plant APS (GE, devenu GE Vernova) a échoué. L'intégration avait pourtant été menée directement par l'éditeur, mais le logiciel s'est révélé « tellement fermé et complexe que ça n'a jamais

fonctionné ».

2.2.3.4 Sensibilité tarifaire et signaux budgétaires

La facturation *par utilisateur* est rejetée chaque fois qu'elle est évoquée : l'aéronautique, Indao et Vinventions soulignent qu'elle pénalise la scalabilité une fois la solution adoptée à l'échelle de l'usine. L'augmentation annuelle des licences est citée comme le facteur déclencheur d'abandon : les 6 % annuels de Redzone ont coûté le client Vinventions, et Joël Crappe mentionne une maintenance annuelle de 20 % sur la licence Apriso comme un poste de coût structurellement contesté en interne. Christophe Camerlynck décrit une variante observée chez Carmeuse sur quinze ans : GE Simplicity restructurait son modèle tarifaire tous les trois ans en promettant une baisse, et la facture sortait en moyenne 10 % plus élevée. À l'inverse, la facturation *par équipement* d'OpSee est validée par deux interlocuteurs chiffres en main : 5 k€ d'investissement initial par ligne et 800 à 900 € annuels comme « raisonnable » (interview 1), 3 500 €/an pour un OEE de ligne comme « satisfaisant » (Dequachim). Vinventions, plus globalement, juge le pricing OpSee acceptable face au coût récurrent de Redzone qu'il vient d'abandonner. Le seuil psychologique des PME se situe autour de quelques dizaines à quelques centaines d'euros par équipement et par mois, conforme à la grille OpSee détaillée en 2.2.2.2.

2.2.3.5 Fonctionnalités prioritaires

Les attentes fonctionnelles s'organisent en trois groupes. La couche d'exécution temps réel arrive en tête : le calcul de l'OEE (ou TRS) et la visualisation des performances en temps réel sont mentionnés dans sept des onze entretiens (interviews 1, 4, 5, 6, 8, 10, 11). La digitalisation de l'atelier vient ensuite : Joël Crappe en fait la priorité numéro un de son périmètre aéronautique (« enlever les papiers de l'atelier, c'est pas très technologique mais c'est ça vraiment le but »), et Colona et Vinventions partagent cet objectif. La traçabilité produit complète et la gestion des défauts qualité sont demandées par les trois secteurs réglementés (agroalimentaire, aéronautique, bouchons œnologiques).

Enfin, des fonctions d'analyse plus avancées émergent en deuxième vague : tableaux de bord personnalisables par rôle (Tesař), passerelles vers la GMAO pour remonter MTBF et MTTR (Vinventions, Colona), passerelles ERP (NetSuite, SAP, Odoo) et, plus prospectivement, détection d'anomalies par machine learning et assistant en langage naturel (groupe aéronautique).

Deux exigences techniques transversales structurent ces demandes. La modularité par équipement (et non par site) est explicitement requise par les interviews 1, 3 et 8 : « start small, add as you grow », formule David Tesař. Et le déploiement *on-premise* reste préféré au cloud public sur les secteurs sensibles, en particulier l'aéronautique de défense (« les données régulées défense ne peuvent pas être en cloud public, et les licences Microsoft Cloud souveraines sont trop chères, donc on garde *on-premise* ») et la cimenterie (propriétaire « un peu paranoïaque »sur l'IA).

2.2.3.6 Signaux d'achat

Cinq entretiens se concluent par un signal d'achat explicite. Tomášek est en finalisation de contrat *early adopter*, Vinventions formalise la deuxième réunion avec son responsable IT (« votre module bouche parfaitement le trou »), Dequachim confirme le devis OpSee, Colona accepte de servir de site bêta, et Tesař demande une estimation chiffrée site-to-site dans les deux semaines. Aucun entretien ne se solde par un refus net. Diarotech reporte la décision MES après la mise en place préalable d'un ERP fonctionnel, mais propose dans le même temps une visite terrain pour affiner le périmètre.

2.2.3.7 Synthèse

Les onze entretiens convergent sur quatre constats. Le coût récurrent des licences propriétaires est la barrière dominante à l'adoption d'un MES en PME, et l'absence d'augmentation prédatrice devient un critère discriminant. La digitalisation de l'atelier (paperless + OEE) est le cas d'usage d'entrée prioritaire, plutôt qu'une couverture MESA-11 complète d'emblée. La modularité par équipement, présente chez OpSee et absente des

MES Tier 1 et mid-market, colle au rythme des PME industrielles, qui équipent leurs lignes une par une plutôt que d'un seul coup. Le déploiement *on-premise* reste préféré au cloud public sur les segments réglementés ou sensibles aux données. Ces constats alimentent la matrice SWOT (2.6) et le positionnement détaillé en 5.1.3.

2.3 Analyse de l'environnement externe

2.3.1 Macro-environnement : analyse PESTEL

Les six dimensions macroéconomiques sont passées en revue successivement, synthétisées dans un tableau opportunité/menace (2.3.1.7), puis croisées dans une matrice à quatre scénarios à horizon 2030 (2.3.1.8).

2.3.1.1 Environnement politique

L'environnement politique européen soutient directement les projets de modernisation industrielle ciblés par OpSee. Depuis 2020, l'Union européenne a fait de la transformation numérique des PME manufacturières un axe prioritaire de sa politique industrielle. La stratégie industrielle européenne insiste sur le renforcement de la résilience des chaînes de production et sur l'adoption de technologies numériques dans les PME industrielles (European Commission, 2023a). Cette orientation favorise indirectement la demande pour des solutions MES accessibles financièrement et déployables rapidement.

Les programmes publics mis en place en Belgique, en France et en Allemagne soutiennent également cette dynamique. France 2030 mobilise 54 milliards d'euros autour de l'industrie du futur, de la souveraineté technologique et de la numérisation des outils de production (Gouvernement français, 2021). En Belgique, le Plan national pour la Reprise et la Résilience finance plusieurs initiatives liées à la digitalisation industrielle via Digital Wallonia et Digital Flanders (European Commission, 2021). Ces dispositifs ciblent principalement les PME, qui constituent précisément le segment visé par OpSee.

Pour OpSee, ces politiques publiques représentent une opportunité commerciale concrète.

Une partie des entreprises industrielles clientes dispose désormais de subventions ou de mécanismes d'accompagnement facilitant l'adoption d'un MES. Cette évolution réduit partiellement la barrière budgétaire historiquement associée aux logiciels industriels.

Le contexte géopolitique récent renforce également l'intérêt pour des solutions technologiques européennes et auditables. Les tensions commerciales internationales, les problématiques de souveraineté numérique et la dépendance aux grands fournisseurs cloud américains poussent certaines entreprises industrielles à privilégier des architectures déployables sur site et maîtrisées localement. Dans ce contexte, le positionnement open-core d'OpSee constitue un avantage stratégique : le noyau AGPLv3 reste auditable et hébergeable localement, tandis que les modules propriétaires permettent de financer le développement du produit sans dépendre d'un modèle SaaS intégral.

L'environnement politique reste néanmoins dépendant des priorités budgétaires publiques. Une réduction des aides à la transformation numérique ou un ralentissement économique européen pourrait freiner les investissements industriels des PME et ralentir l'adoption de nouvelles solutions MES.

2.3.1.2 Environnement économique

Le contexte économique européen reste contrasté pour les PME industrielles. Après le pic inflationniste de 2022, l'inflation dans la zone euro est progressivement revenue à des niveaux plus modérés, permettant un début de baisse des taux directeurs européens (Eurostat, 2025b). La croissance économique demeure toutefois faible et le secteur manufacturier européen a traversé une longue période de ralentissement entre 2022 et 2025 (Williamson, 2026). Cette situation pousse de nombreuses PME à limiter leurs investissements lourds et à privilégier les dépenses directement liées à l'amélioration de la productivité.

Malgré ce contexte prudent, la transformation numérique reste une priorité pour une grande partie des industriels européens. L'enquête EIBIS 2024 montre que les investissements numériques demeurent parmi les principaux axes d'investissement des entreprises

européennes (European Investment Bank, 2024). Pour les PME manufacturières, l'amélioration du suivi de production, de la traçabilité et de l'efficacité opérationnelle devient progressivement une nécessité afin de rester compétitives face aux grands groupes déjà fortement numérisés.

Cependant, les solutions MES traditionnelles restent souvent difficiles d'accès pour les PME. Plusieurs études identifient comme principaux freins le coût d'implémentation, la complexité technique, le manque d'expertise interne et la difficulté d'intégration avec les équipements existants (Dutta et al., 2022 ; Masood & Sonntag, 2020). Les entretiens réalisés dans le cadre du mémoire confirment également que les PME industrielles privilégient généralement des déploiements progressifs et limités avant d'envisager une généralisation à l'ensemble de l'usine.

Cette réalité économique favorise des modèles plus flexibles et moins engageants financièrement. Le positionnement d'OpSee répond directement à cette contrainte : le déploiement peut se faire progressivement, équipement par équipement, avec une tarification prévisible et sans investissement initial comparable à celui des grands MES propriétaires. Le modèle open-core permet également de réduire certains coûts d'entrée tout en conservant une source de revenus via les modules avancés.

En parallèle, le marché européen des MES continue de croître sous l'effet de la transformation numérique industrielle. Plusieurs estimations projettent une croissance soutenue du marché européen à horizon 2030 (MarketsandMarkets, 2026). Cette évolution confirme l'existence d'une demande réelle, mais encore partiellement insatisfaite sur le segment des PME manufacturières.

2.3.1.3 Environnement socioculturel

Les entreprises industrielles accordent une place croissante à la donnée dans le pilotage de leurs opérations. Les investissements liés à la digitalisation restent prioritaires pour de nombreuses PME européennes malgré un contexte économique plus incertain (European Investment Bank, 2024). Les entretiens réalisés dans le cadre du mémoire confirment

également cette tendance : plusieurs entreprises manufacturières interrogées disposent désormais de fonctions dédiées à la transformation numérique ou à l'amélioration continue industrielle. Chez Colona, un CTO est notamment chargé des projets liés à l'industrie 4.0, tandis que Vinventions dispose d'un responsable excellence opérationnelle orienté modernisation des processus industriels.

Cette évolution montre que les PME et ETI industrielles prennent progressivement conscience de l'intérêt stratégique des outils de suivi de production, de traçabilité et d'analyse des performances. Pour OpSee, cette maturité croissante facilite l'identification d'interlocuteurs sensibles aux problématiques MES et réduit partiellement le besoin d'évangélisation du marché.

Cependant, l'adoption d'un MES reste fortement dépendante de l'acceptation des équipes opérationnelles. Plusieurs études montrent que les résistances internes constituent encore une cause fréquente d'échec des projets de digitalisation industrielle (Sutra & Mansur, 2025). Les principales difficultés concernent le manque de compétences numériques, la complexité perçue des nouveaux outils et les habitudes de travail déjà installées dans les ateliers. Les entretiens menés pour ce mémoire confirment également que les opérateurs et responsables de production privilégient des solutions simples, visuelles et faciles à intégrer dans leurs pratiques quotidiennes.

Pour OpSee, cette dimension socioculturelle influence directement les choix produit. L'ergonomie de l'interface, la simplicité du déploiement et l'accompagnement au changement deviennent des éléments aussi importants que les fonctionnalités techniques elles-mêmes. Une solution perçue comme trop complexe risquerait de ralentir fortement l'adoption dans les PME ciblées.

L'acceptation des technologies open source progresse également dans l'industrie manufacturière. Les standards ouverts comme OPC-UA ou MQTT sont désormais largement utilisés dans les environnements industriels modernes et les grands acteurs industriels participent de plus en plus à des projets open source liés à l'industrie 4.0 (Robles et al., 2026). Cette évolution contribue à normaliser l'utilisation de solutions partiellement ou-

vertes dans les systèmes industriels et réduit certaines réticences historiques vis-à-vis des logiciels open source. Le modèle open-core d'OpSee s'inscrit dans cette évolution en combinant transparence technique sur le noyau logiciel et modèle économique commercialement viable.

2.3.1.4 Environnement technologique

L'environnement technologique est favorable au développement d'un MES plus accessible pour les PME industrielles. Les logiciels industriels modernes s'appuient de plus en plus sur des briques techniques matures et largement adoptées, comme Linux, PostgreSQL, Docker ou Kubernetes. Ces technologies réduisent la dépendance aux infrastructures propriétaires et permettent de construire des solutions plus modulaires, plus facilement déployables et moins coûteuses à maintenir (Mantravadi & Møller, 2019).

Cette évolution est directement cohérente avec l'architecture d'OpSee. Le projet peut s'appuyer sur des composants open source éprouvés pour limiter les coûts de développement, accélérer les déploiements et proposer une alternative plus flexible aux MES propriétaires traditionnels. L'entretien mené avec Peter Mees, ancien intégrateur MES chez General Electric et AVEVA, confirme cette tendance : selon lui, les infrastructures industrielles évoluent progressivement vers Linux et PostgreSQL, y compris dans des environnements historiquement dominés par des solutions propriétaires.

Les standards industriels ouverts renforcent également cette opportunité. Des protocoles comme OPC-UA, MQTT ou Sparkplug B facilitent la communication entre les machines, les capteurs, les systèmes de supervision et les logiciels MES (Eclipse Foundation, 2022 ; OASIS, 2019 ; OPC Foundation, 2024). De même, les standards ISA-95 et ISA-88 structurent l'intégration entre le MES, l'ERP et les processus de production (International Society of Automation, 2024). Pour OpSee, le respect de ces standards est essentiel : il permet de s'intégrer plus facilement dans l'existant industriel des PME, sans nécessiter de développements spécifiques trop coûteux.

L'évolution technologique ouvre aussi de nouvelles possibilités fonctionnelles autour de

l'intelligence artificielle. Les MES récents intègrent progressivement des fonctions de détection d'anomalies, de maintenance prédictive ou d'assistance à la décision (Boudjenoun et al., 2025). Pour OpSee, ces usages constituent une piste d'évolution pertinente, notamment pour aider les PME à exploiter leurs données de production sans devoir disposer d'une équipe interne spécialisée en data science.

Cette opportunité doit toutefois être abordée progressivement. Dans un premier temps, la priorité reste de fournir un socle MES fiable, interopérable et simple à déployer. L'intelligence artificielle peut ensuite devenir un différenciateur commercial, à condition de répondre à des besoins opérationnels concrets plutôt qu'à une logique d'innovation purement technologique.

2.3.1.5 Environnement écologique

Les exigences environnementales prennent une place croissante dans l'industrie européenne et renforcent indirectement l'intérêt des entreprises pour les outils MES. Les réglementations européennes récentes imposent progressivement aux entreprises de mieux mesurer, documenter et réduire leur impact environnemental. La directive CSRD élargit notamment les obligations de reporting extra-financier à un nombre croissant d'entreprises européennes (European Union [UE], 2022a). Les grandes entreprises industrielles doivent désormais produire des données plus précises sur leurs émissions, leur consommation énergétique et leurs performances environnementales.

Cette évolution augmente les besoins en traçabilité et en collecte de données de production. Les industriels doivent être capables de relier leurs indicateurs environnementaux aux activités réelles de l'usine, ce qui nécessite des outils capables de centraliser les données opérationnelles en temps réel. Dans ce contexte, les MES deviennent progressivement des outils utiles non seulement pour le pilotage de la production, mais également pour le suivi environnemental et la conformité réglementaire.

La maîtrise de la consommation énergétique constitue également un enjeu croissant pour les industriels européens. L'augmentation des coûts de l'énergie et les objectifs eu-

ropéens de transition écologique poussent les entreprises manufacturières à améliorer leur efficacité énergétique et à réduire les pertes de production (European Commission, 2023b). Les normes comme ISO 50001 encouragent d'ailleurs les entreprises à mettre en place des systèmes de suivi énergétique structurés (ISO, 2018).

Pour OpSee, cette évolution ouvre plusieurs opportunités fonctionnelles. Les données collectées par un MES peuvent être utilisées pour suivre la consommation énergétique des équipements, mesurer les rebuts de production ou calculer certains indicateurs environnementaux liés aux ordres de fabrication. À terme, ces fonctionnalités pourraient devenir un élément différenciateur important auprès des PME industrielles soumises à des exigences croissantes de reporting et de performance environnementale.

L'intégration progressive de fonctionnalités liées au suivi environnemental s'inscrit également dans la logique du modèle open-core d'OpSee. Des modules avancés dédiés à l'analyse énergétique ou au reporting environnemental pourraient être proposés comme fonctionnalités payantes, tout en conservant un noyau libre centré sur le pilotage de production.

2.3.1.6 Environnement législatif

Le cadre réglementaire européen évolue rapidement autour de la cybersécurité, de la gestion des données industrielles et de la traçabilité. Ces évolutions renforcent progressivement les besoins des industriels en outils numériques fiables, sécurisés et capables de centraliser les données de production.

La cybersécurité industrielle devient notamment un enjeu réglementaire majeur. La directive NIS 2 étend les obligations de sécurité informatique à un nombre plus important d'entreprises industrielles européennes (UE, 2022b). Les industriels doivent désormais renforcer la sécurité de leurs systèmes numériques et mieux contrôler les risques liés aux infrastructures connectées. Le Cyber Resilience Act ajoute également de nouvelles exigences pour les logiciels et produits numériques commercialisés dans l'Union européenne (UE, 2024c). Dans ce contexte, la transparence technique et l'auditabilité deviennent des élé-

ments importants pour les logiciels industriels.

Le positionnement open-core d'OpSee peut constituer un avantage sur cet aspect. Le noyau open source permet une meilleure auditabilité du logiciel et facilite certains contrôles de sécurité ou exigences de conformité. La possibilité de déployer la solution sur site répond également aux besoins de certaines entreprises souhaitant limiter leur dépendance aux infrastructures cloud externes.

Le cadre réglementaire autour des données industrielles évolue également. Le Data Act vise à faciliter l'interopérabilité et la portabilité des données issues des objets connectés industriels (UE, 2023). Cette évolution favorise les architectures ouvertes et les logiciels capables de s'intégrer facilement dans des environnements industriels hétérogènes. Pour OpSee, cela renforce l'importance de respecter les standards industriels ouverts et de limiter les mécanismes de verrouillage technologique.

L'intelligence artificielle fait également l'objet d'un encadrement croissant avec l'AI Act européen (UE, 2024a). Même si les fonctionnalités IA envisagées dans un MES restent généralement classées dans des catégories de risque limité, les entreprises devront garantir un certain niveau de transparence sur le fonctionnement des outils utilisés. Cette réglementation pourrait ralentir certaines intégrations IA complexes, mais elle favorise également les solutions capables d'expliquer clairement le traitement des données et les décisions produites.

Enfin, les exigences de traçabilité continuent de se renforcer dans plusieurs secteurs industriels. Les réglementations européennes autour du passeport numérique des produits et de l'écoconception imposeront progressivement une meilleure traçabilité des matériaux, des étapes de production et des impacts environnementaux (UE, 2024b). De nombreux secteurs industriels disposent déjà d'exigences similaires, notamment dans l'agroalimentaire, le pharmaceutique ou l'aéronautique. Ces évolutions augmentent indirectement l'intérêt des entreprises pour les solutions MES capables de centraliser et historiser les données de production.

2.3.1.7 Synthèse PESTEL

Le tableau 2.2 synthétise les principaux facteurs identifiés au travers des six dimensions de l'analyse PESTEL, en distinguant les opportunités et les menaces pour le développement d'OpSee. Cette synthèse alimente directement le diagnostic SWOT (2.6) ainsi que le positionnement stratégique présenté en section 5.1.3.

TABLE 2.2 – Synthèse PESTEL : opportunités et menaces pour OpSee.

PESTEL	**Facteur**	**Opp.**	**Men.**
Politique	Aides publiques à la digitalisation des PME industrielles	✓	
	Recherche de souveraineté technologique européenne	✓	
	Soutien européen à la modernisation industrielle	✓	
Économique	Croissance du marché européen des MES	✓	
	Recherche de solutions plus flexibles et moins coûteuses	✓	
	Acceptation croissante des modèles open-core et open-source commerciaux	✓	
	Ralentissement économique et prudence budgétaire des PME		✓
	Cycles de vente longs dans l'industrie manufacturière		✓
Socioculturel	Montée de la culture data et de la digitalisation industrielle	✓	
	Acceptation croissante des standards et technologies open source	✓	
	Résistance au changement dans les ateliers		✓
	Manque de compétences liées à l'industrie 4.0		✓
Technologique	Maturité des technologies open source industrielles	✓	
	Généralisation des standards industriels ouverts	✓	
	Développement des usages IA et IIoT dans les MES	✓	

suite à la page suivante

Table 2.2 – suite de la page précédente

PESTEL	**Facteur**	**Opp.**	**Men.**
Écologique	Besoins croissants en suivi environnemental et énergétique	✓	
	Renforcement des obligations de reporting environnemental	✓	
	Recherche d'optimisation énergétique dans l'industrie	✓	
Législatif	Renforcement des exigences de cybersécurité industrielle	✓	
	Développement des exigences d'interopérabilité des données industrielles	✓	
	Renforcement des exigences de traçabilité industrielle	✓	
	Cadre juridique favorable aux modèles open-core	✓	
	Contraintes réglementaires liées à l'intelligence artificielle		✓
	Contraintes liées à la protection des données opérateurs		✓

L'analyse PESTEL met en évidence un environnement globalement favorable au développement d'OpSee. La digitalisation progressive des PME industrielles, le renforcement des exigences de traçabilité et la montée des standards ouverts créent un contexte propice à l'adoption de solutions MES plus flexibles et accessibles.

Les principaux freins concernent néanmoins la résistance au changement dans les ateliers, la complexité réglementaire croissante et la prudence budgétaire des PME industrielles dans un contexte économique encore incertain.

2.3.1.8 Méthode des scénarios

Pour structurer la projection à horizon 2030, la PESTEL est croisée selon la méthode dite *Intuitive Logics*, héritée des *planning scenarios* mis en place chez Royal Dutch Shell en 1972-1973 sous l'impulsion de Pierre Wack (Bradfield et al., 2005) : deux axes d'incertitude majeure à fort impact sont sélectionnés, leur combinaison produit quatre futurs alternatifs, qualifiés en probabilité estimée et en indicateurs de basculement. Les deux axes retenus pour OpSee sont la capacité d'investissement des PME industrielles euro-

péennes (faible ↔ élevée) et la méfiance des PME envers l'open source industriel (faible ↔ élevée). Le premier axe agrège la croissance macroéconomique, les taux directeurs, les programmes de financement et la pression CSRD ; le second agrège les références publiques, la structuration des intégrateurs et la communication des éditeurs. La figure 2.4 positionne les quatre scénarios.

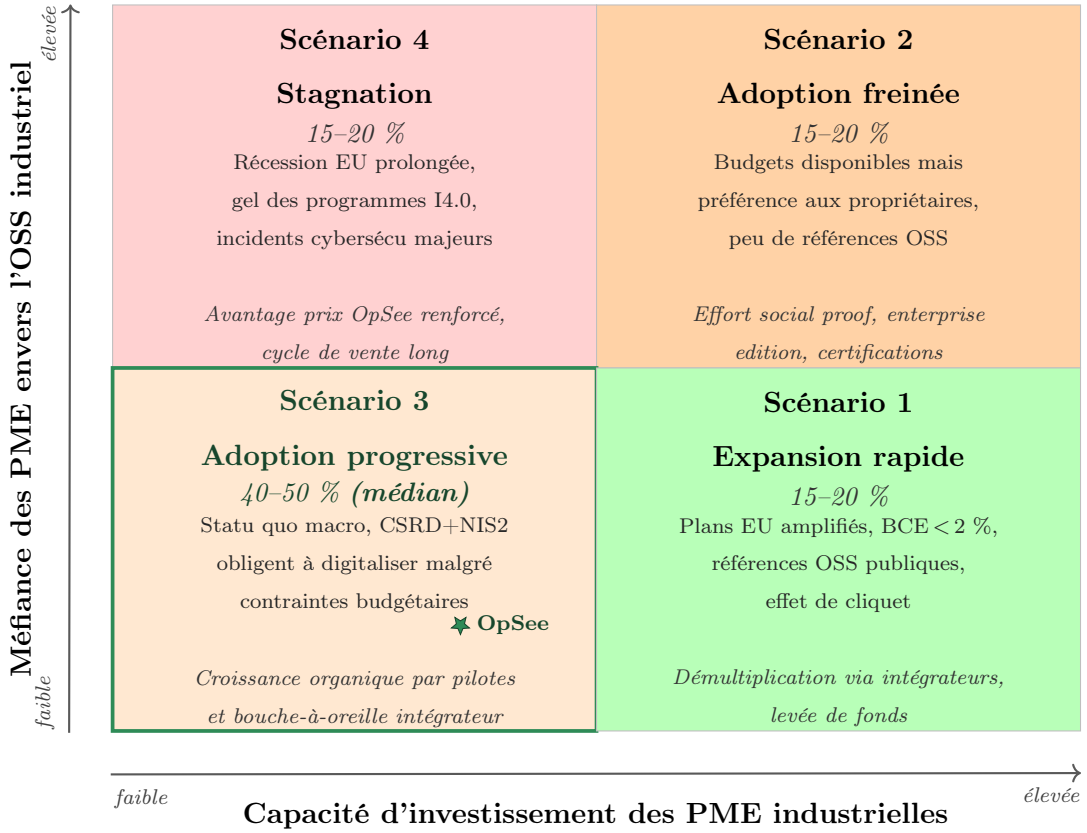


FIGURE 2.4 – Matrice 2×2 des scénarios PESTEL pour OpSee à horizon 2030. Le cadre vert souligne le scénario médian retenu pour la projection opérationnelle et financière ; l'étoile verte localise la position projetée d'OpSee.

Scénario 1 – Expansion rapide (capacité élevée, méfiance faible).

Programmes européens Industrie 4.0 amplifiés, CSRD pleinement en vigueur, taux BCE sous 2 % durablement, et premières références publiques de MES open-core qui déclenchent un effet de cliquet sectoriel. Probabilité estimée à 15-20 %. Le marché atteint

l'extrémité haute des projections (5,88 milliards de dollars en 2030, MarketsandMarkets (2026)), avec une adoption PME qui gagne cinq points par an. OpSee passe en mode démultiplication : réseau d'intégrateurs partenaires, accélération des modules avancés (ESG, IA), levée de fonds éventuelle. Signaux à surveiller : PMI EU au-dessus de 52, taux BCE sous 2 %, et plus de cinq références MES open-core publiques.

Scénario 2 – Adoption freinée par la méfiance (capacité élevée, méfiance élevée).

Les budgets PME existent mais vont aux éditeurs propriétaires bien établis, par réassurance. Peu de communication sur les déploiements open-core réussis, et quelques incidents de cybersécurité industrielle médiatisés confortent ce réflexe. Probabilité 15-20 %. L'adoption MES PME gagne trois points par an, mais la part open-core stagne sous 5 %. OpSee doit intensifier son *social proof* : études de cas, conformité explicite NIS 2 et CRA, voire une *enterprise edition* à SLA renforcées. Signal : croissance MES globale au-dessus de 9 % par an mais open source sous 5 %.

Scénario 3 – Adoption progressive (capacité faible, méfiance faible, scénario médian).

Statu quo macroéconomique avec une croissance européenne autour de 0,5 % et des freins compétences persistants (Cedefop, 2024). La pression CSRD et NIS 2 oblige néanmoins les PME à se digitaliser sous contrainte budgétaire, et l'arrivée d'offres accessibles comme OpSee débloque le segment. Probabilité 40-50 %, c'est le scénario retenu pour la projection financière. Marché au CAGR de 9 % (MarketsandMarkets, 2026), adoption MES PME +2 à 3 points par an. OpSee gagne par pilotes et bouche-à-oreille intégrateur, pas par expansion massive.

Scénario 4 – Stagnation (capacité faible, méfiance élevée).

Récession européenne prolongée, gel des programmes industriels EU, taux directeurs en hausse, et incidents cybersécurité majeurs qui renforcent la méfiance envers l'open source. Probabilité 15-20 %. Le marché plafonne autour de 4 milliards de dollars en 2030. Paradoxalement, l'avantage prix d'OpSee s'y renforce : l'absence d'investissement initial pèse quand les budgets sont gelés. Le cycle de vente s'allonge néanmoins, et un pivot partiel vers les services d'accompagnement peut s'imposer pour préserver le revenu récurrent.

Quel que soit le scénario, trois éléments restent vrais. Le cadre réglementaire européen valorise les solutions ouvertes et auditables, peu importe le contexte macroéconomique. La maturité de la stack open source réduit durablement le coût marginal de développement d'OpSee. Et la demande des PME pour des solutions accessibles persiste, qu'il y ait expansion ou contraction. Ces trois constantes justifient le maintien du positionnement open-core. La projection opérationnelle et financière du mémoire est calibrée sur le scénario médian d'adoption progressive.

2.3.2 Micro-environnement : forces de Porter

Les cinq forces de Porter appliquées au marché MES pour PME précisent la pression concurrentielle qui pèse sur le segment.

2.3.2.1 Intensité de la concurrence

L'intensité concurrentielle est élevée sur le marché global mais nettement plus faible sur la niche ciblée. La cartographie complète des acteurs (Tier 1, mid-market, SaaS, open-source et plateformes adjacentes) figure en annexe A.2.2. Les grands éditeurs propriétaires (Siemens, GE Vernova, Aveva) proposent des solutions complètes et robustes, mais leur coût total de possession et leur complexité d'intégration les rendent inaccessibles aux PME. Les éditeurs mid-market spécialisés (Astrée Software, Productys, Proxia Software AG, SmartYou, Teeptrak) sont plus accessibles, mais propriétaires et peu modulaires. Les

SaaS de monitoring et d'OEE (Evocon, Factry) se déploient rapidement et ne couvrent qu'une partie du périmètre MES. Les projets open-source MES (OpenMES, metasfresh) restent communautaires, sans modèle commercial structuré ; à l'inverse, les acteurs qui facturent par équipement (Teeptrak, Tulip) restent entièrement propriétaires. Combiner open-core packagé et pricing modulaire par équipement reste un positionnement peu représenté dans les inventaires de marché publics comme dans la littérature académique disponible (Besutti et al., 2019).

2.3.2.2 Pouvoir de négociation des clients

Le pouvoir de négociation des clients PME a longtemps été limité par la concentration de l'offre et la complexité des licences propriétaires. Dutta et al. (2022) et Masood et Sonntag (2020) montrent que ces acheteurs, contraints par la rareté des financements et le manque d'expertise interne, restent sensibles au coût d'acquisition et au délai de mise en service. Le rapport de force évolue en faveur des clients sur la période récente. La montée de fonctions transverses dédiées à la digitalisation (CTO chez Colona, responsable excellence opérationnelle chez Vinventions) professionnalise les achats, et 72 % des PME pilotent leurs décisions par la donnée (M. Bianchini et al., 2024 ; European Investment Bank, 2024). Le rejet de la facturation *per user* revient dans presque tous les entretiens (Vinventions, Sonaca, Indao), et l'augmentation annuelle jugée excessive déclenche désormais l'abandon : 6 % par an chez Redzone a fait fuir Vinventions, 20 % de maintenance Apriso sont contestés en interne chez Sonaca. Le seuil psychologique se situe entre quelques dizaines et quelques centaines d'euros par équipement et par mois (interviews 1 et 6, annexe A.2.1). Le pricing pay-per-equipment d'OpSee s'inscrit dans ce déplacement, avec une portabilité des données garantie à la fois par les standards ouverts et par le code source du noyau.

2.3.2.3 Pouvoir de négociation des collaborateurs

Le marché du travail dans le numérique industriel reste tendu. L'EIBIS 2024 classe la disponibilité de personnel qualifié comme obstacle d'investissement pour 77 % des entre-

prises européennes contre 80 % aux États-Unis (European Investment Bank, 2024), et la pénurie touche en priorité les compétences Industrie 4.0 (DevOps industriels, intégrateurs MES, experts ISA-95 et OPC-UA) (Cedefop, 2024). La pression joue côté candidats, sur le salaire comme sur l'autonomie demandée. Le modèle open-core en absorbe une partie. Shahrivar et al. (2018) relèvent que les projets COSS recrutent souvent leurs développeurs dans la communauté d'utilisateurs et de contributeurs, ce qui raccourcit le cycle d'embauche et l'intégration. La visibilité publique du code et l'impact mesurable sur des prospects industriels réels jouent aussi sur l'attractivité, cela peut également renforcer l'attractivité du projet auprès de profils sensibles à l'impact technique et à la visibilité du travail réalisé. (Kula et al., 2025). Pour OpSee, l'équilibre passe par une équipe resserrée et par une communauté qui prend le relais sur la périphérie.

2.3.2.4 Menace des produits de substitution

La menace des produits de substitution est moyenne à élevée. Gomes et al. (2024) décrivent un parc applicatif fragmenté chez les PME, hérité d'achats isolés sans préoccupation d'intégration ; les interviews terrain confirment cette diversité. Colona pilote son TRS sur des fichiers Excel à 75 % de fiabilité (interview 4), Diarotech compile manuellement ses stocks après avoir abandonné Odoo, Vinventions s'appuie sur Wonderware qu'elle veut quitter, et Sonaca développe ses propres applications Mendix pour éviter la facturation *per user* d'Apriso. Les modules production des ERP (Odoo, NetSuite, SAP S/4HANA) jouent un rôle adjacent, mais sont presque toujours abandonnés ou cantonnés à la marge faute de couvrir le périmètre MESA-11. Ces combinaisons suffisent à des opérations simples mais cassent dès qu'on demande de la traçabilité complète, du temps réel ou une intégration équipements cohérente. A. Bianchini et al. (2024) documentent à l'inverse les gains mesurables d'un MES dédié en PME. Les obligations CSRD, NIS 2 et DPP alourdissent par ailleurs le coût de maintenance des patchworks, et créent un espace pour un MES packagé à coût d'entrée maîtrisé.

2.3.2.5 Menace des nouveaux entrants

La menace des nouveaux entrants reste modérée. Trois barrières d'entrée persistent. La maîtrise des standards industriels (ISA-95, ISA-88, OPC-UA, MQTT v5.0, Sparkplug) demande une courbe d'apprentissage longue et des investissements en certification non négligeables (International Society of Automation, 2024 ; OPC Foundation, 2024). L'expertise process s'accumule par l'observation directe d'usines variées : Christophe Camerlynck a passé quinze ans chez Carmeuse avant de pouvoir concevoir un MES adapté (interview 3). La crédibilité commerciale auprès d'industriels conservateurs réclame un portfolio de déploiements éprouvés. Côté technique, la stack open source (Docker, Kubernetes, PostgreSQL, TimescaleDB) abaisse en partie ces barrières en réduisant le coût marginal de développement. Côté financement, l'acquisition de Red Hat par IBM pour 34 milliards de dollars (IBM, 2019) et l'introduction en bourse de GitLab (GitLab Inc., 2021) ont validé la rentabilité du modèle open-core auprès des investisseurs, ce qui rend le capital plus accessible aux futurs entrants COSS (Kula et al., 2025 ; Shahrivar et al., 2018). Aligner standards, expertise process et crédibilité commerciale en même temps reste rare, ce qui peut constituer un avantage de temporalité pour les premiers acteurs capables de combiner ces dimensions.

2.3.2.6 Synthèse

L'analyse des cinq forces confirme que le marché MES destiné aux PME industrielles reste marqué par une forte concurrence globale, mais par une couverture incomplète des besoins spécifiques de ce segment. Les grands acteurs historiques conservent une avance fonctionnelle et commerciale importante, tandis que les solutions plus accessibles restent souvent limitées à des usages partiels. Dans ce contexte, le positionnement d'OpSee repose sur une combinaison différenciante : modularité par équipement, logique open-core, coût d'entrée réduit et compatibilité avec les standards industriels ouverts. Les clients deviennent plus exigeants sur le pricing et la portabilité, ce qui joue dans le sens d'OpSee. Les substituts couvrent une fraction du périmètre seulement, et les barrières d'entrée sur

l'expertise process et la crédibilité commerciale stabilisent une avance temporelle.

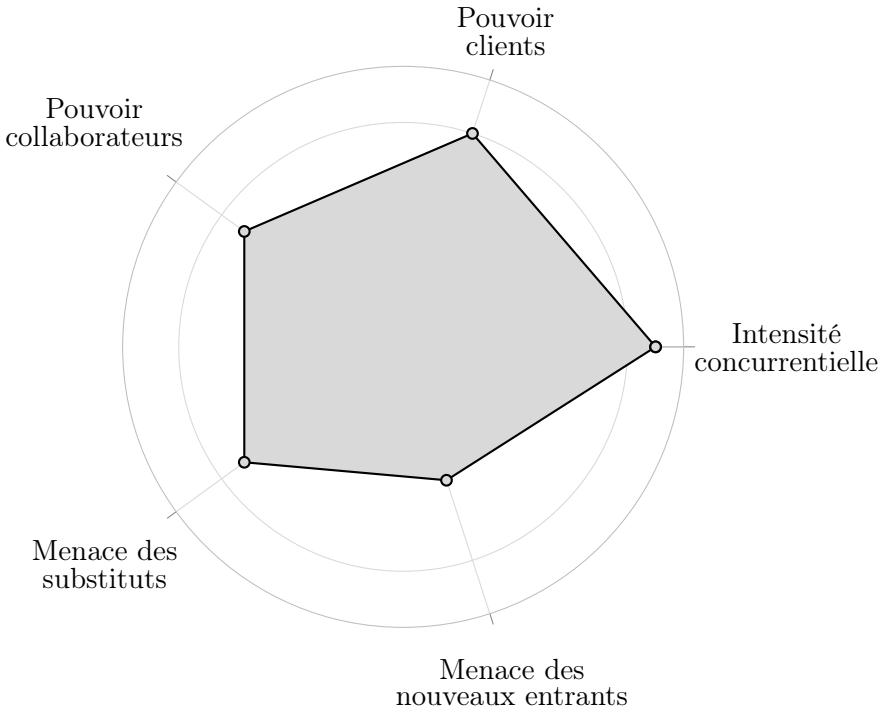


FIGURE 2.5 – Évaluation des cinq forces de Porter appliquées au marché MES pour PME industrielles.

L'intensité concurrentielle et le pouvoir de négociation des clients apparaissent comme les forces dominantes du marché. Les barrières technologiques, la maîtrise des standards industriels et la nécessité d'une expertise process limitent néanmoins partiellement la menace des nouveaux entrants.

2.4 Analyse interne

2.4.1 Modèle VRIN

Le modèle VRIN, formalisé par Barney (1991) dans le cadre de la *Resource-Based View*, évalue si les ressources et compétences internes peuvent fonder un avantage concurrentiel

durable. Quatre critères sont examinés successivement : la valeur, la rareté, l'inimitabilité et la non-substituabilité.

2.4.1.1 Valeur

La valeur des ressources d'OpSee repose d'abord sur leur adéquation avec les difficultés observées chez les PME industrielles. Les travaux de Masood et Sonntag (2020) et Dutta et al. (2022) montrent que les principaux freins à l'adoption de solutions Industrie 4.0 sont le coût, le manque de compétences internes, la complexité d'intégration et la compatibilité avec les systèmes existants. Ces freins apparaissent également dans les entretiens menés dans le cadre du projet, où plusieurs entreprises évoquent leur dépendance à Excel, le coût des licences propriétaires ou encore l'absence de vision temps réel. Le modèle open-core, la tarification par équipement et l'architecture modulaire d'OpSee répondent directement à ces contraintes en réduisant le coût d'entrée, en permettant un déploiement progressif et en limitant le verrouillage fournisseur. L'enquête EIBIS (European Investment Bank, 2024) confirme par ailleurs que le numérique reste la première priorité d'investissement déclarée des entreprises européennes, ce qui valide l'existence d'une demande pour un MES accessible. La valeur ne réside donc pas uniquement dans le logiciel lui-même, mais dans l'alignement entre ses choix techniques, son modèle économique et les contraintes opérationnelles des PME ciblées.

2.4.1.2 Rareté

La rareté des ressources d'OpSee provient principalement de la combinaison spécifique de plusieurs éléments rarement réunis sur le segment des PME industrielles. La majorité des acteurs du marché MES se concentrent soit sur des solutions propriétaires destinées aux grandes entreprises, soit sur des outils plus simples limités au monitoring ou au calcul d'OEE. Les projets MES open source recensés dans la littérature restent quant à eux principalement communautaires et ne disposent généralement pas d'un modèle économique structuré ni d'un véritable réseau de déploiement (Besutti et al., 2019) ;

la cartographie complète des acteurs figure en annexe A.2.2. À l'inverse, les solutions proposant une architecture modulaire et une facturation progressive restent presque exclusivement propriétaires. OpSee se situe à l'intersection de ces approches en combinant un noyau open-core, une architecture modulaire pensée pour les PME, une tarification par équipement et un modèle de déploiement basé sur des partenaires intégrateurs. Cette combinaison est renforcée par la complémentarité des profils réunis autour du projet, mêlant expertise industrielle, compétences techniques en intégration MES et vision entrepreneuriale. La rareté ne réside donc pas uniquement dans une technologie isolée, mais dans l'assemblage cohérent de ressources techniques, commerciales et sectorielles adaptées à un segment encore peu adressé.

2.4.1.3 Inimitabilité

L'inimitabilité des ressources d'OpSee repose d'abord sur l'accumulation progressive d'une expertise difficile à reproduire rapidement. La conception d'une architecture MES modulaire compatible avec les standards industriels (ISA-95, ISA-88, OPC-UA, MQTT, Sparkplug) nécessite une connaissance approfondie des environnements industriels et des problématiques d'intégration. Cette expertise s'appuie notamment sur l'expérience accumulée par Peter Mees, qui a passé sa carrière dans l'intégration MES chez General Electric puis AVEVA (annexe A.2.1, interview 6), ainsi que sur le parcours de Christophe Camerlynck, qui a dirigé l'automatisation chez Carmeuse pendant quinze ans avant de fonder AgiNtech (interview 3). Les entretiens réalisés dans le cadre de cette étude montrent par ailleurs que la compréhension des réalités terrain constitue un facteur critique de crédibilité auprès des industriels. Au-delà de la dimension technique, le modèle open-core peut également produire un effet cumulatif : comme le soulignent Shahrivar et al. (2018) et Kula et al. (2025), les projets COSS renforcent progressivement leur légitimité grâce à la croissance de leur base installée, de leur communauté et de leur écosystème d'intégrateurs. Plus cet écosystème se développe, plus la reproduction du positionnement devient coûteuse pour de nouveaux entrants, qui doivent simultanément reconstruire la technologie,

la crédibilité industrielle et les relations de terrain.

Cette inimitabilité doit toutefois être nuancée. Les outils d'IA générative appliqués au développement logiciel (Copilot, Claude Code, Cursor) abaissent la barrière de production de code et raccourcissent la courbe d'apprentissage technique d'un nouvel entrant. Ce qu'ils ne compressent pas, c'est l'expertise métier qui guide les choix d'architecture : savoir quelle granularité de traçabilité attend un fondeur, comment se branche un MES sur un parc d'automates PLC et de capteurs hétérogènes déjà en place, ou pourquoi une PME réglementée refusera le cloud public. Cette connaissance se construit sur le terrain et non par lecture de documentation (interviews 3 et 6). L'avantage durable se déplace donc du code vers l'expertise process, ce qui renforce le poids de ce pilier plutôt qu'il ne fragilise l'ensemble.

2.4.1.4 Non-substituabilité

La non-substituabilité des ressources d'OpSee repose sur l'absence d'alternative combinant le même périmètre fonctionnel, la même modularité et un coût d'entrée comparable pour les PME industrielles. L'analyse détaillée des substituts (tableurs, SCADA détournés, modules production d'ERP, SaaS OEE) figure en 2.3.2.4. Les solutions actuellement utilisées par les entreprises interrogées reposent principalement sur des combinaisons partielles d'Excel, de modules ERP, de SCADA ou d'outils OEE spécialisés. Ces outils répondent à certains besoins ponctuels, mais restent limités lorsqu'il s'agit d'assurer une traçabilité complète, une intégration temps réel des équipements ou une centralisation cohérente des données de production (Gomes et al., 2024). Les grands MES propriétaires couvrent ces fonctions, mais au prix d'investissements financiers et organisationnels souvent incompatibles avec les ressources des PME. À l'inverse, les outils SaaS plus accessibles restent généralement limités à quelques fonctionnalités spécifiques comme le monitoring ou le calcul d'OEE. A. Bianchini et al. (2024) documentent les gains mesurables qu'apporte un MES propre déployé en PME lorsque la couverture fonctionnelle est complète et l'intégration soignée. La non-substituabilité provient ainsi moins d'une fonctionnalité unique

que de la capacité à proposer une solution intermédiaire entre les outils fragmentés à faible coût et les plateformes MES complètes mais difficilement accessibles pour les PME industrielles.

2.4.1.5 Synthèse VRIN

L'analyse VRIN montre qu'OpSee dispose de plusieurs ressources et compétences susceptibles de soutenir un avantage concurrentiel sur le segment des PME industrielles. La valeur provient de l'adéquation entre les besoins identifiés sur le terrain et les choix structurants du projet : modèle open-core, architecture modulaire, tarification par équipement et déploiement progressif. La rareté tient à la combinaison de ces éléments, encore peu représentée sur le marché MES destiné aux PME. L'inimitabilité repose principalement sur l'expertise industrielle accumulée, la crédibilité terrain et la structuration progressive d'un écosystème open-core. Enfin, la non-substituabilité s'explique par l'absence d'alternative offrant simultanément un périmètre MES cohérent, une accessibilité financière et une transparence technique comparable.

Cet avantage doit toutefois être interprété avec prudence. À ce stade, il ne constitue pas encore un avantage concurrentiel durable pleinement stabilisé, mais plutôt un potentiel stratégique à consolider. Sa durabilité dépendra de la capacité d'OpSee à transformer ses premiers signaux de marché en références clients, à maintenir une qualité d'exécution technique élevée, à structurer un réseau fiable d'intégrateurs et à faire évoluer ses modules avancés en fonction des besoins industriels. Ces points de vigilance sont repris dans le diagnostic SWOT (2.6) ; la traduction du diagnostic VRIN en choix stratégique fait l'objet de la section suivante (2.5.1).

TABLE 2.3 – Synthèse VRIN des principales ressources et compétences d'OpSee.

Ressource / compétence	**V**	**R**	**I**	**N**	**Justification**
Modèle open-core et facturation par équipement	✓	✓	∼	✓	Réduit le coût d'entrée, favorise l'auditabilité et limite le verrouillage fournisseur ; barrière logicielle érodée par l'IA générative.
Architecture modulaire par équipement	✓	✓	✓	✓	Permet un déploiement progressif adapté aux contraintes des PME industrielles.
Expertise industrielle de l'équipe	✓	✓	✓	✓	Repose sur une expérience accumulée dans l'intégration MES (Carmeuse, General Electric, AVEVA).
Réseau de partenaires intégrateurs	✓	∼	✓	∼	Peut accélérer le déploiement, mais doit encore être structuré et stabilisé.
Premiers retours terrain et prospects pilotes	✓	✓	∼	∼	Valident le besoin, mais l'avantage dépendra de la conversion en références clients durables.

2.4.2 Analyse de la chaîne de valeur

L'analyse VRIN (2.4.1) a identifié les ressources susceptibles de fonder un avantage concurrentiel ; la chaîne de valeur examine maintenant comment ces ressources s'articulent dans les activités opérationnelles du projet. Adaptée du modèle de Porter (1985), cette

lecture distingue les activités primaires directement liées à la création, au déploiement et au support du logiciel, ainsi que les activités de soutien qui permettent de maintenir et de faire évoluer l'avantage concurrentiel du projet. La figure 2.6 synthétise cette répartition et identifie les activités sur lesquelles OpSee se différencie le plus nettement des éditeurs MES propriétaires historiques.

Contrairement aux éditeurs MES propriétaires historiques, dont la création de valeur repose largement sur les licences logicielles, les projets d'intégration lourds et les prestations de conseil associées, OpSee cherche à déplacer la création de valeur vers la modularité, la rapidité de déploiement, l'accessibilité financière et l'écosystème open-core. Cette logique modifie à la fois la structure de coûts du projet et la manière dont la valeur est captée auprès des PME industrielles.

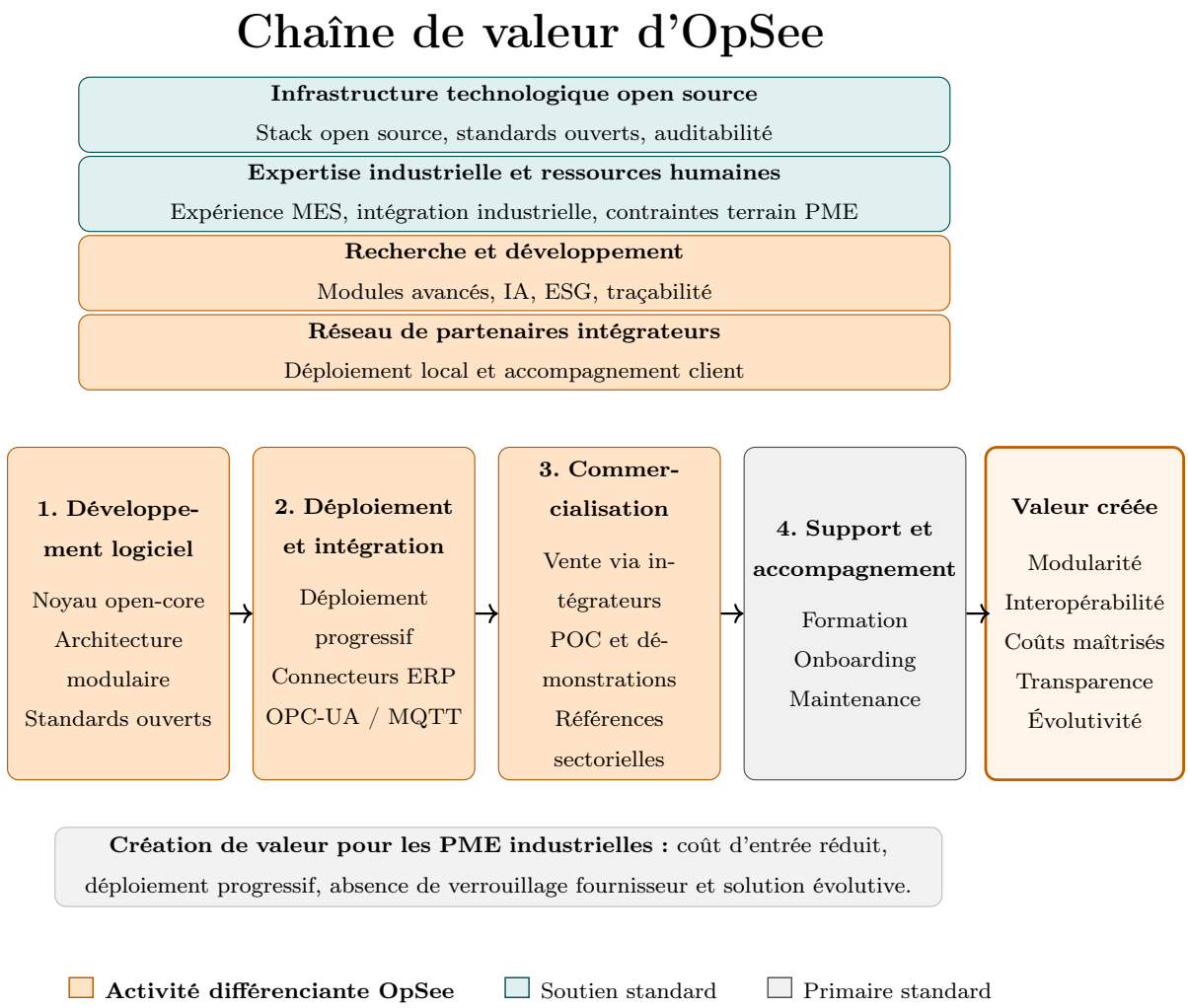


FIGURE 2.6 – Chaîne de valeur d'OpSee adaptée du modèle de Porter (1985).

2.4.2.1 Activités primaires

Développement logiciel et architecture produit

La première activité créatrice de valeur concerne le développement du noyau logiciel et des modules avancés. OpSee s'appuie sur une architecture modulaire construite autour d'un noyau open-core, permettant de séparer les fonctionnalités essentielles accessibles librement des modules avancés commercialisés sous licence propriétaire. Cette architecture facilite le déploiement progressif chez les PME industrielles, qui peuvent commencer par

un périmètre réduit avant d'étendre progressivement les fonctionnalités utilisées. Le recours à des standards industriels ouverts (OPC-UA, MQTT, ISA-95) augmente également l'interopérabilité avec les équipements existants et réduit les coûts d'intégration.

La stack technologique open source (Docker, Kubernetes, PostgreSQL, TimescaleDB) constitue également une source de valeur interne. Elle réduit les coûts de développement et d'infrastructure tout en améliorant la flexibilité technique du projet. Cette approche permet à OpSee de concentrer ses ressources sur les fonctionnalités à plus forte valeur ajoutée plutôt que sur la reconstruction d'une infrastructure logicielle propriétaire.

Déploiement et intégration

Le déploiement constitue une activité centrale dans le secteur MES. Contrairement aux grands éditeurs qui s'appuient souvent sur des projets d'intégration longs et fortement personnalisés, OpSee adopte une logique de déploiement progressif ligne par ligne. Cette approche réduit le risque financier et organisationnel pour les PME industrielles, qui peuvent tester la solution sur un périmètre limité avant d'étendre le déploiement.

La création de valeur repose également sur le réseau de partenaires intégrateurs. Dans le modèle d'OpSee, les intégrateurs jouent un rôle essentiel dans l'installation, la personnalisation et l'accompagnement des clients industriels. Cette structure permet d'augmenter la capacité de déploiement sans internaliser l'ensemble des ressources d'intégration. Elle favorise également une meilleure proximité sectorielle et géographique avec les clients finaux.

Commercialisation et acquisition client

La commercialisation d'OpSee repose principalement sur une logique relationnelle et sectorielle. Les entretiens réalisés dans le cadre de cette étude (annexe A.2.1) montrent que les décisions d'adoption MES en PME s'appuient fortement sur les retours d'expérience, les références industrielles et la confiance accordée aux intégrateurs techniques. La création de valeur commerciale dépend donc moins d'une logique de vente massive que de la capacité

à construire progressivement une crédibilité terrain.

Le modèle de tarification par équipement constitue également un élément différenciant de la proposition de valeur. Contrairement aux modèles *per user* explicitement rejetés par plusieurs interlocuteurs (Vinventions, Sonaca, Indao ; annexe A.2.1), cette approche permet aux PME de maîtriser plus facilement l'évolution de leurs coûts à mesure que le périmètre de déploiement augmente.

Support et accompagnement

L'accompagnement des utilisateurs représente une activité essentielle dans un environnement industriel où la résistance au changement reste importante (Sutra & Mansur, 2025). Les interviews terrain (annexe A.2.1) mettent en évidence l'importance des problématiques de formation, d'appropriation des outils numériques et d'acceptation par les opérateurs. La valeur créée par OpSee ne repose donc pas uniquement sur les fonctionnalités techniques du logiciel, mais également sur la capacité à accompagner les entreprises dans leur transition numérique.

Le modèle open-core peut également réduire certaines dépendances vis-à-vis du fournisseur. La transparence du noyau logiciel et l'utilisation de standards ouverts limitent le verrouillage technologique et facilitent la portabilité des données, ce qui constitue un élément de réassurance important pour les PME industrielles.

2.4.2.2 Activités de soutien

Infrastructure technologique

L'infrastructure technologique d'OpSee repose principalement sur des briques open source matures et largement adoptées dans les environnements industriels modernes. Cette approche réduit les coûts fixes liés aux licences logicielles et améliore la capacité du projet à évoluer rapidement. Elle favorise également l'auditabilité et la conformité réglementaire dans un contexte marqué par les exigences croissantes en matière de cybersécurité industrielle (*Network and Information Security Directive*, NIS 2 ; *Cyber Resilience Act*, CRA),

détaillées dans l'analyse PESTEL législative (2.3.1.6).

Ressources humaines et expertise industrielle

L'expertise industrielle constitue une ressource de soutien centrale dans le projet. Les compétences accumulées par Peter Mees dans l'intégration MES chez General Electric puis AVEVA et par Christophe Camerlynck dans les environnements industriels lourds chez Carmeuse (annexe A.2.1, interviews 3 et 6) apportent une compréhension approfondie des contraintes opérationnelles rencontrées sur le terrain. Cette expertise influence directement les choix d'architecture, de modularité et de déploiement du logiciel.

Le modèle open-core peut également renforcer l'attractivité du projet auprès de développeurs et de contributeurs sensibles à la visibilité technique et à l'impact concret des solutions développées.

Recherche et développement

La recherche et développement constitue enfin une activité de soutien importante dans un secteur MES en forte évolution. Les évolutions réglementaires (*Corporate Sustainability Reporting Directive*, CSRD ; *Digital Product Passport*, DPP) détaillées en 2.3.1.6, l'émergence des fonctionnalités d'analyse prédictive et l'intégration progressive de l'intelligence artificielle créent de nouveaux besoins industriels. La roadmap d'OpSee intègre déjà plusieurs de ces dimensions au travers de modules avancés dédiés à la traçabilité, à l'analyse de données ou à la gestion environnementale.

2.4.2.3 Synthèse

L'analyse de la chaîne de valeur montre que le positionnement d'OpSee repose moins sur une logique de puissance fonctionnelle maximale que sur une combinaison de modularité, d'accessibilité et d'intégration progressive adaptée aux PME industrielles. La valeur est principalement créée par la réduction du coût d'entrée, l'utilisation de standards ouverts, la proximité avec les besoins terrain et le recours à un réseau d'intégrateurs par-

tenaires. Contrairement aux modèles MES propriétaires traditionnels, qui captent une part importante de la valeur via les licences et les projets d'intégration lourds, OpSee cherche à déplacer cette création de valeur vers la flexibilité, la rapidité de déploiement et l'évolution progressive des fonctionnalités utilisées par le client. Le tableau 2.4 récapitule activité par activité la source de différenciation et le mécanisme de capture de valeur ; le détail opérationnel de cette articulation figure dans le plan opérationnel (A.5.1).

TABLE 2.4 – Chaîne de valeur OpSee : différenciation et capture de valeur par activité.

Activité	**Source de différenciation**	**Mécanisme de capture de valeur**
Activités primaires		
Développement logiciel	Architecture open-core, standards ouverts (ISA-95, OPC-UA, MQTT)	Noyau libre comme produit d'appel ; modules premium sous licence propriétaire
Déploiement et intégration	Logique ligne par ligne, intervention partenaire	Commission de 10 % reversée aux intégrateurs sur abonnements (A.5.3)
Commercialisation	Logique relationnelle, références sectorielles	Tarification par équipement (3.2) ; pas de *per user*
Support et accompagnement	Open-core réduit le verrouillage fournisseur	Helpdesk + SLA inclus dans les offres Premium et Entreprise (A.5.5)
Activités de soutien		
Infrastructure technologique	Briques open source matures (Docker, PostgreSQL, TimescaleDB)	Coût marginal de licence nul ; conformité NIS 2 / CRA facilitée
Ressources humaines / expertise	Expertise process (Mees, Camerlynck) accumulée hors marché du travail standard	Crédibilité commerciale auprès d'industriels conservateurs
Recherche et développement	Modules avancés ciblés (ESG, IA, batch ISA-88)	Élargissement progressif du catalogue premium

2.5 Choix de positionnement stratégique

L'analyse externe (PESTEL, Porter) et l'analyse interne (VRIN, chaîne de valeur) éclairent la position concurrentielle d'OpSee dans son environnement. Cette section explicite les choix qui en découlent : position retenue sur l'horloge stratégique de Bowman, puis synthèse de la proposition de valeur qui en résulte.

2.5.1 Stratégie concurrentielle : horloge de Bowman

L'horloge stratégique de Bowman positionne une offre sur deux axes : la valeur perçue par les clients et le niveau de prix (Faulkner & Bowman, 1995). Le modèle distingue huit positions, dont seules quelques-unes tiennent la route à long terme. OpSee n'occupe pas un point unique mais une zone P3-P4, qui couvre la position hybride (P3, valeur élevée à prix faible ou modéré) et glisse vers la différenciation (P4, valeur élevée à prix moyen). La figure 2.7 replace cette zone dans le paysage concurrentiel.

Quatre groupes de concurrents apparaissent sur la carte. Les éditeurs Tier 1 (Siemens Opcenter, SAP Digital Manufacturing, Dassault Apriso, Rockwell) se regroupent en P5, en différenciation focalisée à prix très élevé pour grands groupes industriels. GE Vernova et AVEVA glissent vers P7, avec des marges élevées mais une valeur perçue érodée par l'âge de leur stack (« outdated », interview 3). Les éditeurs mid-market (Aquiweb, Productys, Proxia, SmartYou, Redzone) s'étalent entre P5 et P6, accessibles aux ETI mais hors de portée des PME sur l'investissement initial. Les SaaS IIoT et OEE (Teeptrak, Tulip, Evocon, Factry) occupent l'arc P2-P4, prix bas mais périmètre partiel. Les projets open source (OpenMES, metasfresh) sont en P1, sans modèle commercial. La zone P3-P4 d'OpSee est partagée avec Teeptrak et Tulip, qui ciblent une niche OEE plus étroite ; aucun acteur n'y combine open-core et facturation par équipement (annexe A.2.2).

En P3, le noyau libre supprime le coût de licence et met un outil industriel avancé entre les mains de PME que le marché ignorait. Le glissement vers P4 ne concerne pas le noyau, mais la monétisation des modules avancés, suivant les modèles COSS analysés par

Shahrivar et al. (2018) et Kula et al. (2025). Les autres positions sont écartées : P1 et P2 cassent l'ambition fonctionnelle, P5 à P7 contredisent la logique d'accessibilité PME, P8 implique une perte de valeur incompatible avec un éditeur open-core.

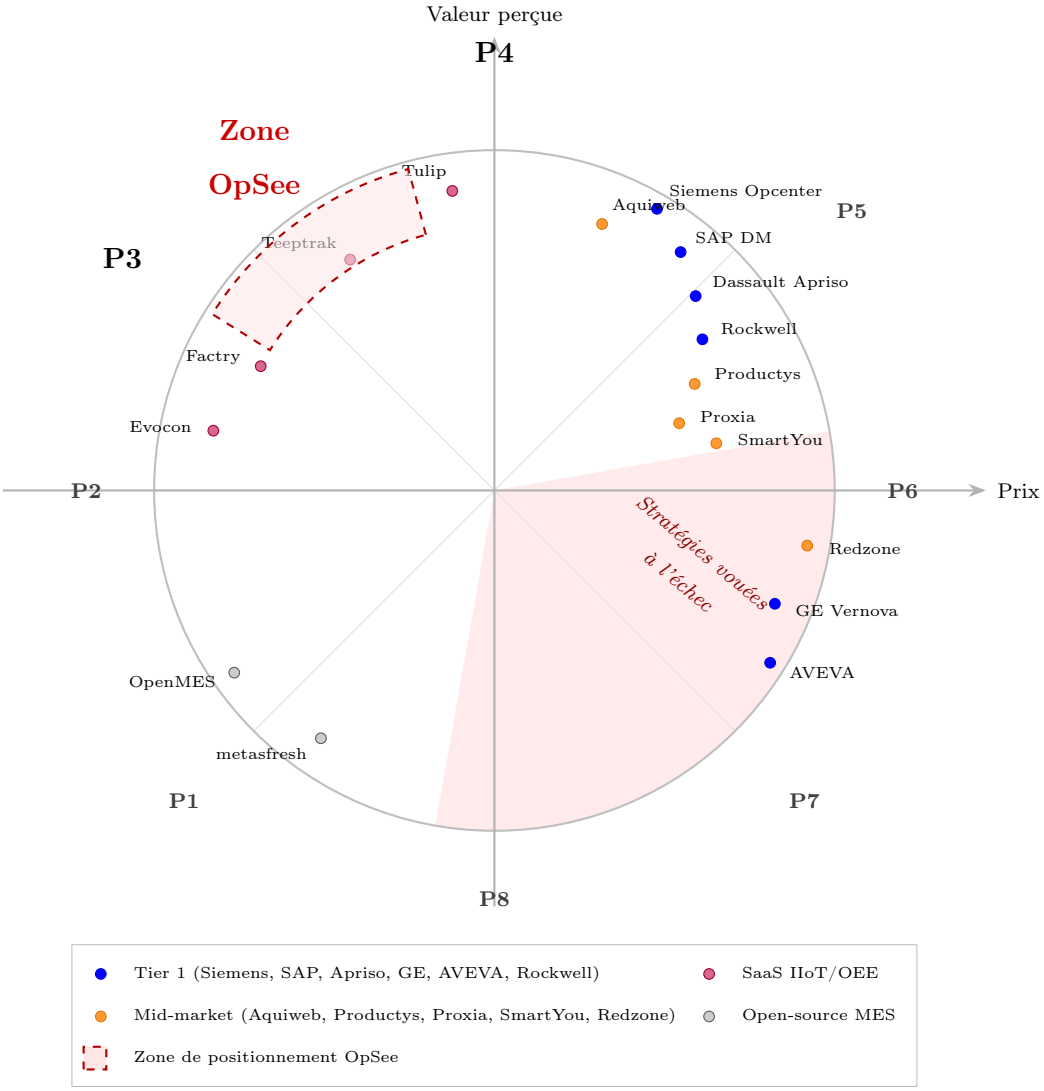


FIGURE 2.7 – Positionnement d'OpSee et de ses principaux concurrents sur l'horloge stratégique de Bowman (Faulkner & Bowman, 1995).

2.5.2 Synthèse de la proposition de valeur

Le *Value Proposition Canvas* de Osterwalder et al. (2014) aligne ce qu'OpSee construit avec ce que les PME industrielles cherchent à accomplir. La figure 2.8 présente cet alignement en six zones : *Value Map* (produits et services, créateurs de gains, réducteurs de douleurs) et *Customer Profile* (tâches, gains attendus, douleurs subies). L'enjeu : chaque douleur identifiée doit trouver un réducteur dans l'offre, et chaque gain attendu un créateur dans le périmètre produit.

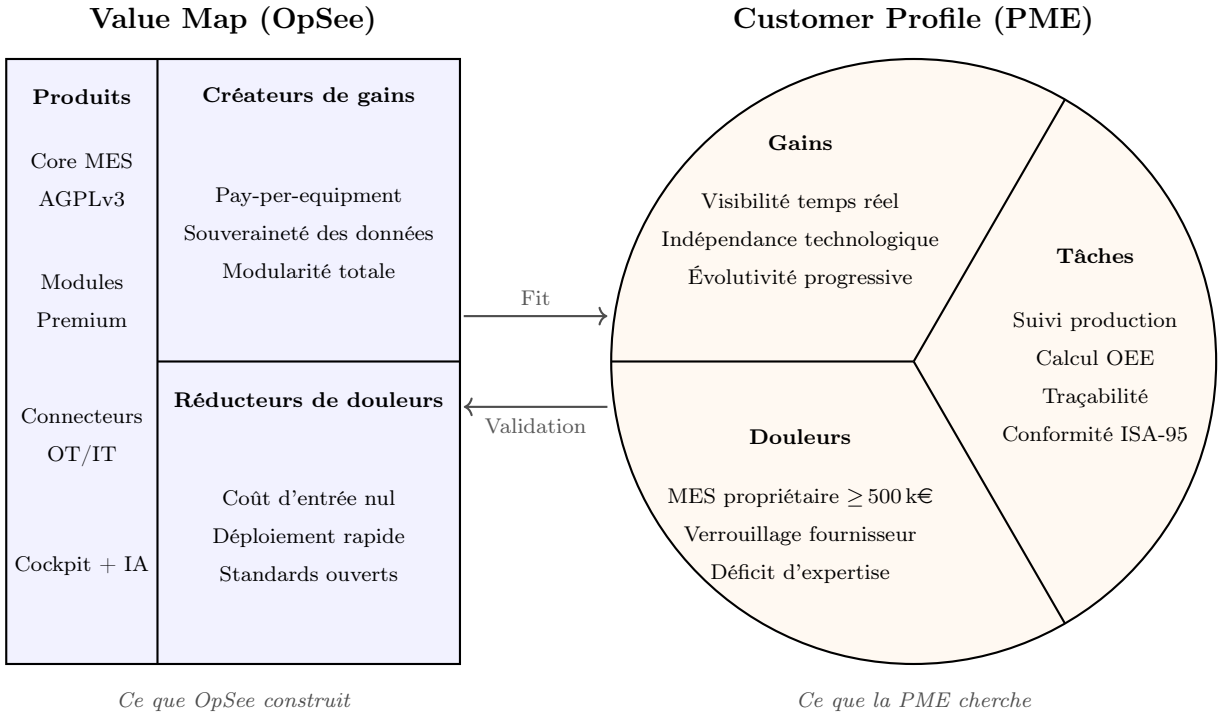


FIGURE 2.8 – Cartographie de la proposition de valeur d'OpSee sur le *Value Proposition Canvas* de Osterwalder et al. (2014). La *Value Map* (gauche) reprend l'offre OpSee, le *Customer Profile* (droite) reprend l'attente des PME industrielles. L'alignement (fit) entre les six zones constitue le test de pertinence du modèle.

2.6 Diagnostic global : matrice SWOT

La matrice SWOT (figure 2.9) consolide les diagnostics interne et externe. Les forces d'OpSee tiennent au modèle open-core (coût d'adoption réduit, transparence), à l'architecture modulaire qui s'adapte finement aux processus industriels, et à une équipe pluridisciplinaire (backend, frontend, stratégie, finance) appuyée par l'expertise industrielle d'AgiNtech. L'alignement sur les standards ISA-95, ISA-88 et OPC-UA, la rapidité d'itération d'une structure légère et la flexibilité d'intégration ERP/IoT viennent renforcer ce socle.

Les faiblesses tiennent au caractère jeune du projet : notoriété à construire face aux acteurs établis, ressources humaines et financières modestes, absence de réseau commercial structuré, peu de retours terrain documentés, dépendance à la dynamique communautaire propre à l'open source. Cette dernière est inhérente au choix stratégique ; elle est partiellement maîtrisée par l'open-core, qui sécurise la captation de valeur sur les modules propriétaires.

Côté opportunités, la digitalisation industrielle est portée par les politiques européennes (Hermann et al., 2016 ; Lasi et al., 2014), les PME expriment une demande explicite d'outils accessibles (Gomes et al., 2024 ; Masood & Sonntag, 2020), l'open source gagne du terrain dans le logiciel industriel (Kula et al., 2025 ; Robles et al., 2026), et le sous-segment du MES open-core comparable est quasi vide (Besutti et al., 2019). À cela s'ajoute le potentiel d'une communauté de contributeurs et l'expansion fonctionnelle de l'IoT industriel.

Côté menaces, plusieurs risques se cumulent : arrivée potentielle de grands éditeurs MES avec des offres cloud accessibles, méfiance persistante de certaines PME envers l'open source, résistance des opérateurs documentée par Sutra et Mansur (2025), cybersécurité industrielle, concurrence des outils low-cost spécialisés OEE, rythme d'évolution technologique, et risque de *forks* si la gouvernance n'est pas formalisée. S'y ajoute un facteur plus récent : les outils d'IA générative appliqués au développement logiciel abaissent la

barrière technique d'entrée et peuvent accélérer l'arrivée de nouveaux entrants capables de répliquer une partie du noyau ; cette menace est toutefois bornée par l'irréductibilité de l'expertise métier (2.4.1.3). Ces menaces sont gérables mais imposent une vigilance continue sur la qualité, la sécurité, l'expertise process et la structuration de la communauté.

Le diagnostic SWOT confirme la pertinence d'une stratégie hybride centrée sur la valeur élevée à coût d'accès réduit, étayée par l'open-core et la modularité. Les défis majeurs portent sur la notoriété, la capacité d'exécution et la structuration de l'écosystème de partenaires ; ces axes structurent le plan opérationnel et le plan financier détaillés dans la suite du mémoire.

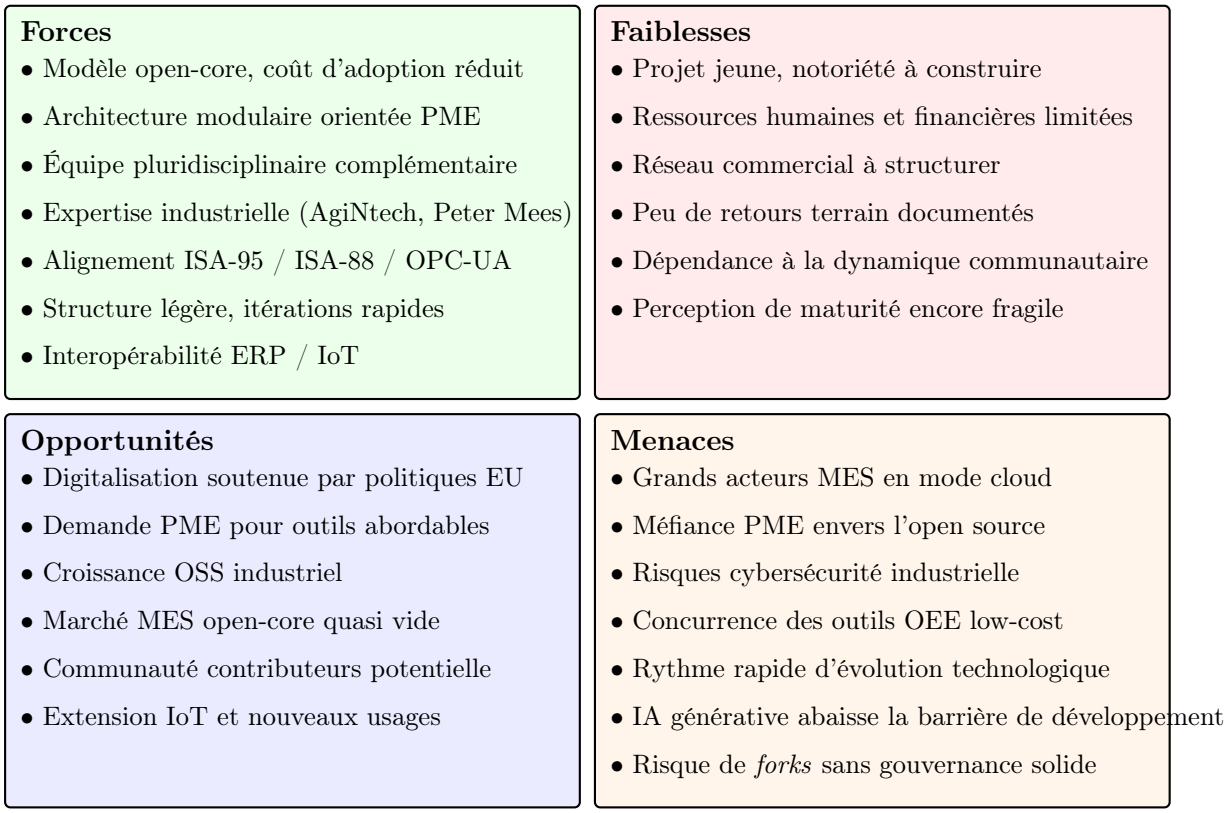


FIGURE 2.9 – Matrice SWOT du projet OpSee.

2.7 Identité stratégique d'OpSee

2.7.1 Mission

La mission d'OpSee est de rendre accessible aux PME manufacturières un MES de qualité industrielle, sans leur imposer le coût, la complexité et le verrouillage souvent associés aux offres propriétaires traditionnelles. Le projet répond à un besoin opérationnel concret : permettre aux entreprises industrielles de suivre leur production en temps réel, de mesurer leur performance, de structurer leur traçabilité et de connecter progressivement l'atelier aux systèmes de gestion existants.

OpSee poursuit cette mission au moyen d'un logiciel open-core modulaire. Le noyau libre permet de réduire le coût d'entrée, de renforcer la transparence technique et de limiter la dépendance au fournisseur. Les modules avancés, proposés sous licence commerciale, permettent quant à eux de financer le développement du projet et d'apporter des fonctionnalités à plus forte valeur ajoutée. Cette articulation vise à offrir aux PME une solution progressive, déployable ligne par ligne, compatible avec leurs contraintes budgétaires et organisationnelles.

2.7.2 Vision

La vision d'OpSee est de devenir la référence européenne du MES open-core destiné aux PME industrielles. À terme, chaque PME manufacturière de la zone cible doit pouvoir s'équiper d'un MES aligné sur les standards Industrie 4.0 (ISA-95, ISA-88, OPC-UA), pour un coût prévisible par équipement et par mois, tout en conservant la maîtrise de ses données et de son infrastructure.

Cette vision repose sur l'idée qu'un MES ne doit plus être réservé aux grandes entreprises disposant de budgets importants et d'équipes d'intégration spécialisées. OpSee ambitionne de démocratiser l'accès aux outils de pilotage industriel en combinant modularité, interopérabilité et transparence. La plateforme pourra progressivement s'élargir à

des modules avancés tels que la maintenance prédictive, l'analyse des coûts, la traçabilité environnementale ou encore l'assistance par intelligence artificielle. Cette évolution sera soutenue par une communauté de contributeurs et par un réseau d'intégrateurs partenaires capables d'adapter la solution aux réalités locales des entreprises.

2.7.3 Culture d'entreprise

La culture d'OpSee repose sur trois principes pratiques. Le premier est l'ouverture : le noyau libre, la documentation publique et les choix techniques traçables doivent permettre aux clients, intégrateurs et contributeurs de comprendre, auditer et adapter la solution. Cette ouverture ne relève pas seulement d'un positionnement technique ; elle constitue aussi un facteur de confiance dans un secteur où les industriels cherchent à limiter le verrouillage fournisseur.

Le deuxième principe est le pragmatisme. OpSee vise d'abord à livrer des fonctionnalités utiles à l'atelier, plutôt qu'à multiplier les modules théoriques ou les promesses technologiques. La priorité est donnée aux besoins directement observés sur le terrain : suivi de production, calcul d'OEE, traçabilité, visualisation temps réel et intégration avec les outils existants.

Le troisième principe est l'apprentissage par le terrain. Les retours des opérateurs, responsables production, intégrateurs et premiers clients orientent les priorités produit. Cette logique permet de maintenir l'alignement entre la roadmap technique et les contraintes concrètes des PME industrielles. Le cadre commercial appliqué aux modules avancés sécurise la captation de valeur sans contredire l'engagement open-core, et préserve l'indépendance technologique que les PME viennent chercher.

2.8 Business Model Canvas

Le Business Model Canvas (Osterwalder & Pigneur, 2010) synthétise sur un seul schéma les neuf composantes du modèle économique d'OpSee : segments de clientèle,

proposition de valeur, canaux, relations clients, sources de revenus, ressources clés, activités clés, partenaires clés et structure de coûts. La figure 2.10 restitue cette synthèse, et les paragraphes qui suivent développent bloc par bloc les choix retenus.

2.8.1 Segments de clientèle

Le cœur de cible regroupe des PME industrielles européennes de moins de 250 employés, dans l'agroalimentaire, la métallurgie, la plasturgie, la chimie et la sous-traitance. Ces entreprises partagent les mêmes difficultés : peu de visibilité sur la production, exploitation limitée des données de terrain, exigences de traçabilité en hausse et équipe IT interne réduite ou absente. C'est ce dernier point qui explique pourquoi les MES traditionnels passent mal dans ce segment : trop coûteux, trop rigides, trop longs à déployer.

Un sous-segment complémentaire couvre les PME du secteur de l'énergie et des utilities. Taille comparable, mais contraintes spécifiques liées à la régulation, à la gestion énergétique et au monitoring des infrastructures. Le même produit y répond avec quelques adaptations.

Un troisième acteur joue un rôle particulier dans le modèle : l'intégrateur industriel. Il est à la fois client (acquisition de licences) et partenaire (implémentation et distribution chez ses propres clients). Son ancrage terrain est ce qui permet à OpSee d'atteindre le marché PME sans construire une force commerciale en propre.

2.8.2 Proposition de valeur

La proposition de valeur répond à un écart précis : les solutions MES disponibles sont calibrées pour des organisations qui ne ressemblent pas aux PME industrielles. OpSee comble cet écart par une architecture modulaire (les fonctionnalités s'adoptent au fur et à mesure) et par une logique « open by design » qui garantit l'interopérabilité avec les systèmes existants et écarte le verrouillage fournisseur, principal point de friction face aux solutions propriétaires.

Côté fonctionnel, la plateforme couvre toute la chaîne, de la collecte des données

Partenaires clés

- Intégrateurs industriels (Bronze / Silver / Gold)
- AgiNtech (cofondateur, expertise sectorielle)
- Fournisseurs technologiques (cloud, hardware edge)
- Communauté open-source contributrice
- Organisations industrielles partenaires

Activités clés

- Développement noyau AGPLv3 + modules premium
- Maintenance, mises à jour, support partenaires
- R&D et veille technologique
- Structuration du réseau d'intégrateurs

Ressources clés

- Plateforme logicielle (code, modules, OPEDGE)
- Équipe technique et business
- Marque OpSee et crédibilité sectorielle
- Réseau d'intégrateurs certifiés

Proposition de valeur

- MES open-core modulaire pour PME industrielles
- Coût d'entrée maîtrisé, pas de verrouillage fournisseur
- Plug-and-play, déployable ligne par ligne
- Interopérabilité ISA-95 / ISA-88 / OPC-UA
- Déploiement local (*on-premise*) sur OPEDGE
- Facturation par équipement connecté
- AI Assistant en surcouche

Relations clients

- Modèle freemium (Free → A → B)
- Support de premier niveau par les intégrateurs
- Communauté open-source (issues, contributions)
- Feedback continu utilisateurs et partenaires

Canaux

- Réseau d'intégrateurs (canal principal)
- Site web et démo du tier Free
- Salons et événements industriels
- Bouche-à-oreille communauté open-source

Segments de clientèle

- PME industrielles européennes (< 250 employés)
- Secteurs cibles : agroalimentaire, métallurgie, plasturgie, chimie, sous-traitance
- Sous-segment énergie et utilities (régulation spécifique)
- Intégrateurs industriels (clients et partenaires)

Structure de coûts

- Coûts fixes dominants : salaires (3 ETP en 2026 puis 6 à 10 ETP), frais de fonctionnement, marketing, frais juridiques
- Coûts variables ($\sim$ 12 % du CA) : commission intégrateurs (10 %), hébergement cloud, plateforme matérielle, frais de transaction
- Coût marginal par client supplémentaire faible → levier opérationnel à l'échelle

Sources de revenus

- Abonnements mensuels par équipement (Tarif A 59 €/mois, Tarif B 95 €/mois)
- Tier Free non monétisé (entrée du funnel d'acquisition)
- Revenus secondaires : formation des intégrateurs, services complémentaires, options d'hébergement cloud

FIGURE 2.10 – Business Model Canvas d'OpSee.

équipement à leur restitution sur tableaux de bord. Le monitoring temps réel et les outils d'analyse rendent l'amélioration continue possible sans projet IT lourd. Le caractère plug-and-play réduit la friction d'intégration, ce qui compte d'autant plus pour des PME sans équipe IT dédiée. Le pricing est transparent et calibré pour leurs contraintes budgétaires. L'IA et les modèles de langage viennent en surcouche pour enrichir l'analyse, sans modifier la logique du produit.

2.8.3 Canaux et relations clients

Le déploiement repose sur l'écosystème d'intégrateurs. Ils distribuent la solution, l'installent, l'adaptent au contexte du client et assurent le support. Ce choix limite les coûts internes d'OpSee et appuie sa croissance sur le réseau partenaire plutôt que sur l'embauche directe. L'intégrateur joue aussi un rôle de tiers de confiance auprès du client industriel, ce qui accélère la décision d'achat.

L'écosystème est segmenté par niveaux (par exemple Bronze, Silver, Gold) pour différencier les partenaires selon leur expertise et leur engagement, et inciter à la montée en compétence. À cela s'ajoutent les fournisseurs technologiques, les organisations industrielles partenaires et les investisseurs. La relation directe avec le client final passe ensuite par le modèle freemium : le tier Free permet une prise en main sans engagement, suivie d'une montée en gamme vers les Tarifs A puis B au rythme du déploiement chez le client.

2.8.4 Activités clés et ressources

Le développement logiciel reste l'activité centrale, avec une maintenance continue et une gestion des mises à jour particulièrement importante pour les installations locales qui ne reçoivent pas les patchs automatiquement. La R&D et la veille technologique préservent l'avantage concurrentiel. Le développement commercial et la structuration du réseau partenaires sont les autres axes opérationnels, alimentés par le retour terrain des utilisateurs.

Les ressources stratégiques sont la plateforme logicielle, l'équipe mixte technique et business, la marque, la crédibilité sectorielle et le réseau d'intégrateurs.

2.8.5 Sources de revenus et structure de coûts

Les revenus sont récurrents mensuels, facturés par équipement connecté ou par fonctionnalité activée, ce qui aligne le coût payé sur la valeur effectivement utilisée. Des revenus secondaires complètent le modèle : formation des partenaires, services complémentaires, options d'hébergement cloud. Les hypothèses tarifaires détaillées (Tarifs A et B, taux de conversion, churn par tier) sont développées au chapitre 7.

Les charges fixes (salaires, développement, infrastructure) dominent la structure de coûts, avec une part variable contenue autour de 12 % du CA. Le coût marginal par client supplémentaire reste faible et produit un effet de levier opérationnel une fois la base installée passée à l'échelle. Le détail chiffré année par année est repris au chapitre 7.

Le modèle repose donc sur une proposition de valeur calibrée pour la PME industrielle, une distribution portée par les intégrateurs et une économie en revenus récurrents par équipement.

Chapitre 3

Analyse technique

Résumé exécutif. Le chapitre couvre l'état de l'art MES (formalisme MESA-11, standards ISA-95 et ISA-88, protocoles OPC UA et MQTT, calcul d'OEE selon ISO 22400), pose une définition formelle de l'*équipement facturable* fondée sur trois critères cumulatifs (inscription au registre d'*assets*, niveau ISA-88/95 facturable, tag actif), et détaille un cahier des charges en 16 exigences fonctionnelles et 9 non fonctionnelles. L'architecture conteneurisée rassemble une dizaine de services Docker : NGINX, FastAPI, TimescaleDB, Keycloak avec OAuth2-Proxy en passerelle OIDC, Mosquitto, Node-RED, un *sidecar* d'ingestion Python, React/Vite côté frontend. Le code tient dans un monorepo GitHub d'environ 295 000 lignes, géré en sprints d'une semaine avec un recours aux agents IA (Claude Code, GitHub Copilot) pour la production de code. Une analyse critique de performance compare quatre configurations sur un banc de charge dédié : la configuration retenue (*fullstack_ opt*, avec collecteur isolé en *sidecar* et cache HTTP) tient 1 945 valeurs résolues par seconde sous charge HTTP réelle, soit environ 195 équipements à 1 Hz par nœud OpEdge (175 sous TLS). Une dernière section traite l'*AI Assistant* (cinq agents experts, 25 outils, contrôle d'accès *RBAC* propagé jusqu'à chaque appel), seule fonctionnalité qui sort aujourd'hui du réseau local du client en appelant l'API

Anthropic en dehors de l'OpEdge ; les pistes d'évolution sont un LLM exécuté localement sur OpEdge et l'adoption du Model Context Protocol comme standard ouvert d'intégration.

3.1 État de l'art des systèmes MES

3.1.1 Définition et rôles d'un MES

OpSee est une solution MES *(Manufacturing Execution System)* destinée aux entreprises manufacturières.

Selon "Definition of Manufacturing Execution System - Gartner Information Technology Glossary" (2025), un MES permet de « gérer, surveiller et synchroniser l'exécution en temps réel des processus physiques impliqués dans la transformation de matières premières en produits intermédiaires et/ou finis. Ces systèmes coordonnent l'exécution des ordres de fabrication avec la planification de la production et les systèmes d'entreprise. Les applications MES fournissent également un retour d'information sur les performances des processus et assurent, lorsque nécessaire, la traçabilité au niveau des composants et des matériaux, ainsi que la gestion de la généalogie et l'intégration avec l'historique des processus. » Mantravadi et Møller (2019) confirment cette définition et situent le MES entre l'ERP et le niveau de contrôle.

On retrouve dans cette définition deux finalités :

— **Coordination de la production :** planification et orchestration des chaînes de production et des processus de fabrication.

— **Supervision opérationnelle :** surveillance en temps réel des lignes de production, analyse des performances et traçabilité complète des processus.

3.1.2 Le formalisme MESA-11

En 1996, l'association MESA International publie un premier formalisme décrivant les fonctions d'un MES ("History of the MESA Models", 2025). Ces 11 fonctions, reprises par Kletti (2007) et illustrées en figure 3.1, restent la référence du domaine bien que le périmètre des MES ait évolué depuis :

1. **Gestion et allocation des ressources** (*Resource Allocation and Status*)

   Où en sont les machines, les outillages, le personnel ? Cette fonction suit leur état en temps réel pour allouer chaque ressource au bon moment.

2. **Ordonnancement détaillé** (*Operations/Detail Scheduling*)

   Planification détaillée de l'ordre des opérations en tenant compte des priorités, des capacités, des ressources et des contraintes technologiques.

3. **Pilotage des flux de production** (*Dispatching Production Units*)

   Répartition des ordres de fabrication entre les ressources disponibles, avec ajustements en temps réel.

4. **Gestion documentaire** (*Document Control*)

   Centralisation de la documentation technique et opérationnelle : instructions de travail, plans, gammes opératoires, spécifications et dossiers de lot. Le MES gère les versions et les rend accessibles aux opérateurs.

5. **Acquisition et traitement des données** (*Data Collection and Acquisition*)

   Collecte automatique des données de production en temps réel : paramètres des procédés, consommations de matières, états des machines, quantités produites. Ces données servent de base au pilotage et à l'amélioration continue.

6. **Gestion de la main-d'œuvre** (*Labor Management*)

   Suivi des compétences, habilitations et disponibilités du personnel pour affecter les bonnes personnes aux bons postes.

7. **Gestion de la qualité** (*Quality Management*)

Enregistrement des contrôles, des écarts et des non-conformités. L'objectif est d'assurer la traçabilité des défauts et d'alimenter les démarches d'amélioration continue.

8. **Gestion des processus de fabrication** (*Process Management*)

   Supervision du flux de production de bout en bout, de la validation des ordres jusqu'au produit fini. C'est cette fonction qui rend visibles les goulots d'étranglement.

9. **Gestion de la maintenance** (*Maintenance Management*)

   Le MES exploite les données de production pour anticiper les pannes et planifier la maintenance préventive, dans le but de réduire les arrêts non planifiés.

10. **Traçabilité et généalogie produit** (*Product Tracking and Genealogy*)

    Pour chaque produit, le MES reconstitue l'historique complet : matières premières, paramètres process, opérateurs, résultats de contrôles. Cette traçabilité répond aux exigences réglementaires et facilite l'analyse de causes racines en cas de défaut.

11. **Analyse de performance** (*Performance Analysis*)

    Comparaison des résultats opérationnels avec les objectifs fixés : où sont les écarts, pourquoi, et que faire pour y remédier.

Ces onze fonctions, décrites en détail par Kletti (2007), couvrent à la fois la coordination de la production et sa supervision. Ce formalisme date toutefois de 1996 ; depuis, MESA International l'a fait évoluer pour intégrer les concepts de l'industrie 4.0 et de la fabrication intelligente, présentés dans la section suivante.

3.1.3 Smart Manufacturing et Industrie 4.0

À partir de ce premier modèle, MESA International a publié plusieurs évolutions ("History of the MESA Models", 2025). Le modèle en vigueur, sorti en 2022, est celui de la « fabrication intelligente » *(Smart Manufacturing)*.

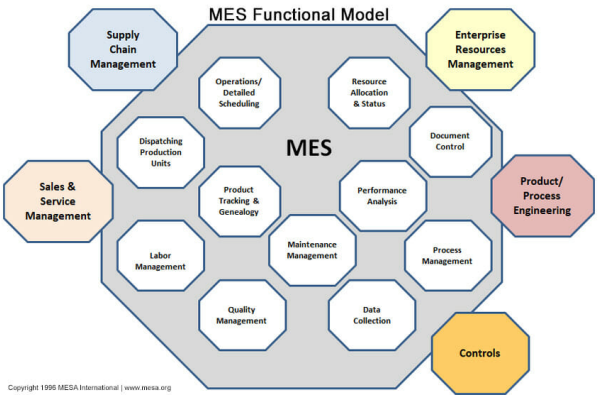


FIGURE 3.1 – Structure du formalisme MESA-11 (“History of the MESA Models”, 2025)

La fabrication intelligente s’inscrit dans le cadre de l’industrie 4.0. Ce cadre découpe l’histoire industrielle en révolutions successives : la première repose sur la mécanisation à vapeur, la quatrième désigne la transformation numérique actuelle, comme illustré en figure 3.2. Selon Lasi et al. (2014), cette quatrième révolution naît de la rencontre de deux forces : une pression économique à l’individualisation, à la flexibilité et à la décentralisation (*application-pull*), et des avancées techniques en automatisation et en numérisation (*technology-push*). L’enjeu est de répondre à une demande croissante de produits individualisés, où chaque commande peut différer de la précédente : la taille de lot tend vers l’unité (*batch size of one*), sans renoncer aux économies d’échelle (Lasi et al., 2014). Contrairement aux révolutions précédentes, observées a posteriori, l’industrie 4.0 a été anticipée et planifiée avant de se déployer (Hermann et al., 2016).

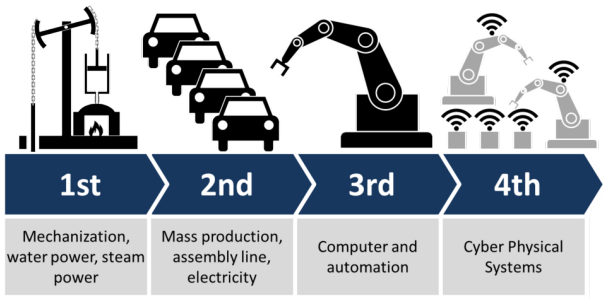


FIGURE 3.2 – Chronologie des révolutions industrielles (“Industrie 4.0”, 2025)

Le premier changement concret par rapport aux générations précédentes tient à la

connectivité des machines. Lasi et al. (2014) placent l'IoT *(Internet of Things)* au cœur de ce basculement ; en usine, il prend la forme de l'IIoT *(Industrial Internet of Things)*, soit des automates programmables *(PLC, Programmable Logic Controller)*, capteurs et équipements capables de communiquer en réseau (Lampropoulos et al., 2019). Chaque machine devient un nœud d'un système plus large, ce que Hermann et al. (2016) retiennent comme premier principe de conception de l'industrie 4.0 : personnes, équipements et capteurs, reliés via l'Internet des Objets, collaborent en continu. Cette connectivité rend possible l'autonomie des processus : un MES peut récupérer les données de chaque équipement et en ajuster les paramètres sans intervention humaine (Ding et al., 2019).

La visibilité est l'autre versant du même problème. Avoir une vue d'ensemble sur les ressources de production permet de construire ce que Kletti (2007) appellent un « cockpit de la production » ; c'est précisément la transparence de l'information que Hermann et al. (2016) retiennent comme second principe de l'industrie 4.0. Elle repose sur les Cyber-Physical Systems *(CPS)*, dont les calculateurs embarqués maintiennent une boucle de rétroaction entre monde physique et représentation numérique (Lee et al., 2015 ; Tao et al., 2019). C'est ce couplage qui fonde le concept d'*usine virtuelle* (Tao et al., 2019).

3.1.3.1 Fabrication intelligente : définition, technologies et objectifs

La fabrication intelligente est moins un concept distinct de l'industrie 4.0 qu'une façon de nommer sa mise en œuvre dans les ateliers. Mantravadi et Møller (2019) le confirment à travers une revue de littérature et trois études de cas : l'objectif est d'améliorer la compétitivité par des technologies de l'information et de la communication *(ICT, Information and Communication Technologies)* permettant « une prise de décision précise et efficace en temps réel ». Zheng et al. (2018) structurent cet objectif en un cadre couvrant la conception, la production, la gestion et la prestation de services.

Les briques technologiques qui rendent cela possible sont l'IIoT pour la collecte de données de terrain, les CPS pour l'intégration physique-numérique, et les jumeaux numériques *(Digital Twins)* pour la simulation (Mantravadi & Møller, 2019 ; Zheng et al.,

2018). Tao et al. (2019) distinguent les deux derniers : les CPS contrôlent le processus physique en boucle fermée ; les jumeaux numériques en tiennent une réplique à jour, ce qui permet de simuler avant d'agir. Leur combinaison forme le DT-CPPS *(Digital Twin-based Cyber-Physical Production System)* décrit par Ding et al. (2019), socle d'un atelier autonome. Leng et al. (2021) notent que les jumeaux numériques permettent aussi de détecter les erreurs de conception par simulation, réduisant ainsi les coûts de mise en service physique.

3.1.3.2 Le MES comme jumeau numérique de l'usine

Le MES se retrouve naturellement au centre de cet écosystème. Mantravadi et Møller (2019) le désignent comme un « jumeau numérique de l'usine » : connecté en temps réel à tous les équipements, il en fournit une image numérique complète et joue le rôle de « cockpit de la fabrication » (Kletti, 2007 ; Mantravadi & Møller, 2019). Leurs trois études de cas montrent que les entreprises qui investissent dans le MES améliorent leur visibilité et leur traçabilité, et le placent au cœur de leur démarche vers l'industrie 4.0. Hermann et al. (2016) avaient d'ailleurs identifié les systèmes MES/ERP innovants comme l'un des champs d'application prioritaires de l'industrie 4.0 dans le domaine des systèmes d'information.

3.1.3.3 Enjeux pour les PME industrielles

Les technologies de l'Industrie 4.0 ont pour la plupart été développées par et pour les grands groupes. Mittal et al. (2018a) signalent ainsi que les modèles de maturité disponibles débutent à un « niveau 1 » qui présuppose un degré de numérisation que nombre de PME n'ont pas atteint, et proposent un « niveau 0 » adapté à leur point de départ réel. C'est dans ce contexte qu'OpSee a été conçu, en visant des PME industrielles dont la base de digitalisation reste partielle ou hétérogène.

3.1.4 Standards industriels

L'échange de données entre systèmes d'information d'une usine repose sur des normes partagées. ISA-95 et ISA-88 structurent l'intégration verticale, de l'ERP jusqu'au contrôle de procédé. Côté transport, OPC UA et MQTT se partagent le terrain.

3.1.4.1 ISA-95 : intégration entreprise-production

La norme ISA-95, publiée à l'international sous la référence IEC 62264, vise à réduire les risques, les coûts et les erreurs liés à l'intégration entre systèmes d'entreprise et systèmes de production (Virta et al., 2010). Elle découpe l'usine en niveaux fonctionnels, souvent représentés sous forme de pyramide d'automatisation (figure 3.3) (Prades et al., 2013) :

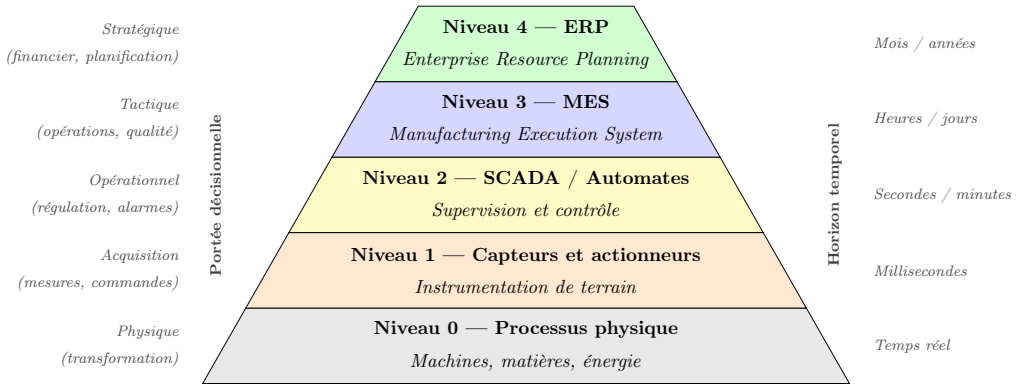


FIGURE 3.3 – Pyramide de l'automatisation ISA-95 (Lachance, 2021).

— **Niveau 4** : planification et logistique, domaine de l'ERP *(Enterprise Resource Planning)*, qui gère les aspects financiers, commerciaux et la planification à long terme.

— **Niveau 3** : gestion des opérations de fabrication, domaine du MES, qui orchestre la production en temps réel.

— **Niveau 2** : supervision et contrôle, domaine des systèmes SCADA *(Supervisory Control and Data Acquisition)* et des automates programmables.

— **Niveaux 1 et 0** : capteurs, actionneurs et processus physique.

La norme se concentre sur l'interface entre les niveaux 3 et 4. Le standard se compose de plusieurs parties : la partie 1 (IEC 62264-1) définit la terminologie et les modèles de données, la partie 3 (IEC 62264-3) décrit les activités de gestion des opérations de fabrication au niveau 3 (Virta et al., 2010). L'ERP transmet au MES les définitions produit, les règles de production et l'ordonnancement. Le MES remonte en retour les capacités de production et les performances constatées (Prades et al., 2013). Ce découpage fixe un vocabulaire commun et clarifie la responsabilité de chaque système (Virta et al., 2010).

Le World Batch Forum a traduit ces modèles en schémas XML sous le nom de B2MML *(Business to Manufacturing Markup Language)* (Virta et al., 2010). C'est ce format que les ERP et les MES utilisent pour s'échanger des données de production.

Le MES se situe donc entre le SCADA (supervision des équipements) et l'ERP (planification des ressources). Concrètement, il reçoit les ordres de fabrication de l'ERP et les traduit en instructions pour le terrain. Les données de production font le chemin inverse, du MES vers les systèmes de gestion (Prades et al., 2013).

3.1.4.2 ISA-88 : gestion des processus batch

ISA-88, publiée sous la référence IEC 61512, complète ISA-95 pour les processus de fabrication par lots *(batch)* (Virta et al., 2010). Ses deux premières parties définissent les hiérarchies d'équipements et de recettes, les structures de données des recettes et le modèle d'activité de contrôle *(control activity model)* (Virta et al., 2010).

La norme tourne autour du concept de « recette » : une séquence d'opérations, de paramètres et de ressources nécessaires à la fabrication d'un lot. Plusieurs niveaux de recettes coexistent, de la recette générale *(general recipe)* à la recette de contrôle *(control recipe)*, propre à un lot et à un équipement donné. Le modèle d'activité de contrôle répartit la gestion d'un lot entre le MES (niveau 3) et le système de contrôle de procédé *(PCS, Process Control System)*, situé au niveau 2 de la pyramide ISA-95 (Virta et al., 2010). Côté MES, trois activités interviennent :

— **Gestion des définitions produit** *(product definition management)* : créer, approuver et versionner les recettes maîtres.
— **Gestion de l'exécution** *(product execution management)* : planifier les lots, créer les recettes de contrôle et les transmettre au PCS.
— **Collecte des données de production** *(production data collection)* : archiver les données d'exécution sous forme de rapports de lot *(batch records)*.

Le PCS reçoit ces recettes de contrôle et gère leur exécution locale : ordonnancement sur les équipements, pilotage du procédé et remontée des événements de production vers le MES (Virta et al., 2010).

Parmi les bénéfices documentés : réduction du temps de cycle des lots, modification plus rapide des recettes, augmentation du taux de production et meilleure disponibilité des données d'analyse (Virta et al., 2010). À noter que la norme, bien que conçue pour le batch, s'applique aussi aux processus discrets, continus et hybrides (Virta et al., 2010).

Les schémas XML d'ISA-88 (BatchML, *Batch Markup Language*) ont été rapprochés de ceux d'ISA-95 (B2MML) : les dernières versions fusionnent les deux en un groupe unifié ISA-95/88 (Virta et al., 2010). Un développeur MES peut donc s'appuyer sur un seul référentiel de données, de l'ERP jusqu'au contrôle de procédé.

3.1.4.3 OPC-UA et MQTT : protocoles de communication industrielle

ISA-95 et ISA-88 normalisent la structure des données échangées, mais pas leur transport. Deux protocoles se partagent ce rôle.

OPC UA

OPC UA *(Open Platform Communications Unified Architecture)* a été développé par l'OPC Foundation pour succéder aux spécifications OPC classiques, qui dépendaient de la technologie COM/DCOM de Microsoft et ne fonctionnaient que sous Windows (Leitner & Mahnke, 2006). L'interface OPC, sous ses différentes formes, assure la connectivité des infrastructures d'automatisation depuis plus de vingt ans (González et al., 2019).

La nouvelle architecture est orientée services *(SOA, Service-Oriented Architecture)* et indépendante de la plateforme : un serveur ou un client OPC UA tourne aussi bien sur un PC que sur un système embarqué (Leitner & Mahnke, 2006).

Les anciennes spécifications OPC utilisaient trois interfaces distinctes pour accéder aux données temps réel (OPC DA), aux historiques (OPC HDA) et aux alarmes (OPC A&E), sans lien entre elles. OPC UA les rassemble dans un espace d'adressage unique. Chaque nœud y est typé : un capteur de température n'est plus une simple valeur flottante, il porte un type qui l'identifie comme tel et le rattache à son équipement. Ce système de types est extensible, ce qui permet de représenter directement des structures conformes à ISA-95 ou ISA-88 dans le serveur (Leitner & Mahnke, 2006 ; Virta et al., 2010). La sécurité, enfin, fait partie de la spécification de base : authentification, chiffrement et intégrité des messages sont prévus dès la conception (Leitner & Mahnke, 2006).

Drahoš et al. (2018) rappellent qu'OPC UA a été retenu comme technologie de communication de référence pour l'industrie 4.0 en Allemagne, après un audit de sécurité favorable du BSI *(Bundesamt für Sicherheit in der Informationstechnik)*. Depuis, le standard s'est enrichi d'un modèle publication/souscription *(PubSub)* : en réseau local, les données circulent en multicast via UDP ; sur des réseaux étendus, elles transitent par des courtiers MQTT ou AMQP (Drahoš et al., 2018). Associé au TSN *(Time-Sensitive Networking)*, OPC UA permet en outre des échanges déterministes en temps réel entre automates de fabricants différents (Drahoš et al., 2018).

MQTT

MQTT *(Message Queuing Telemetry Transport)* est un protocole de messagerie léger, fondé sur le modèle publication/souscription. Prévu à l'origine pour les liaisons à faible bande passante, il s'est imposé comme l'un des protocoles de référence en IoT et IIoT (Silva et al., 2021).

Silva et al. (2021) ont mesuré les performances de MQTT, CoAP et OPC UA dans plusieurs scénarios IoT. OPC UA affiche des temps de complétion plus élevés mais plus

stables ; MQTT est plus rapide, au prix d'une plus grande sensibilité à la fréquence et à la taille des messages. L'explication est structurelle : OPC UA embarque un modèle de données riche et des couches de sécurité qui pèsent sur chaque échange, là où MQTT se contente de transporter une charge utile brute via un courtier *(broker)*.

Complémentarité des deux protocoles

Le tableau 3.1 résume leurs différences.

TABLE 3.1 – Comparaison OPC UA et MQTT (Leitner & Mahnke, 2006 ; Silva et al., 2021)

	OPC UA	**MQTT**
Architecture	Client/serveur + PubSub	Publication/souscription
Modèle de données	Riche (méta-modèle typé)	Aucun (charge utile brute)
Sécurité	Intégrée (authentification, chiffrement)	Déléguée (TLS)
Latence	Plus élevée	Plus faible
Variabilité	Faible	Sensible à la charge
Usage typique	Interopérabilité MES/ERP/SCADA	Collecte terrain (capteurs, IIoT)

OPC UA fournit l'interopérabilité sémantique entre MES, ERP et SCADA grâce à ses modèles d'information typés ; MQTT se charge de la collecte sur le terrain (Silva et al., 2021). L'extension PubSub d'OPC UA formalise d'ailleurs cette répartition : elle permet de véhiculer des messages OPC UA à travers un courtier MQTT (Drahoš et al., 2018). Ces standards et protocoles posent le socle technique sur lequel repose le cahier des charges d'OpSee (section 3.3).

Ces protocoles permettent aussi de remonter les données nécessaires au calcul des indicateurs de performance, à commencer par l'OEE.

3.1.5 L'indicateur OEE : disponibilité, performance, qualité

Dans les années 1980, Nakajima (1988) a introduit le concept de TPM *(Total Productive Maintenance)* et proposé un indicateur quantitatif pour mesurer la productivité des équipements : l'OEE *(Overall Equipment Effectiveness)*. L'OEE condense en un seul chiffre trois dimensions de la performance d'une machine (Muchiri & Pintelon, 2008) :

— **Disponibilité** *(availability)* : la machine est-elle en marche ou à l'arrêt ?

— **Performance** : à quelle vitesse tourne-t-elle par rapport à sa cadence théorique ?

— **Qualité** : combien de pièces produites sont conformes ?

L'OEE se calcule comme le produit de ces trois taux (Muchiri & Pintelon, 2008) :

$$\text{OEE} = \text{Disponibilité} \times \text{Performance} \times \text{Qualité}$$

avec :

$$\text{Disponibilité} = \frac{\text{Temps de fonctionnement}}{\text{Temps de production prévu}}$$

$$\text{Performance} = \frac{\text{Temps de cycle théorique} \times \text{Production réelle}}{\text{Temps de fonctionnement}}$$

$$\text{Qualité} = \frac{\text{Production conforme}}{\text{Production totale}}$$

Un OEE de 100 % signifierait qu'un équipement produit en continu, à pleine cadence, sans défaut. En pratique, aucun équipement n'y parvient : chaque écart est classé parmi les six grandes pertes *(six big losses)* identifiées par Nakajima (1988) :

1. **Pannes et arrêts machine** *(breakdown losses)*
2. **Réglages et changements de série** *(setup and adjustment losses)*
3. **Micro-arrêts et marche à vide** *(idling and minor stoppages)*
4. **Ralentissements** *(reduced speed losses)*
5. **Défauts et reprises** *(quality defects and rework)*

6. **Pertes au démarrage** *(reduced yield during start-up)*

Les pertes 1 et 2 affectent la disponibilité, les pertes 3 et 4 la performance, les pertes 5 et 6 la qualité. L'OEE relie ainsi en un seul indicateur des préoccupations qui relèvent habituellement de services différents : maintenance, production et qualité (Muchiri & Pintelon, 2008).

L'OEE classique a ses limites : il ne mesure que la performance d'un équipement pris isolément et ne tient pas compte des horaires de production planifiés (Muchiri & Pintelon, 2008). Plusieurs variantes ont été proposées pour y remédier. Le TEEP *(Total Effective Equipment Performance)* intègre les arrêts planifiés dans le temps total disponible, ce qui permet de mesurer l'utilisation réelle d'un équipement par rapport à l'ensemble du temps calendaire. L'OTE *(Overall Throughput Effectiveness)* étend le calcul à une ligne de production entière plutôt qu'à une machine isolée (Ng Corrales et al., 2020). La revue systématique de Ng Corrales et al. (2020), qui couvre 186 articles publiés entre 1996 et 2020, confirme que ces variantes sont de plus en plus adoptées en lean manufacturing et en optimisation de la production. OpSee s'inscrit dans cette évolution en ne se limitant pas à l'OEE classique.

L'OEE figure parmi les 34 indicateurs définis par la norme ISO 22400 *(Automation Systems and Integration — Key Performance Indicators for Manufacturing Operations Management)*. Zhu et al. (2018) analysent cette norme et constatent que certains de ses indicateurs clés de performance *(KPI, Key Performance Indicators)*, dont l'OEE, sont mieux adaptés à l'industrie discrète qu'aux processus continus, ce qui a conduit à des propositions de modification pour combler cet écart.

Le calcul de l'OEE repose sur des données de production collectées en temps réel : temps d'arrêt, cadences, taux de rebut. Le MES est le système qui collecte ces données. A. Bianchini et al. (2024) l'illustrent à travers une étude de cas dans une PME italienne, où le passage d'une collecte manuelle à un MES a rendu l'OEE exploitable au quotidien. OpSee suit la même logique : les données remontées via les protocoles décrits en section 3.1.4 alimentent le calcul de l'OEE dans le cockpit de production (voir section 3.3).

3.2 Définition formelle de l'équipement

La facturation par équipement (A.5.1) impose une définition non ambiguë de ce qu'est un « équipement ». La littérature MES laisse cette notion ouverte : Vegetti et Henning (2014) soulignent qu'ISA-88 et ISA-95 emploient des termes différents pour désigner des concepts proches et que les frontières entre niveaux « ne sont bien définies ni dans ISA-88 ni dans ISA-95 ». Les concurrents confirment cette tension : Tulip facture par *interface*, Teeptrak par *machine*, sans interopérabilité de ces définitions.

OpSee retient donc une définition fondée sur trois critères cumulatifs. Un **équipement facturable** est un nœud de la hiérarchie ISA-88/95 du client qui satisfait simultanément :

1. il est déclaré dans le registre d'assets d'OpSee, à une position explicite dans la hiérarchie ;
2. il correspond, dans la sémantique ISA-88/95, à une *Unit*, un *Work Unit*, une *Production Unit*, un *Equipment Module*, une *Storage Unit* ou tout actif industriel autonome équivalent (frigo, silo, etc.) (García et al., 2018 ; Vegetti & Henning, 2014) ;
3. au moins un tag actif (OPC-UA ou MQTT) y est associé, alimenté par un automate, un capteur, une passerelle IIoT ou tout autre dispositif d'acquisition raccordé à la plateforme.

Un nœud purement logique (groupement sans tag propre) n'est donc pas facturable, mais il le devient dès qu'un tag y est rattaché et cesse de l'être lorsque tous ses tags disparaissent. Le comptage est auditable côté serveur : il correspond au nombre d'assets actifs dans le registre, valeur reprise par la chaîne de licensing (A.5.4).

L'ancrage normatif détaillé (hiérarchie ISA-88/95 à six niveaux et figure correspondante), les cas types et arbitrages (ligne d'embouteillage à PLC central, réacteur batch, machine isolée sans automate, actif de stockage instrumenté, capacité d'un OpEdge) ainsi que l'articulation complète avec la chaîne de licensing figurent en annexe A.3.6.

3.3 Cahier des charges d'OpSee

Cette section spécifie le périmètre fonctionnel et non fonctionnel d'OpSee. Le cahier des charges couvre la version cible du produit, et non le seul MVP livré à ce jour. Chaque exigence porte un statut (implémenté, partiel, en développement, feuille de route) repris dans le tableau 3.2 et situé sur l'axe temporel dans la feuille de route détaillée (annexe A.3.5, figure A.55). Les contrôles de sécurité, plus volumineux, figurent en annexe A.3.4.

Les acteurs visés sont les opérateurs de production, les chefs d'atelier, les responsables qualité et les administrateurs. Les exigences fonctionnelles (section 3.3.1) découlent des fonctions MESA-11 et des standards ISA-95/88. Les exigences non fonctionnelles (section 3.3.2) traduisent les contraintes propres aux PME industrielles : simplicité, modularité, coût maîtrisé et fonctionnement sans connexion internet (exigence qui concerne aussi les environnements industriels sensibles). La section 3.3.3 évalue l'alignement avec les standards.

3.3.1 Exigences fonctionnelles

Les exigences fonctionnelles ci-dessous sont identifiées par un code EF-XX et rédigées au présent simple à valeur prescriptive.

3.3.1.1 EF-01 Collecte et ingestion de données industrielles

Le système ingère les données provenant directement des capteurs et des automates via MQTT *(Message Queuing Telemetry Transport)* et OPC UA *(Open Platform Communications Unified Architecture)*, sans dépendance à un système SCADA intermédiaire. Le pipeline gère plusieurs courtiers ou serveurs simultanément, supporte le chiffrement TLS et l'authentification mutuelle (mTLS) lorsqu'une connexion quitte le réseau d'atelier, et accepte le format Sparkplug B (Colombo & Ferrari, 2025 ; Pintilie et al., 2025). Quatre modes de *parsing* sont configurables par règle de *topic* : standard (extraction d'une métrique unique), multi-metric (tableau Sparkplug B), extraction (moteur géné-

rique paramétré par JSONB) et skip (rejet délibéré). Les transformations configurables (compteur différentiel, détection de changement, *deadband*) sont appliquées en sortie de *parsing*. Tout ajout d'un nouveau type d'équipement, d'un format de *payload* ou d'une règle de transformation s'effectue sans redémarrage du collecteur. Les nouveaux *tags* sont découverts automatiquement et journalisés en attente d'association.

3.3.1.2 EF-02 Modélisation hiérarchique des équipements

Le système modélise l'atelier sous forme d'arborescence dont les niveaux par défaut suivent la hiérarchie ISA-88/95 décrite en 3.2. L'utilisateur peut créer ses propres types et classes d'équipements en complément des niveaux normatifs. Chaque équipement porte des capacités, des matériaux compatibles, des opérateurs habilités et un taux de production nominal par combinaison matériau-équipement. L'import et l'export au format Excel sont supportés pour faciliter la mise en service initiale.

3.3.1.3 EF-03 Gestion des procédés de fabrication

Le système couvre, sous un modèle procédural unifié dérivé d'ISA-88, les procédés batch, continus et discrets (assemblage). Une recette peut décrire une formule simple (composition, paramètres, séquence d'opérations) aussi bien qu'un plan d'assemblage comportant une nomenclature *(Bill of Materials)* hiérarchique, des sous-assemblages et des dépendances entre composants. Le modèle procédural est implémenté à quatre niveaux : phase, opération, procédure unitaire et procédure de fabrication. Chaque recette est versionnée et associée à un ou plusieurs équipements cibles.

3.3.1.4 EF-04 Gestion des matériaux, recettes et batches

Le système maintient un référentiel de matériaux structuré en types hiérarchiques modifiables (par défaut : matière première, intermédiaire, produit fini, emballage). Les recettes ISA-88 incluent les formules, les paramètres opérationnels et les règles de changement de série *(changeover rules)*. Le suivi des matières associe à chaque batch les lots de

matières premières consommés et les lots de produits finis générés, condition nécessaire à la traçabilité réglementaire (EF-08).

3.3.1.5 EF-05 Ordonnancement automatique par programmation par contraintes

Le système ordonnance automatiquement les ordres de production sur les équipements disponibles à l'aide d'un solveur par programmation par contraintes (CP-SAT). Da Col et Teppan (2022) montrent que les solveurs CP modernes traitent des instances industrielles atteignant un million d'opérations, ce qui couvre les besoins des PME visées. Le solveur prend en compte les calendriers de travail assignés aux équipements, les arrêts planifiés et imprévus (avec ré-ordonnancement automatique sur arrêt non planifié), les règles de changement de série, les capacités et classes d'équipements, ainsi que les contraintes de compétences et de disponibilité du personnel. Torba et al. (2024) formalisent ce dernier cas sous le nom de MSRCMPSP *(multi-skill resource-constrained multi-project scheduling problem)* et le résolvent sur des instances industrielles réelles de plusieurs milliers d'activités. La durée de chaque batch est estimée en cumulant le temps idéal de chaque phase. Le développement de cette exigence est planifié pour décembre 2026 (issue #239 du dépôt).

3.3.1.6 EF-06 Gestion du personnel, compétences et planification

Le système gère le référentiel des opérateurs (identifiant de badge, compétences certifiées, habilitations), les quarts de travail, les équipes et les calendriers de production avec récurrence configurable. Les calendriers sont assignables aux équipements, ce qui restreint le calcul de l'OEE aux périodes de travail effectives. Les opérateurs sont assignables à des équipements spécifiques avec des rôles définis. Les compétences et habilitations alimentent les contraintes de l'ordonnanceur EF-05.

3.3.1.7 EF-07 Suivi de la performance de production et indicateurs industriels

Le système calcule un ensemble d'indicateurs industriels alimentés par les *tags* ingérés (EF-01) et les événements de batch (EF-15). Le périmètre s'aligne sur la norme ISO 22400 *(Automation Systems and Integration — Key Performance Indicators for Manufacturing Operations Management)* qui définit 34 KPI pour le *manufacturing operations management* (Zhu et al., 2018). Les indicateurs retenus se regroupent en cinq familles :

- **Efficacité globale** : OEE *(Overall Equipment Effectiveness)* décomposé en disponibilité, performance et qualité ; variantes TEEP *(Total Effective Equipment Performance)* incluant les arrêts planifiés et OTE *(Overall Throughput Effectiveness)* étendu à une ligne complète (3.1.4).
- **Production** : volume produit (quantités bonnes, rebutées, retravaillées), cadence réelle vs nominale, débit *(throughput rate)*, temps de cycle moyen, taux d'utilisation de la capacité.
- **Fiabilité et maintenance** : MTBF *(Mean Time Between Failures)*, MTTR *(Mean Time To Repair)*, taux de panne, disponibilité opérationnelle.
- **Qualité** : taux de défauts, FPY *(First Pass Yield)*, DPMO *(Defects Per Million Opportunities)*, taux de conformité.
- **Pilotage des ordres** : respect du planning *(schedule adherence)*, pourcentage d'ordres terminés à temps, écart à la date cible, en-cours WIP *(Work In Progress)*.

Le cockpit (EF-11) expose chaque famille d'indicateurs avec les visualisations adaptées : cascade des pertes (*waterfall*) et Pareto des causes d'arrêt pour l'efficacité, courbes de tendance pour la production et la qualité, vues multi-équipements et multi-lignes, comparaison à la cible et à l'historique.

3.3.1.8 EF-08 Traçabilité de production et conformité réglementaire

Le système assure la traçabilité ascendante (matière première vers produit fini) et descendante (produit fini vers matière première) à la granularité du lot et du batch. Les

données conservées incluent les transitions marche/arrêt horodatées, les valeurs de capteurs, les états de batch, les justifications d'arrêt et les actions utilisateur. Pour chaque perte OEE (arrêt, écart de performance, défaut qualité), l'opérateur sélectionne une raison dans un arbre hiérarchique. Les codes automate peuvent déclencher une justification automatique. Le journal d'audit applicatif enregistre chaque création, modification ou suppression des données métier avec l'identité de l'utilisateur, l'horodatage, les valeurs avant/après et le contexte.

Pour l'**industrie agroalimentaire**, le système couvre les obligations du FSMA (Food Safety Modernization Act, FDA) et de la norme ISO 22005 sur la traçabilité, qui imposent d'enregistrer chaque unité produite avec son origine et son acheminement pour permettre un rappel rapide en cas d'incident (Bosona & Gebresenbet, 2023 ; Lai et al., 2025). Le détail technique des contrôles (sommes de contrôle, chaîne d'identité) figure dans le tableau 3.2 et en annexe pour la couche sécurité (annexe A.3.4).

3.3.1.9 EF-09 Alertes automatiques et détection d'anomalies

Le système déclenche des alertes selon deux mécanismes complémentaires. Le premier repose sur des règles configurables (seuils, durées, motifs combinés) sur les *tags* ingérés et les indicateurs calculés. Le second repose sur des modèles d'apprentissage automatique non supervisés appliqués aux séries temporelles industrielles, plus précisément des autoencodeurs convolutifs et récurrents (LSTM), retenus par Darban et al. (2022) comme adaptés aux contextes industriels multivariés à faibles labels et validés sur une ligne de production réelle par Tziolas et al. (2022). En complément, le module supporte la maintenance prédictive par classification supervisée des motifs de pannes lorsque des données historiques labellisées sont disponibles (Hector & Panjanathan, 2024). Le module d'alertes est déployé comme un service indépendant et s'intègre au cockpit de visualisation (EF-11).

3.3.1.10 EF-10 Reporting normé et exports

Le système génère des rapports normés exportables au format PDF, à la demande ou selon une planification récurrente. Les rapports couvrent au minimum la performance OEE par équipement et par période, les batch records ISA-88, la traçabilité ascendante et descendante d'un lot, le journal d'audit filtré et les rapports de qualité.

3.3.1.11 EF-11 Cockpit de visualisation personnalisable

Le système expose un tableau de bord composable où chaque utilisateur dispose ses propres vues par glisser-déposer de widgets. Le système inclut des widgets pour l'audit, l'OEE, les matériaux, les données brutes et les alertes (EF-09). Un contexte temporel partagé synchronise les widgets d'un même tableau de bord. Les tableaux de bord sont sauvegardés et partageables entre utilisateurs.

3.3.1.12 EF-12 Assistant conversationnel

Le système intègre un agent conversationnel qui interroge les données de production en langage naturel dans le respect des permissions définies pour l'utilisateur connecté. L'agent dispose d'outils contextuels donnant accès aux données OEE, à l'inventaire des équipements et aux valeurs de capteurs. L'implémentation actuelle s'appuie sur une API externe (Claude, Anthropic) et exige une connexion internet sortante. Pour les déploiements hors ligne, le système permet la substitution par un modèle de langage exécuté localement (ENF-03).

3.3.1.13 EF-13 Système de *licensing* modulaire

Le système conditionne l'activation des modules avancés à une licence valide. L'architecture combine deux mécanismes. Premièrement, un **serveur de licences distant** valide à chaque connexion les modules autorisés pour le déploiement (validation *runtime*). Deuxièmement, une **signature locale cryptographiquement vérifiable** est stockée sur

l'OpEdge à la dernière connexion réussie ; elle permet au déploiement de continuer à fonctionner normalement (modules premium actifs) pendant une **période de grâce** lorsque la connexion serveur tombe. Passée cette période sans nouveau *heartbeat*, les modules premium se désactivent automatiquement et le déploiement bascule sur le **noyau AGPLv3 seul**. Ce mode restreint, dans lequel seules les fonctionnalités libres restent disponibles, est désigné par *mode dégradé*. La granularité d'activation est double : par module fonctionnel et par équipement (cf. 3.2). La vérification combine compilation conditionnelle côté code et validation côté serveur, pour bloquer le contournement statique comme le contournement dynamique.

3.3.1.14 EF-14 Localisation multilingue

Le système est multilingue à deux niveaux. Au niveau de l'interface, les textes statiques sont gérés par un système d'internationalisation (i18n). Au niveau des données métier (noms d'équipements, raisons d'arrêt, unités de mesure), chaque entité du référentiel est associée à un identifiant de traduction. Les traductions sont générables automatiquement via l'API DeepL à la création ou à la modification d'un élément. Dix langues sont supportées.

3.3.1.15 EF-15 Gestion et suivi d'exécution des ordres de production

Le système gère le cycle de vie complet des ordres de production : création d'un ordre à partir d'une recette (EF-03) et d'une quantité cible, association à un ou plusieurs batches, édition, priorisation manuelle et annulation. Chaque ordre traverse des états successifs (en attente, ordonnancé via EF-05, en cours, en pause, terminé, annulé) tracés dans le journal d'audit (EF-08).

Le suivi d'exécution des batches s'effectue en temps réel à partir des données ingérées (EF-01) et des saisies opérateur. Pour chaque batch en cours, le système affiche la phase ISA-88 active, l'opérateur affecté, la quantité produite intermédiaire, la consommation de matières (EF-04) et l'écart par rapport au temps idéal cumulé estimé par l'ordonnanceur

(EF-05). Les transitions entre phases déclenchent l'enregistrement automatique des points de mesure et alimentent le calcul d'OEE (EF-07) ainsi que la traçabilité ascendante et descendante (EF-08). La progression agrégée d'un ordre de production (pourcentage de batches terminés, écart à la date cible) est exposée dans le cockpit (EF-11).

3.3.1.16 EF-16 Reporting environnemental et durabilité

L'empreinte carbone des produits fabriqués est calculée à partir de données déjà captées ailleurs dans le système : consommations énergétiques par poste (EF-01), matières consommées et taux de rebut (EF-04, EF-07). Elle est restituée par lot, par produit et par période, selon les scopes 1, 2 et 3 du référentiel ESRS. Ces calculs alimentent deux sorties : les rapports de durabilité exigés par la directive CSRD et les flux structurés du Digital Product Passport (DPP). Le calendrier réglementaire et la justification stratégique de cette exigence sont discutés en 2.3.1.6.

Le tableau 3.2 résume les exigences retenues et leur état d'avancement. Une feuille de route visuelle (Gantt) figure en annexe A.3.5 (figure A.55) : elle situe chaque exigence (fonctionnelle et non fonctionnelle) sur l'axe temporel de mai 2025 à mi-2027.

3.3.2 Exigences non fonctionnelles

Les exigences non fonctionnelles ci-dessous découlent du public visé : des PME industrielles sans budget de grand groupe ni équipe d'administration informatique dédiée (Masood & Sonntag, 2020). Elles sont identifiées par un code ENF-XX.

3.3.2.1 ENF-01 Simplicité d'usage

L'interface est utilisable par des opérateurs de production sans formation longue. La navigation, les formulaires et les tableaux de bord restent compréhensibles pour des utilisateurs sans bagage informatique. L'application repose sur un *design system* commun à tous les modules.

TABLE 3.2 – Exigences fonctionnelles d'OpSee

ID	**Exigence**	**État**	**Remarque**
EF-01	Collecte et ingestion (MQTT, OPC UA, Sparkplug B)	Implémenté	4 modes de parsing, mTLS
EF-02	Modélisation hiérarchique des équipements	Implémenté	Hiérarchie ISA-88/95 (3.2), types modulables
EF-03	Gestion des procédés de fabrication	Partiel	Batch complet, assemblage en feuille de route
EF-04	Matériaux, recettes et batches	Implémenté	Référentiel + ISA-88 complet
EF-05	Ordonnancement par contraintes (CP-SAT)	Feuille de route	Planifié S1 2027 (issue #239)
EF-06	Personnel, compétences et planification	Implémenté	Quarts, équipes, calendriers
EF-07	Indicateurs industriels (ISO 22400)	Implémenté	OEE/TEEP/OTE, MTBF/MTTR, FPY, WIP, schedule adherence
EF-08	Traçabilité et conformité réglementaire	Partiel	Audit complet, module agroalimentaire en feuille de route
EF-09	Alertes automatiques et détection ML	Feuille de route	Règles seuils prévues d'abord, ML ensuite
EF-10	Reporting normé et exports PDF	Partiel	Exports OEE et audit, batch records prévus
EF-11	Cockpit personnalisable	Implémenté	39 widgets
EF-12	Assistant conversationnel	Implémenté	API externe, LLM local prévu
EF-13	*Licensing* modulaire	Feuille de route	Serveur distant + signature locale
EF-14	Localisation multilingue	Implémenté	10 langues, traduction auto DeepL
EF-15	Gestion et suivi d'exécution des ordres de production	Partiel	Cycle de vie ordres, suivi batch temps réel
EF-16	Reporting environnemental et durabilité (CSRD/DPP)	Feuille de route	Empreinte carbone scopes 1/2/3, alimentation DPP

3.3.2.2 ENF-02 Modularité et architecture open-core

Chaque fonctionnalité est activable ou désactivable indépendamment selon le périmètre licencié (EF-13). L'architecture conteneurisée, à raison d'un service par conteneur Docker, renforce cette séparation et permet d'ajouter ou de remplacer une fonctionnalité sans redéployer l'ensemble. Le noyau est distribué sous licence open source AGPLv3 (Besutti et al., 2019), complété par des modules avancés sous licence propriétaire payante.

3.3.2.3 ENF-03 Fonctionnement hors ligne

Le système fonctionne intégralement sans connexion internet sortante. Les données de production restent sur site, les calculs sont réalisés localement et l'interface est accessible depuis le réseau interne de l'usine. Cette exigence vise les ateliers sans connectivité fiable ainsi que les environnements industriels sensibles (défense, sites classés) qui interdisent toute exposition externe. Lorsque l'assistant EF-12 est utilisé hors ligne, un modèle de langage local prend le relais de l'API externe.

3.3.2.4 ENF-04 Déployabilité

Le déploiement tient en moins de trente minutes et tient sur un seul fichier Docker Compose, sans infrastructure annexe. Le client a deux points d'entrée selon qu'il dispose ou non d'un serveur en usine : soit la pile s'installe sur un serveur qu'il fournit, soit elle arrive déjà préinstallée sur une appliance OPEDGE qu'on branche au réseau de l'atelier. La façon d'installer dépend ensuite de la connectivité du site : avec internet, les images conteneur sont tirées depuis le registre GHCR ; sans internet, on transfère sur place une archive contenant les images préconstruites et on les charge hors ligne.

3.3.2.5 ENF-05 Performance et passage à l'échelle

Le système doit absorber un débit d'ingestion d'au moins 1 000 messages par seconde sur la configuration de référence, avec une latence d'API REST inférieure à 200 ms au

95e percentile et un recalcul d'OEE inférieur à une seconde sur l'équipement courant. Ces cibles sont mesurées et discutées dans la section 3.7.

3.3.2.6 ENF-06 Interopérabilité

Le système échange avec les équipements via OPC UA et MQTT, et expose une API REST pour les intégrations entreprise (ERP, GMAO, BI). Tous les protocoles utilisés sont ouverts et standardisés.

3.3.2.7 ENF-07 Sécurité et audit

Le système garantit l'authentification centralisée, l'autorisation par rôle et par groupe d'équipements, le chiffrement des communications, l'intégrité des données au repos, la journalisation auditable et la gestion des correctifs de sécurité. La posture de sécurité couvre six dimensions (installation, authentification, protection des données, surveillance, correctifs, intégrations) inspirées des recommandations de la littérature en cybersécurité industrielle (Kapoor et al., 2025 ; Nankya et al., 2023). Le cahier des charges détaillé de la sécurité figure en annexe A.3.4, sous forme d'un tableau structuré par dimension et par contrôle.

3.3.2.8 ENF-08 Sauvegarde et reprise sur incident

Le système réalise des sauvegardes horodatées et compressées des bases de données d'identité et applicative selon une fenêtre de rétention glissante (30 jours par défaut, paramétrable). La configuration du *realm* d'authentification, les tableaux de bord Grafana et les flux Node-RED sont versionnés séparément. Une procédure de restauration est documentée et testée.

3.3.2.9 ENF-09 Documentation

Le système est accompagné de deux corpus documentaires. La documentation utilisateur multilingue (opérateur, chef d'atelier, administrateur) inclut des tutoriels intégrés

à l'interface. La documentation d'exploitation s'adresse à l'équipe IT du client et couvre l'installation, les mises à jour, les sauvegardes et le dépannage.

Le tableau 3.3 résume les exigences non fonctionnelles retenues et leur état d'avancement.

3.3.3 Alignement avec les standards ISA-95 et ISA-88

Le cahier des charges d'OpSee s'aligne avec les principes d'ISA-95 et ISA-88 présentés en section 3.1.4, sans prétendre à une conformité formelle (certification ou matrice exhaustive de correspondance).

3.3.3.1 Alignement avec ISA-95

ISA-95 structure l'usine en niveaux fonctionnels et définit les échanges entre le MES (niveau 3) et l'ERP (niveau 4) (Prades et al., 2013). OpSee respecte cette séparation : il ne gère ni la comptabilité ni la planification à long terme (niveau 4), et ne commande pas directement les processus physiques (niveaux 1-2). Il se positionne au niveau 3, entre les systèmes de supervision (SCADA, OPC UA) et la couche entreprise.

Le modèle de données d'OpSee reprend les objets métier d'ISA-95 : équipements, matériaux, personnel, indicateurs de performance. L'ordonnancement automatique de la production (EF-05, CP-SAT) couvre la fonction de planification opérationnelle attribuée au niveau 3 par la norme. Les fonctions de *Production Operations Management* (dispatching, exécution et suivi des ordres) sont couvertes par EF-15, qui implémente le cycle de vie des ordres et le suivi temps réel des batches. L'intégration avec l'ERP, prévue dans la feuille de route, suivra les principes d'échange définis par ISA-95 (Virta et al., 2010).

3.3.3.2 Alignement avec ISA-88

ISA-88 définit la hiérarchie des équipements et le modèle procédural pour les processus batch (Virta et al., 2010). OpSee reprend la hiérarchie d'équipements à sept niveaux (*Enterprise, Site, Area, Process Cell, Unit, Equipment Module, Control Module*) telle que

TABLE 3.3 – Exigences non fonctionnelles d'OpSee

ID	**Exigence**	**État**	**Remarque**
ENF-01	Simplicité d'usage	Implémenté	*Design system* commun, navigation sans formation longue
ENF-02	Modularité et architecture open-core	Implémenté	Conteneurisation Docker, noyau AGPLv3 + modules premium
ENF-03	Fonctionnement hors ligne	Partiel	Couvert hors EF-12 ; LLM local en feuille de route
ENF-04	Déployabilité	Implémenté	Docker Compose ; serveur local ou appliance OPEDGE, installation GHCR ou archive hors ligne
ENF-05	Performance et passage à l'échelle	Implémenté	Cibles atteintes : 1 000 msg/s, 200 ms p95, recalcul OEE < 1 s
ENF-06	Interopérabilité	Implémenté	OPC UA, MQTT, REST, protocoles ouverts
ENF-07	Sécurité et audit	Implémenté	6 dimensions, détail en annexe A.3.4
ENF-08	Sauvegarde et reprise sur incident	Partiel	Sauvegardes en place, procédure de restauration à tester
ENF-09	Documentation	Implémenté	Utilisateur + exploitation livrés

décrite dans la norme. Le modèle procédural (phases, opérations, procédures unitaires, procédures batch) et la gestion des recettes (EF-04) sont implémentés. L'exécution batch et le suivi temps réel des phases ISA-88 actives sont assurés par EF-15. L'ordonnancement automatique (EF-05) est en feuille de route, prévu pour le premier semestre 2027. La couche de conformité réglementaire (EF-08) prend en charge l'agroalimentaire via FSMA et ISO 22005.

Le tableau A.2 (annexe A.3) résume ces correspondances.

L'alignement couvre la structure de données, la hiérarchie d'équipements, le modèle procédural, l'exécution et le suivi des ordres de production (EF-15) et le calcul d'OEE. Les écarts portent sur l'intégration ERP côté ISA-95 et sur la finalisation de l'ordonnancement automatique (EF-05). Toutes ces fonctions figurent dans la feuille de route.

3.4 Présentation de l'application OpSee

Le cahier des charges (section 3.3) a énoncé ce que le système doit faire, sous forme d'exigences. La présente section montre comment ces exigences se concrétisent dans le produit livré, en parcourant l'application telle qu'un utilisateur la rencontre. Plutôt que de réénumérer les fonctionnalités, elle en donne la traduction concrète : les écrans réels, les gestes de l'utilisateur, et le rattachement de chacun à l'exigence (EF-XX) et au standard qu'il met en œuvre. Les mécanismes internes (architecture des services, modèle de données, pipeline d'ingestion) ne sont pas repris ici. Ils sont détaillés à la section 3.5.

Le parcours suit un cas concret : une brasserie. Le procédé brassicole relève de la fabrication par lots, ce qui mobilise l'ensemble des objets du modèle ISA-88 (recettes, procédures, phases) en plus du suivi de performance commun à toute production. Les captures présentées proviennent de la version pilote du logiciel, alimentée par des données simulées d'une chaîne de production brassicole. Le corps du texte ne retient que les vues les plus significatives. Une galerie plus complète, couvrant l'ensemble des modules de l'application, figure en annexe A.3.3.

L'interface adopte le modèle d'une application web monopage : une barre de navigation latérale à gauche, un bandeau supérieur (sélecteur de langue, profil) et une zone de contenu principale qui change selon le module actif. La barre latérale est dynamique : son arborescence est chargée depuis la base et dépend du rôle de l'utilisateur et de son périmètre d'équipements, de sorte qu'un opérateur n'y voit que les modules qui le concernent (ENF-01, EF-13). Une bulle d'assistant conversationnel reste accessible dans le coin inférieur droit de chaque écran (EF-12, traitée en fin de section). Le parcours se déroule en quatre temps : modéliser l'atelier, planifier la production, piloter la performance, puis solliciter l'assistant.

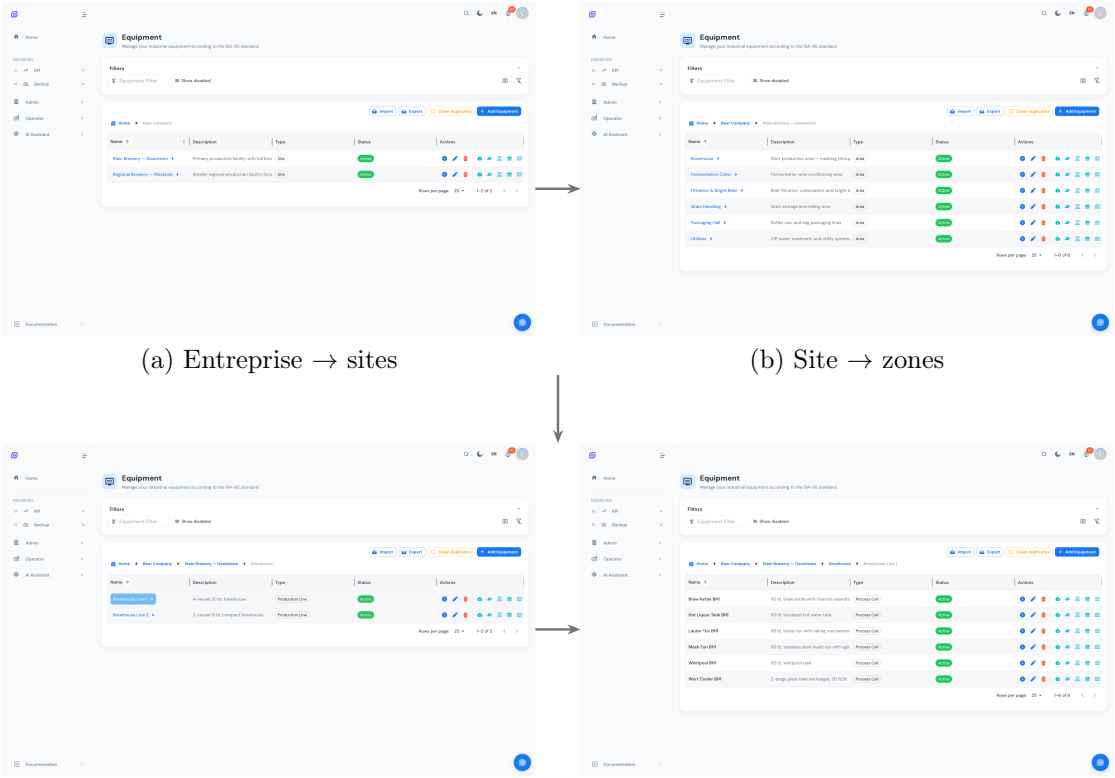
3.4.1 Modéliser l'atelier : de la hiérarchie d'équipements à la recette

La première étape consiste à décrire l'atelier dans le système. OpSee représente l'usine comme une arborescence d'équipements dont les niveaux suivent la hiérarchie ISA-88/95 introduite en section 3.2, et concrétise l'exigence EF-02.

La figure 3.4 suit la descente dans la hiérarchie de la brasserie, de l'entreprise jusqu'à l'équipement, en quatre vues successives : entreprise, sites, zones puis lignes de production avec leurs équipements. La grille n'affiche qu'un niveau à la fois, les éléments ayant des enfants sont cliquables et un fil d'Ariane permet de remonter l'arborescence. Les sept niveaux normatifs (enterprise, site, area, process cell, unit, equipment module, control module) sont disponibles, et l'utilisateur reste libre d'ajouter ses propres types et classes en complément des niveaux ISA-88/95.

Un référentiel de matières (EF-04) complète cette structure physique, organisé en classes hiérarchiques : matières premières, produits finis, emballages. Ce référentiel alimente à la fois les recettes et la traçabilité matière (EF-08).

La recette relie le procédé aux matières et aux équipements. La figure 3.5 présente l'onglet « formule » d'une recette de la brasserie. La formule est la nomenclature (Bill of Materials) du lot : chaque ligne porte une quantité, une indication de criticité et une



(a) Entreprise → sites

(b) Site → zones

(c) Zone → lignes

(d) Ligne → équipements

FIGURE 3.4 – Descente dans la hiérarchie ISA-95/88 de la brasserie, de l'entreprise à l'équipement. À chaque niveau, le fil d'Ariane situe la position dans l'arborescence. Concrétise l'exigence EF-02.

tolérance. La recette fixe ensuite les paramètres de chaque phase (températures, durées, objectifs) et les exigences d'équipement. Une même recette est versionnée et reliée à une procédure de fabrication, conformément à EF-03 et EF-04.

La recette s'appuie enfin sur une procédure de fabrication, structurée selon le modèle procédural ISA-88 à quatre niveaux (procédure de fabrication, procédure unitaire, opération, phase), ce qui matérialise EF-03. La figure 3.6 déroule cette décomposition pour la procédure d'un batch brassicole, de la racine jusqu'à la phase : la procédure regroupe trois grandes procédures unitaires (brassage, fermentation, conditionnement) ; chacune enchaîne des opérations, elles-mêmes décomposées en phases. Une procédure unitaire peut être marquée comme exécutable en parallèle lorsqu'elle s'effectue sur un équipement dis-

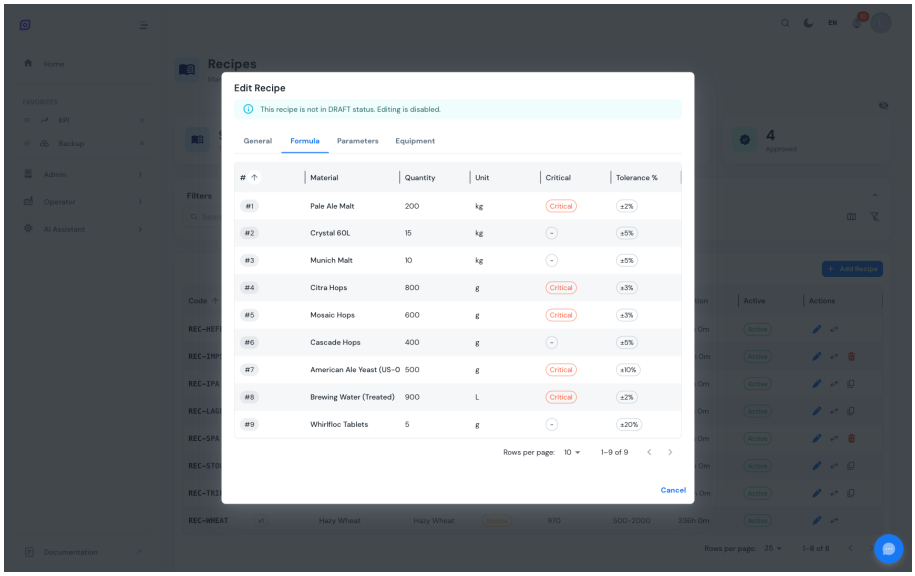


FIGURE 3.5 – Onglet « formule » d'une recette : nomenclature des matières avec quantités, criticité et tolérances. Concrétise l'exigence EF-04.

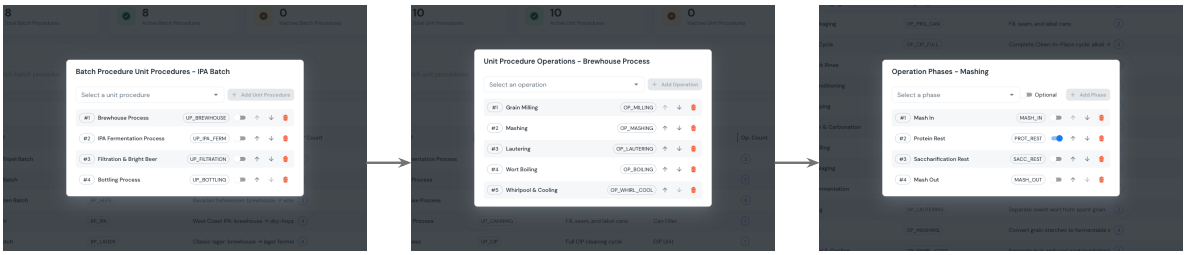
tinct sans dépendance matière, et la même procédure peut servir à plusieurs recettes qui n'en font varier que les paramètres et les matières.

À ce stade, l'atelier est entièrement décrit dans le système : équipements hiérarchisés (EF-02), matières (EF-04), procédure de fabrication et recette (EF-03).

3.4.2 Planifier et lancer la production

Une fois l'atelier modélisé, la production se déclenche par des ordres de fabrication (EF-15). Un ordre est créé à partir d'une recette (EF-03) et d'une quantité cible, puis traverse une succession d'états (en attente, ordonnancé, en cours, en pause, terminé, annulé) tracés dans le journal d'audit (EF-08). La figure 3.7 présente la liste des ordres de la brasserie : plusieurs lots de production sur les lignes de brassage et des ordres de conditionnement sur les lignes d'embouteillage, de mise en canette et de mise en fût. Chaque ordre affiche son équipement, son produit, sa quantité et son statut.

Une fois créés, les ordres sont ordonnancés automatiquement sur les équipements disponibles par un solveur de programmation par contraintes (EF-05), qui tient compte des



(a) Procédure (b) Procédure unitaire (c) Opération

FIGURE 3.6 – Descente dans le modèle procédural ISA-88 : de la procédure à ses procédures unitaires (a), puis aux opérations d'une procédure unitaire (b), jusqu'aux phases d'une opération (c). Concrétise l'exigence EF-03.

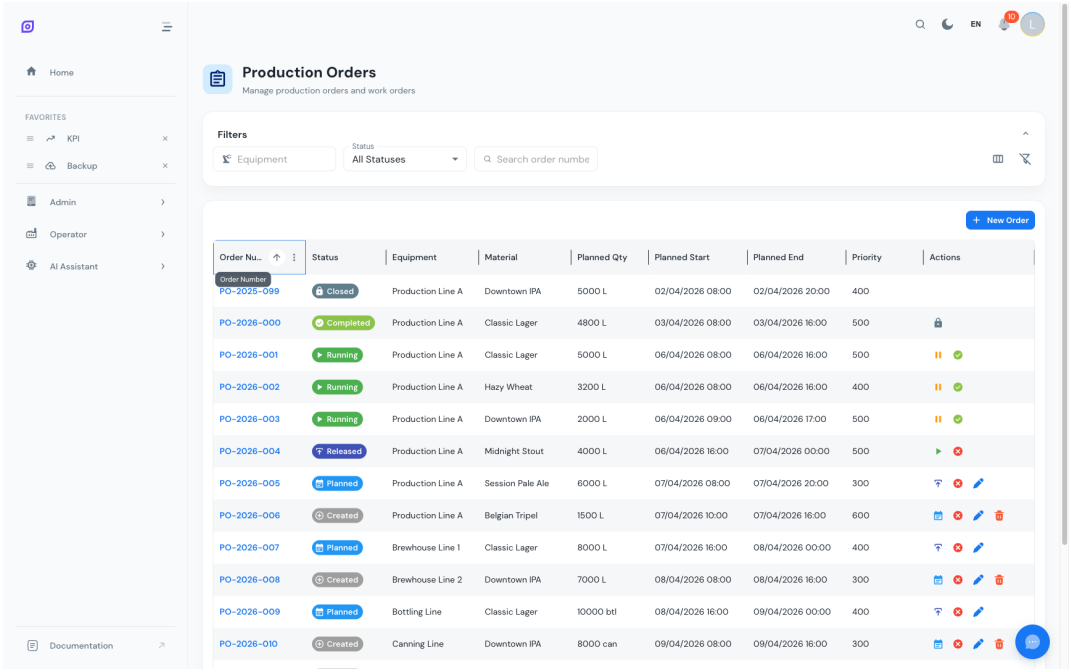


FIGURE 3.7 – Liste des ordres de fabrication : recette, équipement cible, quantité et statut. Concrétise EF-15.

calendriers de travail, des règles de changement de série et des compétences requises. Le suivi d'exécution s'effectue alors en temps réel à partir des données ingérées (EF-01) et des saisies opérateur : pour chaque batch, le système expose la phase ISA-88 active, la quantité produite et la consommation de matières, et la progression de l'ordre remonte dans le cockpit (EF-11). Comme détaillé au cahier des charges (3.3), une partie de cet enchaînement, en particulier l'ordonnancement automatique, est encore en cours de finalisation.

3.4.3 Piloter la performance en temps réel

Le pilotage de la performance s'appuie sur des mesures de production accumulées dans le temps. Pour l'illustrer, on prend ici une chaîne de production de démonstration alimentée par des données simulées. Le suivi répond à l'exigence EF-07 et repose sur l'indicateur OEE présenté en section 3.1.5.

Tout commence par la qualification des arrêts par l'opérateur. En amont, l'administrateur définit un arbre de raisons hiérarchique où chaque cause est rattachée à un type de perte OEE (figure 3.8, à gauche). L'écran opérateur liste ensuite les événements d'arrêt de la ligne (sur la période observée, 517 arrêts en vingt-quatre heures) et signale ceux qui restent à classer. Lorsque l'opérateur sélectionne un arrêt, un panneau lui propose les cartes de raisons issues de cet arbre, telles que Breakdown, Personnel ou Short stop (figure 3.8, à droite). Le choix d'une raison classe automatiquement l'événement par type de perte et par catégorie, et alimente le calcul d'OEE ainsi que la traçabilité (EF-08). Cette saisie est le point où l'opérateur de terrain contribue directement à la qualité de la mesure.

Ces saisies, combinées aux données machines, alimentent le tableau de bord OEE. Les quatre jauges (figure 3.9, en haut) en donnent la lecture immédiate : un OEE de 48,5 %, produit de la disponibilité (66,3 %), de la performance (77,0 %) et de la qualité (95,0 %). Les zones de couleur de chaque jauge sont dérivées des objectifs configurés pour l'équipement (ici 88,4 % d'OEE cible, soit le produit des objectifs de 95 % en disponibilité,

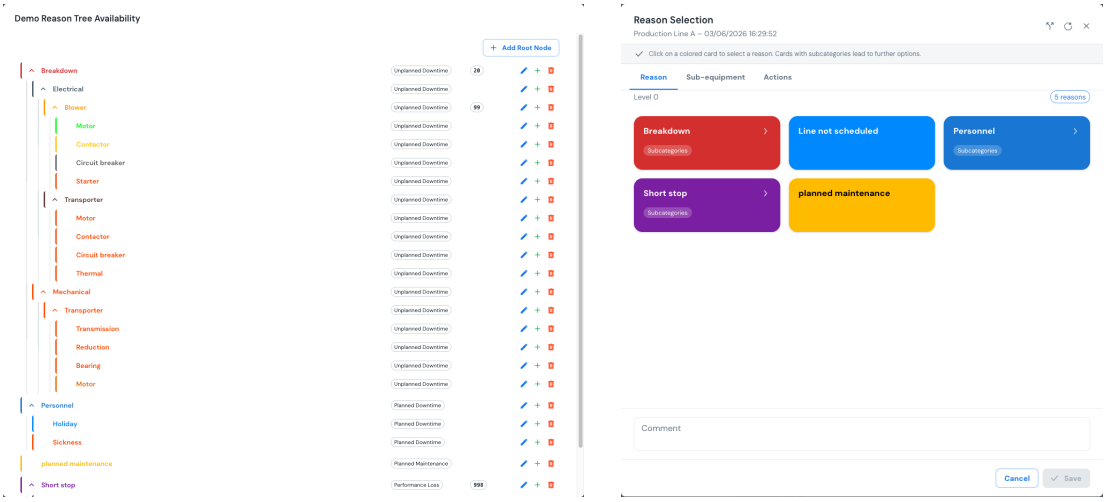


FIGURE 3.8 – À gauche, l'arbre de raisons configuré côté administrateur (chaque cause rattachée à un type de perte OEE, qui détermine sa catégorie). À droite, sa restitution côté opérateur, qui sélectionne la raison de l'arrêt. Alimente EF-07 et EF-08.

95 % en performance et 98 % en qualité), ce qui situe d'un coup d'œil la performance réelle par rapport à la cible.

Là où les jauges résument, le diagramme en cascade explique. La figure 3.9 (en bas) décompose la consommation du temps disponible : du temps planifié (16 h 29) on retranche successivement les pertes de disponibilité pour obtenir le temps de marche, puis les pertes de performance pour obtenir le temps de marche net (10 h 55), enfin les pertes de qualité pour aboutir au temps réellement productif (8 h 25). Cette représentation rend visible, étape par étape, où se perd le temps et donc où porter l'effort d'amélioration.

La dimension temporelle est restituée par une frise chronologique (figure 3.10), qui place chaque arrêt sur l'axe du temps. La couleur indique l'état de qualification : les arrêts en rouge restent à justifier, ceux en vert le sont déjà, y compris les micro-arrêts justifiés automatiquement. L'opérateur repère ainsi immédiatement ce qu'il lui reste à traiter et peut cliquer un arrêt pour le qualifier.

Enfin, le cockpit (EF-11) centralise sur une seule vue les informations issues de l'ensemble des modules. Chaque utilisateur y compose son tableau de bord par glisser-déposer,

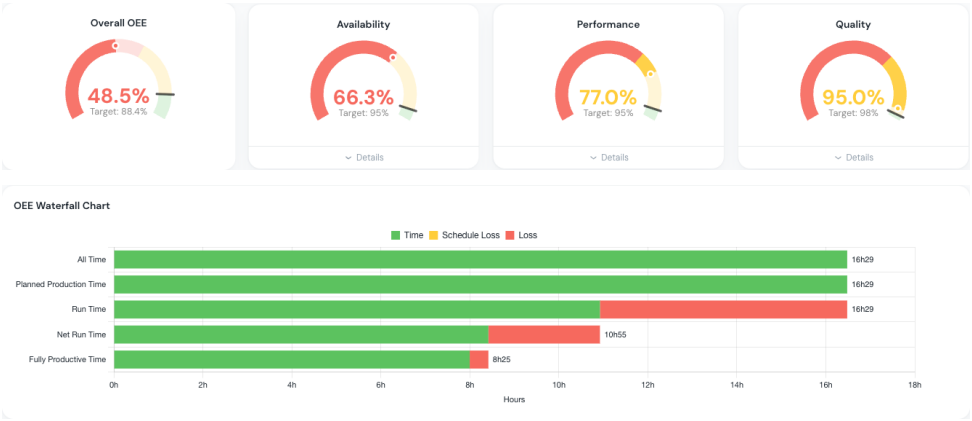


FIGURE 3.9 – Lecture de l'OEE pour la ligne suivie. En haut, les quatre jauges (efficacité globale décomposée en disponibilité, performance et qualité, situées par rapport aux objectifs). En bas, la cascade des pertes, du temps planifié au temps réellement productif. Concrétise EF-07.

FIGURE 3.10 – Frise chronologique des arrêts (vue sur une heure) : en rouge, les arrêts encore à justifier, en vert ceux déjà justifiés (dont les micro-arrêts auto-justifiés).

à partir d'une bibliothèque de widgets (OEE, audit, matières, données brutes). Sa modularité tient à deux niveaux de filtres complémentaires : des filtres globaux s'appliquent à tout le tableau de bord (sélection d'un ou de plusieurs équipements, fourchette de temps), tandis que chaque widget peut redéfinir localement ses propres filtres et sa propre période. Un même cockpit peut ainsi suivre un seul équipement ou en comparer plusieurs, et les configurations sont sauvegardées puis partagées entre utilisateurs (figure 3.11).

FIGURE 3.11 – Cockpit personnalisable : widgets OEE, audit et données agrégés sur un tableau de bord composable. Concrétise EF-11.

3.4.4 Être assisté : l'agent conversationnel

Le dernier maillon du parcours est l'assistant conversationnel (EF-12), accessible depuis la bulle présente sur chaque écran. L'utilisateur dialogue avec lui en langage naturel, sans écrire de requête ni configurer d'écran. Il peut d'abord l'interroger sur ses données de production, comme l'OEE d'une ligne sur la semaine, les principales causes d'arrêt du mois ou l'équipe en poste. La figure 3.12 en donne un exemple : en réponse à une simple demande, l'assistant restitue l'inventaire hiérarchique des équipements.

Au-delà de la consultation, l'assistant agit sur le système. Sa vingtaine d'outils lui permet de créer des équipements et de reconstituer une hiérarchie ISA-95 complète, de générer un tableau de bord, ou encore de gérer les plannings du personnel, toujours dans le strict respect des permissions de l'utilisateur connecté (les actions d'administration exigent un rôle administrateur).

Il constitue toutefois la seule fonction d'OpSee à requérir une connexion internet sortante, puisqu'il s'appuie sur une API externe. Pour les déploiements hors ligne, un modèle de langage local prend le relais (ENF-03). L'architecture de l'agent, ses outils et ses limites sont développés à la section 3.5.7.

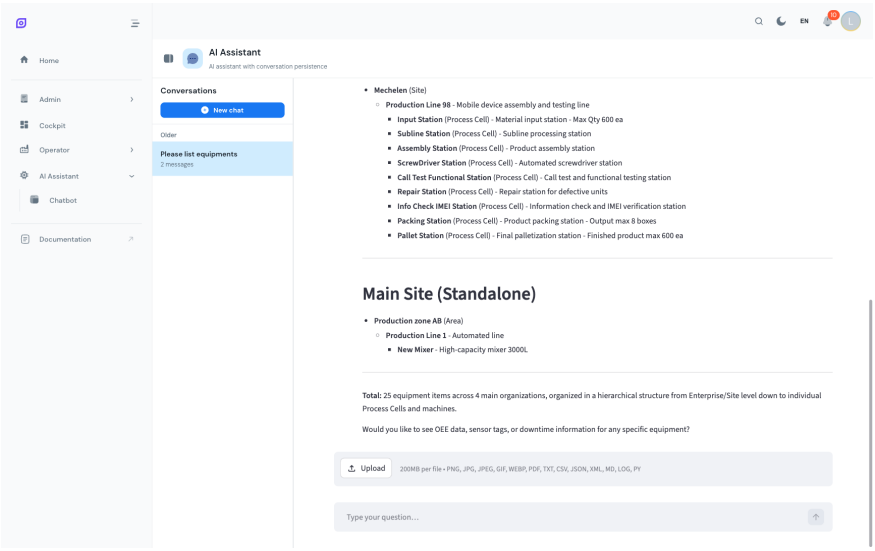


FIGURE 3.12 – Assistant conversationnel : réponse en langage naturel à une demande de l'utilisateur (ici, l'inventaire hiérarchique des équipements). Concrétise EF-12.

Ce parcours montre le cahier des charges traduit en un produit que des opérateurs et des responsables de production peuvent utiliser au quotidien. La section suivante (3.5) décrit l'architecture technique qui le rend déployable et performant.

3.5 Architecture et choix technologiques

3.5.1 Vue d'ensemble et conteneurisation (Docker)

OpSee est composé d'une dizaine de services conteneurisés, orchestrés par Docker Compose. Chaque service tourne dans son propre conteneur et peut être mis à jour sans affecter les autres. La figure 3.13 présente l'architecture et les flux de communication.

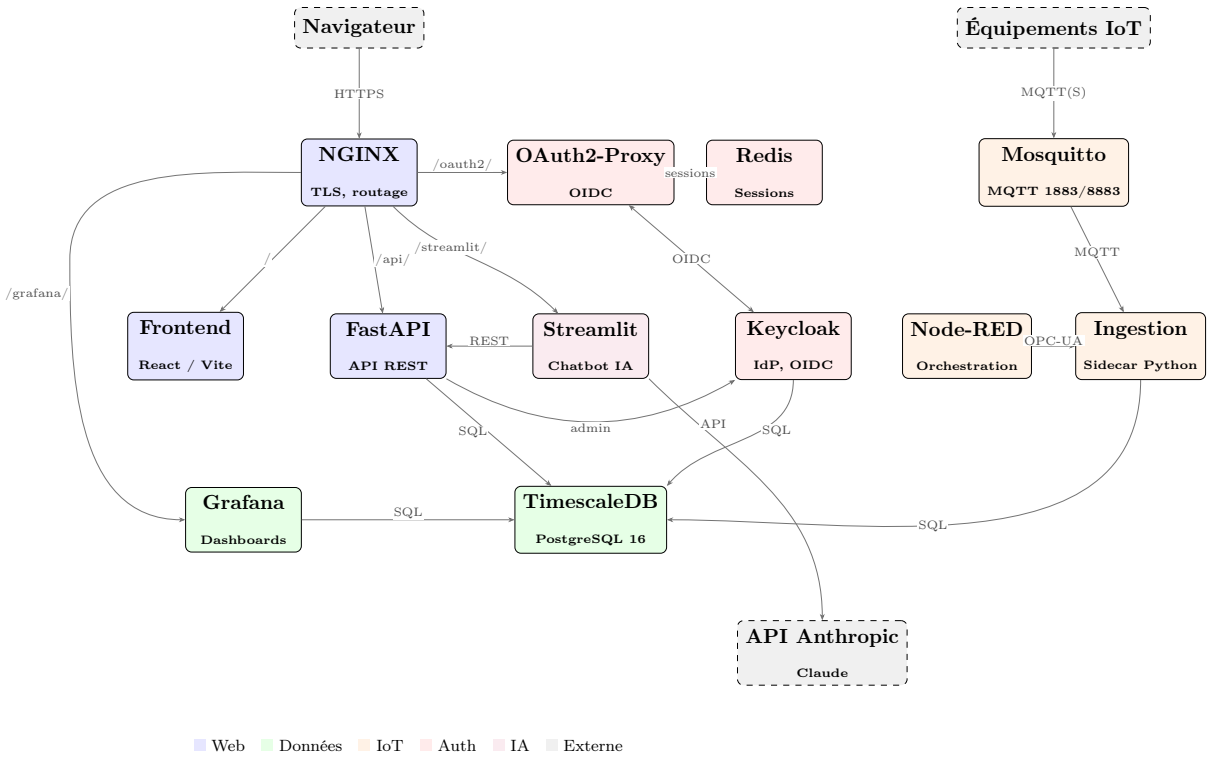


FIGURE 3.13 – Architecture conteneurisée d'OpSee

L'ensemble des services communiquent sur un réseau Docker interne (`de-end-to-end`). Aucun service, à l'exception de NGINX, n'est exposé directement sur Internet : NGINX assure la terminaison TLS et le routage des requêtes vers les services internes via HTTP. Le tableau 3.4 détaille chaque conteneur.

Pourquoi conteneuriser un MES destiné aux PME ? D'abord pour la **portabilité** : un fichier `docker-compose.yml` et un `.env` décrivent l'ensemble de la plateforme, et les

TABLE 3.4 – Services Docker composant l'architecture d'OpSee

Service	**Technologie**	**Rôle**
NGINX	nginx :alpine	Reverse proxy, terminaison TLS (HTTP/2), routage des requêtes vers les services internes
Frontend	React / Vite	Interface utilisateur (SPA)
FastAPI	Python 3.12	API REST : calcul OEE, données de base *(master data)* (équipements, recettes, matériaux, personnel…), contrôle d'accès, audit
TimescaleDB	PostgreSQL 16 + TimescaleDB	Base de données principale : données de production, métriques temporelles, configuration
Keycloak	Keycloak (Quay)	Fournisseur d'identité OpenID Connect, gestion des utilisateurs et des rôles
OAuth2-Proxy	oauth2-proxy v7.7	Passerelle d'authentification OIDC entre NGINX et Keycloak
Redis	Redis 7 Alpine	Stockage des sessions OAuth2-Proxy (persistance AOF)
Mosquitto	Eclipse Mosquitto	Courtier MQTT pour la réception des données des équipements IoT
Ingestion	Sidecar Python (paho-mqtt, asyncua)	Collecteur direct : souscrit aux topics MQTT de Mosquitto, interroge le serveur OPC-UA de Node-RED, applique parsing et transformations, écrit dans `a_tag_value`
Node-RED	Node-RED	Simulation d'équipements et exposition d'un serveur OPC-UA ; alternative à MQTT pour l'ingestion
Grafana	Grafana OSS	Visualisation de séries temporelles, tableaux de bord embarqués dans l'interface via iframe
Streamlit	Python 3.12	Interface de chatbot IA, diagnostic d'équipements via l'API Anthropic (Claude)

images Docker rendent le déploiement et la mise à jour relativement simples quel que soit le système hôte. Le déploiement initial exige toutefois plus que ces deux fichiers : il faut également restaurer un *dump* TimescaleDB (schéma et données de référence), importer le *realm* Keycloak et restaurer les tableaux de bord Grafana, étapes orchestrées par les scripts `install.sh` et `deploy-edge.sh` de l'arborescence `infra/scripts/`. Ensuite pour l'**isolation** : chaque service a son propre environnement d'exécution, ce qui élimine les conflits de versions. Enfin pour la **performance** : les travaux d'IBM Research montrent que Docker égale ou dépasse les machines virtuelles (*VM*) sur l'ensemble des benchmarks testés, avec un overhead négligeable en CPU et mémoire pour les deux technologies. Sur un workload MySQL réaliste, Docker n'introduit que 2 % de perte de débit à haute concurrence, contre plus de 40 % pour KVM (Felter et al., 2015). Wen et al. (2023) confirment ces chiffres (0 à 5 % de perte CPU, mémoire et réseau) et observent que découper une application en conteneurs peut même accélérer son démarrage par rapport à une exécution monolithique, grâce au lancement parallèle des modules.

La principale limite mesurable de la conteneurisation porte sur les entrées/sorties disque : Wen et al. (2023) mesurent un débit I/O inférieur de 5 à 15 % à celui du bare-metal pour Docker et Podman, et de 35 % pour KVM. Felter et al. (2015) précisent toutefois que cet overhead est principalement imputable au système de fichiers AUFS et s'efface lors de l'utilisation de volumes Docker montés directement sur le système hôte, ce qui est le cas pour TimescaleDB et Keycloak dans l'architecture d'OpSee. Les VM offrent une isolation noyau plus stricte et restent préférables quand on a besoin d'une configuration système spécifique ou d'une séparation complète entre applications ; en revanche, Sturley et al. (2024) concluent que les conteneurs sont à privilégier dans les environnements contraints en ressources, où la flexibilité et l'efficacité priment, ce qui correspond précisément aux ordinateurs *edge* visés pour les premiers déploiements clients. Ce constat s'applique d'autant plus aux PME industrielles, qui disposent rarement d'équipes informatiques dédiées à l'administration de machines virtuelles.

Le déploiement bare-metal, sans couche de virtualisation, maximise les performances

I/O mais supprime toute portabilité et impose une gestion manuelle des dépendances système à chaque environnement.

Le premier déploiement sur des machines à faibles ressources (type PC industriel ou Raspberry Pi) peut aussi prendre du temps. Ahmed et Pierre (2018) ont montré que le téléchargement et l'installation d'une image Docker sur un ordinateur monocarte peuvent prendre plusieurs minutes, en raison de l'utilisation séquentielle des ressources (réseau puis décompression CPU puis écriture disque) par le client Docker standard. Cette limite concerne l'initialisation du nœud, pas l'exécution courante ; sur des machines industrielles de capacité standard, le délai reste négligeable.

Govindaraj et Artemenko (2018) situent les conteneurs comme une solution de référence pour l'automatisation d'usine en *edge computing*, grâce à des performances proches du natif et à un *overhead* de virtualisation faible. Ils notent que cette technologie reste néanmoins inadaptée au contrôle temps réel dur, certaines boucles fermées exigeant un cycle de contrôle aussi bas que 0,5 ms, ce qui ne correspond pas au périmètre d'un MES. Leur contribution principale est un schéma de migration redondante qui réduit le temps d'indisponibilité lors d'une *live migration* d'un facteur 1,8 par rapport à la migration standard de conteneurs Linux ; l'enjeu général de la maîtrise des temps d'indisponibilité est traité ci-dessous.

La stratégie de mise à jour par défaut de Docker Compose repose sur un cycle arrêt-remplacement-démarrage, ce qui génère un temps d'indisponibilité à chaque mise à jour. Rajković et al. (2025) proposent pour la couche MES une stratégie de déploiement hybride combinant *blue-green deployment*, *canary release* avec nœuds sentinelles ou de secours, drapeaux de fonctionnalité (*feature flags*) en mode « dark », et tests A/B côté client. Cette combinaison réduit nettement la fenêtre d'indisponibilité par rapport aux stratégies historiques de *recreate* ou *rolling deployment*, tout en simplifiant le *rollback*. Pour OpSee en phase d'amorçage, Docker Compose reste un choix pragmatique ; l'adoption d'un orchestrateur comme k3s ou Kubernetes (qui permettrait nativement de telles stratégies) est envisageable à mesure que le système gagne en criticité.

Le pipeline de données est pris en charge par un sidecar Python dédié, qui se connecte directement aux deux sources : Mosquitto (MQTT, capteurs IoT) et Node-RED (OPC-UA, simulation et automates). Le sidecar parse les payloads, applique les transformations puis écrit les valeurs résolues dans TimescaleDB, où FastAPI les expose à l'interface.

3.5.2 Pipeline de données : ingestion directe et inventaire de serveurs

Le pipeline d'ingestion d'OpSee repose sur les deux protocoles présentés en section 3.1.4 : MQTT pour la collecte auprès des capteurs IoT, et OPC UA pour l'intégration des automates et des environnements de simulation. Ce découpage suit l'architecture proposée par Beregi et al. (2021) pour les *cyber-physical production systems* : OPC UA, riche en possibilités de modélisation de l'information, est positionné au niveau supérieur de l'interopérabilité de service, tandis que MQTT, protocole *pub/sub* léger basé sur un courtier, prend en charge les échanges de données aux niveaux inférieurs. Hoque et al. (2024) valident cette approche dans un contexte industriel multi-capteurs : MQTT, via un courtier Mosquitto, offre une acquisition scalable avec une hiérarchie de topics permettant de classifier les équipements, les lignes et les métriques. L'ingestion est assurée par un sidecar Python dédié, exécuté dans son propre conteneur (`ingestion`) à côté de FastAPI. Cette séparation évite que la charge d'ingestion temps réel n'impacte les latences de l'API et permet de redimensionner ou redéployer chaque service indépendamment. Le sidecar embarque deux collecteurs asynchrones : `MqttCollectorWorker` (*paho-mqtt*) et `OpcuaCollectorWorker` (*asyncua*).

Pour répondre à l'exigence de connexions multiples (section 3.3), OpSee tient un inventaire de serveurs en base. Une table `m_server` décrit les courtiers et endpoints disponibles ; deux tables filles `m_server_mqtt` et `m_server_opcua` portent les paramètres spécifiques à chaque protocole (URL, méthode d'authentification, filtres de topic, QoS, intervalle de publication). Chaque collecteur reconcilie son état toutes les trente secondes contre cet inventaire et reçoit en parallèle des notifications immédiates via `pg_notify` lorsqu'un opé-

rateur ajoute, modifie ou désactive un serveur depuis l'interface. L'ajout d'une ligne, le renouvellement d'un certificat ou la modification des credentials s'appliquent sans redémarrage des collecteurs. L'inventaire joue ici le même rôle que le *Unified Namespace* de Pintilie et al. (2025) dans leur étude de cas Demcon : un seul collecteur agrège les flux de plusieurs sources hétérogènes (PLC, services applicatifs, capteurs) sans coupler le système à un constructeur particulier.

La sécurité des connexions est gérée dans la même base. Une table `m_server_cert` stocke les PEM (autorité de certification, certificat client, clé privée, pairs de confiance OPC UA) chiffrés avec Fernet ; les informations affichables côté interface sont conservées en clair (sujet du certificat, empreinte SHA-256, date d'expiration). Au démarrage d'une connexion, un module `cert_loader` déchiffre les blobs et les matérialise dans un répertoire temporaire en mode `0600`, exigé par *paho-mqtt* et *asyncua* qui prennent des chemins de fichiers et non des objets en mémoire. Quatre méthodes d'authentification sont supportées : anonyme, login/mot de passe, certificat client, et combinaison login plus certificat. La vérification du certificat serveur et l'utilisation des CA système sont configurables par serveur. Cette couche TLS/mTLS est nécessaire car Colombo et Ferrari (2025) montrent que Sparkplug B, désormais standard ISO, ne fournit nativement qu'un contrôle d'accès grossier basé sur des listes de topics, insuffisant face aux exigences industrielles de sécurité par métrique. L'overhead du chiffrement est connu : Gavriilidis et al. (2025) mesurent sur Raspberry Pi 4B (matériel proche du profil OpEdge) une augmentation maximale de 37 % de la consommation CPU pendant la phase de *handshake* TLS 1.3 et un coût mémoire marginal (de 26,1 à 27,5 MB côté client, 7,3 à 8,5 MB côté courtier), ce qui reste compatible avec les contraintes du déploiement edge.

Sparkplug B demande un traitement spécifique. Ce surensemble de MQTT, désormais standardisé par l'ISO (Colombo & Ferrari, 2025), normalise la structure des topics (`spBv1.0/group/messageType/edgeNode/device`) et la sémantique des messages : `NBIRTH`/`DBIRTH` annoncent un *edge node* ou un *device* et déclarent ses métriques avec leurs alias et types ; `NDATA`/`DDATA` ne portent ensuite que les valeurs qui ont changé (stra-

tégie *Report-by-Exception*) ; `NDEATH`/`DDEATH` signalent une déconnexion. Un collecteur qui démarre sans connaître les BIRTH précédents ne peut pas interpréter les NDATA reçus tant qu'une rebirth ne s'est pas produite, ce qui peut prendre plusieurs heures sur certains équipements. OpSee résout ce problème par une hypertable `a_sparkplug_birth` qui archive chaque BIRTH (compression segmentée par `server_id`, partitionnement temporel par tranches de sept jours, rétention par défaut de quatre-vingt-dix jours) et permet à un futur `SparkplugWorker` de reconstruire ses cartes d'alias au démarrage. Le `MultiMetricParser` actuel reconnaît déjà la structure de topic Sparkplug et extrait les métriques individuelles. Pintilie et al. (2025) documentent toutefois que la rigidité du *namespace* Sparkplug peut compliquer son intégration dans des architectures existantes : OpSee garde donc Sparkplug comme un format supporté parmi d'autres et non comme convention obligatoire.

Les deux collecteurs partagent une même chaîne de traitement : résolution du `tag_id` via `TagResolver`, application d'un moteur de transformation (compteur ou différentiel, détection de changement avec *deadband*), puis écriture par lots dans la table finale `a_tag_value` via `ValueWriter`. Aucune table de *staging* intermédiaire n'est utilisée sur ce chemin direct, ce qui réduit la latence et simplifie le pipeline. Les anciennes tables `a_ingestion_mqtt` et `a_ingestion_opcua` restent toutefois activables derrière les toggles `USE_DIRECT_MQTT_INGESTION` et `USE_DIRECT_OPCUA_INGESTION` afin de permettre un retour vers le pipeline historique en cas d'incident.

3.5.3 Base de données (TimescaleDB et modèle de données ISA-95)

OpSee s'appuie sur une instance unique de **PostgreSQL 16** étendue par **TimescaleDB** 2.23 pour couvrir deux besoins habituellement traités par deux moteurs distincts : le stockage relationnel des données de référence (*master data*) et l'archivage massif de séries temporelles. Cette mutualisation est le facteur déterminant du choix : Grafana, FastAPI et Keycloak partagent ainsi la même base, sans couche d'adaptation entre don-

nées de configuration et mesures temps réel, et une sauvegarde unique couvre l'ensemble du système. Wang et al. (2023) démontrent qu'Apache IoTDB dépasse TimescaleDB en débit d'écriture brut (10 millions de valeurs par seconde contre l'ordre de la centaine de milliers pour TimescaleDB sur des charges industrielles réelles), grâce à une structure de fichier *TsFile* optimisée pour les scénarios IoT à valeurs nulles fréquentes. IoTDB reste toutefois un moteur exclusivement orienté séries temporelles, qui ne peut pas accueillir le référentiel relationnel d'OpSee (équipements, recettes, utilisateurs, audit) ni servir de source de données à Keycloak ; le doublement par un PostgreSQL classique annulerait l'avantage cherché.

TimescaleDB est une extension PostgreSQL qui introduit la notion d'*hypertable* : une table abstraite découpée automatiquement en *chunks* (partitions) sur une dimension temporelle. Combiné à l'expressivité SQL et à la transactionnalité de PostgreSQL, ce partitionnement permet de gérer simultanément les séries temporelles et les données relationnelles classiques. Grzesik et Mrozek (2020) évaluent TimescaleDB aux côtés d'InfluxDB, Riak TS, PostgreSQL et SQLite sur un Raspberry Pi configuré comme nœud d'agrégation pour un réseau de capteurs basse consommation. Sur ce profil matériel proche de celui visé par OpEdge, ils mesurent pour TimescaleDB 230 points par seconde en insertion ligne par ligne (contre 260 pour PostgreSQL nu, 191 pour Riak TS, 54 pour InfluxDB et 8 pour SQLite) et 1 187 points par seconde en insertion par lots de dix, avec des requêtes d'agrégation exécutées en moins de 80 ms en moyenne. Ces ordres de grandeur sont cohérents avec ceux mesurés sur le banc d'essai OpSee décrit en section 3.7.1. Les auteurs concluent que des ordinateurs monocartes peu coûteux peuvent servir de nœuds d'agrégation à petite échelle pour les systèmes IoT, ce qui correspond au profil des déploiements OpSee chez une PME.

Quatre hypertables structurent les données opérationnelles d'OpSee :

— `a_tag_value` stocke l'ensemble des valeurs capteurs et métriques calculées sous la forme `(timestamp, tag_id, value)`. C'est la table cible du pipeline d'ingestion (section 3.5.2) et la source principale de Grafana.

— `a_ingestion_mqtt` et `a_ingestion_opcua`, conservées pour le pipeline historique, servent encore de zones de *staging* optionnelles activables derrière un toggle. Une politique de rétention agressive de trois jours borne leur taille puisque les valeurs parsées sont écrites dans `a_tag_value`.

— `a_log`, journal applicatif, est partitionnée dans le temps pour faciliter l'analyse rétroactive et la purge des entrées anciennes.

Les quatre hypertables bénéficient de la compression par colonnes activée au niveau du *chunk*, ce qui contient la dérive de l'espace disque, contrainte critique sur les déploiements OpEdge à matériel limité.

Le schéma comprend une centaine de tables organisées selon une convention de préfixage stricte qui rend l'arborescence lisible sans documentation externe :

— `m_*` (*master data*) regroupe la majorité des tables de référentiel : équipements, types, capacités, classes, matériaux, opérateurs, équipes, recettes, raisons d'arrêt, paramètres globaux, traductions.

— `a_*` (*actual data*) contient les tables transactionnelles de production : valeurs de capteurs, événements de disponibilité, événements qualité, journal d'audit, conversations du chatbot.

— Les tables système (audit, traductions, journal applicatif) complètent l'ensemble.

Le modèle suit les standards ISA-95 et ISA-88 introduits en section 3.1.4. La hiérarchie ISA-88 des équipements est portée par deux tables : `m_equipment_type` fixe le niveau hiérarchique via une colonne `isa88_level` (*enterprise*, *site*, *area*, *process_ cell*, *unit*, *equipment_ module*, *control_ module*), et `m_equipment` référence à la fois son type et son parent par auto-référence. La fonction `f_m_equipment_get()` parcourt l'arbre via une requête récursive (*Common Table Expression*) et retourne, pour une langue donnée, l'ensemble de la hiérarchie traduite. Le modèle procédural ISA-88 est implémenté dans sept tables liées (`m_phase`, `m_operation`, `m_unit_procedure`, `m_batch_procedure` et leurs tables de jonction ordonnées), reproduisant les quatre niveaux normatifs *Phase* → *Operation* → *Unit Procedure* → *Procedure*. Les recettes versionnées (`m_recipe`, statut *DRAFT* → *RE-*

VIEW → *APPROVED* → *OBSOLETE*) référencent ce modèle procédural et leurs nomenclatures matières via `m_recipe_formula_item`.

L'accès aux données suit une convention de séparation : les opérations CRUD simples sont écrites en SQL inline côté Python (via `asyncpg`), tandis que les requêtes complexes sont encapsulées dans une cinquantaine de fonctions stockées préfixées `f_m_*` (référentiel) et `f_a_*` (production), parmi un total d'environ 130 fonctions `f_*`. Les fonctions complexes prennent en charge les jointures multilingues, le parcours hiérarchique des équipements, les calculs OEE et les politiques de filtrage par permissions. Cette approche concentre la logique des requêtes lourdes côté base, où le moteur dispose des index et statistiques nécessaires pour planifier l'exécution, et limite l'aller-retour réseau entre l'API et la base.

Enfin, la table `m_audit` consigne pour chaque mutation l'utilisateur, l'horodatage, la table cible, la requête exécutée et les valeurs avant et après modification au format JSONB. Elle alimente directement le module d'audit du cockpit et porte la traçabilité demandée par les industries soumises à des contraintes de conformité (agroalimentaire, pharmaceutique).

3.5.4 Serveur API (FastAPI)

La couche applicative d'OpSee est portée par **FastAPI**, un *framework* Python asynchrone bâti sur Starlette (côté serveur ASGI) et Pydantic (validation et sérialisation). Lathkar (2023) en rappelle les principales caractéristiques : génération automatique de la documentation OpenAPI à partir des annotations de type, validation déclarative des entrées via les modèles Pydantic, et exécution sur une boucle d'événements `asyncio` qui permet de traiter un grand nombre de requêtes concurrentes avec un nombre restreint de *workers*. Bednarz et Miłosz (2025) comparent FastAPI, Flask et Django sur un même banc d'essai : FastAPI traite près de 4 800 requêtes par seconde sur une route GET simple, soit environ 80 % de plus que Flask et près de trois fois plus que Django. Sur les opérations CRUD de leur étude, FastAPI conserve l'avantage à l'exception d'un cas isolé : la

combinaison *FastAPI + SQLModel* sur un `SELECT` de l'ensemble d'une table. Ce résultat conforte le choix d'OpSee d'utiliser `asyncpg` en accès direct plutôt qu'un ORM (*Object-Relational Mapping*, couche d'abstraction qui traduit les classes Python en requêtes SQL) lourd côté lecture.

Le backend OpSee est organisé selon un **pattern Service-Repository** en trois couches :

— **Router** (`*_API.py`) : déclare les routes HTTP, valide les corps de requête via Pydantic, injecte les dépendances d'authentification et d'autorisation, et journalise les actions dans la piste d'audit.

— **Service** (`*_Service.py`) : implémente la logique métier (règles fonctionnelles propres au domaine industriel : transitions d'état d'un batch, validation d'un changement d'équipement, calcul d'un OEE), gère les transactions et orchestre les appels au repository.

— **Repository** (`*_Repository.py`) : encapsule le SQL direct (via `asyncpg`) et l'invocation des fonctions SQL `f_*`.

La convention de nommage `<Domaine>_API.py / _Service.py / _Repository.py` est appliquée à travers une trentaine de modules de l'arborescence `Menu/`, qui regroupe l'ensemble des routes fonctionnelles : équipements, recettes, procédures, personnel, OEE, traductions, contrôle d'accès, etc. Le tout totalise près de 280 endpoints REST.

Trois points méritent d'être détaillés. D'abord, OpSee ne recourt pas à un *middleware* d'authentification FastAPI classique : la validation de session est déléguée à OAuth2-Proxy en amont (section 3.5.6), et FastAPI se contente de vérifier la signature du JWT à l'aide d'un client **JWKS** mis en cache cinq minutes (algorithme RS256). L'API est ainsi déchargée du cycle complet d'OpenID Connect, et la logique de contrôle d'accès tient dans deux dépendances réutilisables : `inject_user_context` (extraction des rôles depuis les *claims*) et `require_menu_access(path)` (vérification des permissions sur le routeur).

Ensuite, les workers d'ingestion (section précédente) ne tournent pas dans des conteneurs séparés au sens strict en mode legacy : ils sont démarrés dans le *lifespan* de FastAPI, puis déportés sur un *sidecar* Python dédié dans la nouvelle architecture. Le pool `asyncpg`

(10 à 80 connexions) sert principalement aux routes HTTP de FastAPI ; les workers d'ingestion ne l'utilisent qu'épisodiquement (mise à jour de leur statut dans `m_worker`, notifications `pg_notify`). La majorité des écritures de valeurs passe par un chemin distinct (`ValueWriter`, écritures par lots), ce qui mutualise les connexions vers TimescaleDB sans saturer le pool.

Enfin, la sécurité de l'API suit les recommandations de Kornienko et al. (2021) pour les API REST développées avec des *frameworks* Python (Flask en particulier) : durcissement de la configuration au niveau de l'application, du serveur et de la base, authentification par jeton JWT, validation systématique des entrées et requêtes paramétrées contre l'injection SQL. OpSee les met en œuvre par une terminaison TLS systématique en amont, une validation JWT signée à chaque requête, des réponses d'erreur normalisées (`{status, message, code}`) qui n'exposent aucun détail interne, et un journal d'audit horodaté de toutes les mutations avec capture des valeurs avant/après dans la table `m_audit`.

Les dépendances Python du backend restent peu nombreuses : *asyncpg* pour PostgreSQL, *PyJWT* pour les tokens, *aiohttp* pour les appels Admin Keycloak, *pandas* pour les exports analytiques, *anthropic* pour le chatbot. Aucune n'est verrouillée à une version stricte dans `requirements.txt` ; les montées de version sont faciles mais exposent à des régressions ponctuelles. Cette dette est traitée au niveau des déploiements OpEdge, qui figent les versions au moment du *packaging* (section 3.6.3).

3.5.5 Interface utilisateur (React/Vite)

Le frontend d'OpSee est une *single-page application* (SPA) développée en **TypeScript** sur la base de **React 19** et compilée par **Vite** 6. Le rapport *State of JavaScript 2024* (Greif & Benitte, 2024) place React largement en tête des *frameworks* de rendu en termes d'adoption professionnelle, devant Vue et Svelte ; ce dernier domine la satisfaction perçue sans renverser le rapport de force en parts d'usage. Du côté de l'outillage, l'équipe React a officiellement déprécié Create React App en février 2025, motivant cette décision par l'absence de mainteneurs actifs et l'inadéquation de l'outil aux applications de produc-

tion, qui exigent routage, récupération de données et découpage de code intégrés (React Team, 2025). Pour les nouveaux projets, l'équipe recommande en priorité des *frameworks* (Next.js, React Router, Expo) et, à défaut, des outils de *build* comme Vite, Parcel ou Rsbuild. OpSee n'ayant pas besoin de rendu côté serveur, c'est cette dernière option qui a été retenue.

L'arborescence `frontend/src/` est organisée par domaine fonctionnel, avec une quarantaine de dossiers `sections/` (équipements, OEE, personnel, recettes, cockpit, audit, traductions, etc.) et plus de 180 routes lazy-loadées via **React Router v7**. Chaque page importe un module séparé via `React.lazy`, et un mécanisme de *prefetch* déclenché pendant les périodes d'inactivité (`requestIdleCallback`) précharge les modules adjacents pour réduire la latence perçue lors de la navigation.

La gestion d'état suit une approche minimaliste : **aucune bibliothèque tierce** (Redux, Zustand, React Query) n'est introduite. Trois `Context Provider` couvrent les besoins transverses : `AuthContext` (utilisateur, vérification silencieuse toutes les cinq minutes), `LanguageContext` (langue courante, persistance `localStorage`) et `MenuDataContext` (arbre de menus filtré par permissions). Pour chaque domaine fonctionnel, un *hook* dédié encapsule le cycle complet de récupération de données : `useEquipments()`, `useRecipes()`, `useTags()`...L'arborescence en compte plus d'une centaine, écrits sur le même patron.

L'interface repose sur deux composants principaux. Le **cockpit personnalisable**, d'abord, construit sur `react-grid-layout` : 24 types de widgets (KPI OEE, tendances, journaux d'audit, indicateurs matières) se positionnent par *drag-and-drop* sur une grille à 12 colonnes responsive. La configuration de chaque dashboard est sérialisée en JSON et persistée à deux endroits : côté base de données pour le partage et la traçabilité de révision, et côté `localStorage` pour la sélection active et les préférences par utilisateur. Une fonction de *snapshot* synchronise l'état local de la grille (largeurs de colonnes, tri, visibilité) vers la base au moment de la sauvegarde. Le second est le système de **tableaux de données** fondé sur `@mui/x-data-grid`, qui couvre la totalité des écrans CRUD avec un comportement homogène : filtres bookmarkables synchronisés à l'URL, choix et ordon-

nancement des colonnes par l'utilisateur, persistance des largeurs de colonne. Une galerie de captures d'écran illustrant le cockpit, les grilles CRUD et l'ensemble des modules fonctionnels figure en annexe A.3.3.

La localisation est traitée par une solution interne plutôt que par une bibliothèque tierce comme `react-i18next`. Plus de 70 fichiers `locales/*.ts` exportent des objets typés couvrant les dix langues supportées (en, fr, de, es, it, nl, pt, ja, sk, ru) ; un *hook* dédié par domaine (`useEquipmentTranslation`, `useCockpitTranslation`...) renvoie une fonction `t(key)` qui combine la langue courante et le dictionnaire approprié. Ce choix évite la complexité d'un *loader* asynchrone et bénéficie de la vérification statique de TypeScript : toute clé manquante remonte dès la compilation. Pour le contenu défini en base (noms d'équipements, raisons d'arrêt), une table dédiée `m_localization_translation` stocke les traductions en dix langues, alimentées soit manuellement, soit automatiquement via l'API DeepL.

Le contrôle d'accès est appliqué côté serveur : `GET /api/menu` ne retourne que les entrées autorisées, et un `AuthGuard` vérifie chaque chemin avant le rendu d'une route. Cette stratégie évite toute fuite de structure de menu sensible à un utilisateur non habilité, et garantit la cohérence entre les permissions affichées et les permissions effectives.

3.5.6 Authentification et sécurité (Keycloak)

L'authentification d'OpSee est portée par **Keycloak** configuré sur un *realm* dédié, exposé via une chaîne de quatre composants : NGINX pour la terminaison TLS, OAuth2-Proxy pour le cycle OpenID Connect, Redis pour le stockage des sessions côté serveur et FastAPI pour la validation des JWT en aval. Keycloak est un projet open source porté par Red Hat et soutenu par une large communauté : ses versions sont publiées tous les un à deux mois, et la base de code est activement maintenue, ce qui réduit le risque d'accumulation de vulnérabilités non corrigées dans la couche d'authentification, point critique pour un système industriel exposé sur le réseau corporate. Chatterjee et Prinz (2022) montrent par ailleurs, dans un contexte de *microservices*, qu'une architecture

comparable fondée sur Keycloak isole la logique d'authentification du code métier et délègue le flux OIDC à une passerelle dédiée.

Le parcours d'authentification suit la séquence suivante. Lorsqu'un utilisateur accède à `https://opsee.domain/`, NGINX émet un sous-appel `auth_request` vers OAuth2-Proxy. Si aucune session n'est trouvée dans Redis, l'utilisateur est redirigé vers la page de login de Keycloak (thème OpSee personnalisé) et le code d'autorisation est échangé via le *flow* OpenID Connect avec **PKCE** (`code_challenge_method = S256`, *forcé* dans la configuration OAuth2-Proxy) contre des tokens d'accès, d'identité et de rafraîchissement. Les tokens sont conservés côté serveur dans Redis ; côté navigateur, seul un cookie de session `HttpOnly` et `Secure` est exposé. Côté serveur, FastAPI récupère le *access token* via `POST /api/auth/token` et l'inclut dans l'en-tête `Authorization` de chaque requête sortante. FastAPI valide la signature RS256 à l'aide d'un client JWKS mis en cache cinq minutes.

Le maintien des tokens en mémoire (et non dans `localStorage` ou `sessionStorage`) élimine la principale surface d'attaque XSS contre les SPA. Les durées de vie sont délibérément courtes : 5 minutes pour le *access token*, 30 minutes pour le *refresh token*, 24 heures d'inactivité pour le cookie de session, avec un rafraîchissement automatique programmé quatre minutes avant expiration.

Le modèle de droits suit le standard **RBAC** formalisé par Sandhu et al. (1996), qui introduit la notion de rôle comme intermédiaire entre utilisateurs et permissions. On ne révoque pas une permission à un utilisateur, on ajuste son ensemble de rôles. OpSee combine deux dimensions orthogonales :

— **Permissions par menu**, qui contrôlent l'accès à chaque écran fonctionnel sous la forme `menu:<chemin>` (ex. `menu:admin:equipment`). La hiérarchie est respectée : `menu:production` couvre `/production/*`.

— **Permissions par équipement**, qui restreignent les données visibles selon l'arbre ISA-95 sous la forme `equipment:<slug:hiérarchique>` (ex. `equipment:company-a:antwerp:line-1`). Un rôle de niveau supérieur couvre tous les enfants par jointure

récursive sur `m_equipment_keycloak_sync`.

— Un rôle `admin` global outrepasse les deux dimensions.

Les vérifications sont appliquées en cascade : au niveau du routeur FastAPI via la dépendance `require_menu_access(path)`, puis dans les requêtes SQL via une clause `WHERE equipment_id = ANY($allowed_ids)` générée par `Permission_resolver.py`. Le *frontend* reçoit l'arbre de menus déjà filtré (`GET /api/menu`) et l'`AuthGuard` bloque toute navigation vers une route non autorisée. Le contrôle est répété à chaque couche : une défaillance unique ne suffit pas à laisser fuiter une donnée non autorisée.

Les permissions Keycloak sont synchronisées avec la base via un endpoint dédié qui met à jour la table `m_equipment_keycloak_sync`. Cette synchronisation périodique permet de modifier la hiérarchie d'équipements ou la liste des utilisateurs côté Keycloak sans incohérence côté application. La piste d'audit `m_audit` enregistre par ailleurs chaque action mutante avec l'identifiant utilisateur extrait du JWT, son adresse IP et le contexte de session, ce qui répond aux exigences de traçabilité énoncées au chapitre 3.3.1.

3.5.7 L'AI Assistant et la frontière du réseau local

L'*AI Assistant* (EF-12) est la seule fonctionnalité d'OpSee qui sort du réseau local du client : chaque invocation déclenche un appel sortant vers l'API Anthropic, alors que la base de données, l'ingestion et l'interface restent intégralement *on-premise*. La sécurité de ce flux est garantie par construction. Le contexte d'authentification (JWT Keycloak, périmètre d'équipements, accès par menu) est résolu côté serveur via une dépendance FastAPI puis transmis à chaque appel d'outil avant que le LLM n'intervienne ; le modèle n'a aucun accès au JWT ni à Keycloak et appelle des fonctions Python dont les autorisations sont déjà vérifiées. Cinq agents spécialisés (*OEE Expert*, *Timeseries Expert*, *ML Engineer*, *Grafana Agent*, *Configuration Expert*) se partagent 25 outils encadrés par cette propagation RBAC.

La sortie de données vers Anthropic soulève une question de souveraineté distincte : le *system prompt* embarque l'identité de l'utilisateur et les résultats d'outils contiennent

des données industrielles. Le cadre juridique associé (qualification RGPD, DPA, SCCs, AI Act, mode *Bring Your Own key*) est traité au chapitre 4 (4.11). Deux pistes permettront à terme de supprimer cette dépendance externe : l'exécution locale d'un LLM sur OpEdge (limitée aujourd'hui par l'absence de GPU dédié) et l'adoption du *Model Context Protocol* comme standard ouvert d'intégration.

L'analyse complète (boucle d'orchestration et appels d'outils, propagation des permissions, garde-fous côté API Anthropic, perspectives LLM local et MCP) figure en annexe A.3.7.

3.5.8 Synthèse architecturale et interactions entre composants

Les choix techniques décrits dans cette section répondent aux exigences fonctionnelles et non fonctionnelles formulées au chapitre 3.3. Docker assure la portabilité du déploiement. La chaîne NGINX / OAuth2-Proxy / Keycloak place l'authentification dans des bibliothèques de sécurité dédiées, indépendamment maintenues, plutôt que dans le code applicatif. Le pipeline d'ingestion à deux étages accepte MQTT et OPC UA sans imposer un format propriétaire au reste du système. TimescaleDB héberge à la fois les données de référence et les séries temporelles, ce qui simplifie sauvegarde et administration. FastAPI concentre la logique métier dans un *framework* typé et asynchrone ; React/Vite porte une SPA localisée en dix langues. Keycloak couvre le cycle d'identité de bout en bout.

Le tableau 3.5 résume les principales interactions entre ces composants. Chaque flèche correspond à un canal documenté sur un protocole standard (HTTPS, SQL, MQTT, OPC UA, OIDC) ; un composant peut donc être remplacé par une alternative compatible sans casser le reste du système. Mosquitto peut céder sa place à EMQX, Grafana à Apache Superset, Keycloak à Auth0 sur les déploiements cloud.

La plateforme est **offline-first** : seuls le chatbot IA et la traduction automatique DeepL nécessitent un accès internet, tout le reste fonctionne en autonomie une fois déployé. Cette propriété conditionne le déploiement OpEdge décrit en section 3.6.3, qui industrialise le *packaging* et la mise en service sur site client. La sous-section suivante

TABLE 3.5 – Interactions principales entre composants d'OpSee

De	**Vers**	**Canal et finalité**
Navigateur	NGINX	HTTPS, accès SPA, API, documentation
NGINX	Frontend	HTTP interne, service du bundle React
NGINX	FastAPI	HTTP interne, `/api/*`
NGINX	OAuth2-Proxy	`auth_request`, vérification de session
NGINX	Grafana	HTTP interne, `/grafana/*` (iframe)
OAuth2-Proxy	Keycloak	OIDC + PKCE S256, flow d'authentification
OAuth2-Proxy	Redis	TCP, stockage de session
FastAPI	TimescaleDB	SQL (asyncpg), lectures/écritures master et actual data
FastAPI	Keycloak	API Admin, synchronisation des groupes équipement/menu
FastAPI	API Anthropic	HTTPS, chatbot IA via le SDK Claude
Sidecar Ingestion	Mosquitto	MQTT, souscription aux topics capteurs
Sidecar Ingestion	Node-RED	OPC UA, souscription aux nœuds simulés
Sidecar Ingestion	TimescaleDB	SQL, écriture dans `a_tag_value`
Grafana	TimescaleDB	SQL, sources de données pour dashboards
Équipements IoT	Mosquitto	MQTT(S), publication de mesures

revient sur l'AI Assistant, seule composante qui sort du réseau local ; l'organisation de l'équipe et la gestion du code sont ensuite couvertes en section 3.6.

3.6 Environnement de développement

Les sections précédentes ont décrit ce qu'OpSee fait et comment il est construit. Cette section décrit comment l'équipe travaille : organisation, outils, tests, documentation et usage de l'IA dans le développement.

3.6.1 Organisation de l'équipe et méthodologie

L'équipe technique du projet OpSee réunit quatre personnes. Adam Bernard (ingénieur mécatronique) s'occupe du frontend, Nathan Moreau (ingénieur informatique) du backend, et Peter Mees (freelance IT, ayant déjà déployé des solutions MES en milieu industriel) de la base de données. Christophe Camerlynck, CEO d'AgiNtech et porteur de l'idée initiale, pilote le projet. Il fixe les priorités et valide les orientations fonctionnelles grâce à sa connaissance du terrain industriel.

Le projet est géré via un tableau Kanban sur GitHub Projects. Chaque tâche correspond à une issue GitHub, assignée à un ou plusieurs membres de l'équipe. Le travail est découpé en sprints d'une semaine. Chaque membre consacre en moyenne deux à quatre jours par semaine au développement du logiciel.

Chaque mercredi matin, l'équipe se réunit pendant environ une heure. On y fait le bilan de la semaine, on discute des problèmes rencontrés et on définit les priorités du sprint suivant. Entre les réunions, les échanges se font par Teams et WhatsApp.

Sur l'ensemble du projet, en cumulant les trois dépôts initiaux (`OpseeBack`, `OpseeFront`, `OpseeStack`, mai à octobre 2025) et le monorepo `OpSee` qui leur a succédé (octobre 2025 à mai 2026), 385 issues ont été créées, 968 commits produits et 300 pull requests fusionnées. Le monorepo concentre l'essentiel de l'activité (366 issues, 893 commits, 295 PRs sur sept mois), traduisant l'accélération produite par la consolidation des dépôts et l'intégration

des outils d'IA dans le processus (section 3.6.6). Le code source représente à ce jour environ **295 000 lignes** (hors fichiers générés et *dumps* de schéma) : 100 500 lignes Python côté backend, 162 000 lignes TypeScript et TSX côté frontend, 26 800 lignes SQL pour les migrations et fonctions stockées, et 5 000 lignes de scripts shell couvrant l'installation, le déploiement, le packaging des images *edge* et les mises à jour. La gestion du code source et le déploiement continu sont détaillés en section 3.6.2.

3.6.2 Gestion du code et déploiement continu

Le code source est aujourd'hui organisé en un monorepo unique hébergé sur GitHub. Cette consolidation est récente : jusqu'en octobre 2025, le projet vivait dans trois dépôts séparés (`OpseeBack`, `OpseeFront`, `OpseeStack`), un par couche technique. La fragmentation rendait chaque évolution touchant plusieurs couches coûteuse à coordonner, et limitait la visibilité dont les outils d'IA générative (Claude Code, GitHub Copilot) ont besoin pour proposer des modifications cohérentes : un agent qui ne voit qu'un dépôt à la fois ne peut pas, par exemple, vérifier qu'une migration SQL est bien consommée par le code Python qui l'appelle. Le retour d'expérience publié par Potvin et Levenberg (2016) et l'étude empirique conduite par Jaspan et al. (2018) chez Google convergent sur les bénéfices que nous avons cherchés en migrant : versioning unifié et source unique de vérité, partage de code et de dépendances simplifié, possibilité de modifications atomiques traversant plusieurs projets, et meilleure visibilité du code pour les nouveaux contributeurs. Pour OpSee, c'est ce dernier point couplé à la cohérence du contexte fourni aux agents IA qui a fait pencher la balance ; les trois anciens dépôts ont été archivés.

Chaque issue donne lieu à une branche dédiée, nommée `feature/NNN-description` ou `fix/NNN-description`. Une fois le développement terminé, la branche est fusionnée par pull request sur `dev`, la branche par défaut.

Le dépôt utilise deux branches permanentes. La branche `dev` reçoit les développements quotidiens et alimente un serveur de développement. La branche `main` correspond au serveur de démonstration, utilisé pour les démonstrations aux clients et partenaires

potentiels. Le passage de `dev` à `main` se fait par pull request lorsque l'équipe juge la version stable, à un rythme d'environ un déploiement par mois.

Le déploiement est automatisé par deux workflows GitHub Actions :

— **Deploy Dev** : déclenché à chaque push sur `dev`. Le *workflow* commence par exécuter la suite de tests Python (*pytest*, `tests/run_tests.sh`) en *job* préalable ; un échec à ce stade bloque le déploiement et préserve le serveur de toute version contenant un bug détecté par les tests. Si les tests passent, le code est synchronisé sur le serveur par `rsync` via SSH, puis un script de déploiement enchaîne trois étapes : il redémarre la stack Docker Compose pour appliquer les nouvelles images, il provisionne dans le *broker* Mosquitto les utilisateurs MQTT et leurs ACL à partir des secrets de l'environnement (ce qui permet aux capteurs et automates de s'authentifier auprès du *broker*), et il met à jour la documentation Docusaurus servie par NGINX.

— **Deploy Demo** : déclenché à chaque push sur `main`. Le processus est similaire, avec en plus une synchronisation du schéma et des données de configuration de la base de données depuis le serveur de développement.

Un troisième workflow, **Build Edge Images**, compile et publie sur le registre GHCR (*GitHub Container Registry*) les images Docker destinées aux déploiements edge. Ces images alimentent ensuite la chaîne de packaging et de déploiement décrite ci-dessous.

3.6.3 Déploiement sur OpEdge

Le déploiement et les mises à jour d'OpSee sur une appliance OpEdge reposent sur des scripts shell regroupés dans `infra/scripts/` du monorepo. Ils sont prévus pour s'exécuter même sans accès SSH permanent au site client.

Le déploiement initial accepte deux variantes selon la connectivité du site. La variante *online*, via `setup-edge-online.sh`, produit un bundle léger d'environ 1 Mo qui ne contient que la configuration et les scripts ; les images Docker sont tirées depuis GHCR à l'exécution sur l'OpEdge. La variante *offline*, via `package-edge.sh`, emporte les images

Docker, les certificats partagés et un *dump* TimescaleDB plus Keycloak dans un *tarball* de plusieurs gigaoctets, transféré par support physique pour les ateliers sans connectivité sortante (cf. ENF-03). Le script `deploy-edge.sh` exécuté côté OpEdge enchaîne ensuite six étapes : chargement ou *pull* des images, fixation du domaine ou de l'IP dans le `.env`, génération des certificats TLS et MQTT, démarrage des bases et restauration des *dumps*, démarrage de la *stack*, puis affichage des informations post-déploiement. Une option `-from-step N` permet de reprendre à une étape donnée en cas d'interruption.

Les mises à jour suivent un flux séparé qui ne touche jamais aux données du client. Le script `package-edge-update.sh` produit un bundle limité au code applicatif, aux nouvelles images et aux migrations Flyway à appliquer ; il exclut les *dumps* de base, les données Grafana, les utilisateurs Mosquitto et les secrets. Côté OpEdge, `update-edge.sh` sauvegarde la base (`pg_dump` d'OpSee et Keycloak) ainsi que les volumes Grafana et Mosquitto, puis arrête les services applicatifs (*fastapi*, *frontend*, *ingestion*, *streamlit*, *oauth2-proxy*, NGINX, Telegraf, Grafana) en laissant la base et Keycloak actifs pour Flyway. Les nouvelles images Docker sont chargées via `docker load`, ce qui remplace les anciennes images du frontend, du backend et des autres services. Les fichiers de configuration du déploiement sont écrasés en place (`docker-compose.yml`, dossiers `config/`, `db/` pour les migrations Flyway, `scripts/`, `mosquitto_config/`, `keycloak_theme/`, `init-scripts/`), tandis que le répertoire `data/` (volumes PostgreSQL contenant les données TimescaleDB et Keycloak), le fichier `.env` et le dossier `shared-certs/` ne sont jamais touchés. La migration Flyway est ensuite exécutée via un profil Docker Compose dédié, suivie d'un redémarrage glissant de la *stack* (*rolling restart*) et de *health checks*. Les sauvegardes anciennes sont purgées après quelques cycles. Flyway n'applique que les migrations `V*.sql` non encore jouées, ce qui rend la procédure rejouable sans double exécution.

3.6.4 Stratégie de tests

La suite de tests d'OpSee s'appuie sur *pytest* côté backend et couvre trois niveaux complémentaires. Le premier rassemble plus de **74 modules de tests unitaires** (environ

1 660 fonctions) répartis dans `backend/FastApi/tests/` ; chaque module cible un *API*, un service ou un composant d'ingestion (parsers, transformations, collecteurs MQTT et OPC UA, gestionnaire Sparkplug B, *tag resolver*, écriture par lots). Les dépendances externes (base de données, broker MQTT, serveur OPC UA) sont remplacées par des objets factices, ce qui rend ces tests rapides (moins d'une seconde au total pour la plupart des modules) et utilisables comme *garde-fou* avant chaque *commit*.

Le deuxième niveau, dans `backend/FastApi/tests/integration/`, exécute 39 scénarios contre une instance PostgreSQL/TimescaleDB réelle. Chaque test ouvre une transaction qui est annulée à la fin, ce qui élimine les fuites de données entre exécutions et permet d'utiliser la base de développement comme cible sans la polluer. Ces tests valident le comportement bout-en-bout des calculs OEE (disponibilité, performance, qualité), des tendances de production et de l'agrégation par tranche temporelle, sur un jeu de données scénarisé (10 heures de production simulée, 720 pièces produites, 48 rebuts, 24 événements qualité manuels). Un rapport Markdown est généré automatiquement après chaque exécution.

Un troisième niveau cible directement les fonctions PL/pgSQL critiques sous la forme de fonctions de test SQL préfixées `f_t_*` (10 suites couvrant notamment `f_a_tag_value_get`, `f_a_oee_activity_trend`, `f_a_data_quality_report`, `f_m_server` et `f_m_translation_*`). Ces fonctions s'exécutent dans le moteur PostgreSQL lui-même, retournent une table `(test_name, passed, details)` et permettent de vérifier le comportement attendu sans repasser par la couche Python. Le banc d'essai de charge `tests/stress/` (scénarios ingestion, HTTP et combiné, déjà décrit en section 3.7.1) couvre la dimension performance.

Le *workflow* GitHub Actions `Deploy Dev` (section 3.6.2) déclenche la suite *pytest* unitaire à chaque *push* sur `dev` et bloque le déploiement en cas d'échec. Les tests d'intégration et le banc de charge sont lancés à la demande, principalement avant les passages de `dev` vers `main` et lors des campagnes de mesure. Le frontend, en revanche, ne dispose pas encore de suite automatisée : sa validation repose actuellement sur des relectures manuelles et sur la couverture indirecte fournie par les tests d'API qu'il consomme. La mise en place

d'une suite *Playwright* ou *Vitest* fait partie des évolutions identifiées pour l'après-MVP.

3.6.5 Documentation

Plusieurs plateformes de documentation ont été comparées : générateurs de sites statiques (Docusaurus, VitePress, MkDocs, ...) et wikis dynamiques (Wiki.js, BookStack, Docmost, ...). Les wikis offrent une édition plus accessible pour les non-développeurs, mais nécessitent une base de données et un ou plusieurs conteneurs supplémentaires. Docusaurus a été retenu pour trois raisons : le support multilingue natif (un dossier par langue), la légèreté du déploiement (le site est compilé en fichiers HTML servis par NGINX, sans base de données supplémentaire, pour une image Docker d'environ 30 Mo) et la compatibilité avec le workflow de développement (les pages sont des fichiers Markdown versionnés dans le monorepo).

Le site compte 85 pages. Le guide utilisateur en constitue l'essentiel (67 pages), organisé par module : production, cockpit, équipements, personnel, recettes, administration. Chaque module commence par un parcours de prise en main, suivi de pages détaillées par fonctionnalité, accompagnées de captures d'écran. La page d'accueil propose cinq parcours de lecture selon le profil (opérateur, superviseur, manager, administrateur ou développeur) ainsi qu'un parcours « prendre OpSee en main en 10 minutes » pour les visiteurs pressés. Le reste du site couvre l'architecture du système (6 pages), les concepts MES et OEE (6 pages) et un guide développeur (4 pages sur le setup local, la structure du monorepo et les conventions de code).

Le site est déployé automatiquement à chaque push sur `dev` via le script de déploiement décrit en section 3.6.2. En complément, des README techniques sont disponibles dans les sous-dossiers du dépôt (backend, proxy NGINX, configuration MQTT, procédures de backup). L'API est aussi documentée automatiquement par FastAPI : à partir des annotations de type Python et des modèles Pydantic, le *framework* génère une spécification OpenAPI servie sous `/docs` (interface Swagger UI interactive permettant de tester chaque *endpoint*) et `/redoc` (vue ReDoc orientée lecture). La documentation reflète au-

tomatiquement les changements de code, ce qui évite la dérive habituelle entre code et documentation d'API.

3.6.6 Utilisation de l'IA dans le processus de développement

L'équipe a intégré des outils d'IA générative dans son processus de développement, principalement Claude Code (Anthropic) dans VS Code et GitHub Copilot. Ces outils accélèrent la production de code, mais ne décident pas quoi construire. Les choix de conception, le périmètre fonctionnel et les priorités d'implémentation restent du ressort de l'équipe et sont définis lors des réunions hebdomadaires : l'expérience industrielle de Peter Mees et Christophe Camerlynck oriente les besoins métier et la priorisation des fonctionnalités, tandis que les choix d'architecture et de stack technique (FastAPI, TimescaleDB, React/Vite, OAuth2-Proxy + Keycloak, etc.) ont été pesés et tranchés par Adam Bernard et Nathan Moreau, sur base de leurs compétences respectives en ingénierie logicielle. L'IA n'arbitre aucune de ces décisions ; elle exécute des tâches dont le cadre, les conventions et les contraintes de qualité sont fixés par l'équipe en amont.

Deux systèmes d'agents spécialisés structurent cette utilisation. Le premier, destiné à GitHub Copilot, comprend quatre agents organisés en pipeline : un orchestrateur analyse l'issue GitHub, puis délègue séquentiellement à un agent base de données, un agent backend et un agent frontend. Chaque agent reçoit le contexte produit par le précédent.

Le second système, destiné à Claude Code, comprend sept agents : trois agents de développement (base de données, backend, frontend), deux agents de test (un par environnement), un agent expert MES/ISA-95 qui valide la conformité du modèle de données aux standards industriels et un agent de capture d'écran automatisée pour la documentation.

En pratique, l'équipe rédige d'abord une description de la fonctionnalité souhaitée, que l'IA transforme en issue GitHub structurée (description, état actuel du code, périmètre par couche, critères d'acceptation). Une fois l'issue validée, l'IA l'implémente en suivant le pipeline d'agents, et le résultat est revu avant d'être fusionné.

Les conventions du projet sont documentées dans un fichier de configuration central (`CLAUDE.md`) et dans les définitions des agents (environ 4 900 lignes au total). Cette documentation oriente le code généré vers les conventions du projet : nommage SQL, patterns frontend, structure backend et règles de sécurité.

3.7 Analyse critique des performances et des capacités

L'architecture décrite jusqu'ici doit tenir une charge réaliste sur du matériel d'*edge* modeste. Une suite de tests de charge dédiée a été développée pour mesurer ses limites, identifier les goulots et chiffrer l'effet des optimisations successives sur la capacité d'un déploiement OpEdge.

3.7.1 Méthodologie et environnement de test

La suite `tests/stress/` couvre trois scénarios complémentaires. Le scénario **ingestion** pilote un publieur MQTT haut débit (jusqu'à 10 000 messages par seconde, payloads JSON sur 50 tags pré-enregistrés) et mesure le débit en valeurs résolues effectivement écrites dans `a_tag_value`. Le scénario **HTTP** génère une charge concurrente (de 1 à 100 requêtes simultanées) sur trois familles d'*endpoints* : *lightweight* (`/api/health`, `/api/menu`, `/api/languages`), *medium* (`/api/equipment`, `/api/parameters`) et *heavy* (`/api/production/oee/dashboard/*`, agrégations temporelles). Le scénario **combiné** fait tourner les deux en parallèle pour observer la dégradation HTTP sous charge d'ingestion.

Le banc d'essai s'exécute en natif sur le serveur de développement (3 CPU, 4 Go RAM, profil représentatif d'un OpEdge en site client) parce qu'il est plus simple d'y déployer la suite et d'y travailler. La suite collecte toutes les deux secondes : CPU et mémoire de chaque conteneur (`docker stats`), connexions PostgreSQL actives et *idle* (`pg_stat_activity`), avancement des *workers* (table `m_worker`), compteurs de *staging* MQTT et latences HTTP par *endpoint* (p50, p95, p99). Le *broker* Mosquitto écoute

en **TCP non chiffré** sur le port 1883 ; les tests ne couvrent donc ni TLS ni mTLS, et les chiffres de débit ne tiennent pas compte de l'*overhead* de chiffrement présent en production. Quatre configurations sont comparées dans les mêmes conditions :

- **baseline** : architecture initiale (Telegraf en collecteur MQTT, parsing par fonctions SQL, pool `asyncpg` 5–20, pas de cache HTTP).
- **http_opt** : ajout d'un cache TTL en mémoire dans FastAPI sur les *endpoints* servant des données de référence stables à l'échelle de la minute (arborescence des équipements, structure de menu, profil utilisateur), cache NGINX *exact-match* sur les langues et *presets* temporels, pool `asyncpg` relevé à 10–80 connexions et `max_connections` PostgreSQL relevé de 50 à 200.
- **ingest_opt** : remplacement de Telegraf par un client *paho-mqtt* embarqué dans le processus FastAPI, parsing dans la couche Python, écriture directe dans `a_tag_value`.
- **fullstack_opt** : combinaison des deux précédentes, avec en plus le déport du collecteur MQTT dans un conteneur *sidecar* dédié (`opsee-ingestion`) et la réallocation CPU 2 → 1 sur TimescaleDB. Les deux cœurs précédemment réservés à la base sont redistribués : un pour FastAPI et un pour le *sidecar* d'ingestion.

3.7.2 Performance de la configuration de référence

Sur la configuration *baseline*, les tests font apparaître trois plafonds :

- **HTTP** : 204 req/s en débit soutenu à concurrence 25, latence médiane 110 ms ; au-delà, le pool `asyncpg` (max 20) sature et la latence p99 part en oscillations.
- **Ingestion** : 696 valeurs résolues par seconde au mieux, à 5 000 msg/s. Le CPU TimescaleDB plafonne à 96 % dès 1 000 msg/s. Cette valeur ne signifie pas que la base « a fini ses ressources » mais qu'un cœur entier est saturé par le *backend* unique exécutant `f_a_ingestion_mqtt_parse()` ; comme l'ingestion est portée par une seule connexion qui sérialise les écritures sur le *chunk* courant de `a_tag_value`, le second cœur alloué à TimescaleDB ne peut pas être utilisé pour accélérer ce travail. À 10 000 msg/s le pipeline s'effondre à 148 valeurs/s : pool `asyncpg` 5–

20 et `max_connections=50` saturent, le worker reçoit des erreurs de connexion, accumule du *backlog* dans `a_ingestion_mqtt`, et ne récupère plus.

— **Combiné** : 175 req/s à concurrence 25 sous une charge MQTT de 1 000 msg/s. À la même concurrence en HTTP pur, le *baseline* tient 204 req/s. Du côté ingestion, l'ajout de la charge HTTP fait chuter le débit du *worker* à 420 valeurs/s : seuls 16 800 messages sur les 39 700 publiés pendant le test sont effectivement résolus, le reste s'accumulant en *staging*. La base de données, déjà CPU-bound, partage son temps entre INSERT d'ingestion et requêtes HTTP.

Le goulot principal est la base de données : elle parse les payloads MQTT, répond aux requêtes HTTP et plafonne sur le même CPU.

3.7.3 Optimisations et gains mesurés

3.7.3.1 Couche HTTP : cache et dimensionnement du pool

L'essentiel du trafic de référence passe par trois *endpoints* : `/api/equipment` (arbre des équipements, traduit et filtré par permissions), `/api/menu` (structure de menu, traduite et filtrée par permissions) et `/api/profile` (profil utilisateur courant). Leur réponse est stable à l'échelle de la minute. Un cache TTL en mémoire associé à un `asyncio.Lock` par clé absorbe ces requêtes côté FastAPI, et NGINX reprend en *exact-match* les routes `/api/languages` et `/api/time/presets/`. Le pool `asyncpg` passe de 5–20 à 10–80 connexions et PostgreSQL accepte 200 connexions au lieu de 50. Ces valeurs ne sont pas arbitraires : sur la *baseline*, un pool plafonné à 20 sature dès la concurrence 25, alors que la nouvelle architecture doit absorber simultanément le trafic HTTP et les trois *workers* de fond. La marge restante (jusqu'à 200 connexions PostgreSQL) anticipe la configuration `fullstack_opt` décrite plus loin (section 3.7.3.3) : dans cette architecture seulement, le *sidecar* d'ingestion ouvre son propre pool de 80 connexions, ce qui porte le total côté application à 160, auquel s'ajoutent Keycloak, Grafana et les clients auxiliaires.

La figure 3.14 montre l'effet sur le débit HTTP pur : le pic passe de 204 req/s à concurrence 25 (*baseline*) à 357 req/s à concurrence 10 (*http_ opt*), soit un gain de 75 %.

La latence médiane suit le même mouvement : 51 ms → 27 ms à concurrence 10, et le gain est divisé par deux jusqu'à concurrence 50. Au-delà, le bénéfice s'érode : un pool `asyncpg` largement dimensionné expose la base à plus de connexions concurrentes et la latence remonte.

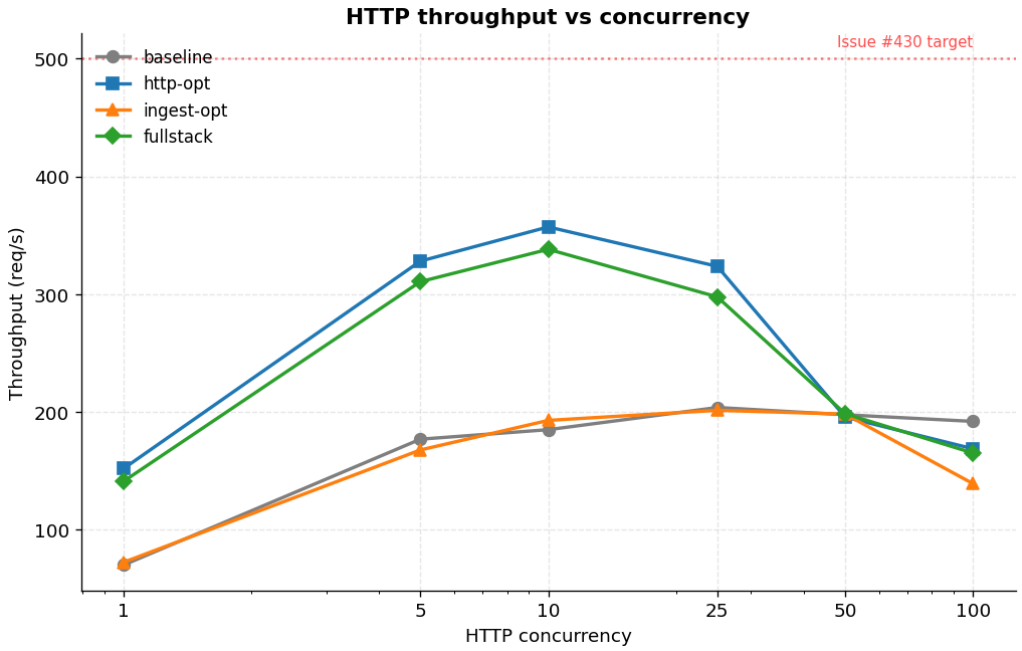


FIGURE 3.14 – Débit HTTP en fonction de la concurrence pour les quatre configurations testées

La figure 3.15 détaille la latence médiane par *endpoint* à concurrence 10 et rend visible le rôle exact du cache. Les routes mises en cache (`/api/menu`, `/api/time/presets/`, `/api/languages`, `/api/equipment/` dans la vue *equipment-list*, et `/api/profile`) voient leur latence chuter d'un facteur 3 à 8 selon la route entre *baseline* et `http_opt` (par exemple *equipment-list* : 137 ms → 40 ms ; *time-presets* : 34 ms → 4 ms). Les routes non cachées (*health*, *activity-trend*, *equipment-overview*) restent au même niveau : le cache ne les concerne pas, mais le pool agrandi évite leur dégradation. Les configurations `ingest_opt` et *baseline* se confondent (mêmes valeurs sur les routes cacheables), confirmant que le gain HTTP vient bien du cache et non du collecteur direct.

Un effet collatéral non prévu apparaît côté ingestion (figure 3.16) : à 10 000 msg/s,

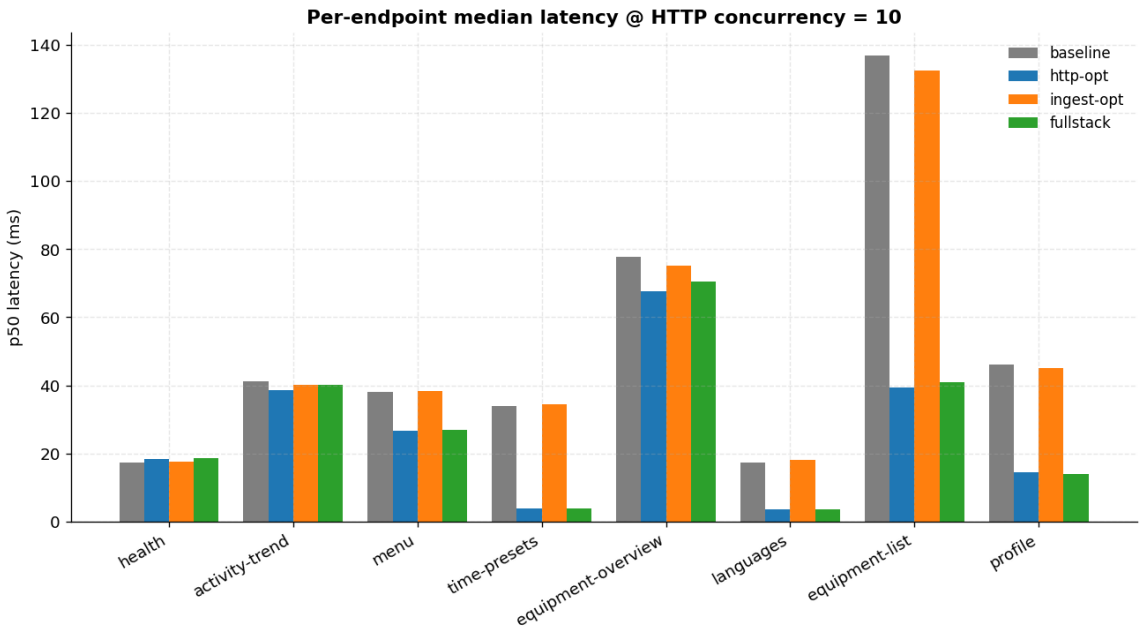


FIGURE 3.15 – Latence médiane par *endpoint* à concurrence 10 pour les quatre configurations

`http_opt` soutient 722 valeurs/s contre seulement 148 pour le *baseline*, alors que la chaîne d'ingestion (Telegraf + parsing SQL) est identique dans les deux configurations. L'explication tient au pool et à `max_connections` : avec 5–20 connexions et `max_connections=50`, le *worker* de parsing finit par concurrencer Keycloak, Grafana et les autres clients pour les rares slots disponibles, reçoit des erreurs de connexion et entre en *backoff*, ce qui explique l'effondrement du *baseline*. Le pool relevé à 10–80 et la limite serveur portée à 200 suppriment cette saturation : le *worker* ne perd plus de connexion et atteint le plafond imposé par le cœur de base unique sollicité.

3.7.3.2 Couche ingestion : collecteur Python direct

Le pipeline *baseline* exécute quatre opérations SQL par message : INSERT dans `a_ingestion_mqtt`, SELECT pour réclamer le lot, UPDATE du statut, INSERT final dans `a_tag_value`. Le *worker* sondant la *staging* toutes les dix secondes par lots de 500 lignes ne peut pas tenir un débit MQTT haut sans creuser un *backlog*.

L'optimisation `ingest_opt` embarque un client *paho-mqtt* dans le processus FastAPI : la souscription MQTT, le parsing par `FormatMatcher`, l'application des transformations et l'écriture par lots de 500 lignes (ou toutes les 200 ms) tournent côté Python, et il ne reste qu'un seul INSERT par message côté base de données. La figure 3.16 compare les débits soutenus : à 10 000 msg/s, le *baseline* chute à 148 valeurs/s tandis que `ingest_opt` maintient 2 183 valeurs/s, soit un facteur 14,8. Le CPU TimescaleDB tombe simultanément de 97 % à 89 %. Il est désormais limité par les écritures et la maintenance d'index, plus par le parsing.

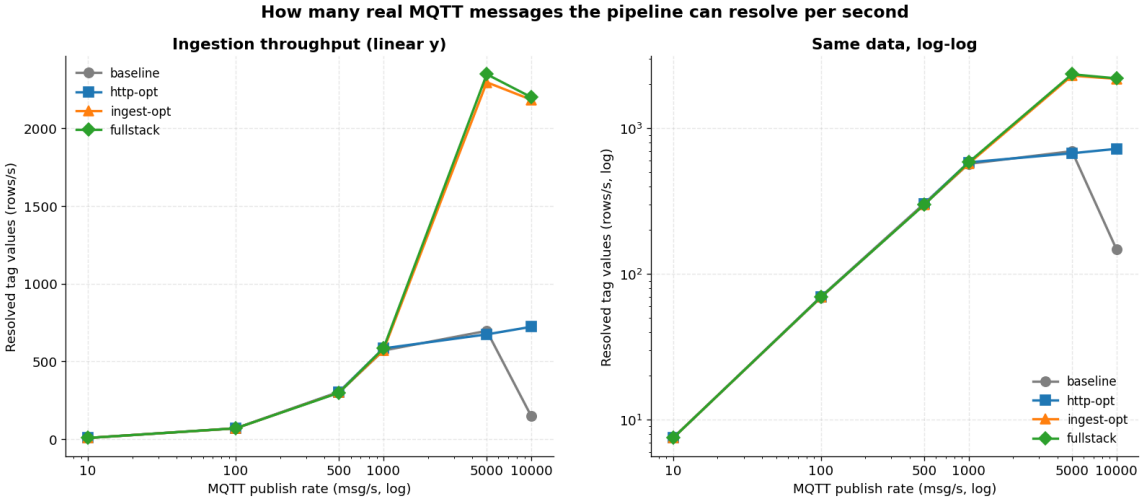


FIGURE 3.16 – Débit d'ingestion (valeurs résolues écrites en base de données) pour les quatre configurations

3.7.3.3 Architecture finale : isolation du collecteur et redécoupage CPU

Embarquer le collecteur MQTT dans le processus FastAPI a un coût indépendant du cache HTTP. À 5 000 msg/s combinés à une concurrence 25, le *baseline* (collecteur Telegraf hors processus, sans cache) tient 180 req/s alors que `ingest_opt` (collecteur *paho-mqtt* dans le même processus que FastAPI, toujours sans cache) chute à 109 req/s, soit une perte de 39 % imputable au déplacement du collecteur dans le processus Python. La cause est le verrou global de l'interpréteur (*GIL*) : ingestion et HTTP sérialisent leur exécution dans

le même processus. `fullstack` (collecteur dans un *sidecar* séparé, avec cache) restaure 190 req/s sur la même charge ; le cache contribue aussi à ce chiffre, mais le retour au-dessus du *baseline* confirme que l'isolation processus suffit à éliminer la contention GIL.

La configuration `fullstack_opt` déporte le collecteur MQTT dans un conteneur *sidecar* dédié (`opsee-ingestion`, image FastAPI lancée avec un point d'entrée minimal `ingestion_launcher.py`). Une fois le parsing sorti de la base, le CPU TimescaleDB redescend en dessous de 40 % jusqu'à 1 000 msg/s (contre 96 % en *baseline*) et libère un budget CPU à redistribuer côté application. Sur un hôte 3 CPU, l'allocation passe de 2 CPU pour la base et 1 CPU partagé pour le reste à 1 CPU pour la base, 1 CPU pour FastAPI et 1 CPU pour le *sidecar* d'ingestion. Le passage à 1 CPU pour la base ne sacrifie rien : l'ingestion étant portée par une seule connexion qui sérialise les écritures sur le *chunk* courant de `a_tag_value`, un cœur supplémentaire n'aurait servi qu'aux travaux annexes (autovacuum, WAL writer).

3.7.3.4 Répartition de la charge CPU

La figure 3.17 compare la consommation CPU pic de chaque conteneur à 1 000 msg/s pour les quatre configurations. Le *baseline* et `http_opt` laissent la base à 95–96 %, c'est-à-dire un cœur saturé par le processus PostgreSQL qui exécute le parsing SQL pour le *worker* d'ingestion. `ingest_opt` ramène la base à 38 % : il ne reste qu'un INSERT par message côté DB, mais le coût de parsing migre dans le processus FastAPI (22 %) ce qui le met en compétition directe avec les requêtes HTTP. `fullstack_opt` déplace ce coût dans le *sidecar* `opsee-ingestion` (25 %) et laisse FastAPI quasi-libre (1 %). Le CPU total tombe de 108 % (*baseline*) à 60 % pour `ingest_opt` et `fullstack`, étalé sur trois conteneurs au lieu d'un.

3.7.3.5 Synthèse comparative des quatre configurations

Le tableau 3.6 et la figure 3.18 résument le comportement de chaque configuration sur les cinq indicateurs clés.

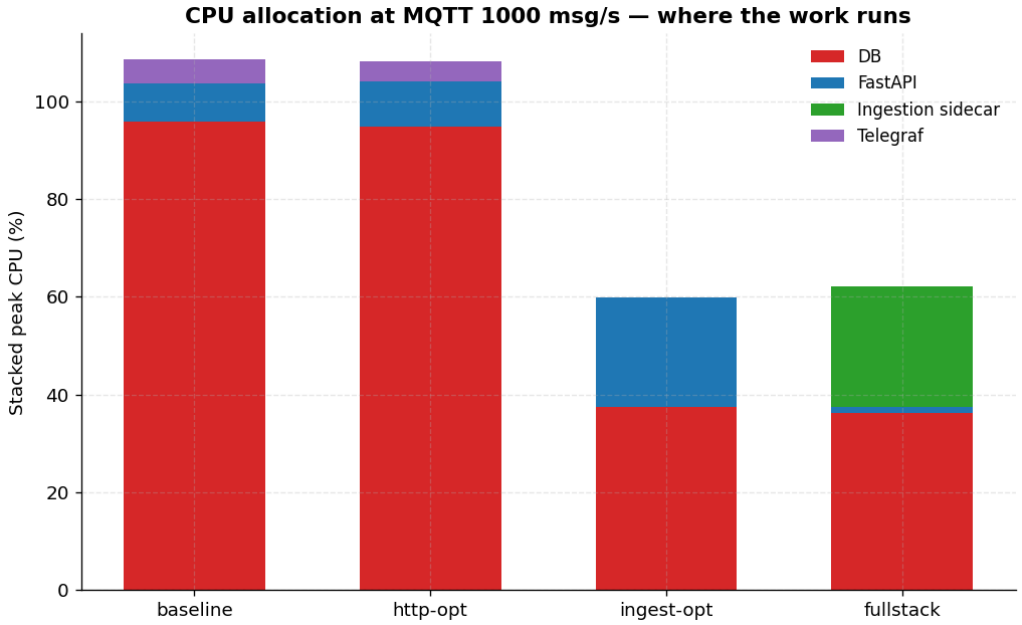


FIGURE 3.17 – Consommation CPU pic par conteneur à 1 000 msg/s, par configuration

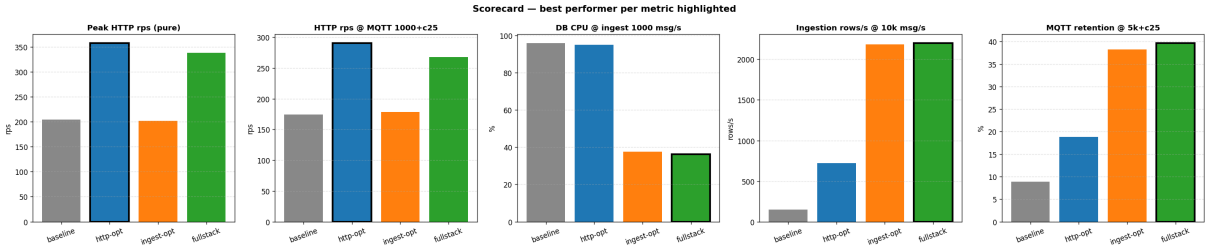


FIGURE 3.18 – Carte de performance comparée des quatre configurations sur cinq indicateurs

TABLE 3.6 – Synthèse comparative des quatre configurations testées

Indicateur	**baseline**	**http_opt**	**ingest_opt**	**fullstack**
Débit HTTP pur, pic (req/s)	204	**357**	202	338
Débit HTTP @ MQTT 1k, c=25 (req/s)	175	**291**	179	268
CPU base @ 1k msg/s (%)	96	95	38	**37**
Débit ingestion @ 10k msg/s (val/s)	148	722	2 183	**2 200**
Retention MQTT @ 5k, c=25 (%)	8,8	18,8	38,3	**39,7**

Sur le HTTP pur, `http_opt` domine légèrement (357 req/s à c=10 contre 338 pour `fullstack`, soit +5 %) grâce au cache et au pool agrandi, sans avoir à isoler l'ingestion. `fullstack` suit de près. Sur le HTTP combiné à charge MQTT modérée (MQTT 100/1000 + c=25), `http_opt` reste devant (308 et 291 req/s contre 302 et 268). À pression plus élevée la hiérarchie change : MQTT 1000 + c=50 voit `fullstack` prendre la tête (194 req/s contre 159 pour `http_opt`, +22 %), grâce à l'isolation du collecteur dans son propre processus. À MQTT 5000 les configurations actives convergent : c=25 voit `http_opt` et `fullstack` à égalité (189 et 190 req/s), c=50 redonne l'avantage à `http_opt` (136 contre 113–115) et c=100 ramène toutes les configurations dans la fourchette 107–117 req/s.

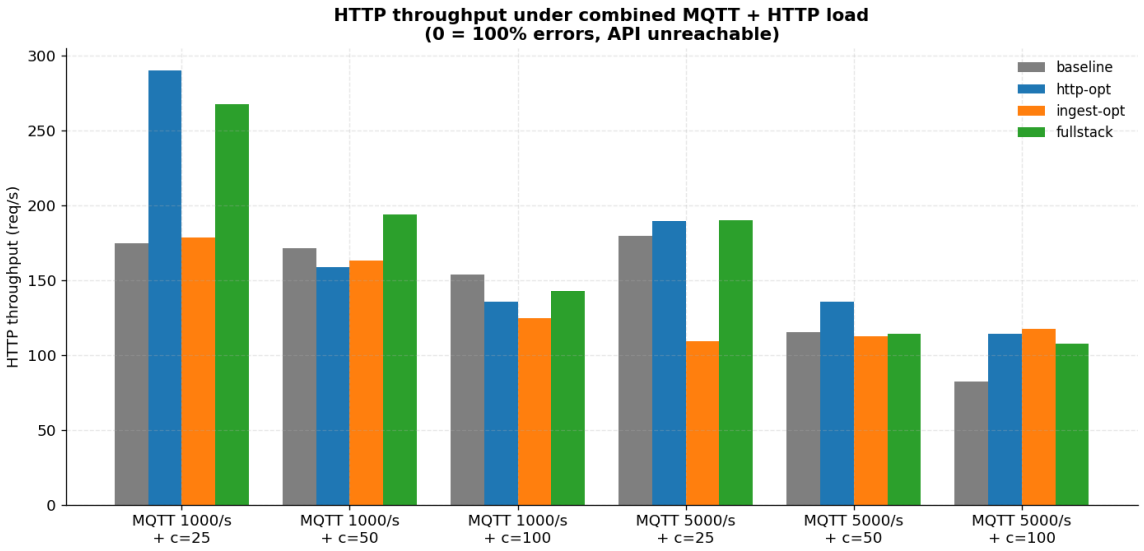


FIGURE 3.19 – Débit HTTP sous charge combinée MQTT + HTTP pour les quatre configurations

Côté ingestion sous concurrence, la mesure complète à MQTT 5000 msg/s avec drain du pipeline permet de chiffrer la résistance de chaque configuration. À concurrence 25, le *baseline* ne traite que 8,8 % des messages publiés : le *worker* SQL et les requêtes HTTP se disputent les connexions, le pipeline s'effondre. `http_opt` double cette retention à 18,8 % grâce au pool agrandi mais reste limité par le parsing SQL. `ingest_opt` et `fullstack` montent respectivement à 38,3 % et 39,7 %. Même hiérarchie à c=50 et c=100 : `fullstack`

maintient une retention de 28–31 % là où `http_opt` stagne à 18 % et le *baseline* oscille entre 19 % et 20 %. La perte qui demeure (60 % à c=25, 70 % à c=50/100) vient de la saturation du nœud 3 CPU à 5 000 msg/s ; le sidecar d'ingestion applique alors sa politique *drop-oldest* sur sa file interne pour ne pas bloquer le processus, conformément au compromis assumé en section 3.7.5.

Sur les cinq indicateurs du tableau 3.6, `fullstack` arrive première sur trois (CPU base, débit ingestion à 10 k msg/s, retention MQTT sous concurrence) et seconde sur les deux autres (HTTP pur et HTTP sous MQTT modéré, à 5–8 % derrière `http_opt`). Les autres configurations n'ont pas cette couverture : `http_opt` domine le HTTP mais reste 3,3 × plus lente que `fullstack` en ingestion à 10 k msg/s et deux fois plus faible en retention sous concurrence ; `ingest_opt` égale `fullstack` en ingestion mais paie la contention GIL en HTTP combiné. `fullstack` est donc la configuration retenue : elle est la meilleure côté ingestion, pur comme combiné, et son débit HTTP reste très proche du meilleur dans tous les régimes testés.

3.7.4 Capacité de production atteignable

La capacité réaliste mesurée à 5 000 msg/s sous charge HTTP de concurrence 25 (1 945 valeurs résolues par seconde, configuration `fullstack`) se traduit directement en nombre d'équipements industriels supportables. C'est le chiffre que l'on retient pour dimensionner un déploiement réel, plutôt que le pic théorique de 2 200 val/s mesuré en ingestion pure sans aucune requête HTTP, qui ne correspond à aucun scénario de production. La cadence pertinente pour un MES n'est pas la même que pour un SCADA : la norme ISO 22400, qui définit les KPI pour le *manufacturing operations management*, prévoit trois cadences de calcul des indicateurs : *real-time* (après chaque événement d'acquisition), *on demand* (sur requête) et *periodically* (toutes les N périodes, par exemple une fois par jour) (Ramis Ferrer et al., 2018). Dans la pratique relevée par Zhu et al. (2018), les KPI utiles aux opérateurs et superviseurs sont quasi systématiquement calculés « on demand, periodically » : ni l'OEE, ni la traçabilité des arrêts, ni les indicateurs

de qualité ne nécessitent la cadence sub-seconde d'un SCADA. Une acquisition à l'échelle de la seconde par tag est donc largement suffisante.

Sur cette base, et pour un équipement publiant 10 tags à 1 Hz (soit 10 messages/s par équipement), un nœud OpEdge supporte **environ 195 équipements** sous charge HTTP courante. Si la cadence est ramenée à 0,2 Hz, granularité courante pour les variables peu dynamiques relevées dans les KPI ISO 22400, la capacité monte à **environ 970 équipements par nœud**. Pour comparaison, le *baseline* non optimisé sous la même charge combinée ne soutient que 437 valeurs/s, soit **quatre fois moins d'équipements** pour le même matériel ; et une fois saturée par la concurrence HTTP, sa retention chute à 8,8 % des messages publiés. Cette marge autorise un déploiement multi-équipements sur un boîtier industriel modeste ; sans les optimisations, il faudrait surdimensionner le matériel ou fragmenter la charge sur plusieurs nœuds.

Ces chiffres correspondent au transport MQTT en clair retenu pour le banc d'essai. Gavriilidis et al. (2025) mesurent sur Raspberry Pi 4B (matériel comparable à OpEdge) un *overhead* CPU de l'ordre de 5 à 6 % sur la phase de chiffrement en régime établi (TLS 1.3, ChaCha20_Poly1305 ou AES_256_GCM, sessions persistantes), avec un pic transitoire pouvant atteindre 37 % durant la poignée de main. Pour une connexion MQTT longue durée comme celle d'OpSee, le coût dominant est celui du régime établi : par prudence, on retient une marge de 10 % sur la capacité d'ingestion projetée. Les 195 équipements à 1 Hz redescendent ainsi autour de **175 équipements** sous TLS, et les 970 à 0,2 Hz autour de **875**. La consommation mémoire supplémentaire (de l'ordre de 1,5 MB par client) reste négligeable sur le profil OpEdge.

3.7.5 Goulots résiduels et pistes d'amélioration

Trois limites encadrent ces résultats.

— **Profil matériel unique.** Tous les tests tournent sur 3 CPU et 4 Go de RAM. Au-dessus de 8 cœurs, la recommandation « 1 CPU pour la base » s'inverserait, et l'allocation par défaut redevient 2 CPU pour TimescaleDB.

— **Transport et formats non couverts.** Les tests utilisent MQTT plain TCP avec des payloads JSON. Trois variantes restent à caractériser sur le matériel cible : (i) TLS et mTLS, dont l'*overhead* théorique est faible (Gavriilidis et al., 2025) mais doit être confirmé sur OpEdge ; (ii) le décodage Sparkplug B binaire (Protobuf), qui double approximativement la charge CPU côté collecteur ; (iii) l'OPC UA direct, implémenté après la mise au point de la procédure de tests, dont la suppression définitive des hypertables de *staging* historiques dépend.

— **Politique de *back-pressure*.** À 5 000 msg/s, la file interne du collecteur (100 000 places, politique *drop-oldest*) écarte volontairement les messages les plus anciens pour ne pas bloquer le processus. La disponibilité est préservée au prix d'un comptage approximatif sous *burst* extrême.

Chapitre 4

Aspects juridiques

Résumé exécutif. OpSee est constituée en SRL belge, retenue pour sa flexibilité (pas de capital minimum depuis la réforme du CSA de 2019) et pour la limitation de responsabilité des fondateurs aux apports. Le chapitre couvre la constitution (statuts notariés, plan financier obligatoire, dépôt à la Banque-Carrefour des Entreprises et à la Banque Nationale dans les délais légaux), la gouvernance bi-pôle technique/business, les obligations comptables (PCMN, dépôt annuel BNB, schéma abrégé applicable aux petites entreprises), les contrats clés (statuts, RH, prestations, licences AGPLv3 et propriétaire, abonnement, partenaires Bronze/Silver/Gold, SLA cloud), la situation particulière des fondateurs étudiants (contrat préalable qui encadre l'attribution future de parts sociales), la responsabilité de l'éditeur et les assurances associées (RC Pro, cyber-risques, D&O à terme). Sur la propriété intellectuelle, un audit dédié de la *stack* confirme qu'environ 98 % des composants tiers sont sous licence permissive ou copyleft faible compatible avec le modèle *open-core* ; quatre cas de vigilance (Grafana en AGPLv3, Redis en SSPL/RSALv2 depuis 7.4, TimescaleDB sous Apache+TSL, Psycopg en LGPL avec exception OpenSSL) sont neutralisés par des choix d'architecture déjà appliqués. Les régulations sectorielles applicables aux MES (ISA-95, RGPD, NIS 2, CRA,

FSMA pour l'agroalimentaire) sont déclinées au cas par cas, et la sortie de données vers l'API Anthropic est qualifiée juridiquement (relation *controller-to-processor*, encadrement par DPA et SCCs de l'article 28 du RGPD, obligations de transparence de l'AI Act article 50, mode *Bring Your Own key* pour les régimes les plus stricts).

4.1 Véhicule juridique de la société

Le développement du projet OpSee requiert un cadre juridique solide, capable d'assurer à la fois la protection du logiciel, la gestion des licences, les relations contractuelles avec les clients et partenaires, ainsi que la responsabilité limitée des fondateurs. Dans ce contexte, le véhicule juridique retenu est la Société à Responsabilité Limitée (SRL), forme la plus appropriée pour une jeune entreprise technologique en Belgique (Belgique, 2019 ; SPF Économie, s. d.).

La SRL constitue aujourd'hui la structure privilégiée pour les start-ups belges en raison de sa grande flexibilité et de son cadre réglementaire moderne. Contrairement à l'ancienne SPRL, elle ne nécessite aucun capital minimum, ce qui facilite sa création tout en offrant une responsabilité limitée aux fondateurs : chacun n'est engagé qu'à hauteur de son apport. Ce point est particulièrement crucial dans un projet tel qu'OpSee, opérant dans un domaine stratégique comme les logiciels industriels, où des risques opérationnels, techniques ou contractuels peuvent survenir (Belgique, 2019 ; Liantis, s. d.).

Au niveau opérationnel, la SRL permet à OpSee de détenir l'ensemble des droits de propriété intellectuelle liés au logiciel, sous réserve de leur cession formelle par chaque contributeur (cf. section 4.8). Une fois cette concentration des droits assurée, le périmètre couvert inclut les modules gratuits open source publiés sous licence AGPLv3, les modules premium distribués sous licence propriétaire, ainsi que la marque OpSee. La SRL devient alors l'entité juridique titulaire qui accorde les licences d'utilisation, facture les abonnements et assure la conformité des partenaires Bronze, Silver et Gold. Elle est également

responsable du respect du RGPD, des conditions générales d'utilisation, ainsi que de la gestion des contrats d'abonnement du logiciel.

La SRL offre en outre une structure d'actionnariat souple, compatible avec l'entrée ultérieure de partenaires stratégiques ou d'investisseurs. Dans le cadre d'OpSee, elle peut accueillir aussi bien l'entreprise Agintech, apportant son expertise industrielle, que nous, les étudiants issus de l'UCLouvain, tout en permettant à l'avenir des levées de fonds ou l'émission de parts supplémentaires.

Enfin, la SRL constitue un véhicule juridique adapté à la mise en place d'un réseau de partenaires. Grâce à sa capacité à signer des contrats commerciaux, fiscaux et technologiques, elle peut structurer efficacement les relations avec les intégrateurs certifiés, gérer les commissions et assurer un cadre légal clair pour la distribution du logiciel.

En résumé, la SRL fournit à OpSee un cadre juridique adapté aux spécificités d'une start-up technologique développant un logiciel open-core. Elle protège les fondateurs, sécurise la propriété intellectuelle et permet une croissance progressive du projet.

4.2 Constitution de la société

La constitution d'OpSee correspond au processus juridique par lequel les fondateurs du projet formaliseront leur volonté d'exercer ensemble une activité économique commune, en l'occurrence le développement et la commercialisation d'un logiciel MES open-core et modulaire. Comme pour toute création d'entreprise, cette démarche implique la réunion de plusieurs éléments essentiels : un accord entre associés, la rédaction d'un contrat de société, le choix d'une forme juridique adaptée et le respect des formalités légales qui donnent naissance à la personnalité morale de la société.

OpSee prend forme dès lors que les futurs associés expriment clairement leur intention de collaborer dans un but commun et de partager les bénéfices comme les risques. Dans ce cas précis, la société résulte de la volonté conjointe d'AgiNtech, une entreprise expérimentée dans les solutions industrielles, et d'une équipe d'étudiants de l'UCLou-

vain, apportant innovation, dynamisme et compétences technologiques. Ce consentement mutuel est concrétisé dans un contrat de société qui fixe les droits, les apports et les obligations de chacun. Comme l'exige le droit des sociétés, cet accord doit être exempt de tout vice de consentement, tel que l'erreur, le dol ou la violence, afin d'être pleinement valable.

La capacité des associés constitue également une condition essentielle. Dans le cadre d'OpSee, les fondateurs sont soit des personnes morales, comme Agintech, soit des personnes physiques majeures et capables, ce qui assure la conformité du projet aux exigences légales relatives à la capacité juridique des associés et à la représentation des personnes morales.

La rédaction des statuts représente l'étape centrale de la constitution. Ces statuts définissent la forme juridique – en l'occurrence la Société à Responsabilité Limitée (SRL) –, le siège social en Belgique, la durée de la société, le capital social, l'objet social ainsi que la répartition des parts entre les associés. Ils déterminent également les pouvoirs attribués au gérant, les modalités de prise de décision, les conditions de transfert de parts et, le cas échéant, des clauses spécifiques liées à la propriété intellectuelle du logiciel OpSee, élément crucial du projet. La SRL constitue une forme particulièrement adaptée pour une start-up technologique, en raison de sa grande flexibilité, de l'absence d'exigence de capital minimum et de la limitation de la responsabilité des fondateurs à leurs apports.

La constitution d'OpSee exige également le respect des formalités légales, telles que la rédaction et la signature des statuts (souvent par acte notarié), la préparation du plan financier obligatoire démontrant la viabilité du projet sur au moins deux ans, le dépôt des fonds en cas d'apport en numéraire, la publication des statuts au Moniteur belge, l'immatriculation à la Banque-Carrefour des Entreprises (BCE) et l'obtention d'un numéro de TVA. Une fois ces démarches accomplies, OpSee acquiert la personnalité morale, ce qui lui permet d'ouvrir un compte bancaire professionnel, de signer des contrats et d'agir juridiquement en son propre nom (Belgique, 2019 ; SPF Économie, s. d.).

L'objet social d'OpSee doit être réel, licite et suffisamment précis. Il concerne prin-

cipalement le développement, la commercialisation, l'intégration et la maintenance de solutions logicielles MES ainsi que des services liés tels que le support, la formation et le consulting. Le siège social, quant à lui, fixe la domiciliation juridique de l'entreprise et détermine les juridictions compétentes en cas de litige.

En définitive, la constitution d'OpSee marque la transformation du projet en une entité juridique dotée de droits et d'obligations propres. Elle formalise les règles internes de fonctionnement, établit les capacités et responsabilités des associés, protège la propriété intellectuelle liée au logiciel, structure les relations commerciales et permet à l'entreprise d'exercer légalement ses activités. Cette étape confère à OpSee une personnalité morale distincte de celle de ses membres.

4.3 Gouvernance et administration

La gouvernance et l'administration d'OpSee se reposent sur une structure qui a été pensée pour offrir à la start-up un cadre décisionnel clair tout en préservant l'agilité indispensable au développement d'un logiciel technologique en phase de lancement.

OpSee s'appuie sur deux pôles principaux, dont la collaboration constitue la base même de sa gouvernance interne. La première est l'équipe technique, composée d'Adam et Nathan, deux étudiants ingénieurs civils de l'UCLouvain, responsables du développement du logiciel, de la conception des fonctionnalités clés et de la mise en place des architectures informatiques du système MES. Cette équipe est supervisée par Peter, ingénieur expérimenté en logiciels MES et apportant son expertise industrielle. Il facilite l'encadrement technique, accompagne les décisions complexes liées au produit et assure que les développements sont alignés avec les standards industriels et les besoins réels des PME.

La seconde est l'équipe business, formée par Juliette et Louis, deux étudiants en gestion à l'UCLouvain. Leur rôle couvre l'analyse du marché, la stratégie commerciale, la création du modèle économique, la communication, la gestion des partenaires et la préparation du

déploiement commercial. Cette équipe est dirigée par Christophe, CEO d'AgiNtech et cofondateur du projet, qui apporte son expérience entrepreneuriale, sa vision stratégique et sa connaissance des enjeux industriels. Bien qu'il supervise principalement l'aspect business, Christophe est également impliqué dans le suivi technique : il vérifie régulièrement l'avancement du développement, participe aux réunions techniques et s'assure que les choix technologiques restent cohérents avec la stratégie globale (Drouot, 2024 ; KPMG Law Belgium, 2020).

Cette organisation crée une gouvernance intégrée, où les deux dimensions essentielles d'OpSee (la technique et le business) avancent de manière coordonnée. Christophe occupe un rôle central en tant que décideur final, conformément aux pratiques des jeunes entreprises à structure légère. Toutefois, sa posture est collaborative : il veille à consulter chaque membre de l'équipe sur les questions liées à l'évolution du projet, encourage les échanges transversaux et soutient les propositions provenant aussi bien de la partie technique que de la partie business. Cette dynamique garantit que les décisions reflètent à la fois les besoins du marché, les contraintes techniques et la vision à long terme de la société.

L'administration quotidienne de la société repose donc sur une combinaison de rigueur et de flexibilité. Les réunions régulières entre les deux pôles permettent de suivre l'avancement du développement logiciel, d'adapter la stratégie commerciale, de préparer les tests utilisateurs et d'anticiper les futures itérations du produit. Ce mode de fonctionnement assure une cohérence permanente entre le développement technologique et les impératifs commerciaux, élément indispensable dans une start-up qui combine modèle open source, modules propriétaires et mise en place d'un réseau de partenaires intégrateurs.

À mesure qu'OpSee grandira, cette gouvernance pourra évoluer vers des structures plus formalisées, comme un comité stratégique ou l'arrivée d'investisseurs. À ce stade de développement, l'organisation actuelle offre une capacité décisionnelle rapide tout en assurant la continuité du projet.

4.4 Obligations comptables

En tant que Société à Responsabilité Limitée (SRL) constituée en Belgique, OpSee est soumise à un ensemble d'obligations comptables et financières strictement encadrées par le Code des sociétés et des associations (CSA) ainsi que par les normes comptables belges. Ces obligations ont pour objectif d'assurer la transparence financière de la société, la fiabilité de ses informations économiques et la protection des associés et des tiers, notamment les partenaires, clients, fournisseurs et administrations publiques.

OpSee doit tout d'abord tenir une comptabilité régulière, complète et fidèle, conforme au plan comptable minimum normalisé (PCMN) (De Coster & Procureur, 2021). Cette comptabilité doit refléter, de manière sincère, toutes les opérations de la société : ventes, achats, abonnements, prestations de services, salaires, investissements technologiques, dépenses d'hébergement logiciel, amortissements, dettes éventuelles ou encore revenus issus des licences et modules premium. L'ensemble des pièces justificatives (factures, extraits bancaires, contrats, notes de frais, conventions partenaires) doit être conservé pendant minimum sept ans, conformément aux obligations légales (Belgique, 2013 ; Commission des Normes Comptables, s. d.).

En tant que SRL, OpSee est tenue d'établir chaque année des comptes annuels, comprenant le bilan, le compte de résultats et l'annexe. Étant une jeune start-up avec une structure légère, OpSee pourra se conformer au schéma abrégé, réservé aux petites entreprises répondant aux critères de taille fixés par la loi (chiffre d'affaires inférieur à 9 millions €, total du bilan inférieur à 4,5 millions €, et moins de 50 travailleurs). Ce format simplifié permet une présentation allégée, adaptée aux PME et start-ups en phase de lancement.

Les comptes annuels d'OpSee doivent être approuvés par l'assemblée générale des associés dans les six mois suivant la clôture de l'exercice comptable. Une fois approuvés, ils doivent être déposés auprès de la Banque Nationale de Belgique (BNB) dans un délai légal de trente jours (Banque nationale de Belgique, s. d.). Ce dépôt assure la publicité des

comptes et permet aux tiers d'accéder aux informations financières essentielles relatives à la société.

OpSee est également soumise à des obligations fiscales, telles que la déclaration à l'impôt des sociétés, le dépôt des déclarations TVA si l'activité y est soumise, ainsi que le respect des règles en matière de précompte professionnel lorsqu'elle emploiera du personnel (Drouot, 2024). Si la société accorde des abonnements, vend des services ou propose des modules logiciels premium, les factures doivent respecter toutes les mentions obligatoires prévues par le droit belge (Belgique, 1992 ; SPF Finances, 2015).

Dans le cadre de ses investissements immatériels, notamment le développement logiciel, OpSee doit veiller à appliquer correctement les règles relatives aux amortissements des immobilisations incorporelles. Le code source, les modules propriétaires et les actifs informatiques doivent être évalués selon des méthodes comptables appropriées, reflétant leur valeur réelle et leur durée d'utilisation estimée. Les dépenses liées à la propriété intellectuelle (dépôts de marque, conseils juridiques), à l'hébergement et au développement logiciel peuvent également être comptabilisées suivant les règles applicables aux actifs immatériels ou aux charges d'exploitation.

Les obligations comptables d'OpSee impliquent également un suivi régulier de sa trésorerie, un contrôle interne minimal et une communication transparente avec l'expert-comptable ou le fiduciaire chargé de l'accompagner. Ce suivi permet à la société d'anticiper ses besoins financiers, de construire un plan de cash-flow cohérent, de contrôler la rentabilité du projet logiciel et de préparer d'éventuelles levées de fonds ou entrées de nouveaux partenaires.

Au-delà de l'exigence légale, une gestion financière rigoureuse augmente la crédibilité de la start-up auprès des partenaires intégrateurs, facilite les discussions avec les premiers clients et rassure les institutions financières.

4.5 Principaux contrats

Dans le cadre de son développement en tant que start-up technologique active dans les logiciels MES, OpSee doit mettre en place un ensemble de contrats essentiels pour structurer ses relations internes, protéger ses actifs immatériels, organiser son modèle économique et assurer la conformité légale de ses activités. Ces contrats constituent l'ossature juridique de l'entreprise et permettent de sécuriser les collaborations aussi bien en interne qu'à l'égard des clients, partenaires et prestataires externes.

Le premier type de contrat indispensable est le contrat de société (statuts), signé lors de la constitution de la SRL. Ce document établit la structure interne, la répartition des parts, les apports des fondateurs, les pouvoirs du ou des gérants, ainsi que les modalités de prise de décision. Il définit également l'objet social d'OpSee (le développement et la commercialisation d'un logiciel MES open-core) et encadre la gestion des actifs immatériels, notamment la propriété intellectuelle du logiciel. Ces statuts servent de fondement légal à toutes les autres relations contractuelles de la société.

En parallèle, OpSee doit gérer plusieurs contrats liés à ses ressources humaines. D'une part, les futurs employés devront disposer de contrats de travail conformes au droit belge, précisant la fonction, le régime de travail, la rémunération, les clauses de confidentialité et de propriété intellectuelle, et les obligations mutuelles. D'autre part, les étudiants participant au projet ont signé un contrat spécifique, établi d'un commun accord, détaillant leur rôle, leurs responsabilités et les conditions dans lesquelles ils pourront revendiquer des droits ou intégrer la société après la fin de leur master. Ce contrat clarifie la situation particulière des fondateurs encore en formation, tout en protégeant OpSee contre d'éventuelles revendications prématurées (Belgique, 1978 ; SPF Emploi, s. d. ; UCM, 2022).

S'ajoute à cela le recours potentiel à des prestataires externes, tels que freelancers, consultants techniques ou experts juridiques. Ces collaborations doivent être encadrées par des contrats de prestation de services, qui définissent précisément les missions, les délais, la rémunération, la confidentialité et la propriété des livrables. Ces contrats sont

essentiels pour éviter toute requalification en contrat de travail, ce qui pourrait exposer OpSee à des risques juridiques importants.

Un autre pilier juridique concerne la protection et l'exploitation du logiciel. OpSee doit mettre en place une licence open source pour son code de base (AGPLv3), accompagnée d'une licence propriétaire pour ses modules premium (FOSSA, 2021 ; Free Software Foundation, 2007). La licence open source encadre l'utilisation, la modification et la redistribution du logiciel, tout en imposant des obligations spécifiques de transparence du code dérivé. La licence propriétaire, quant à elle, définit les droits accordés aux clients sur les modules payants, les limitations d'usage, les conditions de maintenance et le respect des droits exclusifs de la société. Ces licences sont essentielles pour protéger l'actif immatériel principal d'OpSee et sécuriser ses revenus (European Parliament and Council, 2009 ; Lejeune, 2017).

En lien avec son modèle économique basé sur des abonnements, OpSee doit également établir un contrat d'abonnement à destination de ses clients. Ce document détaille les trois niveaux d'accès proposés (Free, Premium, Entreprise), les fonctionnalités incluses, les conditions financières, la durée de l'abonnement, la résiliation, les modalités de support technique, ainsi que les responsabilités respectives de l'entreprise et du client. Une politique d'usage doit y être intégrée afin de gérer les abus potentiels, notamment dans l'utilisation de la formule « Free ».

Parallèlement, dans le cadre de sa stratégie de mise sur le marché, OpSee prévoit de s'appuyer sur un réseau d'intégrateurs. Cela nécessite la mise en place de trois types de contrats : Bronze Partner, Silver Partner, et Gold Partner, chacun offrant des avantages spécifiques, des niveaux de commission, des obligations en matière de formation, des exigences de qualité et des conditions d'accès privilégié au support ou à la roadmap technique. Ces contrats constituent un élément central du modèle commercial d'OpSee et doivent être rédigés de manière rigoureuse pour garantir la cohérence et la sécurité des partenariats.

Enfin, OpSee devra également gérer des contrats d'hébergement ou de services cloud

si le logiciel est proposé en SaaS, incluant des accords de niveau de service (*Service Level Agreement*, SLA), des engagements en matière de sécurité, de disponibilité et de sauvegarde des données. Ces contrats sont indispensables pour renforcer la confiance des clients et assurer la conformité aux exigences légales, notamment en matière de protection des données.

L'ensemble de ces contrats couvre la constitution de la société, la gestion des ressources humaines, la protection du logiciel, la commercialisation du produit, la relation avec les partenaires et la gestion des services techniques. Ils forment l'ossature juridique nécessaire à l'activité d'OpSee.

4.6 Considérations juridiques liées aux ressources humaines

La gestion des ressources humaines au sein d'OpSee implique un ensemble de considérations juridiques essentielles pour assurer la conformité de l'entreprise à la législation belge, protéger les travailleurs et garantir un fonctionnement organisationnel cohérent. En tant que jeune SRL en construction, OpSee doit anticiper ces enjeux dès le départ, afin d'établir un cadre RH solide, clair et adapté à un projet entrepreneurial porté à la fois par des professionnels expérimentés et des étudiants engagés dans un processus académique (Acerta, s. d.).

OpSee est soumise au droit du travail belge, exigeant la formalisation rigoureuse des relations contractuelles. Chaque collaboration doit être encadrée par un contrat écrit précisant la fonction, le statut (comme étudiant, stagiaire ou futur employé), les responsabilités, la durée du travail, la rémunération éventuelle, et les clauses spécifiques (confidentialité, non-concurrence, propriété intellectuelle). Cela permet d'éviter tout litige et de clarifier les droits de chaque participant au projet.

Un élément particulier distingue OpSee des start-ups classiques : la participation d'étudiants encore inscrits en master. Conformément aux règles universitaires et au cadre légal,

ces étudiants, engagés dans les équipes technique et business, ne peuvent pas revendiquer de droits patrimoniaux ou de parts sociales tant qu'ils sont encore étudiants. Pour encadrer cette situation et assurer une transparence totale, tous les étudiants impliqués ont signé un contrat d'un commun accord, spécifiant leurs responsabilités, leur rôle dans le développement du projet et surtout les conditions dans lesquelles ils pourront éventuellement obtenir des droits, parts sociales ou une position au sein de l'entreprise après la fin de leur master. Ce document garantit une gouvernance équitable, protège le projet contre tout conflit anticipé et confirme que leur participation actuelle se fait à titre pédagogique, expérimental ou préparatoire (Belgique, 1978 ; SPF Emploi, s. d. ; UCM, 2022).

En parallèle, OpSee doit être affiliée à un secrétariat social agréé, chargé de la gestion administrative des travailleurs, du calcul des cotisations sociales (Office national de sécurité sociale, ONSS), des déclarations Dimona et de l'émission des fiches de paie. Même si l'équipe opérationnelle est encore en partie composée d'étudiants, cette affiliation devient indispensable dès que la société engage son premier travailleur salarié ou indépendant assimilé (ONSS, s. d.).

Un autre aspect essentiel concerne la propriété intellectuelle. Étant donné que le cœur de la valeur d'OpSee réside dans son logiciel MES, il est impératif que toutes les créations (code source, modules, documentations techniques, interfaces graphiques) soient clairement attribuées à la société. Les contrats, y compris celui signé par les étudiants, doivent contenir des clauses stipulant que les contributions réalisées dans le cadre du projet appartiennent à OpSee. Cela protège l'entreprise en cas de départ d'un membre de l'équipe ou lors de futures levées de fonds.

La société est également tenue de respecter les règles relatives au bien-être au travail, notamment en matière de santé et sécurité au travail, et doit s'affilier à un service externe de prévention et protection (Belgique, 1996). Bien que le projet soit principalement numérique, ces obligations s'appliquent dès l'engagement de salariés ou de collaborateurs réguliers.

Lorsqu'OpSee collabore avec des freelances, consultants externes ou partenaires inté-

grateurs, il est impératif d'établir des contrats de prestation précis. Ces contrats doivent éviter tout risque de requalification en contrat de travail et préciser l'étendue des missions, la rémunération, les délais et la gestion de la confidentialité.

Enfin, OpSee doit se conformer au RGPD, notamment pour la gestion des données personnelles de ses collaborateurs : informations administratives, coordonnées, données bancaires, documents contractuels, évaluations, etc. Des mesures organisationnelles et techniques doivent garantir la sécurisation, la limitation de l'accès et le respect des durées de conservation.

Les considérations juridiques RH d'OpSee concilient protection des personnes, conformité légale, transparence contractuelle et sécurisation des actifs de la société. Le contrat signé entre les étudiants permet à OpSee de poursuivre son développement et de se professionnaliser après la fin des études de ses membres fondateurs.

4.7 Responsabilité et assurances

Sur le plan juridique, OpSee est tenue de respecter l'ensemble des responsabilités découlant de son statut de Société à Responsabilité Limitée (SRL). Cette forme juridique limite en principe la responsabilité des associés à leurs apports, ce qui protège leur patrimoine personnel. Toutefois, certains comportements peuvent engager la responsabilité personnelle des dirigeants, notamment en cas de faute grave de gestion, de négligence manifeste, ou de non-respect des obligations légales, comptables ou fiscales. Les gérants doivent donc veiller à assurer une gestion prudente, transparente et conforme à la loi.

Dans le cadre de ses relations contractuelles, OpSee assume également une responsabilité professionnelle vis-à-vis de ses clients, notamment concernant la qualité du logiciel, la prestation des services associés, le respect des engagements contractuels et la continuité de l'assistance technique. Si une défaillance du logiciel provoque une interruption de production ou un préjudice financier chez un client, la responsabilité de la société pourrait être engagée. Pour limiter ces risques, les contrats d'abonnement, de licence ou de prestation

doivent inclure des clauses claires de limitation de responsabilité, définissant l'étendue des garanties, les exclusions et les plafonds d'indemnisation. Ces dispositions sont indispensables dans le secteur du logiciel industriel, où les conséquences d'un dysfonctionnement peuvent être importantes.

La gestion des données constitue un autre domaine de responsabilité majeur. En manipulant des informations de production, des données industrielles ou des données personnelles, OpSee est soumise au Règlement général sur la protection des données (RGPD). Cela implique l'obligation de mettre en place des mesures de sécurité adaptées, de limiter l'accès aux données, de respecter les droits des utilisateurs et de documenter les processus de traitement. En cas de violation de données, la responsabilité de la société pourrait être engagée, entraînant des sanctions administratives et des dommages réputationnels. Une gouvernance rigoureuse de la sécurité informatique, accompagnée de procédures internes, s'avère donc indispensable.

Pour se protéger contre ces différents risques, OpSee doit souscrire plusieurs assurances professionnelles. La première est l'assurance responsabilité civile professionnelle (RC Pro), essentielle pour les entreprises du secteur numérique (Cyber Cover, s. d. ; Ethias, s. d. ; Fortinet, 2021 ; Orus, s. d.). Elle couvre les dommages causés à des tiers à la suite d'erreurs, de négligences ou d'omissions dans la prestation de services, dans le développement du logiciel ou dans la gestion des données. Cette assurance constitue un filet de sécurité indispensable dans les relations B2B.

Ensuite, il est nécessaire pour la start-up de disposer d'une assurance cyber-risques, de plus en plus incontournable dans les entreprises technologiques. Elle couvre les conséquences d'attaques informatiques, de piratages, de pertes de données, d'interruptions de service ou de violations de sécurité. Étant donné qu'OpSee développe un logiciel utilisé potentiellement sur des lignes de production industrielles, cette assurance protège non seulement la société, mais renforce aussi la confiance des clients et partenaires.

À mesure qu'OpSee se développera, l'entreprise devra également envisager une assurance responsabilité des administrateurs et dirigeants (Directors and Officers). Cette

assurance protège les gérants contre les réclamations liées à leurs décisions de gestion, notamment dans le cadre de levées de fonds, de partenariats ou de conflits potentiels entre associés. Elle est particulièrement recommandée dans les sociétés innovantes où les dirigeants sont amenés à prendre des décisions rapides dans un environnement en évolution constante (HDI Global, 2020 ; KPMG Law Belgium, 2020 ; Stas de Richelle, Laurent, 2019).

Enfin, si OpSee engage du personnel salarié, les assurances obligatoires, telles que l'assurance accidents du travail, devront également être souscrites. L'entreprise devra aussi veiller à garantir la conformité de ses infrastructures numériques et locales afin de réduire les risques opérationnels.

Les responsabilités et assurances décrites ci-dessus limitent les risques financiers et juridiques de l'entreprise, protègent les dirigeants et collaborateurs, et renforcent la confiance des clients et partenaires. Une approche proactive de ces enjeux est nécessaire dans le secteur des solutions industrielles MES.

4.8 Propriété intellectuelle

La propriété intellectuelle constitue un enjeu central pour OpSee, dont l'actif principal repose sur un logiciel MES combinant une base open source et des modules propriétaires payants. La manière dont cette propriété est structurée, protégée et contractuellement encadrée conditionne non seulement la sécurité juridique de la start-up, mais également la valorisation de l'entreprise, la confiance des clients et la cohérence de son modèle économique.

Dès la constitution du projet, il est essentiel que l'ensemble des droits liés au logiciel (code source, architecture, interfaces, documentations techniques, bases de données, design visuel et modules propriétaires) soit clairement attribué à la société OpSee SRL (Belgique, 2013 ; Lejeune, 2014). Pour éviter toute ambiguïté, la propriété intellectuelle doit être transférée par écrit à la société dès sa création, qu'elle provienne d'AgiNtech,

des fondateurs, des étudiants ou de tout tiers ayant contribué de manière significative au développement du logiciel.

La situation spécifique des étudiants impliqués (équipe technique et équipe business) rend cet aspect encore plus important. Conformément au cadre légal et universitaire, les contributions des étudiants ne peuvent être valorisées ou revendiquées pendant leur master. Pour prévenir tout litige, tous les étudiants d'OpSee ont signé un contrat d'accord préalable, précisant que leurs contributions (code, analyses, maquettes, documentation) sont la propriété exclusive d'OpSee et définissant les conditions dans lesquelles des droits ou parts sociales pourront être attribués après leur diplomation. Cette démarche garantit la sécurité de la start-up et protège la continuité du projet lors du passage du statut académique au statut entrepreneurial.

Sur le plan juridique, OpSee adopte un modèle hybride composé d'une base open source sous licence AGPLv3 et de modules premium propriétaires placés sous licence payante. La licence open source AGPLv3 impose que toute version modifiée ou dérivée du logiciel soit également diffusée sous la même licence, garantissant la transparence du code et la pérennité du projet open source. Cela renforce la visibilité du logiciel et encourage la participation d'une communauté, tout en protégeant OpSee contre la privatisation non autorisée de son travail.

En parallèle, la société développe des modules avancés (intelligence artificielle, maintenance prédictive, connecteurs ERP, outils analytiques évolués) placés sous licence propriétaire. Cette licence encadre strictement l'utilisation des modules, interdit leur redistribution non autorisée, limite les droits accordés aux clients et conditionne leur usage à un abonnement ou un paiement annuel (Droit & Technologies, s. d. ; European Parliament and Council, 2009 ; Lejeune, 2017, 2025). Ce modèle dual permet à OpSee de concilier les bénéfices de l'open source (flexibilité, adoption rapide, transparence) avec une stratégie commerciale durable basée sur la vente de fonctionnalités avancées.

Afin de renforcer la protection de ses actifs, OpSee peut également déposer sa marque commerciale, son logo, ainsi que son nom de domaine, assurant une protection contre

l'usurpation ou la confusion sur le marché. Le dépôt de marque garantit l'exclusivité de l'usage du nom "OpSee" et permet d'agir juridiquement en cas de violation.

La protection de la propriété intellectuelle s'étend également aux relations avec les partenaires intégrateurs (Bronze, Silver, Gold). Les contrats partenaires doivent inclure des clauses spécifiant soigneusement les droits d'utilisation du logiciel, l'accès au code source, les limites en matière de modification, les conditions de redistribution et l'obligation de respecter les propriétés exclusives sur les modules premium. Ces clauses sont cruciales pour garantir la cohérence du modèle open-core et éviter que des partenaires ne détournent le modèle économique.

Enfin, dans le cadre du RGPD et de la gestion des données industrielles, OpSee doit aussi protéger les informations sensibles générées par son logiciel. Bien que cela relève plus de la protection des données que de la propriété intellectuelle, les deux dimensions sont souvent interconnectées dans les projets numériques modernes et doivent être intégrées dans la gouvernance technologique de la société.

La propriété intellectuelle d'OpSee structure le cœur du projet, fonde la stratégie commerciale et sécurise les relations contractuelles. Une gestion rigoureuse et anticipative de cet enjeu est nécessaire dans un écosystème où la transparence du code et la vente de modules propriétaires coexistent. Au-delà du noyau de PI propre à OpSee, la viabilité juridique du modèle open-core dépend également des licences des composants tiers que la stack assemble ; la section suivante en propose un audit.

4.9 Compatibilité de la stack technique avec le modèle open-core

Le modèle open-core retenu pour OpSee repose sur deux engagements parallèles : publier le noyau sous licence AGPLv3 et commercialiser les modules premium sous licence propriétaire. La viabilité juridique de ce montage dépend aussi des licences amont des composants tiers que la stack assemble, point généralement absent des analyses straté-

giques.

4.9.1 Positionnement théorique : *single-vendor open source* et *IP modularity*

Sur le plan académique, OpSee relève du modèle dit « single-vendor open source firm » défini par Riehle (2020). Ce modèle se caractérise par un éditeur unique propriétaire du code, qui le publie sous licence open source tout en monétisant des compléments : services, garanties, fonctionnalités avancées ou hébergement cloud. Riehle (2020) y distingue deux stratégies de monétisation : le *dual licensing*, où la même base est offerte sous licence open source *et* sous licence commerciale, et l'*IP modularity*, plus communément appelée *open core*, qui consiste à réserver certaines fonctionnalités à une version payante. OpSee adopte explicitement cette seconde stratégie, en cohérence avec la « current breed » d'éditeurs identifiés par Riehle (2020) (MongoDB, Redis Labs, Neo4j), qui ciblent les outils d'infrastructure et de DevOps depuis la crise de 2008.

Riehle (2021) complète ce cadre par un second modèle, celui du distributeur open source, dont la propriété intellectuelle ne porte pas sur le code mais sur l'assemblage cohérent de composants tiers (build, matrices de compatibilité, suites de tests). OpSee combine de fait les deux dimensions : un noyau propre relevant du dual licensing au sens de Riehle, et un travail d'intégration de briques open source amont (FastAPI, React, MUI, Keycloak, Mosquitto, Node-RED, TimescaleDB, Grafana, Redis, etc.) qui relève partiellement du modèle distributeur. Cette double exposition explique pourquoi l'audit de licences ne peut se limiter au code propre d'OpSee.

4.9.2 Audit appliqué à la stack OpSee

Sur l'ensemble des composants tiers que mobilise OpSee, l'audit complet reporté en annexe A.4.1 établit qu'environ 98 % sont sous licences permissives (MIT, BSD 2/3-clause, Apache 2.0) ou copyleft faible (LGPL, EPL), sans aucune contrainte sur le code

propriétaire d'OpSee. Quatre composants requièrent toutefois une attention particulière en raison soit d'une licence atypique, soit d'un changement de licence récent.

Grafana, AGPLv3 depuis avril 2021.

Dutt (2021) relate la décision de Grafana Labs de relicencier Grafana, Loki et Tempo de l'Apache 2.0 vers l'AGPLv3, en réponse explicite à la tendance de marché analysée à la section 8.1.1 du chapitre 8 : « almost every at-scale open source company that we admire (such as Elastic, Redis Labs, MongoDB, Timescale, Cockroach Labs, and many others) has evolved their license regime » (Dutt, 2021). L'AGPLv3 est OSI-approuvée et n'interdit pas l'usage commercial, mais elle déclenche une obligation de partage du code source pour toute version modifiée mise à disposition par réseau. OpSee utilise Grafana sans modification du code source et dans un service isolé, intégré au reste de la plateforme par authentification déléguée. La contagion AGPL ne s'étend donc pas au code OpSee. Cette frontière doit néanmoins être documentée et préservée : tout fork ou modification directe du source Grafana imposerait la publication AGPL des dérivés.

Redis, SSPL/RSALv2 depuis Redis 7.4, mars 2024.

Redis Inc. (2024) abandonne la licence BSD 3-Clause au profit d'une double licence source-available, RSALv2 et SSPLv1. La première interdit explicitement de « commercialize the software or provide it to others as a managed service » (Redis Inc., 2024). OpSee utilise Redis pour un usage strictement interne (gestion des sessions d'authentification), ce qui ne déclenche pas la contrainte de la SSPL/RSALv2. La prudence commande toutefois soit le maintien de la version 7.2 (dernière sous BSD), soit la migration vers *Valkey*, fork BSD constitué dès mars 2024 sous la gouvernance de la Linux Foundation et soutenu par AWS, Google Cloud, Oracle, Ericsson et Snap Inc. (The Linux Foundation, 2024). La gouvernance fondationnelle de Valkey lui confère une trajectoire plus stable à long terme.

TimescaleDB, Apache 2.0 et Timescale License.

L'extension de base de données retenue par OpSee suit un modèle de double licence depuis décembre 2018 : les fonctionnalités du cœur sont sous Apache 2.0, tandis que certaines fonctions avancées (compression, distribution multi-nœud) relèvent de la *Timescale License* (TSL), licence source-available qui prohibe explicitement de « provide time-sharing services or database-as-a-service services » (Tiger Data, 2025). La configuration de déploiement d'OpSee restreint explicitement le binaire chargé au sous-ensemble Apache et écarte donc la zone TSL.

Psycopg, LGPLv3 avec exception OpenSSL.

L'adaptateur d'accès à la base de données utilisé par OpSee est diffusé sous LGPLv3, assortie d'une clause d'exception autorisant l'édition de liens avec OpenSSL (Psycopg Project, 2024). Le copyleft LGPL n'affecte pas le code OpSee dès lors que la bibliothèque est utilisée comme dépendance non modifiée, ce qui est le cas dans la stack actuelle.

L'AGPLv3 retenue pour le noyau OpSee (section 4.8) appelle une précision complémentaire. L'article 13 de la licence n'étend la portée du copyleft qu'aux *ouvrages dérivés* mis à disposition par réseau ; il n'impose rien sur des *ouvrages distincts* qui interagiraient avec le noyau par des interfaces standardisées. Les modules premium d'OpSee, livrés comme composants séparés communiquant avec le noyau au travers d'interfaces publiques documentées, ne constituent donc pas des dérivés au sens de l'AGPL et peuvent légitimement être distribués sous licence propriétaire. Cette frontière, classique dans le modèle open-core, doit être conservée et documentée pour résister à une éventuelle contestation.

4.9.3 Synthèse

Le tableau 4.1 récapitule les zones identifiées. Aucun composant n'oppose un obstacle juridique à la commercialisation d'OpSee selon le modèle open-core. Les ajustements requis se limitent à des choix d'architecture (isolation Grafana, épinglage ou substitution

Redis, paramètre TimescaleDB) qui sont déjà appliqués ou aisément applicables.

TABLE 4.1 – Composants de la stack OpSee à licence atypique ou récemment modifiée. La colonne « Mesure adoptée » décrit l'état d'implémentation actuel dans la stack, pas une recommandation théorique.

Composant	**Licence**	**Mesure adoptée**
Grafana	AGPLv3	Conteneur isolé, aucune modification du source
Redis $\geq$ 7.4	SSPL + RSALv2	Épinglage 7.2 (BSD) ou migration Valkey
TimescaleDB	Apache 2.0 + TSL	Flag `TIMESCALEDB_LICENSE=Apache`
Psycopg	LGPLv3 + exception OpenSSL	Linkage dynamique, sans modification

L'inventaire exhaustif des dépendances (composant, version, licence, source) est reporté en annexe A.4.1. Le risque structurel de relicensing qui pèse sur les éditeurs single-vendor amont, et qui explique la concentration de changements de licence observée depuis 2018, est analysé séparément à la section 8.1.1 du chapitre 8. Il justifie l'intégration d'une veille licenciaire dans la gouvernance opérationnelle d'OpSee, orientée en priorité vers les projets hébergés par des fondations neutres (Apache Software Foundation, Cloud Native Computing Foundation, Linux Foundation), historiquement moins exposées à des relicensings unilatéraux.

4.10 Réglementations liées aux MES

Les logiciels MES (Manufacturing Execution Systems) opèrent au sein des processus industriels, là où se croisent production, qualité, traçabilité, sécurité et gestion des

données. Bien qu'il n'existe pas de réglementations exclusivement dédiées aux MES, ces systèmes sont soumis à un ensemble de normes et obligations sectorielles qui influencent directement leur conception, leur déploiement et leur exploitation.

L'une des références majeures dans le domaine est la norme ISA-95, conçue pour structurer l'intégration entre les systèmes de pilotage industriel (niveau OT – Operational Technology) et les systèmes de gestion (niveau IT – ERP). Cette norme définit les modèles d'informations, les échanges de données, les niveaux hiérarchiques de l'usine et les bonnes pratiques d'intégration. Pour un logiciel MES comme OpSee, la conformité aux principes d'ISA-95 garantit une interopérabilité robuste avec les équipements de production, les lignes automatisées et les logiciels ERP (International Society of Automation, s. d.).

Selon les secteurs, des obligations réglementaires spécifiques peuvent également s'appliquer. Dans l'agroalimentaire, la traçabilité est encadrée par le règlement européen qui impose la capacité à suivre les flux de matières premières et produits finis (European Parliament and Council, 2002). Un MES doit donc intégrer des fonctionnalités de suivi des lots, d'enregistrement horodaté et de documentation des étapes critiques. Dans le secteur pharmaceutique, des réglementations strictes telles que GMP (Good Manufacturing Practices) ou 21 CFR Part 11 de la FDA imposent des exigences en matière d'intégrité des données, de signatures électroniques, de gestion des accès et d'audit trail. Même si OpSee cible prioritairement les PME industrielles hors biotech/pharma, ces standards influencent les attentes globales en matière de fiabilité et de sécurité (d'Orey, 2025 ; IntuitionLabs, s. d. ; Steinborn, 2004).

Les MES sont également concernés par le RGPD, car ils gèrent parfois des données personnelles : identifiants opérateurs, accès, analyses de performance, données d'incidents. L'entreprise doit donc garantir la minimisation des données, la protection des accès, la traçabilité des connexions et la documentation des traitements dans son registre RGPD (CNIL, s. d. ; European Parliament and Council, 2016).

Les exigences en matière de cybersécurité deviennent également centrales pour les systèmes industriels. Les référentiels tels que ISO/IEC 27001 et IEC 62443 (sécurité des

systèmes industriels) ou les directives européennes NIS2 imposent des mesures de protection contre les intrusions, une gestion des vulnérabilités et la sécurisation des flux OT/IT (European Parliament and Council, 2022 ; IEC, 2021 ; ISO/IEC, 2022). Pour un MES moderne, la conformité à ces standards est un gage de sécurité indispensable.

Enfin, les industries doivent parfois se conformer à des obligations de reporting environnemental, qualité ou performance. L'intégration d'indicateurs (OEE, consommation énergétique, ESG) dans un MES permet de satisfaire ces obligations, en offrant des données fiables et auditables.

Il n'existe donc pas de réglementation unique dédiée aux MES, mais un ensemble de normes techniques, industrielles et légales que ces systèmes doivent respecter. Cette conformité conditionne la confiance des clients européens et, en pratique, l'accès au marché. Une obligation transverse à toutes ces réglementations mérite un traitement à part en raison de sa spécificité : la sortie de données vers un service IA externe, analysée à la section suivante.

4.11 Confidentialité et souveraineté des données dans l'AI Assistant

Le cadre RGPD général posé à la section 4.7 et les obligations sectorielles applicables aux MES (section 4.10) doivent être déclinés au cas particulier de l'AI Assistant d'OpSee. Conçu pour fonctionner sans connexion permanente à Internet, OpSee héberge ses bases de données, ses services d'ingestion et son interface sur l'infrastructure du client. L'AI Assistant constitue le seul écart à ce principe : chaque invocation du chatbot déclenche un appel sortant vers les serveurs d'Anthropic. La qualification juridique de cette relation tripartite (entreprise cliente, OpSee, Anthropic), les risques qui subsistent malgré l'encadrement contractuel et le rôle du mode *Bring Your Own key* (BYO) pour les clients soumis aux régimes les plus stricts sont examinés dans les sous-sections qui suivent.

4.11.1 Qualification juridique de la relation OpSee–Anthropic

La relation entre OpSee et Anthropic s'inscrit dans le schéma *controller-to-processor* prévu par l'article 28 du RGPD. L'entreprise cliente déployant OpSee est le responsable du traitement, OpSee opère comme sous-traitant pour le compte de cette dernière, et Anthropic agit comme sous-traitant ultérieur au sens juridique du règlement. Cette qualification est formalisée dans l'*Anthropic Data Processing Addendum* (Anthropic, 2024b), incorporé par référence dans les termes commerciaux. Le DPA interdit à Anthropic tout traitement des données personnelles en dehors de la prestation du service, toute combinaison avec des données d'autres clients et tout usage secondaire non autorisé par le règlement applicable. Les transferts internationaux sont couverts par les clauses contractuelles types (*Standard Contractual Clauses*, SCCs) de la Commission européenne, module 2 (controller to processor). Les entrées et sorties sont supprimées automatiquement dans les trente jours pour les utilisateurs de l'API commerciale (Anthropic, 2024c), et les termes commerciaux interdisent l'entraînement des modèles sur les données transmises dans ce cadre (Anthropic, 2024a).

Schwartmann et al. (2024) analysent l'intersection entre les systèmes IA et le droit de la protection des données : la transmission de données personnelles vers un système IA doit reposer sur une base légale au sens de l'article 6 du RGPD, et le principe de minimisation impose de ne transmettre que ce qui est strictement nécessaire à la finalité poursuivie. La CNIL prolonge cette analyse par des travaux d'audit dédiés aux modèles IA, dont le projet PANAME, un outil d'évaluation de la confidentialité développé en partenariat avec l'ANSSI et l'Inria (CNIL, 2025).

4.11.2 Données transmises et qualification au regard du RGPD

À chaque tour de conversation, l'AI Assistant transmet à l'API Anthropic davantage que le seul texte saisi par l'utilisateur. Le contexte système enrichi par OpSee embarque l'identité et l'adresse e-mail de l'utilisateur, son périmètre d'accès et un horodatage. À

cela s'ajoutent les messages en langage naturel et, pour chaque appel d'outil interne, les données métier retournées : indicateurs de performance (OEE), valeurs de capteurs, noms d'équipements, entrées de planning, raisons d'arrêt.

Deux catégories juridiques distinctes coexistent dans ce flux. Les adresses e-mail et les noms d'opérateurs sont des données à caractère personnel au sens de l'article 4 du RGPD, qui activent l'ensemble des obligations du règlement (base légale, minimisation, droits des personnes concernées). Les indicateurs OEE, les capacités de production et les plannings de travail ne relèvent pas directement de cette catégorie, mais constituent des données industrielles sensibles dont la divulgation à un tiers pourrait porter atteinte à la confidentialité commerciale de l'entreprise cliente. Devarajulu (2025) soulignent que la plupart des LLM commerciaux sont accessibles uniquement via des API publiques, ce qui complique l'application des principes de souveraineté et de transparence du traitement dans les environnements réglementés.

4.11.3 Risques résiduels et obligations dérivées

Le cadre contractuel décrit ci-dessus atténue les risques liés à la rétention et à l'usage secondaire des données. Il ne couvre pas l'ensemble des risques propres aux systèmes d'agents avec outils. Zhong et al. (2025) montrent que ces systèmes sont exposés à deux vulnérabilités classées aux deux premières positions du référentiel de l'*Open Worldwide Application Security Project* (OWASP) pour les applications intégrant des modèles de langage : l'injection de prompt et la divulgation d'information sensible. Les résultats d'outils retournés au modèle rejoignent l'historique de conversation et peuvent, en cas de contenu malveillant ou mal formé, amener le modèle à révéler des informations qui n'auraient pas dû être exposées. L'implémentation actuelle d'OpSee ne filtre pas ces résultats avant leur injection dans le contexte du modèle.

Chen et al. (2025) identifient la transmission de données dans les prompts comme un vecteur de risque propre aux LLM : même si les modèles ne mémorisent pas les conversations API, les informations transmises traversent des infrastructures tierces et peuvent

être exposées lors d'incidents de sécurité en transit. Asthana et al. (2025) proposent une détection automatique des données à caractère personnel (*Personally Identifiable Information*, PII) dans les entrées et sorties LLM comme mesure de mitigation opérationnelle. Cette couche de protection n'est pas présente dans la version actuelle d'OpSee : les adresses e-mail et les noms d'opérateurs sont transmis tels quels, sans pseudonymisation préalable. L'implémentation ne propose pas non plus de mécanisme d'opt-in granulaire permettant à un utilisateur de refuser explicitement que ses interactions transitent via l'API Anthropic.

Ces lacunes ne remettent pas en cause la conformité du dispositif pour la majorité des contextes d'usage, dans la mesure où les obligations contractuelles côté Anthropic et l'absence d'entraînement sur les données fournissent un socle solide. Elles constituent toutefois autant d'obligations dérivées que les responsables de traitement devront documenter dans leur analyse d'impact relative à la protection des données (AIPD) au sens de l'article 35 du RGPD.

Au-delà du RGPD, le règlement européen sur l'intelligence artificielle (UE, 2024a) introduit des obligations propres aux systèmes d'IA. OpSee est qualifié de *fournisseur* au sens de l'article 3(3), puisqu'il met sur le marché un système d'IA intégré à son logiciel ; l'entreprise cliente qui déploie OpSee endosse pour sa part le rôle de *déployeur* (art. 3(4)). L'AI Assistant interagit directement avec des personnes physiques et relève à ce titre des obligations de transparence de l'article 50 : l'utilisateur doit être informé, de manière claire et au plus tard lors de la première interaction, qu'il dialogue avec un système d'IA. Le système n'entre pas dans les catégories à haut risque énumérées à l'annexe III du règlement, ce qui le dispense des obligations renforcées des articles 26 et 27, mais la mention explicite du caractère IA dans l'interface et la documentation reste obligatoire.

4.11.4 Cadre contractuel client et mode BYO

Avant même l'intervention du droit, l'architecture d'OpSee comporte deux mécanismes de minimisation qui restreignent l'exposition aux données strictement nécessaires à la finalité. Le contrôle d'accès par rôles (*Role-Based Access Control*, RBAC) garantit, par

construction, que le modèle ne reçoit que les données auxquelles l'utilisateur connecté est autorisé à accéder ; sa mise en œuvre est décrite à la section 3.5.7. Le plafonnement du volume transmis par appel limite l'exposition unitaire.

Le mode *Bring Your Own key* (BYO) offre une séparation contractuelle plus nette : lorsque l'utilisateur final fournit sa propre clé d'API Anthropic, la relation juridique avec Anthropic devient directe entre l'utilisateur (ou son employeur) et le fournisseur du modèle, sans intermédiation d'OpSee. La politique de données applicable est alors celle du contrat propre à l'utilisateur, indépendante du déploiement OpSee. Pour les entreprises clientes ayant déjà négocié des conditions particulières avec Anthropic (rétention zéro, hébergement régional, engagements supplémentaires), ce mode permet de récupérer ces garanties sans renégociation par OpSee.

Ces dispositifs ne suffisent toutefois pas dans les contextes réglementaires les plus stricts (secteurs pharmaceutique, agroalimentaire ou défense), où toute sortie de donnée vers un service cloud doit faire l'objet d'une analyse d'impact spécifique. L'élimination complète du risque suppose alors de retirer toute dépendance à un fournisseur LLM externe ; les pistes techniques explorées en ce sens (LLM local, protocole MCP) sont discutées à la section 3.5.7.

4.12 Synthèse

Le chapitre a posé les coordonnées juridiques d'OpSee : SRL belge à responsabilité limitée des fondateurs, constitution formalisée par cession de droits depuis chaque contributeur, gouvernance bipolaire technique/business sous la direction de Christophe, conformité comptable PCMN, portefeuille contractuel couvrant statuts, RH, prestations, licences, abonnements et programmes partenaires, et responsabilité de l'éditeur encadrée par les assurances RC Pro, cyber et D&O.

Sur la propriété intellectuelle, le modèle open-core (noyau AGPLv3 et modules premium propriétaires) a été confronté à la stack technique réellement utilisée : environ 98 %

des composants tiers sont sous licences permissives, et les quatre composants à licence atypique (Grafana, Redis, TimescaleDB, Psycopg) sont neutralisés par des choix d'architecture déjà appliqués. Le risque structurel de relicensing qui pèse sur les éditeurs single-vendor amont est analysé séparément au chapitre des risques (section 8.1.1).

Sur le plan sectoriel, OpSee se rattache aux normes ISA-95, à la traçabilité agroalimentaire et aux exigences de cybersécurité NIS2, avec une déclinaison spécifique pour l'AI Assistant : qualification controller-to-processor avec Anthropic, encadrement par DPA et SCCs, identification des risques résiduels et obligations dérivées (AIPD, transparence AI Act), et mode BYO comme mécanisme de séparation contractuelle pour les régimes les plus stricts.

Aucune disposition juridique identifiée ne s'oppose à la commercialisation d'OpSee selon le modèle open-core. Les ajustements requis sont soit déjà appliqués, soit clairement identifiés.

Chapitre 5

Marketing

Résumé exécutif. Le marketing stratégique applique le cadre STP aux PME manufacturières européennes : segmentation croisée selon quatre critères (taille, intensité numérique au sens du *Digital Intensity Index* d'Eurostat, type de procédé batch/continu/discret, besoins fonctionnels) ; ciblage des PME de 10 à 249 salariés en agroalimentaire, plasturgie, mécanique et métallurgie sur la zone BE/FR/DE/NL avec extension Tchéquie ; positionnement sur trois piliers validés par les entretiens terrain (modèle *open-core*, facturation par équipement, déploiement *on-premise*), combinaison qu'aucun éditeur concurrent ne propose. Le marketing opérationnel décline les quatre P : *produit* (noyau AGPLv3 limité à l'observabilité, catalogue premium OEE avancé, IA intégrée, batches ISA-88, reporting personnalisé), *prix* (tier Free gratuit, Premium 59 €/mois/équipement avec une fonction premium au choix, Entreprise 95 €/mois/équipement avec toutes les fonctions premium), *distribution* (réseau d'intégrateurs structuré en trois niveaux Bronze/Silver/Gold avec commission uniforme de 10 % sur les abonnements ; différenciation par outils de vente, accès anticipé à la *roadmap* et reconnaissance commerciale plutôt que par taux), *communication* (site web, LinkedIn, salons *Yaka* et *Ambition Industrie* à Liège, démonstrations terrain dont un trieur motorisé de balles de

ping-pong qui matérialise les trois composantes de l'OEE).

Le présent chapitre articule la stratégie commerciale d'OpSee en deux temps. Le marketing stratégique (5.1) découpe le marché des PME industrielles, sélectionne les segments visés et formule le positionnement de la solution face aux alternatives existantes. Le marketing opérationnel (5.2) traduit ces orientations en décisions concrètes selon le cadre des quatre P : produit, prix, distribution et communication.

5.1 Marketing stratégique

Le marketing stratégique d'OpSee vise à identifier les segments de marché les plus pertinents, à sélectionner les clients cibles et à définir un positionnement différenciant sur le marché européen des logiciels MES pour PME manufacturières. Les choix présentés dans cette section s'appuient directement sur les analyses réalisées au chapitre 2.

5.1.1 Segmentation

L'analyse du marché met en évidence quatre critères de segmentation particulièrement pertinents pour OpSee : la taille de l'entreprise, sa maturité numérique, son type de production et ses besoins fonctionnels.

La taille constitue le premier critère structurant. Les grandes entreprises industrielles disposent généralement des ressources nécessaires pour déployer des solutions MES complexes proposées par des acteurs tels que Siemens, AVEVA ou GE Vernova. À l'inverse, les PME manufacturières de dix à deux cent quarante-neuf salariés, qui représentent près de 105 000 entreprises sur la zone géographique étudiée (table 2.1), restent souvent sous-équipées. Beaucoup s'appuient encore sur Excel, des développements internes ou des modules ERP partiels qui ne permettent pas un pilotage complet de la production. Cette situation crée un besoin pour des solutions MES plus accessibles et mieux adaptées à leurs contraintes opérationnelles.

Le niveau de maturité numérique constitue un second critère important. Les entreprises les moins digitalisées ne disposent généralement pas encore des prérequis organisationnels nécessaires à l'adoption d'un MES. À l'inverse, les entreprises les plus avancées sont souvent déjà équipées de solutions propriétaires fortement intégrées. OpSee vise principalement les entreprises situées dans les niveaux intermédiaires de maturité numérique, qui ont identifié les limites de leurs outils actuels mais recherchent une solution plus accessible que les offres traditionnelles du marché.

Le type de production influence également fortement les besoins. Les entreprises de mécanique, de métallurgie ou de plasturgie accordent une importance particulière au suivi des performances machines et au calcul de l'OEE. Les entreprises agroalimentaires ou pharmaceutiques accordent davantage d'importance à la traçabilité des lots de production. Les environnements de production discrète et de production par lots apparaissent ainsi comme les plus pertinents pour le déploiement initial d'OpSee.

Enfin, les besoins fonctionnels varient selon le niveau de maturité des entreprises. Certaines recherchent avant tout une meilleure visibilité sur leurs performances de production, tandis que d'autres souhaitent digitaliser leurs processus atelier ou améliorer leur traçabilité. L'architecture modulaire d'OpSee permet de répondre progressivement à ces différents besoins en accompagnant les entreprises dans leur trajectoire de digitalisation.

5.1.2 Ciblage

À la suite de la segmentation du marché, le ciblage consiste à sélectionner les segments les plus attractifs et les plus pertinents pour l'entreprise (Kotler & Keller, 2016). Dans le cadre d'OpSee, le ciblage se concentre sur les PME manufacturières engagées dans une démarche de digitalisation progressive de leur production, implantées dans la zone géographique de déploiement initial (Belgique, France, Allemagne et Pays-Bas, avec une extension naturelle vers la Tchéquie ; cf. 2.2.2.1).

Ce choix repose sur plusieurs constats mis en évidence dans l'analyse de marché. D'une part, les grandes entreprises industrielles disposent généralement des ressources né-

cessaires pour déployer des solutions MES complexes proposées par les principaux acteurs du marché. D'autre part, de nombreuses PME restent insuffisamment équipées malgré des besoins croissants en matière de suivi de production, de traçabilité et d'amélioration des performances opérationnelles. Cette situation crée un espace de marché favorable à une solution plus accessible et plus flexible.

OpSee cible plus spécifiquement les entreprises présentant un niveau intermédiaire de maturité numérique. Ces organisations ont généralement déjà identifié les limites de leurs outils actuels mais ne disposent pas encore des ressources financières ou techniques nécessaires pour adopter des solutions MES traditionnelles. Elles recherchent des outils simples à déployer, financièrement accessibles et capables d'évoluer progressivement avec leurs besoins.

Les secteurs prioritaires sont l'agroalimentaire, la plasturgie, la mécanique et la métallurgie. Les entretiens réalisés dans le cadre de l'étude de marché ont montré que ces secteurs présentent des besoins récurrents en matière de calcul d'OEE, de suivi des performances machines, de gestion des temps d'arrêt et de traçabilité des opérations (2.2.3). Une entreprise agroalimentaire cherchera par exemple à renforcer la traçabilité de ses lots de production, tandis qu'une entreprise de plasturgie accordera davantage d'importance au suivi des performances de ses équipements.

À court terme, OpSee concentre ses efforts commerciaux sur les PME de 20 à 150 salariés appartenant à ces secteurs prioritaires. Cette approche permet de focaliser les ressources du projet sur les segments présentant les besoins les plus clairement identifiés, de développer des références clients et de construire progressivement la crédibilité commerciale nécessaire à une expansion vers d'autres segments du marché.

5.1.3 Positionnement

Le positionnement correspond à la place qu'une entreprise souhaite occuper dans l'esprit de ses clients par rapport à ses concurrents (Kotler & Keller, 2016). Il vise à mettre en évidence les éléments différenciants de l'offre et la manière dont celle-ci répond aux

besoins du marché cible.

OpSee se positionne comme une solution MES open-core, modulaire et accessible, spécifiquement conçue pour les PME manufacturières souhaitant digitaliser leur production sans supporter la complexité et les coûts généralement associés aux solutions MES traditionnelles. Contrairement aux principaux éditeurs du marché, dont les offres sont principalement pensées pour de grandes organisations industrielles, OpSee adopte une approche progressive adaptée aux contraintes opérationnelles et budgétaires des PME.

Ce positionnement repose sur trois dimensions complémentaires : un modèle open-core, une facturation par équipement et un déploiement local *on-premise*. Les entretiens réalisés dans le cadre de l'étude qualitative ont mis en évidence trois préoccupations récurrentes chez les PME industrielles : le coût des projets de digitalisation, la nécessité d'une adoption progressive et la maîtrise des données de production (2.2.3). Les choix retenus pour OpSee visent précisément à répondre à ces contraintes.

Le modèle open-core constitue l'élément central de ce positionnement. Comme le soulignent Shahrivar et al. (2018) et Kula et al. (2025), les modèles *Commercial Open Source Software* combinent un noyau libre avec des fonctionnalités avancées propriétaires. Dans le cas d'OpSee, cette approche permet de concilier transparence, indépendance technologique et viabilité économique. Le noyau ouvert facilite l'adoption de la solution, tandis que les modules premium apportent des fonctionnalités avancées adaptées aux besoins croissants des entreprises.

La facturation par équipement constitue un second élément différenciant. Alors que de nombreux éditeurs privilégient une tarification par utilisateur ou par site, OpSee aligne ses coûts sur la réalité opérationnelle des PME industrielles. Une entreprise peut ainsi commencer par connecter un nombre limité d'équipements puis étendre progressivement son utilisation du logiciel à mesure de sa digitalisation.

Enfin, le déploiement *on-premise* répond aux préoccupations exprimées par certaines entreprises concernant la souveraineté des données industrielles et l'intégration dans des environnements de production parfois isolés des infrastructures cloud.

La combinaison de ces trois caractéristiques reste peu répandue sur le marché européen du MES (2.2.2.2). OpSee occupe ainsi une position intermédiaire entre les solutions MES traditionnelles, souvent jugées trop complexes ou trop coûteuses pour les PME, et les outils simplifiés qui ne couvrent qu'une partie des besoins industriels (2.5.1).

En résumé, OpSee ambitionne d'être perçu comme le MES open-core des PME industrielles : une solution capable d'offrir les bénéfices d'un MES professionnel tout en restant accessible, flexible et adaptée aux réalités des petites et moyennes entreprises manufacturières.

5.2 Marketing opérationnel

Le marketing opérationnel traduit le positionnement et les choix stratégiques d'OpSee en actions commerciales concrètes. Il définit la manière dont la solution est proposée au marché à travers les décisions relatives au produit, au prix, à la distribution et à la communication.

Les choix présentés dans cette section sont directement alignés avec le positionnement d'OpSee : proposer aux PME manufacturières une solution MES accessible, modulaire et adaptée à une adoption progressive. L'objectif est de réduire les barrières à l'entrée traditionnellement associées aux projets MES tout en garantissant un modèle économique durable.

Les sous-sections suivantes détaillent les politiques de produit, de prix, de distribution et de communication retenues pour soutenir le lancement et le développement commercial du projet.

5.2.1 Politique de produit

La politique de produit regroupe les décisions relatives aux caractéristiques, aux fonctionnalités et aux services associés à l'offre proposée par l'entreprise (Kotler & Keller, 2016). Dans le cas d'OpSee, elle vise à répondre aux besoins des PME manufacturières en

matière de suivi de production, de traçabilité et d'amélioration des performances opérationnelles.

L'offre repose sur une architecture open-core cohérente avec le positionnement présenté en section 5.1.3. Le noyau du logiciel, distribué sous licence AGPLv3, fournit les fonctionnalités essentielles d'observabilité de la production : collecte des données, visualisation des indicateurs et analyse de tendance. Des modules avancés distribués sous licence propriétaire viennent compléter cette base avec des fonctionnalités telles que le calcul d'OEE avancé, la gestion des lots selon ISA-88, le reporting personnalisé ou l'intégration d'outils d'intelligence artificielle.

Cette approche correspond au modèle *Commercial Open Source Software* décrit par Riehle (2012) et Kula et al. (2025), dans lequel un noyau libre favorise l'adoption tandis que les fonctionnalités avancées assurent la viabilité économique de l'éditeur. Le choix des fonctionnalités intégrées au noyau libre et de celles proposées dans les offres commerciales constitue un élément central de la stratégie produit d'OpSee.

La modularité représente l'un des principaux éléments différenciants du projet. Contrairement aux solutions MES traditionnelles, souvent déployées sous forme de projets lourds nécessitant des investissements importants dès le départ, OpSee permet une adoption progressive. Les entreprises peuvent commencer par connecter un nombre limité d'équipements afin d'obtenir une visibilité sur leurs données de production et de calculer leurs premiers indicateurs de performance. Cette première étape vise à démontrer rapidement la valeur du système sans nécessiter de transformation organisationnelle majeure.

Une fois cette phase validée, les clients peuvent progressivement activer des modules complémentaires tels que l'OEE avancé, la gestion des lots, les tableaux de bord personnalisés ou les fonctionnalités d'intelligence artificielle. Cette logique réduit le risque perçu lors de l'adoption, facilite l'obtention d'un retour sur investissement rapide et accompagne les entreprises dans leur trajectoire de digitalisation.

Le développement produit est organisé autour d'une feuille de route évolutive. La première version commerciale se concentre sur les fonctionnalités essentielles de collecte

de données, de visualisation et de pilotage de la production. Les évolutions futures seront priorisées en fonction des retours des utilisateurs, des besoins identifiés par les intégrateurs partenaires et des évolutions du marché industriel. Cette approche permet d'assurer une adéquation continue entre le produit et les besoins réels des clients.

L'expérience utilisateur constitue également un axe prioritaire du développement. Les interfaces sont conçues pour être compréhensibles par des opérateurs, responsables de production et responsables d'atelier ne disposant pas nécessairement d'une expertise informatique avancée. Cet aspect est particulièrement important dans un contexte où la résistance au changement constitue l'un des principaux facteurs d'échec des projets MES (Sutra & Mansur, 2025). Une attention particulière est donc portée à la simplicité des écrans, à la lisibilité des indicateurs et à la rapidité de prise en main.

Afin de faciliter l'acquisition de nouveaux clients, OpSee prévoit également la mise à disposition d'environnements de démonstration permettant aux prospects de découvrir concrètement les fonctionnalités du logiciel avant tout déploiement. Ces démonstrations s'appuieront sur des cas d'usage industriels représentatifs mettant en évidence les bénéfices du système en matière de visibilité de la production, de suivi des temps d'arrêt, de calcul d'OEE et de traçabilité. Cette approche vise à réduire l'incertitude liée à l'achat d'un MES et à accélérer la prise de décision.

Enfin, la politique de produit inclut une dimension de services reposant principalement sur le réseau d'intégrateurs partenaires. OpSee concentre ses ressources sur le développement et l'amélioration du logiciel tandis que les partenaires assurent l'installation, la configuration, la formation des utilisateurs et l'accompagnement des projets de déploiement. Cette organisation permet à l'entreprise de conserver une structure légère tout en garantissant aux clients un accompagnement de proximité adapté aux réalités du terrain industriel.

5.2.2 Politique de prix

La politique de prix regroupe les décisions relatives à la tarification de l'offre et constitue un élément déterminant du positionnement concurrentiel d'une entreprise (Kotler & Keller, 2016). Dans le cas d'OpSee, elle poursuit un double objectif : réduire les barrières financières à l'adoption des solutions MES pour les PME manufacturières tout en assurant la viabilité économique du projet.

Conformément au positionnement présenté en section 5.1.3, OpSee adopte un modèle open-core combinant un noyau gratuit sous licence AGPLv3 avec des offres propriétaires payantes. Cette approche permet aux entreprises de découvrir et d'expérimenter la solution sans investissement logiciel initial, tout en créant un mécanisme de montée en gamme vers les fonctionnalités avancées.

Le noyau gratuit met à disposition les fonctionnalités essentielles d'observabilité de la production : collecte des données, analyse de tendance et cockpit de visualisation limité. Cette offre constitue la principale porte d'entrée commerciale du projet. Elle permet aux PME industrielles de tester la solution sur un nombre limité d'équipements et aux intégrateurs partenaires de démontrer concrètement les bénéfices du logiciel auprès de leurs clients. Cette logique s'apparente à une stratégie freemium dont les taux de conversion observés dans l'industrie logicielle se situent généralement entre 3 et 5

La monétisation repose sur deux offres propriétaires. L'offre Premium, facturée 59 euros par mois et par équipement, donne accès à une fonctionnalité avancée du catalogue premium au choix. L'offre Entreprise, facturée 95 euros par mois et par équipement, active simultanément l'ensemble des fonctionnalités avancées disponibles.

Le choix d'une tarification par équipement constitue un élément différenciant important. Alors que de nombreux éditeurs MES privilégient une facturation par utilisateur ou par site, OpSee aligne son modèle sur la réalité opérationnelle des ateliers industriels. Une entreprise peut ainsi débuter avec quelques équipements connectés puis étendre progressivement son déploiement à mesure que les bénéfices sont démontrés. Cette approche limite l'investissement initial et accompagne la croissance du projet de digitalisation.

À titre d'exemple, une PME équipée de dix machines paierait 590 euros par mois avec l'offre Premium ou 950 euros par mois avec l'offre Entreprise. Ces montants restent significativement inférieurs aux coûts généralement observés lors du déploiement de solutions MES traditionnelles, qui impliquent fréquemment des investissements initiaux de plusieurs dizaines de milliers d'euros.

La politique tarifaire joue également un rôle central dans le développement du réseau de partenaires. Les intégrateurs assurent les prestations d'installation, de configuration, de formation et d'accompagnement directement facturées aux clients. En complément, ils perçoivent une commission de 10

Enfin, la montée en gamme constitue un levier important du modèle économique. L'objectif n'est pas uniquement d'acquérir de nouveaux utilisateurs du noyau gratuit, mais également d'accompagner progressivement les clients vers les offres payantes au fur et à mesure de leur maturité numérique. Cette logique permet d'augmenter la valeur générée par client tout en maintenant une barrière d'entrée faible pour les PME manufacturières.

La figure 5.1 synthétise l'articulation entre les différentes offres du catalogue, les flux de création de valeur et le rôle des intégrateurs partenaires dans le modèle économique d'OpSee.

5.2.3 Politique de distribution

La politique de distribution d'OpSee repose sur un réseau d'intégrateurs partenaires chargés de commercialiser, déployer et accompagner la solution auprès des PME manufacturières. Dans le secteur des logiciels industriels, la distribution ne se limite pas à la vente du produit : elle englobe également l'installation, l'intégration, le déploiement et l'accompagnement des utilisateurs (Kotler & Keller, 2016).

Dans le modèle d'OpSee, les partenaires intégrateurs constituent à la fois le principal canal de distribution et l'infrastructure humaine du déploiement chez le client. Shahrivar et al. (2018) identifient la position dans le *value network* comme l'un des éléments critiques du modèle *Commercial Open Source Software* (COSS), les partenaires jouant si-

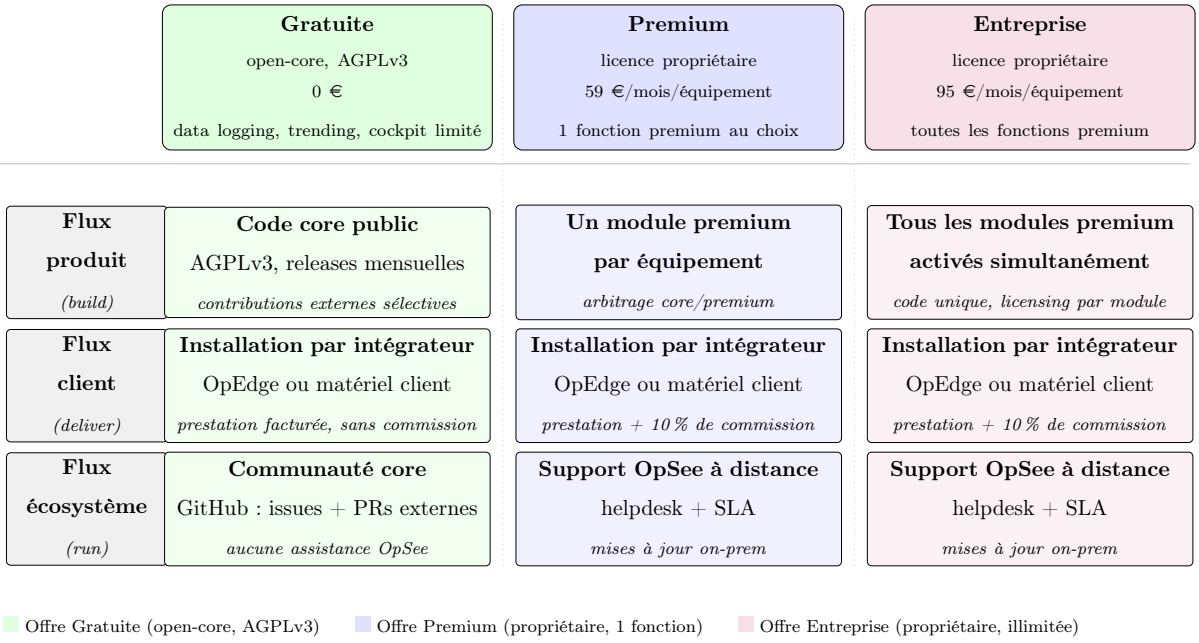


FIGURE 5.1 – Modèle opérationnel d'OpSee : trois flux opérationnels articulés autour de l'offre open-core et de ses deux extensions propriétaires.

multanément un rôle commercial et opérationnel. Cette logique est également formalisée par Jansen (2020) dans le *Software Ecosystem Governance Maturity Model* (SEG-M2), dont la capability *partner promotion and grooming* couvre le recrutement, la formation, la certification et l'évaluation des partenaires.

Cette approche est particulièrement adaptée au marché ciblé par OpSee. Les PME manufacturières disposent rarement des ressources internes nécessaires pour déployer seules une solution MES. Les intégrateurs assurent donc la prospection commerciale, la démonstration du logiciel, l'installation, la configuration, l'intégration aux systèmes existants et l'accompagnement des utilisateurs tout au long du projet.

Le recours à des partenaires permet à OpSee de concentrer ses ressources sur le développement et l'amélioration du logiciel tout en bénéficiant d'une capacité de déploiement étendue. Cette organisation favorise également une croissance plus rapide sans devoir constituer immédiatement une importante équipe interne de consultants et de techniciens.

Le recrutement des premiers partenaires constitue une priorité stratégique pour le

lancement du projet. Les intégrateurs ciblés sont principalement des sociétés spécialisées en automatisation industrielle, des intégrateurs MES, des consultants Industrie 4.0 ainsi que des partenaires déjà actifs dans l'écosystème Odoo ou dans l'intégration de solutions ERP industrielles. Ces acteurs disposent généralement d'une bonne connaissance des environnements de production et possèdent déjà un portefeuille de clients correspondant au marché cible d'OpSee.

L'objectif est de constituer un réseau initial de cinq partenaires certifiés durant la première année de commercialisation. À horizon trois ans, OpSee vise un réseau d'une quinzaine de partenaires actifs répartis sur les principaux marchés ciblés. Cette montée en puissance progressive permet d'assurer une couverture géographique cohérente tout en maintenant un niveau élevé de qualité de service.

TABLE 5.1 – Objectifs de développement du réseau de partenaires

Indicateur	**Année 1**	**Année 2**	**Année 3**
Partenaires certifiés	5	10	15
Pays couverts	2	4	5
Projets déployés	10	30	60

Les objectifs présentés au tableau 5.1 permettent de structurer le développement progressif du réseau de partenaires et d'assurer une couverture commerciale cohérente avec les ambitions de croissance d'OpSee. La montée en puissance du réseau doit permettre d'accélérer le déploiement de la solution tout en conservant un niveau élevé de qualité et d'accompagnement auprès des clients industriels.

Le programme partenaires est structuré en trois niveaux progressifs de certification : Bronze, Silver et Gold. Le niveau Bronze correspond aux partenaires nouvellement certifiés, capables d'installer et de configurer les fonctionnalités de base du logiciel. Le niveau Silver regroupe des intégrateurs plus expérimentés, en mesure d'accompagner des projets plus complexes et de conseiller les entreprises dans le choix des modules avancés. Le

niveau Gold rassemble les partenaires de référence disposant d'une expertise sectorielle approfondie et d'une expérience significative dans l'intégration de solutions industrielles. Cette progression s'inspire du programme partenaires d'Odoo, qui structure son réseau autour de différents niveaux associés à des critères de compétence et de satisfaction client (Odoo S.A., 2026).

Le processus d'intégration d'un nouveau partenaire se déroule en plusieurs étapes. Après une phase de sélection, le partenaire suit un parcours de formation couvrant les fondamentaux du logiciel, les standards industriels supportés ainsi que les bonnes pratiques de déploiement. Une certification valide ensuite sa capacité à réaliser un premier projet de manière autonome. Des formations continues et des mises à jour régulières permettent ensuite d'accompagner l'évolution du produit et de maintenir les compétences du réseau.

Cette structuration garantit un niveau de qualité homogène tout en encourageant la montée en compétence des partenaires. Le modèle SEG-M2 prévoit également des mécanismes d'audit et d'évaluation régulière permettant de vérifier le respect des standards attendus et, si nécessaire, de rétrograder ou d'exclure un partenaire ne répondant plus aux critères de qualité définis.

Le design des incitations associées à ce programme constitue un enjeu opérationnel important. Pelser et al. (2015) montrent que les programmes partenaires les plus efficaces sont ceux qui créent un sentiment de reconnaissance et d'accompagnement plutôt qu'une simple relation transactionnelle. Le programme OpSee privilégie donc les investissements en formation, en support, en visibilité commerciale et en accès privilégié à la roadmap du produit.

La rémunération des intégrateurs combine la facturation directe de leurs prestations de services au client final et une commission de 10

Le développement commercial d'OpSee repose largement sur ce réseau. Les intégrateurs constituent le principal canal d'acquisition de nouveaux clients et jouent un rôle clé dans l'identification des besoins, la démonstration du logiciel et l'accompagnement

des projets pilotes. Cette stratégie permet à OpSee de bénéficier d'une force commerciale étendue sans devoir constituer immédiatement une équipe de vente importante.

Les partenaires sont également encouragés à participer à des salons professionnels, à organiser des démonstrations et à produire du contenu technique mettant en avant leurs réalisations. Cette logique contribue à renforcer la visibilité du projet tout en valorisant l'expertise des intégrateurs auprès de leurs propres clients.

Enfin, la politique de distribution d'OpSee repose sur une logique de proximité avec les entreprises industrielles. Les partenaires fournissent un accompagnement local et réactif, particulièrement important dans un secteur où les contraintes opérationnelles et les besoins d'assistance influencent fortement l'adoption et l'utilisation quotidienne des logiciels. Cette proximité constitue un facteur clé de succès pour la diffusion du projet et la construction d'une relation durable avec les clients.

5.2.4 Politique de communication

La politique de communication d'OpSee vise à faire connaître la solution auprès des PME manufacturières, à recruter des intégrateurs partenaires et à générer les premiers projets pilotes. Dans un marché où les décisions d'achat sont longues et impliquent plusieurs parties prenantes, la communication doit avant tout construire la crédibilité du projet et démontrer concrètement la valeur du logiciel. Comme le soulignent Kotler et Keller (2016), la communication ne vise pas uniquement à générer de la notoriété, mais également à construire une relation de confiance durable avec les clients et les partenaires.

Dans le cadre d'OpSee, la communication doit répondre à un double objectif : faire connaître la solution auprès des PME manufacturières et construire une crédibilité suffisante dans un marché historiquement dominé par de grands éditeurs de logiciels industriels. La stratégie de communication s'organise donc autour de la démonstration concrète de la valeur du produit, de la transparence liée au modèle open-core et de la proximité avec les acteurs industriels.

Les objectifs de communication des premières années sont au nombre de quatre :

— accroître la notoriété d'OpSee auprès des PME manufacturières ;

— recruter et accompagner les premiers intégrateurs partenaires ;

— générer des démonstrations qualifiées du logiciel ;

— convertir les projets pilotes en abonnements Premium ou Entreprise.

La présence numérique constitue un premier axe de la communication. Le site internet du projet présente la proposition de valeur, les fonctionnalités du logiciel, les offres disponibles et le fonctionnement du modèle open-core. Il met également en avant les cas d'usage industriels, les bénéfices opérationnels du logiciel et les différents modules disponibles. L'objectif est de permettre aux visiteurs de comprendre rapidement les problèmes auxquels répond OpSee et les bénéfices attendus d'un déploiement.

LinkedIn constitue un second canal de communication particulièrement pertinent pour OpSee. La plateforme permet de diffuser du contenu professionnel destiné aux dirigeants de PME, responsables de production, intégrateurs et acteurs de l'écosystème industriel. Les publications peuvent notamment porter sur les avancées du projet, des démonstrations produit, des retours d'expérience, des contenus éducatifs autour du MES ou encore des tendances liées à l'industrie 4.0.

La communication s'inscrit dans un parcours commercial progressif. Les prospects découvrent généralement OpSee via LinkedIn, un salon professionnel, une recommandation d'intégrateur ou une recherche en ligne. Ils sont ensuite orientés vers une démonstration du logiciel ou vers l'installation du noyau gratuit. Cette phase pilote permet aux entreprises de tester la solution dans un environnement réel avant d'envisager une migration vers les offres Premium ou Entreprise. Cette approche est particulièrement adaptée au marché industriel, où les décisions d'investissement reposent davantage sur la démonstration de résultats concrets que sur des arguments marketing traditionnels.

La participation à des salons industriels, conférences spécialisées et événements liés à l'industrie 4.0 constitue un autre levier important. Ces événements permettent à OpSee de rencontrer directement des PME manufacturières, des intégrateurs, des responsables de production et des acteurs institutionnels. Ils offrent l'occasion de réaliser des démonstra-

tions en conditions proches du terrain, de recueillir des retours qualitatifs et de renforcer la crédibilité du projet auprès de l'écosystème industriel. Le projet a notamment participé au salon Yaka, consacré à l'intelligence artificielle, et au salon Ambition Industrie à Liège, deux événements qui ont permis de présenter la solution aux PME industrielles, aux intégrateurs et aux acteurs institutionnels de la région.

Les démonstrations produit sont au cœur de la stratégie de communication. Dans le secteur industriel, les entreprises ont besoin de visualiser concrètement le fonctionnement d'une solution avant d'envisager son adoption. OpSee doit donc mettre en avant des scénarios d'utilisation réels, par exemple le suivi d'une ligne de production, le calcul de l'OEE, la visualisation des arrêts machines ou la collecte de données en temps réel. Pour ses démonstrations en salon, le projet s'appuie sur un dispositif compact : un trieur motorisé qui sépare des balles de ping-pong rouges et blanches, piloté par un automate sur lequel OpSee calcule l'OEE en temps réel. Les balles blanches représentent les pièces conformes et les balles rouges les rebuts, ce qui matérialise la composante qualité de l'indicateur. Les visiteurs peuvent également forcer l'arrêt ou le redémarrage de la machine afin d'illustrer la composante disponibilité, tandis que le débit de balles triées est comparé à une vitesse nominale pour rendre visible la composante performance. Cette mise en situation rend la construction de l'OEE immédiatement compréhensible pour les visiteurs et permet de démontrer concrètement la valeur du logiciel.

La communication s'appuie également sur les partenaires intégrateurs, qui constituent un canal privilégié auprès des clients industriels. Lorsqu'ils interviennent chez un client pour des missions d'intégration plus larges, comme la mise en place d'une chaîne de production, le déploiement d'équipements automatisés ou la modernisation d'un système informatique industriel, ils peuvent identifier le besoin d'un MES et proposer OpSee comme composante de la solution globale. Cette logique inscrit la promotion d'OpSee dans le flux de travail naturel des intégrateurs et évite de recourir à une démarche commerciale isolée.

Les partenaires jouent également un rôle de prescription. Grâce à leur proximité avec les entreprises industrielles, ils sont souvent les premiers à identifier un besoin de digitalisa-

tion de la production. Ils constituent ainsi un canal d'acquisition particulièrement efficace pour OpSee, car leur recommandation bénéficie déjà d'un niveau élevé de confiance auprès du client final. Des supports commerciaux, des vidéos de démonstration, de la documentation technique simplifiée et des présentations standardisées sont mis à leur disposition afin d'assurer une communication cohérente autour du projet.

Enfin, la dimension open-core constitue un levier de communication différenciant. La transparence du projet, la documentation publique, la présence sur GitHub et l'ouverture du noyau logiciel renforcent la confiance des entreprises industrielles en réduisant les craintes d'enfermement vis-à-vis d'un éditeur unique (2.1.2). Cette communication autour de l'open-core doit toutefois rester centrée sur les bénéfices concrets pour les PME, notamment la flexibilité, l'accessibilité financière, l'indépendance technologique et la possibilité d'adopter progressivement le logiciel.

La stratégie de communication sera déployée progressivement. La première année sera principalement consacrée au recrutement des partenaires intégrateurs et à la réalisation des premiers projets pilotes. Les salons professionnels, les démonstrations produit et les contenus diffusés sur LinkedIn constitueront les principaux leviers d'acquisition. À partir de la deuxième année, l'objectif sera d'accroître la visibilité du projet grâce aux retours d'expérience clients, aux études de cas et aux références obtenues lors des premiers déploiements. Ces références joueront un rôle essentiel dans la construction de la crédibilité d'OpSee sur un marché où la confiance constitue un facteur déterminant dans les décisions d'achat.

La politique de communication d'OpSee s'articule ainsi autour de la création de confiance, de la démonstration concrète de la valeur du logiciel et de la proximité avec l'écosystème industriel. Cette approche correspond aux spécificités du marché B2B industriel, où la crédibilité et la preuve opérationnelle sont déterminantes dans les décisions d'adoption.

Chapitre 6

Gouvernance

Résumé exécutif. OpSee fonctionne avec une structure volontairement légère à deux pôles : un pôle technique sous l'encadrement de Peter Mees et un pôle business sous la direction de Christophe Camerlynck (CEO d'AgiNtech), avec coordination hebdomadaire par pôle et réunion inter-pôles bimensuelle. Un *advisory board* consultatif (trois experts externes dont un industriel client et un expert MES extérieur à l'écosystème AgiNtech) est prévu à partir de 2027. Le pacte d'actionnaires anticipe les transitions à venir (diplomation des fondateurs étudiants, entrée d'investisseurs, départs éventuels) par les clauses standards de l'écosystème start-up : *vesting* conditionné à l'engagement opérationnel, droit de préemption, *drag-along*, *tag-along*, quorums sur décisions stratégiques. Le conflit d'intérêts OpSee–AgiNtech est traité explicitement par une procédure de récusation (au sens de l'article 5 :76 du CSA), une discipline de pleine concurrence (*arm's length*) sur les flux inter-entités, et une clause de non-exclusivité du partenariat. La gouvernance opérationnelle couvre la *roadmap* produit (*backlog* unifié, comité produit trimestriel, comité client Gold consultatif), l'animation de la communauté open source (*Contributor License Agreement*, statut de mainteneur explicite, code de conduite type *Contributor Covenant*), une veille licenciaire continue sur les composants amont et la

mitigation du *bus factor* (documentation systématique, dépôt conjoint des secrets de production AgiNtech–OpSee). Six indicateurs non financiers (qualité du réseau partenaires, santé de la communauté, conformité RGPD/AI Act, NPS clients, hygiène licenciaire) consolident les indicateurs commerciaux du chapitre 7 dans un rapport de gouvernance annuel.

L'équipe et la collaboration avec AgiNtech, le véhicule juridique et l'audit des licences amont, le programme partenaires et le plan financier ont été traités aux chapitres 1 à 7. Ce chapitre traite uniquement de ce qui les articule : comment le pouvoir se répartit entre associés, comment le conflit d'intérêts OpSee–AgiNtech est anticipé, comment la roadmap produit et la communauté open source sont pilotées, et quels indicateurs non-financiers complètent ceux du chapitre 7.

6.1 Structure organisationnelle et processus décisionnels

L'équipe est présentée en section 1.3 et le rôle des intervenants AgiNtech en section 4.3. La structure qui en résulte est à deux pôles : un pôle technique mené par les fondateurs ingénieurs avec Peter en encadrement, et un pôle business mené par les fondateurs en gestion sous la direction de Christophe (CEO d'AgiNtech). Cette répartition est celle qu'adoptent la plupart des éditeurs logiciels à leurs débuts, lorsque l'équipe reste réduite et que les fondateurs assument directement leurs spécialités respectives.

6.1.1 Processus décisionnels et coordination interne

Les décisions opérationnelles quotidiennes sont prises au sein du pôle concerné. Les décisions stratégiques (contrat structurant, choix d'architecture irréversible, ouverture du capital, recrutement clé) feront l'objet d'une validation collective entre les fondateurs, élargie à Christophe lorsqu'elles engagent la trajectoire industrielle de l'entreprise.

La coordination cible combine des réunions hebdomadaires distinctes pour chacun des deux pôles et une réunion inter-pôles toutes les deux semaines avec Peter et Christophe pour les sujets transverses. Le tableau 6.1 récapitule l'ensemble des instances de gouvernance d'OpSee, y compris celles décrites plus loin (comité produit, comité client Gold, advisory board).

TABLE 6.1 – Instances de gouvernance d'OpSee : cadence, participants et périmètre décisionnel.

Instance	**Cadence**	**Participants**	**Périmètre**
Réunion pôle technique	Hebdomadair	Fondateurs techniques, Peter	Développement, architecture, sécurité
Réunion pôle business	Hebdomadair	Fondateurs business, Christophe	Commercial, marketing, partenaires
Réunion inter-pôles	Bimensuelle	Tous les fondateurs, Peter, Christophe	Arbitrages transverses, suivi global
Comité produit	Trimestrielle	Fondateurs, Peter	Roadmap, arbitrage noyau/premium
Comité client Gold	Trimestrielle	OpSee + partenaires Gold	Influence sur la roadmap
Advisory board (à partir 2027)	Trimestrielle	Fondateurs + 3 experts externes	Revue stratégique consultative

6.1.2 Évolution organisationnelle et advisory board

La structure actuelle est volontairement légère. À mesure que le parc d'équipements connectés croît selon les hypothèses du plan financier (section 7.1), plusieurs évolutions sont anticipées : recrutement de développeurs supplémentaires, création d'une fonction

support client, structuration progressive d'une équipe commerciale interne et formalisation du réseau d'intégrateurs en programme tri-niveaux (section 5.2.3).

Advisory board.

Un *advisory board* non statutaire est envisagé à partir de la deuxième année d'exploitation, soit en 2027 dans le scénario médian du plan financier (section 7.1). Sa composition cible mêle un industriel issu d'une PME manufacturière déjà cliente, un expert MES senior extérieur à AgiNtech (pour contrebalancer le biais évoqué en section 6.2.2), et un acteur supplémentaire ayant plus une vision stratégique. Le format retenu est celui d'une revue stratégique trimestrielle consultative, sans pouvoir décisionnel formel mais assortie d'un engagement de réponse écrite des fondateurs aux recommandations émises. Cette forme légère renforce la crédibilité du projet auprès des partenaires financiers sans introduire de contrainte décisionnelle prématurée ; elle préfigure le comité stratégique formel qui interviendra en cas d'entrée d'investisseurs externes.

6.2 Gouvernance actionnariale

Le choix de la SRL et les obligations associées sont traités en section 4.1. Cette section couvre deux points non traités ailleurs et propres à OpSee : l'organisation contractuelle entre associés au-delà des statuts (pacte d'actionnaires), et la gestion du conflit d'intérêts induit par la proximité avec AgiNtech.

6.2.1 Pacte d'actionnaires

Un pacte d'actionnaires complète les statuts et anticipe les transitions prévisibles à cinq ans : diplomation des fondateurs étudiants, entrée potentielle d'investisseurs, départ ou décès d'un associé. Sa rédaction est rendue particulièrement importante par deux spécificités d'OpSee : une équipe fondatrice partiellement composée d'étudiants encore en master à la constitution, et un actionnariat partagé entre personnes physiques et une

personne morale (AgiNtech).

Vesting et statut transitoire des fondateurs étudiants.

Le contrat signé par les étudiants à la création du projet (section 4.6) conditionne l'attribution effective de parts sociales à la fin du master et à l'engagement opérationnel post-diplomation. Le pacte exprime le fait que si l'étudiant travaille au sein de l'entreprise, il aura l'occasion d'acheter des parts d'OpSee tant qu'il est actif dans la société mais qu'il devra les revendre s'il décide de sortir du projet. Ce mécanisme, classique dans l'écosystème start-up depuis les travaux empiriques de Kaplan et Strömberg (2003) sur les contrats de *venture capital*, empêche qu'un fondateur quitte le projet immédiatement après avoir obtenu l'intégralité de ses parts.

Clauses de cession et de sortie.

L'évolution de l'actionnariat est encadrée par trois clauses standards, dont la diffusion dans les contrats VC a été documentée par Bengtsson (2011) :

— un droit de préemption au profit des associés existants en cas de cession projetée par l'un d'eux, qui contrôle l'entrée de tiers au capital ;

— une clause de *drag-along* (obligation d'entraînement) qui permet à une majorité qualifiée de contraindre les minoritaires à céder leurs parts en cas d'offre globale sur la société, condition généralement exigée par les investisseurs en phase d'amorçage ;

— une clause de *tag-along* (droit de suite) qui protège symétriquement les minoritaires en cas de cession majoritaire, en leur ouvrant la possibilité de céder aux mêmes conditions.

Quorums et droits de veto.

Le pacte fixe la liste des décisions soumises à majorité qualifiée ou à veto d'AgiNtech, distinctes des décisions opérationnelles courantes : levée de fonds significative, cession d'actifs incorporels (code source, marque), modification de la licence du noyau, partenariat

exclusif structurant, recrutement d'un dirigeant. Cette liste est volontairement courte : elle protège les décisions de fond sans paralyser l'exécution quotidienne par un veto trop large.

Mécanisme de résolution des conflits.

Le pacte ne prévoit pas une résolution graduée des litiges entre associés comme il existe par exemple : une tentative de médiation interne sur trente jours, puis un médiateur agréé, et l'arbitrage en dernier ressort. Le contentieux judiciaire est explicitement écarté car son coût et sa durée seraient incompatibles avec la phase de développement. On compte principalement sur la bonne volonté de chacun dans la résolution des conflits et c'est pour cela qu'un contrat a été rédigé précédemmment afin d'éviter toutes tensions possibles au sein du projet.

6.2.2 Gestion des conflits d'intérêts OpSee–AgiNtech

La proximité entre OpSee et AgiNtech, présentée comme un atout au chapitre 1 (accès au terrain industriel, réseau d'intégrateurs, expertise MES), est aussi un *conflit d'intérêts structurel* qui doit être explicitement gouverné. Trois zones de tension émergent en pratique.

Mandats croisés.

Christophe est CEO d'AgiNtech et dirigeant d'OpSee à la fois. Les arbitrages dans lesquels l'intérêt commercial d'AgiNtech (en tant qu'intégrateur ou partenaire industriel) diverge de celui d'OpSee (par exemple favoriser un intégrateur concurrent sur un territoire) ne peuvent donc être tranchés par lui seul. Ce traitement s'inscrit dans le cadre des conflits d'intérêts des dirigeants d'une SRL belge prévu par le (Belgique, 2019, art. 5 :76), lui-même aligné sur les principes de gouvernance d'entreprise de l'OECD (2023).

Conditions commerciales inter-entités.

Les prestations facturées par AgiNtech à OpSee (et réciproquement) respectent le principe de pleine concurrence (*arm's length*) : des conditions tarifaires équivalentes à celles que les deux entités pratiqueraient avec des tiers non liés. Cette discipline répond à deux préoccupations distinctes : éviter un transfert de marge à visée fiscale, et préserver la crédibilité du projet auprès d'investisseurs externes. Les flux entre OpSee et AgiNtech sont revus chaque année et consignés dans le rapport de gestion remis aux associés.

Indépendance opérationnelle.

Les contrats avec AgiNtech sur le périmètre intégration ne sont pas exclusifs. AgiNtech entre dans le réseau partenaires d'OpSee aux mêmes conditions qu'un intégrateur tiers : commission de 10 %, programme de certification, audit périodique (voir section 5.2.3). Réciproquement, OpSee peut référencer d'autres intégrateurs sans accord préalable d'AgiNtech, y compris sur les territoires historiquement couverts par celle-ci. Cette double clause préserve l'autonomie commerciale du projet.

L'*advisory board* mentionné en section 6.1.2 joue ici un rôle de garde-fou complémentaire : la présence d'un expert MES extérieur à l'écosystème AgiNtech apporte un point de vue indépendant sur les décisions structurantes.

6.3 Gouvernance opérationnelle

Un éditeur de logiciel industriel open-core comme OpSee doit piloter quatre dimensions opérationnelles qui lui sont propres : la roadmap produit, la communauté open source, la veille sur les licences amont, et la continuité d'équipe. Les choix d'architecture, le modèle de licences AGPLv3 + propriétaire et les exigences de cybersécurité sont traités aux chapitres 3 et 4 ; cette section se limite aux processus de pilotage qui les rendent tenables sur la durée.

6.3.1 Gouvernance produit et roadmap

L'arbitrage entre noyau gratuit et catalogue premium est le moteur du cycle produit. Son cadre théorique figure en annexe (section A.5.2) et sa mise en œuvre dans le plan opérationnel (section A.5.1). Le processus décisionnel s'organise comme suit :

— **Backlog produit unifié.** Toutes les demandes (issues GitHub publiques, retours clients via les intégrateurs, propositions internes) sont versées dans un backlog unique tenu par le pôle technique. Chaque entrée est qualifiée selon trois axes : la dimension métier, la complexité d'implémentation, et une classification provisoire (noyau libre, module premium, ou refus).

— **Comité produit trimestriel.** Une revue trimestrielle réunit les fondateurs et Peter pour arbitrer le classement, fixer la priorité du trimestre suivant et reclasser au besoin certaines fonctions entre noyau et catalogue premium. Cette cadence rejoint la logique d'*accessorize* décrite par Olson et al. (2018), où des fonctions initialement premium migrent dans le noyau lorsque le marché les banalise.

— **Comité client Gold.** Le programme partenaires (section 5.2.3) prévoit un comité client trimestriel réservé aux intégrateurs Gold, dont l'avis pondère les décisions du comité produit sans s'y substituer. Cette boucle ramène la roadmap au plus près des déploiements réels, sans confier la décision finale aux partenaires.

6.3.2 Gouvernance de la communauté open source

Publier le noyau d'OpSee sous AGPLv3 ne constitue pas en soi un projet open source. La visibilité, les contributions externes et la crédibilité auprès des intégrateurs supposent une animation explicite de la communauté. La phase de mise en marché prévoit pour cela les mécanismes suivants :

Contributor License Agreement (CLA).

Toute contribution externe au noyau (issue GitHub, *pull request*, traduction, documentation) est soumise à un accord de licence du contributeur. Ce mécanisme, standard chez les éditeurs *single-vendor* comme MongoDB, Elastic ou Grafana Labs avant sa transition AGPLv3, donne à OpSee la liberté de relicencier le noyau ou d'intégrer une contribution au catalogue premium si besoin. Il préserve donc la viabilité commerciale du modèle open-core analysé en section 4.9.

Statut de mainteneur.

Le projet distingue explicitement deux rôles : les contributeurs ponctuels (qui voient une *pull request* fusionnée) et les mainteneurs (qui disposent du droit de fusion sur le dépôt principal). Les mainteneurs sont initialement les fondateurs techniques. L'ouverture progressive de ce statut à des contributeurs externes engagés sur la durée suit les pratiques décrites dans le *Software Ecosystem Governance Maturity Model* de Jansen (2020), capability *community management*.

Code de conduite et modération.

L'adoption d'un code de conduite explicite, typiquement adapté du *Contributor Covenant* de Ehmke (2014), et la désignation d'un référent modération encadrent les échanges sur les canaux publics (issues, discussions, salons de chat). Les communautés industrielles attendent cette discipline avant d'engager leur image sur une solution.

Les outils opérationnels (plateforme du dépôt principal, canal de discussion communautaire, signataire institutionnel du CLA) seront fixés lors de l'ouverture publique du dépôt et ne sont pas arrêtés à la date du présent mémoire.

6.3.3 Veille licenciaire opérationnelle

L'audit de la stack technique mené au chapitre 4 (section 4.9) établit qu'environ 98 % des composants tiers utilisés par OpSee sont sous licence permissive ou copyleft faible compatible avec le modèle open-core. Les quatre composants à licence atypique (Grafana, Redis, TimescaleDB, Psycopg) sont neutralisés par des choix d'architecture déjà appliqués. Le risque structurel de relicensing pesant sur les éditeurs *single-vendor* amont est analysé à la section 8.1.1.

L'audit doit se prolonger en pratique opérationnelle. Les mesures continues retenues sont les suivantes :

— **Inventaire de dépendances actualisé.** La liste des composants tiers et de leurs licences (annexe A.4.1) est régénérée à chaque montée de version majeure, via un outil d'analyse de licences branché sur la chaîne d'intégration continue.

— **Alerte sur relicensing.** Une veille porte sur les annonces publiques des éditeurs amont, en particulier ceux identifiés comme exposés à la section 8.1.1. Tout changement déclenche une analyse d'impact dans le mois qui suit l'annonce.

— **Priorité aux fondations neutres.** Pour les nouveaux composants à intégrer, priorité va aux projets hébergés par l'Apache Software Foundation, la Cloud Native Computing Foundation ou la Linux Foundation, historiquement moins exposés à des relicensings unilatéraux.

6.3.4 Continuité opérationnelle et *bus factor*

Une partie des fondateurs est encore en master au moment de la constitution, et OpSee se déploie chez le client en production industrielle. Le risque de discontinuité d'expertise sur le noyau technique, conceptualisé sous le terme de *bus factor* par Cosentino et al. (2015) puis affiné en *truck factor* par Avelino et al. (2016) pour les dépôts Git, est donc un enjeu de gouvernance à part entière. La documentation systématique des composants critiques rend la reprise possible par un développeur extérieur. Le code

source, les configurations et les secrets de production sont déposés sous gestion conjointe AgiNtech–OpSee, avec une procédure de récupération formalisée en cas d'indisponibilité des fondateurs techniques. Enfin, les contrats étudiants prévoient un engagement opérationnel post-diplomation (section 4.6), qui prolonge la continuité d'expertise au-delà du périmètre académique.

6.4 Pilotage et indicateurs

Le pilotage de l'entreprise s'appuie sur deux familles d'indicateurs. La première, commerciale et financière (chiffre d'affaires, coût d'acquisition client, *lifetime value*, taux de *churn* et de conversion entre tiers Free, A et B), est développée au chapitre 7 sous trois scénarios chiffrés (worst, expected, best case). Elle n'est pas redoublée ici.

La seconde famille porte sur la gouvernance non-financière et mesure la santé du dispositif décrit dans le présent chapitre :

— **Qualité du réseau partenaires.** Taux de certification active des intégrateurs (proportion conservant leur certification à l'issue de l'audit annuel prévu par la capability *partner promotion and grooming* du SEG-M2, voir section 5.2.3), nombre de partenaires par niveau, ancienneté moyenne du réseau.

— **Santé de la communauté open source.** Nombre de contributeurs externes actifs sur les douze derniers mois, nombre d'issues ouvertes ou fermées, délai médian de réponse aux *pull requests*. Ces indicateurs prolongent la gouvernance communautaire décrite en section 6.3.2.

— **Conformité réglementaire.** Bilan annuel des incidents RGPD, état d'avancement de l'analyse d'impact relative à la protection des données (AIPD) pour l'AI Assistant (section 4.11), suivi des obligations de transparence prévues à l'article 50 de l'AI Act.

— **Satisfaction client.** *Net Promoter Score* (NPS) recueilli auprès des utilisateurs finaux et des intégrateurs (Reichheld, 2003), taux de réabonnement par tier d'équi-

pement. Ces indicateurs complètent qualitativement le *churn* équipement modélisé en section 7.1.

— **Hygiène licenciaire.** Délai moyen entre l'annonce d'un relicensing amont et la décision de mitigation, nombre de composants tiers en cours d'examen pour incompatibilité avec le modèle open-core. Ces indicateurs prolongent le suivi décrit en section 6.3.3.

Le tableau 6.2 synthétise ces indicateurs, leur source de mesure et le niveau d'alerte retenu.

Ces indicateurs sont consolidés une fois par an dans un *rapport de gouvernance* remis à l'*advisory board* (section 6.1.2), puis archivé. Une cadence annuelle, plus longue que le suivi commercial mensuel, correspond à ce que mesurent ces indicateurs : des mouvements de fond, pas des variations de court terme.

6.5 Synthèse

Sur le plan organisationnel, OpSee fonctionne avec une structure à deux pôles sous direction de Christophe, des rythmes de coordination différenciés et un *advisory board* consultatif à partir de 2027. Sur le plan actionnarial, un pacte d'actionnaires anticipe les transitions à venir (diplomation des fondateurs étudiants, entrée de capital, départs éventuels) par les clauses standards de l'écosystème start-up : *vesting* avec *cliff*, *drag-along*, *tag-along*, et quorums sur décisions stratégiques. Le conflit d'intérêts OpSee–AgiNtech, lui, est gouverné explicitement par une procédure de récusation, une discipline de pleine concurrence sur les flux inter-entités et une clause de non-exclusivité du partenariat.

Sur le plan opérationnel, la roadmap produit est arbitrée par un comité interne trimestriel et un comité client Gold consultatif ; la communauté open source est animée par un CLA, un statut de mainteneur explicite et un code de conduite ; l'audit de licences du chapitre 4 est traduit en veille continue ; le risque de *bus factor* est adressé par la documentation et le dépôt conjoint des secrets. Le pilotage complète enfin les indicateurs

commerciaux du chapitre 7 par six indicateurs non-financiers portant sur le réseau, la communauté, la conformité, la satisfaction client et l'hygiène licenciaire.

Aucun de ces dispositifs ne demande à ce stade de structure statutaire plus lourde. Un comité stratégique ou un conseil d'administration élargi viendront avec l'entrée d'investisseurs externes ou la croissance de l'équipe. Le chapitre constitue ainsi le pendant organisationnel du chapitre des risques (chapitre 8) : à plusieurs des risques qui y sont identifiés, il propose des contre-mesures explicites.

TABLE 6.2 – Indicateurs de gouvernance non-financière : source de mesure, cadence, seuil d'alerte.

Indicateur	**Source**	**Cadence**	**Seuil d'alerte**
Taux de certification active des partenaires	Audit annuel du programme partenaires	Annuelle	< 80 % du réseau
Contributeurs externes actifs (12 mois)	Statistiques du dépôt principal	Trimestriell	Tendance baissière deux trimestres consécutifs
Délai médian de réponse aux *pull requests*	Statistiques du dépôt principal	Mensuelle	> 14 jours
Incidents RGPD	Registre des traitements	Continue	Tout incident notifiable
NPS utilisateurs finaux et intégrateurs	Enquête semestrielle	Semestrielle	< 20
Délai d'analyse d'impact post-relicensing	Registre de veille licenciaire	Continue	> 30 jours

Chapitre 7

Plan financier

Résumé exécutif. Le plan financier couvre OpSee sur cinq ans (2026-2030) en trois scénarios (*worst*, *expected*, *best*). Hypothèses macro : indexation annuelle de 2,5 % sur coûts et salaires, ISOC belge des petites sociétés (20 % jusqu'à 100 000 € de bénéfice imposable, 25 % au-delà). Hypothèses commerciales : 16 équipements par client en *expected*, conversion Free→Premium de 10 à 20 % selon le scénario, churn équipement de 1 à 5 %, tarifs de 59 et 95 €/mois/équipement avec indexation tarifaire de 5 %/an, commission partenaire 10 %. Le chiffre d'affaires 2030 atteint 579 k€ en *worst*, 1,57 M€ en *expected* et 2,77 M€ en *best*. Les charges fixes passent de 238 k€ en 2026 (3 ETP démarrant en septembre) à 754 k€ en 2030 (10 ETP), dominées aux deux tiers par les ressources humaines. L'EBITDA bascule en territoire positif dès 2028 en *best* et en 2029 en *expected* ; il reste négatif en *worst* sur tout l'horizon du plan. Le financement combine apport AgiNtech (200 k€ en 2026), subventions wallonnes et fédérales (180 k€ cumulés sur 2026-2027) et tour de capital risque externe (150 k€ en 2027), soit 530 k€ qui couvrent l'intégralité du besoin en scénarios médian et optimiste ; un financement contingent dimensionné sur un creux de -829 k€ en 2030 serait à mobiliser uniquement en *worst*. La marge brute s'établit autour de 88 % du CA, la *Rule of 40* est

franchie dès 2028 en *expected*, et la VAN actualisée à 12,5 % atteint +182 k€ en *expected* et +1,36 M€ en *best* sur l'horizon explicite. La valorisation pré-money 2027 au multiple de 5x ARR ressort à 1,28 M€ en *expected* (89,5 % AgiNtech après dilution par le tour de capital risque). Les deux paramètres à valider en priorité sur le terrain sont la conversion Free→payant et le churn équipement.

Le Business Model Canvas d'OpSee, qui synthétise les neuf composantes du modèle économique du projet, est présenté et développé en section 2.8 du chapitre 2.

7.1 Hypothèses fixées pour établir notre plan financier

Le plan financier d'OpSee repose sur deux blocs d'hypothèses : les paramètres macroéconomiques et fiscaux applicables au marché belge d'une part, et la trajectoire de croissance commerciale de la solution d'autre part.

Sur le plan macroéconomique, le modèle applique une indexation annuelle de 2,5 % aux coûts et aux salaires. Ce taux représente la moyenne attendue de l'inflation belge sur l'horizon 2026-2030 : les projections du Bureau fédéral du Plan situent l'IPC à 3,5 % en 2026 puis 3,0 % en 2027 (Bureau fédéral du Plan, 2026), avant convergence progressive vers la cible symétrique de 2 % à moyen terme adoptée par la BCE depuis sa revue stratégique de 2021 (European Central Bank, 2021). L'impôt sur les sociétés suit le barème belge applicable aux petites sociétés au sens de l'article 1 :24 du *Code des sociétés et des associations* : taux réduit de 20 % sur la première tranche de 100 000 € de bénéfice imposable, taux normal de 25 % au-delà, sous réserve du versement au dirigeant d'une rémunération brute annuelle minimale de 50 000 € conformément à l'article 215 du CIR 92 (Code des impôts sur les revenus 1992, article 215 – Taux de l'impôt des sociétés, 1992 ; SPF Finances, 2024).

Les hypothèses commerciales modélisent une croissance progressive du portefeuille clients. Trois scénarios sont retenus (*worst*, *expected*, *best*), l'analyse se concentrant sur le

scénario intermédiaire considéré comme le plus représentatif. La croissance est incrémentale : le nombre de nouveaux clients d'une année dépend du volume de l'année précédente auquel s'applique un taux de croissance. Par exemple, 10 nouveaux clients en 2026 avec un taux de 20 % donnent 12 nouveaux clients en 2027.

Le modèle retient une hypothèse de configuration moyenne par client industriel. Le scénario *expected* fixe une PME disposant de deux lignes de production de huit équipements chacune, soit seize équipements connectés par client (au sens de la section 3.2). Le scénario *worst* retient dix équipements par client (PME plus petites ou parc partiellement instrumenté), le scénario *best* vingt (PME plus grandes ou multi-lignes). Ce paramètre détermine directement les revenus puisque la facturation repose sur le nombre d'équipements connectés.

Le pricing suit la logique open-core et comporte trois niveaux : un tier Free (noyau AGPLv3 gratuit), un Tarif A (offre Premium, 59 €/mois par équipement, environ 708 €/an) et un Tarif B (offre Entreprise, 95 €/mois par équipement, environ 1 140 €/an). Le tier Free n'est pas générateur de revenus directs : il sert d'entrée du funnel d'acquisition et permet aux PME de tester la plateforme sans engagement avant de basculer sur le Tarif A, puis le cas échéant sur le Tarif B.

OpSee n'est toutefois pas un SaaS au sens strict : la plateforme fonctionne en mode *offline-first* et en déploiement local (*on-premise*) chez le client (voir section 3.5.8). Le modèle articule open-core, facturation par équipement et déploiement local (voir section 5.1.3), une combinaison dont aucune étude de cas publique ne couvre les trois dimensions simultanément. Les hypothèses de conversion, churn et upgrade qui suivent sont donc extrapolées des benchmarks SaaS B2B (référence sectorielle la plus proche), puis adaptées au contexte OpSee : cycle de décision plus long propre aux PME industrielles (Dutta et al., 2022), et coût d'implémentation initial pluri-postes (licences, intégration, migration de données, personnalisation, formation, support) qui caractérise les déploiements ERP/MES industriels (Gallman, 2024) et crée des coûts de changement (*switching costs*) significatifs.

Les hypothèses de churn et de conversion sont construites au niveau des équipements plutôt que des clients, en cohérence avec le modèle économique : la facturation dépend du nombre d'équipements connectés actifs (3.2) et du tier de chaque équipement. Une entreprise cliente peut conserver OpSee tout en faisant évoluer certains équipements d'un tier à l'autre (Free vers A, A vers B), ce qui reflète plus finement la dynamique réelle d'usage.

Le churn équipement du tier Free est considéré comme nul dans les trois scénarios. Contrairement à un SaaS grand public, l'offre Free d'OpSee implique déjà une intégration chez le client (installation, configuration, connexion d'équipements, flux de données, hébergement). L'entreprise a donc déjà investi du temps et des ressources avant même de passer au payant, ce qui crée des coûts de changement substantiels cohérents avec les implémentations ERP/MES (Gallman, 2024). Les variations négatives observées sur le tier Free correspondent donc à une migration vers les offres payantes, pas à des départs.

La conversion Free → Tarif A est estimée à 10 % en *worst case*, 15 % en *expected case* et 20 % en *best case*. Ces taux dépassent les benchmarks freemium classiques (3,4 % pour les solutions Enterprise, 4,8 % pour les ERP, 4,1 % pour l'IoT (Bailyn, 2024)), ce qui s'explique par le caractère opérationnel de l'offre Free d'OpSee : déjà ancrée dans l'environnement de production, elle joue le rôle d'une démonstration intégrée plutôt que d'un essai léger. Les déclencheurs de conversion identifiés par Li (2022) pour le SaaS (fréquence d'usage, interactions initiées par l'utilisateur) s'en trouvent renforcés.

Le churn équipement du Tarif A est fixé à 5 % en *worst*, 3 % en *expected*, 2 % en *best*. Ces taux sont nettement inférieurs à la médiane SaaS B2B (16 % par an selon Pflaum (2025)), pour la même raison : une fois un équipement raccordé au Tarif A, l'entreprise bénéficie de fonctionnalités opérationnelles avancées et n'a pas d'intérêt à le déraccorder. Ces ordres de grandeur restent cohérents avec les analyses de SaaS Capital (2024) sur la rétention en SaaS B2B intégré.

La conversion Tarif A → Tarif B est retenue à 8 / 10 / 12 % selon le scénario. La montée en gamme y est plus progressive que la conversion initiale Free → A, car le

Tarif B représente une décision plus engageante : interconnexion plus large, pilotage global, exploitation complète du potentiel MES, intervention possible d'intégrateurs. Steinhoff et al. (2025) montrent que regrouper de nombreux modules additionnels dès l'*onboarding* accroît la perception de complexité et dégrade la rétention ; une approche progressive est donc préférable à un *bundling* agressif.

Le churn équipement du Tarif B est fixé à 3 / 2 / 1 % selon le scénario. Cette diminution graduelle reflète l'intégration la plus poussée (tableaux de bord, connecteurs industriels, intégration ERP), pour laquelle un remplacement devient particulièrement onéreux compte tenu des postes de personnalisation (Gallman, 2024).

La logique d'ensemble est celle d'un logiciel industriel intégré : plus le tier monte, plus l'intégration est forte, plus les coûts de changement sont élevés et plus le churn diminue. Le modèle ne décrit donc pas une perte d'utilisateurs entre offres, mais une migration progressive du parc d'équipements vers les tiers les plus avancés. Une indexation annuelle des prix de 5 % est appliquée pour absorber l'inflation et la montée en valeur de la solution. Une commission partenaire de 10 % sur les abonnements rémunère le réseau d'intégrateurs.

Les coûts se répartissent en fixes et variables. Les charges d'exploitation annuelles (hors coûts directs proportionnels au CA) croissent avec l'équipe : 238 k€ en 2026 (3 ETP démarrant en septembre), 465 k€ en 2027 (premier exercice plein, équipe étendue à 6 ETP), 476 k€ en 2028, puis 571 k€ en 2029 et 754 k€ en 2030 avec l'arrivée de quatre postes additionnels (CEO, deuxième vague d'ingénieurs, responsable marketing). Elles comprennent les salaires et charges sociales, les frais de fonctionnement (loyer, assurances, frais corporate), le marketing, les prestations externes et le matériel informatique.

Les coûts variables représentent environ 12 % du CA et comprennent la commission partenaire (10 %), l'hébergement cloud, l'amortissement de la plateforme matérielle et les frais de transaction. Le coût marginal d'un client supplémentaire reste donc limité.

La TVA belge est modélisée selon le régime PME : taux standard 21 % sur la part du CA soumise (environ 80 %, le solde étant en autoliquidation intra-UE B2B), déclara-

tions trimestrielles (régime applicable aux PME sous 2,5 M€ de CA). Le solde net (TVA collectée moins déductible) est intégré au plan de trésorerie comme flux distinct, ce qui modélise le décalage entre encaissements et reversements à l'administration.

Côté financement, l'amorçage repose sur trois sources. AgiNtech apporte 200 000 € en capital en 2026 et acquiert 100 % du capital à la constitution. Une enveloppe de subventions de 30 000 € en 2026 et 150 000 € en 2027 est mobilisable via les dispositifs wallons et fédéraux détaillés en section 7.13. Un tour de capital risque externe de 150 000 € vient compléter l'apport en 2027 pour absorber la phase d'investissement et soutenir la transition vers la rentabilité ; ce tour dilue partiellement AgiNtech.

7.2 Estimations des ventes

Les projections de revenus tiennent compte de la structure réelle d'une PME industrielle (lignes de production et équipements par ligne), pas seulement du nombre de clients. La facturation repose sur le volume d'équipements connectés.

Les ventes annuelles dérivent du nombre de nouveaux clients selon les taux de croissance définis précédemment, déclinés sur trois scénarios qui varient sur la vitesse d'adoption et le taux de conversion.

Dans le scénario *expected*, la croissance reste progressive et cohérente avec le cycle de vente long propre au secteur industriel. Dutta et al. (2022) identifient les principales barrières à l'implémentation MES dans les PME : manque de fonds, déficit d'expertise interne, contraintes de compatibilité avec les systèmes existants, arbitrages de priorité. Ces barrières ralentissent l'adoption et étalent la décision sur plusieurs mois.

La segmentation tarifaire à trois niveaux décrite plus haut s'ajoute à cette structure : tier Free (noyau AGPLv3 gratuit, entrée du funnel), Tarif A (offre Premium : une fonction premium au choix activée par équipement, parmi le catalogue OEE avancé, IA intégrée, batches ISA-88, reporting personnalisé), Tarif B (offre Entreprise : toutes les fonctions premium activées simultanément, plus support prioritaire et accompagnement à l'instal-

lation). Seuls les Tarifs A et B génèrent un revenu direct dans les projections ; le Free est traité comme un coût marketing et un générateur de leads. Une répartition par défaut de 50 % / 50 % entre Tarifs A et B est retenue, à confirmer sur les premiers déploiements.

- Worst case : 80 équipements payants la première année, alimentés par un pool d'environ 800 équipements Free (à un taux de conversion Free → Tarif A de 10 %) ;
- Expected case : 160 équipements payants, soit un pool Free d'environ 1 070 équipements (conversion 15 %) ;
- Best case : 280 équipements payants, soit un pool Free d'environ 1 400 équipements (conversion 20 %).

Ces volumes découlent directement des taux de conversion Free → Tarif A retenus en section précédente (10 / 15 / 20 %), eux-mêmes extrapolés des benchmarks freemium-to-paid publiés pour les segments Enterprise, ERP et IoT (Bailyn, 2024) et ajustés à la hausse pour tenir compte du caractère opérationnel et déjà intégré de l'offre Free chez OpSee. Les analyses sectorielles plus larges sur le SaaS B2B (ChartMogul, 2025 ; OpenView Partners, 2023) restent mobilisées comme cadre de référence, sans être directement transposables au modèle *on-premise* et freemium par équipement d'OpSee. Les valeurs retenues constituent donc une référence sectorielle proche, à confirmer avec les premiers déploiements pilotes.

Les estimations varient selon le scénario. Le *worst* suppose une adoption lente, peu de clients acquis et une montée en puissance progressive du réseau de partenaires. Le *best* mise sur une accélération plus rapide, soutenue par l'effet réseau, l'adoption facilitée par les intégrateurs et la densité d'équipements par client.

7.3 Prévisions du chiffre d'affaires

Le chiffre d'affaires d'OpSee est directement proportionnel au nombre d'équipements adoptant les formules payantes (Tarif A et Tarif B). Le tier Free, présenté en section précédente, n'apporte pas de revenu direct mais alimente la conversion vers les tiers payants. Les tarifs étant exprimés en paiement mensuel par équipement, source de vérité pour le

présent plan, les revenus annualisés sont obtenus par multiplication par douze :

— Tarif A : 59 €/mois par équipement, soit environ 708 €/an ;

— Tarif B : 95 €/mois par équipement, soit environ 1 140 €/an.

Les projections de chiffre d'affaires sur cinq ans (2026-2030), exprimées HT et issues du plan financier consolidé, sont représentées sur la figure 7.1. Elles intègrent l'indexation annuelle des prix de 5 % et la dynamique de migration progressive du parc d'équipements vers les tiers payants. L'écart entre scénarios s'accentue avec le temps, traduisant l'effet composé de la densité d'équipements par client et du rythme d'acquisition.

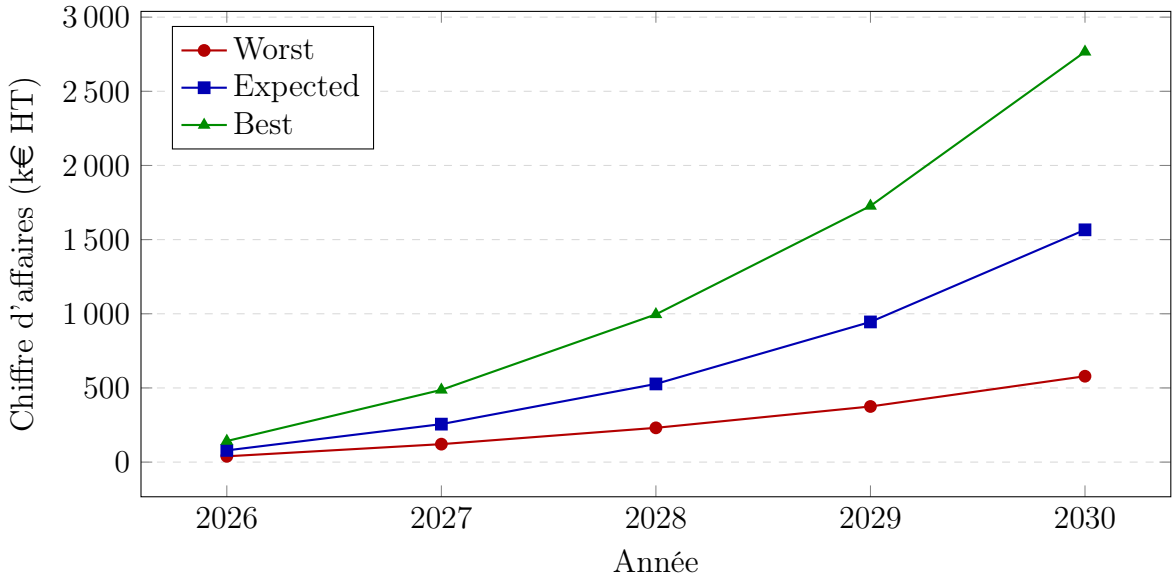


FIGURE 7.1 – Chiffre d'affaires annuel par scénario (k€ HT).

L'écart entre scénarios reflète à la fois le rythme d'acquisition de nouveaux clients, la densité moyenne du parc d'équipements par client et la répartition entre Tarif A et Tarif B. La croissance reste largement dépendante de la capacité du réseau d'intégrateurs partenaires à convertir de nouveaux clients industriels et de la maturité du processus de migration tarifaire au sein du parc installé.

7.4 Coûts fixes annuels

Les coûts fixes annuels, hors investissements initiaux, croissent avec l'équipe sur la période 2026-2030. La première année (2026) s'établit à 238 k€, l'équipe initiale n'étant engagée qu'à partir de septembre. L'exercice plein 2027 porte les charges à 465 k€, qui restent autour de 476 k€ en 2028 sous l'effet de l'indexation annuelle de 2,5 %. En 2029, le recrutement d'un CEO, d'un ingénieur additionnel et d'un responsable marketing à partir de septembre pousse le total à 571 k€ ; l'effet plein de ces embauches et l'arrivée d'un cinquième ingénieur en janvier 2030 portent l'exercice 2030 à environ 754 k€.

Salaires de l'équipe.

Premier poste de coût (salaires nets + charges salariales + charges patronales). Le total RH passe de 40 k€ en 2026 (3 ETP sur quatre mois) à 262 k€ en 2027 (premier exercice plein à 6 ETP), 268 k€ en 2028, 329 k€ en 2029 puis 496 k€ en 2030 avec l'équipe étendue à 10 ETP. L'équipe initiale compte six collaborateurs à partir de janvier 2027 : un dirigeant technique, deux profils business et trois profils techniques. Quatre postes supplémentaires renforcent la structure à partir de septembre 2029 puis janvier 2030 (CEO, deux ingénieurs additionnels, responsable marketing), pour un effectif final de dix collaborateurs. La figure 7.2 synthétise la trajectoire des recrutements.

Frais de fonctionnement.

Loyer, assurances, petit matériel, fournitures, services bancaires, télécommunications, frais corporate. Le loyer passe de 2 000 €/mois sur l'équipe initiale à 3 000 €/mois à partir de septembre 2029 pour accommoder l'équipe élargie.

Marketing et acquisition clients.

Salons professionnels, communication (publicité, plaquettes, site web), déplacements. Budget initial de 12 k€/an, porté à environ 30 k€/an à partir de 2029 avec l'arrivée du

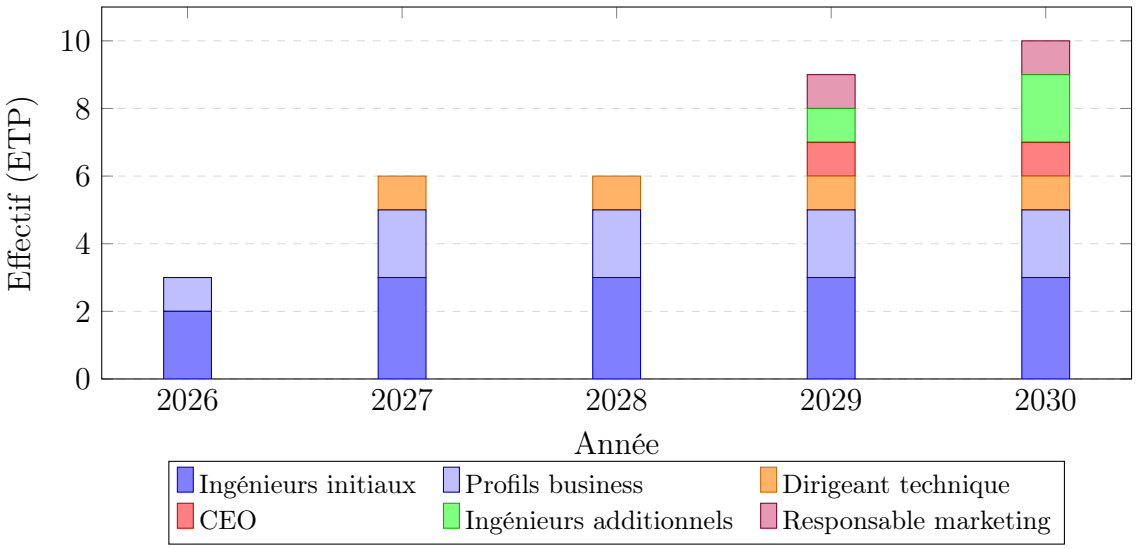


FIGURE 7.2 – Effectif d'OpSee 2026-2030 (ETP en fin d'année).

responsable marketing.

Frais juridiques et administratifs.

Obligations réglementaires, prestations juridiques et formalités administratives, environ 12 k€/an.

Matériel informatique et logiciels.

Postes de travail à l'embauche (laptops, écrans, accessoires) et abonnements logiciels récurrents. Environ 24 k€ en 2026 pour l'équipe initiale, puis ajouts ponctuels en 2029 (trois postes) et 2030 (un poste) pour les nouveaux collaborateurs.

La figure 7.3 donne la répartition des charges d'exploitation 2030 (régime de croisière post-embauches), dominée par les ressources humaines à hauteur des deux tiers.

7.5 Coûts variables annuels

Les coûts variables regroupent les charges proportionnelles au volume d'équipements connectés ou au chiffre d'affaires. Quatre postes les composent :

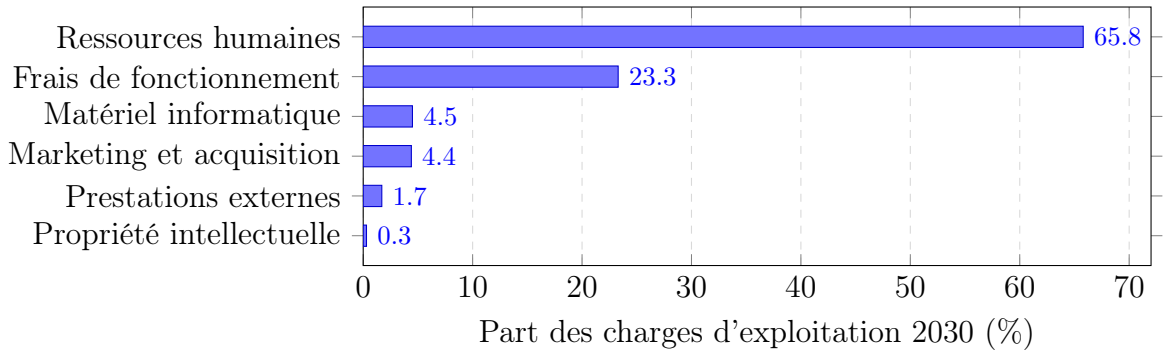


FIGURE 7.3 – Répartition des charges d'exploitation 2030 (754 k€).

— commission partenaire de 10 % sur les abonnements payants, qui rémunère le réseau d'intégrateurs pour le déploiement et le support de premier niveau ;

— hébergement cloud à 0,20 € par équipement actif et par mois, dédié au serveur de licences central qui valide les modules premium activés à chaque déploiement (voir section 3.3.1.13) ; les données industrielles, elles, restent intégralement sur l'OpEdge chez le client, conformément au déploiement *on-premise* ;

— plateforme matérielle (*hardware platform*) à 0,10 € par équipement actif et par mois (amortissement et maintenance des composants edge fournis par OpSee) ;

— frais de transaction liés aux paiements récurrents, estimés à 1,5 % du CA.

Sur l'ensemble du plan, ces coûts variables représentent environ 12 % du CA, de façon stable d'une année et d'un scénario à l'autre. La commission partenaire en représente l'essentiel (10 % du CA). L'hébergement cloud et la plateforme matérielle pèsent peu en valeur absolue, le coût unitaire par équipement restant faible. La marge brute qui en résulte s'établit autour de 88 %, dans la fourchette des éditeurs SaaS B2B malgré le déploiement local.

7.6 Besoin en fonds de roulement au lancement de l'entreprise

Le besoin en fonds de roulement (*Working Capital Requirement*, BFR) traduit le décalage entre les flux d'encaissement et de décaissement de l'entreprise, et constitue un indicateur central du risque de trésorerie d'un projet en phase de lancement. Comme le rappelle Clermont (2018), une mauvaise estimation du BFR figure parmi les causes majeures de défaillance des entreprises nouvellement créées, ce qui justifie un calcul dédié dans le plan financier.

Le BFR a été estimé selon la méthodologie classique du business plan, en appliquant un délai moyen de paiement client d'un mois au chiffre d'affaires annualisé, conformément à l'approche décrite par Clermont (2018) pour les composantes de créances clients. Compte tenu du modèle d'OpSee, marqué par une facturation mensuelle des abonnements, des dépenses récurrentes alignées sur l'activité, l'absence de stocks physiques significatifs et des délais fournisseurs limités, la formule retenue se simplifie en :

$$\mathrm{BFR}_{\text{anne } n} \approx \frac{\mathrm{CA}_{\text{anne } n}}{12}$$

soit l'équivalent d'environ un mois de chiffre d'affaires immobilisé en créances clients. La variation annuelle du BFR, qui correspond au cash réellement consommé chaque année par la croissance, s'obtient comme la différence entre le BFR de l'année courante et celui de l'année précédente.

Sur les cinq années du plan, la variation cumulée du BFR par scénario s'établit comme suit :

— Worst case : 48 000 € environ, dont 3 285 € dès la première année ;

— Expected case : 131 000 €, dont 6 600 € la première année ;

— Best case : 230 000 €, dont 11 800 € la première année.

L'augmentation du BFR au fil de la croissance constitue une charge structurelle pour la trésorerie, particulièrement marquée dans le scénario *best* où la dynamique commerciale

rapide mobilise davantage de fonds de roulement. Cette évolution est intégrée au plan de financement comme un besoin à couvrir, en cohérence avec la pratique recommandée par Clermont (2018).

7.7 Trésorerie avant les apports en capital

Avant toute injection de capital ou source de financement externe, la trésorerie d'OpSee est structurellement négative sur la première moitié du plan, en cohérence avec la dynamique typique d'une start-up en phase d'investissement. Sans les apports cumulés sur 2026-2027 (200 000 € AgiNtech, 30 000 € et 150 000 € de subventions, 150 000 € de capital risque, soit 530 000 € au total), le cumul de trésorerie atteindrait son point bas de la manière suivante par scénario :

- *Worst case* : déficit cumulé qui se creuse jusqu'à environ -1,36 M€ en 2030, sans retour à l'équilibre sur la période ;
- *Expected case* : déficit cumulé maximal autour de -454 000 € en 2028, résorption progressive et retour en territoire positif à environ +170 000 € en 2030 ;
- *Best case* : déficit cumulé modéré autour de -203 000 € en 2027, bascule en territoire positif dès 2028 (+78 000 €) et trésorerie cumulée à environ +2,0 M€ en 2030.

Sans apport externe, le projet ne peut donc pas couvrir ses charges fixes de structure durant l'amorçage, et la viabilité du plan dépend directement de l'activation des financements identifiés en section 7.13. Les deux premières années concentrent l'essentiel de ce besoin, le temps que la base installée payante atteigne un volume suffisant pour absorber les charges de personnel.

7.8 Compte de résultat prévisionnel

Le compte de résultat prévisionnel agrège produits et charges d'exploitation pour faire ressortir l'EBITDA, puis le résultat net après impôt sur les sociétés selon le barème belge des petites sociétés (20 % jusqu'à 100 000 € de bénéfice imposable, 25 % au-delà, cf.

section 7.1). La figure 7.4 montre la trajectoire de l'EBITDA et identifie le point de bascule par scénario ; le tableau 7.1 reprend le résultat net après impôts. Le tableau complet du compte de résultats détaillé figure en annexe A.6.4.

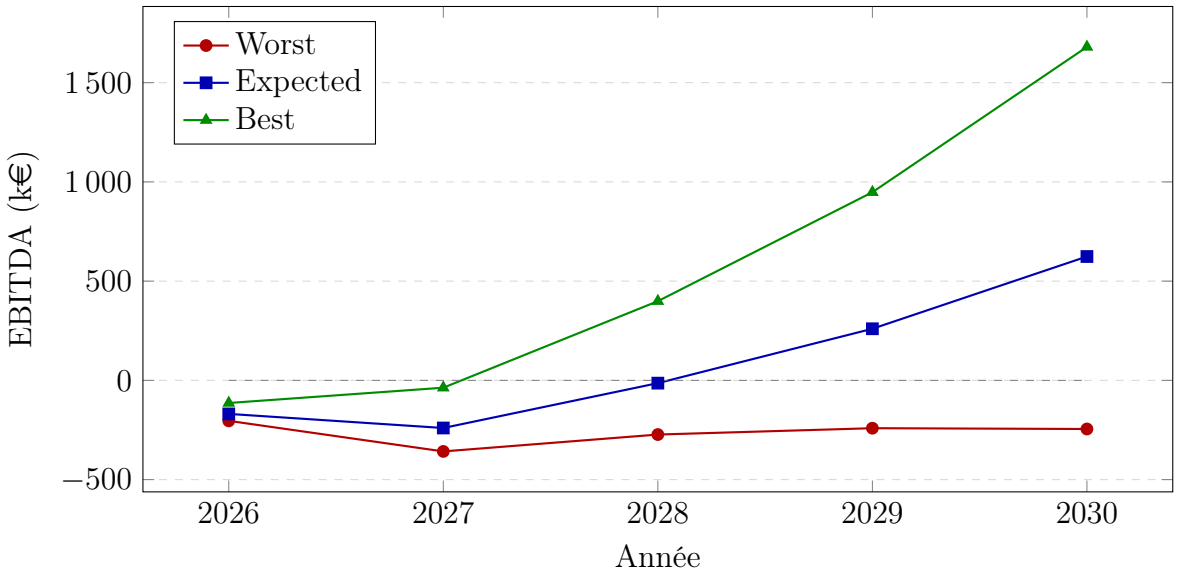


FIGURE 7.4 – EBITDA annuel par scénario (k€).

Année	Worst	Expected	Best
2026	-173 634	-138 782	-83 919
2027	-208 169	-90 099	89 081
2028	-273 341	-13 641	303 288
2029	-240 849	198 915	715 023
2030	-244 798	472 342	1 264 210

TABLE 7.1 – Résultat net après impôts par scénario (€), incluant les subventions perçues en 2026 et 2027 et l'équipe élargie à partir de septembre 2029.

L'année où l'EBITDA bascule en territoire positif varie selon le scénario : 2028 en *best*, 2029 en *expected*, hors d'atteinte en *worst* sur l'horizon du plan. Cet écart dépend directement de la vitesse à laquelle la base installée payante grossit et finit par couvrir les

charges fixes de structure. Le scénario *worst* reste structurellement déficitaire en fin de plan (EBITDA à -42 % du CA en 2030), tandis que *expected* et *best* génèrent des résultats nets cumulés substantiels sur les trois dernières années une fois le seuil de rentabilité dépassé.

7.9 Bilan prévisionnel

Le bilan prévisionnel d'OpSee reflète le caractère immatériel du projet et la structure de financement retenue. À l'actif, deux postes dominent : la trésorerie disponible, qui évolue avec l'apport initial et les résultats opérationnels, et les créances clients équivalentes à environ un mois de chiffre d'affaires (voir section 7.6). Les immobilisations sont volontairement maintenues à zéro. C'est une pratique prudente pour une start-up logicielle : toutes les dépenses de développement, de propriété intellectuelle (dont la marque EUIPO) et de prestations externes passent en charges d'exploitation au lieu d'être capitalisées. Conséquence : le bilan sous-estime mécaniquement la valeur stratégique du logiciel et de la marque. Cette valeur immatérielle est analysée ailleurs, notamment dans le VRIN (section 2.4.1), mais elle ne figure pas au bilan comptable.

Au passif, la structure d'amorçage repose sur l'apport en capital de 200 000 € versé par AgiNtech en 2026, complété par un tour de capital risque externe de 150 000 € en 2027 qui dilue partiellement AgiNtech. À cela s'ajoutent les subventions perçues sur 2026-2027, comptabilisées en produits d'exploitation, et les résultats reportés à mesure que l'entreprise atteint la rentabilité. Le capital social est maintenu à zéro : la réforme belge des SRL de 2019 a supprimé le capital minimum libéré au profit d'un patrimoine initial suffisant, rôle joué par les apports. Les dettes financières sont nulles dans l'hypothèse retenue, le projet privilégiant un autofinancement par apports plutôt qu'un endettement bancaire. Les dettes d'exploitation se limitent aux obligations fiscales et sociales courantes ainsi qu'au solde TVA reverser à l'administration au terme de chaque trimestre.

Le bilan reste donc dominé par l'apport initial qui absorbe les pertes des premières années, sans endettement bancaire. Les ressources tangibles à l'actif sont limitées : l'in-

vestissement principal porte sur le capital humain et le logiciel, qui ne figurent pas dans les chiffres du bilan.

7.10 Plan de trésorerie prévisionnel

Le plan de trésorerie est construit au pas mensuel sur la période 2026-2030. Il intègre les encaissements (abonnements récurrents, apport en capital initial) et les décaissements (charges fixes, charges variables, variation du BFR, impôt sur les sociétés). Tous les flux sont exprimés HT, comme le compte de résultat et le plan de financement, pour garantir la cohérence du modèle.

Avec les apports mobilisés sur 2026-2027 (200 000 € AgiNtech, 180 000 € de subventions, 150 000 € de capital risque), la trésorerie reste maîtrisée durant la phase d'investissement avant de remonter à mesure que la base installée payante couvre les charges fixes. La figure 7.5 montre la trésorerie cumulée par scénario après mobilisation de l'ensemble des sources de financement.

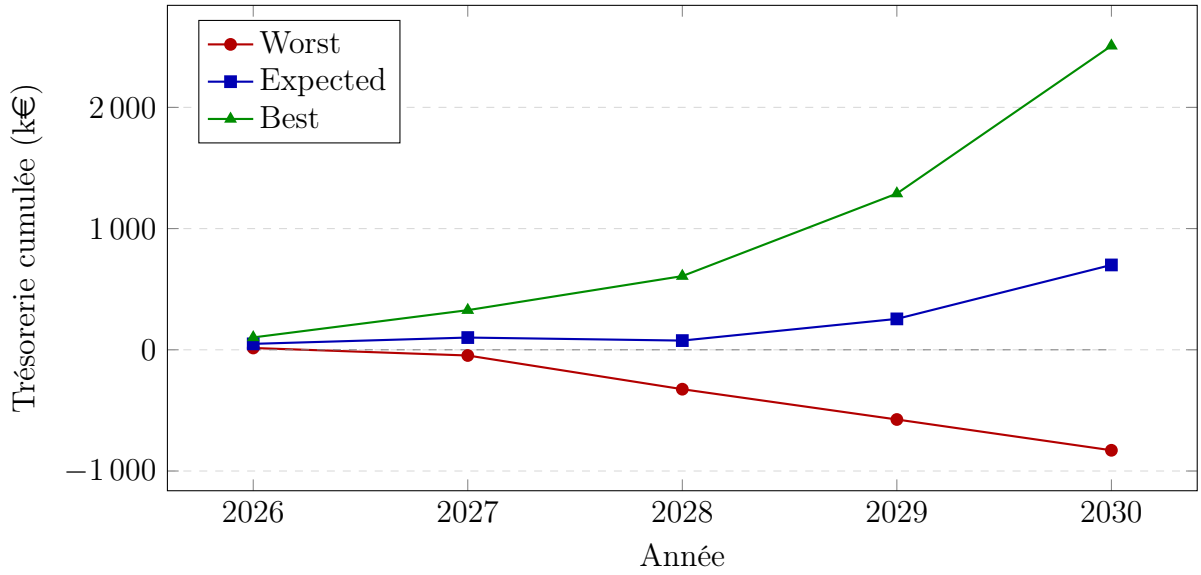


FIGURE 7.5 – Trésorerie cumulée annuelle par scénario (k€, après apports).

Par scénario :

— *Worst* : la trésorerie bascule en territoire négatif dès 2027 et se creuse continûment jusqu'à environ -829 000 € en 2030. Le scénario ne revient pas à l'équilibre sur l'horizon du plan et nécessitera un financement contingent significatif à mobiliser dès 2027, dimensionné sur le creux maximal observé. Cette dégradation reflète notamment l'élargissement de l'équipe à partir de septembre 2029 (recrutement de quatre postes additionnels) qui n'est soutenable que si la traction commerciale suit les hypothèses des scénarios médian ou optimiste ;

— *Expected* : la trésorerie reste positive en permanence, avec un point bas autour de +76 000 € en 2028 lié à la montée en puissance des embauches, puis une remontée pour atteindre environ 700 000 € en 2030. Les apports prévus couvrent l'intégralité du besoin de roulement, sans recours à un financement externe complémentaire ;

— *Best* : la trésorerie reste largement positive, avec un cumul progressant de 102 000 € en 2026 à environ 2,5 M€ en 2030.

Le besoin de financement contingent ne concerne donc que le scénario *worst*, où l'élargissement de l'équipe se traduit par un creux de trésorerie significativement plus profond que dans les scénarios médian et optimiste. Dans *expected* et *best*, la combinaison apport AgiNtech + subventions + capital risque suffit à absorber le creux d'amorçage avant que la base installée payante ne génère un cash-flow opérationnel suffisant. Le pilotage du calendrier d'embauche reste un levier d'ajustement à activer si la traction se dégrade en cours de plan.

7.11 Ratios de rentabilité

Plusieurs indicateurs synthétiques permettent d'apprécier la trajectoire de rentabilité du projet et de la situer par rapport aux benchmarks du secteur SaaS.

Marge brute.

Compte tenu de la structure de coûts variables présentée en section 7.5, la marge brute (chiffre d'affaires moins coûts directs) s'établit à environ 88 % du CA sur l'ensemble du plan, avec une stabilité notable d'une année à l'autre et d'un scénario à l'autre. Cette valeur est cohérente avec les ordres de grandeur observés dans le SaaS B2B intégré.

Marge EBITDA.

La marge EBITDA, rapport de l'EBITDA au chiffre d'affaires, illustre le levier opérationnel du modèle. Elle reste fortement négative en début de période (les charges fixes de structure étant largement supérieures au CA), puis bascule en territoire positif aux dates indiquées en section 7.8 pour les scénarios *expected* et *best* ; en *worst*, elle reste négative sur tout l'horizon du plan. En fin de période (2030), elle atteint -42 % en *worst* (l'élargissement de l'équipe n'est pas compensé par la traction commerciale), 40 % en *expected* et 61 % en *best*. L'écart entre scénarios traduit l'effet de levier opérationnel à mesure que la base installée croît plus ou moins vite que les charges fixes élargies par les embauches additionnelles.

Rule of 40.

Indicateur de référence dans l'évaluation des entreprises SaaS, la *Rule of 40* stipule que la somme du taux de croissance du chiffre d'affaires et de la marge EBITDA doit atteindre ou dépasser 40 % pour qu'une société soit considérée comme équilibrant correctement croissance et rentabilité (Corporate Finance Institute, 2024). Pour les jeunes structures, une variante pondérée (1,33 × croissance + 0,67 × marge) accorde davantage de poids à la croissance, plus déterminante en phase d'amorçage. Appliqué au plan financier d'OpSee, cet indicateur reste structurellement négatif durant la phase de pré-rentabilité (croissance forte mais EBITDA très négatif), puis franchit le seuil de 40 % à partir du moment où la rentabilité opérationnelle est atteinte. Dans le scénario *expected*, ce franchissement intervient dès l'année 2028, suivi d'une amélioration continue les années suivantes.

Point mort.

Le point mort opérationnel, soit le niveau de chiffre d'affaires couvrant exactement les coûts fixes, évolue avec la taille de l'équipe. Sur l'équipe initiale (2027-2028), il se situe autour de 530 000 € par an, valeur cohérente avec une marge brute de 88 % et des coûts fixes annuels de l'ordre de 470 000 €. À partir de 2030, avec une équipe portée à dix collaborateurs et des coûts fixes proches de 750 000 €, le point mort grimpe à environ 855 000 €. Ce seuil est franchi dès 2028 dans le scénario *best*, en 2029 dans le scénario *expected*, et reste hors d'atteinte dans le scénario *worst* sur l'horizon du plan.

Valeur Actuelle Nette (VAN).

La VAN actualise les résultats nets prévisionnels sur l'horizon 2026-2030 à un taux r de 12,5 % : 2,5 % de taux sans risque BCE et 10 % de prime de risque pour société en amorçage, valeur retenue par Damodaran (2009). Le modèle ne comportant pas d'amortissements (aucune capitalisation logicielle), le résultat net approxime correctement le flux de trésorerie disponible suivant la convention de Brealey et al. (2020). La VAN cumulée sur cinq ans atteint -797 000 € en *worst*, +182 000 € en *expected* et +1,36 M€ en *best*. Dans les deux scénarios positifs, le projet crée de la valeur sur l'horizon explicite, sans même incorporer de valeur terminale. Celle-ci est traitée en section 7.14 par une approche par multiple sectoriel.

7.12 Ratios de structure financière

Au-delà de la rentabilité, deux ratios complètent l'analyse : la solvabilité, qui mesure l'autonomie financière à long terme, et la liquidité, qui apprécie la capacité à honorer les engagements courants.

Ratio de solvabilité.

Le rapport entre capitaux propres et total du bilan mesure la part du financement assurée par les fonds propres face à l'endettement. Quiry et Le Fur (2025) retient 25 % comme seuil de référence pour une PME ; un ratio négatif signe une insolvabilité technique, les pertes cumulées ayant consommé les capitaux propres. OpSee est financé exclusivement par fonds propres et subventions non remboursables, sans emprunt bancaire ; les dettes courantes se limitent au solde TVA trimestriel à reverser. Le ratio reste donc structurellement supérieur à 90 % en *expected* et *best* sur tout le plan, mais cela tient à l'absence d'endettement plus qu'à la performance opérationnelle. En *worst*, la dégradation est rapide : les pertes cumulées consomment l'apport initial dès 2027 et la solvabilité bascule en territoire négatif. Une recapitalisation au-delà du tour de capital risque déjà prévu serait alors nécessaire, ou le financement contingent décrit en section 7.13.

Ratio de liquidité générale.

Le ratio rapporte les actifs circulants (trésorerie disponible, créances clients, créances TVA) aux dettes à court terme (dette TVA Q4 non reversée et tout découvert bancaire en cas de trésorerie négative). Un ratio supérieur à 1 signifie que l'entreprise couvre ses engagements courants avec ses liquidités immédiates et ses créances à encaisser. En *expected* et *best*, il reste très élevé sur tout le plan (de 10 à plus de 90 selon l'année), conséquence directe de l'absence d'endettement bancaire et d'un BFR maîtrisé. En *worst*, la liquidité se dégrade dès 2027 (ratio sous 0,35) puis s'effondre à partir de 2028 (autour de 0,05-0,06), signe d'un découvert bancaire structurel sur la fin du plan. Ce profil confirme le besoin de financement contingent sur 2027-2030 si la traction commerciale se dégrade.

7.13 Sources de financement

Le plan de financement d'OpSee combine trois sources principales activées sur 2026-2027, complétées par un mécanisme contingent réservé au scénario pessimiste.

Apport en capital d'AgiNtech (2026).

La première source mobilisée est un apport en capital d'AgiNtech à hauteur de 200 000 €, versé en début d'exercice 2026. AgiNtech acquiert ainsi 100 % du capital de la SRL à sa constitution. Cet apport couvre les frais de structuration, les premiers mois de salaires de l'équipe technique et business, et la mise en place du noyau logiciel jusqu'aux premières livraisons commerciales.

Subventions publiques wallonnes et fédérales.

OpSee mobilise une enveloppe estimée à 30 000 € en 2026 et 150 000 € en 2027, répartie sur plusieurs dispositifs publics auxquels la société est éligible en tant que PME wallonne. Les chèques-entreprises wallons (cybersécurité, propriété intellectuelle, maturité numérique) sont sollicités dès 2026 pour des montants unitaires de 5 000 à 15 000 € chacun, sur le portail `cheques-entreprises.be`. La dispense partielle de versement du précompte professionnel pour le personnel de recherche (à hauteur de 80 %, après notification à Belspo et obtention du statut de *Young Innovative Company*) génère une économie de charges sociales de l'ordre de 10 000 € en 2026 (sur quatre mois de salaires) puis 25 000 à 30 000 € en année pleine sur les deux profils techniques. Le programme FIRST Entreprise du SPW Recherche cofinance le recrutement d'un chercheur sur 12 à 24 mois en partenariat avec une unité universitaire belge, à hauteur de 50 à 70 % du salaire chargé ; un dossier déposé sur l'appel de mars 2026 permet un démarrage en octobre 2026 et un financement plein en 2027. Le dispositif Win4Company du SPW Recherche, accessible à partir de la deuxième année d'activité, finance des projets de recherche industrielle ou de développement expérimental en partenariat avec un centre de recherche agréé (CETIC, Sirris) ; il constitue la principale source attendue en 2027 pour un projet structuré autour de l'intégration LLM et de l'ancrage normatif ISA-95. Enfin, le crédit d'impôt R&D fédéral apporte un complément modeste de quelques milliers d'euros par an. L'incertitude inhérente à l'obtention effective de ces financements (taux d'acceptation, délais d'instruction, conjoncture budgétaire) justifie le retenue d'une hypothèse prudente : ces 180 000 €

cumulés sur 2026-2027 constituent une cible réaliste mais non garantie, et toute fraction non obtenue est compensée par le tour de capital risque décrit ci-après.

Capital risque externe (2027).

Un tour de capital risque externe de 150 000 € est levé en 2027 pour absorber la phase d'investissement et assurer la transition vers la rentabilité opérationnelle. Cette levée dilue AgiNtech, dont la part au capital décroît selon la valorisation pré-money retenue. Le tour est dimensionné pour compenser, le cas échéant, les subventions non obtenues et pour fournir une marge de sécurité opérationnelle sur la fenêtre 2027-2028, qui correspond à l'inflexion attendue de la trajectoire commerciale.

Financement contingent réservé au scénario *worst*.

Le scénario pessimiste, dont le point bas de trésorerie atteint environ -829 000 € en 2030, requiert un financement complémentaire significatif qui n'est pas pré-provisionné dans le plan principal. Ce besoin contingent serait couvert, en cas de matérialisation, par une combinaison de leviers à activer dès 2027 : avance récupérable sectorielle (pôle Mecatech ou INFOPOLE), prêt subordonné Digit Online de Wallonie Entreprendre, étalement ou suspension partielle du calendrier d'embauche des quatre postes additionnels prévus en 2029-2030, ou tour de financement complémentaire à des conditions ajustées à la traction observée. Le pilotage du calendrier d'embauche reste le levier le plus rapide à mobiliser, dans la mesure où l'élargissement de l'équipe à partir de septembre 2029 est calibré pour les scénarios médian et optimiste et peut être différé si la traction commerciale ne suit pas.

L'ensemble de ces sources couvre le BFR initial et le creux d'amorçage dans les scénarios *expected* et *best*. Le scénario *worst* reste le cas où le pilotage budgétaire devra être le plus serré, sans toutefois remettre en cause la solidité du plan tant que les trois sources principales (AgiNtech, subventions, capital risque) sont mobilisables aux montants prévus.

7.14 Valorisation et cap table

Deux moments du plan appellent une valorisation d'OpSee : 2027 pour fixer le pré-money du tour de capital risque de 150 000 €, et 2030 pour anticiper une sortie éventuelle au terme du plan. La VAN calculée en section 7.11 donne un premier seuil de création de valeur sur l'horizon explicite, mais elle exclut la valeur terminale, qui pèse beaucoup pour une société SaaS encore en croissance. La méthode retenue est celle du multiple sectoriel appliqué à l'*Annual Recurring Revenue* (ARR), couramment utilisée pour les sociétés SaaS B2B (Metrick & Yasuda, 2010).

Choix du multiple.

Le multiple central retenu est 5x l'ARR, cohérent avec les benchmarks 2025 de SaaS Capital (2025) : médiane de 5,3x sur les sociétés SaaS privées *equity-backed*, 4,8x sur les *bootstrapped*. Pour comparaison, Damodaran (2026) rapporte un EV/Sales de 11,4x sur le secteur Software (System & Application) coté, mais ce périmètre couvre des sociétés à maturité et profils de croissance très différents. Une fourchette 4x-8x est retenue pour la sensibilité, le haut de fourchette correspondant aux sociétés à croissance supérieure à 40 % par an que viserait OpSee en *best*.

Valorisation pré-money 2027.

Appliqué à l'ARR projeté de 2027 (premier exercice plein avec base installée significative), le multiple central de 5x donne une pré-money de 607 000 € en *worst*, 1,28 M€ en *expected* et 2,44 M€ en *best*. Le tour de 150 000 € dilue alors AgiNtech à des degrés très différents selon le scénario (tableau 7.2).

En *expected*, AgiNtech conserve donc 89,5 % du capital après dilution. L'écart entre scénarios (de 6 % de dilution en *best* à 20 % en *worst*) reflète la prime de risque qu'appliqueraient les investisseurs externes sur une valorisation tirée par une traction plus faible.

Scénario	**Pré-money**	**Post-money**	**% AgiNtech**	**% VC**
Worst	607 268	757 268	80,2 %	19,8 %
Expected	1 279 908	1 429 908	89,5 %	10,5 %
Best	2 436 525	2 586 525	94,2 %	5,8 %

TABLE 7.2 – Cap table post tour de capital risque 2027 (montants en €, multiple central 5x ARR).

Valorisation Y5 et perspectives de sortie.

À l'horizon 2030, l'ARR projeté en *expected* est de 1,57 M€, soit une valorisation centrale de 7,83 M€ au multiple 5x (fourchette 6,3-12,5 M€ sur 4x-8x). En *best*, l'ARR Y5 de 2,77 M€ porte la valorisation à 13,8 M€ en central (jusqu'à 22,1 M€ en haut de fourchette). Ces niveaux correspondent aux ordres de grandeur observés sur le segment SaaS B2B européen pour des sociétés ayant atteint 1-3 M€ d'ARR avec une croissance maintenue au-dessus de 40 % par an. En *worst*, la valorisation Y5 plafonne à 2,9 M€ en central, niveau qui rend une sortie peu pertinente, d'autant que la dilution des fondateurs sur le tour 2027 aurait déjà été importante.

Sensibilité aux paramètres clés.

La valorisation par multiple dépend de deux paramètres : le multiple appliqué (effet linéaire direct) et l'ARR à la date d'évaluation, lui-même fonction du churn et de la conversion Free→payant. Les hypothèses retenues en section 7.1 constituent donc les variables à défendre lors d'un tour ultérieur. Une dégradation simultanée du multiple (passage à 4x) et de l'ARR (scénario *worst*) compresserait la valorisation d'environ deux tiers par rapport au central.

7.15 Conclusion du plan financier

La structure de coûts d'OpSee combine une part fixe importante (charges de personnel et frais de fonctionnement) et une part variable d'environ 12 % du chiffre d'affaires, principalement composée de la commission partenaire. Cette répartition produit un effet de levier opérationnel net : tant que la base installée reste limitée, le compte de résultat est largement négatif ; une fois un volume critique d'équipements raccordés, la rentabilité progresse rapidement.

L'année où ce basculement intervient sépare nettement les trois scénarios : 2028 en *best*, 2029 en *expected*, hors d'atteinte en *worst*. Le *worst* est le scénario à surveiller : il reste structurellement déficitaire sur l'horizon du plan, avec un cumul de trésorerie creusant jusqu'à -829 000 € en 2030 et un financement contingent significatif à mobiliser. À l'inverse, *expected* et *best* couvrent l'intégralité du besoin avec les sources principales et génèrent une trésorerie positive significative à partir de 2029-2030.

Le besoin de financement principal se concentre sur 2026-2027. L'apport AgiNtech (200 000 € en 2026), les subventions wallonnes et fédérales (180 000 € cumulés sur deux ans) et le tour de capital risque de 150 000 € en 2027 suffisent dans les scénarios médian et optimiste. Le scénario *worst* appellerait un financement contingent additionnel dès 2027 pour absorber un creux de trésorerie d'environ -829 000 € en 2030 ; le pilotage du calendrier d'embauche (en particulier des quatre postes additionnels prévus en septembre 2029) constitue le levier d'ajustement le plus rapide à activer dans ce cas. La fiabilité du plan dépend principalement de deux paramètres à valider sur le terrain : la conversion Free→payant (10-20 %) et le churn équipement (1-5 %). Ce sont les deux variables les plus sensibles aux écarts entre projection et réalité industrielle.

Chapitre 8

Analyse des risques, limites et pistes d'amélioration

Résumé exécutif. Quatre risques majeurs sont identifiés, chacun avec une mitigation explicite. *(1) Risque licenciaire sur la chaîne d'approvisionnement open source* : depuis 2018, plusieurs éditeurs *single-vendor* (MongoDB, Elastic, HashiCorp, Redis) ont basculé vers des licences *source-available* non OSI-approuvées ; OpSee privilégie les composants gouvernés par des fondations neutres (Apache Software Foundation, Cloud Native Computing Foundation, Linux Foundation) et maintient une veille licenciaire continue. *(2) Risque de cybersécurité et de protection des données industrielles* : adoption du NIST Cybersecurity Framework, gestion stricte des rôles, journalisation auditable, sauvegardes et procédures de restauration testées. *(3) Risque d'adoption commerciale lente* : entrée par preuves de concept ciblées sur un atelier ou une ligne, en suivant la théorie de la diffusion des innovations de Rogers, plutôt que par déploiements complets. *(4) Risque de dépendance aux partenaires intégrateurs* : programme de certification graduée Bronze/Silver/Gold, documentation standardisée, support technique dédié et audit annuel du réseau. Le chapitre identifie aussi les limites du prototype actuel (ordonnancement auto-

matique APS, détection d'anomalies par *machine learning* supervisé, reporting CSRD et alimentation du *Digital Product Passport* encore en feuille de route) et les limites méthodologiques (échantillon qualitatif non statistiquement représentatif), puis propose des pistes d'amélioration techniques (élargissement du support des protocoles industriels, intégration ERP, analyse de données avancée) et organisationnelles (structuration du réseau partenaires, cas clients documentés comme levier de crédibilité).

8.1 Analyse des risques

8.1.1 Risque licenciaire sur la chaîne d'approvisionnement open source

L'audit présenté à la section 4.9 fixe l'état des licences des dépendances utilisées par OpSee au moment de la rédaction du mémoire. Cet état ne peut toutefois pas être considéré comme définitivement stable. Les éditeurs open source conservent la possibilité de modifier leur stratégie de licence, en particulier lorsqu'ils cherchent à mieux protéger leur modèle économique ou à limiter la captation de valeur par de grands fournisseurs cloud.

Ce risque est particulièrement important pour un projet comme OpSee, dont l'architecture repose sur plusieurs composants open source. Depuis 2018, plusieurs éditeurs single-vendor ont remplacé leurs licences open source historiques par des licences dites *source-available*. Ces licences donnent accès au code source, mais ne répondent pas toujours à la définition de l'open source au sens de l'*Open Source Initiative*. L'exemple le plus marquant est celui de MongoDB, qui a remplacé l'AGPLv3 par la *Server Side Public License* (SSPL) en 2018 (MongoDB Inc., 2018). L'*Open Source Initiative* a ensuite refusé de reconnaître cette licence comme open source (Open Source Initiative, 2021). Des évolutions similaires ont ensuite concerné Elastic, HashiCorp Terraform, CockroachDB ou encore Redis (Argentieri, 2024).

Pour OpSee, ce risque ne porte donc pas uniquement sur les licences actuellement utilisées, mais aussi sur leur évolution future. Un composant aujourd'hui compatible avec le modèle d'OpSee pourrait voir ses conditions d'utilisation modifiées dans une version ultérieure. Cette situation peut créer trois types de conséquences. Premièrement, elle peut imposer une veille juridique continue afin d'éviter l'intégration involontaire d'une version devenue incompatible. Deuxièmement, elle peut obliger l'équipe à rester sur une ancienne version, au risque de perdre certaines mises à jour fonctionnelles ou de sécurité. Troisièmement, dans le cas d'un composant critique, elle peut conduire à devoir remplacer la technologie concernée ou maintenir un fork interne, ce qui représenterait une charge importante pour une équipe de petite taille.

La mitigation repose donc sur une politique de gestion active des dépendances. OpSee doit privilégier, lorsque cela est possible, les projets gouvernés par des fondations neutres telles que l'Apache Software Foundation, la Cloud Native Computing Foundation ou la Linux Foundation, dont les choix de licence sont généralement moins dépendants d'un acteur commercial unique. L'équipe doit également maintenir une veille licenciaire régulière sur les composants critiques et documenter, pour chacun d'eux, une alternative ou un fork mobilisable en cas d'évolution défavorable. Cette approche ne supprime pas le risque, mais elle limite la dépendance d'OpSee à des décisions unilatérales prises par des éditeurs tiers.

8.1.2 Risque de cybersécurité et de protection des données industrielles

En tant que MES, OpSee est amené à traiter des données sensibles liées à la production, aux performances des machines, aux ordres de fabrication, aux stocks et potentiellement à la traçabilité des opérations. Une faille de sécurité, une mauvaise configuration des accès ou une indisponibilité prolongée du système pourrait donc avoir des conséquences importantes pour les clients industriels. Dans un contexte industriel connecté, la cybersécurité devient un enjeu central, car les systèmes de production sont de plus en plus intégrés aux

systèmes d'information de l'entreprise (National Institute of Standards and Technology, 2024).

Ce risque est renforcé par le positionnement d'OpSee comme solution modulaire, intégrable à l'écosystème informatique existant des PME manufacturières. Les connexions avec des ERP, des bases de données, des capteurs ou des outils tiers augmentent la surface d'attaque potentielle. La littérature souligne que l'interconnexion croissante des systèmes industriels expose les organisations à des risques nouveaux, notamment en matière de disponibilité, d'intégrité des données et de continuité opérationnelle (European Union Agency for Cybersecurity, 2023).

La mitigation repose sur plusieurs leviers. OpSee doit prévoir une gestion stricte des rôles et permissions, des sauvegardes régulières, une journalisation des actions critiques et des mécanismes de restauration en cas d'incident. Ces mesures s'inscrivent dans les bonnes pratiques de gestion des risques numériques, qui recommandent d'identifier, protéger, détecter, répondre et restaurer les systèmes critiques (National Institute of Standards and Technology, 2024).

8.1.3 Risque d'adoption commerciale lente

Le deuxième risque majeur concerne l'adoption commerciale d'OpSee par les PME manufacturières. Même lorsque le besoin de digitalisation est réel, les entreprises industrielles peuvent se montrer prudentes face à l'introduction d'un nouvel outil de production. L'adoption d'une innovation ne dépend pas uniquement de ses caractéristiques techniques, mais aussi de sa compatibilité avec les pratiques existantes, de sa complexité perçue et de la capacité des utilisateurs à en observer rapidement les bénéfices (Rogers, 2003).

Ce risque est particulièrement important pour OpSee, dont la proposition de valeur repose sur une alternative plus accessible, plus flexible et moins verrouillée que les solutions MES propriétaires traditionnelles. Cette différenciation peut constituer un avantage, mais elle peut aussi susciter des interrogations chez les premiers clients : pérennité du projet, maturité fonctionnelle, qualité du support, sécurité du modèle open-core ou encore

capacité à accompagner le déploiement dans un environnement industriel réel.

La mitigation passe par une stratégie d'entrée progressive sur le marché. Plutôt que de viser immédiatement des déploiements complets, OpSee peut privilégier des preuves de concept limitées à une ligne, un atelier ou un cas d'usage précis. Cette logique permet de réduire le risque perçu par le client et de démontrer rapidement la valeur opérationnelle de la solution. Elle rejoint l'idée selon laquelle les innovations sont plus facilement adoptées lorsqu'elles peuvent être testées à petite échelle avant un déploiement plus large (Rogers, 2003).

8.1.4 Risque de dépendance aux partenaires intégrateurs

Le modèle de déploiement d'OpSee repose en partie sur des partenaires intégrateurs capables d'installer, configurer et adapter la solution chez les clients industriels. Cette approche permet à OpSee de ne pas internaliser l'ensemble des prestations de terrain et de s'appuyer sur des acteurs déjà proches des PME manufacturières. Elle crée toutefois un risque de dépendance commerciale et opérationnelle.

Dans un modèle fondé sur un réseau de valeur, la performance de l'entreprise ne dépend pas uniquement de ses ressources internes, mais aussi de la qualité des relations avec les acteurs qui participent à la création et à la livraison de la valeur. Pour OpSee, cela signifie qu'une partie de l'expérience client dépendra directement de la compétence, de la motivation et du sérieux des intégrateurs.

Si les intégrateurs ne comprennent pas suffisamment le produit, ne le priorisent pas dans leur portefeuille ou ne disposent pas des compétences nécessaires, la qualité des déploiements peut en être affectée. Or, dans le cas d'un MES, l'expérience client dépend fortement de la phase d'intégration : un mauvais paramétrage, une mauvaise reprise des données ou une formation insuffisante peuvent conduire à une perception négative du logiciel, même si le produit lui-même est techniquement robuste.

La mitigation nécessite une structuration progressive du réseau de partenaires. OpSee doit fournir une documentation claire, des procédures de déploiement standardisées, des

formations techniques et un support aux intégrateurs. À terme, la mise en place d'un programme de certification pourrait également permettre de distinguer les partenaires capables de représenter correctement la solution.

8.2 Limites et pistes d'amélioration

8.2.1 Limites fonctionnelles actuelles du prototype

À ce stade du développement, OpSee ne couvre pas encore l'ensemble des fonctionnalités présentes dans les MES industriels les plus complets du marché. Le projet se concentre principalement sur les besoins prioritaires identifiés lors des entretiens exploratoires et de l'étude de marché : suivi de production, traçabilité, centralisation des données et indicateurs de performance. Plusieurs fonctionnalités avancées restent en feuille de route : ordonnancement automatique (APS), détection d'anomalies et alertes ML, reporting environnemental CSRD/DPP, ainsi que la finalisation de la traçabilité. Le détail des exigences encore à livrer figure en annexe A.3.5.

Cette approche progressive constitue un choix volontaire afin de conserver une architecture modulaire et maîtrisable pour une équipe de taille réduite. Elle implique toutefois que certaines entreprises industrielles plus matures ou disposant de processus très spécialisés pourraient considérer la solution comme incomplète à court terme.

8.2.2 Limites méthodologiques de l'étude

L'étude réalisée dans le cadre de ce mémoire repose principalement sur une approche qualitative et exploratoire. Les entretiens menés auprès d'acteurs industriels permettent d'identifier plusieurs besoins récurrents et de mieux comprendre les freins liés à la digitalisation des PME manufacturières. Toutefois, le nombre limité d'entreprises interrogées ne permet pas de généraliser statistiquement les résultats à l'ensemble du marché industriel belge ou européen.

Par ailleurs, le projet étant encore en phase de développement, certaines hypothèses stratégiques présentées dans ce mémoire n'ont pas encore pu être validées à grande échelle sur le terrain. Les hypothèses liées au modèle économique, au réseau d'intégrateurs ou au rythme d'adoption commerciale devront donc être confrontées à l'expérience réelle des premiers déploiements.

8.2.3 Pistes d'amélioration techniques

Plusieurs axes d'amélioration technique peuvent être envisagés pour les prochaines phases de développement d'OpSee. Premièrement, le renforcement des capacités d'intégration industrielle constitue un enjeu important, notamment via le support élargi de protocoles industriels et d'interfaces avec les ERP existants. Deuxièmement, l'amélioration des outils d'analyse de données et de visualisation pourrait permettre une exploitation plus avancée des informations de production collectées par le système.

À plus long terme, l'intégration de fonctionnalités de *machine learning* pourrait également représenter une évolution stratégique du produit, distincte de l'assistant conversationnel déjà présent. L'analyse prédictive des performances de production, la détection d'anomalies ou l'aide à la planification constituent des perspectives cohérentes avec l'évolution actuelle des logiciels industriels.

8.2.4 Pistes d'amélioration organisationnelles et commerciales

Le développement du réseau de partenaires intégrateurs constitue une piste d'amélioration majeure pour assurer la croissance d'OpSee. La structuration d'un programme de formation, de certification et de support permettrait d'améliorer la qualité des déploiements et de réduire la dépendance directe à l'équipe fondatrice.

Sur le plan commercial, la création de cas clients documentés et de projets pilotes constitue également un levier important pour renforcer la crédibilité du projet auprès des PME manufacturières. Dans un marché industriel où la confiance joue un rôle central, les références opérationnelles et les retours d'expérience concrets représentent un facteur clé

d'adoption.

Chapitre 9

Conclusion

L'objectif de ce mémoire était d'évaluer la faisabilité d'OpSee, une solution MES open-core destinée aux PME manufacturières. Face à un marché dominé par des solutions souvent coûteuses, complexes à déployer et principalement conçues pour les grandes entreprises, le projet cherchait à déterminer s'il était possible de proposer une alternative plus accessible, modulaire et économiquement viable.

L'analyse stratégique réalisée dans le cadre de ce travail a mis en évidence l'existence d'une opportunité de marché réelle. Les PME manufacturières font face à une pression croissante en matière de digitalisation, de traçabilité et de pilotage de la performance industrielle, tout en disposant de ressources financières et techniques limitées. L'étude de marché qualitative a confirmé l'existence d'un besoin pour des solutions MES plus simples à déployer, plus flexibles et mieux adaptées aux réalités opérationnelles des petites et moyennes structures.

L'analyse concurrentielle a montré qu'OpSee se positionne sur un segment encore relativement peu occupé. Alors que les grands éditeurs historiques proposent des solutions puissantes mais souvent surdimensionnées pour les PME, et que les initiatives open source industrielles restent limitées ou peu structurées commercialement, OpSee combine un noyau libre, une architecture modulaire et une approche progressive de déploiement. Cette proposition de valeur répond directement aux principales difficultés identifiées lors de

l'étude de marché : coût d'entrée élevé, dépendance au fournisseur, manque de flexibilité et complexité des projets d'intégration.

Les analyses techniques ont permis de démontrer la faisabilité de la solution envisagée. L'architecture retenue s'appuie sur des technologies open source matures et sur des standards industriels largement reconnus tels que l'ISA-95, l'ISA-88 et OPC-UA. Le choix d'une architecture conteneurisée, modulaire et déployable localement permet de répondre aux exigences de souveraineté des données fréquemment exprimées par les industriels tout en facilitant l'évolutivité du produit.

Sur le plan juridique, le travail a permis d'étudier les implications liées au développement d'un logiciel open-core. L'analyse des licences open source a confirmé la pertinence du choix d'une licence AGPLv3 pour le noyau de la solution tout en permettant la commercialisation de modules propriétaires complémentaires. Les mécanismes de gouvernance, de propriété intellectuelle et de conformité ont également été définis afin de sécuriser le développement futur du projet.

L'étude du modèle économique a montré qu'un équilibre pouvait être trouvé entre accessibilité pour les utilisateurs et création de valeur pour l'entreprise. Le modèle retenu repose sur une combinaison de modules premium, de services associés et d'un réseau de partenaires intégrateurs inspiré des écosystèmes développés par certains acteurs du logiciel open source. Cette approche permet de limiter les coûts de structure tout en favorisant la diffusion de la solution auprès des PME industrielles.

Les analyses financières indiquent qu'OpSee pourrait atteindre une trajectoire de croissance viable à condition de valider progressivement ses hypothèses commerciales et de développer un réseau d'intégrateurs capable d'accompagner le déploiement de la solution sur le terrain. Les besoins de financement identifiés restent compatibles avec une stratégie de développement progressive adaptée à une jeune entreprise technologique.

Enfin, l'analyse des risques a permis d'identifier plusieurs points d'attention majeurs. Les principaux défis concernent notamment l'adoption du produit par le marché, la capacité à constituer une communauté active autour du noyau open source, l'évolution future

des licences des composants utilisés ainsi que la concurrence exercée par les grands éditeurs du secteur. Plusieurs mesures préventives ont toutefois été proposées afin de réduire ces risques et de renforcer la résilience du projet.

L'ensemble des analyses menées converge vers une conclusion claire : le projet OpSee est globalement faisable. Il répond à un besoin réel du marché, s'appuie sur des choix techniques cohérents, bénéficie d'un positionnement différenciant et repose sur un modèle économique compatible avec les spécificités du secteur industriel. Bien que plusieurs hypothèses devront encore être validées lors des prochaines phases de développement, les fondations stratégiques, techniques, juridiques et financières du projet apparaissent suffisamment solides pour justifier la poursuite de son développement.

Dès lors, ce mémoire valide la pertinence du projet OpSee et propose une feuille de route cohérente pour ses prochaines étapes. Plus qu'un projet académique, OpSee constitue aujourd'hui une initiative entrepreneuriale concrète dont l'ambition est de démocratiser l'accès aux outils de pilotage industriel au sein des PME manufacturières européennes.

9.1 Perspectives futures

Le présent mémoire constitue une étude de faisabilité du projet OpSee. Toutefois, contrairement à de nombreux projets entrepreneuriaux qui restent au stade conceptuel, OpSee entre dès à présent dans une phase concrète de validation terrain.

À partir de juin 2026, plusieurs entreprises partenaires participeront à un programme d'*Early Adopters* visant à tester les premières versions opérationnelles de la solution dans des environnements industriels réels. Cette phase permettra de confronter les hypothèses développées dans ce mémoire aux réalités du terrain, de recueillir les retours des utilisateurs et d'identifier les améliorations nécessaires avant une commercialisation à plus grande échelle.

Les prochains développements porteront notamment sur la stabilisation du produit, la finalisation des modules premium en cours de développement et le développement

des nouveaux modules cités dans le cahier des charges, ainsi que la structuration du réseau d'intégrateurs partenaires chargé du déploiement de la solution auprès des clients industriels.

À moyen terme, l'objectif est de transformer OpSee en une solution commercialement mature et pleinement déployable. Sous réserve des résultats obtenus lors de la phase de validation terrain, une commercialisation officielle est envisagée au cours de l'année 2027.

Au-delà du lancement commercial, plusieurs axes d'évolution sont déjà identifiés. Ils concernent notamment l'intégration de fonctionnalités avancées d'analyse de données, de maintenance prédictive, d'assistance par intelligence artificielle, de suivi énergétique et de traçabilité environnementale. Ces développements devront toutefois être guidés par les besoins réels exprimés par les utilisateurs afin de conserver l'approche pragmatique et progressive qui constitue aujourd'hui l'un des principaux éléments différenciants du projet.

Enfin, le développement futur d'OpSee passera également par la constitution d'une communauté active autour du noyau open source. La participation de contributeurs externes, d'intégrateurs et d'entreprises utilisatrices pourrait renforcer l'innovation, accélérer l'amélioration continue du produit et contribuer à faire émerger un véritable écosystème autour de la plateforme.

Annexe A

Annexes

Les annexes suivent la structure du mémoire : chaque section reprend le numéro du chapitre auquel elle se réfère et regroupe les matériaux complémentaires associés (entretiens, tableaux comparatifs, fiches techniques, etc.). Une section liminaire regroupe les curriculum vitae des auteurs.

A.1 Curriculum vitae

A.1.1 Nathan Moreau

Nathan Moreau
né(e) à Ottignies-Louvain-La-Neuve, le 09/29/2003
Moyen de transport : Permis B
Mobilité internationale : Belgique

7, avenue des pinsons
1390 Grez Doiceau
+32488580583
titou.moreau29@gmail.com

Études

2024 - 2026 — **INEO/CPME**
Uclouvain

2024 - 2026 — **Master [120] : Ingénieur civil en informatique, orientation intelligence artificielle**
Université catholique de Louvain
Grade : Grande Distinction

2021 - 2024 — **Ingénieur Civil**
Uclouvain
Majeure : Informatique **Mineure :** Éléctricité
Grade : Grande Distinction

Mémoire

Titre — Etude de la faisabilité d'un logiciel MES en Open-Source

Promoteur(s) — Charles Pecheur

Description — Dans le cadre de la formation interdisciplinaire INEO, nous réalisons un mémoire sur la faisabilité mais également la viabilité et désirabilité d'un logiciel MES en Open-Source pour les PME.

Expériences

2020 - 2026 — Chef scouts pour des animés de tout âge allant de 6 à 18 ans. J'ai pu être le trésorier et le chef responsable.

2025 - 2026 — Trésorier dans un kot à projet qui porte sur la santé et la santé mentale. Sang12

2023 - 2025 — Étudiant tuteur à l'université dans des cours d'informatiques et d'économie. Consiste à donner des séances d'exercices à d'autres étudiants.

Langues

Français	Langue maternelle
Néerlandais	B2
Anglais	C1

Informatique

Applications	Suite Microsoft, Github, Linux, Docker, SSH, Canva, Unix shell, Jupyter notebook
Langages	Python, Java, C, Bash/Shell , SQL, Postgres, OZ

Intérêts professionnels

Machine Learning, Algorithmique, dévelopement logiciel, Cybersécurité

Divers

Photographie, Cinéma, Course à pied Trail

A.1.2 Adam Bernard

Adam Bernard
né(e) à Montigny-le-Tilleul, le 14/04/2003
Moyen de transport : Permis B
Mobilité internationale : Belgique

Avenue Armand Bontemps, 3
1340 OTTIGNIES
0484850348
bernard.adam@hazthunder.com

Études

2024 - 2026	**Master CPME / INEO** Université catholique de Louvain
2024 - 2026	**Master [120] : Ingénieur civil électromécanicien, orientation à finalité spécialisée: mécatronique** Université catholique de Louvain
2021 - 2024	**Bachelier en sciences de l'ingénieur, orientation ingénieur civil** Université catholique de Louvain **Grade :** Distinction

Mémoire

Titre	Conception et développement d'un MES open-source pour l'industrie 4.0
Promoteur(s)	Professeur Charles Pecheur et Professeur invité, Professeur ordinaire Frank Janssen
Description	Ce mémoire s'inscrit dans le cadre du master interdisciplinaire INEO et est réalisé en collaboration avec l'entreprise AgiNtech.

Expériences

2023 -	Étudiant indépendant dans le détail de jeux de société et fondateur de la marque de protection Hazap Acryl®
2022 - 2023	Colruyt, Cashier
2021 - 2022	Brico, gardening sector and drive-in
2021 - 2021	Carrefour market, bakery
2018 - 2021	Walibi-Belgium, attraction operator

Langues

Français	Langue maternelle
Néerlandais	A2
Anglais	B1
Espagnol	A1

Informatique

Applications	SolidWorks,VS Code,Git/GitHub,CMS,Adobe Illustrator/Photoshop,LaTeX,Suite Office
Langages	Python, C / C++, Java, JavaScript, TypeScript, HTML / CSS, React (dev frontend)

Intérêts professionnels

Ingénierie, mécatronique, automatisation, dev logiciel/web, UI/UX, innovation

Divers

Entrepreneuriat, business, padel, course a pied, creation (impression 3D, DIY)

A.1.3 Juliette Marchand

Juliette Marchand

ETUDIANTE EN SCIENCE DE GESTION - INEO

Étudiante en science de gestion à l'UCLouvain, passionnée par l'entrepreneuriat. Cofondatrice d'OpSee, une solution MES open-core destinée aux PME manufacturières.

Cours gilles de lerrines 6,
1457 Walhain
jumarchand02@gmail.com
+32 468362152

Parcours académique

Master INEO/CPME
2024-2026
- UCLouvain

Master [120] : Science de gestion
2024-2026
- UCLouvain - Louvain school of management

Science économique et de gestion
2020-2024
- UCLouvain

Secondaire
2014-2020
- Lycée Martin V
- Option : Français, histoire et sport

Expérience professionnelle

OpSee - Co-fondatrice
JANVIER 2025 - MAINTENANT
Une solution MES open-core permettant aux PME manufacturières d'améliorer le suivi de production et leur visibilité opérationnelle.

Agidrive
AOÛT 2021 - MAINTENANT
Une agence de téléprospection qui aide les entreprises à générer des rendez-vous commerciaux qualifiés grâce à des équipes d'étudiants formés et encadrés.
- 2021-2022 : Business developer
- 2022-2024 : Promue Team Leader

Hors-Champs
2019-2021
Restaurant gastronomique
- Serveuse

Bénévolat

Kot planète terre
- Kot à projet étudiant centré sur la durabilité, qui sensibilise à un mode de vie plus responsable à travers des initiatives concrètes autour du zéro déchet
  - 2024-2025 : Trésorière
  - 2025-2026 : Présidente

Mouvement de jeunesse
- 2008-2020 : Animée
- 2020-2021 : Chef baladin - communication
- 2021-2024 : Chef louvette - Responsable de section
- 2024-2025 : Chef pi - Responsable de section

Compétences

- Entrepreneuriat
- Leadership
- Organisation et planification
- Communication
- Développement commercial
- Prospection commerciale
- Esprit d'analyse
- Gestion de projet

Langues

- Français - Langue maternelle
- Anglais - B2

Intérêts

- Course à pied
- Padel
- Voyage
- Cuisine

A.1.4 Louis Verbeeren

LOUIS VERBEEREN

PERSONAL DATA

- Linkedin Profile
- louisverbeeren@gmail.com
- +32 475 45 03 29
- Date of birth : 27/08/2001
- MBTI profile : ESTJ

SKILLS

Management & Soft Skills
- Team management
- Leadership
- Organization
- Adaptability

Sales & Communication
- Prospecting
- Negotiation
- Persuasion

Computer Skills
- Microsoft Office (Word, PowerPoint, Excel – basics)
- Canva

LANGUAGES

- French : mother tongue
- English : Fluent
- Dutch : Fluent

*"I am a **team player** with great **communication** skills and **adaptability**. I truly believe in **collaboration** for solving complex problems and can rely on a **methodical** & **organized** analytical approach."*

WORK EXPERIENCE

Co-Founder of OpSee

Business & Strategy - OpSee | 2024 - ...

- Co-created a startup as part of the INEO entrepreneurship program
- Worked on business development, market validation and strategy
- Collaborated within a team to build and structure the project

Sales – Agidrive

Sales prospection | 2025

- Conducted outbound calls to generate leads and acquire new clients
- Presented services and handled objections
- Developed strong communication and persuasion skills
- Worked with targets and performance metrics

Royal Military Academy

Officer cadet in the Belgian army - military and social sciences | 2019-2020

- Worked in a highly disciplined and demanding environment
- Developed strong sense of responsibility and leadership
- Gained experience in teamwork under pressure

EDUCATION

Louvain school managemement (LSM)

Matser in Management Science – INEO (Entrepreneurship Program) | 2024 - 2026

Erasmus in Greece

Athens University of Economics and Business - AUEB | 2025

Université Catholique de Louvain (UCL)

Bachelor in Humanities and Social Sciences – Minor: Management Science | 2021-2024

Gap year

Voluntary work and academic training - EDV | 2020-2021

CENTER OF INTERESTS

- Scouting : scout leader 2021-2026
- Sports: cycling, football, padel and tennis, ultimate frisbee (university team)
- Travelling & nature
- Music (trumpet and festival)

A.2 Opportunité et Analyse Stratégique (chapitre 2)

A.2.1 Interviews

A.2.1.1 Interview 1

Louis : Voilà nickel, non non c'est bon alors. Ça c'est bon, je fais ça comme ça, nickel. Mais en gros, moi c'était pour discuter un peu. Comme je te disais, je suis dans un master où on essaie de découvrir un peu le côté entrepreneurial. Et du coup, on collabore avec une entreprise qui a justement comme projet de peut-être se lancer dans tout ce qui est logiciel MES. Et nous, en tant qu'étudiants, notre rôle est de faire une étude de marché, à la fois auprès des potentielles entreprises qui pourraient être intéressées par ce type de logiciel, mais aussi de s'intéresser aux concurrents pour voir un peu l'offre qui existe déjà sur le marché. Après, comme je te l'ai dit, ça reste très académique. Pour nous, c'est surtout faire un rapport, une analyse, voir ce qui existe déjà et vraiment comprendre le marché en tant que tel. C'est vraiment ça notre rôle spécifique. Du coup ici, pour la réunion, ce que j'ai fait, c'est qu'on a à la fois un formulaire pour tout ce qui est concurrence et un formulaire pour les entreprises qui pourraient être intéressées par le logiciel qu'on pourrait développer. Et donc ce que je te propose, c'est un peu de jouer le rôle de, par exemple, imaginons que votre entreprise souhaite justement utiliser un logiciel MES, de répondre à certaines questions, que ce soit pour un nouveau logiciel ou une première application d'un logiciel MES. Et du coup, le but serait de poser quelques questions pour voir ce que ton entreprise attend comme type de logiciel pour son bon fonctionnement, la ligne de production, etc. Genre quel type d'équipement, quelles features ils voudraient, etc. Du coup, ce que je peux faire pour simplifier, c'est soit je t'envoie le lien du formulaire et tu le complètes de ton côté, soit on le fait ensemble. Je peux te l'envoyer par WhatsApp si tu veux, ou dans la conversation.

Joseph : Oui, carrément.

Louis : C'est quoi le cadre du MES, c'est-à-dire où commence son application et où

ça se termine, notamment en lien avec un ERP ?

Joseph : Justement, c'est aussi dans le questionnaire. Nous, on se centralise principalement sur les MES, et on va aussi parler de la norme ISA-95. C'est un système qui permet d'interconnecter le logiciel MES avec l'ERP pour avoir quelque chose de connecté entre eux. On pose aussi des questions là-dessus pour voir si ça pourrait être intéressant pour les entreprises de lier tout ça ensemble pour avoir une gestion commune.

Louis : Ok, mais attends, je t'envoie rapidement le lien ici. Est-ce que tu l'as ? Si tu l'ouvres, est-ce que ça fonctionne ?

Joseph : Ok, c'est bon.

Louis : Du coup, on peut regarder ça ensemble. Je partage mon écran comme ça on le fait ensemble. Company name, j'imagine que tu préfères que je ne le mette pas ?

Joseph : Oui, ne le mets pas. Mets plutôt quelque chose de générique.

Louis : Ok. Et pour la taille de l'entreprise ?

Joseph : PME, c'est entre 10 et 250 salariés. Mais moi je dirais plutôt entreprise de moins de 500. Ça dépend de la définition.

Louis : Ok, je note.

Joseph : En France, on est environ 250 personnes. Donc je considère qu'on est une entreprise de taille moyenne.

Louis : Et au niveau des sites ?

Joseph : Deux sites en France.

Louis : Et les lignes de production ?

Joseph : Inférieur à 10.

Louis : Est-ce que vous utilisez un système MES ?

Joseph : Oui. On utilise surtout :

le suivi de production en temps réel, les indicateurs de performance, et un système assez sur mesure.

Tout ce qui est traçabilité et ordres de fabrication, c'est géré par l'ERP.

Louis : Et au niveau du prix, tu trouves ça raisonnable ?

Joseph : Oui, il est adapté. On est environ à :

5000€ d'investissement par ligne et 800–900€ par an par ligne

C'est un modèle par ligne de production, pas par utilisateur.

Louis : Et pour les utilisateurs ?

Joseph : Tu peux en créer autant que tu veux. Et ça, c'est le bon modèle. Tu paies une licence par ligne, mais tu peux ajouter des utilisateurs librement.

Louis : Et au niveau de la formation ?

Joseph : Il y avait une formation au départ incluse dans le prix. Mais le logiciel est assez intuitif, donc pas besoin de gros suivi.

Louis : Et la modularité, c'est important ?

Joseph : Oui, clairement. Aujourd'hui, ils proposent plusieurs modules :

performance opérations manuelles maintenance

Et tu choisis ce que tu veux.

Louis : Et en termes de critères importants ?

Joseph :

modularité facilité d'utilisation interface intuitive automatisation maximale limiter la saisie manuelle

Louis : Et le pricing idéal selon toi ?

Joseph : Par ligne de production, clairement. Pas par site, sinon ça crée des déséquilibres.

Louis : Et pour la data et l'analyse ?

Joseph : Power BI est indispensable aujourd'hui. Il faut que le MES puisse exporter les données facilement vers Power BI. Sinon, ça ne marchera pas.

Louis : Et le reporting ?

Joseph : Le gros avantage, c'est :

données en temps réel tableaux de bord partageables visualisation intuitive

Louis : Ok, super. Merci beaucoup en tout cas.

Joseph : Avec plaisir. Et si tu as d'autres questions, n'hésite pas.

A.2.1.2 Interview 2

François : Et je dézoome un peu et je regarde sur le temps long comment ça se passe, si j'ai des dérives. D'où vient le problème ? Notre algo est spécialisé justement là-dedans, à trouver des causes racines, des causes de dérives, des comportements qui s'écartent tout en restant dans les tolérances, par exemple du fabricant, des comportements qui s'écartent de la normale. Carrément, une fois qu'on a suffisamment de données à disposition, et donc un historiseur qui est bien touffu, on est aussi capables évidemment de donner des prédictions. Précédemment, Pépite est assez âgé pour avoir développé des connecteurs capables de se connecter à n'importe quelle source de données, peu importe le protocole. Même un vieux fichier CSV qui traîne sur un serveur, on va aller voir, comme les protocoles de données les plus modernes.

Louis : Mais du coup voilà, ici, je pense que pour la réunion, on peut un peu faire du ping-pong en questions-réponses de chaque côté, l'un l'autre. Mais du coup nous, en fait, en tant qu'étudiants — je ne sais pas si je l'ai dit ou pas — mais on est une équipe de 4 à travailler sur le projet en collaboration avec Agitech, qui lead un peu le projet. Et du coup ici, pour notre mémoire, on doit créer entre autres une analyse de marché. Donc on essaie de voir des entreprises ou même des personnes qui pourraient être impactantes par rapport au projet aussi. Et du coup, on se disait que Indao pourrait, d'une certaine manière, être soit — je ne sais pas trop comment le définir — on pourrait le voir un peu au fur et à mesure de la réunion, comme un complément ou peut-être une sorte de concurrence indirecte par rapport à certains services spécifiques, par exemple par la donnée et tout ça. Et du coup, de poser un peu des questions là-dessus pour analyser. Et nous, c'est entre autres pour notre mémoire, pour faire cette analyse de marché. Et du coup, moi j'avais quelques questions en tête déjà pour commencer, pour poser un peu le cadre, si c'est ok comme ça. Du coup voilà, la compagnie c'est Indao chez vous. Je voulais savoir déjà pour commencer vers quelle année Indao a été créée, du coup lié aussi au projet Pépite initialement.

François : Pépite.

Louis : Ça ok. Et du coup vous êtes originaires de Liège ? Et vous avez un nombre d'employés de plus ou moins combien ?

François : Je dirais 25, et la majorité sont ingénieurs.

Louis : Ok ouais. Et puis aussi, j'ai oublié de dire, il n'y a pas d'obligation de répondre à toutes les questions. S'il y a une question qui est un peu technique ou un peu trop...

François : Je ferai l'anguille.

Louis : Ok ça va, il n'y a pas de souci. Et merci d'avoir précisé, comme ça il n'y a pas de questions gênantes ou qui puissent déranger.

Et du coup, pour commencer aussi, peut-être dire un peu ton rôle au sein de l'entreprise Indao.

François : Je terminerai ma mission le 17 avril. Je suis rentré au mois de juin en tant que directeur. Et donc je serai parti jeudi prochain. Et donc oui, effectivement, jusqu'à présent, j'étais directeur commercial.

Louis : Ok ok, ça va.

Est-ce que vous nous entendez, Louis et Nathan ?

Nathan : Oui.

Louis : Du coup, Nathan fait aussi partie du projet Oxy, comme je te le disais précédemment à François, qui est lié à l'entreprise Agitech. Et du coup, je disais à François que nous sommes étudiants et qu'on travaille sur le projet en collaboration avec Agitech, et que pour notre mémoire, on doit faire une analyse qualitative du marché et aussi des entreprises ou des personnes qui pourraient impacter le projet. Et du coup, on se disait que Indao pourrait être une entreprise intéressante à analyser et avec laquelle communiquer pour voir ce qu'ils proposent, sachant qu'il y a certaines similitudes avec ce qu'on propose. Sachant que nous, on est plus sur un logiciel MES, et si je ne dis pas de bêtises, vous êtes plus dans l'analyse approfondie et l'optimisation des entreprises industrielles. Mais voilà, discuter avec vous pour voir ce qui existe déjà et ce qui pourrait être complémentaire.

Philippe : Oui, alors peut-être pour refaire un bref historique. Nous, on propose — ça a toujours été dans l'ADN de l'entreprise — des outils d'optimisation de process

industriels en utilisant l'IA. On a un peu plus de 25 ans d'expérience dans ce domaine, pour optimiser les processus de production et aussi la maintenance. On a développé une plateforme construite autour d'algorithmes d'IA, et puis on a petit à petit remonté vers la source des données. Donc maintenant, on a une plateforme qui permet de collecter les données des machines, des systèmes de supervision, partout où on peut générer de la donnée dans une usine, y compris les opérateurs, la contextualiser et la préparer pour alimenter les outils d'aide à la décision. Donc en fait, on a une plateforme qui fait le bout en bout, depuis la collecte de la donnée jusqu'au dashboard pour aider les opérateurs à piloter l'usine à l'optimum. Et on peut même reboucler dans les automates pour adapter les consignes en fonction du contexte de production. Donc ça, c'est vraiment notre métier. On n'est pas du tout dans des outils de planification, ni dans les MES, ni dans la GMAO.
Louis : Et du coup, alors peut-être que vous percevez notre projet Opsy plus comme quelque chose de complémentaire que réellement un concurrent en tant que tel, non ?

Philippe : Ce qui nous intéresse, il y en a des brouettes sur le marché. Donc c'est effectivement souvent là où on va chercher la donnée, parce que nous, on a besoin d'avoir des informations comme le type de recette, quand je démarre, quand j'arrête de fabriquer, pour pouvoir avoir une signature cohérente. Si par exemple on a un projet avec Safran ou avec Smart, là on va chercher les données, mais ils n'ont pas toutes les données qui sont utiles. De notre côté, ils ont uniquement les données qui sont liées à la gestion de la production et à la traçabilité. Donc voilà, mais ce n'est pas suffisant pour diagnostiquer des problèmes de performance et comprendre d'où viennent ces problèmes.

Louis : Et je me disais, vous êtes principalement liés à des secteurs... j'ai vu un peu sur votre site, c'est du coup des secteurs industriels, style la chimie, tout ce qui est lié aux machines, outils, métaux, etc. Et je me demandais, par rapport à tout ça, est-ce que vous visez principalement des PME ou même déjà directement des grosses entreprises ? J'entends Safran et tout ça.

Philippe : La plupart de nos clients, ce sont des clients qui ont des process de production relativement complexes. Alors on a quelques petites exceptions, mais la plupart du

temps, c'est dans le domaine de la chimie, du papier, des cimenteries, donc des processus continus. Ce n'est pas par exemple dans l'assemblage. On ne travaille pas dans les ateliers de fabrication classiques. On a travaillé un peu dans les machines outils, mais ce n'est pas notre cœur de métier. Nous, on va plutôt travailler dans les processus continus avec un certain niveau de complexité et une variabilité qui vient de la matière première ou des entrées du processus.

Louis : Et vous vous focalisez plutôt sur l'Europe ou plus localement ?

Philippe : On travaille beaucoup en Wallonie parce que c'est plus simple, mais on n'a pas de frontières.

Louis : Et vous intégrez votre solution chez les clients ?

Philippe : Non, pas du tout. On travaille avec des intégrateurs. Par exemple, avec un intégrateur comme Agitech dans le domaine du transport de pétrole. L'intégrateur installe la plateforme, et nous, on fournit le support et la documentation.

Louis : Et du coup, j'imagine que c'est un système de commission avec les intégrateurs ?

Philippe : C'est un modèle qu'on essaie de développer. On a aussi des partenaires en mode OEM, qui ajoutent de la valeur sur notre plateforme, en marque blanche. Donc c'est eux qui installent, qui attaquent les projets, et nous on fournit la plateforme et le support.

Louis : Et au niveau du support justement ?

Philippe : Le support de première ligne est fait par les intégrateurs. Pour les questions plus avancées, c'est nous qui intervenons.

Louis : Et au niveau du pricing ? Vous êtes sur abonnement ?

Philippe : Oui.

Louis : Nous, on pense à un modèle freemium avec des fonctionnalités ajoutées progressivement. Vous en pensez quoi ?

Philippe : On n'a pas de prix unique, on a un prix par utilisateur et par niveau fonctionnel.

François : Je vous encourage dans votre réflexion, mais attention. Le freemium, c'est intéressant pour attirer les clients, mais il faut que ce soit très simple. Si c'est gratuit mais que ça vous prend trop de temps, ça ne marche pas. Le client teste, prend l'habitude, et ensuite il devient un prospect chaud.

Philippe : Le problème, c'est qu'on doit intervenir pour connecter les machines. Il y a un effort technique non négligeable. Donc le freemium est compliqué dans l'industrie.

Louis : Oui, c'est un peu la même conclusion qu'on avait.

Louis : Et au niveau des licences, comment ça fonctionne chez vous ?

Philippe : Ce sont des accès. On définit plusieurs types d'accès, et le client paie en fonction. On ne paie pas de licences à d'autres fournisseurs.

Louis : Et c'est du mensuel ?

Philippe : Non, principalement annuel. On sépare la licence de l'hébergement.

Louis : Et l'hébergement ?

Philippe : Souvent sur site, pour des raisons de sécurité et de performance. Les clients ne veulent pas toujours mettre leurs données dans le cloud.

Et puis il y a aussi la question du temps réel.

Louis : Et l'open source, vous y avez pensé ?

Philippe : Oui, mais on n'a pas vu d'intérêt.

François : Il faut gérer une communauté, des licences, la sécurité… Et souvent les clients confondent open source et gratuit. Mais en réalité, ils veulent surtout que le système fonctionne.

Philippe : Et il y a aussi des contraintes de licences open source qui peuvent poser problème en usage commercial. Donc on a préféré simplifier.

Louis : Et au niveau de la modularité et des connexions ?

Philippe : On interagit surtout avec les systèmes de données : SCADA, DCS, etc. On se base sur des protocoles standards comme OPC UA.

Louis : Et l'évolution de l'IA dans votre produit ?

Philippe : On intègre de plus en plus d'IA. Des modèles pour la prédiction, la détec-

tion d'anomalies, l'optimisation. Et aussi des LLM pour : nettoyer les données configurer les dashboards générer des indicateurs

Nathan : Oui, avoir un agent IA intégré partout dans l'application.

Philippe : Oui, mais attention aux hallucinations. Les modèles peuvent donner des réponses fausses.

Louis : Et pour la génération de clients ?

Philippe : Participer à des événements, utiliser LinkedIn, suivre les actualités.

François : Et faire du terrain.

Aller voir les clients directement.

Philippe : Et bien se positionner dans les standards MES.

Louis : Ok, super intéressant.

Philippe : Capitalisez sur vos premiers clients.

François : Un client peut vous ramener d'autres opportunités.

Louis : Merci beaucoup pour votre temps.

François : Avec plaisir.

Philippe : Bonne continuation !

A.2.1.3 Interview 3

Louis : Christophe, enchanté de te voir un petit peu dans le cadre du projet aussi. Est-ce que tu pourrais te présenter, dire ce que tu fais, et puis comment t'est venue un peu l'idée en voyant pleinement ce qui se passait au niveau du marché ? Voilà, ton expérience du coup, revenir un petit peu au début, et te présenter en même temps à la même occasion.

Christophe : Ok. Donc en fait, tu vois, ça fait à peu près 30 ans que je suis dans l'industrie et dans le monde du MES. On va dire à peu près aussi longtemps que j'ai toujours été intéressé par l'exploitation des données industrielles pour pouvoir tirer réellement la quintessence des outils et des projets qu'on met en place chez les clients. J'ai commencé en tant qu'intégrateur système en France. J'ai fait ça pendant plus d'une dizaine d'années, en implémentant plusieurs fois des projets MES, en pratique, ce genre de choses.

Ensuite, j'ai rejoint une société belge, Carmeuse, pendant 15 ans, où j'étais en charge de l'électricité, de l'automation et de l'informatique industrielle. Et là, on a également implémenté, mais à beaucoup plus grande échelle, une plateforme MES qui a été intégrée dans différentes usines du groupe en Europe. À la fin de cette collaboration, j'ai pris du recul par rapport à mes premiers intérêts, qui étaient vraiment la gestion de projets d'intégration industrielle, etc. Et dans cette intégration, on fait toute la chaîne industrie 4.0. Donc on part de l'électricité, tout ce qui est étude électrique, implémentation, capture des signaux, on intègre ça dans des automates programmables, qu'on configure et qu'on programme également. On met à disposition les interfaces opérateurs, toutes les interfaces graphiques pour le pilotage du site. Et donc ça forme une couche MES qui permet de faire du pilotage d'atelier et de remonter des informations plutôt macroscopiques, on va dire à l'heure, à la demi-journée selon le type de process dans lequel on évolue. Parfois, ça peut être plus rapide également si c'est nécessaire. Et donc c'est un outil qui est plutôt orienté ingénieur process, directeur de production. Ces outils permettent également d'alimenter les ERP, puisque ce sont les outils qui consomment la matière, qui créent des stocks, qui transforment la matière, qui donnent des indicateurs de performance sur le fonctionnement. Et donc, ces données de fonctionnement, avec les consommations, etc., donnent beaucoup d'informations pour pouvoir calculer les coûts du produit fini. Et en fait, comment on en est arrivé à développer nous-mêmes Opsi, c'est que depuis un peu moins de 5 ans, on a la volonté d'amener la technologie dans les PME. Donc on est sur un marché qui est quand même hyper mature. Il y a de très gros acteurs sur le marché qui vont vers de très gros clients. Ce sont des acteurs qui ont beaucoup d'experts, beaucoup de complexité, mais en fait, dès qu'on descend vers les PME, aujourd'hui ces outils sont hyper complexes. Ils sont aussi sur des technologies pas évidentes à faire évoluer quand on a de gros parcs installés dans des groupes internationaux. Donc ce sont des systèmes importants, complexes à bâtir, quasiment uniquement par des spécialistes. Et en fait, on s'est positionnés sur quelques projets MES pour des PME avec ces outils standards du marché, et les clients n'ont pas pu suivre. Ces technologies sont beaucoup trop complexes

et trop chères. Donc on a décidé de faire nos propres outils MES, mais pas en mode projet, pas en disant : on installe un outil chez un client et il est dépendant de nous. Le parti pris, ça a été de faire directement un produit, un excellent produit, qui soit intégrable par un réseau de partenaires intégrateurs. Ces partenaires vont s'occuper de la gestion de projet, de la connexion vers les PLC, etc. Et par définition, on veut que l'outil soit très facilement configurable par le client final. À la fin du projet, l'objectif, c'est que le client puisse être autonome. Je ne sais pas si tous vont le faire, mais la possibilité doit exister. Et ça passe par la facilité de l'outil, par le fait qu'on a une API complètement ouverte pour pouvoir développer et configurer la plateforme.

Louis : Et du coup, qu'est-ce qui différencie Opsi des autres logiciels MES ? Quelle est la plus-value et l'avantage concurrentiel ?

Christophe : On ne travaille que sur des plateformes open source. Donc on va dire que l'outil sera "open core". Il y a des choses qui ne seront pas 100Deuxième chose : il y a de l'IA de manière complètement native. Troisième point : on a pensé dès le départ une ouverture complète sur n'importe quel type de données, n'importe quel équipement, n'importe quel contexte industriel. Quatrième point : le business model. Il est basé uniquement sur les équipements, avec un nombre de tags illimité et un nombre d'utilisateurs complètement illimité. Donc le prix est lié aux équipements. Et le dernier point, c'est que ce sont des gens qui viennent de l'industrie qui développent. On a la connaissance métier du terrain, et ça fait une grosse différence. J'ai été moi-même pendant 15 ans de l'autre côté de la barrière, donc j'ai vu les difficultés. Le but, c'est de tirer toutes les leçons de cette expérience pour répondre aux besoins des PME. Mais aussi des grandes entreprises qui sont parfois coincées dans des systèmes trop complexes et trop chers.

Louis : Et au niveau du développement à l'international, quelle est votre vision ?

Christophe : La stratégie marketing n'est pas encore complètement définie. Mais notre premier client est en Slovaquie, donc déjà à l'international. Vu qu'on est très compétitifs en coûts, on ne peut pas se limiter à la Belgique. Donc oui, il y a clairement une volonté d'expansion. On a déjà des discussions avec des partenaires potentiels, notamment

en Belgique. Une fois la stratégie définie, on verra comment structurer les marchés.

Louis : Et au niveau des données ?

Christophe : Aujourd'hui, la valeur d'une entreprise est liée à ses données. Nous, on collecte surtout les données machines plutôt que les données manuelles. Ce sont les machines qui font tourner l'usine. Donc c'est là qu'on se concentre. Et ça permet d'avoir une vision complète de la production.

Louis : Et le modèle d'intégration ?

Christophe : Le client doit pouvoir estimer lui-même le prix de la licence. Pas besoin de passer par un commercial. Il choisit ensuite un partenaire intégrateur. OpSee ne fait que le logiciel. L'intégrateur fait le déploiement et la mise en œuvre. Et il est commissionné sur les licences.

Louis : Et le hosting ?

Christophe : Aujourd'hui, ce n'est pas la priorité. On privilégie les installations locales. Beaucoup d'industriels ne veulent pas leurs données dans le cloud. Le hosting viendra peut-être plus tard.

Louis : Et l'IA ?

Christophe : Elle est présente à deux niveaux. Un chatbot pour interagir avec la plateforme. Et ensuite une IA plus avancée, basée sur du machine learning contrôlé, pour expliquer les résultats.

On veut éviter une IA "boîte noire". **Louis :** Et sinon, encore une question, c'est plus au niveau du support fait un peu, le support que vous avez envie de donner à OpSee. Est-ce que c'est un support que vous gérez totalement ou bien est-ce que ça reste du support aux intégrateurs et tout ça ?

Christophe : Non non, la première ligne de support, ce sera les intégrateurs. Donc ce sera à eux aussi, a minima, de gérer ce qui est fait chez le client. Comme n'importe quel éditeur de logiciel aujourd'hui, ils ont des formations, ils sont certifiés OpSee, donc ils auront les connaissances. Ils pourront faire les premières, on va dire, le niveau 1 dans tout ce qui va être plutôt lié à des problèmes de configuration, des choses comme ça. Et

OpSee fera toute la partie des bugs de la plateforme, des modules qui seront développés par nous, et le support second niveau s'il y a vraiment des choses qui sont difficilement gérables par quelqu'un qui n'a pas développé. Donc voilà, c'est quelque chose qui est en train de s'affiner petit à petit.

Louis : Et pour terminer, peut-être dire un peu le prochain grand challenge du moment, ce qui dirige un peu aussi vos priorités ?

Christophe : Clairement, c'est technique. Bon, tout est bien sous contrôle, autant que faire se peut de ce que l'on voit maintenant. On attaque réellement la partie, tout ce qui est partie légale, on va dire : licences, contrats de partenariat, etc. Et toute la partie marketing. Donc il faut qu'on travaille maintenant sur la stratégie marketing.

Louis : Voilà, voilà, très bien. Merci beaucoup pour les informations, et puis je pense qu'on a déjà pas mal. Je pense qu'on a fait un bon aperçu de l'envers du décor de OpSee du coup. Merci beaucoup pour ce temps donné.

A.2.1.4 Interview 4

Juliette : Encore un tout grand merci de prendre le temps pour nous aider.

La première question, est-ce que je peux vous demander un peu de vous décrire, donc décrire un peu l'entreprise, votre secteur d'activité, et quel est votre rôle à vous au sein de l'entreprise ?

Frederic : Donc, Colona, c'est une boîte d'environ 250 personnes, qui fabrique des sauces, donc mayonnaise, ketchup, et toute une série de sauces spéciales, comme Devos Lemmens, que vous connaissez sans doute. Voilà. Nous sommes surtout actifs à l'export, parce que le marché belge est un petit peu bouché. Donc notre grande zone géographique, c'est plutôt la France, et plus particulièrement le nord de la France.

On a un chiffre d'affaires d'environ 120 millions d'euros, et on fabrique 45 000 tonnes de sauces par an. Voilà, ça c'est pour la boîte.

Alors moi, mon rôle dans la boîte : je suis responsable technique, donc Chief Technical Officer, mais ça c'est le beau mot en anglais pour dire responsable technique. J'ai en charge

tout ce qui est services techniques, plus l'excellence opérationnelle au niveau transversal du groupe, ainsi que le plan d'investissement. Et à ce titre-là, je suis membre du comité de direction, où nous sommes cinq dans le comité exécutif de la boîte.

Voilà, je ne sais pas si ça suffit.

Juliette : Oui, c'est super, merci beaucoup. Oui, si vous voulez plus.

Frederic : Non, non, ça me semble bien. Juste par rapport à mon parcours : moi, j'ai rejoint la boîte il y a un an seulement, donc je suis assez nouveau dans l'organisation. Et au préalable, j'ai travaillé 17 ans pour une boîte qui faisait des bouchons pour le vin, des bouchons synthétiques, dans la région de Verviers, avec le même type de fonction, donc la responsabilité opérationnelle du groupe, technologique, et aussi membre du comité exécutif. Voilà.

Juliette : Ok, super, merci beaucoup. Donc ça, c'était pour vraiment comprendre l'entreprise et votre rôle.

Sinon, une question qui rentre dans le sujet : quels sont les outils que vous utilisez au quotidien au niveau technique ? Est-ce que vous êtes Excel, ERP, papier ou autre ?

Frederic : Donc oui, par rapport à mon rôle, j'ai été engagé pour faire toute la transformation opérationnelle de l'entreprise. Tout ce qui est mise en place du lean, l'excellence opérationnelle, et tout ce qui est industrie 4.0, donc digitalisation et modernisation des outils.

Et donc, dans ce cadre-là, je pense qu'on va aller vers un MES. Donc le MES fait partie des éléments 4.0 qu'on doit implémenter.

Aujourd'hui, on a un ERP qui s'appelle Odoo, bien connu en Belgique, dans lequel on est en train de digitaliser à peu près tous nos process. On a des ressources en interne qui sont des anciens développeurs Odoo, donc qui sont tout à fait capables de customiser l'ERP à tous les process de l'entreprise.

Au niveau technique, département technique pur, il y a encore énormément de choses qui sont en Excel, malheureusement.

Et donc, dans les mois qui viennent, on devrait avoir une GMAO. Tu vois ce que c'est

GMAO ?

Juliette : Oui, de nom, peut-être rappeler vite fait.

Frederic : Gestion de Maintenance Assistée par Ordinateur, donc c'est l'ensemble des données : gestion des pièces de rechange, gestion des interventions des techniciens, rapports sur les interventions techniques, analyse des pannes, etc.

Donc tout ça sera rapatrié dans Odoo, qui devrait être notre seul outil en termes de gestion de maintenance professionnelle dans la boîte.

Pour l'instant, comment est-ce que vous suivez le temps de production, les stocks, l'avancement des commandes ?

Les stocks sont dans l'ERP, l'avancement des commandes est dans l'ERP. Par contre, tout ce qui est TRS, donc performance des lignes de production, se calcule via des fichiers Excel.

Juliette : Ok. Vos outils sont-ils centralisés ou répartis sur plusieurs supports ?

Frederic : Plusieurs supports. Comme je l'ai dit, on a l'ERP qui est assez récent, et toute une série de choses qui doivent remonter dans l'ERP. L'ERP aujourd'hui sert surtout à la finance, à la gestion des stocks et au processus supply chain, mais pas encore au processus production.

Alors, à voir par rapport à ce processus-là ce qui sera dans le MES et ce qui sera dans l'ERP. A priori, tout ce qui sera performance de production restera plutôt au niveau MES et ne remontera pas dans l'ERP.

Juliette : Sinon, quelles sont les erreurs les plus fréquentes dans votre organisation à ce niveau-là ?

Frederic : Par rapport aux pertes de productivité ?

Juliette : Oui, par rapport à vos outils. Où avez-vous le plus d'erreurs à cause du manque d'outils ou des mauvais outils ?

Frederic : Alors, les outils informatiques ne génèrent pas d'erreurs en tant que telles. Par contre, la fiabilité des données issues des fichiers Excel dépend de l'encodage des personnes.

Je veux dire que la fiabilité est d'environ 75 %. Et donc, c'est un peu faible, sachant que c'est cela qui va orienter toute l'amélioration continue de l'entreprise, les groupes de travail prioritaires, etc. Donc ce n'est pas super fiable, notamment pour l'organisation des ressources et la planification des groupes d'amélioration continue.

Juliette : Sinon, est-ce que vous manquez parfois d'informations en temps réel ?

Frederic : En temps réel, oui, clairement. On n'arrive pas à piloter en temps réel. On pilote après coup, à la maille du jour au lendemain.

Ce n'est pas pour ça qu'il n'y a pas de réactivité pendant les pauses de production : s'il y a un problème, les équipes font appel aux services techniques. Mais au niveau du management, on ne capture réellement les causes de panne que le lendemain, en analysant les rapports Excel.

Tandis qu'un MES est censé apporter une visualisation en live de la performance des lignes de production.

Juliette : Selon vous, qu'est-ce qu'il devrait absolument y avoir dans un outil idéal ?

Frederic : Pour moi, le MES a pour rôle principal la performance en ligne de production, donc le TRS. Et avec le TRS, tous les indicateurs associés : MTBF (temps moyen entre deux pannes) et MTTR (temps d'intervention technique).

C'est vraiment la fonction de base, avec une visualisation en temps réel de la situation de l'usine, pour voir immédiatement si les lignes fonctionnent correctement à un instant donné.

Ensuite, il faut une analyse des pertes de productivité (Pareto) pour orienter les actions d'amélioration continue.

En deuxième point, la qualité : le MES doit intégrer les contrôles qualité, les tests opérateurs, et les lier aux batchs de production.

Juliette : Est-ce qu'il est important pour vous que la solution s'adapte à vos processus spécifiques ?

Frederic : Oui et non. Pour moi, si un software est bien conçu, la version standard doit couvrir 95 % des besoins. Sinon, c'est que les processus sont trop complexes.

Il y a toujours une petite part de customisation nécessaire, mais elle doit rester limitée.

Juliette : Pourquoi avez-vous décidé de tester un MES ?

Frederic : Pour fiabiliser les données.

Juliette : Pourquoi OpSee ?

Frederic : Première raison : Christophe a passé trois mois chez nous en consultance, donc il connaît bien l'entreprise et nos besoins.

Deuxième raison : participer à la version bêta d'un logiciel est une opportunité pour adapter l'outil à nos besoins.

Juliette : Quels sont les principaux freins à l'adoption ?

Frederic : Le prix peut être un frein, mais le principal frein reste la maturité de l'entreprise. Il faut une culture d'amélioration continue et une organisation suffisamment structurée pour tirer profit de l'outil.

Cela demande aussi du temps, de l'énergie et une bonne compréhension des processus.

Juliette : Si OpSee n'existait pas, auriez-vous adopté un MES ?

Frederic : Oui, clairement. Peut-être un peu plus tard, mais c'était prévu.

Concernant les MES existants :

J'ai déjà implémenté un MES américain très performant dans une précédente entreprise, mais extrêmement coûteux, avec des licences élevées et une forte dépendance au fournisseur.

Je ne veux plus de ce modèle.

Donc la solution open source, que ce soit OpSee ou un autre, était une évidence, avec des coûts plus abordables et plus de flexibilité.

OpSee a été mis en concurrence avec Technord. On aurait trouvé une solution ailleurs, mais OpSee a été retenu.

Juliette : Voilà, c'est tout pour mes questions.

Merci beaucoup pour votre temps.

A.2.1.5 Interview 5 (Cemix – Tesar David, session 1)

Réunion de découverte (session 1) avec David Tesař, directeur d'une cimenterie du groupe Cemix (Slovaquie), conduite en anglais par Christophe (commercial OpSee) et Peter (chef de produit, ex-CPA/Camoz, développeur de Prism). L'objectif est de cadrer les besoins de digitalisation du prospect et de présenter les modules pertinents d'OpSee avant qu'il ne formalise un cahier des charges.

Christophe : [...] So the goal today [...] is to review a bit more what are your needs, David, in term of digitalization and what you would like to bring to your team, making sure that the positioning of OpSee could fit your need for now and a bit more your future. So last time we presented the platform [...] but now it would be much better if you can express what you need. So therefore, I ask Peter to join.

David : Okay. So regarding our needs. First of all, at the moment we are running several different type of visualizations for almost for each production part. We have kind of different type of control system. So some kind of overview for the managers of the department or for me or for production manager at all. Some platform which will be able to present production data, let's say in case of conception, stability, process, some process parameters. And to have it as easy access will be something what we are looking for. We are not so interest in, for example, OEE, because at the moment our capacity is two times, three times bigger than is the needs of the market. So we are mostly running, for example, when the electricity is cheap. So we are not at the moment limited by the reliability of the equipment. We are more or less limited by the needs of the market.

David : So what's really something missing in our production is some easy follow if we are running efficiently or not. So if I would like to see some data, what was the last day average production on the line mill, it will be hard to get this information. Or if I would like to see some parameters of the mill, the most important, again, you have to go into the control room somehow, look for this information. So this is something what really missing at the moment for us as managers, each departments or me or other colleagues.

Christophe : So for now you have different facilities. In that facilities, once you have

one type of HMI, on the other one you have another one. You have nothing which is really providing you a global overview.

David : Yeah. Even we don't have a centralized control room. So at the moment we are running how much ? Five control rooms. So yeah, the status of our automation is quite poor and is something what really needs to be improved. Well, for this reason, Jozef and Laci made some kind of report about the status of our automation and what would be the good to do, how to improve the situation.

Christophe : So we have a trending tool that was really improved lately, so Peter probably can show it. And for the parameter stuff, currently is not yet fully integrated yet there. It's a little bit hidden for the timing because it's not completely on board, but that's currently something we can implement without too much issues.

David : Because if I can disturb you, Christophe, for example, KPIs. If I look on our production KPIs, it's something what really missing. People at the moment running the equipments to deliver the product, but we are really not pushing them to do it. Let's say they try to do it by the best way, but we don't have any measurement or how to measure the efficiency or follow the KPIs. And really I would like to set up some standards that this will be the three, four KPIs for the mill, for the kilns, and you have to follow it. If there will be something over the range for KPIs, you have need to explain, and also it will have somehow impact on, for example, maybe on your bonus or whatever. So this is something what was not here as a standard. And okay, we are running something via Excel, but I really don't want to use Excel for such a control.

Christophe : And David, might it be possible for you to share the Excel file you are speaking about ?

David : I will look, and not now, but I can provide you later.

Christophe : Yeah. That would be interesting so we can see how can that be implemented in the KPI part. [...] So the first thing regarding trending and so on, what you mentioned in term of productivity for instance, that's something maybe you can show, Peter, the trend.

Peter : [...] We are heavily developing and focusing on the solid base of OpSee. So for me, the solid base is data collection, is the equipment structure. So that needs to be rock solid. The complete equipment structure can be defined. You can drill down as from the S95 model. But for the data logging, we're also working now with a very easy approach to add servers. For instance, OPC servers, you can just browse your data. You can add it. So it's all included. You don't need to have other software. The data logging is inside. For MQTT, if you're using that, what we're doing here is we can use a sniffer to see what data is coming in over the broker. I can just click on it and add the tags. So for the time being, we will support MQTT, OPC UA, Sparkplug B, and we will extend this later on. We have full security also in there.

Christophe : So that means, David, regarding your point, at a certain point of time, it will be necessary to have the connection with your current system. Either the PLC, either the HMI, so we can recover with this kind of protocol the information which are needed.

David : Yeah, but this is usual. We do that for example for automatic gate system. We have some open system or part of the system is open for the external to be able to load and upload.

Peter : So the idea of OpSee is really...I worked for GE a long time, and they all have separate packages which are working together, but they're all different. So we want to combine it in one thing that works. So you end up with tags. [...] You can say, "Okay, I want to filter on it. I want to have raw value, change detection with the deadband," and stuff like that so that you're not logging everything. Then everything ends up in a database, which is also part of it. It's fully open source and fully open. [...] You can group them by units. You can go back and forth on the trending. But also you can do some analytics on moving average, but also Six Sigma, Two Sigma bands, and min-max envelopes.

Peter : What is also interesting is that you can say, if you have an operator and you see something strange, you can select it here. You can say "strange operation". And then it

will be saved for future use. [...] So this is for me the base. What is next on the planning is the KPIs, and the KPIs, this is what you're talking about. These are aggregations of, for instance, the last shift, the last day. We made a very extensive platform for Kermas, which was working quite well, but was quite slow at the end. So we're learning from that. And we want to make the same approach where you can define your KPIs, and they will be much more advanced than at Kermas because we want to also use AI and machine learning in there, so give the possibility to do a lot more than just a standard deviation and min-max. So it will be quite advanced. But this is ongoing.

Peter : For now what we have is first of all the dashboarding, which can be in Grafana. But we're trying to offer as much standard reporting. So Grafana is an option, but our standard reports will be in OpSee itself. So this is all coming from the raw data, so you can define it yourself. [...] Let me have a look to OEE. You don't need to have that, but this is OEE on how your line is producing. You can have an equipment overview where you see all the lines in your area, for instance, and here you can already see for today what the amount produced, waste and performance was. Now they're fully OEE focused, but if you want to see the average temperature, it can also be there. And this is specially made for television screens which are hanging next to the plants.

Peter : Operator screens with all the downtimes. And then what we're also making is the cockpit, and the cockpit is something completely new. These are widgets which you can use to create your own overview. So if you want to see the downtime timeline, you can just add it here. If you want to add a trend, you can also add it here, and you can start configuring your cockpit as you want.

David : So it could be personalized for, okay, for something for me and it will be different compared to the operator.

Peter : Indeed. It's not only showing. You can also click here and start defining, for instance, your downtime record. So it's not read only. We can put it read only for operators, but the idea is that an operator should not use 20 screens to do something. The cockpit is made to have everything included there, and they can just make cockpits

for themselves and do everything on there.

David : This is perfect.

Peter : And this is evolving. We are heavily working on that. Did you show the AI assistant, Christophe ?

David : Yes, we touch it, but there was a little problem with the license, if you remember. Our license or tokens or whatever.

Peter : [...] We have limits. So yeah, we have a quota, and we reached it apparently [...] The AI assistant can give you more insights on what you're seeing and can also start configuring OpSee.

David : So you can switch between different AI platforms because I saw that you are changing from Gemini to...

Peter : Yeah. And if I'm putting Claude Opus, for instance, I need to put my Anthropic API key. This is from your cloud subscription, and then you can start asking questions. [...] Anyway, it was working in the past. We need to fix it. It's quite powerful. Christophe did a workshop on it. You can configure everything in OpSee with this assistant if it's working.

David : In case of, because it's, let's say, I don't want to say open AI sources, how is it with the privacy ?

Peter : Well, that's a good question. We are currently implementing on-premise AI models. I'm doing some investigation on that. I'm running the Gemma 4 LLM right now, which is fully downloadable, and you can run it on your own hardware, no cloud involved. So if you want, we can support these models, and they're quite good, but you need your hardware. You need NVIDIA hardware to run it on, otherwise it's too slow. You cannot run it just on CPU.

David : You know, I'm touching this topic because our owner is little bit paranoid. And he's really scared. He's on some way pushing us to use AI system or AI tool, but on other hands, we are quite limited if you would like to involve it in our daily basis. So at the moment we are switching to a different type of SAP, and it should be also some AI

system implemented, but it needs to be really. . .He's really strict that it needs to be our own AI or really working for us, not for others. If you understand me.

Peter : Yes. I have solutions for that. So we will also implement that in OpSee so that your data is not going to the clouds. But it involves some extra hardware. So if you're interested in that, you can always let me know. But the feature will be in there in the new release of OpSee. We're currently working on that.

Christophe : For me, we can show everything. It depends what David's needs and what you would like to see, David, and shoot your question, and after that we can look at what would you ask us to do for a next step, if any is required from your side ?

David : You know, I propose that I will prepare some list or description about our expectations or our needs, with the current status where we are and what is available at the moment for us and where we would like to go, and you can have a look and say, "This is possible" or "This is not possible now and will be possible in, I don't know, half a year." If it's okay for you like that.

Peter : That's perfect.

Christophe : David, is there anything else you would like to see or understand about the tool for now or the future or to share ideas that things you didn't see and you say, "Oh, it would be great to have this or that" ?

David : No. For me it's clear that it's a really wide range system. Maybe in our case we will use a little part of it, and in that part which we will need, I would like to really see what is my wish. And this year I would like to describe to you precisely and spend some time on it and provide to you and you will say, "Yes, this is possible," or not.

Christophe : Just, David, do not be afraid about all the modules you see. When you have such a platform, it's all the time very, very modular. So it can be really small design, and you will pay a really small cost or price for it. Or if it is larger or it can expand, then you just pay as you go, as you grow, and as you need. So that's really the interest. So it will be really interesting to receive your request, and we can have a look at it and come up with a proposal.

Peter : If I may, David. I don't want to say more, so I will say only like this because I believe it's important to see your request file. But as you said, it's maybe you are going to use only a small portion of it for the moment, yes. But I have seen your plant. I have seen the automation system there. I know the process a little bit, so I tend to disagree with your statement. But I leave it like that. So let's send us your request and then we will see.

Peter : It's heavily in development. So we're going fast forward. But we want to start with the basics. Reporting and KPIs is on the shortlist, so it is being extended as we speak. But if you have input and nice to haves, we can give that more prio if you want. Currently the focus is on data logging, trending, dashboarding, and OEE. But KPIs can also...they're very important also.

David : But if you have OEE, you are not far from KPIs, it's also more or less very close topic.

Peter : I know, but for KPIs, well, we made some very nice inheritable, template-based KPI module, and we are rethinking that to also include in OpSee because it's very powerful. So what I want to avoid is that an engineer or an operator needs to configure each KPI for each production line and each measurement. So we need to standardize a bit, and we need to say, "Okay, this is such a production line. This blueprint is applicable for the KPIs," and then they can just say, "Okay, for that line, I take that blueprint with all the KPIs inside," and it's just measuring it. And you can overrule it for that equipment. We need to find a way of standardizing that, and I have something in my head how I want to do it, a bit more modern. If it works like I have it in my head, it will be very powerful in terms of rollout, especially if you have a lot of equipment.

David : You know, we are standard line plant. Kiln, mill, hydration, crushers. Nothing special.

Peter : So mill, hydration, crushers, these are different equipment. The KPIs will be a bit different. You will have an overlap somewhere. But we will combine them per type of equipment, and then for the mill you have different KPIs than for the crusher. So it's

an idea, and it will be soon there. I think we made a difference on that part, KPIs.

Christophe : So David, we'll just be waiting your input. And once we have it, let us some weeks just to have a look and discuss it and come back with a proposal.

David : Sounds good. [...]

A.2.1.6 Interview 6 (Dequachim)

Entretien de découverte mené avec Frédéric, CTO d'un groupe agroalimentaire de cinq sites, en présence de Christophe (AgiNtech, porteur d'OpSee) et de Peter (architecte technique). L'objectif initial est de présenter une simulation de licence OpSee pour un site type Dequachim (lignes de conditionnement chimique en batch), d'évaluer la réaction du prospect au modèle tarifaire, et de comparer avec son expérience passée d'une solution MES américaine (Red Zone). L'échange s'est tenu majoritairement en anglais à la demande des participants ; quelques courtes amorces en français ont été conservées telles quelles.

Christophe : As well for, uh, Dequachim with all the batch and so on. It's not that easy to have something which makes sense. So the discussion now with Fred will be really, really interesting. [...] He says, « Okay, what could be the price of OpSee once we finish the project ? » So I have kind of simulation. [...] You see here, this is the production line. Then here they have the machines, and on the machines I say, « Okay, they want only the OEE. » So they have one module. [...] In this case, the yearly cost for them will be around ten thousand. Now, if they go only for the OEE on the production line itself, to reduce the cost, then they will have only five, and the cost will be three thousand five hundred. And then I say, « Okay, but there could be something in between. » [...] If you have all the machines, you have the line for free. Or if you have at least two and you want another one to supervise, then it can be for free. Something like that.

Fred : Yeah.

Christophe : [...] Fred, vu que t'as une carrière internationale, on peut switcher en anglais ?

Fred : Thanks. I understand French, so that's no problem. But in English it's easy to

speak. [...]

Christophe : So Frederic is the CTO. [...]

Fred : We split operational leading functions in two parts. First part is really to manage the day-to-day activity of the plant and more generally the operations. My role is more to support, to drive investment, project, operational excellence, and to take the lead on the key projects to improve the plant. [...]

Christophe : Peter, maybe you can also very shortly introduce yourself.

Peter : Okay. I'm twenty years now in industry. I started on data logging and SCADA, and then went to MES, OEE. And now I'm also doing AI and data. [...] Together with Christophe, we did a very large OEE project, data logging project, quality project. [...] I did a project for Duracell, a complete RFID tracking [...] with quality. We did a project with supermarkets in the Netherlands where we monitored fifty thousand fridges, remotely. It was completely custom-built. We had ten million data points coming in from Jumbo, from Albert Heijn. [...] Currently, I'm also doing one OEE project at Chanel in Paris. [...] Work for ArcelorMittal, work for food companies, work for cigar companies, so I've seen all industries a bit.

Christophe : So Fred, just one pending thing before we go to that license topic for today. We are currently finishing the part related to the security that you asked. [...] All the security we are implementing inside OpSee. [...] By the end of next week you will have a quite good idea about the way the things are implemented. [...] You are the second one who asked the question. The other company, Dequachim, asked the same question, and exactly the same answer for the hardware part. That's AgiNtech. For the software part, I'll come back.

Peter : The idea there is that we're not reinventing the wheel. So what we do is we build on top of or we use a component which is open source, which is the industry standard. We use it all the time. The good thing is that we get the updates for that package. [...] Keycloak. We fully rely on that because it's made by experts. We want to be busy with the data and not with all the security things. [...] It's a very good product.

It's really the industry standard at the moment.

Christophe : Just made some upfront simulation, Fred. So how this is built. Our strategy is to have only two prices. First price is if you take one module of OpSee. And the second price, if you take more than one. And if you take more than one, you have all of them. [...] We were having in mind making our simulation with fifty-nine for one module. So this is per month. [...] Per equipment. [...]

Christophe : For each of the machines where you have the OEE, it would be fifty-nine euros per month per equipment. All the things related just to data collection, trending and nothing beside that, there is no cost. [...] Overall, the yearly cost with this approach would be around ten thousand euros per year.

Fred : We need to add K five. We need to add all the dosat lines [...] My question is, imagine that we are just talking about the OEE module. Generally, you have one equipment that makes the OEE of all the lines, the bottleneck. [...] The final step is the step that gives the OEE. Then the reason of the OEE loss is depending probably on another equipment. But in this case, do you need the module on each equipment ? Because that was one of my questions. [...]

Christophe : An equipment, we define an equipment by the fact that you take a module and you put the module on it. But you can put it at any level you want in your plant. So if we take production line, and then you have your process, your process cell, you could say, « Okay, I want the OEE on that one, plus this one, plus this one. » Then you have three. You can say, « I want only on the production line. » [...] Here, if you take only on the line, then you pay the module only for the line.

Fred : That's it.

Christophe : But you will not have the OEE per machine. [...] Only the OEE of the line, which is usually what we see in the plant. And all the downtime inside could be related to the different machines that compose this line. The cost will be three thousand five hundred euros per year. [...] We could say, for instance, if you want to have the OEE on the line, but I have two or three sensitive machines, like on the K five, that I would

like the OEE as well, then we could maybe build a kind of combo. [...] What is really crucial is that within a minute people need to understand and be able to calculate what will be their own cost and to implement it directly on the website.

Christophe : Do you think it could be interesting if you do not have any solution that you go on the website of OpSee and you say, « Okay, I explain roughly like in a tree what my plant is. I have a production line. I have three machines. I want this OEE on that. I want tracking and tracing. » You put the button, you have the cost. Would that be interesting for you as an owner ?

Fred : For me, yes, but I would say that's because I already experienced MES solutions in my previous life. I think for the targets you have, which are more small and mid-size companies that have not yet experienced MES because it's too expensive, the ones on the market, they will need guideline to define the needs and even what is a MES, what can I expect from an MES. So I don't think you will have a lot of people that will come directly on the site and make their market. They will probably more contact you to define the first set of what is a MES, what I can expect. Can you come on the plant and see approximately what could be the cost ? [...]

Fred : Just to explain to Peter, I installed an American MES on my previous group, which was also a food packaging company. Not food company, but food packaging for the wine market. It was Red Zone, an American solution, and they are targeting a lot of companies like us. [...] I cut it because after eight years, the final cost for the group, and it was a group of five hundred people, so not a big group, but five plants, and we only installed the MES on two. The cost was one hundred fifty K per year. And that's typically the cost model I don't want to experiment anymore because at the moment, because of the cost reduction I had to cut, I had to dismantle what we did and to rebuild. [...] My understanding of what you explained to me, Christophe, was « I built OpSee to have a completely different price model and to help mid-size and small companies to implement MES with another philosophy. » And that's the reason why I like OpSee. What I see, it's not shocking me, honestly, regarding price. I understand that we have a license cost to

maintain the software, to benefit of the evolution, because you have to pay perhaps some open source license, et cetera. But the kind of cost I got in the past is so huge. [...] At the moment, you cannot justify it to your board with some continuous improvement because, okay, at the beginning you can say, « I will earn five times the price because the first year, the second... » And after five years, « Ugh. How can I explain again that I will expend this money ? » [...]

Peter : That's exactly what I'm also doing. I'm also doing OEE studies at companies where I'm having these discussions. Do we need to calculate over a complete production line or do we need to calculate OEE over the units ? And sometimes the answer is complete production line and then indeed you end up with one OEE license and you can use your units for starvation and blocking [...] if the materials are not there or if it's blocked, but you have one figure at the end. But some customers want for each unit also the OEE and then we have the first license where you calculate it for each unit. [...] To answer your second thing, I also worked a lot with American MES solutions from General Electric and AVEVA lately and the issue they are having right now is they have solutions but they are completely outdated. And you have the open source community which is ramping up. You see all the servers going to Linux. You see all the databases going to Postgres and we want to do exactly the same with OpSee. But you need to have the glue to have a product to go to a customer because if you just install Postgres and Grafana for industrial companies, sometimes they cannot do anything with it. [...]

Fred : That was my only question. What I see, I'm fully reassured except if Christophe each year comes with a fifty percent price increase on the license fees. But I trust the guy enough to say it will not happen. It's a joke. [...] But it's something I see honestly also. Each year I get six percent. Gone. Gone. [...] You can cry, you can scream. Okay. But it's like this. You can unbuild if you want.

Peter : No, no. We build the business model with two or three percent, I don't remember, a year, which is only the salary cost.

Fred : Yeah. That's the inflation. Okay.

Peter : We... This is really not the goal of overshooting because otherwise we destroy completely our business model. So that's not the goal at all.

Fred : Good. You will send me that ? [...] With precautions. I can fully understand it's not a full engagement at this time, but just to get an idea. [...] For me it's okay. What I see is okay.

Peter : It's what we signed and now we need to be completely open with our early adopters otherwise we cannot have feedback. So I will share it with you. [...]

Christophe : My target, and that's what we commit all together, is making sure that this one, for all the full scope, will remain under one hundred euros per month to start with. Because this is a psychological effect as well. The functions that we have, and that's still something we need to discuss and refine, but that's the functions that will have to be paid. So the OEE, the batch, tracking and tracing, AI. But not the AI [...] of configuration, the AI more related to machine learning and so on that still need to be developed.

Fred : Yeah, machine learning to make some quick correlation between some parameters.

Christophe : Yeah, to deal with [...] not to work only with LLM that could have a hallucination or we could not explain the result, but to go really in something that we develop internally, and that we have the control over the result. [...]

Fred : All the quality part, you put that in SOP module ?

Christophe : It depends. SOP could relate to quality. If you speak about sampling and introducing result, then probably that will stand in SOP. The goal is not to break LIMS with it.

Fred : No, no, of course. I mean by quality, it's more the quality control part, for production. The control they need to encode somewhere. Which is clearly not LIMS.

Christophe : This part, yes, this is SOP, standard operational procedure. So could be quality, could be machine checking, could be tuning and stuff like that.

Fred : Checklist, autonomous maintenance and all this kind of stuff. Okay.

Christophe : There is another one which is KPI. KPI will be the ability to store, to create your own KPI and then to reuse it afterwards inside your configuration with the data you want to have.

Fred : Right. Thanks a lot. [...]

Christophe : So Fred, you will be in touch with Peter when we will start to speak about configuration of OEE and all that kind of things. Raphael will manage completely the entire project for all the OEE part, then Peter will take a portion of it, or I will take, or both of us. We'll see.

Fred : Okay. Looking forward. [...]

A.2.1.7 Interview 7 (Diarotech)

Entretien de découverte avec Diarotech, PME belge fabriquant des outils diamantés sur mesure pour l'oil and gas à l'export (cinquante machines, neuf opérateurs, production par lots de petites séries). Participants côté Diarotech : Lamine (administrateur délégué), Horacio Tellez (R&D), Nicolas Golard (directeur de fabrication) et Étienne Balthasart (IT manager). Côté AgiNtech : Christophe Camerlynck. Échange mené en français. Le prospect n'a aucun ERP, une tentative d'implémentation Odoo a été abandonnée après dépassement de budget, et la gestion des stocks et du prix de revient se fait aujourd'hui sous Excel et de mémoire. Conclusion : intérêt confirmé mais non prioritaire, le prospect demande une visite terrain pour qualifier le besoin réel.

[...]

Diarotech : Donc moi, je suis l'administrateur délégué, Lamine. À ma droite, j'ai Horacio Tellez, qui est le responsable de la recherche développement. Et puis vous avez Nicolas Golard, qui est le directeur de fabrication. Et alors en ligne depuis chez lui, vous avez notre IT manager, Étienne Balthasart.

[...]

Christophe : Donc, est-ce que la terminologie MES est familière à tout le monde ou pas trop ?

Diarotech : Sans doute pas. On est resté vraiment dans les concepts relativement vagues. Donc peut-être préciser ce que ça concerne pour vous. Et puis alors nous, on vous expliquera un peu comment on fonctionne et voir s'il y a des points de concordance.

Christophe : [...] Le MES, originellement, ça comprenait onze fonctions dédiées uniquement au pilotage d'atelier : indicateurs de performance, gestion des opérateurs, gestion de recettes selon la norme ISA-88. Cette plateforme se cale entre les opérateurs de ligne et l'ERP. L'ERP a une vue macro, journalière ou hebdomadaire ; le MES tourne plutôt à l'heure, voire à la minute. [...] Ces plateformes existent depuis une trentaine d'années mais restent globalement inaccessibles pour des PME : dès qu'on va chez Siemens, AVEVA, Rockwell, ça coûte des fortunes. Notre volonté chez AgiNtech, c'est d'amener la technologie avancée dans les PME, accessible techniquement et financièrement. [...]

Diarotech : Bon, je pense effectivement à vous entendre que votre produit est trop sophistiqué pour ce que nous faisons nous-mêmes. En fait, nous sommes une petite société de production qui faisons du produit custom, donc on fait des produits dédicacés pour chacun de nos clients. Ils sont essentiellement dans le oil and gas à l'export. Et comme tous ces produits sont différents, on a besoin d'une agilité très grande et donc on a encore un processus de fabrication qui est très manuel. Et donc on a aujourd'hui à peu près pas de système de captation de data dans l'atelier.

Diarotech : D'autre part, on voulait développer un système ERP. On avait contacté les gens d'Odoo après avoir contacté beaucoup d'autres. Odoo nous avait assuré qu'ils pouvaient faire le travail moyennant pas mal de lignes de programmation et pas mal d'heures de coaching. On avait démarré et le premier volet qui devait durer cinquante heures a duré plus de cent heures. On a arrêté les frais en se disant que les six cents heures promises allaient devenir mille deux cents. Une usine à gaz qui allait nous coûter beaucoup trop cher. Donc pour l'instant, on recherche un ERP ou éventuellement à développer quelque chose de spécifique. [...]

Balthasart : On n'a rien ni avant ni après. On n'a pas d'ERP. Et on n'a pas trouvé de quoi le faire fonctionner. Et on n'a pas de moyen de retirer des données des machines.

On travaille par lots, c'est uniquement du lot. Et il y a des moments où il faut mélanger les lots pour optimiser, par exemple, le traitement dans un four ou dans une presse. On n'a pas de machine avec des automates. On a que du manuel. Au niveau de l'ERP, on a ce qui a été développé en interne, qui est une solution Excel et qui fonctionne bien pour la facturation, pour l'expédition. Mais ça s'arrête là. Le reste de notre ERP, c'est dans la tête de Nicolas.

Christophe : Quand vous aviez contacté Odoo, quelle était la problématique que vous leur aviez soumise ?

Balthasart : Le besoin, c'est d'avoir une assurance au cas où on aurait un problème de personnel, puisque le cœur de la fabrication, de la planification, c'est de l'humain. Il peut arriver n'importe quoi à n'importe qui et il faut qu'on puisse se débrouiller sans. Jusqu'à maintenant, ça n'a rien donné.

Diarotech : Le système était censé aussi nous aider à faire de la gestion de stock, gestion produits finis et calcul de prix de revient.

Christophe : Et le calcul de prix de revient se fait sur quoi principalement ? Coût matière, coût énergie, l'ensemble ?

Diarotech : Aujourd'hui, c'est l'ensemble, mais c'est un calcul fait manuellement ou sur tableau Excel sur base d'une recette et d'un produit défini pour un client. Ça reste une opération globalement manuelle et relativement imprécise, puisque pas basée sur la réalité de la fabrication. C'est plutôt l'expérience de Nicolas sur lequel on se base.

Golard : Au cours des différents lots, on a des étapes communes, comme deux traitements thermiques. Il suffit que le volume des deux traitements thermiques soit plus ou moins rempli et ça influence déjà le prix de revient. Vous avez un autre lot, il faut dix pour cent du temps total pour effectuer les réglages de la machine. Si vous faites cinquante pièces ou cent pièces, vous n'aurez pas le même temps passé par pièce. C'est plutôt un calcul moyen qui est effectué ici. Ce n'est pas un calcul en temps réel.

Christophe : [...] Le TRS se décompose en trois paramètres : temps de fonctionnement de la machine par rapport à une cible, cadence en pièces, qualité. [...] Aller collecter

de la donnée, on n'a pas besoin d'automate pour ça. On installe des capteurs directement connectés sur les réseaux. [...] On n'a pas la volonté de remplacer un ERP. En revanche, on peut probablement contextualiser et mettre en forme pas mal d'informations qui peuvent être intéressantes pour calculer des coûts de production.

Diarotech : Non, je pense qu'on doit d'abord résoudre notre problème de gestion globale de la production, la mesure des stocks matières premières, produits finis, et avoir une idée du prix de revient global. On doit d'abord attaquer le côté un peu plus ERP avant de s'intéresser aux détails. Ce que vous proposez pourrait être intéressant d'avoir des pilotages et des mesures spécifiques, mais je ne pense pas que ce soit la priorité.

Christophe : La gestion des stocks, comment vous la faites aujourd'hui ?

Diarotech : On a des stocks de départ, des stocks matières premières, des stocks produits finis, mais on a des étapes de fabrication avec des stocks intermédiaires. On a des poudres non mélangées, des poudres mélangées selon certaines recettes, puis ces poudres sont granulées avec le diamant et on a à nouveau des stocks de granulation. Le processus de fabrication d'un batch peut durer trois ou quatre semaines compte tenu des différentes commandes en cours et des bottlenecks au niveau des fours de frittage. Les stocks aujourd'hui, c'est des fichiers Excel que Nicolas met à jour de manière quotidienne.

Golard : La gestion du stock, c'est du plus et du moins, il n'y a rien.

Christophe : Quand vous lancez une fabrication, comment vous mesurez ce que vous consommez ?

Golard : C'est quelqu'un qui, suivant la recette, prend autant de kilos de cette poudre-là, autant de kilos de diamant, on mélange. C'est fait de manière manuelle, ça revient sous forme de fiches papier et puis c'est tout simplement déduit du stock matière initiale.

Diarotech : Il y a un certain nombre de choses que vous faites qui sont d'application, mais je ne pense pas que ce soit la priorité. Pour donner un exemple, on a neuf ouvriers et on a cinquante machines pour pouvoir faire des pièces de toutes formes, des séries de cinquante pièces et des séries de deux mille. Donc parfois c'est des presses automatiques, sinon des presses manuelles. C'est pour être le plus agile possible. L'optimisation

de chacune des machines, le temps entre pannes, ce n'est pas ça aujourd'hui la priorité.

Christophe : La planification, nous, c'est justement pas encore prévu. Remonter les infos dont vous avez besoin pour calculer beaucoup plus précisément vos coûts standards, je pense que c'est le bon outil. J'ai bossé quinze ans chez Carmeuse, on utilisait ce genre d'outil justement pour avoir les coûts de production. C'était le seul moyen de savoir ce qui avait été réellement consommé, quels étaient les temps de production. [...]

Balthasart : Plutôt plus tard. Faire revenir les données de fabrication, je pense que ça peut se faire à la main et les introduire dans les fichiers Excel de Nicolas. Pratiquement toutes les machines ont un ou deux ou trois backups. Donc une machine est en panne, on passe sur la suivante. Pour le moment, c'est assez rare qu'on ait besoin de plusieurs machines en parallèle. Ce n'est pas quelque chose d'urgent, sauf peut-être pour Nicolas.

Golard : Les remontées, pour le moment, elles se font de manière manuelle.

Balthasart : On ne peut pas mettre un capteur de toute façon. Il faut que ce soit un document rempli par les ouvriers une fois qu'ils ont fini leur batch.

Golard : Ne connaissant pas notre domaine, il serait plus facile de discuter directement ici, vous voyez un peu notre façon de procéder. Mais le temps réel, nous, il n'y a pas vraiment besoin.

Christophe : Tout le monde n'a pas besoin de temps réel, on est bien d'accord. Le MES, c'est un horizon de temps qui est à l'heure, à deux heures. En général c'est suffisant.

Golard : Nous, c'est même pas à l'heure ou deux heures, la journée nous suffit. On n'a pas besoin de plus bas que la journée.

Christophe : Vous n'êtes pas très loin de chez nous. Si ça vous intéresse, je passe une heure ou deux chez vous. Je regarde avec Nicolas comment vous êtes organisés, ce que vous collectez, ce dont vous avez besoin. Au feeling, je pourrais dire si ça vaut le coup d'en discuter. [...]

Balthasart : Très bien. On retient la proposition. On va y réfléchir, en discuter en interne. Je reviens vers vous en disant : OK, on tente une visite et une discussion plus approfondie pour être vraiment sûr que ça peut marcher ou pas. Sans ça, ce n'est pas

possible de dire quelque chose.

Christophe : Faisons comme ça. J'attends votre retour. Si vous pouvez juste me donner un retour positif ou négatif. Si c'est négatif, je ne vous relance pas.

Balthasart : Absolument. Vous aurez notre retour.

[...]

A.2.1.8 Interview 8 (Cemix Štramberk – Tesar David, session 2)

Deuxième session avec David Tesař (directeur, cimenterie Cemix de Štramberk, République tchèque), tenue le 22 avril 2025 en visioconférence, en anglais. Sont présents Christophe (AgiNtech, Belgique), Ladislav Vastag et Jozef (TriPrisma, Slovaquie), David Tesař et son collègue Michal (directeur production et technique). L'objectif est de présenter la plateforme OpSee, d'évaluer son adéquation aux fours PFR, hydrateurs et broyeurs de Štramberk, et de discuter sécurité, prix et étapes suivantes.

David : [...] Both of us started our career as process engineers. He worked for Arcelor-Mittal, me for Kermas. Here in Štramberk we are missing this position, and we discussed before the meeting that it is a little bit sad, as both of us know how the position is important for the proper control of the technology. At the moment we are here as ex-process engineers.

Christophe : [...] This platform aims to provide a good overview in real-time of a shop floor. It is really dedicated for process engineer or even former process engineer. Everything which is related to operation, to have real-time information based on more macro data. The aim is not to go in deep detail all the time, but to provide a global overview of what's going on in the plant and what is the health of the plant. [...] We are in a full open source stack. So everything we develop, you do not have to buy a license from Microsoft or Google. In term of sovereignty of data, everything can be just installed in the plant or be hosted somewhere, but nothing is compulsory. It's really a choice. [...]

David : This data must be manually written to the system, or it can be taken from the operating system ?

Christophe : [...] The design of the plant is typically something you do yourself, because from one plant to another it's completely different. You can export a basic Excel, fill it, re-import it. Or different documents can be analyzed by an AI assistant that creates the line for you. [...]

David : As mentioned at the beginning, we don't have the process engineer just now. And it is directly work for the process engineer. So I'm thinking how to connect it to our existing system, so that some of the data will load from the current system automatically. Something should be written manually, but it is a lot of data. It will help if some of the data loads automatically here. For example, when we have one part of the plant in operation, it means that this and this equipment is in operation, and it should be filled automatically.

Christophe : Fully automatically, probably not really. But this is really our job together. Either you have someone locally who can say, "to retrieve this data you go there, there, there, you take this information in the PLC," and then we make the connection. The second approach is that we can also help by analyzing the software you are having currently. What kind of kiln do you have ? A rotary kiln ?

David : One is single shaft and one PFR. And we are interested to have it also for the other technology like hydration or mill — limestone mill. Not only for the kilns.

Christophe : Yes, clearly. When you see all the energy a limestone mill is consuming, there are things to be done. We are active really from the electrical part, including PLC. So we can help going inside the PLC, looking at your interface to start and stop your mill production. Following the chain of command, at one moment your mill probably has a status that says "mill is operating," and a set point "the mill operates at thirty ton an hour." We can go inside your PLC, making sure that the data are correctly set up in a table that can be retrieved by the platform. [...]

Christophe : KPI is a place where we develop customized functions needed for the operation. For instance, on the PFR kiln at Kermas, we developed a function that, during ten seconds before the reversal of the shaft and ten seconds after, was cleaning the data

— channel pressure and temperature — just to analyze the reversal time, the behavior of temperature and pressure inside the channel. We can also develop an average of the fuel consumption per cycle, all these mathematical functions, in Python. Customized for each customer. [...]

Christophe : Translation is fully included. We can switch to Slovak, Czech, even Japanese. Translation is done once and written in a database, so if you want to adapt a word to fit what is usually used in your plant, you replace it. We have all the unit conversion. If you collect data in Celsius and discuss with someone in the US in Fahrenheit, everyone sees in the unit he wants. [...]

Christophe : The reason tree for availability : you start from scratch and define breakdown, personal issue, electrical, mechanical, hydraulic. You can go as deep as you want ; three or four levels is already quite interesting. Lower than that starts to be difficult to make a real efficient analysis. [...]

Christophe : The cockpit is like your mobile phone : every user creates his own dashboard with widgets. If you connect, you create yours. Someone else who connects gets his own cockpit. [...]

David : Christophe, if I may interrupt. You can have the same data the operator needs to follow, but it's an MES system. It is supposed to manage the production, not the technological process itself. The system can collect raw data from the PLC — temperature, level measurements — and display it as Grafana. But I heard a remark that maybe KPIs are not for you guys, and I stopped here. Here we are something really under control because we have some KPIs which are really not properly defined, at least for modernised technology, because some of them are really old. And people here, workers, managers or shift leaders, are not evaluated based on actual KPIs. In this case we are a very not-well-controlled plant. This was something in our mind last year — the previous technical or production director had it in mind, and I pushed him to finish the process regarding KPIs, because really we are producing something and we don't know our efficiency. We know some production cost, but we are not following actual production data. And he died, you

know the story. So we are restarting the process, and this could be some tool to help us with this topic.

Vastag : Absolutely. What you see in front of you is a dashboard. You can create it based on raw data from the PLC, but then you are just rebuilding an HMI screen, and this is not the purpose of this system. You combine your KPIs, and when there is a problem in your production, from those KPIs you can drill down and do the analysis, linking the KPI data on the same time axis with your raw data. So this is much more powerful than just recreating an HMI screen. Second, where this is heading is having the AI support in the background. The AI can help you to create your KPI, do the analysis of the raw data, guide you through the troubleshooting, and also propose you a KPI. If you know how to talk to and teach the model, it can become a very powerful tool for a process engineer.

Christophe : [...] When it's red, there is no justification, nobody knows what happens. You click on it, the reason tree appears, you put a comment, and it turns green. Then the data starts to be meaningful because you can analyze based on the justifications. You have top downtime reason — if you stop all the time because of a discharge table hydraulic issue, you know where to focus the maintenance. You can also split a breakdown : one hour real breakdown plus half an hour preventive maintenance done during the same stop. [...] You have MTBF, MTTR, availability, performance, quality, the waterfall from twenty-four hours down to fully productive in green. [...]

Christophe : [Démonstration de l'assistant IA, configuration d'une nouvelle ligne « Cemix Štramberk PFR kiln » par prompt en langage naturel.] [...] Instead of you sending the mail to Laci to say "I just bought something, please configure it, it's the same as the other one," you write the prompt and the AI makes the configuration for you. [...]

Vastag : If you have a new machine similar to an existing one — one kiln, two kilns, very similar mills — it's very easy to deploy with functionalities already defined. The data mapping, finding the proper data tags and linking them to the proper inputs on the MES side, still needs to be done. But it saves a significant amount of time and money

deploying the system over your factory.

Christophe : [...] We created an agent for OEE analysis. If you say "look at my PFR kiln OEE analysis in autumn versus spring, can you analyze the differences," you could see differences due to winter humidity. Sensor data, anomaly detection : if your kiln runs at nine hundred sixty degrees and then falls at five hundred for a few minutes, it can say "that's not normal behavior because blah blah blah," and you can remove the data. Machine learning and prediction — based on data, "if you want your kiln running perfectly, this is what would be interesting to do." [...]

Christophe : It's really scalable. You can start with one simple machine for your people to start being used to drive equipment using KPIs. Then you want to configure another one, you just buy a license for a second equipment. User is unlimited, number of tags unlimited. Everything is based on equipment.

David : [About security and data sharing.]

Christophe : The entire platform is secured using Keycloak — open source, designed to have everything secured. Even if you ask the chatbot to create a new line but you don't have admin access, it won't do it. Everything is secured by Keycloak. After that, for sure, it needs hardware security in the plant, but in term of software, this is managed.

Vastag : Very shortly, if your IT guys are going to ask, you could just tell them that this system is fully compatible with the actual cybersecurity stack, whatever you might have.

David : This is for the discussion with our IT department, because we have some internal rules. It must be checked by them. [...] Regarding cost, what is your estimation for one PFR kiln to set up into this system ?

Christophe : I will ask Peter Mees, the guy who did the entire Kermas project on that platform, for his estimation. You wanted also hydration and mill, right ?

David : Somehow, if we decide to start, we need to choose if it will be mill, hydration, or directly the kiln.

Christophe : Okay, as a pilot. I will ask Peter for hydration, mill, and PFR kiln

estimation. And I'll give you also an estimation of the license cost. The license cost will not be a big money. Really.

Vastag : Just one remark, David. As far as OEE goes — at least the downtime — you are quite okay. No problem. If you are targeting also KPI, what I wasn't analyzing because of lack of time when I was visiting your plant is the data readiness of your production units. That needs to be done, and that might require also on your side some investment to create additional data sources if they are not there yet. Beside the cost you are going to get from us, there might be need also some installation on site.

Christophe : The PFR kiln, if you intend to start it — apparently in the coming months.

David : That's true. We have to.

Christophe : Is it a Qualical or a Cimprogetti ?

David : Qualical.

Christophe : The best idea, even if not the easiest, would be to start with the PFR kiln. Before the guys of Qualical come for startup, we make sure that all the needed data are ready, and when they are there, they can prepare for you on site all the data that will be needed later with OpSee. In term of cost, that will be really cost-efficient. [...]

David : End of summer, beginning of autumn. For sure this year. And regarding the hydration, we are at the moment starting the project for new hydration — with Cimprogetti. [...]

Christophe : [...] Next step, I'll make the cost estimation. You'll get that in the coming two weeks. I'll discuss with Peter. If it makes sense for you, we move forward, go a bit more in detail on license cost, and have a face-to-face site discussion to make sure the scope is clear.

David : Fine to me.

Christophe : Any technical or practical question regarding the platform in term of usage ? Anything you didn't see that could be of interest ?

David : As I see, it's a fully web application. Not necessary to install, hardware

request minimum, you need just the web connection from the area where you want to use it.

Christophe : Everything is installed on a server or component hosting the application, Linux or Docker container. Docker is generally better, lighter. To install and configure it, a few hours, not more, once the hardware is ready.

David : And what about the mobile application, how can you use it from the phone ? The visualization for phone needs to be adapted, right ?

Christophe : First time someone puts the question. I will make the test and let you know. You mean from a dashboard point of view, for you to see ?

David : Yes. I'm tired over the weekend, just have a look at what's going on in the plant. In some cases, if you open a webpage from your phone, it's a disaster to use.

Christophe : I'll check it, connect with my mobile phone to see how it looks. Very good point. The other customers only work when they are in the plant. [...]

Christophe : David, thank you very much, Michal as well. If there is interest, next time it will be much better to come in person and discuss more in detail, probably together with Peter and Ladislav in the room. [...]

A.2.1.9 Interview 9 (GreenBuddies – Tomasek Jaroslav)

Échange tripartite entre Christophe Camerlynck (AgiNtech), Rado et Jaroslav Tomasek (GreenBuddies, PME slovaque, client en phase de finalisation du contrat d'early adopter pour OpSee). La conversation, tenue à quelques jours de Pâques, porte sur la clarification du périmètre contractuel : où installer OpSee selon que le projet d'automatisation est confié à AgiNtech ou à un tiers, articulation entre OpSee et l'OPEDGE, calendrier de signature et engagement formel du client. Elle illustre la dynamique commerciale d'un déploiement OpSee en contexte PME et la nécessité de clarifier la frontière OPEDGE/OpSee pour des interlocuteurs non spécialistes.

Rado : We are saving CO_2 footprint. So...

Christophe : Yes. That's a good idea, by the way.

Rado : Last week we really had an issue with the diesel.

Christophe : And the cost as well ?

Rado : Yeah, the cost as well, but mainly availability was an issue. Because without that we are really not able to produce.

Christophe : [...] So what can I do for you ?

Jaroslav : Would you like to explain the OpSee, the server, and the mail which you sent ?

Rado : Not the functionality. This we remember. We are okay with that. Let's say business side of that.

Christophe : Okay. So it's mainly related to where to install it, I guess.

Rado : Yes.

Christophe : So the thing is the following. If we have one line, like tertiary line, with a small amount of data, with the OPEDGE, we can do already quite a lot. So if we go together with the project of the automation of the line, in our proposal that we are going to review in the coming two weeks, we already plan to have an OPEDGE. So in this case, for you there is absolutely nothing to do. If you go with someone else for the automation part, and this guy does not plan to provide an OPEDGE, then we will have to build something on which we can install the software. It could be a simple computer. It does not need a lot of resources. It just needs to be, for instance, a computer running Linux. But that's something to be known. And as this early adopter contract is only related to OpSee, this is why I wrote, « Okay, which way do we go if you do not have an OPEDGE available for it ? »

Jaroslav : If I understood correctly, if it is different, there will have to be some computer there.

Rado : Yes, yes.

Christophe : Rado, if in your automation project — just in case you don't do it with us, you do it with someone else — you say, « Guys, you need to have an OPEDGE installed there, because we need it for the remote access and for OpSee. » They can put

it there and we configure it. It's not a big deal.

Rado : Okay. So now the question, because anyhow, regarding automation, we have to wait for your quotation, updated quotation, which, okay, two weeks, three weeks, something like that.

Christophe : Yeah.

Rado : We would like to finalize this point by end of April latest.

Christophe : Yes.

Rado : But for this OpSee, you have to have signed contract earlier. With AgiNtech.

Christophe : Yes. For the contract in OpSee, we can just mention in the scope, at the end, to say — we can write something like, « Alas will make sure that an OPEDGE AD will be available for the installation, either installed by AgiNtech, either installed by a third-party supplier, » and that's it.

Rado : Yeah. Okay.

Christophe : We just need to have it. This is the only point. We do it like that ?

Rado : Then I am okay with that. Yes. Just put some sentence there, and then it's clear. Because I didn't really understand what the meaning in fact behind that was.

Christophe : Yeah. It's not so easy to capture like that at first view, especially when it's not really your field. It's something which is specific even for people that are a bit more accustomed with all that IT stuff. [...]

Christophe : So I do it that way, Rado, and I send you back a PDF file, last version with my signature, and I will just need yours in this case.

Rado : Yes. Okay. So when you send it, you will have it back signed in one day. Maximum, so no problem.

Christophe : Okay, good.

[...]

Christophe : So enjoy Easter, and I will make the contract immediately because my next meeting is in fifteen minutes, so I'll do it right away so you get it back right now.

Rado : Okay. Thank you, Christophe.

Christophe : Thank you both of you. Bye bye.

A.2.1.10 Interview 10 (Vinventions – Pirard)

Entretien avec Axel Pirard, directeur du site Vinventions de Thimister-Clermont (Belgique, environ deux cents personnes, fabrication de bouchons synthétiques pour le vin à base de polymères de canne à sucre, quinze pour cent du marché mondial des vins tranquilles en bouteille), accompagné de Raphaël Gazon, responsable excellence opérationnelle. L'échange, mené en français avec Christophe Camerlynck (cofondateur d'AgiNtech), porte sur les besoins MES de Vinventions : relier la production à la GMAO Ultimo et à l'ERP NetSuite après l'abandon d'un MES clé en main (Redzone) jugé trop coûteux. L'entretien se conclut par un signal d'achat explicite (« votre module bouche parfaitement le trou ») et la planification d'une seconde rencontre avec le spécialiste IT pour cadrer les API GMAO.

Christophe : [...] Si vous pouviez juste me contextualiser un petit peu plus et vous présenter également.

Pirard : Je m'appelle Axel Pirard, je suis le directeur du site de Thimister-Clermont pour Vinventions. C'est un site qui a à peu près deux cents personnes ici à Thimister, avec pour but de fabriquer des bouchons synthétiques pour le vin, des bouchons qui sont fabriqués à base de polymère de canne à sucre. Et donc on inonde le marché mondial avec nos produits, environ quinze pour cent du marché mondial du vin qui va en bouteille, du vin tranquille qui va en bouteille. [...] On a un site de production ici avec environ deux cents personnes, cent cinquante ouvriers, semi-automatisés. C'est une partie très automatisée avec des contrôles en ligne pour à peu près tout. C'est l'extrusion de polymères. Et puis le reste, c'est des machines qui sont plutôt individuelles, d'impression offset, de personnalisation des bouchons et d'emballage. On a une GMAO qui est assez récente, qui fonctionne bien [...]

Christophe : Ultimo.

Pirard : Ultimo, voilà. [...] Et on a à côté de ça un module qu'on appelle un module qualité qui, lui, va reprendre toutes les fiches qualité au niveau de la production. Donc à

quel moment on fait les tests, quels sont les résultats enregistrés, etc. Tout ce qui remplace les checklists papier. [...] Ça a été développé par Technord, notamment, en open source. Donc on a tous les droits là-dessus. [...] Ce qu'on cherche aujourd'hui, c'est de faire le lien entre la production, où il y a des automates, il y a une supervision, en tout cas sur une partie de l'usine, dans Wonderware, mais qu'on ne souhaite pas continuer à utiliser. On ne veut pas investir dans Wonderware parce qu'on ne sait pas à quel prix on aura nos licences Wonderware dans quelques années. Donc on préfère ne pas aller vers cette voie et développer une application qui serait plutôt open source avec pour objectif de faire le lien entre ce qui se passe en production, donc mesurer les quantités produites, le rendement global des machines. Et de faire le tag de panne pour la GMAO, c'est-à-dire qu'on a un tag d'arrêt et l'opérateur doit l'identifier. Et ça, ça va dans la base de données de la GMAO si c'est une panne ou de notre base de données tout court. [...] C'est assez bien visualisé pour l'extrusion au niveau supervision, mais c'est pas très bien visualisé pour les autres machines. Il y a encore une cinquantaine de machines qui sont concernées. [...] On aimerait avoir ce rendement des machines en visuel, avec ce lien avec la GMAO.

Christophe : Vous avez un ERP aujourd'hui vers lequel vous montez des infos également ?

Pirard : On a un ERP qui n'est pas spécialement en lien aujourd'hui avec les machines. [...] Les machines ne remontent aucune information vers l'ERP. C'est l'opérateur qui scanne à production complète au moment où il scanne l'étiquette de sa caisse terminée.

Christophe : Et c'est quoi l'ERP ?

Raphaël : NetSuite.

Pirard : Oracle NetSuite. [...] Quand on doit communiquer avec l'ERP, on le fait déjà pour la GMAO, pour les pièces de rechange, par exemple. On crée une API qui communique avec l'ERP dans les deux sens. Ça fonctionne, on l'a déjà fait plusieurs fois.

Raphaël : Donc moi, c'est Raphaël Gazon. Je suis responsable excellence opérationnelle ici. Pour rebondir un peu sur ce que disait Axel, on a développé avec Technord un système de fiche technique qui est normalement la première marche de notre MES. Donc

c'était vraiment là qu'on voulait aller de base, c'était de se dire, on développe un système où on est les seuls maîtres à bord, où on ne paye pas de licence, on ne doit pas dépendre de quelqu'un pour gérer nos pannes, nos productivités, etc. Donc on a une offre en ce sens venant de Technord. Donc on sait ce que ça va nous coûter chez Technord si on développe notre application en interne, mais on ne sait pas ce que ça peut coûter ailleurs. Donc plutôt que de se lancer tête baissée avec Technord, on préférait avoir un peu l'avis externe d'autres personnes qui développent ce genre d'application pour savoir si on ne peut pas avoir mieux ailleurs ou équivalent et moins cher aussi, évidemment.

Christophe : [...] On a vu que systématiquement, les projets ne se faisaient pas parce que les coûts de licence récurrents étaient beaucoup trop importants. [...] Tous les trois ans, il y a l'éditeur qui revenait en disant « super, on a changé notre business model. Ça va vous coûter moins cher. » Finalement, tu récupères la facture, ça coûte dix pour cent plus cher. [...] Chez Carmeuse, on avait présélectionné Plant APS de GE (General Electric, devenu GE Vernova) pour faire un POC. On n'a pas voulu utiliser d'intégrateur pour éviter le problème classique « c'est l'intégrateur » contre « c'est l'éditeur ». Donc on a fait l'intégration directement par l'éditeur. Ils se sont complètement plantés durant le POC. Ils n'ont jamais réussi à mettre en fonction ce dont on avait besoin, le logiciel était tellement fermé et complexe que ça n'a jamais fonctionné. Et donc on a fini par développer un MES sur mesure avec un intégrateur, qui tourne encore aujourd'hui mais sans suivi de développement.

Pirard : Nous, on avait acheté un MES clé en main qui s'appelle Redzone, qui fonctionnait plutôt bien, mais on a eu le problème que la base de données ne nous appartenait pas, donc c'était dans leur cloud à eux. Et le deuxième problème, c'est que tous les ans, ils nous passaient six pour cent d'augmentation sur les licences d'utilisation.

Raphaël : Et de plus, on ne pouvait même pas le faire communiquer avec nos outils internes non plus.

Pirard : Donc on a tout changé et on est reparti de zéro.

Raphaël : C'est de là qu'on a eu notre expérience MES pour savoir ce qu'on voulait

maintenant et ce qu'on ne voulait plus.

Pirard : Pour créer une base de données, il faut d'abord la constituer de manière qualitative et donc c'est un peu ça que qui nous manque aujourd'hui, c'est un modèle OEE qui va constituer cette base de données pour nous.

Christophe : [...] [Présentation détaillée de la stack OpSee : PostgreSQL/TimescaleDB, Python, React, Keycloak, conteneurs Docker, modèle business à 59-95 € par mois et par équipement, hébergement souverain européen.] [...]

Christophe : Si on regarde la partie OEE en tant que telle [...] on est complètement aligné avec l'ISA-95. [...] Je ne sais pas quels sont les ordres de grandeur dans votre métier. C'est combien de bouchons à l'heure, par exemple ?

Pirard : On va parler de sept mille bouchons à l'heure par exemple.

Christophe : [...] [Explication du calcul OEE avec écrasement du nominal par type de produit, arbre des causes configurable, auto-justification via codes défaut automate.] [...] Donc on a maintenant la possibilité de faire des statistiques sur toute cette partie raison qui a été qualifiée. Donc on peut ressortir le MTBF, le MTTR, etc. Et remonter l'info typiquement à une GMAO.

Pirard : La GMAO, de quoi elle a besoin ? Elle a besoin par exemple d'un nombre de pièces. Si on arrive à trois millions de pièces, paye un entretien à prévoir.

Christophe : Ok. Le compteur de pièces, on l'a dans l'OEE de toute façon.

Pirard : Ok. Et donc les données que vous utilisez ici, vous allez les chercher dans l'automate ?

Christophe : L'automate ou ça peut être une saisie manuelle de l'opérateur. Sinon, oui, on peut aller les chercher directement dans l'automate. [...] La difficulté qu'on a en général, c'est qu'est-ce qu'une machine à l'arrêt ou qu'est-ce qu'une machine en marche. Demandez à un client de définir ce que c'est qu'une machine qui fonctionne, j'avais plus de définitions que de gars autour de la table. [...]

Pirard : Je dirais que ça remplit le trou aujourd'hui que nous avons dans nos systèmes.

Pirard : Et le support, c'est PC, c'est tablette, c'est quoi ?

Christophe : Il faut un navigateur Web. [...] Il n'y a rien à installer. [...] Pour la partie téléphone, on a décidé de ne pas faire la partie admin via le téléphone. [...] Par contre, la partie opérateur sur un iPad, normalement, ça devrait le faire sans problème. [...] L'installation derrière, on travaille qu'avec du container Docker. [...]

Pirard : Qu'est-ce qu'il vous faudrait pour pouvoir nous faire une offre ?

Christophe : Aller peut-être un peu plus dans le détail de ce que vous voulez remonter dans votre GMAO de manière un peu plus spécifique pour voir ce qu'il y a comme adaptation éventuellement à faire. Est-ce qu'il y a une API qu'il faut développer. [...] L'idée, ce serait d'utiliser uniquement le module OEE tel qu'il est là, mais de pouvoir remonter les justifications. Tout ce qui est MTBF, MTTR, vous voulez le calculer dans votre GMAO ou pas ?

Pirard : Oui, c'est ça. On peut le calculer par ailleurs, ce n'est pas un problème d'en avoir deux en regardant lequel est le plus pertinent. Ce qui est important, c'est en fait votre module bouche parfaitement le trou. Il faudrait juste qu'on s'attaque à qu'est-ce qui doit être transmis comme information à la GMAO. C'est la machine a été à l'arrêt autant de temps et elle a sorti autant de pièces sur tel laps de temps. Donc ce n'est pas hyper compliqué. Et éventuellement une justification.

Pirard : Est-ce que vous avez une vue globale par exemple de l'arborescence ? [...] Vous avez un OEE par machine, et donc avec ça vous savez faire un OEE par zone et un OEE par usine ?

Christophe : [...] L'OEE, c'est une fonction. Il nous faut une information d'arrêt, une information de production et une information de qualité. Donc si vous le faites sur une machine, pour la machine, on aura besoin de ces infos-là. Pour la ligne, on aura besoin de ces infos-là. Mais il faut voir comment vous qualifiez une ligne qui fonctionne. [...]

Pirard : Nous, on a comme cas ici, vous avez douze machines qui font la même chose à la même vitesse. [...] Ce qui nous intéresse, c'est globalement aujourd'hui sur les vingt-quatre heures ou sur les huit heures qui viennent de passer, si les douze machines ont eu un rendement de quatre-vingt pour cent. [...]

Raphaël : En parlant de l'expérience qu'on a eue via Redzone, on avait un OEE global. Si l'OEE était bon, on n'allait pas chercher plus loin. Mais si par exemple, l'OEE global était à quatre-vingt au lieu d'être à nonante, on cliquait dessus, on voyait les machines splittées et sur chaque machine, on voyait l'OEE individuel. Et on pouvait se dire OK, sur cette machine-là, c'est là qu'on a un problème.

Christophe : Si vous me dites comment vous calculez les quatre-vingt pour cent pour l'atelier, on va pouvoir le faire. J'ai aucun doute là-dessus.

Pirard : Parfait.

Christophe : [...] Si vos quatre-vingt pour cent ne collent pas à une définition de l'OEE, on développe là et on pourra l'utiliser dans le modèle comme vous souhaitez.

Pirard : On a déjà un modèle assez facile puisqu'on a des machines identiques avec des vitesses nominales identiques, parfois pas, parfois spécifiques par produit, mais ça, c'est pas grave parce que vous avez cette possibilité de l'ajuster par produit. Mais ce qui nous importe, c'est d'avoir effectivement cette arborescence de rendement. Ça veut dire que l'extrusion, par exemple, il y a cinq lignes de production identiques, il y en a quatre qui sont planifiées et les quatre tournent avec un OEE moyen de septante pour cent. Et si septante pour cent paraît en dessous du rendement attendu, alors là, on va plus loin et on regarde ligne par ligne quelle est la ligne qui pose problème.

Christophe : Ok, donc c'est une simple moyenne.

Pirard : C'est simplement une moyenne pour donner une indication et une arborescence à l'OEE. [...] C'est ça qu'on veut mettre en place.

Pirard : Dites-moi comment on fait. Est-ce qu'on se revoit avec votre équipe ? Est-ce qu'on doit préparer quelque chose pour vous ?

Christophe : Je vous envoie un mail entre mercredi après-midi et vendredi pour les prochaines étapes. J'en discute avec l'équipe. [...]

Pirard : On va pas vous donner l'offre Technord telle quelle. Ça ne se fait pas. Par contre, le cahier des charges qu'on leur a donné [...] et les options qui sont retenues, ça, on peut vous donner. Et aussi, je pense qu'il y a une discussion à avoir sur les éventuelles

API qu'on aurait avec la GMAO. Peut-être l'ERP, mais je ne suis pas sûr que ce soit nécessaire. [...] On aura notre spécialiste IT aussi la prochaine fois.

Christophe : [...] Si jamais vous avez des questions techniques, si vous pouvez me les rédiger en anglais, ce serait l'idéal. Parce que le gars qui pilote tout ça est plutôt néerlandophone. [...]

Pirard : Pas de souci. [...] Merci beaucoup. Belle journée.

A.2.1.11 Interview 11 (Sonaca – Joël Crappe, GPO Qualité)

Entretien mené par Nathan Moreau (cofondateur d'OpSee) avec Joël Crappe, Global Process Owner *qualité chez Sonaca (groupe belge de fabrication aéronautique, assemblage F-35, quatre à cinq sites en Belgique, présence aux États-Unis et au Brésil). Joël est responsable des processus qualité (gestion des défauts, plans clients) et porte les applications IT qui les supportent. Il est chef de projet qualité sur le programme F-35 et membre de l'équipe projet MES. L'échange porte sur la stack MES actuelle (Apriso de Dassault Systèmes, Mendix en interne, historian DigiPox), les modèles de licence, les contraintes de souveraineté des données militaires, et les retours d'expérience sur la digitalisation de l'atelier.*

Nathan : Exactement ton rôle pour l'instant. Donc pas forcément par rapport au MES mais qu'est-ce que tu gères ?

Joël : Je suis ce qu'on appelle un GPO, *Global Process Owner* pour la qualité. Je suis responsable du fonctionnement des processus qualité, entre autres la gestion des défauts sur les produits et la gestion des plans clients. Je suis également membre de l'équipe projet MES en tant que responsable qualité, et chef de projet qualité sur le F-35 – on assemble un produit F-35. Je suis aussi responsable des applications IT qui supportent les processus qualité.

Nathan : Tu es donc étroitement lié aux outils logiciels qui t'aident pour la qualité.

Joël : Oui, tout à fait, mais essentiellement pas le pur industriel. Je ne m'occupe pas des programmes d'usinage sur les machines à commande numérique, ni des réseaux

industriels. On a une application historian, DigiPox, qui récolte vraiment l'ensemble des paramètres du processus – toutes les données des machines à commande numérique. Ça, c'est plus géré au niveau *manufacturing*. Après, l'exploitation, c'est moi qui peux y intervenir : si au niveau qualité on veut s'assurer qu'un processus s'est bien passé, on sort dans un *datalake* l'ensemble des températures du four pendant le processus, par exemple. Il ne faut pas que tu sois en dessous d'un certain seuil.

Nathan : Un système de récolte de données pour tout votre système de production, donc. C'est qui qui vous vend cette solution ? Combien de machines vous avez ?

Joël : C'est une solution qu'on paye, et ce n'est pas évident parce que je pense qu'il y a même certaines machines qui de base ne sont pas compatibles avec DigiPox – c'est parfois compliqué de pouvoir extraire les données. Pour les machines, on en a quand même pas mal, ça dépend des usines. Si je prends le site belge, on a quatre ou cinq usines. L'usine des pièces machinées a une vingtaine de machines à commande numérique. L'usine des petites pièces primaires a un système de trempe, du traitement de surface, de la peinture – des cabines avec des paramètres à contrôler (humidité, température, durées). En assemblage, on a aussi des commandes numériques de perçage. Le composite a des fours, trois ou quatre autoclaves, trois ou quatre machines de perçage. L'usine GPE (grandes pièces élémentaires) a quelques machines à commande numérique pour le perçage et le détourage. [...] Et après, tu as les États-Unis aussi – ils en ont un bon paquet – plus le Brésil.

Nathan : Vous payez la licence MES par utilisateur, ou par rapport au nombre de machines avec leurs fonctionnalités intégrées ?

Joël : Il y a plusieurs éléments de réponse. Le MES qu'on utilise n'est pas directement raccordé à la machine – il irait puiser les données directement dans le *datalake*. Chaque utilisateur a sa licence *user* du MES et profitera des données connues du MES. Il n'y aura pas de licences spécifiques pour le MES pour aller chercher les données. C'est vraiment par utilisateur, et après ça dépend du schéma que tu as avec ton fournisseur de solution. Ici, c'est Apriso de chez Dassault, et je pense que ce sont des licences individuelles. Donc

si tu as un gars qui a un accès, c'est payé pour lui.

Nathan : Donc DigiPox et le MES Apriso, c'est bien deux solutions différentes pour lesquelles vous payez deux licences différentes ?

Joël : Oui. On a Apriso de Dassault comme MES, mais on est aussi en train de développer en interne sur base d'une solution proposée par Siemens qui s'appelle Mendix – du *low-code*. On développe énormément d'applications avec Mendix. Pour l'instant, à partir du moment où tu as une licence Mendix, tu as accès à tout ce qui a été développé en Mendix. Si on développe dix applications, je peux y accéder avec une licence unique.

Nathan : Et tout ce qui est sécurisation des données, j'imagine que c'est important dans votre secteur. Cloud ou local ?

Joël : C'est un point très important. Il y a deux aspects. D'une part, ici on travaille sur du militaire, donc ce sont des données régulées, vraiment très strictes en termes d'accessibilité, données défense. Ce sont des plateformes sécurisées, des environnements virtuels où tu dois d'abord être validé en tant qu'utilisateur, avoir reçu des formations de comportement sur ce que tu peux faire avec les données. Ces données-là sont *on-premise*, elles ne sont pas dans le cloud. Il y a deux niveaux de cloud : un cloud public, et un cloud où tu achètes des licences spécifiques Microsoft beaucoup plus chères, qui te certifient que ce sont uniquement des gens américains qui sont derrière. Le cloud public est moins cher, mais ta donnée peut se retrouver en Inde, gérée par des gars en Afrique – tu ne sais pas où elles sont. Ce n'est pas acceptable pour les contrats militaires, et comme les licences Microsoft souveraines sont super chères, nous on est en interne et on n'a pas cette problématique. Mais on a la contrainte de ne pas être autorisé de mettre des données défense en cloud. Et comme SAP tourne en partie dans le cloud, ça veut dire qu'on ne peut pas y avoir de données régulées. [...]

Joël : Pour les autres données, il y a moins de contraintes. On a des accès limités, des rôles, et pour rentrer sur notre environnement on a du MFA, *multi-factor access*. C'est très contraignant – on n'arrête pas de rentrer des codes avec les smartphones – mais voilà. Notamment sur la base de ce qu'on a eu comme problématique dans le passé : ils ont

crypté toute leur donnée, on n'a plus pu produire pendant deux mois je crois. Ils ont tout perdu, ont dû ressortir les papiers. Donc il faut aussi bien empêcher les accès externes de rentrer dans tes environnements IT.

Nathan : Avec les solutions dont tu nous as parlé, est-ce que tu as des problèmes, des moments où tu te dis que ça pourrait être mieux ?

Joël : Avec Apriso, on fait beaucoup de choses. On est relié à notre PLM, Teamcenter – la définition complète du produit, les fiches techniques, les modèles 3D, les specs matière, les specs process, tout est dedans. Le MES échange avec Teamcenter : si une nouvelle fiche technique est mise à jour dans Teamcenter, elle est envoyée automatiquement dans le MES et raccrochée directement à la bonne gamme de travail. Ça, c'est une grosse fonctionnalité qu'on a mise en place. Le MES parle aussi à SAP, notre ERP, pour les plannings de prod et les stocks. Apriso fait beaucoup. Mendix, ce qu'on a développé, on l'a déployé pour l'instant uniquement aux États-Unis parce qu'on a changé là-bas. C'est juste, sans trop caricaturer, valider les opérations : le gars à l'écran voit l'opération qu'il doit faire, il dit « je commence », il consulte ses fiches, et quand il a fini, c'est « j'ai fini mon opération ». La confirmation repart vers SAP. [...] Il gère aussi les contrôles des caractéristiques : l'opérateur va mesurer dix cotes sur sa pièce, et s'il y a des cotes hors tolérance, le MES génère automatiquement des défauts. Tant que tu as un défaut ouvert, tu ne peux pas valider ton opération – tu dois d'abord gérer ton défaut. Tout ça, c'est des choses qui ont l'air simples mais on arrive très vite dans des cas où on s'arrache les cheveux.

Joël : Le patron nous dit : « moi je veux une solution qui ne coûte rien, vous prenez du C, du Python, ce que vous voulez, vous faites un code qui fait votre MES et moi je ne paye aucune licence de façon récurrente. » On a une meilleure approche de coût avec Mendix qu'avec Apriso, et donc on pousse pour aller vers Mendix.

Nathan : C'est aussi ce qu'on a remarqué dans notre business model : la plupart des solutions MES actuellement ont une licence beaucoup trop coûteuse pour la plupart des gens, surtout pour les PME. Nos premiers clients sont des PME qui ont quelques outils de production. Ce qu'on a fait comme business model, c'est qu'on fait payer une

licence par équipement. Une machine paiera sa licence, et ça s'adapte aussi en fonction des fonctionnalités. Si on veut uniquement avoir l'indicateur TRS sur la machine, on a un pack basique. Si on veut une solution plus complète, on a un deuxième pack. Et on a aussi un pack *open source* où on ne fait que l'ingestion de données. Peu importe le nombre d'utilisateurs ou la taille de l'usine, c'est l'équipement qui pilote la licence. On combine l'ingestion et le MES ensemble : on part directement du PLC, des automates et des capteurs, on récupère toute la donnée, on a notre datalake avec une base TimescaleDB qui inclut directement le MES.

Joël : Ok. C'est intéressant.

Nathan : Ce qui est intéressant aussi, c'est de pouvoir tourner des statistiques sur ces données. On fait du SPC, du *statistical process control*, pour voir si ton processus est sous contrôle statistique. On regarde si ça suit une gaussienne, on calcule les *Cp* et *Cpk*. Un autre point où nous on en est aux débuts, c'est l'IA. Sur les derniers mois, on a intégré un chatbot qui communique directement avec les routes API du software sous forme d'outils, pour faire tout ce que pourrait faire l'utilisateur via langage naturel. Tu peux lui demander d'aller configurer un équipement, rechercher la moyenne de température sur un certain équipement, identifier les anomalies, et directement il répond.

Joël : De la consultation à la carte.

Nathan : Tu peux aussi l'utiliser dans la configuration. Imaginons que tu donnes un planning de production sous forme Excel : lui va pouvoir traiter la donnée pour l'intégrer correctement dans l'API, sans que tu aies à le faire à la main. Il y a aussi les aspects maintenance préventive – détecter des problèmes avant qu'ils ne bousillent tes pièces. On a parlé avec un autre business qui fait plus de machine learning : tu appliques des modèles sur tes données et tu les fais tourner tout le temps pour faire de la prévention.

Nathan : Si tu devais dire deux ou trois fonctionnalités maximum les plus importantes pour votre secteur, ce serait quoi ?

Joël : La priorité, c'était d'enlever les papiers de l'atelier, digitaliser. C'est un peu bête parce que ce n'est pas très technologique, mais c'était vraiment le but initial, et

franchement pas évident. Avec le papier, tu as tellement de flexibilité que quand tu le digitalises, tu ne sais plus corriger. Tu as des gammes de production où tu dis « ah non, ça ce n'est pas comme ça, on va faire appel à autre chose », tu corriges, tu mets ton cachet, c'est bon. Retrouver ce niveau de flexibilité dans le digital n'est pas évident parce que logiquement tu dois avoir des autorisations. [...] Le gars qui travaille doit avoir sa liste de tous les ordres de fabrication qu'il doit adresser sur sa journée, en tout cas avec leur priorité – c'est important, la priorité, de travailler d'abord sur les choses urgentes et importantes attendues aux étapes suivantes. Donner vraiment la fonctionnalité digitalisée et les infos nécessaires au gars pour faire son boulot. Avant, il avait son classeur avec ses fiches de référence à l'écran, il allait voir dans son classeur. On a essayé de dégager les classeurs et de lui donner accès aux fiches à travers son écran. Chaque fois, on rajoute de la complexité pour qu'il ait un maximum d'infos à travers son interface.

Joël : Et là, je parle uniquement de l'opérationnel dans l'atelier. Après, tu as tous les métiers support qui veulent accéder aux infos depuis leur bureau, surveiller comment ça se passe à distance. Il y a deux points de vue : l'atelier qui doit bosser avec toutes les infos le plus facilement possible à disposition, et les bureaux où tu as des niveaux hiérarchiques. Les plus gros patrons veulent voir les gros KPI macro, et au plus tu descends dans la hiérarchie, au plus ils doivent aller dans les aspects détaillés de ce qui se passe en atelier.

Joël : Rétroactivement, je pense qu'on a probablement voulu mettre trop vite beaucoup de complexité dans les systèmes. Il vaut mieux commencer simple et rajouter au fur et à mesure que d'avoir d'emblée le couteau suisse qui fait tout. Au début, le challenge c'est déjà de faire adopter ta solution par les gens qui ont des habitudes de dix, quinze, vingt ans.

Joël : Tout ce qui est appareils de mesure connectés aussi – pieds à coulisse, on mesure une épaisseur, tu pouvais lire la valeur et la taper au clavier, grosse perte de temps. Là ils sont connectés, tu envoies la mesure directement dans le système. On gère aussi la calibration de ces appareils : tous les ans, tous les six mois selon le type, ils doivent retourner au labo pour être étalonnés. Apriso bloque l'équipement qui est hors délai – le

gars ne pourra pas utiliser un pied à coulisse qui a dépassé son délai de calibration.

Nathan : Et s'il n'a que celui-là ?

Joël : Il faut avoir un petit fonds de roulement de pieds à coulisse disponibles pour intervenir, parce que le nerf de la guerre, c'est que ton atelier tourne en permanence. [...]

Joël : Un autre aspect important une fois que tu as mis le MES en place, c'est le *helpdesk* – il faut pouvoir gérer les problèmes. On est en train de mettre en place différents niveaux de support, deux ou trois niveaux. Tu as le niveau atelier où le gars a un problème, il appelle son chef. Puis le niveau au-dessus, s'ils n'ont pas trouvé la solution, ça remonte. Et ça tourne 24/7 : à partir du moment où ta prod tourne 24/7, tu dois avoir un support 24/7. Tu ne peux pas laisser ta prod à l'arrêt.

Nathan : L'entreprise qui vous vend la solution MES vous propose aussi un support sur les problématiques logicielles ?

Joël : À partir du moment où c'est en prod, tu as une équipe dédicacée chez le fournisseur qui s'occupe des problématiques de produits, avec un certain formalisme : un SLA, un timing de réaction attendu. Tu payes ton fournisseur pour avoir un service. Ça dépend du bug que tu rencontres : en prod tu dois débloquer, ensuite si c'est un vrai bug logiciel, ça passe à une équipe développement chez le fournisseur qui doit reproduire le défaut et le corriger. Et nous en parallèle, on continue à avoir des idées d'amélioration, qui ne rentrent pas par l'équipe de prod du fournisseur mais par l'équipe développement. On a des plateformes d'échange, des tickets Jira. On a deux *ticketings* : un pour remonter les problèmes du système en prod, un autre pour encoder les idées d'amélioration. La partie amélioration continue, c'est un projet de développement qui peut s'arrêter. Par contre, le support de la solution en production ne doit pas s'arrêter, et tu payes une maintenance annuelle pour ça – je crois que c'est vingt pour cent des coûts des licences. [...] On a besoin de l'éditeur de la solution de façon continue. Par contre, pour Mendix, vu qu'on développe en interne, c'est nous qui assurons ça.

Nathan : Si vous avez d'autres questions n'hésitez pas, mais on a déjà fait un bon petit tour. Merci à vous d'avoir donné de votre temps.

Joël : Pas de souci, avec plaisir, très intéressant. Et ça va, votre solution tourne ?

Nathan : Pas mal. On va chez un premier client en juin, qui a besoin de *tracking* de température de ses frigos, pour vérifier qu'il n'y a pas d'anomalie. Au fur et à mesure, c'est connecté et accessible depuis les bureaux pour surveiller. On va faire l'intégration au début seulement en interne, de A à Z, de l'ingestion à l'affichage, et la solution se fait en interne. Tous les gens en local se connectent directement au logiciel avec un système de *user* et de sécurité, et en externe si tu ouvres les ports c'est sécurisé, sinon tu peux faire un VPN. L'objectif d'ici fin d'année : pouvoir faire des TRS complets avec justification des pertes performance, issues, qualité – plus ou moins fini avec un *trending* sigma, où tu peux voir à quel point tu es dans ton range. Après ça, avoir un *batch management* complet – ça c'est plus compliqué et c'est encore dans la roadmap.

Joël : Bon courage. Bon mémoire.

A.2.2 Synthèse des concurrents directs et indirects

Cette annexe consolide la cartographie concurrentielle de l'offre MES sur la zone de déploiement initiale d'OpSee (Belgique, France, Allemagne, Pays-Bas), enrichie de quelques acteurs internationaux structurants. Elle s'appuie sur les entretiens conduits pour ce mémoire (annexe A.2.1), la littérature spécialisée mobilisée au chapitre 2, et une recherche web complémentaire (mai 2026). Le tableau A.1 récapitule l'ensemble ; les positionnements concurrents et adjacents sont distingués.

TABLE A.1 – Synthèse comparative des concurrents et plateformes adjacentes du segment MES.

Acteur	**Catégorie**	**Modèle / pricing**	**Vs OpSee**
Siemens Opcenter	Tier 1	Licence sept chiffres, maintenance 20 %/an, lock-in stack Siemens	Indirect

suite à la page suivante

Table A.1 – suite de la page précédente

Acteur	**Catégorie**	**Modèle / pricing**	**Vs OpSee**
SAP Digital Mfg	Tier 1	Licence + intégration 12–18 mois, lié à S/4HANA, cloud Microsoft souverain	Indirect
Dassault Apriso	Tier 1	Licence *per user*, maintenance 20 %, lié à Teamcenter et SAP	Indirect (cognitif)
GE Vernova (Proficy)	Tier 1	Licence, stack en migration Linux/Postgres, qualifiée d'« outdated »	Indirect
AVEVA / Wonderware	Tier 1	Licence opaque, stack vieillissante, en sortie chez Vinventions	Indirect
Rockwell (FactoryTalk)	Tier 1	Licence haut de gamme, peu de prospects européens rencontrés	Indirect
Astrée Software (Aquiweb)	Mid-market	Propriétaire, devis, 290+ sites, offre SaaS Astn'go (essai 30 j)	**Direct**
Teeptrak	Mid-market OEE	200–800 $/machine/an, déploiement 48 h, ROI 8–14 mois	**Direct** (segment OEE)
Productys	Mid-market	Éditeur français propriétaire, pricing non public	Indirect
Proxia Software AG	Mid-market	Allemand, manufacturing discret, propriétaire	Indirect
SmartYou	Mid-market	Acteur belge propriétaire, peu d'info publique	Indirect
Redzone	Mid-market SaaS	Cloud propriétaire, +6 %/an, abandonné par Vinventions	**Direct**

suite à la page suivante

Table A.1 – suite de la page précédente

Acteur	**Catégorie**	**Modèle / pricing**	**Vs OpSee**
Tulip	SaaS IIoT	100–250 €/mois par *interface*, low-code propriétaire	Indirect
Evocon	SaaS OEE	Cloud, quelques dizaines à centaines d'€/équipement/mois	Indirect
Factry (BE)	SaaS OEE/MES léger	Linux + Grafana, produit propriétaire, positionnement intermédiaire	Indirect (proximité géo)
OpenMES	Open source MES	MIT, communautaire, sans offre commerciale	Non (vide commercial)
metasfresh	Open source MES	GPLv2+, monétisé par services uniquement	Non (vide commercial)
Apache Streampipes	Open source IoT	Apache 2.0, ingestion de flux IoT, pas un MES complet	Non (couche amont)
Wonderware / Ignition	SCADA	Supervision propriétaire, parfois associée à un MES léger	Adjacent
Mendix / OutSystems	Low-code	Plateformes propriétaires, parfois utilisées pour bricoler un MES	Adjacent
Ultimo / CMMS divers	GMAO	Maintenance, intégration API recherchée avec le MES	Adjacent
Odoo	ERP	Module production limité, ne remplace pas un MES	Adjacent
NetSuite	ERP	Oracle, présent chez Vinventions	Adjacent
SAP S/4HANA	ERP	Présent chez Sonaca, interface Apriso	Adjacent

suite à la page suivante

Table A.1 – suite de la page précédente

Acteur	**Catégorie**	**Modèle / pricing**	**Vs OpSee**
Indao / Pepite	IA process	Optimisation par IA, fournisseur de données pour le MES	Complémentaire
DigiPox / Aspen IP.21	Historian	Stockage time-series, en amont du MES	Adjacent

Trois acteurs concentrent la concurrence la plus directe : **Teeptrak** (pricing transparent par machine, ROI court, mais OEE seul vs MES complet OpSee), **Astrée Software (Aquiweb)** (leader français mid-market, plus de 290 sites, mais entièrement propriétaire) et **Redzone** (déjà abandonné par Vinventions, mais actif sur le marché US et international). Aucun acteur identifié ne combine simultanément un modèle open-core commercial structuré et un pricing modulaire par équipement, ce qui isole le positionnement d'OpSee sur ce sous-segment précis (Besutti et al., 2019).

A.3 Analyse technique (chapitre 3)

A.3.1 Alignement d'OpSee avec ISA-95 et ISA-88

TABLE A.2 – Alignement d'OpSee avec ISA-95 et ISA-88

Standard	**Concept**	**Traduction dans OpSee**
ISA-95	Positionnement niveau 3 (MES)	OpSee se situe entre SCADA et ERP
ISA-95	Modèle de données (équipements, matériaux, personnel)	Référentiels (EF-02, EF-04, EF-06)
ISA-95	Indicateurs de performance (OEE)	Calcul OEE complet : *waterfall*, Pareto, tendances (EF-07)
ISA-95	Ordonnancement de production	Solveur CP-SAT, en feuille de route (EF-05)
ISA-95	*Production Operations Management* (dispatching, exécution, suivi)	Cycle de vie des ordres + suivi batch temps réel (EF-15)
ISA-95	Échange ERP – MES	Prévu, feuille de route
ISA-88	Hiérarchie d'équipements (7 niveaux)	Implémenté, navigation en arbre (EF-02)
ISA-88	Modèle procédural (phases → batch procedures)	Implémenté, CRUD complet (EF-03, EF-04)
ISA-88	Gestion des recettes	Recettes, formules, paramètres, règles de changement (EF-04)
ISA-88	Exécution de batches et suivi de phases	Implémenté, suivi temps réel (EF-15) ; rapports de lot partiels (EF-10)
ISA-88	Conformité réglementaire (FSMA, ISO 22005)	Audit complet, module agroalimentaire en feuille de route (EF-08)

A.3.2 Outils exposés à l'AI Assistant

Cette annexe détaille l'ensemble des vingt-cinq outils que les agents experts du chatbot d'OpSee peuvent invoquer (voir section 3.5.7). Les outils sont définis côté serveur dans le module `backend/FastApi/Menu/Chatbot/chatbot_agents.py` et stockés dans la table `m_chatbot_agent_tool` pour permettre une assignation par agent. La colonne *Permission* indique le rôle minimal requis pour qu'un utilisateur puisse déclencher l'outil par l'intermédiaire du chatbot.

TABLE A.3 – Outils exposés aux agents experts de l'AI Assistant d'OpSee : 17 outils en lecture, 7 en écriture et 1 outil avancé d'interrogation SQL, soit 25 au total.

Outil	**Permission**	**Description**
Lecture : équipements et OEE (5 outils)		
`get_equipment_list`	Authentifié	Liste les équipements accessibles à l'utilisateur.
`get_equipment_oee`	Authentifié	Retourne les métriques OEE (disponibilité, performance, qualité) d'un équipement.
`get_oee_availability_summary`	Authentifié	Résume les événements d'arrêt et leurs raisons.
`get_oee_pareto`	Authentifié	Construit un Pareto des causes d'arrêt.
`get_equipment_tags`	Authentifié	Retourne les capteurs (*tags*) assignés à un équipement.
Lecture : séries temporelles (2 outils)		
`get_tags`	Authentifié	Liste les capteurs avec leurs métadonnées.
`get_tag_values`	Authentifié	Interroge l'hypertable `a_tag_value` avec interpolation (brut, linéaire, paliers). Plafond de 500 points.

(suite page suivante)

(suite de la page précédente)

Outil	Permission	Description
Lecture : personnel et plannings (6 outils)		
`get_shifts`	Authentifié	Liste les quarts de travail.
`get_crews`	Authentifié	Liste les équipes.
`get_operators`	Authentifié	Liste les opérateurs.
`get_schedules`	Authentifié	Liste les plannings.
`get_schedule_entries`	Authentifié	Liste les entrées d'un planning.
`get_active_shift`	Authentifié	Identifie le quart actif pour un équipement à un instant donné.
Lecture : raisons et objectifs (3 outils)		
`get_reasons`	Authentifié	Liste les raisons d'arrêt.
`get_reason_trees`	Authentifié	Retourne les arbres hiérarchiques de raisons.
`get_oee_objectives`	Authentifié	Retourne les objectifs OEE configurés.
Lecture : Grafana (1 outil)		
`get_grafana_datasources`	Authentifié	Liste les sources de données Grafana disponibles.
Écriture : plannings (3 outils)		
`create_schedule_entry`	Admin ou rôle planning	Crée une entrée de planning.
`update_schedule_entry`	Admin ou rôle planning	Met à jour une entrée de planning.
`delete_schedule_entry`	Admin ou rôle planning	Supprime une entrée de planning.
Écriture : configuration (4 outils)		
`update_oee_objective`	Admin ou rôle configuration	Met à jour un objectif OEE.
`create_equipment`	Admin	Crée un nouvel équipement.

(suite page suivante)

(suite de la page précédente)

Outil	Permission	Description
`assign_tags`	Admin	Assigne des capteurs à un équipement.
`create_grafana_dashboard`	Admin	Crée un tableau de bord Grafana à partir d'un modèle JSON.

Avancé : SQL (1 outil)

`execute_sql_query`	Admin	Exécute une requête `SELECT`, `WITH` ou `EXPLAIN`. Plafond de 1 000 lignes.

A.3.3 Captures d'écran du logiciel OpSee

Cette annexe regroupe les captures d'écran de l'interface OpSee dans sa version pilote, telles qu'utilisées dans la documentation officielle du logiciel. Les écrans sont organisés par domaine fonctionnel et regroupés à raison de quatre par page.

A.3.3.1 Accueil et connexion

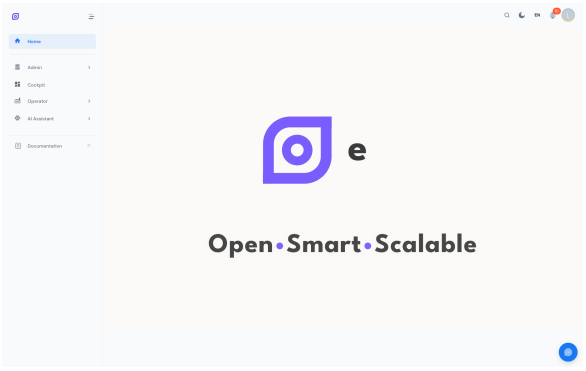


FIGURE A.1 – Page d'accueil OpSee, point d'entrée vers les modules.

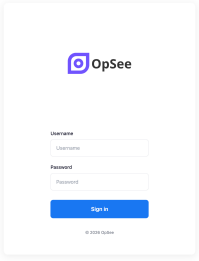


FIGURE A.2 – Écran de connexion.

A.3.3.2 Cockpits personnalisables

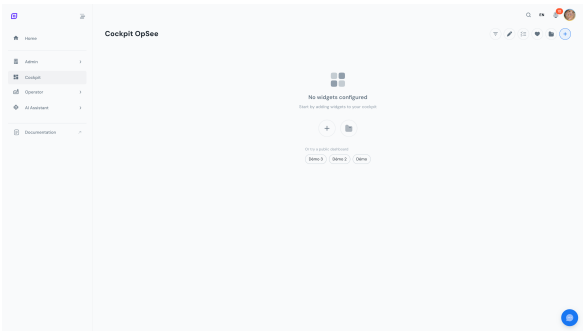


FIGURE A.3 – Cockpit configurable : vue principale agrégeant widgets et frises chronologiques.

FIGURE A.4 – Mode édition : ajout, déplacement et redimensionnement des widgets.

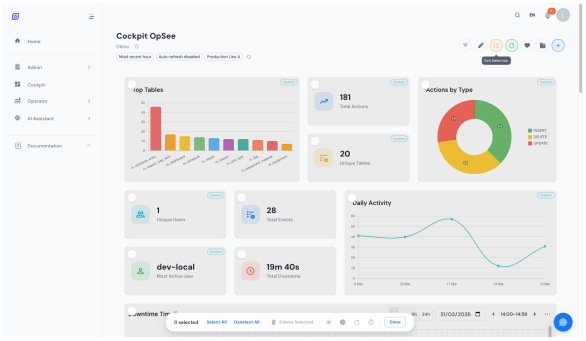


FIGURE A.5 – Mode sélection multiple pour opérations par lot sur les widgets.

FIGURE A.6 – Boîte de dialogue d'ajout d'un widget.

FIGURE A.7 – Menu contextuel d'un widget.

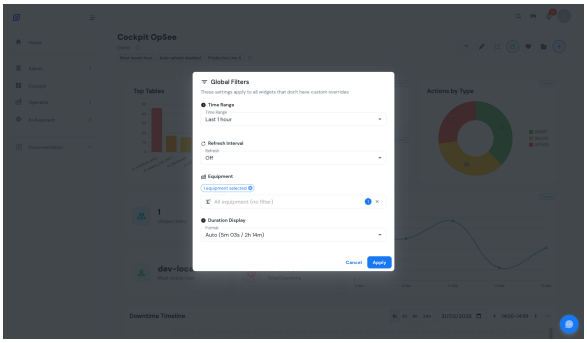


FIGURE A.8 – Panneau de filtres globaux appliqués au cockpit.

FIGURE A.9 – Frise chronologique en pleine largeur.

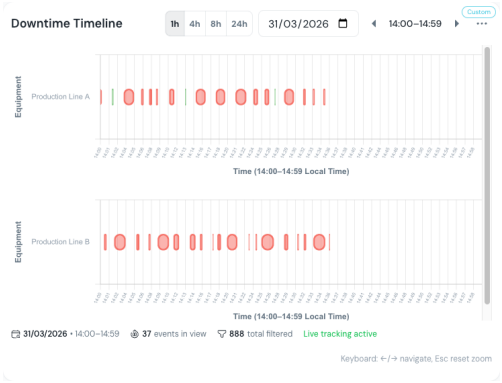


FIGURE A.10 – Frise chronologique scindée par équipement.

A.3.3.3 Administration — Équipements

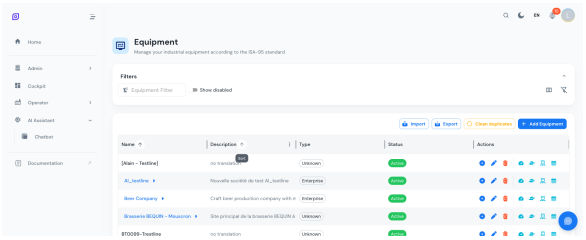


FIGURE A.11 – Grille des équipements de la hiérarchie ISA-95.

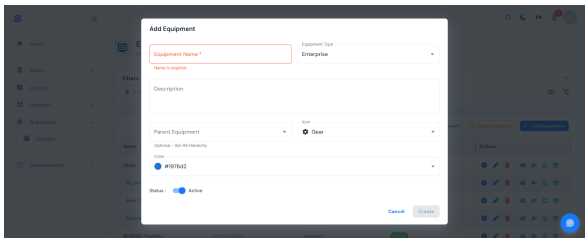


FIGURE A.12 – Création d'un équipement.

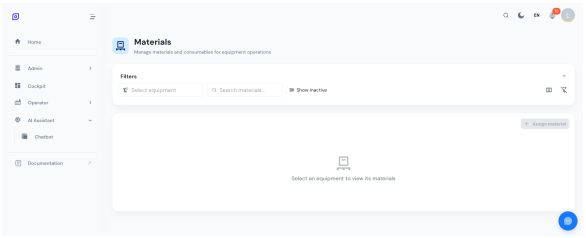


FIGURE A.13 – Affectation des matières autorisées à un équipement.

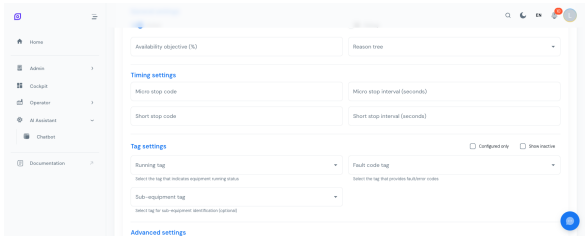


FIGURE A.14 – Configuration OEE par équipement.

A.3.3.4 Administration — Matières

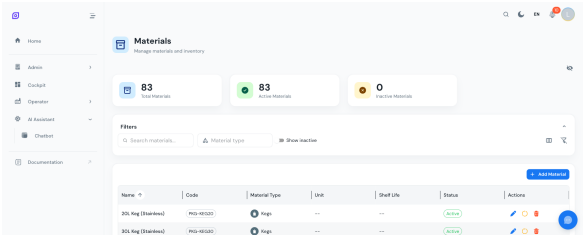


FIGURE A.15 – Liste complète des matières.

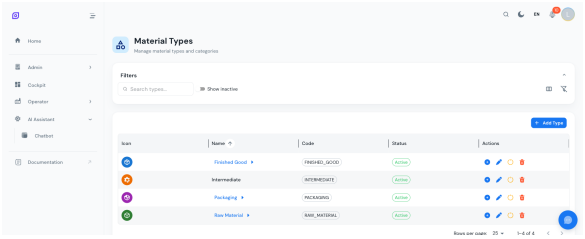


FIGURE A.16 – Liste des classes de matières.

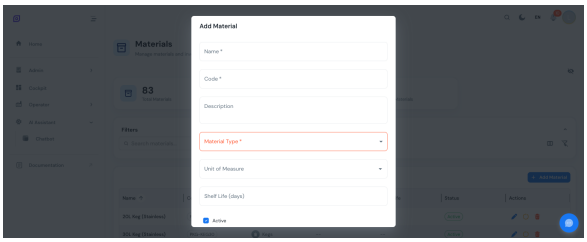


FIGURE A.17 – Création d'une matière.

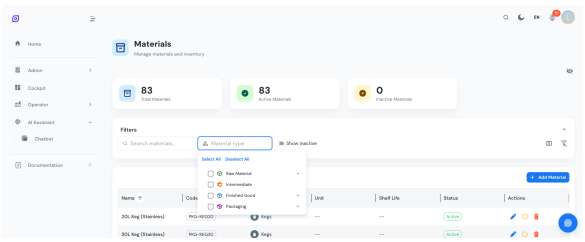


FIGURE A.18 – Filtre par arborescence de classes.

A.3.3.5 Administration — Personnel

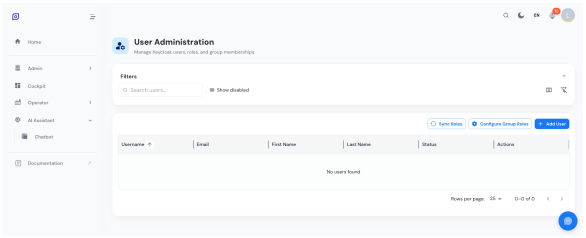


FIGURE A.19 – Grille des utilisateurs.

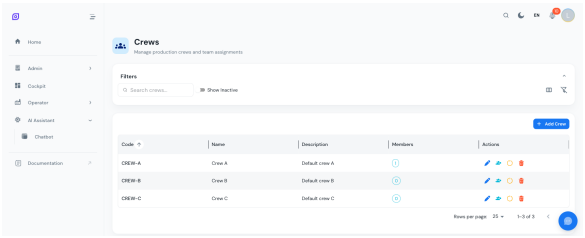


FIGURE A.20 – Grille des équipes (*crews*).

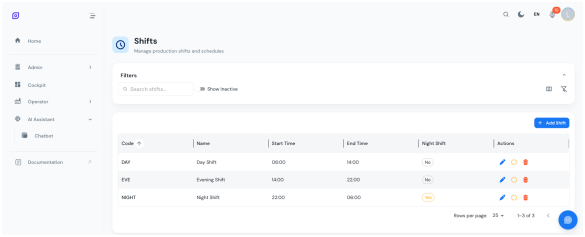


FIGURE A.21 – Grille des postes (*shifts*).

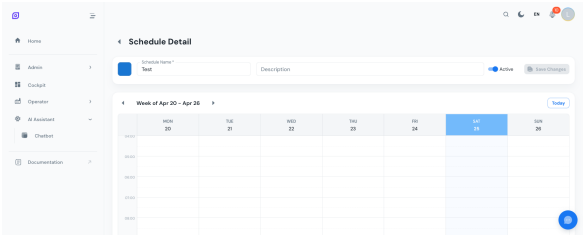


FIGURE A.22 – Calendrier des plannings.

A.3.3.6 Administration — Procédures (ISA-88)

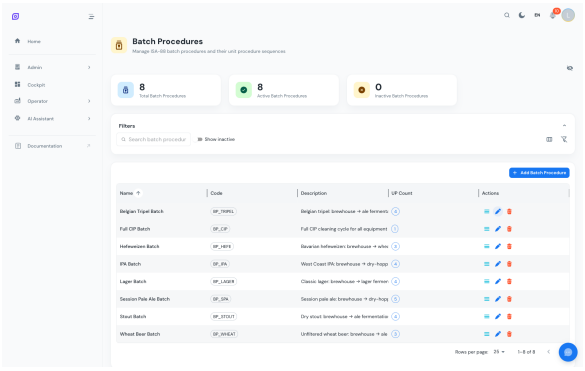


FIGURE A.23 – Liste des procédures de lot.

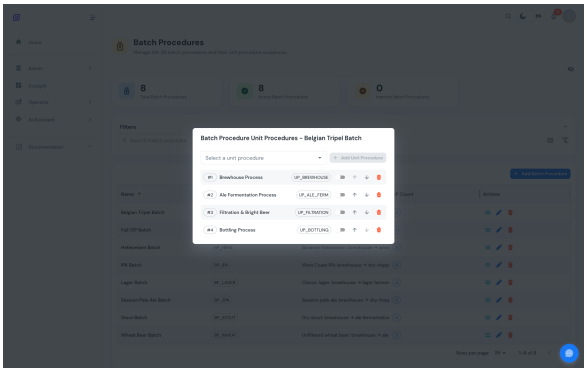


FIGURE A.24 – Gestion des procédures d'unité au sein d'une procédure de lot.

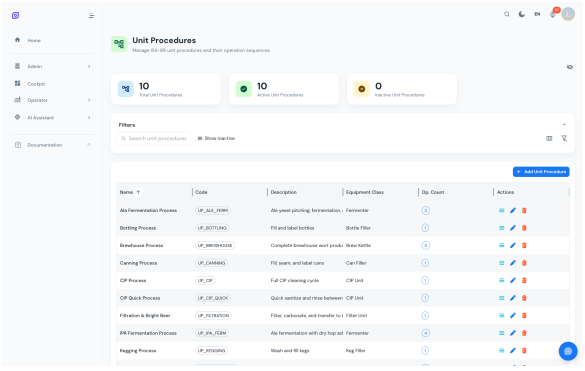


FIGURE A.25 – Liste des procédures d'unité.

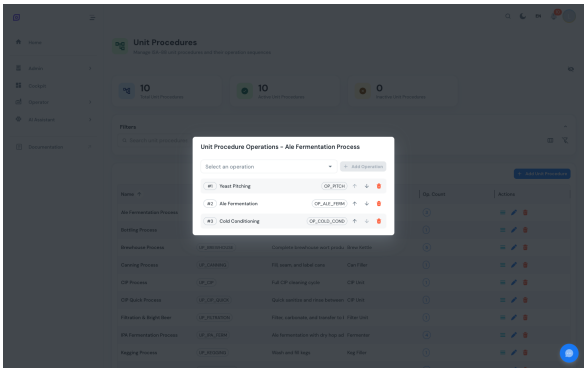


FIGURE A.26 – Gestion des opérations d'une procédure d'unité.

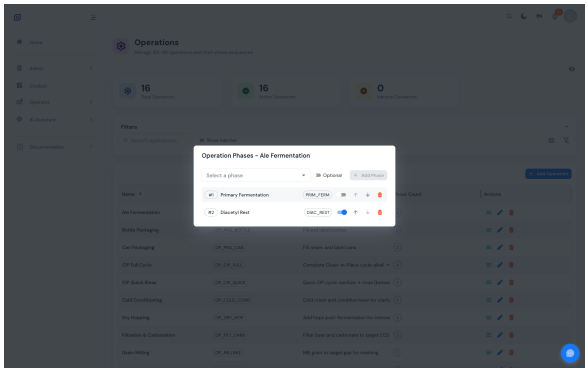


FIGURE A.27 – Gestion des phases au sein d'une opération.

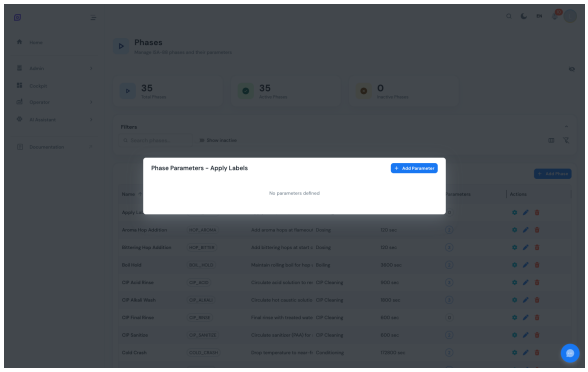


FIGURE A.28 – Paramètres d'une phase.

A.3.3.7 Administration — Recettes

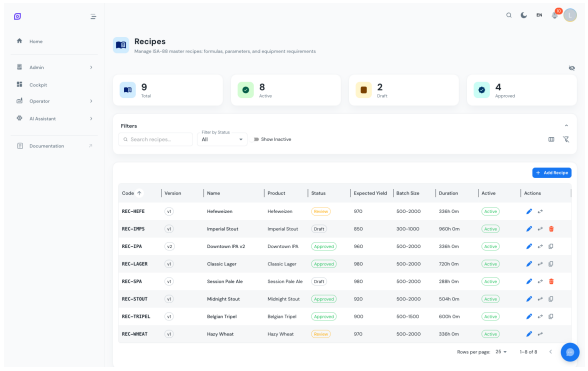


FIGURE A.29 – Liste des recettes.

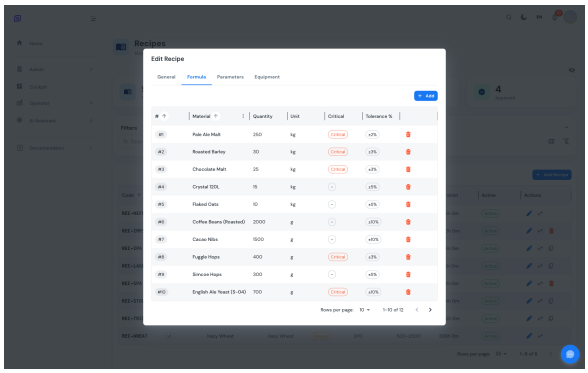


FIGURE A.30 – Onglet formule (composition d'une recette).

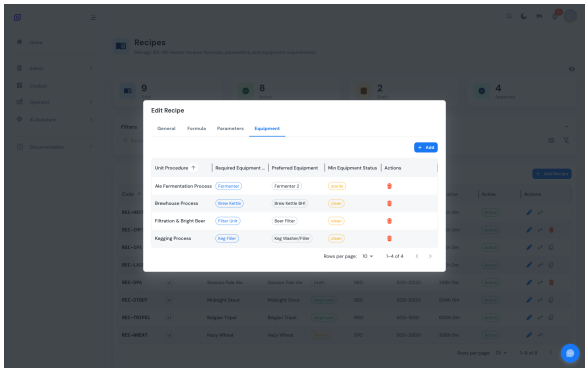


FIGURE A.31 – Onglet équipements requis.

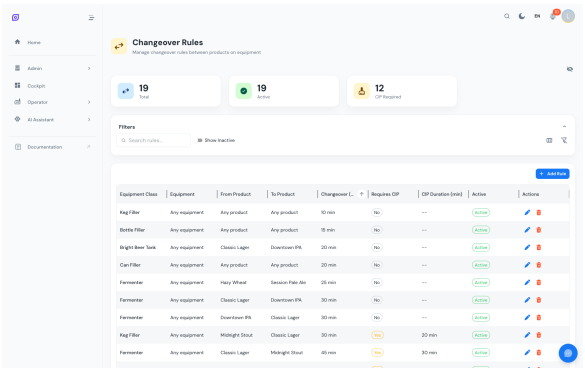


FIGURE A.32 – Règles de changement de format entre recettes.

A.3.3.8 Configuration OEE

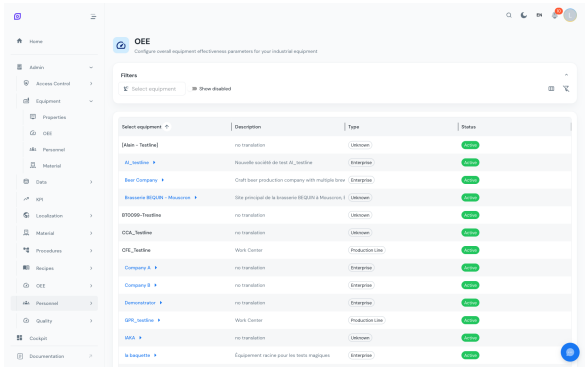


FIGURE A.33 – Affectation des paramètres OEE par équipement.

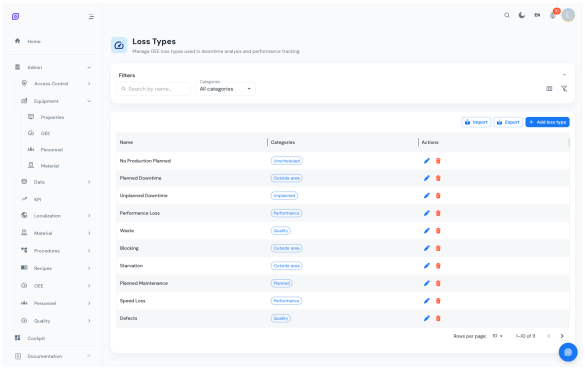


FIGURE A.34 – Types de pertes OEE.

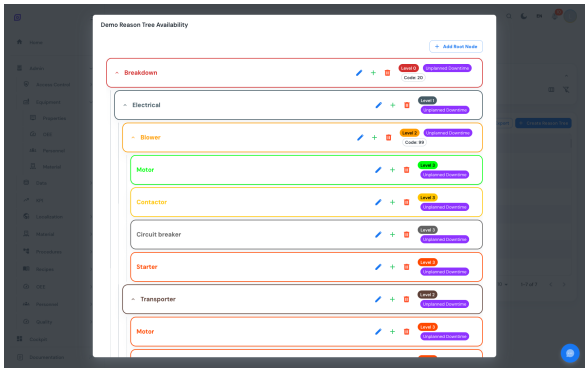


FIGURE A.35 – Constructeur d'arbre de raisons d'arrêt.

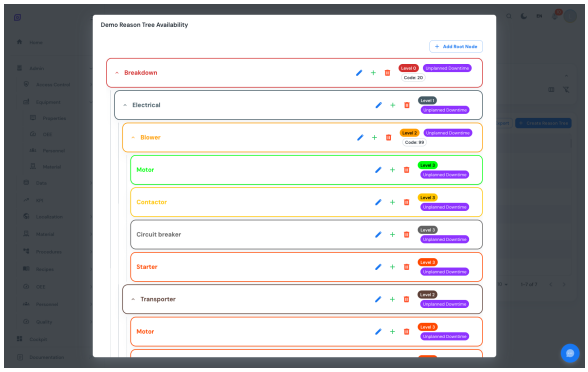


FIGURE A.36 – Vue arborescente d'un arbre de raisons.

A.3.3.9 Administration plateforme

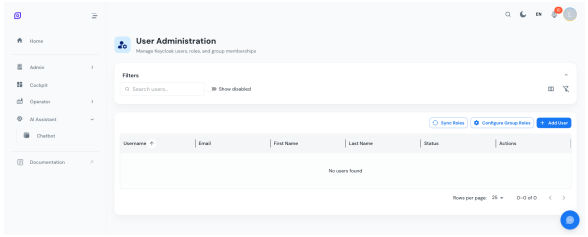


FIGURE A.37 – Gestion des utilisateurs (rôles, permissions).

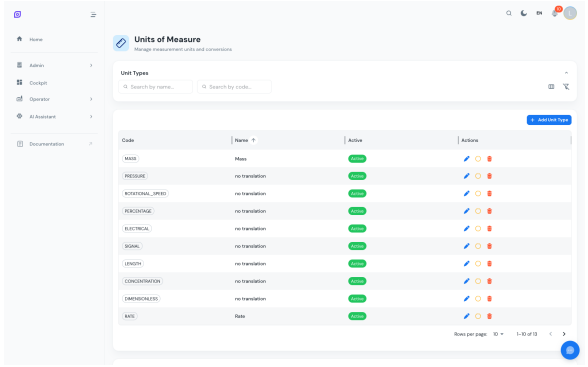


FIGURE A.38 – Unités de mesure.

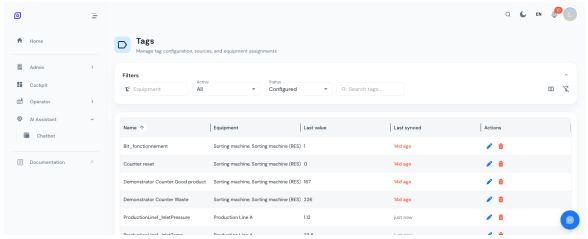


FIGURE A.39 – Tags de données (variables process).

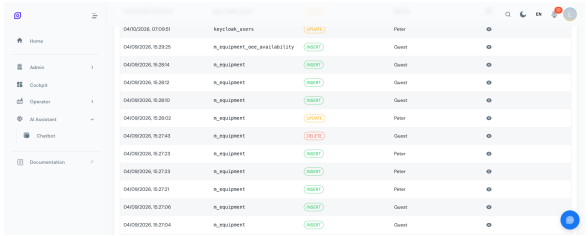


FIGURE A.40 – Journal d'audit.

A.3.3.10 Production

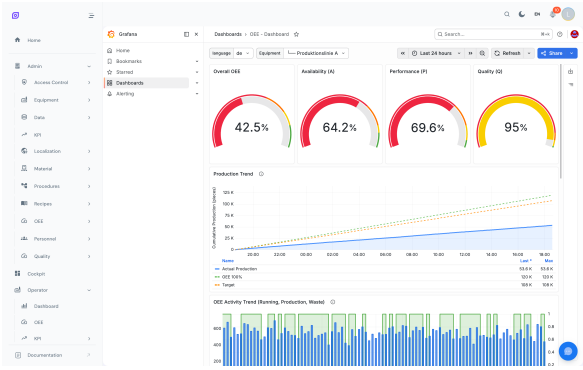


FIGURE A.41 – Tableau de bord production.

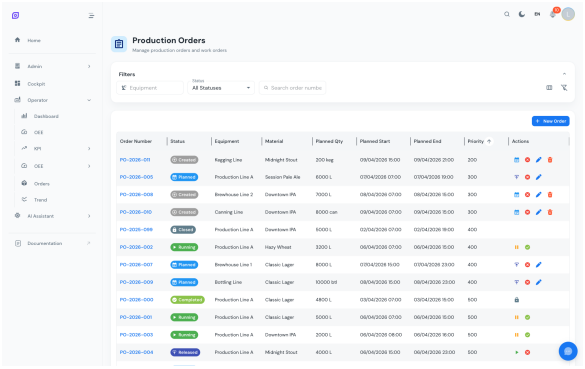


FIGURE A.42 – Ordres de fabrication.

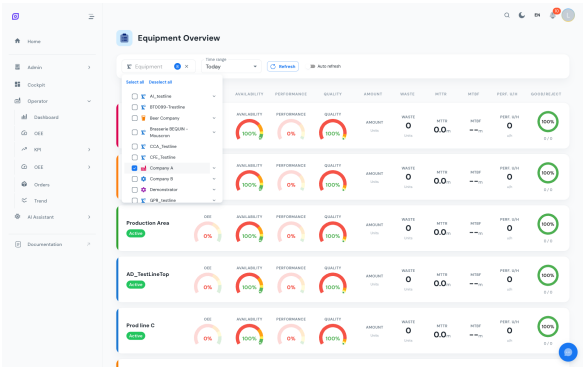


FIGURE A.43 – Vue d'ensemble des équipements.

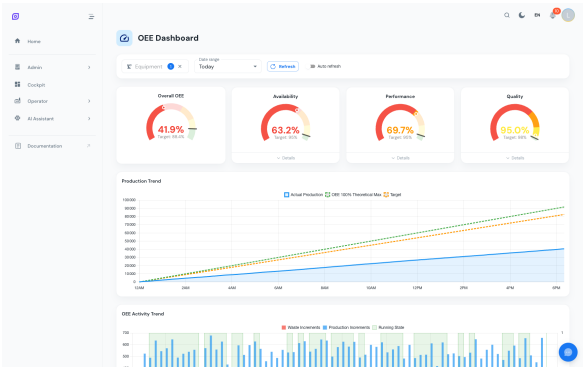


FIGURE A.44 – Tableau de bord OEE complet.

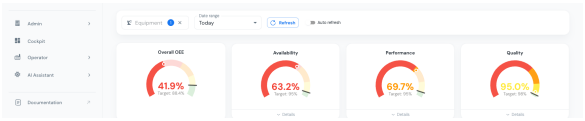


FIGURE A.45 – Jauges OEE (disponibilité, performance, qualité).

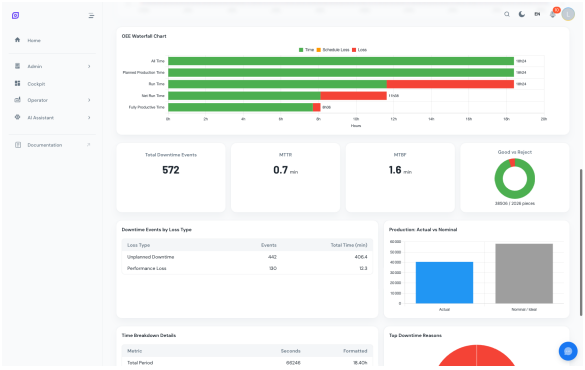


FIGURE A.46 – Diagramme en cascade des pertes OEE.

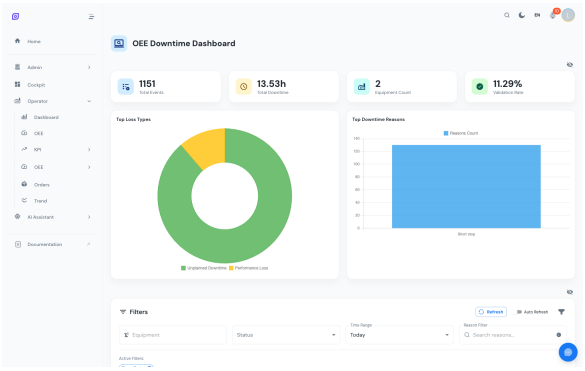


FIGURE A.47 – Tableau de bord des arrêts.

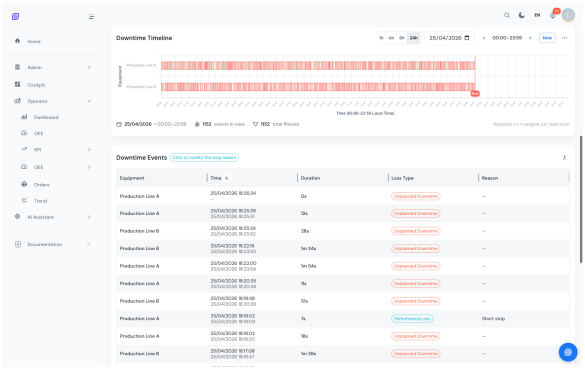


FIGURE A.48 – Frise chronologique des arrêts.

A.3.3.11 Vue opérateur et assistant IA

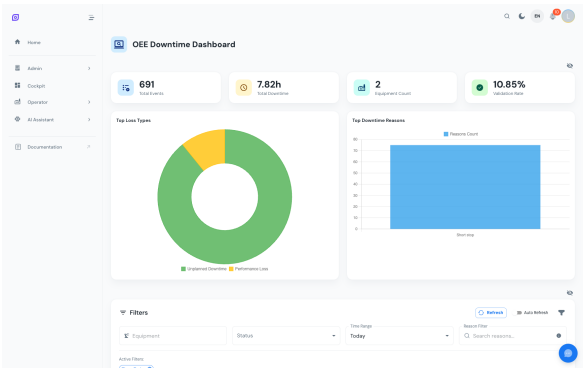


FIGURE A.49 – Vue opérateur d'un poste.

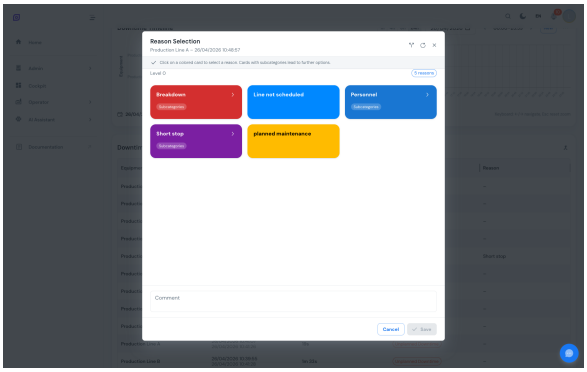


FIGURE A.50 – Sélection d'une raison d'arrêt côté opérateur.

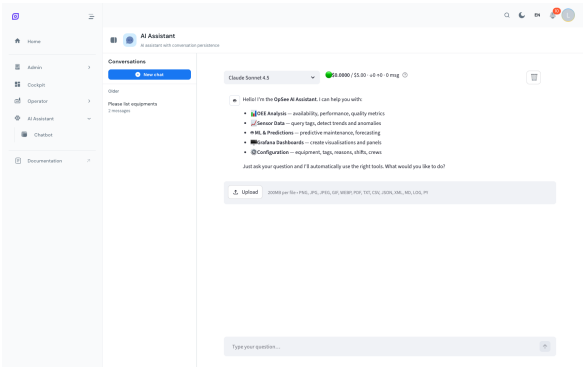


FIGURE A.51 – Assistant conversationnel connecté à l'API OpSee.

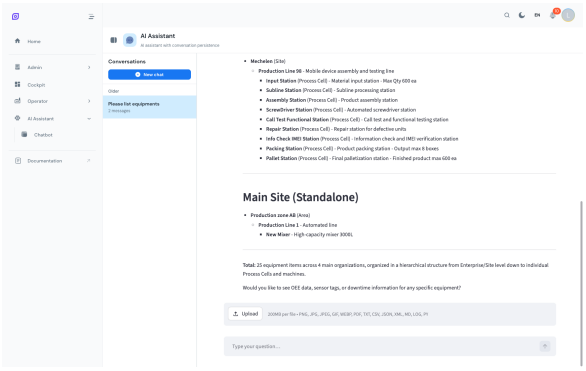


FIGURE A.52 – Historique des conversations avec l'assistant.

A.3.3.12 Profil utilisateur

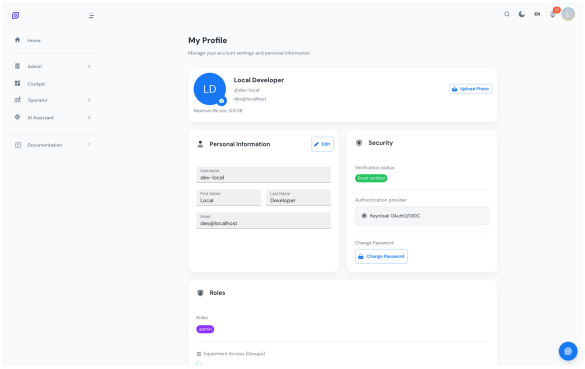


FIGURE A.53 – Profil utilisateur connecté.

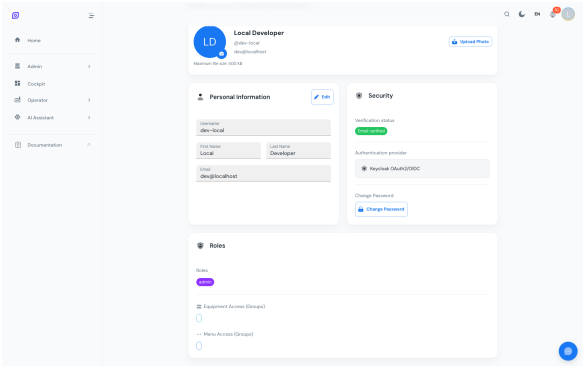


FIGURE A.54 – Carte des rôles et permissions de l'utilisateur.

A.3.4 Cahier des charges sécurité détaillé

Cette annexe détaille le cahier des charges de la sécurité d'OpSee, en complément de l'exigence non fonctionnelle ENF-07 (section 3.3.2). La structure suit les six dimensions retenues par la littérature en cybersécurité industrielle (Kapoor et al., 2025 ; Nankya et al., 2023).

TABLE A.4 – Cahier des charges sécurité d'OpSee, structuré selon six dimensions de la cybersécurité industrielle.

Contrôle	**Exigence**
Dimension 1. Installation et configuration sécurisées	
Déploiement isolé	Chaque composant (Keycloak, PostgreSQL/TimescaleDB, NGINX, OAuth2-Proxy, Mosquitto, Grafana) est déployé dans un conteneur isolé à partir d'images officielles épinglées sur des versions stables.
Aucun *credential* par défaut	Tous les comptes administratifs (base de données, courtier MQTT, Grafana, Keycloak) sont initialisés à partir de secrets injectés à l'installation ; aucun *credential* par défaut éditeur ne subsiste.

Contrôle	**Exigence**
Surface d'attaque minimale	Seuls les composants requis sont installés ; les modules, thèmes, fournisseurs et *plug-ins* Keycloak non utilisés sont absents du déploiement.
IdP durci	Keycloak fonctionne en mode production avec `sslRequired=external`, joignable exclusivement via un *reverse proxy* durci.
Terminaison TLS	Tout trafic externe se termine au *reverse proxy* avec TLS 1.2 ou TLS 1.3 exclusivement, suites ECDHE/AES-GCM modernes, HSTS et en-têtes `X-Frame-Options`, `X-Content-Type-Options`, `Referrer-Policy`, `X-XSS-Protection`.

Dimension 2. Authentification et contrôle d'accès

Authentification centralisée	Toute authentification transite par Keycloak via OAuth 2.0/OpenID Connect avec le flux Authorization Code et PKCE (S256). Le flux implicite est désactivé.
Authentification multifacteur	TOTP et WebAuthn sont activables pour les comptes administratifs et privilégiés via les flux Keycloak standard.
Politique de mots de passe	Longueur minimale, complexité, historique et rotation sont configurables par client.
Anti-*brute force*	Verrouillage progressif sur tentatives répétées au niveau de l'IdP.
Provisionnement administratif	L'auto-inscription, la réinitialisation anonyme du mot de passe et la vérification anonyme par e-mail sont désactivées ; le provisionnement des comptes est une action administrative.
RBAC à deux axes	Les permissions sont résolues à chaque requête sur deux axes : rôles fonctionnels (ce que l'utilisateur peut faire) et appartenance à un groupe d'équipements (ce qu'il peut voir).
Rejet de l'accès anonyme	Tout accès anonyme est rejeté à la périphérie ; chaque appel API valide le JWT contre le JWKS de Keycloak.
Sessions courtes	*Access token* : 5 min ; *refresh token* : 30 min ; SSO idle : 24 h ; *cookies* `Secure`, `HttpOnly`, `SameSite=Lax`, protection CSRF par requête.

Dimension 3. Protection des données

Contrôle	**Exigence**
Données en transit	TLS 1.2+ pour tout trafic utilisateur ; MQTTS sur 8883 avec TLS pour la télémétrie d'atelier ; OPC UA Basic256Sha256 avec `SignAndEncrypt` ; trafic inter-services isolé sur un réseau Docker privé.
Données au repos	Données d'identité et données applicatives sur PostgreSQL/TimescaleDB avec chiffrement disque fourni par la plateforme d'hébergement. Mots de passe en PBKDF2 ; secrets OAuth chiffrés. Chiffrement intégral des données activable.
Gestion des secrets	*Credentials* base, secrets OAuth, *credentials* MQTT et secrets administratifs injectés à l'exécution comme variables d'environnement ou *Docker secrets*. Aucun secret n'est versionné.
Sauvegardes	Sauvegardes horodatées, compressées, planifiées, avec fenêtre de rétention glissante (30 jours par défaut). Configuration du *realm*, tableaux de bord Grafana et flux Node-RED versionnés séparément. Procédure de restauration documentée.

Dimension 4. Surveillance et journalisation

Audit applicatif	Toute création, modification ou suppression sur les données métier (utilisateurs, rôles, groupes, équipements, recettes, ordres de production, assignations) est journalisée avec utilisateur acteur, horodatage, table, enregistrement, action, valeurs avant/après, IP cliente, identifiant de session et module. Interrogeable par les administrateurs avec filtrage.
Journaux *reverse proxy*	Chaque requête est journalisée avec le sujet authentifié et son résultat.
Événements IdP	Événements de connexion Keycloak (succès/échec, émission de *token*, déconnexion, changement de mot de passe, événements MFA) et événements administratifs (*realm*, client, utilisateur, rôle, groupe) journalisés.
Rétention	Au moins 90 jours par défaut, paramétrable. Journaux en écriture seule du point de vue applicatif.

Contrôle	**Exigence**
Métriques opérationnelles	Ingestion, santé du courtier, santé de la base, latence d'API, succès/échec d'authentification collectés en continu.

Dimension 5. Mises à jour et gestion des correctifs

Suivi CVE	Suivi des publications amont et des avis CVE pour chaque composant (Keycloak, base, *reverse proxy*, OAuth2-Proxy, Mosquitto, Node-RED, Grafana).
Cadence de mise à jour	Mises à jour appliquées à cadence régulière et hors cadence sur publication d'une CVE de gravité pertinente.
Déploiement par image	Les déploiements sont des images de conteneurs : la mise à jour avance par remplacement d'image ; le retour arrière est immédiat.
Pipeline CI/CD	Les changements transitent par un *pipeline* CI/CD avec tests automatisés. Aucun correctif ad hoc sur service en production.

Dimension 6. Intégrations sécurisées

OIDC pour les accès humains	Frontend, Grafana et SSO externe authentifient contre Keycloak en OAuth 2.0/OIDC. Aucun mot de passe statique partagé ni clé API à durée illimitée pour les utilisateurs.
Clients OAuth à moindre privilège	Clients confidentiels lorsqu'un secret peut être protégé, publics avec PKCE sinon. URIs de redirection en liste blanche par client. Seuls les *scopes* requis sont accordés.
Interfaces administratives non publiques	Console Keycloak, base, Node-RED, pgAdmin et supervision non exposées publiquement ; accès uniquement via le *proxy* authentifiant ou en bande hors ligne.
MQTT/MQTTS	Courtier MQTT avec accès anonyme désactivé, authentification par utilisateur/mot de passe, ACL par *topic* restreignant chaque classe d'équipement aux *topics* qu'elle utilise. Port MQTTS 8883 protégé par TLS. *Listener* en clair désactivé en production.
OPC UA sécurisé	Clients OPC UA configurés en `SignAndEncrypt` avec `Basic256Sha256` ; authentification client par certificat X.509 ou utilisateur/mot de passe ; rejet des *endpoints* `SecurityMode=None` ; magasin de certificats serveur spécifique au site.

Contrôle	**Exigence**
Ingestion à frontière de confiance	Toutes les données d'atelier (MQTT, OPC UA, dépôts de fichiers) transitent par une couche de *staging* dédiée avant d'être interprétées et promues dans le schéma applicatif.
Durcissement API (OWASP)	Toute requête base passe par des requêtes paramétrées invoquant des fonctions stockées versionnées (anti-injection). Frontend React échappe les valeurs interpolées par défaut (anti-XSS). Appels API authentifiés par JWT *bearer* avec CSRF par requête. `X-Frame-Options: SAMEORIGIN` (anti-clickjacking). Toute requête API revalide le JWT contre le JWKS et résout à nouveau le périmètre de l'utilisateur. HSTS et TLS 1.2+.

A.3.5 Feuille de route détaillée du cahier des charges

Cette annexe détaille l'état d'avancement et la chronologie de chaque exigence du cahier des charges (sections 3.3.1 et 3.3.2), reconstituée à partir de l'historique `git` de quatre dépôts successifs : trois dépôts d'amorçage `OpseeStack` (infrastructure et pipeline d'ingestion), `OpseeFront` (premier socle React) et `OpseeBack` (*reverse proxy*, OAuth2, premiers *endpoints* de l'API) actifs entre mai et octobre 2025, puis le *monorepo* `OpSee` (octobre 2025 – avril 2026) avec ses migrations SQL versionnées (V20 à V408). Le statut suit quatre paliers : **Implémenté** (livré dans le MVP), **Partiel** (mécanique principale en place, finitions ou variantes manquantes), **En développement** (travail démarré, fonctionnalité non encore livrable), **Feuille de route** (non commencé).

Synthèse.

La feuille de route s'étend sur quatre phases. La phase d'amorçage (mai à octobre 2025, dépôts `OpseeStack`, `OpseeFront`, `OpseeBack`) pose les fondations du pipeline d'ingestion (EF-01), de l'infrastructure conteneurisée (ENF-02, ENF-04), de la sécurité périmétrique (ENF-07), de l'interopérabilité (ENF-06), des premiers *endpoints* d'équipement, d'audit et d'OEE (EF-02, EF-07, EF-08), ainsi que du système d'internationalisation (EF-14). La

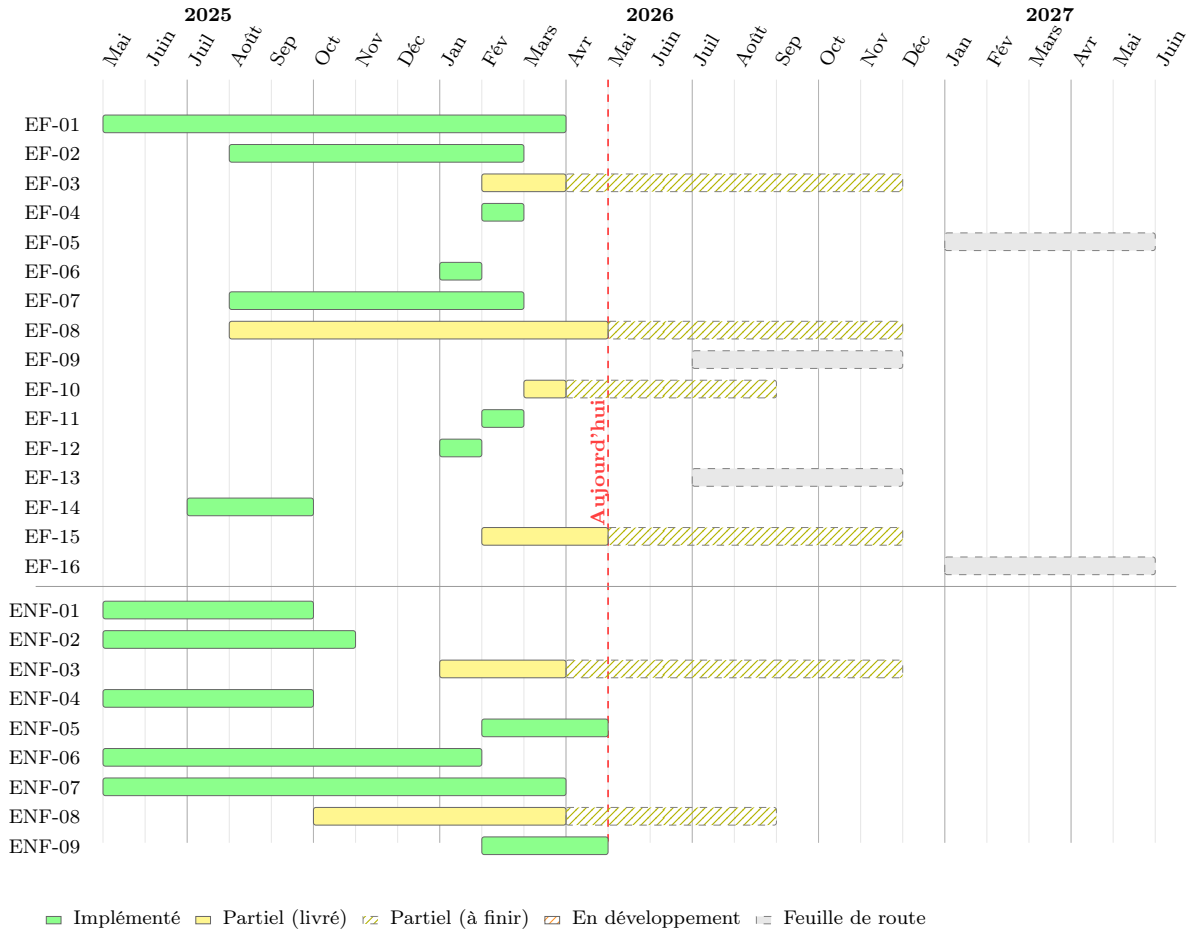


FIGURE A.55 – Feuille de route des exigences du cahier des charges d'OpSee (mai 2025 – mi-2027).

phase de consolidation dans le *monorepo* (octobre 2025 à avril 2026) livre la gestion du personnel (EF-06), du chatbot (EF-12), des batches ISA-88 (EF-04), du cockpit (EF-11), une première version de la gestion et du suivi des ordres de production (EF-15, partiel) et les optimisations de performance et de sauvegarde (ENF-05, ENF-08). La phase à venir (mai à fin 2026) doit finaliser les exigences partielles (EF-03, EF-08, EF-10, EF-15, ENF-03, ENF-08) et démarrer les deux exigences pures de feuille de route planifiées pour fin 2026 : EF-09 (alertes et détection d'anomalies) et EF-13 (*licensing* modulaire). Une quatrième phase (premier semestre 2027) regroupe enfin l'ordonnanceur CP-SAT (EF-05, issue #239) et le module de reporting environnemental (EF-16, CSRD/DPP), aligné sur les paliers d'application de la directive pour les PME industrielles cotées.

A.3.6 Définition formelle de l'équipement

Le chapitre 3 retient en section 3.2 une définition compacte de l'équipement facturable. Le développement complet figure ci-dessous.

A.3.6.1 Le besoin d'une définition non ambiguë

La notion d'équipement est ambiguë dans la littérature MES. Vegetti et Henning (2014) soulignent qu'ISA-88 et ISA-95 emploient des termes différents pour désigner des concepts proches, dont celui d'« équipement », et que les critères de frontière entre niveaux hiérarchiques « ne sont bien définis ni dans ISA-88 ni dans ISA-95 ». Tant que l'équipement reste une catégorie descriptive, l'imprécision est gérable ; elle devient problématique dès qu'elle sert d'unité de facturation. Les concurrents confirment cette tension : Tulip facture par *interface*, Teeptrak par *machine*, sans que ces définitions soient interopérables. OpSee a besoin de sa propre définition, compatible avec les standards et auditable côté logiciel.

A.3.6.2 Ancrage normatif : la hiérarchie ISA-88/95

ISA-88 organise l'usine selon un modèle physique hiérarchique (García et al., 2018 ; Vegetti & Henning, 2014). Six niveaux structurent ce modèle, du plus agrégé au plus

granulaire :

- **Site** : une usine ou un site géographique.
- **Area** : une zone de l'usine (atelier, hall de production).
- **Work Center** : le découpage logique de l'Area selon le type de procédé. Trois variantes coexistent : *Process Cell* pour le batch (réacteurs, mélangeurs), *Production Line* pour le discret (ligne d'assemblage) et *Production Unit* pour le continu (segment de procédé autonome).
- **Unit / Work Unit** : une machine ou un poste autonome au sein d'un Work Center (une presse, un four, un poste d'assemblage). Le terme *Unit* renvoie au batch, *Work Unit* au discret. Le procédé continu ne descend pas à ce niveau : la Production Unit fait elle-même office d'équipement productif.
- **Equipment Module** : un sous-ensemble fonctionnel d'une Unit (système d'agitation, circuit thermique, dosage).
- **Control Module** : le niveau d'instrumentation, regroupant capteurs, actionneurs et automates qui pilotent l'équipement physique.

Les trois niveaux supérieurs (Site, Area, Work Center) relèvent d'ISA-95 ; les trois niveaux inférieurs (Unit, Equipment Module, Control Module) relèvent d'ISA-88, avec un chevauchement au niveau Work Center, où les deux normes décrivent les mêmes groupements sous des angles différents (Vegetti & Henning, 2014).

ISA-88 a été conçue pour le batch, mais s'applique aujourd'hui aux processus discrets et continus (García et al., 2018 ; Vegetti & Henning, 2014). Cette hiérarchie reste donc valable pour OpSee quel que soit le secteur industriel ciblé. Le registre d'assets d'OpSee suit cette structure : chaque nœud déclaré côté client est positionné dans la hiérarchie ISA-88/95 lors de la mise en service (3.3). La figure A.56 synthétise l'ensemble et identifie les niveaux retenus comme *équipement facturable* pour OpSee.

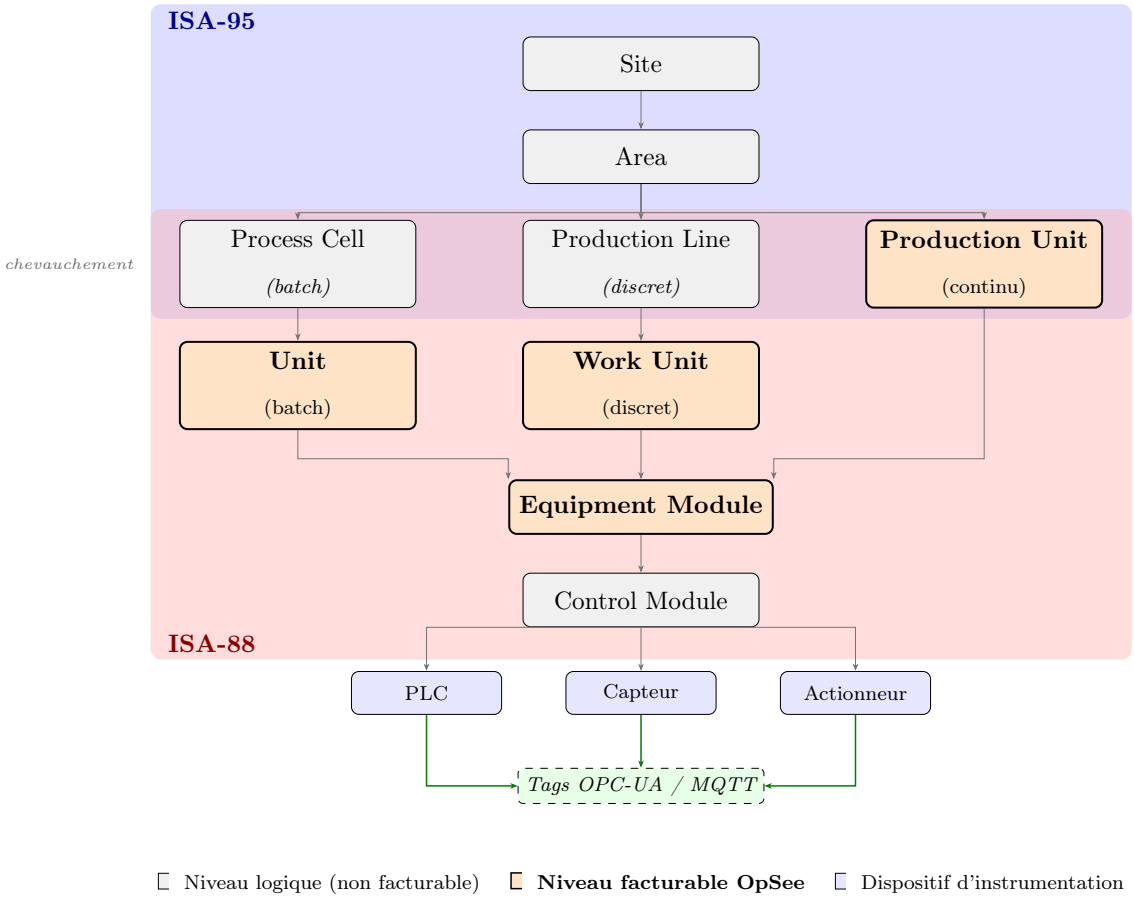


FIGURE A.56 – Hiérarchie physique ISA-88/95 et niveaux facturables OpSee (García et al., 2018 ; Vegetti & Henning, 2014).

A.3.6.3 Ancrage technique : connexion à un automate ou à un capteur

La hiérarchie ISA-88/95 décrit la structure logique de l'usine, pas les nœuds qu'OpSee observe effectivement. Le second critère est donc ancré dans le flux de données. García et al. (2018) rattachent chaque nœud d'un serveur OPC-UA à un dispositif physique (automate ou capteur) identifié de manière unique (García et al., 2018 ; Leitner & Mahnke, 2006).

Un nœud de la hiérarchie est dit *instrumenté* dès lors qu'au moins une voie de donnée active y est rattachée : tag OPC-UA, topic MQTT (Silva et al., 2021), ou autre source d'acquisition raccordée à la plateforme. Un nœud purement logique (par exemple un atelier qui regroupe des Units sous une étiquette commune) ne porte aucune donnée propre et n'apparaît pas comme source de production.

A.3.6.4 Définition retenue par OpSee

OpSee combine ces deux ancrages. Un **équipement facturable** est un nœud de la hiérarchie ISA-88/95 du client qui satisfait simultanément trois conditions cumulatives :

1. il est déclaré dans le registre d'assets d'OpSee, à une position explicite dans la hiérarchie ;
2. il correspond, dans la sémantique ISA-88/95, à une *Unit*, un *Work Unit*, une *Production Unit*, un *Equipment Module*, une *Storage Unit* ou tout actif industriel autonome équivalent (frigo, silo, etc.) (García et al., 2018 ; Vegetti & Henning, 2014) ;
3. au moins un tag actif (OPC-UA ou MQTT) y est associé, alimenté par un automate, un capteur, une passerelle IIoT ou tout autre dispositif d'acquisition raccordé à la plateforme.

Conséquence directe : un nœud logique de regroupement, sans tag propre, n'est pas facturable ; un nœud devient facturable dès qu'un tag y est rattaché, et cesse de l'être si tous ses tags disparaissent. Le comptage est auditable côté serveur : il correspond au

nombre d'assets actifs dans le registre, valeur reprise par la chaîne de licensing (A.5.4).

A.3.6.5 Cas types et arbitrages

Ligne d'embouteillage avec un automate central.

Une ligne de cinq machines successives partageant un PLC central peut être déclarée comme une *Unit* unique (un équipement facturable) si le client souhaite piloter et facturer la ligne comme un bloc, ou comme cinq *Equipment Modules* indépendants si chaque poste reçoit ses propres tags et fait l'objet d'un suivi distinct (OEE par poste, traçabilité par étape). L'arbitrage se fait avec l'intégrateur lors de l'analyse des besoins, selon la granularité de pilotage souhaitée.

Réacteur batch ISA-88.

Un réacteur conforme à ISA-88 contient plusieurs *Equipment Modules* (agitation, circuit thermique, dosage) qui remontent au niveau *Unit*. Si ces sous-modules ne sont pas individuellement instrumentés au sens du critère 3, ils ne sont pas facturés : seul le réacteur, en tant qu'*Unit*, l'est. Cette logique suit les recettes de contrôle ISA-88 décrites par Virta et al. (2010), où l'allocation d'équipement se fait au niveau de l'*Unit*.

Machine isolée sans automate.

Une machine sans PLC mais équipée d'un capteur IoT qui publie son état reste facturable dès lors que ce capteur alimente un tag actif. Cette ouverture compte pour les PME dont une partie du parc reste non-automatisée : l'instrumentation peut progresser sans changer la structure de facturation.

Actif de stockage instrumenté.

Un frigo industriel monitoré (température, hygrométrie, ouvertures de porte) ou un silo équipé de capteurs de niveau, de poids ou d'humidité est facturable au même titre qu'une ressource productive. Cas typiques : chaîne du froid en agroalimentaire et pharma, silos

de matière première en cimenterie ou industrie alimentaire. La traçabilité et la conformité réglementaire associées à ces actifs justifient leur prise en compte par le MES, et donc par la facturation OpSee.

Borne supérieure et capacité d'un OpEdge.

Le plan financier (7.1) prévoit seize équipements par client en *expected*, dix en *worst*, vingt en *best*. Les tests de charge (3.7.4) montrent qu'un nœud OpEdge unique tient 195 équipements à 1 Hz et 970 à 0,2 Hz. Un seul OpEdge couvre donc le parc d'une PME cible, sans plafond matériel sur la facturation.

A.3.6.6 Articulation avec la chaîne de licensing

La définition retenue est l'unité de comptage directe de la chaîne de licensing, détaillée côté cahier des charges en 3.3.1.13 (mécanisme technique : serveur distant + signature locale + granularité module/équipement) et côté plan opérationnel en A.5.4 (articulation commerciale) : chaque équipement facturable porte un identifiant unique côté serveur central, auquel sont rattachés les modules premium activés. Le comptage est auditable à tout moment via une requête sur le registre d'assets actifs et reste évolutif : l'ajout ou la suppression d'équipements en cours de contrat se traduit immédiatement par un recalcul de la facturation, sans renégociation contractuelle. Cette mécanique conditionne aussi le calcul de la commission reversée aux intégrateurs partenaires (A.5.3) et la possibilité, pour un client Premium, de redéployer la fonction premium d'un équipement à l'autre sans réinstallation.

A.3.7 Intégration des modèles de langage (LLM) dans OpSee

Le chapitre 3 introduit en section 3.5.7 l'AI Assistant et son périmètre. Les sous-sections qui suivent en présentent l'implémentation complète, les enjeux de souveraineté et les pistes d'évolution.

L'*AI Assistant* est aujourd'hui la seule fonctionnalité d'OpSee qui dépend d'une connexion internet : toutes les autres briques fonctionnent en mode strictement hors ligne, conformément aux exigences posées en section 3.3.2. Ce statut singulier soulève des questions de confidentialité et de souveraineté propres au contexte industriel. Par ailleurs, l'intégration de modèles de langage dans les systèmes manufacturiers est un axe de recherche actif de l'industrie 4.0. Plaat et al. (2025) montrent que les LLM évoluent désormais vers des agents capables de raisonner, d'agir et d'interagir avec des outils, et Lee et Su (2024) proposent un cadre dédié, l'*Industrial Large Knowledge Model (ILKM)*, pour adapter ces modèles aux spécificités du domaine industriel.

A.3.7.1 Architecture de l'AI Assistant : agents experts et appels d'outils

L'*AI Assistant* d'OpSee ne se contente pas de répondre à des questions : il agit sur le système. Au sens de la taxonomie de Plaat et al. (2025), c'est un agent : un modèle capable de raisonner, d'invoquer des outils et d'interagir avec son environnement. Concrètement, l'assistant peut interroger la base de données de production, modifier un planning à la demande d'un opérateur autorisé et générer un tableau de bord Grafana à partir d'une description en langage naturel. Ces capacités reposent sur quatre choix architecturaux : un mécanisme d'appels d'outils fondé sur le paradigme *function-calling*, une équipe de cinq agents spécialisés, un catalogue de fonctions exposées au modèle et une propagation stricte des permissions jusqu'à chaque appel.

Boucle d'orchestration et appels d'outils.

Le mécanisme d'appels d'outils repose sur le paradigme *function-calling* : le modèle reçoit, avec sa requête, la description structurée des fonctions qu'il peut invoquer. Des bancs d'essai tels que le *Berkeley Function Calling Leaderboard* (Patil et al., 2025) mesurent la capacité d'un LLM à sélectionner et paramétrer correctement ces outils. OpSee ne recourt pas au standard ouvert *MCP* discuté plus loin, mais s'appuie directement sur l'interface *tool-use* native de l'*API Anthropic*, accessible via le *SDK* Python

`anthropic`. Le service backend `chatbot_service.py` implémente la boucle d'orchestration illustrée en figure A.57. La requête initiale appelle `client.messages.create` avec le message utilisateur, le *system prompt* de l'agent, la définition des outils disponibles et le contexte d'authentification. Si la réponse du modèle se termine par `stop_reason = "tool_use"`, le service exécute chaque outil côté serveur et réinjecte les résultats sous forme de `tool_result` dans la séquence de messages avant de relancer l'appel. Si la réponse se termine par `end_turn`, le texte produit est renvoyé à l'utilisateur. La boucle est bornée par deux garde-fous : un plafond de dix itérations par requête et une troncature des résultats dépassant 50 000 caractères, avec dégradation graduée qui réduit la taille des listes plutôt qu'opérer une coupure en milieu de texte. Le modèle par défaut est Claude Sonnet, retenu pour son équilibre entre coût et qualité, mais chaque agent peut être configuré sur Claude Haiku ou Claude Opus selon ses exigences [1].

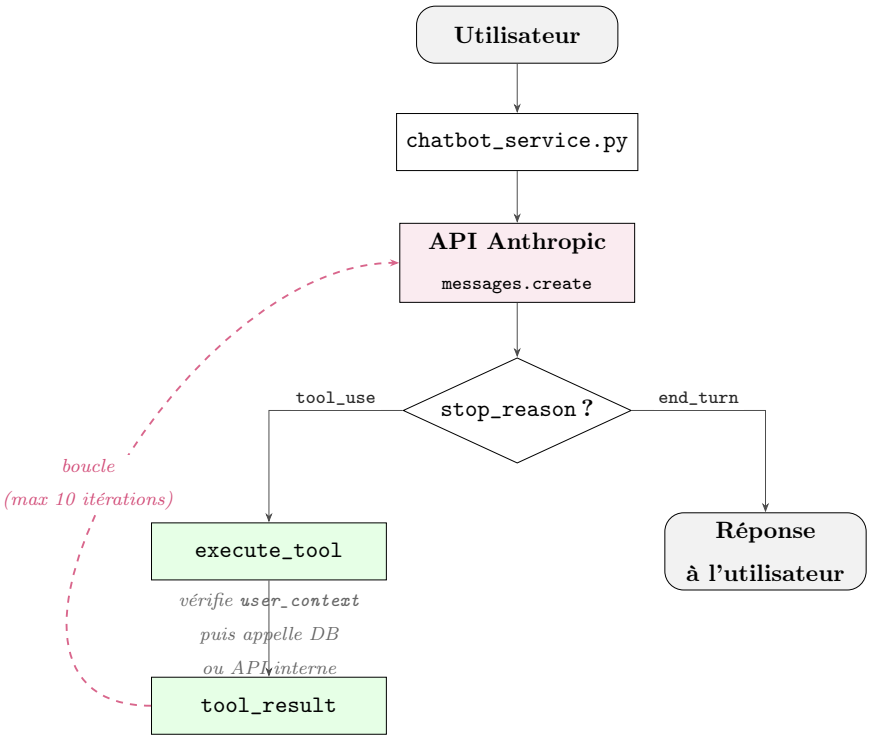


FIGURE A.57 – Boucle d'orchestration du chatbot OpSee.

1. Le modèle par défaut est stocké dans la colonne `model` de la table `m_chatbot_agent` ; il vaut actuellement `claude-sonnet-4-20250514` et reste configurable agent par agent sans redéploiement.

Cinq agents experts spécialisés.

OpSee définit cinq agents spécialisés plutôt qu'un assistant généraliste unique. L'*OEE Expert* analyse les composantes de l'OEE (disponibilité, performance, qualité) et construit des comparaisons entre équipes, équipements ou périodes. Le *Timeseries Expert* interroge les données capteurs de l'hypertable TimescaleDB `a_tag_value` en appliquant les modes d'interpolation requis (brut, linéaire, par paliers). L'agent *ML Engineer* porte un positionnement autour de la maintenance prédictive et de la détection d'anomalies, mais repose en pratique sur l'analyse statistique des données de production via *SQL (Structured Query Language)*, sans pipeline d'apprentissage automatique entraîné. Le *Grafana Agent* génère des tableaux de bord au format JSON à partir de descriptions en langage naturel, à partir des sources de données déjà déclarées dans l'instance Grafana du système. Le *Configuration Expert* couvre l'ensemble des actions de configuration du système. Chaque agent dispose de son propre *system prompt*, de son modèle Claude et de son sous-ensemble d'outils, stockés dans les tables `m_chatbot_agent` et `m_chatbot_agent_tool` pour permettre une reconfiguration sans redéploiement. Ce choix repose sur l'idée qu'un *system prompt* ciblé associé à un sous-ensemble réduit d'outils limite l'ambiguïté des requêtes et diminue le risque d'hallucinations sur des données industrielles, un enjeu documenté dans d'autres travaux de couplage MES-LLM (Yuan et al., 2025). La spécialisation par agent facilite aussi la maintenance : modifier le périmètre ou le comportement d'un expert n'affecte pas les autres.

Outils exposés au modèle.

L'*AI Assistant* dispose de vingt-cinq outils. Dix-sept sont en lecture seule et donnent accès aux données métier : équipements et OEE, séries temporelles, personnel et plannings, raisons d'arrêt, objectifs OEE et sources de données Grafana. Sept outils en écriture permettent des actions de configuration : création, mise à jour ou suppression d'entrées de planning, ajustement d'objectifs OEE, création d'équipements, assignation de capteurs et génération de tableaux de bord Grafana. Un dernier outil, `execute_sql_query`, autorise

des requêtes SQL ad hoc, mais uniquement en lecture et réservé aux administrateurs [2]. Le tableau exhaustif figure en annexe A.3.2. Chaque outil vérifie ses propres permissions avant exécution, selon un mécanisme combinant rôle administrateur et accès par menu, détaillé au paragraphe suivant.

Propagation des permissions et sécurité par construction.

La sécurité de l'*AI Assistant* est garantie par construction, non par la confiance accordée au modèle. Lorsqu'une requête arrive sur l'endpoint `/api/chatbot/chat`, la dépendance FastAPI `inject_user_context` décode le *JSON Web Token (JWT)* émis par Keycloak et place les informations utilisateur dans `request.state`. Cet objet `user_context` est transmis à chaque appel d'outil via la signature `execute_tool(..., user_context, ...)`. Avant toute requête en base, chaque outil vérifie les permissions qui lui sont propres : appartenance au rôle administrateur (`has_admin_role`), périmètre d'équipements autorisés (`_resolve_allowed_equipment`) et accès aux modules (`_has_menu_access`). Le LLM n'a aucun accès au JWT ni à Keycloak. Il appelle des fonctions Python dont le contexte d'autorisation est déjà résolu. Si un utilisateur n'a pas accès à une ligne de production, `get_equipment_list` ne la retournera pas, et le modèle ne peut pas la solliciter par un autre chemin. Les *system prompts* formalisent aussi ces contraintes : « toujours appeler `get_equipment_list` avant de manipuler des identifiants d'équipement » et « ne jamais inventer ni deviner d'identifiants ». Dans l'écosystème MCP, les attaques par *tool poisoning* et *rug pull* exploitent précisément l'absence d'identité cryptographique des outils (Song et al., 2025) : résoudre les permissions côté serveur avant que le LLM n'intervienne supprime cette surface d'attaque. Les solutions OAuth pour les standards ouverts proposées par Bhatt et al. (2025) sont discutées plus bas. Côté authentification Anthropic, deux modes coexistent : une clé serveur centralisée gérée par l'administrateur, et une clé personnelle transmise depuis le navigateur via le *header* HTTP `x-anthropic-api-key`, sans persistance côté serveur. Ce second mode est au cœur des enjeux traités plus bas.

2. Les mots-clés autorisés se limitent à `SELECT`, `WITH` et `EXPLAIN` ; le résultat est plafonné à 1 000 lignes.

A.3.7.2 Sortie de données vers l'API Anthropic

OpSee est conçu pour fonctionner sans connexion permanente à Internet : la base de données, les services d'ingestion et l'interface sont tous hébergés sur l'infrastructure du client. L'*AI Assistant* constitue le seul écart à ce principe. Chaque invocation du chatbot déclenche un appel sortant vers les serveurs d'Anthropic, ce qui pose un problème de souveraineté que l'architecture RBAC ne résout pas. Le cadre juridique de cette transmission (qualification RGPD, encadrement contractuel, mode *BYO*) est analysé à la section 4.11 du chapitre 4 ; les paragraphes qui suivent s'en tiennent au flux sortant et aux garde-fous d'implémentation.

À chaque tour de conversation, le service `chatbot_service.py` envoie à l'API Anthropic un message dont le contenu dépasse le simple texte utilisateur. Le *system prompt*, enrichi dynamiquement par `inject_user_context`, embarque l'identité et l'adresse e-mail de l'utilisateur, l'horodatage UTC et son périmètre d'accès Keycloak. À cela s'ajoutent les messages formulés en langage naturel et, pour chaque itération de la boucle d'orchestration, les résultats des outils : valeurs OEE, données de capteurs, noms d'équipements, entrées de planning, raisons d'arrêt. Ce flux mêle ainsi données à caractère personnel (adresses e-mail, noms d'opérateurs) et données industrielles sensibles (indicateurs de performance, capacités, plannings), avec les conséquences juridiques analysées à la section 4.11.

L'implémentation comporte plusieurs garde-fous techniques. La troncature graduée des résultats d'outils à 50 000 caractères plafonne le volume de données par appel. Le RBAC, hérité de l'architecture présentée plus haut, garantit que le modèle ne reçoit que les données auxquelles l'utilisateur authentifié est autorisé à accéder, et ne peut pas interroger des équipements hors de son périmètre. Le mode *Bring Your Own API key* (BYO) autorise enfin l'utilisateur final à fournir sa propre clé Anthropic via le header `x-anthropic-api-key` ; l'appel API quitte alors directement le navigateur du client vers Anthropic, sans intermédiation d'OpSee, ce qui modifie également la chaîne contractuelle (cf. section 4.11).

Ces mitigations restent cependant insuffisantes pour les contextes réglementaires les plus stricts, où toute sortie de donnée vers un service cloud doit faire l'objet d'une analyse d'impact spécifique. La seule voie permettant de garantir une souveraineté complète des données est d'éliminer la dépendance à un fournisseur LLM externe.

A.3.7.3 Perspectives : LLM local et protocole MCP

L'API Anthropic est aujourd'hui le seul point de sortie d'OpSee vers l'extérieur. Dans les contextes industriels réglementés les plus stricts, c'est un point de friction difficile à justifier. Deux pistes, encore à l'état d'exploration, permettraient de s'en affranchir : héberger le modèle directement sur l'infrastructure cliente, ou adopter le *Model Context Protocol (MCP)* pour découpler l'architecture des outils du fournisseur LLM.

LLM local sur OpEdge.

L'équipe technique d'OpSee a posé une intention claire sur le sujet : remplacer la dépendance à un LLM externe par un modèle exécuté localement sur l'OpEdge ou sur un serveur du client. Il n'existe pas encore de *proof of concept* ni de *spike* planifié, mais la direction est tracée : si le modèle tourne sur l'infrastructure du client, aucune donnée industrielle ne quitte le périmètre de l'entreprise. Zhang et al. (2025) caractérisent les inconvénients que pose l'hébergement cloud des LLM aux systèmes temps réel : latence de réseau, coût de bande passante et risques liés à la transmission de données sensibles vers des centres distants. Leur approche *EdgeShard* partitionne le réseau de neurones en fragments répartis sur des dispositifs hétérogènes, ce qui réduit la latence jusqu'à 50 % sans perte de précision mesurable. Des runtimes open source comme Ollama permettent déjà d'exécuter localement des modèles quantisés de la famille Llama, Mistral ou Qwen sur des GPU grand public, sans dépendance à un fournisseur externe (Ollama, 2025). L'obstacle pour OpEdge reste matériel : les configurations actuelles n'embarquent pas de GPU dédié, condition nécessaire pour faire tourner un modèle de taille suffisante.

MCP comme standard ouvert d'intégration.

L'implémentation actuelle de l'*AI Assistant* repose sur l'interface *tool-use* native de l'API Anthropic, ce qui lie l'architecture des outils à un seul fournisseur LLM. Le *Model Context Protocol* est une alternative qui lève cette dépendance. Lancé par Anthropic en novembre 2024 (Anthropic, 2024d), MCP définit un protocole JSON-RPC client-serveur pour la découverte dynamique et l'invocation structurée d'outils par les modèles de langage. Hou et al. (2025) le décrivent comme un protocole qui « shifts the paradigm from tool bindings hardcoded per application toward an interoperable ecosystem of composable, discoverable network services », s'inspirant du *Language Server Protocol* pour standardiser l'accès aux outils entre éditeurs de code. En un an, le protocole a atteint 97 millions de téléchargements mensuels du SDK et 10 000 serveurs actifs ; Visual Studio Code, Cursor, Claude, ChatGPT et Gemini ont tous intégré une couche MCP (Hou et al., 2025). En décembre 2025, Anthropic a cédé la gouvernance à la *Linux Foundation*, dans le cadre de la création de l'*Agentic AI Foundation (AAIF)*, co-fondée avec OpenAI et Block et soutenue par Google, Microsoft et Amazon Web Services (Linux Foundation, 2025). Pour les intégrateurs, cette neutralité de gouvernance réduit le risque de voir le protocole évoluer au seul bénéfice de son créateur. Pour OpSee, l'adoption de MCP consisterait à exposer les 25 outils de `chatbot_agents.py` comme un serveur MCP. Le gain immédiat serait l'indépendance vis-à-vis du fournisseur LLM : ce serveur fonctionnerait avec Claude, GPT-4, Gemini ou un modèle local via Ollama. Les risques propres à l'écosystème MCP (*tool poisoning*, *rug pull*, usurpation de serveur) ont été abordés plus haut. La gouvernance de la Linux Foundation et les mécanismes OAuth proposés par Bhatt et al. (2025) atténuent une partie de ces risques, à mesure que le standard mature.

Cas d'usage prospectifs.

L'architecture agentique en place rend possibles des cas d'usage qui n'ont pas besoin d'un modèle fine-tuné : ils s'appuient sur le paradigme *agent + outils*, appliqué à de nouveaux problèmes. Deng et al. (2024) montrent qu'un agent LLM équipé d'une couche

RAG (*Retrieval-Augmented Generation*) et d'un accès aux outils produit des diagnostics de panne et des recommandations de maintenance comparables aux méthodes spécialisées, sans fine-tuning préalable. Appliqué à OpSee, ce pattern suggère au moins trois extensions : le diagnostic d'arrêt enrichi, où l'agent croise les valeurs de capteurs autour d'un événement et le *reason tree* pour proposer une cause probable ; le dispatching d'opérateurs, où l'agent identifie un remplaçant disponible en croisant plannings et contraintes de quart ; et l'aide à la configuration de recettes ISA-88, où le dialogue en langage naturel guiderait la saisie des paramètres de phases *batch*. Aucun de ces usages n'est encore tracé dans le dépôt, mais le code actuel les rend déjà techniquement faisables. Un *AI Assistant* localement hébergé et interopérable via MCP répondrait aux trois tensions soulevées dans cette annexe : dépendance vis-à-vis d'un fournisseur externe, sortie de données industrielles, et couplage entre l'architecture des outils et l'API Anthropic. Ce sont précisément les points qu'un projet open-core comme OpSee a intérêt à résoudre.

A.4 Aspects juridiques (chapitre 4)

A.4.1 Audit complet des licences de la stack OpSee

Cet inventaire recense les composants tiers utilisés par OpSee, leur licence et le risque qu'ils font peser sur la commercialisation du logiciel selon le modèle open-core. Les licences ont été vérifiées dans les fichiers `LICENSE` des dépôts publics le 17 mai 2026. Les changements de licence notables (Grafana 2021, MongoDB 2018, Redis 2024, TimescaleDB 2018) sont sourcés individuellement dans la section 4.9.

La colonne *Risque* de chaque tableau ci-dessous reprend trois niveaux :

— **OK** : licence permissive, aucune contrainte sur le code propriétaire d'OpSee ;

— **Vigilance** : contrainte légère (attribution, mise à disposition de la bibliothèque) ;

— **Attention** : copyleft fort ou licence source-available, isolation requise.

Dans la colonne *Source* du tableau A.5.1.1, les composants hébergés sur GitHub sont identifiés par leur chemin `<organisation>/<dépôt>` ; chaque entrée est un lien cliquable

dans la version numérique du mémoire.

A.4.1.1 Infrastructure et services (images Docker)

Composant	**Version**	**Licence**	**Risque**	**Source**
Nginx	alpine	BSD 2-Clause	OK	nginx.org
PostgreSQL	via TimescaleDB	PostgreSQL License	OK	postgresql.org
TimescaleDB	latest-pg16	Apache 2.0 / TSL	Attention	timescale/timescaledb
Redis	7-alpine	BSD 3-Clause ($\leq$ 7.2) / SSPL+RSALv2 ($\geq$ 7.4)	Attention	redis/redis
Keycloak	latest	Apache 2.0	OK	keycloak/keycloak
OAuth2-Proxy	v7.7.1	MIT	OK	oauth2-proxy/oauth2-proxy
Eclipse Mosquitto	latest	EPL 2.0 + EDL 1.0	Vigilance	eclipse/mosquitto
Node-RED	latest	Apache 2.0	OK	node-red/node-red
Telegraf	latest	MIT	OK	influxdata/telegraf
Grafana	latest	AGPLv3 (depuis v8.0)	Attention	grafana/grafana
Streamlit (image custom)	n/a	Apache 2.0	OK	streamlit/streamlit

A.4.1.2 Backend Python (FastAPI)

Paquet	Licence	Risque	Commentaire
FastAPI	MIT	OK	Framework principal
Uvicorn	BSD 3-Clause	OK	Serveur ASGI
PyJWT[crypto]	MIT + Apache 2.0	OK	`cryptography` sous Apache
python-multipart	Apache 2.0	OK	
python-dotenv	BSD 3-Clause	OK	
psycopg2-binary	LGPLv3 + exception OpenSSL	Vigilance	Linkage dynamique
SQLAlchemy	MIT	OK	
asyncpg	Apache 2.0	OK	
aiohttp	Apache 2.0	OK	
httpx	BSD 3-Clause	OK	
pandas	BSD 3-Clause	OK	
openpyxl	MIT	OK	
XlsxWriter	BSD 2-Clause	OK	
anthropic (SDK)	MIT	OK	API Claude facturée à l'usage

A.4.1.3 Streamlit (chatbot LLM)

Paquet	Licence	Risque	Commentaire
Streamlit	Apache 2.0	OK	
plotly	MIT	OK	
scikit-learn	BSD 3-Clause	OK	

A.4.1.4 Frontend (React + MUI)

Paquet	**Licence**	**Risque**	**Commentaire**
React, React-DOM (v19)	MIT	OK	
TypeScript	Apache 2.0	OK	
Vite	MIT	OK	
@mui/material, @mui/lab	MIT	OK	MUI Community
@mui/x-data-grid (free)	MIT	OK	Aucune feature Pro
@mui/x-date-pickers (free)	MIT	OK	
@emotion/*	MIT	OK	
apexcharts, react-apexcharts	MIT	OK	
chart.js, react-chartjs-2	MIT	OK	
axios	MIT	OK	
date-fns, date-fns-tz, dayjs	MIT	OK	
es-toolkit	MIT	OK	
file-saver	MIT	OK	
react-grid-layout	MIT	OK	
react-router-dom	MIT	OK	
simplebar-react	MIT	OK	
xlsx (SheetJS CE)	Apache 2.0	OK	
@iconify/react	MIT	OK	
@fontsource/* (DM Sans, Barlow)	OFL 1.1	OK	Polices
@minimal/material-kit-react	MIT	OK	Édition Free Minimal UI
minimal-shared	MIT	OK	Hooks et utilitaires Minimal

A.4.1.5 Composants Node-RED additionnels

Paquet	**Licence**	**Risque**	**Commentaire**
node-red-contrib-opcua	Apache 2.0	OK	Connecteur OPC UA
node-red-contrib-postgresql	MIT	OK	
node-red-contrib-sparkplug	Apache 2.0	OK	Standard Sparkplug B

A.4.1.6 Services externes (SaaS)

Service	**Modèle**	**Risque**	**Commentaire**
Anthropic API (Claude)	SaaS commercial, paiement à l'usage	OK	Plafonné à 5 USD/jour pour le chatbot
DeepL API	SaaS commercial, freemium	OK	Traduction i18n

Sur les composants inventoriés, environ 98 % sont sous licences permissives (MIT, BSD, Apache 2.0) ou copyleft faible (LGPL, EPL). Les zones *Attention* et *Vigilance* sont discutées une à une dans la section 4.9 et résumées dans le tableau 4.1.

A.5 Plan opérationnel détaillé (chapitre 5)

Alors que le marketing opérationnel (section 5.2) couvre l'acquisition et la fidélisation des clients, le plan opérationnel décrit le quotidien d'OpSee : développement du logiciel, déploiement chez les PME industrielles et organisation des opérations qui suivent la mise en service. Le modèle économique d'OpSee suit une logique open-core : un noyau gratuit sous licence AGPLv3 coexiste avec deux offres propriétaires payantes facturées par équipement. Le plan opérationnel s'articule en six volets : une vue d'ensemble du modèle (section A.5.1), le cycle de vie du produit jusqu'à la mise en service client (section A.5.2), le programme partenaires intégrateurs et revendeurs (section A.5.3), l'infrastructure et la

chaîne de licensing (section A.5.4), le support et la qualité de service (section A.5.5) et enfin le pilotage et la trajectoire opérationnelle (section A.5.6).

OpSee est en phase pilote au moment de la rédaction de ce mémoire : quatre intégrateurs *early adopters* ont été signés et le premier déploiement commercial est planifié pour juin 2026 chez un premier client industriel. Le plan opérationnel présenté ci-dessous correspond donc au modèle cible vers lequel l'équipe oriente sa structuration. Les mécaniques détaillées (programme partenaires à trois niveaux, processus de certification, outils de pilotage) s'appuient sur les cadres académiques mobilisés et sur les décisions de design prises à ce stade. Elles restent à valider empiriquement à mesure que le réseau et la base clients se développent.

A.5.1 Vue d'ensemble du modèle opérationnel open-core

La figure 5.1 (politique de prix, sous-section 5.2) synthétise le modèle opérationnel d'OpSee en croisant les trois flux opérationnels (production logicielle, livraison client et exploitation au quotidien) avec les trois offres du catalogue tarifaire. Cette double lecture fait apparaître ce qui change selon l'offre et ce qui reste mutualisé.

OpSee s'inscrit dans la catégorie des éditeurs *single-vendor commercial open source* formalisée par Riehle (2012), dans laquelle une entreprise unique détient l'intégralité des droits de propriété intellectuelle d'un produit dont elle distribue librement le noyau pour stimuler l'adoption, tout en monétisant des extensions propriétaires. Ce modèle, qualifié d'open-core (“Open-Core Model”, 2026), est aussi celui d'éditeurs comme Odoo ou GitLab. OpSee décline ce modèle avec une particularité par rapport à ces références : ses deux offres propriétaires sont facturées au nombre d'équipements connectés et non au nombre d'utilisateurs ou à l'usage.

Le noyau gratuit sous licence AGPLv3, qui couvre le *logging* des données, l'analyse de tendance et un cockpit limité à ces deux fonctions, est un produit d'appel auprès des PME industrielles. Les intégrateurs s'en saisissent comme canal d'entrée de leur *funnel* commercial : ils l'installent à titre démonstratif sur quelques équipements du client et

accompagnent ensuite la conversion vers les offres payantes, sur lesquelles ils perçoivent une commission de 10 % (section A.5.3). Les deux offres propriétaires monétisent les modules avancés d'un catalogue extensible : calcul d'OEE avancé, intelligence artificielle intégrée, gestion de *batches* selon ISA-88 et reporting personnalisé. Ce catalogue continue de s'enrichir au fil de la maturation du produit. L'offre Premium, à 59 € par mois et par équipement, donne accès à une fonction du catalogue choisie au cas par cas pour chaque équipement. L'offre Entreprise, à 95 € par mois et par équipement, lève cette restriction et active simultanément toutes les fonctions du catalogue.

Côté opérationnel, la différenciation se concentre dans le flux produit. Les flux client et écosystème distinguent simplement la Gratuite des deux offres payantes, qui partagent le même régime de service. Le flux produit unifie le développement autour d'une base de code commune et concentre la principale décision opérationnelle de l'éditeur : arbitrer pour chaque nouvelle fonctionnalité sa destination, noyau gratuit ou catalogue premium (section A.5.2). Le flux client suit la même logique pour les trois offres : un intégrateur partenaire installe la solution sur le matériel adapté (OpEdge fourni par OpSee, ou serveur Linux compatible côté client) et facture sa prestation. Les compétences techniques requises pour cette mise en service, détaillées en section A.5.2, dépassent les ressources internes des PME industrielles ciblées et rendent cette intervention indispensable même pour l'offre Gratuite. L'intégrateur perçoit en sus une commission de 10 % sur les abonnements payants (section A.5.3), ce qui l'incite à orienter ses clients vers les offres Premium ou Entreprise.

Le flux écosystème distingue en revanche deux régimes. Les déploiements Gratuits sont laissés à la communauté GitHub et ne reçoivent aucune assistance OpSee après livraison. Les deux offres payantes bénéficient d'une même assistance à distance, d'un SLA identique et de mises à jour on-premise gérées de la même manière (section A.5.5). La distinction entre Premium et Entreprise ne porte donc que sur le nombre de fonctions activables par équipement.

A.5.2 Cycle de vie du produit et déploiement client

Le cycle de vie d'OpSee s'inscrit dans le rythme de développement décrit en section 3.6.2. La branche `dev` reçoit en continu les nouvelles fonctionnalités, testées sur le serveur de développement. Le passage à la branche `main`, qui alimente le serveur de démonstration, intervient lorsque l'équipe juge la version stable, à un rythme moyen d'environ un déploiement par mois. Les images Docker destinées à OpEdge sont publiées en parallèle sur le registre *GitHub Container Registry* (GHCR). Ce cycle impose deux exigences opérationnelles : garantir une compatibilité ascendante stricte sur les versions on-premise déjà installées chez les clients, et conduire en parallèle deux trajectoires de produit, le noyau libre et le catalogue de modules premium propriétaires.

L'arbitrage entre noyau gratuit et catalogue premium structure l'ensemble du cycle produit. Riehle (2012) note qu'il s'agit d'un défi récurrent pour les éditeurs *single-vendor commercial open source* : il faut motiver l'achat d'une licence commerciale sans frustrer la communauté en lui retirant des fonctionnalités qu'elle considère comme essentielles. Les éditeurs expérimentés y répondent par une approche temporelle, en différant l'ouverture de certaines fonctionnalités au noyau jusqu'à ce qu'elles soient banalisées sur le marché. Olson et al. (2018) qualifient cette logique d'« accessorize » dans la typologie de Raymond, illustrée par SugarCRM (CRM open-source assorti d'extensions propriétaires) et par MySQL (*dual licensing*). OpSee adopte la même heuristique : les fonctions de captation et de visualisation de base restent dans le noyau gratuit où elles servent de produit d'appel, tandis que les fonctions à forte valeur ajoutée sectorielle, présentées en section A.5.1, intègrent le catalogue premium. La gouvernance produit se réserve la possibilité de reclasser ces fonctions au fil du temps, dans un sens comme dans l'autre, en fonction de la maturation du marché.

L'offre Gratuite comporte un risque opérationnel propre au modèle freemium. Sur le marché grand public, une étude empirique sur 343 jeux PC distribués via Steam montre que les jeux freemium sont utilisés 34 à 64 % moins de temps et génèrent jusqu'à 92 % de revenus en moins que les jeux *pay-to-play* à contenu équivalent (Rietveld, 2018). Ces ordres

de grandeur ne sont pas directement transposables au B2B industriel mais illustrent le mécanisme sous-jacent : le découplage entre paiement et consommation prive le client d'un *sunk cost* initial. En contexte logiciel, les taux de conversion freemium observés se situent généralement entre 3 et 5 % (Bailyn, 2024 ; Koch & Benlian, 2017). Sur le segment cible d'OpSee, ce risque est partiellement compensé par le rôle de l'intégrateur : en facturant sa prestation d'installation dès l'offre Gratuite (section A.5.1), il introduit un investissement réel du client et transpose le *sunk cost* de la dimension licence à la dimension service. Cette hypothèse reste à valider empiriquement sur les premiers déploiements pilotes.

La mise en service suit une démarche identique pour les trois offres : un intégrateur partenaire conduit successivement l'analyse des besoins, l'installation logicielle (sur OpEdge ou serveur Linux compatible côté client), la configuration des équipements et de la hiérarchie ISA-88, le raccordement des automates via OPC-UA et MQTT, le provisionnement des comptes Keycloak et la formation des opérateurs. L'offre Premium ajoute une étape spécifique : le choix de la fonction premium activée par équipement, conduit avec le client lors de l'analyse des besoins en croisant profil sectoriel (agroalimentaire, plasturgie, métallurgie…), criticité réglementaire éventuelle (traçabilité, GMP) et trajectoire de digitalisation interne. La structure technique sous-jacente relève de la chaîne de licensing détaillée en section A.5.4.

Cette mécanique de cycle produit et de mise en service repose entièrement sur le réseau d'intégrateurs partenaires, dont la structuration opérationnelle (recrutement, certification, niveaux de qualification, mécanique de commissionnement) est détaillée en section A.5.3.

A.5.3 Programme partenaires intégrateurs et revendeurs

Dans le modèle d'OpSee, les partenaires intégrateurs sont à la fois le canal de distribution principal et l'infrastructure humaine du déploiement chez le client. Shahrivar et al. (2018) placent la position dans le *value network* parmi les huit composantes critiques du business model COSS *(Commercial Open Source Software)* et soulignent que les partenaires apportent deux contributions complémentaires : les services de mise en

œuvre, et un accès aux clients industriels que l'éditeur ne peut atteindre directement. Jansen (2020) formalise cette logique dans le *Software Ecosystem Governance Maturity Model* (SEG-M2), dont la capability *partner promotion and grooming*, qui couvre le repérage, la formation, la certification, l'évaluation périodique et l'exclusion potentielle des partenaires, fournit le cadre structurant du programme à trois niveaux d'OpSee.

Le programme s'organise en trois niveaux progressifs, désignés Bronze, Silver et Gold. Le niveau Bronze regroupe les nouveaux entrants ayant validé la certification minimale (configuration réseau OT, raccordement OPC-UA et MQTT, provisionnement Keycloak, modélisation ISA-88). Ils peuvent vendre les trois offres dès leur certification. Le niveau Silver concerne les intégrateurs ayant validé une certification avancée et démontré un volume d'activité minimum (typiquement une dizaine de déploiements concluants par an). Ils accèdent à un environnement de démo dédié, à un accès anticipé à la roadmap fonctionnelle et à un canal de support technique prioritaire. Le niveau Gold désigne les partenaires de référence dans les secteurs stratégiques (agroalimentaire, plasturgie, métallurgie, chimie). Le statut requiert un audit annuel par OpSee, un score *Net Promoter Score* (NPS) client supérieur à un seuil défini et une activité commerciale soutenue. Ces conditions permettent à l'inverse une rétrogradation ou un retrait de certification, pratique de *partner exclusion* identifiée par Jansen comme l'aboutissement de la maturité dans la gestion partenariale.

Ce modèle s'inspire du programme partenaires d'Odoo, qui structure son réseau européen autour des niveaux Ready, Silver et Gold avec un seuil de rétention client de 80 % pour le maintien du statut Gold (Odoo S.A., 2026). OpSee retient « Bronze » plutôt que « Ready » pour le tier d'entrée afin de rendre la progression hiérarchique immédiatement lisible aux clients PME.

La rémunération suit une logique uniforme : l'intégrateur perçoit une commission de 10 % sur les abonnements Premium et Entreprise qu'il vend, indépendamment de son niveau de certification. La différenciation entre Bronze, Silver et Gold s'organise autour de trois dimensions non financières qui amplifient indirectement le volume d'affaires des

partenaires les plus engagés.

Les outils de vente progressent au fil de la certification. Bronze accède au portail partenaire et à la documentation technique. Silver bénéficie en outre d'un kit de démonstration dédié (par exemple le trieur motorisé de balles de ping-pong rouges et blanches utilisé sur les salons d'OpSee) et de la transmission de leads qualifiés sur sa zone géographique et son secteur. Gold reçoit en priorité les leads grands comptes et multi-sites captés par OpSee.

Le support et l'anticipation produit suivent la même gradation. Bronze dispose du helpdesk standard. Silver bénéficie d'un helpdesk prioritaire avec un SLA réduit et d'un accès à la roadmap fonctionnelle jusqu'à six mois avant la publication officielle. Gold se voit attribuer un account manager OpSee dédié et une place dans un comité client trimestriel offrant une influence directe sur les priorités produit.

La reconnaissance commerciale s'amplifie également avec la certification. Bronze figure dans l'annuaire des partenaires sur le site OpSee. Silver dispose d'un profil enrichi (cas d'usage, secteurs cibles) et participe à du co-marketing léger (webinaires conjoints, posts sociaux). Gold est mis en avant sur une page « partenaires de référence » et bénéficie d'un co-marketing renforcé : événements co-organisés, études de cas et white papers co-brandés, et abondement marketing (*Marketing Development Funds*) sur les opérations communes.

Cette architecture pose une question classique en marketing B2B : éviter qu'un programme à incitations financières ne devienne un mécanisme transactionnel froid, contre-productif sur l'engagement. Pelser et al. (2015) montrent empiriquement, sur un échantillon de 284 vendeurs revendeurs d'un éditeur Fortune 100 du secteur high-tech, que les programmes partenaires génèrent simultanément deux états émotionnels distincts. La *gratitude* (appréciation positive) augmente l'effort de vente et l'engagement avec respectivement $\beta = 0{,}20$ et $\beta = 0{,}42$. À l'inverse, l'*indebtedness* (sentiment d'obligation) les diminue avec $\beta = -0{,}19$ et $\beta = -0{,}31$. La gratitude est tirée par la valeur perçue du programme et par la perception de motifs bienveillants. Pour OpSee, cela traduit deux directives. La communication autour du programme doit mettre en avant l'investissement

de l'éditeur dans la réussite du partenaire (formations, support, accès roadmap), plutôt que l'attente de retours commerciaux. Le programme doit également valoriser l'effort fourni par le partenaire (certifications obtenues, formations complétées) plutôt que sa seule performance brute.

Sur le plan opérationnel, le programme met à disposition un portail partenaire commun à tous les niveaux, qui regroupe la documentation technique et les supports commerciaux. La gestion qualité du réseau s'organise autour de trois mécanismes complémentaires implémentant ensemble la pratique *partner health analysis* de la capability *partner promotion and grooming* dans le SEG-M2 : la formation continue (modules en ligne et sessions présentielles, dispensées en partenariat avec AgiNtech), l'audit annuel par OpSee, et la rétrogradation ou le retrait de certification lorsque les seuils de qualité ne sont plus tenus.

Aux niveaux Silver et Gold s'ajoute une fonction commerciale spécifique : le conseil avant-vente sur le choix de la fonction premium par équipement, introduit en section A.5.2. L'intégrateur oriente la sélection selon le profil du client : la gestion *batch* chez un industriel ISA-88 actif (chimie, agroalimentaire), le reporting chez un client à forte criticité réglementaire, l'intelligence artificielle chez un client mature en digitalisation. Cette compétence n'est attendue qu'à partir du niveau Silver.

Cette infrastructure partenariale s'appuie elle-même sur une infrastructure technique : un système de licensing capable de provisionner les modules premium par équipement, de tracer les ventes attribuables à chaque partenaire et de gérer la chaîne de mise à jour on-premise (section A.5.4).

A.5.4 Infrastructure, fournisseurs et chaîne de licensing

L'infrastructure interne d'OpSee s'organise autour de trois environnements déjà décrits en section 3.6.2 : un serveur de développement alimenté par la branche `dev`, un serveur de démonstration alimenté par la branche `main` et un registre d'images GHCR qui distribue les conteneurs Docker destinés aux déploiements OpEdge chez les clients. À cette infrastructure interne s'ajoute un ensemble de fournisseurs externes dont la criticité

opérationnelle varie selon leur substituabilité.

La dépendance fournisseur est largement documentée dans la littérature comme un frein à l'adoption de services en ligne. Opara-Martins et al. (2016) définissent le *vendor lock-in* comme la situation dans laquelle l'entreprise cliente est dépendante de l'implémentation technologique d'un fournisseur unique et ne peut migrer sans coûts substantiels, contraintes juridiques ou incompatibilités techniques. Leur enquête auprès de 114 organisations britanniques montre que 71 % des répondants jugent ce risque dissuasif pour l'extension de leur usage du cloud, et que les trois stratégies de mitigation les plus citées sont la sélection rigoureuse des fournisseurs en amont du contrat (66,4 %), l'existence d'un environnement ouvert favorisant la concurrence entre fournisseurs (52,3 %) et l'usage de composants logiciels à interfaces standardisées (39,3 %). Pour OpSee, le seul fournisseur dont la défaillance affecte directement le produit livré au client est Anthropic, qui alimente le chatbot d'assistance à l'opérateur. Cette dépendance a fait l'objet d'une voie de mitigation identifiée en section 3.5.7 : exposer les outils internes via MCP, un standard ouvert d'intégration entre LLM et applications désormais gouverné par la *Linux Foundation*. Les autres fournisseurs (DeepL pour la traduction automatique, GHCR pour les images Docker au format *Open Container Initiative* (OCI), cloud d'hébergement des serveurs dev et démo, processeur de paiement, secrétariat social, expert-comptable) reposent sur des formats ou des protocoles standardisés et restent substituables sans rupture du service.

La chaîne de licensing est le pivot opérationnel de l'open-core OpSee. Le mécanisme technique est formalisé dans l'exigence fonctionnelle EF-13 (3.3.1.13) : un serveur de licences distant associe à chaque équipement abonné un identifiant et la liste de modules premium activés, et émet une signature locale cryptographiquement vérifiable que l'OpEdge conserve pour fonctionner pendant une période de grâce en cas de coupure réseau. À distinguer de la distribution des binaires elle-même, qui passe par les images GHCR évoquées plus haut : GHCR livre le code, le serveur de licences valide les droits d'activation. La couche commerciale qui s'appuie sur ce mécanisme conditionne la facturation par équipement (3.2), le calcul de la commission de 10 % reversée à l'intégrateur

(section A.5.3) et la possibilité, pour un client Premium, de basculer la fonction premium d'un équipement à l'autre sans réinstallation complète. L'implémentation reste à finaliser avant le premier déploiement commercial de juin 2026.

Cette infrastructure et cette chaîne de licensing fournissent le socle opérationnel que le support et la qualité de service, abordés en section A.5.5, viennent exploiter au quotidien.

A.5.5 Support et qualité de service

Le support des déploiements OpSee s'organise sur deux niveaux complémentaires. L'intégrateur certifié qui a conduit la mise en service assure la première ligne : suivi opérationnel chez le client final, résolution des incidents de paramétrage et formation continue des opérateurs. OpSee porte la seconde ligne : helpdesk technique sur les incidents que l'intégrateur ne peut traiter seul, escalade sur le code source et livraison des mises à jour. Cette répartition préserve la cohérence du modèle où l'intégrateur reste le contact privilégié du client industriel.

Le régime de service est strictement aligné sur le découpage tarifaire défini en section A.5.1. L'offre Gratuite ne donne droit à aucune assistance directe d'OpSee : les utilisateurs s'appuient sur la documentation publique et sur le canal communautaire (issues et *pull requests* publiques sur le dépôt GitHub du noyau). Les offres Premium et Entreprise ouvrent un périmètre de service identique : helpdesk OpSee à distance, SLA contractuel et mises à jour on-premise gérées de la même manière. Aucune différence de service ne sépare Premium d'Entreprise. La distinction tarifaire entre les deux porte exclusivement sur le nombre de fonctions premium activables par équipement (section A.5.1).

Les engagements de service Premium et Entreprise reposent sur trois niveaux de sévérité. Un incident bloquant la production d'un équipement déclenche une prise en charge sous deux heures ouvrées avec un objectif de résolution sous huit heures. Une dégradation fonctionnelle non bloquante est traitée sous un jour ouvré. Les questions de paramétrage et les demandes d'évolution sont qualifiées sous trois jours ouvrés. Les mises à jour de sécurité et les correctifs critiques sont poussés en flux continu sur les déploiements abonnés,

tandis que les mises à jour fonctionnelles suivent un cycle de release on-premise négocié avec le client pour respecter les fenêtres de maintenance industrielle. Ces engagements seront consignés dans le contrat d'abonnement à finaliser avec les premiers clients commerciaux à partir de juin 2026.

La qualité du service est suivie par quatre indicateurs. Le *Mean Time To Resolve* (MTTR) sur incidents bloquants mesure la performance opérationnelle directe. Le taux d'escalade depuis l'intégrateur vers OpSee mesure inversement l'autonomie du réseau certifié et constitue un retour sur l'efficacité du programme de formation détaillé en section A.5.3. Le NPS client, collecté par les intégrateurs auprès de leurs clients industriels, joue un double rôle : il alimente la condition de promotion Gold introduite en section A.5.3 et fournit à OpSee un proxy de satisfaction produit. Pour limiter le biais lié au fait que l'intégrateur collecte un indicateur dont dépend sa propre certification, OpSee se réserve la possibilité d'enquêter directement auprès d'un échantillon de clients lors de l'audit annuel des partenaires Gold. Le NPS partenaire, conduit annuellement par OpSee auprès des intégrateurs certifiés, mesure leur expérience du programme et la qualité du support technique reçu.

Ces indicateurs alimentent le tableau de bord de pilotage et la trajectoire d'évolution opérationnelle, détaillés en section A.5.6.

A.5.6 Pilotage et trajectoire opérationnelle

Le pilotage couple une grille d'indicateurs (section A.5.6.1) et une trajectoire à trois phases (section A.5.6.2) qui en conditionne la mise en œuvre.

A.5.6.1 Indicateurs de pilotage

Shahrivar et al. (2018) formalisent le business model COSS comme un système de huit composantes critiques regroupées en trois catégories (proposition, création/livraison et capture de la valeur), dont la position dans le *value network*, les sources de revenus et la structure coût-bénéfice. OpSee regroupe les indicateurs de pilotage associés à ces

composantes en quatre axes opérationnels qui résument l'état de santé du modèle.

L'axe acquisition et conversion suit le pool d'équipements en offre Gratuite et le taux de conversion vers les offres payantes. Les benchmarks publiés situent la conversion freemium typique entre 3 et 5 % (Bailyn, 2024 ; Koch & Benlian, 2017), et les hypothèses retenues dans le plan financier (10 à 20 % selon les scénarios) reflètent le caractère déjà intégré de l'offre Gratuite chez OpSee. Cet axe constitue l'un des paramètres les plus sensibles du modèle et reste à valider lors de la phase pilote. L'axe mix de revenu suit la répartition des équipements entre Premium et Entreprise et la distribution des fonctions activées par les clients Premium, cette dernière fournissant le signal opérationnel pour reclasser une fonction du catalogue premium vers le noyau gratuit lorsque sa banalisation l'exige (section A.5.2). L'axe performance du réseau capitalise sur les indicateurs introduits en section A.5.5 (MTTR, taux d'escalade, NPS client, NPS partenaire) et y ajoute la pyramide d'effectifs Bronze, Silver et Gold du programme partenaires. L'axe dépendance fournisseur surveille enfin le coût marginal des appels Anthropic par déploiement, indicateur direct du risque de *vendor lock-in* discuté en section A.5.4.

A.5.6.2 Trajectoire d'évolution opérationnelle

La trajectoire opérationnelle d'OpSee se décompose en trois phases successives, conditionnées à la validation des seuils définis ci-dessus.

La phase de pilote (juin 2026 à mi-2027) cherche à valider le modèle avec les quatre intégrateurs *early adopters* et le premier client commercial : consolidation des SLA, formalisation de la chaîne de licensing par équipement, mesure des premiers taux de conversion réels. Les trois recrutements à plein temps prévus à partir de septembre 2026 dans le plan financier accompagnent cette consolidation, l'équipe initiale passant à six ETP en janvier 2027. La phase de structuration (mi-2027 à mi-2028) assure la montée en puissance du programme partenaires, avec les premiers passages Bronze vers Silver, l'élargissement progressif du catalogue de fonctions premium en fonction des retours terrain et la formalisation des processus de release et de support. La phase de scale (mi-2028 à mi-2029)

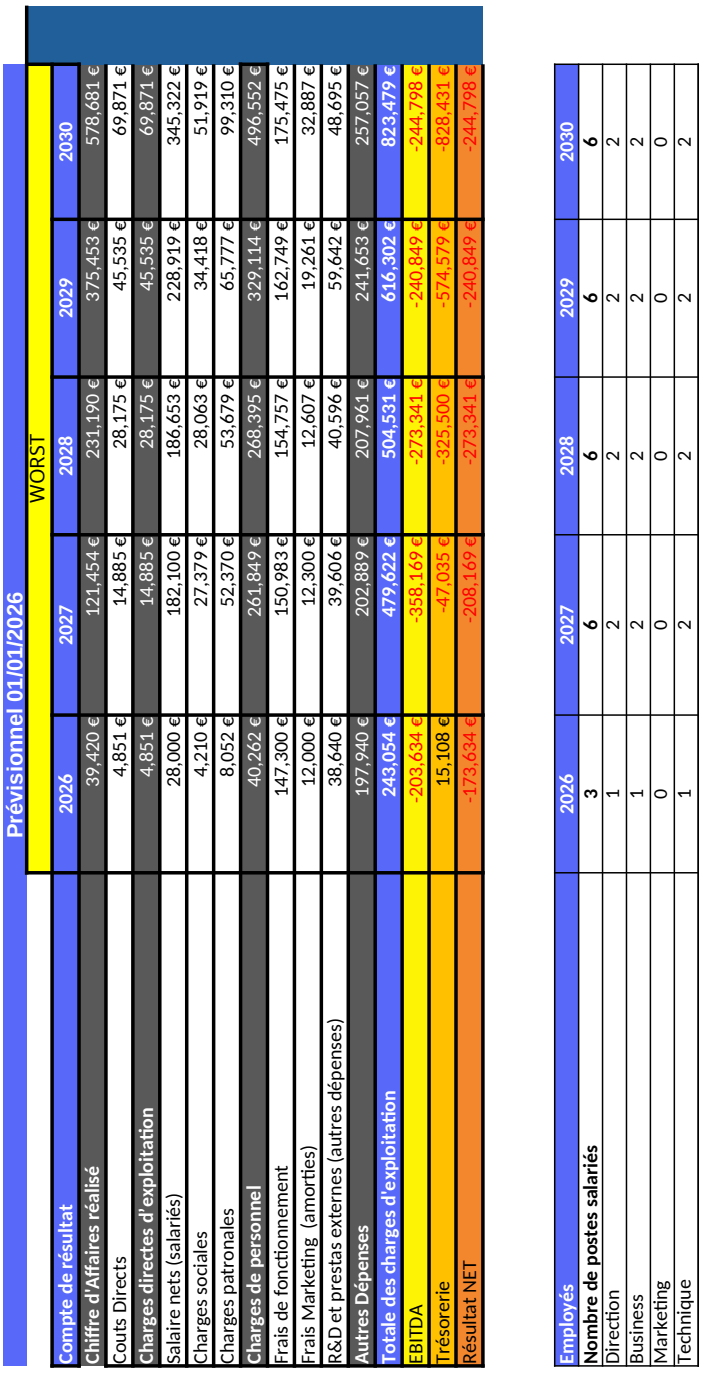
industrialise les opérations, avec l'émergence des premiers partenaires Gold dans les secteurs stratégiques identifiés en section A.5.3 et une ouverture potentielle au-delà de la Belgique selon la vitesse d'absorption du marché domestique.

Cette trajectoire définit le modèle cible. Le franchissement de chaque phase reste conditionné aux retours du terrain, conformément au cadrage posé en section A.5.

A.6 Plan financier (chapitre 7)

Les feuilles principales du plan financier sont reproduites ci-dessous en orientation paysage, telles qu'exportées du classeur consolidé. Elles complètent les tableaux synthétiques présentés dans le corps du chapitre 7.

A.6.1 Synthèse du scénario *Worst*



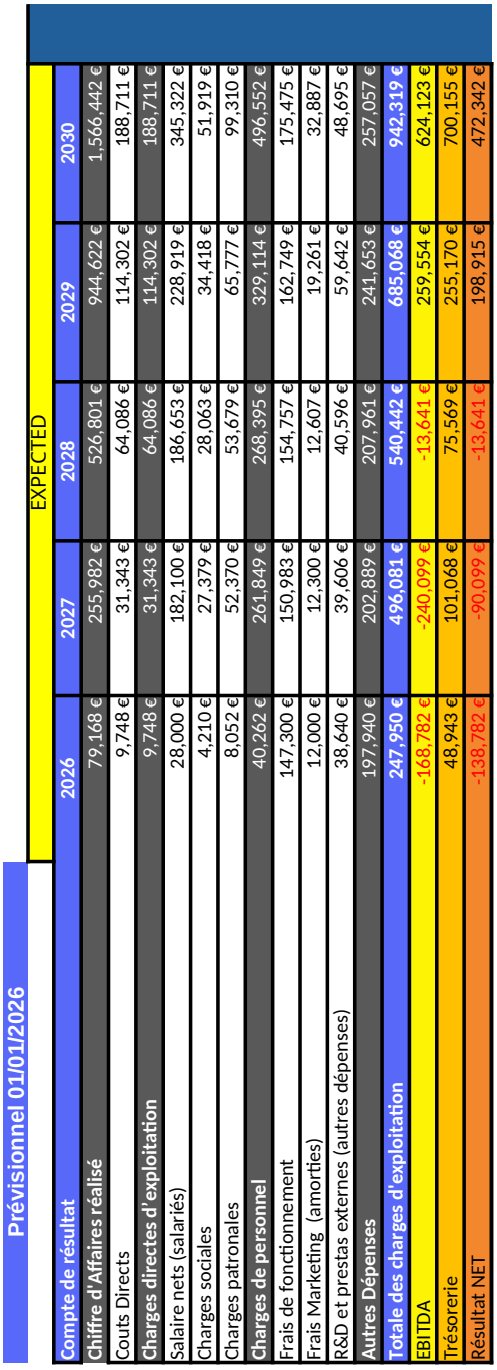
Prévisionnel 01/01/2026

WORST

Compte de résultat	2026	2027	2028	2029	2030
Chiffre d'Affaires réalisé	39,420 €	121,454 €	231,190 €	375,453 €	578,681 €
Couts Directs	4,851 €	14,885 €	28,175 €	45,535 €	69,871 €
Charges directes d'exploitation	4,851 €	14,885 €	28,175 €	45,535 €	69,871 €
Salaire nets (salariés)	28,000 €	182,100 €	186,653 €	228,919 €	345,322 €
Charges sociales	4,210 €	27,379 €	28,063 €	34,418 €	51,919 €
Charges patronales	8,052 €	52,370 €	53,679 €	65,777 €	99,310 €
Charges de personnel	40,262 €	261,849 €	268,395 €	329,114 €	496,552 €
Frais de fonctionnement	147,300 €	150,983 €	154,757 €	162,749 €	175,475 €
Frais Marketing (amorties)	12,000 €	12,300 €	12,607 €	19,261 €	32,887 €
R&D et prestas externes (autres dépenses)	38,640 €	39,606 €	40,596 €	59,642 €	48,695 €
Autres Dépenses	197,940 €	202,889 €	207,961 €	241,653 €	257,057 €
Totale des charges d'exploitation	243,054 €	479,622 €	504,531 €	616,302 €	823,479 €
EBITDA	-203,634 €	-358,169 €	-273,341 €	-240,849 €	-244,798 €
Trésorerie	15,108 €	-47,035 €	-325,500 €	-574,579 €	-828,431 €
Résultat NET	-173,634 €	-208,169 €	-273,341 €	-240,849 €	-244,798 €

Employés	2026	2027	2028	2029	2030
Nombre de postes salariés	**3**	**6**	**6**	**6**	**6**
Direction	1	2	2	2	2
Business	1	2	2	2	2
Marketing	0	0	0	0	0
Technique	1	2	2	2	2

A.6.2 Synthèse du scénario *Expected*

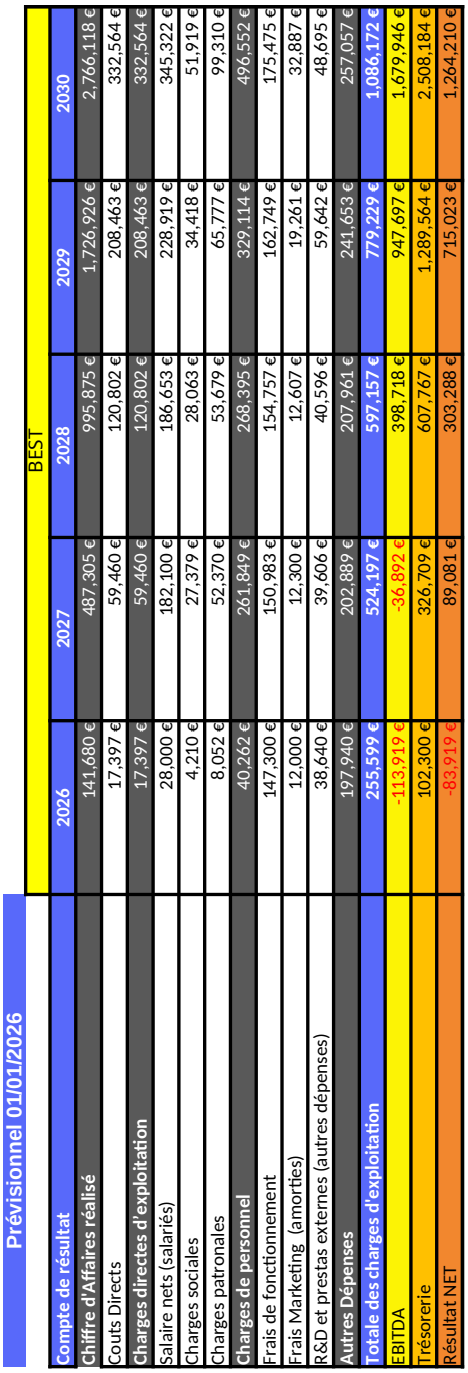


Prévisionnel 01/01/2026

EXPECTED

Compte de résultat	2026	2027	2028	2029	2030
Chiffre d'Affaires réalisé	79,168 €	255,982 €	526,801 €	944,622 €	1,566,442 €
Couts Directs	9,748 €	31,343 €	64,086 €	114,302 €	188,711 €
Charges directes d'exploitation	9,748 €	31,343 €	64,086 €	114,302 €	188,711 €
Salaire nets (salariés)	28,000 €	182,100 €	186,653 €	228,919 €	345,322 €
Charges sociales	4,210 €	27,379 €	28,063 €	34,418 €	51,919 €
Charges patronales	8,052 €	52,370 €	53,679 €	65,777 €	99,310 €
Charges de personnel	40,262 €	261,849 €	268,395 €	329,114 €	496,552 €
Frais de fonctionnement	147,300 €	150,983 €	154,757 €	162,749 €	175,475 €
Frais Marketing (amorties)	12,000 €	12,300 €	12,607 €	19,261 €	32,887 €
R&D et prestas externes (autres dépenses)	38,640 €	39,606 €	40,596 €	59,642 €	48,695 €
Autres Dépenses	197,940 €	202,889 €	207,961 €	241,653 €	257,057 €
Totale des charges d'exploitation	**247,950 €**	**496,081 €**	**540,442 €**	**685,068 €**	**942,319 €**
EBITDA	-168,782 €	-240,099 €	-13,641 €	259,554 €	624,123 €
Trésorerie	48,943 €	101,068 €	75,569 €	255,170 €	700,155 €
Résultat NET	-138,782 €	-90,099 €	-13,641 €	198,915 €	472,342 €

A.6.3 Synthèse du scénario *Best*



Prévisionnel 01/01/2026	BEST				
Compte de résultat	**2026**	**2027**	**2028**	**2029**	**2030**
Chiffre d'Affaires réalisé	141,680 €	487,305 €	995,875 €	1,726,926 €	2,766,118 €
Couts Directs	17,397 €	59,460 €	120,802 €	208,463 €	332,564 €
Charges directes d'exploitation	17,397 €	59,460 €	120,802 €	208,463 €	332,564 €
Salaire nets (salariés)	28,000 €	182,100 €	186,653 €	228,919 €	345,322 €
Charges sociales	4,210 €	27,379 €	28,063 €	34,418 €	51,919 €
Charges patronales	8,052 €	52,370 €	53,679 €	65,777 €	99,310 €
Charges de personnel	40,262 €	261,849 €	268,395 €	329,114 €	496,552 €
Frais de fonctionnement	147,300 €	150,983 €	154,757 €	162,749 €	175,475 €
Frais Marketing (amorties)	12,000 €	12,300 €	12,607 €	19,261 €	32,887 €
R&D et prestas externes (autres dépenses)	38,640 €	39,606 €	40,596 €	59,642 €	48,695 €
Autres Dépenses	197,940 €	202,889 €	207,961 €	241,653 €	257,057 €
Totale des charges d'exploitation	255,599 €	524,197 €	597,157 €	779,229 €	1,086,172 €
EBITDA	-113,919 €	-36,892 €	398,718 €	947,697 €	1,679,946 €
Trésorerie	102,300 €	326,709 €	607,767 €	1,289,564 €	2,508,184 €
Résultat NET	-83,919 €	89,081 €	303,288 €	715,023 €	1,264,210 €

A.6.4 Compte de résultats prévisionnel

WORST CASE

	2026	2027	2028	2029	2030
Vente produit	39,420.00	121,453.50	231,189.84	375,452.52	578,680.65
Chiffre d'affaires	**39,420.00**	**121,453.50**	**231,189.84**	**375,452.52**	**578,680.65**
/	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Produits d'exploitation (A)	**39,420.00**	**121,453.50**	**231,189.84**	**375,452.52**	**578,680.65**
commission partenaire	3,942.00	12,145.35	23,118.98	37,545.25	57,868.06
serveur	212.00	612.00	1,058.80	1,572.00	2,215.20
Backups	106.00	306.00	529.40	786.00	1,107.60
Outils de développements	591.30	1,821.80	3,467.85	5,631.79	8,680.21
COUTS DIRECTS D'EXPLOITATION (B)	**4,851.30**	**14,885.15**	**28,175.03**	**45,535.04**	**69,871.07**
Salaires nets	28,000.00	182,100.00	186,652.50	228,918.81	345,321.78
Charges salariales	4,209.82	27,378.89	28,063.36	34,418.14	51,919.43
Charges patronales	8,052.46	52,369.72	53,678.97	65,776.72	99,310.30
Frais de fonctionnement	147,300.00	150,982.50	154,757.06	162,749.35	175,474.98
Marketing - Commercial	12,000.00	12,300.00	12,607.50	19,261.26	32,886.86
Prestations externes	12,000.00	12,300.00	12,607.50	12,922.69	13,245.75
Dépenses R&D (hors investissements)	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Propriété intellectuelle, frais juridiques associés	1,440.00	1,476.00	1,512.90	1,550.72	1,589.49
Investissements productifs	25,200.00	25,830.00	26,475.75	45,168.86	33,859.46
Charges d'exploitation (C)	**238,202.28**	**464,737.11**	**476,355.54**	**570,766.56**	**753,608.06**
Résultat d'exploitation (D = A - B - C)	**(203,634.58)**	**(357,369.77)**	**(273,340.73)**	**(240,849.08)**	**(244,799.48)**
Subventions d'exploitation	30,000.00	150,000.00	0.00	0.00	0.00
Produits financiers					
Frais financiers (intérêts et autres frais bancaires)	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Résultat avant impôts (E)	**(173,634.58)**	**(207,369.77)**	**(273,340.73)**	**(240,849.08)**	**(244,799.48)**
impôts sur les sociétés	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Résultat net	**(173,634.58)**	**(207,369.77)**	**(273,340.73)**	**(240,849.08)**	**(244,799.48)**

EXPECTED CASE

	2026	2027	2028	2029	2030
Vente produit	79,168.00	255,981.60	526,800.96	944,622.00	1,566,442.35
Chiffre d'affaires	**79,168.00**	**255,981.60**	**526,800.96**	**944,622.00**	**1,566,442.35**
/	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Produits d'exploitation (A)	**79,168.00**	**255,981.60**	**526,800.96**	**944,622.00**	**1,566,442.35**
commission partenaire	7,916.80	25,598.16	52,680.10	94,462.20	156,644.24
serveur	428.80	1,270.40	2,336.00	3,780.00	5,713.60
Backups	214.40	635.20	1,168.00	1,890.00	2,856.80
Outils de développements	1,187.52	3,839.72	7,902.01	14,169.33	23,496.64
COUTS DIRECTS D'EXPLOITATION (B)	**9,747.52**	**31,343.48**	**64,086.11**	**114,301.53**	**188,711.27**
Salaires nets	28,000.00	182,100.00	186,652.50	228,918.81	345,321.78
Charges salariales	4,209.82	27,378.89	28,063.36	34,418.14	51,919.43
Charges patronales	8,052.46	52,369.72	53,678.97	65,776.72	99,310.30
Frais de fonctionnement	147,300.00	150,982.50	154,757.06	162,749.35	175,474.98
Marketing - Commercial	12,000.00	12,300.00	12,607.50	19,261.26	32,886.86
Prestations externes	12,000.00	12,300.00	12,607.50	12,922.69	13,245.75
Dépenses R&D (hors investissements)	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Propriété intellectuelle, frais juridiques associés	1,440.00	1,476.00	1,512.90	1,550.72	1,589.49
Investissements productifs	25,200.00	25,830.00	26,475.75	45,168.86	33,859.46
Charges d'exploitation (C)	**238,202.28**	**464,737.11**	**476,355.54**	**570,766.56**	**753,608.06**
Résultat d'exploitation (D = A - B - C)	**(168,781.80)**	**(240,098.99)**	**(13,640.68)**	**259,553.91**	**624,123.02**

Subventions d'exploitation	30,000.00	150,000.00	0.00	0.00	0.00
Produits financiers					
Frais financiers (intérêts et autres frais bancaires)		0.00			
Résultat avant impôts (E)	(138,781.80)	(90,099.00)	(13,640.69)	259,553.91	624,123.02
impôts sur les sociétés	0.00	0.00	0.00	60,638.48	151,780.76
Résultat net	**(138,781.80)**	**(90,099.00)**	**(13,640.69)**	**198,915.44**	**472,342.27**
BEST CASE					
	2026	**2027**	**2028**	**2029**	**2030**
Vente produit	141,680.00	487,305.00	995,875.02	1,726,926.45	2,766,117.85
Chiffre d'affaires	**141,680.00**	**487,305.00**	**995,875.02**	**1,726,926.45**	**2,766,117.85**
/	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Produits d'exploitation (A)	**141,680.00**	**487,305.00**	**995,875.02**	**1,726,926.45**	**2,766,117.85**
commission partenaire	14,168.00	48,730.50	99,587.50	172,692.65	276,611.78
serveur	736.00	2,280.00	4,184.00	6,577.60	9,640.00
Backups	368.00	1,140.00	2,092.00	3,288.80	4,820.00
Outils de développements	2,125.20	7,309.58	14,938.13	25,903.90	41,491.77
COUTS DIRECTS D'EXPLOITATION (B)	**17,397.20**	**59,460.08**	**120,801.63**	**208,462.94**	**332,563.55**
Salaires nets	28,000.00	182,100.00	186,652.50	228,918.81	345,321.78
Charges salariales	4,209.82	27,378.89	28,063.36	34,418.14	51,919.43
Charges patronales	8,052.46	52,369.72	53,678.97	65,776.72	99,310.30
Frais de fonctionnement	147,300.00	150,982.50	154,757.06	162,749.35	175,474.98
Marketing - Commercial	12,000.00	12,300.00	12,607.50	19,261.26	32,886.86
Prestations externes	12,000.00	12,300.00	12,607.50	12,922.69	13,245.75
Dépenses R&D (hors investissements)	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Propriété intellectuelle, frais juridiques associés	1,440.00	1,476.00	1,512.90	1,550.72	1,589.49
Investissements productifs	25,200.00	25,830.00	26,475.75	45,168.86	33,859.46
Charges d'exploitation (C)	**238,202.28**	**464,737.11**	**476,355.54**	**570,766.56**	**753,608.06**
Résultat d'exploitation (D = A - B - C)	**(113,919.48)**	**(36,892.19)**	**398,717.85**	**947,696.95**	**1,679,946.24**
Subventions d'exploitation	30,000.00	150,000.00	0.00	0.00	0.00
Produits financiers					
Frais financiers (intérêts et autres frais bancaires)		0.00			
Résultat avant impôts (E)	(83,919.48)	113,107.81	398,717.85	947,696.95	1,679,946.24
impôts sur les sociétés	0.00	24,026.95	95,429.46	232,674.24	415,736.56
Résultat net	**(83,919.48)**	**89,080.86**	**303,288.39**	**715,022.72**	**1,264,209.68**

A.6.5 Bilan prévisionnel

Bilan prévisionnel – OpSee

Période 2026 – 2030 · trois scénarios (Worst / Expected / Best)

Poste	WORST CASE					EXPECTED CASE					BEST CASE				
	2026	2027	2028	2029	2030	2026	2027	2028	2029	2030	2026	2027	2028	2029	2030
ACTIF															
Immobilisations incorporelles (logiciel, IP, marque)	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
Trésorerie disponible	15 158 €	-46 977 €	-325 143 €	-574 310 €	-838 604 €	48 943 €	101 125 €	75 626 €	254 997 €	699 980 €	102 300 €	326 766 €	607 824 €	1 289 391 €	2 908 011 €
Créances clients (BFR)	3,285 €	10,121 €	19,266 €	31,288 €	49,223 €	6,597 €	21,332 €	43,900 €	78,719 €	130,537 €	11,807 €	40,409 €	82,990 €	143,911 €	230,350 €
TOTAL ACTIF	**26,364 €**	**-31,802 €**	**-305,143 €**	**-543,464 €**	**-780,381 €**	**61,218 €**	**122,457 €**	**119,526 €**	**333,716 €**	**830,519 €**	**116,081 €**	**367,375 €**	**690,813 €**	**1,433,302 €**	**2,738,521 €**
Créances TVA Etat (crédit Q4)	7,974 €	5,054 €	1,034 €	—	—	5,678 €	—	—	—	—	1,974 €	—	—	—	—
PASSIF															
Capital social	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
Apports successifs cumulés	200,000 €	350,000 €	350,000 €	350,000 €	350,000 €	200,000 €	350,000 €	350,000 €	350,000 €	350,000 €	200,000 €	350,000 €	350,000 €	350,000 €	350,000 €
Résultats reportés cumulés	-173,634 €	-381,802 €	-655,143 €	-893,992 €	-1,140,791 €	-138,782 €	-228,981 €	-240,321 €	-43,400 €	428,736 €	-83,919 €	5,161 €	308,450 €	1,023,472 €	2,287,885 €
TOTAL CAPITAUX PROPRES	**26,366 €**	**-31,802 €**	**-305,143 €**	**-543,992 €**	**-790,791 €**	**61,218 €**	**121,019 €**	**109,679 €**	**306,599 €**	**778,736 €**	**116,081 €**	**355,161 €**	**658,450 €**	**1,373,472 €**	**2,637,885 €**
Comptes courants associés (Q4 non réservés)	—	—	—	1,528 €	10,410 €	—	1,438 €	13,847 €	27,117 €	51,783 €	—	12,213 €	32,364 €	59,831 €	100,636 €
TOTAL PASSIF	**26,366 €**	**-31,802 €**	**-305,143 €**	**-543,464 €**	**-780,381 €**	**61,218 €**	**122,457 €**	**119,526 €**	**333,716 €**	**830,519 €**	**116,081 €**	**367,375 €**	**690,813 €**	**1,433,302 €**	**2,738,521 €**
Vérification (Actif − Passif)	-0 €	-0 €	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—

Hypothèses & conventions

Feuille de calcul générée automatiquement à partir des paramètres saisis dans le modèle financier (logiciel, IP, parts sociales, trésorerie disponible, créances clients (BFR), immobilisations incorporelles, comptes courants associés, résultats reportés cumulés, capitaux propres, TVA Etat (crédit Q4), total actif, total passif, vérification actif − passif).

Capital social : 0 € (SAS belge dans le 2029, capital social libéré non requis).

Apport en capital initial (T1) : 400 000 € (apporté successivement : Hypothèque — reste 49 cumulés. Modifier dans Hypothèque pour ajuster.

Trésorerie : Plan de financement — cumul soldes (B28 / B54 / B85).

Créances clients : BFR de l'année − CA / 12 (B31 / B66 / B97).

Résultats reportés : cumul des résultats nets reportés (Compte de résultats: B51 / B81 / B91).

TVA : Créances TVA = crédit Q4 ; Dettes TVA = TVA Q4 collectée non reversée à 20 % (reversement Q4 – janvier N+1).

A.6.6 Plan de financement détaillé

WORST CASE

	2026	2027	2028	2029	2030
BESOINS					
Charges directes	4,851 €	**14,885 €**	**28,175 €**	**45,535 €**	**69,871 €**
Total charges fixes	199,562 €	**425,131 €**	**435,759 €**	**511,124 €**	**704,913 €**
Total autres dépenses	38,640 €	**39,606 €**	**40,596 €**	**59,642 €**	**48,695 €**
Remboursements + frais financiers	- €	- €	- €	- €	- €
TOTAL BESOINS	**246,339 €**	**486,458 €**	**513,675 €**	**628,323 €**	**840,415 €**
RESSOURCES					
Revenus brute	39,420 €	121,454 €	231,190 €	375,453 €	578,681 €
Variation BFR	3,285 €	6,836 €	9,145 €	12,022 €	16,936 €
Apports successifs en capital (fondateurs et investisseurs)	200,000 €	150,000 €	- €	- €	- €
Compte Courant associés	- €	- €	- €	- €	- €
Aides publiques (Subventions)	30,000 €	150,000 €	- €	- €	- €
Aides publiques (Avances remboursables)	- €	- €	- €	- €	- €
Autres	- €	- €	- €	- €	- €
Solde TVA net (encaissée – décaissée + reversement + remb.) -	7,974 €	2,920 €	4,020 €	3,563 €	7,881 €
TOTAL RESSOURCES	**261,446 €**	**424,373 €**	**235,209 €**	**379,015 €**	**586,562 €**
Mvt de trésorerie de la période	15,108 € -	62,085 € -	278,466 € -	249,308 € -	253,853 €
Report à nouveau 0 €	15,108 € -	46,977 € -	325,443 € -	574,752 € -	828,604 €
CUMULS SOLDES	**15,108 € -**	**46,977 € -**	**325,443 € -**	**574,752 € -**	**828,604 €**

Calcul de la variation du BFR (besoin en fond de roulement)

Délai de paiement des clients	1 mois				
Ventes	39,420 k€	121,454 k€	231,190 k€	375,453 k€	578,681 k€
BFR	3,285 k€	10,121 k€	19,266 k€	31,288 k€	48,223 k€
Variation du BFR	3,285 k€	6,836 k€	9,145 k€	12,022 k€	16,936 k€

EXPECTED CASE

	2026	2027	2028	2029	2030
BESOINS					
Charges directes	9,748 €	**31,343 €**	**64,086 €**	**114,302 €**	**188,711 €**
Total charges fixes	199,562 €	**425,131 €**	**435,759 €**	**511,124 €**	**704,913 €**
Total autres dépenses	38,640 €	**39,606 €**	**40,596 €**	**59,642 €**	**48,695 €**
Remboursements + frais financiers	- €	- €	- €	- €	- €
TOTAL BESOINS	**254,547 €**	**510,815 €**	**563,010 €**	**780,525 €**	**1,145,918 €**
RESSOURCES					
Revenus brute	79,168 €	255,982 €	526,801 €	944,622 €	1,566,442 €
Variation BFR	6,597 €	14,734 €	22,568 €	34,818 €	51,818 €
Apports successifs en capital (fondateurs et investisseurs)	200,000 €	150,000 €	- €	- €	- €
Compte Courant associés	- €	- €	- €	- €	- €
Aides publiques (Subventions)	30,000 €	150,000 €	- €	- €	- €
Aides publiques (Avances remboursables)	- €	- €	- €	- €	- €
Autres	- €	- €	- €	- €	- €
Solde TVA net (encaissée – décaissée + reversement + remb.) -	5,678 €	7,016 €	10,710 €	15,275 €	24,461 €
TOTAL RESSOURCES	**303,490 €**	**562,997 €**	**537,511 €**	**959,897 €**	**1,590,903 €**

Mvt de trésorerie de la période		48,943 €	52,182 €	- 25,499 €	179,372 €	444,985 €
Report à nouveau	0 €	48,943 €	101,125 €	75,626 €	254,997 €	699,982 €
CUMULS SOLDES		**48,943 €**	**101,125 €**	**75,626 €**	**254,997 €**	**699,982 €**

Calcul de la variation du BFR (besoin en fond de roulement)						
Délai de paiement des clients	1 mois					
Ventes		79,168 k€	255,982 k€	526,801 k€	944,622 k€	1,566,442 k€
BFR		6,597 k€	21,332 k€	43,900 k€	78,719 k€	130,537 k€
Variation du BFR		6,597 k€	14,734 k€	22,568 k€	34,818 k€	51,818 k€

BEST CASE

	2026	2027	2028	2029	2030
BESOINS					
Charges directes	17,397 €	**59,460 €**	**120,802 €**	**208,463 €**	**332,564 €**
Total charges fixes	199,562 €	**425,131 €**	**435,759 €**	**511,124 €**	**704,913 €**
Total autres dépenses	38,640 €	**39,606 €**	**40,596 €**	**59,642 €**	**48,695 €**
Remboursements + frais financiers	- €	- €	- €	- €	- €
TOTAL BESOINS	**267,406 €**	**577,026 €**	**734,967 €**	**1,072,825 €**	**1,588,507 €**
RESSOURCES					
Revenus brute	141,680 €	487,305 €	995,875 €	1,726,926 €	2,766,118 €
Variation BFR	11,807 €	28,802 €	42,381 €	60,921 €	86,599 €
Apports successifs en capital (fondateurs et investisseurs)	200,000 €	150,000 €	- €	- €	- €
Compte Courant associés	- €	- €	- €	- €	- €
Aides publiques (Subventions)	30,000 €	150,000 €	- €	- €	- €
Aides publiques (Avances remboursables)	- €	- €	- €	- €	- €
Autres	- €	- €	- €	- €	- €
Solde TVA net (encaissée − décaissée + reversement + remb.)	- 1,974 €	14,187 €	20,150 €	27,466 €	41,009 €
TOTAL RESSOURCES	**369,706 €**	**801,492 €**	**1,016,025 €**	**1,754,392 €**	**2,807,127 €**
Mvt de trésorerie de la période	102,300 €	224,466 €	281,058 €	681,568 €	1,218,620 €
Report à nouveau	0 € 102,300 €	326,766 €	607,824 €	1,289,391 €	2,508,011 €
CUMULS SOLDES	**102,300 €**	**326,766 €**	**607,824 €**	**1,289,391 €**	**2,508,011 €**

Calcul de la variation du BFR (besoin en fond de roulement)						
Délai de paiement des clients	1 mois					
Ventes		141,680 k€	487,305 k€	995,875 k€	1,726,926 k€	2,766,118 k€
BFR		11,807 k€	40,609 k€	82,990 k€	143,911 k€	230,510 k€
Variation du BFR		11,807 k€	28,802 k€	42,381 k€	60,921 k€	86,599 k€

A.6.7 Indicateurs financiers : VAN, ratios, valorisation

Indicateurs financiers — OpSee

VAN · Ratios solvabilité/liquidité · Valorisation · Cap table

1. Valeur Actuelle Nette (VAN)

Taux d'actualisation r = 12,5 % · Flux = Résultat net (proxy FCF, pas d'amortissements) · Horizon 2026-2030

Taux d'actualisation (r) 12.50%

Scénario / Année	2026	2027	2028	2029	2030	VAN totale
Année t (exposant actualisation)	1	2	3	4	5	
Résultat net — Worst	-173,634	-208,169	-273,341	-240,849	-244,798	**-797,003**
Flux actualisé — Worst	-154,341	-164,479	-191,976	-150,361	-135,846	
Résultat net — Expected	-138,782	-90,099	-13,641	198,915	472,342	**182,167**
Flux actualisé — Expected	-123,362	-71,189	-9,580	124,182	262,116	
Résultat net — Best	-83,919	89,081	303,288	715,023	1,264,210	**1,356,731**
Flux actualisé — Best	-74,595	70,385	213,009	446,385	701,547	

*Taux 12,5 % = 2,5 % sans risque + 10 % prime startup (Damodaran).

*VAN > 0 = projet créateur de valeur sur l'horizon 5 ans. Hors valeur terminale (cf. §Valorisation).

2. Ratio de solvabilité (Capitaux propres / Total Passif)

Seuil critique : 20-25 % (Quiry et al., 2025).

Scénario / Année	2026	2027	2028	2029	2030
Solvabilité — Worst	100.0%	-209.6%	-1503.1%	-1745.1%	-1639.8%
Solvabilité — Expected	100.0%	98.9%	89.9%	91.8%	93.8%
Solvabilité — Best	100.0%	96.7%	95.3%	95.8%	96.3%

3. Ratio de liquidité générale (Actifs circulants / Dettes CT)

Actifs circulants = Trésorerie + Créances clients + Créances TVA · Dettes CT = Dettes TVA Q4

Scénario / Année	2026	2027	2028	2029	2030
Liquidité — Worst	n/a	0.32	0.06	0.05	0.06
Liquidité — Expected	n/a	91.56	9.92	12.21	16.04
Liquidité — Best	n/a	30.08	21.35	23.96	27.16

*Ratio > 1 = actifs circulants suffisent à couvrir dettes courantes.

4. Valorisation et cap table

Méthode : ARR × multiple sectoriel · Multiple central 5x (SaaS Capital, 2025) · Sensibilité 4x–8x

Multiple ARR central	5.0x Multiple bas	4.0x Multiple haut	8.0x

4.1 Valorisation pré-money 2027 (tour VC)

ARR (CA HT) 2027 par scénario · Source : Compte de résultats

Scénario	ARR 2027 (€)	Bas (4x)	Central (5x)	Haut (8x)
Worst	121,454	485,814	**607,268**	971,628
Expected	255,982	1,023,926	**1,279,908**	2,047,853
Best	487,305	1,949,220	**2,436,525**	3,898,440

4.2 Valorisation Y5 (sortie potentielle 2030)

Scénario	ARR 2030 (€)	Bas (4x)	Central (5x)	Haut (8x)
Worst	578,681	2,314,723	**2,893,403**	4,629,445
Expected	1,566,442	6,265,769	**7,832,212**	12,531,539
Best	2,766,118	11,064,471	**13,830,589**	22,128,943

4.3 Cap table — dilution du tour VC 2027 (150 k€)

Sur valorisation pré-money centrale 5x ARR 2027 · Tour 150 k€

Scénario	Pré-money (€)	Tour (€)	Post-money (€)	% AgiNtech	% VC
Worst	607,268	150,000	757,268	80.2%	19.8%
Expected	1,279,908	150,000	1,429,908	**89.5%**	10.5%
Best	2,436,525	150,000	2,586,525	94.2%	5.8%

· AgiNtech détient 100 % avant le tour VC (apport 200 k€ en 2026).

· Le tour VC dilue AgiNtech proportionnellement à la part levée sur post-money.

· Worst : trésorerie négative ajoutée aux dettes CT (besoin de financement bancaire CT).

A.7 Analyse des risques (chapitre 8)

Section réservée aux annexes du chapitre 8.

Bibliographie

Acerta. (s. d.). *Engager des étudiants jobistes en 2023 et 2024 : c'est avantageux jusqu'à 600 heures par an.* Acerta. Récupérée mai 18, 2026, à partir de https://www.acerta.be/fr/inspiration/engager-des-etudiants-jobistes-en-2023-et-2024-cest-avantageux-jusqua-600-heures-par-an

Ahmed, A., & Pierre, G. (2018). Docker container deployment in fog computing infrastructures. *2018 IEEE International Conference on Edge Computing (EDGE)*. https://doi.org/10.1109/EDGE.2018.00008

Anthropic. (2024a). Commercial terms of service. Récupérée avril 25, 2025, à partir de https://www.anthropic.com/legal/commercial-terms

Anthropic. (2024b). Data processing addendum. Récupérée avril 25, 2025, à partir de https://www.anthropic.com/legal/data-processing-addendum

Anthropic. (2024c). How long do you store personal data ? (Commercial API). Récupérée avril 25, 2025, à partir de https://privacy.anthropic.com/en/articles/7996866-how-long-do-you-store-personal-data

Anthropic. (2024d, novembre 25). Introducing the model context protocol. Récupérée avril 25, 2025, à partir de https://www.anthropic.com/news/model-context-protocol

Argentieri, S. R. (2024, septembre 25). *Moving away from open source : trends in source-available licensing.* Goodwin Procter LLP. Récupérée mai 17, 2026, à partir de https://www.goodwinlaw.com/en/insights/publications/2024/09/insights-practices-moving-away-from-open-source-trends-in-licensing

Asthana, S., Zhang, B., Mahindru, R., DeLuca, C., Gentile, A., & Gopisetty, S. (2025). Deploying privacy guardrails for LLMs : a comparative analysis of real-world applications. https://doi.org/10.48550/arXiv.2501.12456

Avelino, G., Passos, L., Hora, A., & Valente, M. T. (2016). A Novel Approach for Estimating Truck Factors. *2016 IEEE 24th International Conference on Program Comprehension (ICPC)*, 1-10. https://doi.org/10.1109/ICPC.2016.7503718

Bailyn, E. (2024). *SaaS freemium conversion rates : 2026 report*. First Page Sage. Récupérée mai 8, 2026, à partir de https://firstpagesage.com/seo-blog/saas-freemium-conversion-rates/

Banque nationale de Belgique. (s. d.). *Centrale des bilans*. Banque nationale de Belgique. Récupérée mai 18, 2026, à partir de https://www.nbb.be/fr/centrale-des-bilans

Barney, J. (1991). Firm resources and sustained competitive advantage. *Journal of Management*, *17*(1), 99-120. https://doi.org/10.1177/014920639101700108

Bednarz, B., & Miłosz, M. (2025). Benchmarking the performance of Python web frameworks. *Journal of Computer Sciences Institute*, *36*, 336-341.

Belgique. (1978, juillet 3). Loi du 3 juillet 1978 relative aux contrats de travail. Récupérée mai 18, 2026, à partir de https://www.ejustice.just.fgov.be/eli/loi/1978/07/03/1978070303/justel

Arrêté royal n° 1 du 29 décembre 1992 relatif aux mesures tendant à assurer le paiement de la taxe sur la valeur ajoutée (1992, décembre 29). Récupérée mai 18, 2026, à partir de https://www.ejustice.just.fgov.be/eli/arrete/1992/12/29/1992015116/justel

Loi du 4 août 1996 relative au bien-être des travailleurs lors de l'exécution de leur travail (1996, août 4). Récupérée mai 18, 2026, à partir de https://www.ejustice.just.fgov.be/eli/loi/1996/08/04/1996012650/justel

Code de droit économique (2013, février 28). Récupérée mai 18, 2026, à partir de https://www.ejustice.just.fgov.be/eli/loi/2013/02/28/2013A11134/justel

Belgique. (2019, mars 23). Code des sociétés et des associations. Récupérée mai 18, 2026, à partir de https://www.ejustice.just.fgov.be/eli/loi/2019/03/23/2019A40586/justel

Bengtsson, O. (2011). Covenants in Venture Capital Contracts. *Management Science*, *57*(11), 1926-1943. https://doi.org/10.1287/mnsc.1110.1409

Beregi, R., Pedone, G., Háy, B., & Váncza, J. (2021). Manufacturing execution system integration through the standardization of a common service model for cyber-physical production systems. *Applied Sciences*, *11*(16), 7581. https://doi.org/10.3390/app11167581

Besutti, R., Machado, V. d. C., & Cecconello, I. (2019). Development of an open source-based manufacturing execution system (MES) : Industry 4.0 enabling technology for small and medium-sized enterprises. *Scientia cum Industria*, *7*(2), 1-11. https://doi.org/10.18226/23185279.v7iss2p1

Bhatt, M., Narajala, V. S., & Habler, I. (2025). ETDI : mitigating tool squatting and rug pull attacks in Model Context Protocol (MCP) by using OAuth-enhanced tool definitions and policy-based access control. https://doi.org/10.1109/CARS67163.2025.11337310

Bianchini, A., Savini, I., Andreoni, A., Morolli, M., & Solfrini, V. (2024). Manufacturing execution system application within manufacturing small–medium enterprises towards key performance indicators development. *Sustainability*, *16*(7), 2974. https://doi.org/10.3390/su16072974

Bianchini, M., Lasheras Sancho, M., & Kwon, I. (2024). SME digitalisation to manage shocks and transitions : 2024 OECD D4SME survey. *OECD SME and Entrepreneurship Papers*. Récupérée mai 13, 2026, à partir de https://www.oecd.org/en/publications/sme-digitalisation-to-manage-shocks-and-transitions_eb4ec9ac-en.html

Bosona, T., & Gebresenbet, G. (2023). The role of blockchain technology in promoting traceability systems in agri-food production and supply chains. *Sensors*, *23*(11), 5342. https://doi.org/10.3390/s23115342

Boudjenoun, C., Saib, M., Zemmouchi-Ghomari, L., & Rezgui, W. (2025). Leveraging intelligent manufacturing execution systems for digital transformation in the food

and beverage industry. *Journal of Intelligent Manufacturing and Special Equipment*. https://doi.org/10.1108/jimse-05-2025-0006

Bradfield, R., Wright, G., Burt, G., Cairns, G., & Van Der Heijden, K. (2005). The origins and evolution of scenario techniques in long range business planning. *Futures*, *37*(8), 795-812. https://doi.org/10.1016/j.futures.2005.01.003

Brealey, R. A., Myers, S. C., & Allen, F. (2020). *Principles of Corporate Finance* (13e éd.). McGraw-Hill Education.

Bureau fédéral du Plan. (2026, mai 5). *Indice des prix à la consommation – Prévisions d'inflation*. Bureau fédéral du Plan. Récupérée juin 1, 2026, à partir de https://www.plan.be/databases/17-fr-indice

Cedefop. (2024). *VET Occupations in Shortage : a cross-country analysis*. European Centre for the Development of Vocational Training. Récupérée mai 14, 2026, à partir de https://www.cedefop.europa.eu/en/publications/9209

ChartMogul. (2025). *SaaS insights and benchmarks*. ChartMogul. Récupérée mai 7, 2026, à partir de https://chartmogul.com/insights/

Chatterjee, A., & Prinz, A. (2022). Applying Spring security framework with KeyCloak-based OAuth2 to protect microservice architecture APIs : a case study. *Sensors*, *22*(5), 1703. https://doi.org/10.3390/s22051703

Chen, K., Zhou, X., Lin, Y., Feng, S., Shen, L., & Wu, P. (2025). A survey on privacy risks and protection in large language models. https://doi.org/10.1007/s44443-025-00177-1

Clermont, T. (2018). *Le besoin en fonds de roulement dans le business plan (BFR)*. Compta Facile. Récupérée mai 8, 2026, à partir de https://www.compta-facile.com/besoin-en-fonds-de-roulement-bfr/

CNIL. (s. d.). *Le registre des activités de traitement*. Commission nationale de l'informatique et des libertés (CNIL). Récupérée mai 18, 2026, à partir de https://www.cnil.fr/fr/RGPD-le-registre-des-activites-de-traitement

CNIL. (2025). Intelligence artificielle — Thématique IA et RGPD. Récupérée avril 25, 2025, à partir de https://www.cnil.fr/fr/intelligence-artificielle

Code des impôts sur les revenus 1992, article 215 – Taux de l'impôt des sociétés (1992, avril 10). Récupérée juin 1, 2026, à partir de https://eservices.minfin.fgov.be/myminfin-web/pages/fisconet/document/c8ce26a5-1c69-410b-9eaf-7e3a73e2b541

Colombo, P., & Ferrari, E. (2025). Efficient enforcement of fine-grained access control in Sparkplug-based industrial internet of things. *2025 IEEE International Conference on Systems, Man, and Cybernetics (SMC)*, 6281-6288. https://doi.org/10.1109/SMC58881.2025.11343597

Commission des Normes Comptables. (s. d.). *Conservation des livres et des pièces justificatives*. Commission des Normes Comptables (CNC). Récupérée mai 18, 2026, à partir de https://www.cnc-cbn.be/fr/avis/conservation-des-livres-et-des-pieces-justificatives

Corporate Finance Institute. (2024). *The SaaS rule of 40 explained*. Corporate Finance Institute. Récupérée mai 8, 2026, à partir de https://corporatefinanceinstitute.com/resources/valuation/rule-of-40/

Cosentino, V., Cánovas Izquierdo, J. L., & Cabot, J. (2015). Assessing the Bus Factor of Git Repositories. *2015 IEEE 22nd International Conference on Software Analysis, Evolution, and Reengineering (SANER)*, 499-503. https://doi.org/10.1109/SANER.2015.7081864

Cyber Cover. (s. d.). *Choisir son assurance cyber-risques : Guide complet pour entreprises*. Cyber Cover. Récupérée mai 18, 2026, à partir de https://www.cyber-cover.fr/guides/assurance-cyber-risques/comment-choisir-une-assurance-cyber-risques-pour-une-entreprise

Da Col, G., & Teppan, E. C. (2022). Industrial-size job shop scheduling with constraint programming. *Operations Research Perspectives*, *9*, 100249. https://doi.org/10.1016/j.orp.2022.100249

Damodaran, A. (2009). Valuing Young, Start-up and Growth Companies : Estimation Issues and Valuation Challenges. Récupérée mai 28, 2026, à partir de https://pages.stern.nyu.edu/~adamodar/pdfiles/papers/younggrowth.pdf

Damodaran, A. (2026). *Price and Value to Sales Ratio by Sector (US, January 2026).* Stern School of Business, New York University. Récupérée mai 28, 2026, à partir de https://pages.stern.nyu.edu/~adamodar/New_Home_Page/datafile/psdata.html

Darban, Z. Z., Webb, G. I., Pan, S., Aggarwal, C. C., & Salehi, M. (2022). *Deep learning for time series anomaly detection : a survey.* arXiv : 2211.05244. https://doi.org/10.48550/arXiv.2211.05244

De Coster, J., & Procureur, N. (2021). *Plan comptable des entreprises autres que les associations et les fondations* [ISBN 978-94-03-02012-9. Plan comptable minimum normalisé (PCMN) belge édité par l'ITAA]. Institute for Tax Advisors & Accountants (ITAA). Récupérée mai 18, 2026, à partir de https://www.itaa.be/wp-content/uploads/20210302-FR-epdf-final-plan-comptable-v2.0.pdf

Definition of Manufacturing Execution System - Gartner Information Technology Glossary. (2025). Gartner. Récupérée octobre 28, 2025, à partir de https://www.gartner.com/en/information-technology/glossary/mes-manufacturing-execution-system

Deng, H., Namoano, B., Zheng, B., Khan, S., & Erkoyuncu, J. A. (2024). From prediction to prescription : large language model agent for context-aware maintenance decision support. https://doi.org/10.36001/phme.2024.v8i1.4114

Devarajulu, V. S. (2025). LLM deployment in regulated enterprise AI systems : a privacy-preserving and compliant architectural approach. https://doi.org/10.1109/AIBThings66987.2025.11296166

Ding, K., Chan, F. T. S., Zhang, X., Zhou, G., & Zhang, F. (2019). Defining a digital twin-based cyber-physical production system for autonomous manufacturing in smart shop floors. *International Journal of Production Research*, *57*(20), 6315-6334. https://doi.org/10.1080/00207543.2019.1566661

d'Orey, F. (2025, mai 29). *How MES enhances manufacturing efficiency and quality while complying with FDA 21 CFR part 11 requirements*. Critical Manufacturing. Récupérée mai 18, 2026, à partir de https://www.criticalmanufacturing.com/blog/how-mes-enhances-manufacturing-efficiency-and-quality-while-complying-with-fda-21-cfr-part-11-requirements/

Drahoš, P., Kučera, E., Haffner, O., & Klimo, I. (2018). Trends in industrial communication and OPC UA. *2018 Cybernetics & Informatics (K&I)*. https://doi.org/10.1109/CYBERI.2018.8337560

Droit & Technologies. (s. d.). *Portail du Droit des Technologies*. Cabinet Ulys — Droit & Technologies. Récupérée mai 18, 2026, à partir de https://www.droit-technologie.org/

Drouot, A. (2024, août 29). *Obligations fiscales pour les entreprises*. Legal PME. Récupérée mai 18, 2026, à partir de https://legalpme.be/obligations-fiscales-entreprise/

Dutt, R. (2021, avril 20). *Grafana, Loki, and Tempo will be relicensed to AGPLv3*. Grafana Labs. Récupérée mai 17, 2026, à partir de https://grafana.com/blog/grafana-loki-tempo-relicensing-to-agplv3/

Dutta, G., Kumar, R., Sindhwani, R., & Singh, R. K. (2022). Overcoming the barriers of effective implementation of manufacturing execution system in pursuit of smart manufacturing in SMEs. *Procedia Computer Science*, *200*, 820-832. https://doi.org/10.1016/j.procs.2022.01.279

Eclipse Foundation. (2022). *Sparkplug Specification : interoperability between MQTT clients in industrial IoT*. Eclipse Foundation. Récupérée mai 14, 2026, à partir de https://sparkplug.eclipse.org/

Ehmke, C. A. (2014). *Contributor covenant : a code of conduct for open source projects* [Géré depuis 2021 par l'Organization for Ethical Source]. Récupérée mai 18, 2026, à partir de https://www.contributor-covenant.org/

Ethias. (s. d.). *Assurance RC pro*. Ethias Professionnels. Récupérée mai 18, 2026, à partir de https://www.ethias.be/pro/fr/private/assurances/rc-pro.html

European Central Bank. (2021, juillet 8). *The ECB's monetary policy strategy statement* [Strategy review confirming a symmetric two per cent inflation target over the medium term]. European Central Bank. Récupérée juin 1, 2026, à partir de https://www.ecb.europa.eu/home/search/review/html/ecb.strategyreview_monpol_strategy_statement.en.html

European Commission. (2021, septembre 13). *Belgium's recovery and resilience plan.* European Commission. Récupérée mai 14, 2026, à partir de https://commission.europa.eu/business-economy-euro/economic-recovery/recovery-and-resilience-facility/country-pages/belgiums-recovery-and-resilience-plan_en

European Commission. (2023a). *A New Industrial Strategy for Europe – updated.* European Commission. Récupérée mai 14, 2026, à partir de https://commission.europa.eu/strategy-and-policy/priorities-2019-2024/europe-fit-digital-age/european-industrial-strategy_en

European Commission. (2023b, février 1). *A Green Deal Industrial Plan for the Net-Zero Age* [COM(2023) 62 final]. European Commission. Récupérée mai 14, 2026, à partir de https://commission.europa.eu/strategy-and-policy/priorities-2019-2024/european-green-deal/green-deal-industrial-plan_en

European Investment Bank. (2024, octobre). *EIB investment survey 2024 : European Union overview.* https://doi.org/10.2867/53

Règlement (CE) n° 178/2002 établissant les principes généraux et les prescriptions générales de la législation alimentaire (2002, janvier 28). Récupérée mai 18, 2026, à partir de http://data.europa.eu/eli/reg/2002/178/oj

Directive 2009/24/CE concernant la protection juridique des programmes d'ordinateur (version codifiée) (2009, avril 23). Récupérée mai 18, 2026, à partir de http://data.europa.eu/eli/dir/2009/24/oj

Règlement (UE) 2016/679 relatif à la protection des personnes physiques à l'égard du traitement des données à caractère personnel (RGPD) (2016, avril 27). Récupérée mai 18, 2026, à partir de http://data.europa.eu/eli/reg/2016/679/oj

Directive (UE) 2022/2555 relative à la cybersécurité dans l'Union (NIS 2) (2022, décembre 14). Récupérée mai 18, 2026, à partir de http://data.europa.eu/eli/dir/2022/2555/oj

European Union. (2022a, décembre 14). *Directive (EU) 2022/2464 on corporate sustainability reporting (CSRD)*. Official Journal of the European Union. Récupérée mai 14, 2026, à partir de https://eur-lex.europa.eu/eli/dir/2022/2464/oj

European Union. (2022b, décembre 14). *Directive (EU) 2022/2555 on measures for a high common level of cybersecurity across the Union (NIS 2)*. Official Journal of the European Union. Récupérée mai 14, 2026, à partir de https://eur-lex.europa.eu/eli/dir/2022/2555/oj

European Union. (2023, décembre 13). *Regulation (EU) 2023/2854 on harmonised rules on fair access to and use of data (Data Act)*. Official Journal of the European Union. Récupérée mai 14, 2026, à partir de https://eur-lex.europa.eu/eli/reg/2023/2854/oj

European Union. (2024a, juin 13). *Regulation (EU) 2024/1689 laying down harmonised rules on artificial intelligence (AI Act)*. Official Journal of the European Union. Récupérée mai 14, 2026, à partir de https://eur-lex.europa.eu/eli/reg/2024/1689/oj

European Union. (2024b, juin 13). *Regulation (EU) 2024/1781 establishing a framework for the setting of ecodesign requirements for sustainable products*. Official Journal of the European Union. Récupérée mai 14, 2026, à partir de https://eur-lex.europa.eu/eli/reg/2024/1781/oj

European Union. (2024c, octobre 23). *Regulation (EU) 2024/2847 on horizontal cybersecurity requirements for products with digital elements (Cyber Resilience Act)*. Official Journal of the European Union. Récupérée mai 14, 2026, à partir de https://eur-lex.europa.eu/eli/reg/2024/2847/oj

European Union Agency for Cybersecurity. (2023). *ENISA Threat Landscape 2023* (rapp. tech.). ENISA.

Eurostat. (2020). *Annual enterprise statistics by size class for special aggregates of NACE Rev. 2 activities (sbs_sc_sca_r2)*. European Commission. Récupérée mai 13, 2026, à partir de https://ec.europa.eu/eurostat/databrowser/view/sbs_sc_sca_r2/default/table

Eurostat. (2024). *Businesses in the manufacturing sector – Statistics Explained*. European Commission. Récupérée mai 12, 2026, à partir de https://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php?title=Businesses_in_the_manufacturing_sector

Eurostat. (2025a). *Digital intensity by NACE Rev. 2 activity (isoc_e_diin2)*. European Commission. Récupérée mai 13, 2026, à partir de https://ec.europa.eu/eurostat/databrowser/view/isoc_e_diin2/default/table

Eurostat. (2025b, janvier 17). *Annual inflation up to 2.4% in the euro area* [Press release 2-17012025-AP]. European Commission. Récupérée mai 14, 2026, à partir de https://ec.europa.eu/eurostat/web/products-euro-indicators/w/2-17012025-ap

Factory AI Group. (2026). *The best manufacturing execution systems (MES) for 2026 : a strategic comparison for operations leaders*. Factory AI. Récupérée mai 12, 2026, à partir de https://f7i.ai/blog/the-best-manufacturing-execution-systems-mes-for-2026-a-strategic-comparison-for-operations-leaders

Faulkner, D., & Bowman, C. (1995). *The essence of competitive strategy*. Prentice Hall.

Felter, W., Ferreira, A., Rajamony, R., & Rubio, J. (2015). An updated performance comparison of virtual machines and Linux containers. *2015 IEEE International Symposium on Performance Analysis of Systems and Software (ISPASS)*, 171-172. https://doi.org/10.1109/ISPASS.2015.7095802

Fortinet. (2021). *Latest threat report reveals disruptive shift of cyber threats*. FortiGuard Labs, Fortinet. Récupérée mai 18, 2026, à partir de https://www.fortinet.com/corporate/about-us/newsroom/press-releases/2021/fortiguard-labs-reports-disruptive-shift-of-cyber-threats

Fortune Business Insights. (2026). *Manufacturing execution systems market share report, 2034*. Fortune Business Insights. Récupérée mai 12, 2026, à partir de https://www.fortunebusinessinsights.com/manufacturing-execution-systems-market-110827

FOSSA. (2021, août 13). *Open source software licenses 101 : the AGPL license*. FOSSA. Récupérée mai 18, 2026, à partir de https://fossa.com/blog/open-source-software-licenses-101-agpl-license/

Free Software Foundation. (2007, novembre 19). *Licence publique générale GNU affero, v3.0*. Free Software Foundation. Récupérée mai 18, 2026, à partir de https://www.gnu.org/licenses/agpl-3.0.html

G2. (2026). *Tarification de Tulip 2026*. G2. Récupérée mai 8, 2026, à partir de https://www.g2.com/fr/products/tulip-interfaces-tulip/pricing

Gallman, M. (2024). *The true cost of an ERP implementation for manufacturers*. Rea Business Advisors. Récupérée mai 8, 2026, à partir de https://reaadvisory.com/insight/erp-implementation-cost/

García, M. V., Irisarri, E., Pérez, F., Marcos, M., & Estevez, E. (2018). From ISA 88/95 meta-models to an OPC UA-based development tool for CPPS under IEC 61499. *2018 IEEE 14th International Workshop on Factory Communication Systems (WFCS)*. https://doi.org/10.1109/WFCS.2018.8402362

Gavriilidis, N. O., Halkidis, S. T., & Petridou, S. (2025). Empirical evaluation of TLS-enhanced MQTT on IoT devices for V2X use cases. *Applied Sciences*, *15*(15), 8398. https://doi.org/10.3390/app15158398

GitLab Inc. (2021, octobre 13). *GitLab announces pricing of initial public offering*. GitLab Inc. Récupérée mai 14, 2026, à partir de https://about.gitlab.com/press/releases/2021-10-13-gitlab-announces-pricing-of-initial-public-offering/

Gomes, C., Busanello, E., Padilha, B., Lerman, L. V., & Tabim, V. M. (2024). Exploring key factors for implementing manufacturing execution systems (MES) within the framework of industry 4.0 for small and medium-sized enterprises (SMEs) in the

manufacturing sector. *Production*, *34*, e20230085. https://doi.org/10.1590/0103-6513.20230085

González, I., Calderón, A. J., Figueiredo, J., & Sousa, J. M. C. (2019). A literature survey on open platform communications (OPC) applied to advanced industrial environments. *Electronics*, *8*(5), 510. https://doi.org/10.3390/electronics8050510

Gouvernement français. (2021, octobre 12). *France 2030 : 54 milliards d'euros pour l'industrie et l'innovation*. Ministère de l'Économie et des Finances. Récupérée mai 14, 2026, à partir de https://www.economie.gouv.fr/france-2030

Govindaraj, K., & Artemenko, A. (2018). Container live migration for latency critical industrial applications on edge computing. *2018 IEEE 23rd International Conference on Emerging Technologies and Factory Automation (ETFA)*. https://doi.org/10.1109/ETFA.2018.8502659

Greif, S., & Benitte, R. (2024). *State of JavaScript 2024 — front-end frameworks*. Devographics. Récupérée avril 30, 2026, à partir de https://2024.stateofjs.com/en-US/libraries/front-end-frameworks/

Grzesik, P., & Mrozek, D. (2020). Comparative analysis of time series databases in the context of edge computing for low power sensor networks. *Computational Science – ICCS 2020*, 371-383. https://doi.org/10.1007/978-3-030-50426-7_28

HDI Global. (2020, novembre 27). *Assurance responsabilité administrateurs et dirigeants*. HDI Global. Récupérée mai 18, 2026, à partir de https://www.hdi.global/fr-be/insurance/managers-and-decision-makers/executives/

Hector, I., & Panjanathan, R. (2024). Predictive maintenance in Industry 4.0 : a survey of planning models and machine learning techniques. *PeerJ Computer Science*, *10*, e2016. https://doi.org/10.7717/peerj-cs.2016

Hermann, M., Pentek, T., & Otto, B. (2016). Design Principles for Industrie 4.0 Scenarios. *2016 49th Hawaii International Conference on System Sciences (HICSS)*, 3928-3937. https://doi.org/10.1109/HICSS.2016.488

History of the MESA Models. (2025). Manufacturing Enterprise Solutions Association | MESA International. Récupérée octobre 28, 2025, à partir de https://mesa.org/topics-resources/mesa-model/history-of-the-mesa-models/

Hoque, S., Ahmmed, I., Jobair, A., Hossain, M. S., Uddin, M. R., & Hasan, M. (2024). Development of a scalable industrial process monitoring sensor system for large-scale IoT networks using MQTT and time series database. *2024 International Conference on Emerging Power, Electronics and Automation (ICEPES)*. https://doi.org/10.1109/ICEPES60647.2024.10653574

Hou, X., Zhao, Y., Wang, S., & Wang, H. (2025). Model context protocol (MCP) : landscape, security threats, and future research directions. https://doi.org/10.1145/3796519

iBase-t Experts. (2021, juin 8). *Evaluating the total cost of ownership of an on-premises MES*. iBase-t. Récupérée mai 12, 2026, à partir de https://www.ibaset.com/evaluating-the-total-cost-of-ownership-of-an-on-premises-mes/

IBM. (2019, juillet 9). *IBM closes landmark acquisition of Red Hat for $34 billion*. IBM Investor Relations. Récupérée mai 14, 2026, à partir de https://www.ibm.com/investor/news/ibm-completes-acquisition-of-red-hat

IEC. (2021, février 26). *Understanding IEC 62443*. International Electrotechnical Commission. Récupérée mai 18, 2026, à partir de https://www.iec.ch/blog/understanding-iec-62443

Industrie 4.0. (2025, octobre 29). In *Wikipédia*. Récupérée novembre 3, 2025, à partir de https://fr.wikipedia.org/w/index.php?title=Industrie_4.0&oldid=230175146 Page Version ID : 230175146.

International Society of Automation. (s. d.). *ISA-95 standard : enterprise-control system integration*. International Society of Automation. Récupérée mai 18, 2026, à partir de https://www.isa.org/standards-and-publications/isa-standards/isa-95-standard

International Society of Automation. (2024). *ANSI/ISA-95 : enterprise-control system integration*. ISA. Récupérée mai 14, 2026, à partir de https://www.isa.org/standards-and-publications/isa-standards/isa-standards-committees/isa95

IntuitionLabs. (s. d.). *21 CFR part 11 compliance : electronic records in pharma*. IntuitionLabs. Récupérée mai 18, 2026, à partir de https://intuitionlabs.ai/articles/21-cfr-part-11-compliance-guide-pharma

ISO. (2018). *ISO 50001 :2018 : energy management systems*. International Organization for Standardization. Récupérée mai 14, 2026, à partir de https://www.iso.org/standard/69426.html

ISO/IEC. (2022). *ISO/IEC 27001 :2022 — information security, cybersecurity and privacy protection — information security management systems — requirements*. International Organization for Standardization. Récupérée mai 18, 2026, à partir de https://www.iso.org/standard/27001

Jansen, S. (2020). A focus area maturity model for software ecosystem governance. *Information and Software Technology*, *118*, 106219. https://doi.org/10.1016/j.infsof.2019.106219

Jaspan, C., Jorde, M., Knight, A., Sadowski, C., Smith, E. K., Winter, C., & Murphy-Hill, E. (2018). Advantages and disadvantages of a monolithic repository : a case study at Google. *2018 IEEE/ACM 40th International Conference on Software Engineering : Software Engineering in Practice (ICSE-SEIP)*, 225-234. https://doi.org/10.1145/3183519.3183550

Kagermann, H., Wahlster, W., & Helbig, J. (2013). *Recommendations for Implementing the Strategic Initiative INDUSTRIE 4.0* (rapp. tech.). acatech – National Academy of Science et Engineering.

Kaplan, S. N., & Strömberg, P. (2003). Financial Contracting Theory Meets the Real World : An Empirical Analysis of Venture Capital Contracts. *The Review of Economic Studies*, *70*(2), 281-315. https://doi.org/10.1111/1467-937X.00245

Kapoor, S., Kumar, S., & Vardhan, H. (2025). *Cyber security of OT networks : a tutorial and overview*. arXiv : 2502.14017. https://doi.org/10.48550/arXiv.2502.14017

Katsinis, A., Lagüera-González, J., Di Bella, L., Odenthal, L., Hell, M., & Lozar, B. (2024). *Annual report on european SMEs 2023/2024 : SME performance review 2023/2024*. Publications Office of the European Union. https://doi.org/10.2826/355464

Kletti, J. (2007). New ways for the effective factory. In *Manufacturing Execution Systems — MES* (p. 1-39). Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-540-49744-8_1

Koch, O. F., & Benlian, A. (2017). The effect of free sampling strategies on freemium conversion rates. *Electronic Markets*, *27*(1), 67-76. https://doi.org/10.1007/s12525-016-0236-z

Kornienko, D. V., Mishina, S. V., Shcherbatykh, S. V., & Melnikov, M. O. (2021). Principles of securing RESTful API web services developed with Python frameworks. *Journal of Physics : Conference Series*, *2094*(3), 032016. https://doi.org/10.1088/1742-6596/2094/3/032016

Kotler, P., & Keller, K. L. (2016). *Marketing management* (15e éd.). Pearson.

KPMG Law Belgium. (2020, octobre 20). *KPMG law's new manual on the belgian company code*. KPMG Law Belgium. Récupérée mai 18, 2026, à partir de https://www.kpmglaw.be/en/news/kpmg-law-s-new-manual-on-the-belgian-company-code/

Kula, R. G., Reid, B. A., & Treude, C. (2025, mars 4). *Open source at a crossroads : the future of licensing driven by monetization*. arXiv : 2503.02817. Récupérée mai 12, 2026, à partir de https://arxiv.org/abs/2503.02817v2

Lachance, P. (2021, septembre 7). *An introduction to IoT, CMMS and the ISA-95 framework*. Brightly Software. Récupérée avril 2, 2026, à partir de https://www.brightlysoftware.com/blog/an-introduction-to-iot-cmms-and-the-isa-95-framework

Lai, M. B., Vergamini, D., & Brunori, G. (2025). Food supply chain : a framework for the governance of digital traceability. *Foods*, *14*(12), 2032. https://doi.org/10.3390/foods14122032

Lampropoulos, G., Siakas, K., & Anastasiadis, T. (2019). Internet of Things in the context of Industry 4.0 : an overview. *International Journal of Entrepreneurial Knowledge*. https://doi.org/10.2478/ijek-2019-0001

Lasi, H., Fettke, P., Kemper, H.-G., Feld, T., & Hoffmann, M. (2014). Industry 4.0. *Business & Information Systems Engineering*, *6*(4), 239-242. https://doi.org/10.1007/s12599-014-0334-4

Lathkar, M. (2023). *High-performance web apps with FastAPI : the asynchronous web framework based on modern Python*. Apress. https://doi.org/10.1007/978-1-4842-9178-8

Lee, J., Bagheri, B., & Kao, H.-A. (2015). A cyber-physical systems architecture for industry 4.0-based manufacturing systems. *Manufacturing Letters*, *3*, 18-23. https://doi.org/10.1016/j.mfglet.2014.12.001

Lee, J., & Su, H. (2024). A unified industrial large knowledge model framework in Industry 4.0 and smart manufacturing. *International Journal of AI for Materials and Design*, *1*(2), 41. https://doi.org/10.36922/ijamd.3681

Leitner, S.-H., & Mahnke, W. (2006). OPC UA – service-oriented architecture for industrial applications. *Softwaretechnik-Trends*, *26*(4).

Lejeune, F. (2014, août 21). *La propriété intellectuelle et les créations d'employés*. Récupérée mai 18, 2026, à partir de https://www.fredericlejeune.be/la-propriete-intellectuelle-et-les-creations-demploye s/

Lejeune, F. (2017, juin 25). *Droit d'auteur, programmes d'ordinateur et gérant de société : absence de présomption de cession*. Récupérée mai 18, 2026, à partir de https://www.fredericlejeune.be/droit-dauteur-programmes-dordinateur-et-gerant-de-societe-absence-de-presomption-de-cession/

Lejeune, F. (2025, mars 2). *Logiciels : droits intellectuels*. Récupérée mai 18, 2026, à partir de https://www.fredericlejeune.be/droits-intellectuels/logiciels/

Leng, J., Wang, D., Shen, W., Li, X., Liu, Q., & Chen, X. (2021). Digital twins-based smart manufacturing system design in Industry 4.0 : a review. *Journal of Manufacturing Systems*, *60*, 119-137. https://doi.org/10.1016/j.jmsy.2021.05.011

Li, H. A. (2022). Converting free users to paid subscribers in the SaaS context : the impact of marketing touchpoints, message content, and usage. *Production and Operations Management*, *31*(6), 2185-2203. https://doi.org/10.1111/poms.13672

Liantis. (s. d.). *Réforme du droit des sociétés : ce qu'il faut savoir*. Liantis. Récupérée mai 18, 2026, à partir de https://www.liantis.be/fr/devenir-independant/forme-juridique/societes

Linux Foundation. (2025, décembre 9). Linux foundation announces the formation of the agentic AI foundation (AAIF). Récupérée avril 25, 2025, à partir de https://www.linuxfoundation.org/press/linux-foundation-announces-the-formation-of-the-agentic-ai-foundation

Macaulay, A. (2023, septembre 14). *The duration of an SAP implementation project*. IgniteSAP. Récupérée mai 12, 2026, à partir de https://ignitesap.com/the-duration-of-an-sap-implementation-project/

Mantravadi, S., & Møller, C. (2019). An Overview of Next-generation Manufacturing Execution Systems : How important is MES for Industry 4.0 ? *Procedia Manufacturing*, *30*, 588-595. https://doi.org/10.1016/j.promfg.2019.02.083

MarketsandMarkets. (2025). *Manufacturing execution systems market size, share & trends – 2030*. MarketsandMarkets Research. Récupérée mai 12, 2026, à partir de https://www.marketsandmarkets.com/Market-Reports/manufacturing-execution-systems-mes-market-536.html

MarketsandMarkets. (2026, mai). *Europe manufacturing execution system (MES) market worth $5.88 billion by 2030*. MarketsandMarkets Research. Récupérée mai 13, 2026, à partir de https://www.marketsandmarkets.com/PressReleases/europe-manufacturing-execution-system.asp

Masood, T., & Sonntag, P. (2020). Industry 4.0 : adoption challenges and benefits for SMEs. *Computers in Industry*, *121*, 103261. https://doi.org/10.1016/j.compind.2020.103261

Metrick, A., & Yasuda, A. (2010). The Economics of Private Equity Funds. *Review of Financial Studies*, *23*(6), 2303-2341. https://doi.org/10.1093/rfs/hhq020

Mittal, S., Khan, M. A., Romero, D., & Wuest, T. (2018a). A critical review of smart manufacturing & Industry 4.0 maturity models : implications for small and medium-sized enterprises (SMEs). *Journal of Manufacturing Systems*, *49*, 194-214. https://doi.org/10.1016/j.jmsy.2018.10.005

Mittal, S., Khan, M. A., Romero, D., & Wuest, T. (2018b). A Critical Review of Smart Manufacturing & Industry 4.0 Maturity Models : Implications for Small and Medium-sized Enterprises (SMEs). *Journal of Manufacturing Systems*, *49*, 194-214. https://doi.org/10.1016/j.jmsy.2018.10.005

MongoDB Inc. (2018, octobre 16). *MongoDB issues new Server Side Public License for MongoDB community server*. MongoDB Inc. Récupérée mai 17, 2026, à partir de https://www.mongodb.com/company/newsroom/press-releases/mongodb-issues-new-server-side-public-license-for-mongodb-community-server

Muchiri, P., & Pintelon, L. (2008). Performance measurement using overall equipment effectiveness (OEE) : literature review and practical application discussion. *International Journal of Production Research*, *46*(13), 3517-3535. https://doi.org/10.1080/00207540601142645

Nakajima, S. (1988). *Introduction to TPM : total productive maintenance*. Productivity Press.

Nankya, M., Chataut, R., & Akl, R. (2023). Securing industrial control systems : components, cyber threats, and machine learning-driven defense strategies. *Sensors*, *23*(21), 8840. https://doi.org/10.3390/s23218840

National Institute of Standards and Technology. (2024). *The NIST Cybersecurity Framework 2.0* (rapp. tech.). National Institute of Standards et Technology.

Ng Corrales, L. d. C., Lambán, M. P., Hernandez Korner, M. E., & Royo, J. (2020). Overall equipment effectiveness : systematic literature review and overview of different approaches. *Applied Sciences*, *10*(18), 6469. https://doi.org/10.3390/app10186469

OASIS. (2019, mars 7). *MQTT Version 5.0 OASIS Standard*. OASIS Open. Récupérée mai 14, 2026, à partir de https://docs.oasis-open.org/mqtt/mqtt/v5.0/mqtt-v5.0.html

Odoo S.A. (2026). *Become an Odoo partner — partnership program*. Odoo S.A. Récupérée mai 9, 2026, à partir de https://www.odoo.com/become-a-partner

OECD. (2023). *G20/OECD Principles of Corporate Governance 2023*. https://doi.org/10.1787/ed750b30-en

Ollama. (2025). Ollama — run large language models locally. Récupérée avril 25, 2025, à partir de https://ollama.com

Olson, D. L., Johansson, B., & De Carvalho, R. A. (2018). Open source ERP business model framework. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, *50*, 30-36. https://doi.org/10.1016/j.rcim.2015.09.007

ONSS. (s. d.). *Dimona, DmfA et Limosa*. Office national de sécurité sociale (ONSS). Récupérée mai 18, 2026, à partir de https://www.onss.be/dimona-dmfa-et-limosa

Opara-Martins, J., Sahandi, R., & Tian, F. (2016). Critical analysis of vendor lock-in and its impact on cloud computing migration : a business perspective. *Journal of Cloud Computing*, *5*(1), 4. https://doi.org/10.1186/s13677-016-0054-z

OPC Foundation. (2024). *OPC Unified Architecture (OPC UA)* [IEC 62541]. OPC Foundation. Récupérée mai 14, 2026, à partir de https://opcfoundation.org/about/opc-technologies/opc-ua/

Open Source Initiative. (2021, janvier 19). *The SSPL is not an open source license*. Open Source Initiative. Récupérée mai 17, 2026, à partir de https://opensource.org/blog/the-sspl-is-not-an-open-source-license

Open-core model. (2026, avril 21). Wikipedia. Récupérée mai 8, 2026, à partir de https://en.wikipedia.org/wiki/Open-core_model

OpenView Partners. (2023). *2023 SaaS benchmarks report*. OpenView Partners. Récupérée mai 7, 2026, à partir de https://openviewpartners.com/2023-saas-benchmarks-report/

Orus. (s. d.). *L'assurance RC Pro des SSII / ESN*. Orus. Récupérée mai 18, 2026, à partir de https://www.orus.eu/assurance-rc-pro/esn-ssii

Osterwalder, A., & Pigneur, Y. (2010). *Business Model Generation : A Handbook for Visionaries, Game Changers, and Challengers*. Wiley.

Osterwalder, A., Pigneur, Y., Bernarda, G., & Smith, A. (2014). *Value proposition design : how to create products and services customers want*. Wiley.

Patil, S. G., Mao, H., Yan, F., Ji, C. C.-J., Suresh, V., Stoica, I., & Gonzalez, J. E. (2025). *The Berkeley function calling leaderboard (BFCL) : from tool use to agentic evaluation of large language models*. Récupérée avril 25, 2026, à partir de https://gorilla.cs.berkeley.edu/leaderboard.html

Pelser, J., de Ruyter, K., Wetzels, M., Grewal, D., Cox, D., & van Beuningen, J. (2015). B2B channel partner programs : disentangling indebtedness from gratitude. *Journal of Retailing*, *91*(4), 660-678. https://doi.org/10.1016/j.jretai.2015.05.006

Pflaum, S. (2025). *2025 B2B SaaS startup benchmarks*. Lighter Capital. Récupérée mai 8, 2026, à partir de https://www.lightercapital.com/blog/b2b-saas-startup-benchmarking-insights

Pintilie, A., Poelarends, R., & Capiluppi, A. (2025). Optimising IIoT control systems at Demcon : integrating MQTT, Sparkplug B, and ISA-88 for unified automation. *Proceedings of the 20th International Conference on Evaluation of Novel Approaches to Software Engineering (ENASE 2025)*, 351-358. https://doi.org/10.5220/0013142000003928

Plaat, A., van Duijn, M., van Stein, N., Preuss, M., van der Putten, P., & Batenburg, K. J. (2025). Agentic large language models, a survey. *Journal of Artificial Intelligence Research*, *84*. https://doi.org/10.1613/jair.1.18675

Porter, M. E. (1985). *Competitive advantage : creating and sustaining superior performance*. Free Press.

Potvin, R., & Levenberg, J. (2016). Why Google stores billions of lines of code in a single repository. *Communications of the ACM*, *59*(7), 78-87. https://doi.org/10.1145/2854146

Prades, L., Romero, F., Estruch, A., García-Dominguez, A., & Serrano, J. J. (2013). Defining a methodology to design and implement business process models in BPMN according to the standard ANSI/ISA-95 in a manufacturing enterprise. *Procedia Engineering*, *63*, 115-122. https://doi.org/10.1016/j.proeng.2013.08.283

Psycopg Project. (2024). *Psycopg/LICENSE.txt at master*. Psycopg Project (GitHub). Récupérée mai 17, 2026, à partir de https://github.com/psycopg/psycopg/blob/master/LICENSE.txt

Quiry, P., & Le Fur, Y. (2025). *Finance d'entreprise : Pierre Vernimmen* (23e éd.). Dalloz.

Rajković, P., Aleksić, D., Janković, D., Milenković, A., & Đorđević, A. (2025). Hybrid deployment strategy for software updates to the manufacturing execution system layer. *Computer Science and Information Systems*, *22*(2), 401-435. https://doi.org/10.2298/CSIS240807027R

Ramis Ferrer, B., Muhammad, U., Mohammed, W. M., & Martínez Lastra, J. L. (2018). Implementing and visualizing ISO 22400 key performance indicators for monitoring discrete manufacturing systems. *Machines*, *6*(3), 39. https://doi.org/10.3390/machines6030039

React Team. (2025, février 14). *Sunsetting Create React App*. React. Récupérée avril 30, 2026, à partir de https://react.dev/blog/2025/02/14/sunsetting-create-react-app

Redis Inc. (2024, mars 20). *Redis adopts dual source-available licensing*. Redis Inc. Récupérée mai 17, 2026, à partir de https://redis.io/blog/redis-adopts-dual-source-available-licensing/

Reichheld, F. F. (2003). The One Number You Need to Grow. *Harvard Business Review*, *81*(12), 46-54. Récupérée mai 18, 2026, à partir de https://hbr.org/2003/12/the-one-number-you-need-to-grow

Riehle, D. (2012). The single-vendor commercial open source business model. *Information Systems and e-Business Management*, *10*(1), 5-17. https://doi.org/10.1007/s10257-010-0149-x

Riehle, D. (2020). Single-vendor open source firms. *Computer*, *53*(4), 68-72. https://doi.org/10.1109/MC.2020.2969672

Riehle, D. (2021). The open source distributor business model. *Computer*, *54*(12), 99-103. https://doi.org/10.1109/MC.2021.3112318

Rietveld, J. (2018). Creating and capturing value from freemium business models : a demand-side perspective. *Strategic Entrepreneurship Journal*, *12*(2), 171-193. https://doi.org/10.1002/sej.1279

Robles, G., Gamalielsson, J., Lundell, B., Brax, C., Persson, T., Mattsson, A., Gustavsson, T., Feist, J., & Öberg, J. (2026). A comparative analysis of industrial involvement and licensing in the open source software ecosystems of four IoT standards. *Journal of Systems and Software*, *234*, 112708. https://doi.org/10.1016/j.jss.2025.112708

Rogers, E. M. (2003). *Diffusion of Innovations* (5e éd.). Free Press.

SaaS Capital. (2024). *Churn benchmarks for B2B SaaS companies*. SaaS Capital. Récupérée mai 8, 2026, à partir de https://www.saas-capital.com/research/churn-benchmarks-for-b2b-saas-companies/

SaaS Capital. (2025, janvier). *2025 Private SaaS Company Valuations*. SaaS Capital. Récupérée mai 28, 2026, à partir de https://www.saas-capital.com/blog-posts/private-saas-company-valuations-multiples/

Sáenz de Ugarte, B., Artiba, A., & Pellerin, R. (2009). Manufacturing Execution System – A Literature Review. *Production Planning & Control*, *20*(6), 525-539. https://doi.org/10.1080/09537280902938613

Sandhu, R. S., Coyne, E. J., Feinstein, H. L., & Youman, C. E. (1996). Role-based access control models. *Computer*, *29*(2), 38-47. https://doi.org/10.1109/2.485845

Schwartmann, R., Keber, T., Zenner, K., & Kurth, S. (2024). Data protection aspects of the use of artificial intelligence—initial overview of the intersection between GDPR and AI act. https://doi.org/10.9785/cri-2024-250503

Shahrivar, S., Elahi, S., Hassanzadeh, A., & Montazer, G. (2018). A business model for commercial open source software : a systematic literature review. *Information and Software Technology*, *103*, 202-214. https://doi.org/10.1016/j.infsof.2018.06.018

Shoplogix. (2025). *Total cost of ownership for MES : financial guide for smart manufacturing*. Shoplogix. Récupérée mai 12, 2026, à partir de https://shoplogix.com/total-cost-of-ownership-for-mes/

Silva, D. M. A., Carvalho, L., Soares, J. A. M., & Sofia, R. C. (2021). A performance analysis of Internet of Things networking protocols : Evaluating MQTT, CoAP, OPC UA. *Applied Sciences*, *11*(11), 4879. https://doi.org/10.3390/app11114879

Song, H., Shen, Y., Luo, W., Guo, L., Chen, T., Wang, J., Li, B., Zhang, X., & Chen, J. (2025). Beyond the protocol : unveiling attack vectors in the Model Context Protocol ecosystem. https://doi.org/10.48550/arXiv.2506.02040

SPF Économie. (s. d.). *Les formes de sociétés*. Service public fédéral Économie, P.M.E., Classes moyennes et Énergie. Récupérée mai 18, 2026, à partir de https://economie.fgov.be/fr/themes/entreprises/creer-une-entreprise/demarches-pour-creer-une/les-formes-de-societes

SPF Emploi. (s. d.). *Contrat d'occupation d'étudiants*. SPF Emploi, Travail et Concertation sociale. Récupérée mai 18, 2026, à partir de https://emploi.belgique.be/fr/themes/contrats-de-travail/contrats-de-travail-particuliers/contrat-doccupation-detudiants

SPF Finances. (2015, octobre 16). *Comptabilité et facturation*. Service public fédéral Finances. Récupérée mai 18, 2026, à partir de https://finances.belgium.be/fr/entreprises/tva/comptabilite-facturation/comptabilite-facturation

SPF Finances. (2024). *Déclaration à l'impôt des sociétés – exercice d'imposition 2024 (formulaire officiel)* [Cadre « Détail des bénéfices », case 1754 : taux réduit de 20 % sur la première tranche de 100 000 €; case 1460 : imposable au taux normal de 25 %]. Service public fédéral Finances. Récupérée juin 1, 2026, à partir de https://finances.belgium.be/sites/default/files/downloads/121-declaration-isoc-2024.pdf

Stas de Richelle, Laurent. (2019, décembre 19). *Les responsabilités des administrateurs dans le nouveau Code des Sociétés et Associations*. Barreau de Liège-Huy. Récupérée mai 18, 2026, à partir de https://barreaudeliege-huy.be/fr/actualites/les-responsabilites-des-administrateurs-dans-le-nouveau-code-des-societes-et

Steinborn, L. (2004, décembre 30). The rules governing medicinal products in the european union. In *GMP/ISO quality audit manual for healthcare manufacturers and their suppliers, volume 2 – regulations, standards, and guidelines* (p. 257-316). CRC Press. https://doi.org/10.3109/9780203026656-14

Steinhoff, L., Kim, J. J., Kanuri, V. K., & Palmatier, R. W. (2025). Unintended consequences of selling B2B digital subscription add-ons for customer onboarding. *Journal of the Academy of Marketing Science*, *53*, 1447-1481. https://doi.org/10.1007/s11747-025-01088-3

Sturley, H., Fournier, A., Salcedo-Navarro, A., Garcia-Pineda, M., & Segura-Garcia, J. (2024). Virtualization vs. containerization, a comparative approach for application deployment in the computing continuum focused on the edge. *Future Internet*, *16*(11), 427. https://doi.org/10.3390/fi16110427

Sutra, D., & Mansur, A. (2025). From resistance to adoption : a mixed-methods framework for successful manufacturing execution system implementation in digital transformation initiatives. *OPSI*, *18*(2), 425-447. https://doi.org/10.31315/opsi.v18i2.15583

Symestic. (2026). *MES implementation : from pilot to rollout in weeks, not months*. Symestic. Récupérée mai 12, 2026, à partir de https://www.symestic.com/en-us/blog/mes/implementation

Tao, F., Qi, Q., Wang, L., & Nee, A. Y. C. (2019). Digital twins and cyber–physical systems toward smart manufacturing and Industry 4.0 : correlation and comparison. *Engineering*, *5*, 653-661. https://doi.org/10.1016/j.eng.2019.01.014

TeepTrak. (2026). *MES system in manufacturing : honest guide to costs and alternatives 2026*. TeepTrak. Récupérée mai 12, 2026, à partir de https://teeptrak.com/en/mes-system-manufacturing/

The Linux Foundation. (2024, mars 28). *Linux Foundation launches open source Valkey community*. The Linux Foundation. Récupérée mai 17, 2026, à partir de https://www.linuxfoundation.org/press/linux-foundation-launches-open-source-valkey-community

Tiger Data. (2025, juin 17). *Software licensing : Timescale license (TSL)*. Timescale, Inc. (Tiger Data). Récupérée mai 17, 2026, à partir de https://www.tigerdata.com/legal/licenses

Torba, R., Dauzère-Pérès, S., Yugma, C., Gallais, C., & Pouzet, J. (2024). Solving a real-life multi-skill resource-constrained multi-project scheduling problem. *Annals of Operations Research*, *338*, 69-114. https://doi.org/10.1007/s10479-023-05784-7

Tziolas, T., Papageorgiou, K., Theodosiou, T., Papageorgiou, E., Mastos, T., & Papadopoulos, A. (2022). Autoencoders for anomaly detection in an industrial multivariate time series dataset. *Engineering Proceedings*, *18*(1), 23. https://doi.org/10.3390/engproc2022018023

UCM. (2022, novembre). *Le contrat d'étudiant*. Union des Classes Moyennes. Récupérée mai 18, 2026, à partir de https://www.ucm.be/sites/default/files/2022-11/Etudiant_2022-11.pdf

Vegetti, M., & Henning, G. (2014). ISA-88 formalization : A step towards its integration with the ISA-95 standard. *Proceedings of the 6th Workshop on Formal Ontologies Meet Industry (FOMI)*, *1333*. https://ceur-ws.org/Vol-1333/fomi2014_4.pdf

Virta, J., Seilonen, I., Tuomi, A., & Koskinen, K. (2010). SOA-Based integration for batch process management with OPC UA and ISA-88/95. *2010 IEEE 15th Conference on Emerging Technologies & Factory Automation (ETFA)*. https://doi.org/10.1109/ETFA.2010.5641286

Wang, C., Qiao, J., Huang, X., Song, S., Hou, H., Jiang, T., Rui, L., Wang, J., & Sun, J. (2023). Apache IoTDB : a time series database for IoT applications. *Proceedings of the ACM on Management of Data*, *1*(2). https://doi.org/10.1145/3589775

Wen, L., Rickert, M., Pan, F., Lin, J., & Knoll, A. (2023). Bare-metal vs. hypervisors and containers : performance evaluation of virtualization technologies for software-defined vehicles. *2023 IEEE Intelligent Vehicles Symposium (IV)*. https://doi.org/10.1109/IV55152.2023.10186789

Williamson, C. (2026). S&P global eurozone manufacturing PMI [April 2026 release (headline at 52.2, 47-month high). Historical chart (2016–2026) shows the headline index below the 50 expansion threshold continuously between mid-2022 and early 2026, with values in 2024 oscillating in the 43–47 range].

Yuan, Z., Li, M., Liu, C., Han, F., Huang, H., & Dai, H.-N. (2025). Chat with MES : LLM-driven user interface for manipulating garment manufacturing system through natural language. *Journal of Manufacturing Systems*, *80*, 1093-1107. https://doi.org/10.1016/j.jmsy.2025.02.008

Zhang, M., Shen, X., Cao, J., Cui, Z., & Jiang, S. (2025). EdgeShard : efficient LLM inference via collaborative edge computing. *IEEE Internet of Things Journal*. https://doi.org/10.1109/JIOT.2024.3524255

Zheng, P., Wang, H., Sang, Z., Zhong, R. Y., Liu, Y., Liu, C., Mubarok, K., Yu, S., & Xu, X. (2018). Smart manufacturing systems for Industry 4.0 : conceptual framework,

scenarios, and future perspectives. *Frontiers of Mechanical Engineering*. https://doi.org/10.1007/s11465-018-0499-5

Zhong, P., Chen, S., Wang, R., McCall, M., Titzer, B. L., Miller, H., & Gibbons, P. B. (2025). RTBAS : defending LLM agents against prompt injection and privacy leakage. https://doi.org/10.48550/arXiv.2502.08966

Zhu, L., Johnsson, C., Varisco, M., & Schiraldi, M. M. (2018). Key performance indicators for manufacturing operations management — gap analysis between process industrial needs and ISO 22400 standard. *Procedia Manufacturing*, *25*, 82-88. https://doi.org/10.1016/j.promfg.2018.06.060

UNIVERSITÉ CATHOLIQUE DE LOUVAIN
INEO – Formation interdisciplinaire en entrepreneuriat
Collège des Doyens, Place des Doyens 1, 1348 Louvain-la-Neuve, Belgique | **www.uclouvain.be/ineo**