



HAL
open science

Interaction Lean-BIM en phase exécution de projet de construction : Développement d'un outil de planification automatique basé sur les informations du bâtiment pour soutenir la démarche LPS®

Maroua Sbiti

► To cite this version:

Maroua Sbiti. Interaction Lean-BIM en phase exécution de projet de construction : Développement d'un outil de planification automatique basé sur les informations du bâtiment pour soutenir la démarche LPS®. Génie des procédés. HESAM Université, 2023. Français. NNT : 2023HESAE062 . tel-04467480

HAL Id: tel-04467480

<https://pastel.hal.science/tel-04467480v1>

Submitted on 20 Feb 2024

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

ÉCOLE DOCTORALE SCIENCES DES MÉTIERS DE L'INGÉNIEUR
LINEACT CESI – Campus de la Rochelle

THÈSE

présentée par : **Maroua SBITI**

soutenue le : **21 Novembre 2023**

pour obtenir le grade de : **Docteur d'HESAM Université**

préparée à : **École Nationale Supérieure d'Arts et Métiers**

Spécialités : **Génie civil : Lean Construction et BIM**

**Interaction Lean-BIM en phase exécution de projet de
construction :**

**Développement d'un outil de planification
automatique basé sur les informations du bâtiment
pour soutenir la démarche LPS®**

THÈSE dirigée par :
M. MAZARI Bélahcène

et co-encadrée par :
M. BEDDIAR Karim et M. BELADJINE Djaoued

Jury

Mme. Lilia GZARA, Professeur, INSA Lyon
M. David GREENWOOD, Professeur, Northumbria University
M. Zoubeir LAFHAJ, Professeur, Ecole Centrale de Lille
M. Benachir MEDJDOUB, Professeur, Nottingham Trent University
M. Belahcene MAZARI, Directeur de recherche, Cesi LINEACT
M. Djaoued BELADJINE, Enseignant chercheur, Cesi LINEACT
M. Karim BEDDIAR, Enseignant chercheur HDR, Cesi LINEACT
M. Lionel CHEVALIER, Directeurs projets industrialisation, Equans

Présidente du Jury
Rapporteur
Rapporteur
Examineur
Examineur
Examineur
Examineur
Invité

Remerciements

La réalisation de ce travail a été possible grâce au concours de plusieurs personnes auxquelles je voudrais témoigner toute ma gratitude :

- Mon directeur de thèse M. Bélahcène Mazari pour avoir accepté de diriger cette thèse et pour les conseils efficaces qu'il m'a dispensés.
- Mon entreprise d'accueil Equans pour m'avoir offert l'opportunité de réaliser cette thèse auprès de ses équipes.
- Mes encadrants académiques M. Karim Beddiar et M. Djaoued Beladjine, et mes encadrants industriels M. Romuald Perrault et M. Lionel Chevalier, qui par leurs paroles, leurs écrits, leurs conseils et leurs critiques ont guidé mes réflexions durant mes recherches.
- Toutes les personnes d'Equans qui ont contribué de près ou de loin à ce projet, merci pour votre aide et pour votre disponibilité.
- Les membres du jury pour le temps qu'ils ont consacré à l'examen de mon manuscrit et pour leurs différentes remarques.

Ainsi, je tiens à témoigner toute ma reconnaissance à mes très chers parents, Abdelouahed Sbiti et Laila Chenfour, pour tous les efforts qu'ils ont déployés pour mon éducation et mon bien-être. Merci également à ma petite sœur Aya Sbiti pour son encouragement et les bons souvenirs que nous avons partagés. Aussi, je tiens à témoigner toute ma gratitude à mon cher conjoint Aymane Hadri pour son soutien et son accompagnement dans les travaux de développement.

Résumé

Ces dernières années, le secteur de la construction a connu une baisse de productivité par rapport aux autres secteurs d'activité. Cette chute est principalement due à l'adoption tardive et ralentie des méthodes de production allégées et des nouvelles technologies. Pour améliorer sa productivité, le secteur de la construction doit accélérer son adoption des techniques du Lean Construction (LC) et du BIM. Ces solutions s'avèrent être efficaces pour améliorer la collaboration entre les acteurs d'un projet, optimiser les processus de conception et de construction et par voie de conséquence construire vite, mieux et moins cher. Malgré le développement et la mise en œuvre séparés de ces solutions, des travaux de recherche ont montré un fort intérêt quant à leur application conjointe.

Afin de contribuer à la co-application du LC et du BIM, et en se basant sur un état de l'art, nos travaux de recherche ont conduit à l'identification d'une interaction prometteuse entre ces deux approches. Celle-ci relie la méthode Last Planner System® (méthode de planification collaborative du LC) aux fonctions de visualisation du BIM. Par ailleurs, une analyse détaillée des outils combinant le LPS® et le BIM a montré que l'exploitation des données générées par ces deux approches ne fait pas encore l'objet d'une intégration complète. Pour améliorer l'intégration entre le LPS® et le BIM, nous proposons à travers cette thèse d'automatiser la génération des tâches du planning collaboratif de l'approche LPS® à partir des données opérationnelles d'un projet de construction, y compris les données de la maquette numérique BIM. L'automatisation de la planification permet aux décideurs de s'affranchir du travail manuel fastidieux, ce qui se traduit par un gain de temps et économique. De plus, elle capitalise sur les données opérationnelles du projet pour créer de la valeur ajoutée, ce qui témoigne d'une gestion plus légère des informations du bâtiment, c'est-à-dire d'une approche « Lean Building Information Management ».

Sur le plan technologique, nos travaux ont permis de mettre en place un outil (une application Web) permettant de générer automatiquement un planning spatio-temporel en utilisant les données du génie climatique d'un projet de construction réel. Ces informations incluent les données de chiffrage du projet produites en phase avant-vente, les données de la maquette numérique modélisées en phase d'études d'exécution, les jalons imposés par le client ainsi que les données standards des opérations de mises en œuvre des équipements. La mise en œuvre de cette solution a nécessité une analyse préalable des besoins des utilisateurs, des données d'entrées, un travail rigoureux pour rédiger et standardiser les opérations de mise en œuvre des équipements, ainsi que plusieurs développements notamment informatiques.

Enfin, des évaluations fonctionnelles et analytiques ont été menées afin de vérifier la cohérence des résultats générés par la solution, ainsi que pour évaluer dans quelle mesure ses fonctionnalités répondent aux besoins des utilisateurs finaux.

Les résultats obtenus dans le cadre de cette thèse ouvrent la voie à plusieurs travaux futurs, notamment en matière de gestion continue des données des projets de construction tout au long de leurs cycles de vie, grâce à l'utilisation des entrepôts de données (DataWarehouse).

Abstract

In recent years, the construction sector has experienced a decline in productivity compared to other industries. This decrease is primarily due to the delayed and slow adoption of lean production methods and new technologies. To enhance its productivity, the construction sector must expedite its adoption of Lean Construction (LC) techniques and Building Information Modeling (BIM). These solutions have proven to be effective in improving collaboration among project stakeholders, optimizing design and construction processes, and consequently enabling faster, better, and more cost-effective construction. Despite the separate development and implementation of these solutions, research has shown a strong interest in their combined application.

In order to contribute to the co-application of LC and BIM, based on a state-of-the-art review, our research has led to the identification of a promising interaction between these two approaches. This connection links the Last Planner System® (a collaborative planning method of LC) with the visualization functions of BIM. Furthermore, a detailed analysis of tools combining LPS® and BIM has shown that the utilization of data generated by these two approaches is not yet fully integrated. To enhance the integration between LPS® and BIM, we propose, through this thesis, to automate the generation of tasks in the collaborative planning of the LPS® approach using operational data from a construction project, including data from the BIM digital model. Automating the planning process allows decision-makers to eliminate tedious manual work, resulting in time and cost savings. Moreover, it leverages the project's operational data to create added value, demonstrating a leaner management approach to building information, known as "Lean Building Information Management."

On a technological level, our work has allowed us to implement a tool (a web application) that automatically generates a spatio-temporal schedule using real construction project data of the HVAC (heating, ventilation, and air conditioning) discipline. These pieces of information include project estimation data generated during the tendering phase, data from the digital model created during the detailed design stage, the client's milestones, as well as standards of equipments' installation operations. The implementation of this solution required a preliminary analysis of user needs and input data, meticulous work to define and standardize the equipments' installation operations as well as several developments, including software development.

Finally, functional and analytical evaluations were conducted to verify the coherence of the results generated by the solution, as well as to assess to what extent its functionalities meet the needs of end users.

The results obtained in this thesis pave the way for several future works, particularly in the field of continuous management of construction projects data throughout their life cycles, through the use of data warehouses.

Liste des publications et communications

Articles dans des revues internationales avec comité de lecture [ACL]

- Sbiti, M.; Beladjine, D.; Beddiar, K.; Mazari, B. Leveraging Quantity Surveying Data and BIM to Automate Mechanical and Electrical (M & E) Construction Planning. *Appl. Sci.* 2022, 12, 4546. <https://doi.org/10.3390/app12094546>
- Sbiti, M.; Beddiar, K.; Beladjine, D.; Perrault, R.; Mazari, B. Toward BIM and LPS® Data Integration for Lean Site Project Management: A State-of-the-Art Review and Recommendations. *Buildings* 2021, 11, 196. <https://doi.org/10.3390/buildings11050196>

Articles en conférences (in)ternationales avec comité de lecture [C-ACTI/ACTN]

- Sbiti, M.; Beddiar, K.; Beladjine, D.; Perrault, R.; Mazari, B. Field Management Solutions Supporting Foreman Executive Tasks. In Proceedings of the 23rd International Conference on Lean Construction, Lean Principles and Theory, Amsterdam, The Netherlands, 8-9 February 2021.
- Sbiti, M.; Beddiar, K.; Beladjine, D.; Perrault, R.; Mazari, B. La construction DigitaLean : Exigences et Propositions. In Proceedings of 27^{ème} colloque des sciences de la conception et de l'innovation, 2 July 2020.

Communications

- Sbiti, M.; Perrault, R. DigitaLean Construction: Scheduling automation for MEP activities. Communication at the International Symposium Sustainable Buildings and Construction 4.0, 11 May 2022.

Table des matières

Remerciements	2
Résumé	3
Abstract	4
Liste des publications et communications.....	5
Table des matières.....	6
Sigles et abréviations.....	9
Liste des figures	11
Liste des tableaux	14
Introduction	15
Chapitre 1 : <i>Genèse du projet et contexte industriel</i>	18
1.1. Genèse du projet de thèse	19
1.2. Contexte industriel.....	20
1.2.1. Adoption du Lean Construction	20
1.2.2. Adoption du BIM	22
1.3. Difficultés liées à la planification des travaux.....	23
1.4. Conclusion	26
Chapitre 2 : <i>État de l'art</i>	27
2.1. Etat des lieux du secteur de la construction.....	28
2.2. Fondamentaux du Lean Construction.....	31
2.2.1. Origine et évolution.....	31
2.2.2. Définitions et principes	32
2.2.3. Boîte à outils du Lean Construction	34
2.2.4. Tendance de digitalisation des outils conventionnels	39

2.3.	Fondamentaux du BIM.....	40
2.3.1.	Origine et évolution.....	40
2.3.2.	Définitions.....	42
2.3.3.	Fonctionnalités du BIM.....	45
2.4.	Analyse des interactions entre le Lean Construction et le BIM	51
2.5.	Analyse des outils combinant le LPS® et le BIM.....	55
2.6.	Motivations – Questionnements scientifiques.....	63
2.7.	Méthodologie de recherche	65
2.8.	Conclusion.....	69
Chapitre 3 : <i>Conception et développement d’un outil de planification automatique</i>		70
3.1.	Spécification des besoins pour la planification du montage.....	71
3.2.	Etudes de faisabilité.....	74
3.2.1.	Contraintes temporelles de planification.....	74
3.2.2.	Quantitatif du matériel et temps de mise en œuvre.....	77
3.2.3.	Planification standard du savoir-faire métier	84
3.3.	Proposition d’un outil de planification automatique de la phase de montage	88
3.3.1.	La base de données.....	91
3.3.2.	Traitement des données.....	99
3.3.3.	Interface utilisateur.....	103
3.4.	Planification avec un lissage des ressources humaines	113
3.4.1.	Formulation du problème	113
3.4.2.	Construction du modèle	114
3.4.3.	Solution du modèle.....	116
3.4.4.	Validation et mise en œuvre.....	117
3.5.	Discussion et conclusion	121

Chapitre 4 : <i>Evaluation de l'outil de planification automatique</i>	124
4.1. Introduction sur les méthodes d'évaluation.....	125
4.2. Sélection des méthodes d'évaluation de notre outil de planification automatique.....	126
4.3. Résultats des tests fonctionnels	127
4.4. Résultats de l'évaluation analytique	128
4.5. Discussion et conclusion	134
Conclusion et perspectives	135
Conclusion.....	135
Perspectives	138
Références	141
Annexes.....	151
Annexe 1 : Extrait du contenu de la table t_level.....	151
Annexe 2 : Extrait du contenu de la table t_article.....	151
Annexe 3 : Extrait du contenu de la table t_level_article.....	152
Annexe 4 : Extrait du contenu de la table t_group	152
Annexe 5 : Extrait du contenu de la table t_operation	153
Annexe 6 : Extrait du contenu de la table t_group_operation	153
Annexe 7 : Extrait du contenu de la table t_operation_prerequisite.....	154
Annexe 8 : Extrait du contenu de la table t_level_model.....	154
Annexe 9 : Extrait du contenu de la table t_element_model.....	155
Annexe 10 : Extrait du contenu de la table t_working_days.....	155
Annexe 11 : Rappel des principes du tri topologique.....	156
Annexe 12 : Grille d'évaluation de notre outil de planification automatique	157

Sigles et abréviations

ANRT : Association nationale de la recherche et de la technologie.

AV : Avant-vente.

BIM : Building information model/modeling/management.

BFS : Breadth-first search.

BOC : Bâtiments et ouvrages complexes.

BTP : Bâtiment et travaux publics.

CCTP : Cahier des clauses techniques particulières.

CIFE : Center for integrated facility engineering.

CIFRE : Convention industrielle de formation par la recherche.

CRA : Constructive research approach.

CSC : Construction supply chain.

CVCD : Chauffage, ventilation, climatisation, désenfumage.

DCE : Dossier de consultation des entreprises.

DFS : Depth-first search.

DOE : Dossier des ouvrages exécutés.

DPGF : Décomposition du prix global et forfaitaire.

DSI : Direction des systèmes d'informations.

DSO : Direction support aux opérations.

EE : Etudes d'exécution.

ERP : Enterprise resource planning.

ESE : Equans solutions engineering.

ETI : Entreprise de taille intermédiaire.

ETL : Extract transform load.

GIS : Geographic information system.

GPS : Global positioning system.

ICE : Integrated concurrent engineering.

ICP : Iterative closest point.

IDM : Information delivery manual.

IFC : Industry foundation classes.

IGLC : International group of Lean Construction.
IPD : Integrated project delivery.
ITD : Innovation et transformation digitale.
LCI : Lean construction institute.
LoD : Level of detail.
LPDS : Lean project delivery system.
LPS[®] : Last planner system[®].
MCD : Modèle conceptuel de données.
MPD : Modèle physique de données.
MRP : Manufacturing resource planning.
MVD : Model view definition.
MVP : Management visuel de la performance.
NIBS : National Institute of building sciences.
OLAP : Online analytical processing.
PIB : Produit intérieur brut.
PLB : Plomberie.
PME : Petites et moyennes entreprises.
PPC : Percent plan complete.
RFID : Radio frequency identification.
RPO : Résolution des problèmes opérationnels.
SQL : Structured query language.
TIC : Technologies de l'information et de la communication.
TFV : Transformation flow value.
TPS : Toyota production system.
UWB : Ultra wideband.
VDC : Virtual design and construction.

Liste des figures

FIGURE 1: LES 5 STANDARDS LEAN CHEZ EQUANS FRANCE [6]	22
FIGURE 2: PRIORISATION DES USAGES BIM AU SEIN D'EQUANS, LES CHIFFRES SONT EN NOMBRE DE REpondANTS SUR UNE POPULATION DE 100 PARTICIPANTS A L'ENQUETE.....	23
FIGURE 3: PROCESSUS DE PILOTAGE D'UNE AFFAIRE CHEZ EQUANS.....	26
FIGURE 4: EVOLUTION DE LA VALEUR AJOUTEE PAR HEURES TRAVAILLEES DANS LE CONSTRUCTION ET L'INDUSTRIE AU ETATS UNIES (NOAH SMITH, 2021)	28
FIGURE 5: REPARTITION DES TEMPS PRODUCTIFS ET IMPRODUCTIFS DANS LE SECTEUR DE LA CONSTRUCTION [12].....	29
FIGURE 6: STRUCTURE DU SECTEUR DE LA CONSTRUCTION PAR TAILLE D'ENTREPRISE DANS QUATRE PAYS DIFFERENTS (DAVE, 2013)	31
FIGURE 7: EVOLUTION DU LEAN.....	32
FIGURE 8 : LEAN PROJECT DELIVERY SYSTEM [28].....	34
FIGURE 9: LES ETAPES DU LPS® [32].....	36
FIGURE 10: LIENS ENTRE LES DIFFERENTS ASPECTS DU BIM : FONCTIONNELS, INFORMATIONNELS, TECHNIQUES, ORGANISATIONNELS ET JURIDIQUES [47].	45
FIGURE 11: EXEMPLE DE MODELE 4D INCLUANT DES ELEMENTS LOGISTIQUES [60].....	49
FIGURE 12: CONCEPT DU SUIVI D'AVANCEMENT AUTOMATISEE VIA LE BIM ET LES TECHNOLOGIES DE CAPTURE DE LA DONNEE DU TERRAIN	50
FIGURE 13: MATRICE PONDEREE DES INTERACTIONS ENTRE LES TECHNIQUES DU LEAN CONSTRUCTION ET LES FONCTIONNALITES DU BIM [75].	54
FIGURE 14: PAGE DE MISE A JOUR DES AFFECTATIONS DE RESSOURCES D'UN LOT DE TRAVAIL DANS WORKPLAN [77].....	56
FIGURE 15: EXEMPLE DES CONTRAINTES D'UNE ACTIVITE GEREES DANS IPS	57
FIGURE 16: EXEMPLE DE VISUALISATION 4D DES CONTRAINTES DE TYPE RESSOURCES ET INFORMATIONS DANS LEWIS ; LA TACHE D'INSTALLATION DE LA CHARPENTE (SURLIGNEE EN BLEU) NE PEUT PAS DEMARRER CAR LES PLANS ET LE MATERIEL NE SONT PAS ENCORE DISPONIBLE [80].	58
FIGURE 17: APERÇU DU MODELE VDC DE L'ENTREPRISE SKANSKA NORWAY [82]	59
FIGURE 18: APERÇU DES STATUTS DES ACTIVITES DU PEINTRE VIA L'OUTIL CONWIP	60
FIGURE 19: APERÇU DE L'INTERFACE KANBIM.	61
FIGURE 20: RESUME DES FONCTIONNALITES DE VISILEAN [85]	62
FIGURE 21: MATRICE D'INTERACTIONS ENTRE LE BIM ET LE LPS® [86].....	63
FIGURE 22: OBJECTIFS ET PERIMETRE DE LA THESE (LES RESULTATS ATTENDUS DE CE TRAVAIL SONT ENCADRES EN VERT).....	65
FIGURE 23: APPROCHE DE RECHERCHE A L'INTERCONNEXION DE LA VISION PHILOSOPHIQUE, DE LA STRATEGIE ET DES METHODES DE RECHERCHE [88].	66
FIGURE 24: MECANISME DE TRAVAIL DANS LA CONSTRUCTIVE RESEARCH APPROACH.....	67
FIGURE 25: EXTRAIT DU PLANNING CONTRACTUEL DU PROJET DE CONSTRUCTION DU CENTRE CHIRURGICAL ET INTERVENTIONNEL DE RENNES [99]	76

FIGURE 26: EXEMPLE DE CLASSIFICATION DU GROUPE D'EQUIPEMENT DES GAINES FLEXIBLES	78
FIGURE 27: EXTRAIT DE LA FEUILLE DE METRE AERAUQUE DU PROJET CCI DE RENNES.....	79
FIGURE 28: EXTRAIT DE LA LISTE DES CODES UTILISEES PAR LE SERVICE CHIFFRAGE D'EQUANS	79
FIGURE 29: EXTRAIT DE LA BASE DE TEMPS UTILISEE PAR LE SERVICE CHIFFRAGE D'EQUANS.....	79
FIGURE 30: APERÇU SUR L'ONGLET "NOMENCLATURE" DU DEVIS DU PROJET CCI DE RENNES	80
FIGURE 31: CAPTURE DE LA MAQUETTE 3D DU CCI DE RENNES AVEC LES PROPRIETES D'UNE INSTANCE DE LA FAMILLE GAIN FLEXIBLE CIRCULAIRE DE TYPE AXI_ALU NU_Mo/Mo	82
FIGURE 32: EXTRAIT DU REFERENTIEL EQUANS DE REPERAGES DES FAMILLES REVIT	82
FIGURE 33: EXTRAIT DU VISUEL DU SEQUENCEMENT STANDARD ETABLI ET AFFINE AVEC LES RESPONSABLES DE PROJETS.....	85
FIGURE 34: ARCHITECTURE DE LA SOLUTION DEVELOPEE.	90
FIGURE 35: MODELE CONCEPTUEL DE NOTRE BASE DE DONNEES.	94
FIGURE 36: MODELE PHYSIQUE DE NOTRE BASE DE DONNEES.	95
FIGURE 37: APERÇU DES GROUPES DE NOTRE SCRIPT DYNAMO DEDIE A L'EXTRACTION AUTOMATIQUE DES QUANTITATIFS DE LA MAQUETTE VERS NOTRE BASE DE DONNEES.....	97
FIGURE 38: EXTRAIT DU CODE PYTHON UTILISE DANS UN NŒUD DU SCRIPT DEDIE A L'EXTRACTION DES DONNEES DES LONGUEURS DE GAINES.	98
FIGURE 39: LECTEUR DYNAMO PERMETTANT DE LANCER LE SCRIPT DEVELOPE	98
FIGURE 40: PROCESSUS DE TRAITEMENT DES DONNEES ET SES INTERACTIONS AVEC LA BASE DE DONNEES ET L'INTERFACE UTILISATEUR...	100
FIGURE 41: LES DEUX REPRESENTATIONS D'UN GRAPHE EN MACHINE (MATRICE D'ADJACENCE ET LISTES D'ADJACENCE)	101
FIGURE 42: SAISIE DES CONTRAINTES DE DISPONIBILITE DES NIVEAUX DECLARES EN PHASE AVANT-VENTE	103
FIGURE 43: SAISIE DES JALONS DE REALISATION DES PREREQUIS HORS METIER.....	104
FIGURE 44: DECLARATION DES JOURS DE LA SEMAINE TRAVAILLES (COCHE) ET DES HEURES D'OUVERTURE	104
FIGURE 45: DECLARATION DES CORRESPONDANCES ENTRE LA DESIGNATION DES NIVEAUX EN PHASE AV ET EE.....	105
FIGURE 46: VUE MACRO DU PLANNING GENERE.....	107
FIGURE 47: VUE DETAILLEE DES OPERATIONS DE MISES EN ŒUVRE DES TERMINAUX DU SYSTEME D'EAU CHAUDE EC AU NIVEAU RDJ, ET SES PREREQUIS.	108
FIGURE 48: INFORMATION DETAILLEES D'UNE OPERATION. (A) ONGLET DES INFORMATIONS GENERALES. (B) ONGLET DES PREDECESSEURS. (C) ONGLET « RESSOURCES » AFFICHE LES EQUIPEMENTS ISSUS DU CHIFFRAGE ASSOCIES A CETTE TACHE (LES ELEMENTS COCHES). (D) ONGLET « NOTES » LISTE LES EQUIPEMENTS ISSUS DE LA MAQUETTE NUMERIQUE ASSOCIES A CETTE TACHE.....	109
FIGURE 49: ESTIMATION DE LA CHARGE DE TRAVAIL ET DES RESSOURCES REQUIS.	111
FIGURE 50: ESTIMATION DU NOMBRE D'OUVRIERS REQUIS.....	112
FIGURE 51: METHODE DE RESOLUTION D'UN PROBLEME DE RECHERCHE OPERATIONNELLE [108]	113
FIGURE 52: PRINCIPE DE FONCTION D'UN ALGORITHME GENETIQUE [110].....	117
FIGURE 53: NOMBRE DE RESSOURCES REQUIS AVEC ET SANS LISSAGE DES RESSOURCES POUR L'ENSEMBLE DES DONNEES N°2	120

FIGURE 54: EXTRAIT DU PLANNING TOUT CORPS D'ETAT DU CCI DE RENNES CREE PAR L'ENTREPRISE GENERALE ET COMPLETE MANUELLEMENT PAR LE RESPONSABLE DE CE PROJET COTE EQUANS MR. THOMAS SEMENNOU	122
FIGURE 55: APPRECIATIONS GENERALES DES PARTICIPANTS VIS-A-VIS DE NOTRE PREUVE DE CONCEPT SUR UNE ECHELLE DE LIKERT	133
FIGURE 56: ARCHITECTURE D'UN ENTREPOT DE DONNEES DE PROJET DE CONSTRUCTION [115].....	140
FIGURE 57: EXEMPLE D'UN GRAPHE ORIENTE ACYCLIQUE	156
FIGURE 58: DEUX PRINCIPALES TECHNIQUES D'EXPLORATION DES SOMMETS D'UN GRAPHE (LE PARCOURS EN LARGEUR BFS ET LE PARCOURS EN PROFONDEUR DFS)	156

Liste des tableaux

TABEAU 1: CARACTERISTIQUES DU LITTLE BIM ET DU BIG BIM (SKYBIM, 2013).....	43
TABEAU 2: QUELQUES USAGES BIM PAR DIMENSION	46
TABEAU 3: EVALUATION DES FONCTIONS DE CERTAINS OUTILS BIM 4D DANS LE DOMAINE DE LA GESTION DE LA PRODUCTION [29]	55
TABEAU 4: EXIGENCES FONCTIONNELLES DE L'APPLICATION DE PLANIFICATION AUTOMATIQUE ET DE SUIVI DE L'AVANCEMENT ISSUES DE L'URS	72
TABEAU 5: PROPRIETES DE L'INSTANCE DE GAINÉ FLEXIBLE PRESENTÉE DANS LA FIGURE 31	83
TABEAU 6 : GAMME DE MISE EN ŒUVRE DU GROUPE TAD (TUBE ACIER NOIR DISTRIBUTION)	87
TABEAU 7: TAILLE DES ENSEMBLES DE DONNÉES UTILISÉES LORS DES TESTS DU MODÈLE D'OPTIMISATION	114
TABEAU 8: DETAIL DES INFORMATIONS CONTENUES DANS L'ENSEMBLE N°2.....	114
TABEAU 9: TEMPS DE CALCUL ET VALEUR DE LA FONCTION OBJECTIVE OBTENUS POUR LES QUATRE ENSEMBLES DE DONNÉES.....	118
TABEAU 10: MATRICE RESULTANTE DE L'EXECUTION DE NOTRE PROGRAMME POUR L'ENSEMBLE DES DONNÉES N°2.....	118
TABEAU 11: EXEMPLE DE MATRICE D'ORDONNANCEMENT DES TACHES DE L'ENSEMBLE DES DONNÉES N°2 SANS PRISE EN COMPTE DE L'USAGE DES RESSOURCES.....	119
TABEAU 12: METHODES D'EVALUATION D'UNE SOLUTION PROPOSÉE DANS LE DOMAINE DES TECHNOLOGIES DE L'INFORMATION [111].	125
TABEAU 13: COUVERTURE DES FONCTIONNALITES DE LA SPECIFICATION UTILISATEUR PAR NOTRE PREUVE DE CONCEPT ET LES COMMENTAIRES D'EVALUATION DES RESPONSABLES DE PROJETS (GRIS : HORS PERIMETRE, VERT : FONCTIONNALITE DEVELOPPEE, JAUNE : FONCTIONNALITE PARTIELLEMENT DEVELOPPEE, ORANGE : FONCTIONNALITE NON DEVELOPPEE, VIOLET : NOUVELLE FONCTIONNALITE IDENTIFIEE).....	129

Introduction

Selon le rapport de l'Organisation des Nations Unies publié en 2013, la population mondiale devrait augmenter de 23% par rapport à 2021 pour atteindre 9.6 milliards d'ici 2050 [1]. Cette croissance démographique sans précédent va entraîner une demande accrue de logements et d'infrastructures dans les villes. Les normes de construction et d'habitation devront être adaptées pour se conformer aux nouvelles règles édictées par cette évolution. Les acteurs de la construction sont confrontés à un défi de taille pour inventer de nouvelles solutions permettant de construire des logements vite, mieux et moins cher en réponse à l'urgence démographique. En outre, les transitions numériques et énergétiques devront également être prises en compte pour que le secteur de la construction s'adapte aux changements à venir.

Afin d'améliorer sa compétitivité, il serait judicieux pour le secteur de la construction de s'inspirer des innovations apportées aux procédés et aux produits de l'industrie manufacturière. Au cours des dernières décennies, ces innovations ont permis de doubler la productivité de l'industrie manufacturière. L'adoption des méthodes dégraissées de gestion de production et le recours aux nouvelles technologies de l'information sont des éléments clés de ce succès et devraient être testées dans le domaine de la construction.

Ces vingt dernières années ont vu l'émergence de plusieurs initiatives visant à industrialiser et à digitaliser le secteur de la construction. L'adoption du Lean Construction et de la modélisation des informations du bâtiment BIM ont commencé à changer les approches traditionnelles de gestion de projet vers de nouveaux modèles orientés sur la collaboration. D'un côté le Lean Construction implique le concours de tous les acteurs d'un projet de construction dans une approche d'amélioration continue des processus de production, centrée sur la satisfaction du client. Cette démarche consiste à réduire la variabilité dans les flux de production, ce qui permet d'éliminer les gaspillages et d'améliorer la performance. Dans le secteur de la construction, il existe de nombreuses causes de variabilité, notamment les difficultés de coordination et de communication entre les intervenants, les modifications de dernière minute de la conception, les imprévus sur le chantier tels que les intempéries, les retards de livraison et les accidents de travail. Malgré les efforts déployés, il est peu probable que cette variabilité soit complètement éliminée sur les chantiers. Cependant, il est possible de réduire ces incidents en anticipant les contraintes du projet grâce à la méthode Last Planner System[®] et au BIM. D'une part, le Last Planner System[®] est une

méthode de planification et d'apprentissage, issue du Lean Construction et développée spécifiquement pour la construction qui permet de favoriser un flux de travail continu, prévisible et fiable grâce à une anticipation des prérequis d'exécution des processus de construction. D'une autre part, le BIM favorise la collaboration entre les différents acteurs impliqués dans toutes les phases d'un projet de construction, améliore la communication entre ces parties prenante et réduit considérablement les incompréhensions du projet grâce à ses capacités de visualisation. Cette collaboration se fait autour d'une représentation virtuelle des données de l'ouvrage, appelée maquette numérique. Il s'agit d'une base de données intelligente, qui contient à la fois des informations géométriques et fonctionnelles. Cette représentation permet d'effectuer de multiples analyses et simulations.

Cependant, les paradigmes de ces deux approches continuent d'évoluer avec les avancées de la recherche dans ces domaines. Aujourd'hui, il est reconnu que ces deux méthodes contribuent de manière différente à briser les structures cloisonnées. Dans une démarche Lean Construction, la coopération remet en question les processus de production, en particulier pendant la phase d'exécution, pour déterminer les méthodes de construction, le moment opportun, l'emplacement approprié et les personnes responsables. Le BIM amène une réflexion sur la gestion des processus de production et des informations liées à la conception d'un produit à différentes étapes de son cycle de vie. Etant donné que les données relatives au produit et aux processus sont toutes les deux indispensables à la construction, les approches Lean Construction et BIM sont indéniablement compatibles et permettent d'étendre le concept de collaboration.

Cette thèse se concentre sur les interactions entre le Lean Construction et le BIM. Afin de contribuer à la co-application de ses deux approches, il est apparu, suite à une analyse de l'état de l'art, qu'une intégration prometteuse peut être réalisée entre les données du LPS[®] et celles de la maquette numérique BIM. A partir de ces recherches bibliographiques, un premier verrou scientifique a été identifié : Comment exploiter les données de la maquette numérique pour automatiser la planification en phase exécution ?

Cette problématique a été affinée par la suite afin de répondre au besoin exprimé par l'entreprise Equans, qui nécessitait une planification dès les premières étapes d'un projet, avant même que la maquette numérique ne soit modélisée. Ainsi, le verrou scientifique et technologique de cette thèse s'est transposée selon : Comment exploiter des données provenant de sources multiples y compris la maquette numérique pour automatiser la planification en phase exécution ?

L'objectif principal de cette thèse est de concevoir et développer un système de planification automatique qui utilise simultanément les données de chiffrage d'un projet et celles de la maquette numérique produites respectivement en phase avant-vente et en phase d'études d'exécution par les collaborateurs d'Equans.

Le présent mémoire est structuré en quatre chapitres :

- Le premier chapitre expose la genèse du projet de thèse et le contexte industriel. Dans la section 1.1, nous évoquons l'origine du projet, tandis que la section 1.2 présente un état des lieux des pratiques Lean Construction et BIM du partenaire industriel. Enfin, les enjeux en termes de planification des travaux sont relatés dans la section 1.3.
- Le deuxième chapitre présente un état de l'art de notre sujet de recherche. La section 2.1 rapporte les performances et les enjeux du secteur de la construction. La section 2.2 introduit la philosophie et les outils du Lean Construction. Dans la section 2.3, nous décrivons l'approche BIM et ses différents cas d'usages. Ensuite, nous étudions les interactions entre le Lean Construction et le BIM dans la section 2.4. Puis, nous examinons en détail dans la section 2.5 l'interaction entre le LPS[®] et le BIM. Nous concluons ce chapitre par les sections 2.6 et 2.7 qui résument respectivement nos questionnements scientifiques et la méthodologie de recherche.
- Le troisième chapitre se concentre sur la conception et le développement de notre solution de planification automatique. Nous commençons par présenter les spécifications fonctionnelles de l'application dans la section 3.1. Nous examinons ensuite la faisabilité de la solution dans la section 3.2. La section 3.3 décrit en détail l'architecture globale de notre solution et décrit comment chaque élément a été conçu et développé. Enfin, nous exposons nos travaux d'optimisation de la planification par le biais d'un lissage des ressources dans la section 3.4. Nous concluons ce chapitre avec une discussion et conclusion dans la section 3.5.
- Enfin, le quatrième chapitre est dédié à l'évaluation de notre outil de planification automatique. Les méthodes d'évaluations utilisées sont présentées dans la section 4.2 après un état de l'art synthétique des méthodes existants dans la littérature explicité dans la section 4.1. Les résultats des évaluations de notre outil par le biais des tests fonctionnels et de l'évaluation analytique sont décrits respectivement dans les sections 4.3 et 4.4. Enfin, la section 4.5 est dédié à la discussion des résultats et la conclusion de ce chapitre.

Chapitre 1 : *Genèse du projet et contexte industriel*

Sommaire

- 1.1. Genèse du projet de thèse
 - 1.2. Contexte industriel
 - 1.2.1. Adoption du Lean Construction
 - 1.2.2. Adoption du BIM
 - 1.3. Difficultés liées à la planification des travaux
 - 1.4. Conclusion
-

Dans ce chapitre, nous allons aborder le contexte qui a conduit à ce projet de thèse. Nous examinerons également les résultats de l'état des lieux des pratiques du Lean Construction et du BIM chez Equans. Enfin, nous décrirons les difficultés spécifiques que nous avons identifiées en matière de planification des travaux et de pilotage des projets chez Equans qui nous ont permis d'affiner l'orientation du sujet de thèse.

1.1. Genèse du projet de thèse

Chez Equans, le BIM et le Lean Construction sont employés de manière indépendante. Le BIM est principalement utilisé pour la modélisation paramétrique de l'ouvrage en phase de conception, tandis que le Lean Construction est davantage appliqué lors de la réalisation des travaux sur le chantier. Cependant, plusieurs directions opérationnelles estiment que l'utilisation du BIM peut entraîner des coûts et des délais supplémentaires pour les études, et que la maquette numérique n'est pas suffisamment exploitée sur le terrain. De même, les partisans du Lean Construction ont souvent des difficultés à obtenir les données techniques nécessaires au pilotage des chantiers, en particulier celles provenant des études. Dans ce contexte, l'idée d'intégrer le Lean Construction et du BIM a été proposée pour apporter des bénéfices mutuels aux concepteurs et aux réalisateurs.

Dans ce scénario de collaboration idéale, les différents acteurs du projet travaillent de manière efficiente pour optimiser les délais et les coûts. Les techniciens d'études collectent les besoins en informations des compagnons avant le début de la conception, ce qui permet d'alimenter la maquette numérique BIM par des données précises et pertinentes tout au long du processus de réalisation. Cette approche garantit la transmission adéquate des informations au terrain et permet aux décideurs d'allouer efficacement les ressources en matériel, en matériaux et en main-d'œuvre. Les compagnons sur le chantier utilisent les données transmises, les rectifient et les complètent de manière à les rendre conformes à la réalité du terrain. Ces données mises à jour alimentent ensuite de façon dynamique la maquette numérique, ce qui permet d'optimiser le temps nécessaire à la constitution du dossier des ouvrages exécutés (DOE). C'est à partir de ce scénario idyllique et de ces hypothèses qu'est née la thématique initiale de cette thèse :

Le Lean-BIM en construction : comment améliorer la performance opérationnelle en combinant le Lean et le BIM en phase exécution ?

Ce projet de recherche, réalisé au sein du laboratoire CESI LINEACT, est financé par l'entreprise Equans avec le soutien financier de l'ANRT dans le cadre du dispositif CIFRE. Cette dernière est spécialisée dans la conception, l'intégration et la maintenance de solutions multi techniques dans divers domaines tels que le génie climatique, le génie électrique, la réfrigération, la protection incendie, les technologies de l'information et de télécommunications, ainsi que les solutions

digitales. Equans est une entreprise issue de la scission des activités d'Axima et d'Ineo, les deux filiales historiques d'Engie, et fait actuellement partie du groupe Bouygues. L'expertise d'Equans dans ces différents domaines est mise à profit dans plusieurs marchés à travers les quatre divisions du groupe, à savoir : Spécialités (Infrastructures énergétiques, Transport, Défense & Marine, Industries des procédés), Smart Building (Bâtiments tertiaires, Industries de proximité), Réfrigération & Sécurité Incendie, Villes & Territoires Connectés (Smart City et Territoires intelligents, Réseaux, Technologie de l'information et de la communication, Sécurité) [2].

1.2. Contexte industriel

Pour accélérer les transitions énergétique, industrielle et numérique de ses clients, Equans infuse une culture environnementale, de management de la qualité, d'amélioration continue et de transformation digitale au sein de ses directions opérationnelles [3]. Nous décrivons succinctement dans la partie suivante les initiatives prises par Equans pour sensibiliser ses collaborateurs et ses clients aux méthodologies du Lean Construction et de BIM.

1.2.1. Adoption du Lean Construction

La transformation Lean chez Equans a débuté il y a plus de 10 ans pour garantir le partenariat avec le client historique du groupe « Les Chantiers De l'Atlantique » [4]. Depuis, les initiatives d'implémentation de cette culture se sont multipliées dans plusieurs agences engagées dans la conduite du changement. Aujourd'hui, le Lean Construction est porté par la Direction Support aux Opérations (DSO) née en janvier 2021 [5]. Elle promouvait 5 standards Lean (voir Figure 1) sur l'ensemble des divisions au plus près des équipes terrain : le 5S, le Management Visuel de la Performance (MVP), la Résolution des Problèmes Opérationnels (RPO), le Gemba Walk et le Last Planner System (LPS®) [6]. Il est important de noter que mes travaux de recherche en 1^{ère} année ont été menés au sein de la DSO sous la tutelle du responsable Lean Management d'Equans France, Monsieur Romuald Perrault.

Au démarrage de la thèse, nous avons réalisé un sondage en vue de quantifier la maturité du partenaire industriel au niveau de son adoption des techniques du Lean Construction et du BIM. Cette enquête a été adressée à l'ensemble des collaborateurs internes d'Equans via le groupe Yammer

« DigitaLean » dédié au partage de bonnes pratiques lean et digitales. 100 personnes ont participé à cette enquête impliquant des chargés d'affaires, responsables d'exécution, directeurs d'agences et régionaux, responsables d'études et commerciaux.

Les résultats de ce sondage ont montré que, malgré les efforts d'accompagnement des projets et de formation sur les techniques du Lean Construction, 39% uniquement des collaborateurs de notre échantillon sont sensibilisés à ces méthodes. Plus particulièrement, en ce qui concerne l'approche principale du Lean Construction, le LPS®, elle reste largement méconnue et peu appliquée. Seulement 20 personnes sur 100 en ont entendu parler et seuls 14 participants ont eu l'expérience de le mettre en pratique. Ces chiffres datent de 2021, ils proviennent des résultats d'un sondage réalisé au démarrage de la thèse en vue de quantifier la maturité du partenaire industriel sur le plan du Lean Construction et du BIM. Depuis, la situation devrait avoir évolué au regard de l'opiniâtreté des quatre experts Lean d'Equans France dans la transmission de la culture de l'amélioration continue.

La transformation Lean chez Equans est aussi accompagnée d'une transformation digitale des principaux processus de son système de management. Une équipe dédiée de la DSO travaille en collaboration avec la Direction des Systèmes d'Informations (DSI) pour constituer le catalogue applicatif, sa promotion et la conduite du changement [7]. Ce catalogue couvre plusieurs processus opérationnels et stratégiques permettant par exemple la gestion de la relation client avec l'outil Planet, la gestion des devis via QuickDevis, le pointage et la gestion de la paie grâce à Fiori et Pleiades, la gestion intégrée des activités de l'entreprise avec SAP, la gestion du chantier en mobilité en utilisant les outils Fieldwire ou Kairnial, le contrôle de gestion et l'aide à la décision avec Vision... Quant aux systèmes d'ingénierie, y compris les logiciels BIM, ils sont administrés par une autre entité et ne font pas partie du périmètre de la DSI. Nous abordons les pratiques et ces systèmes d'ingénierie dans la section suivante.

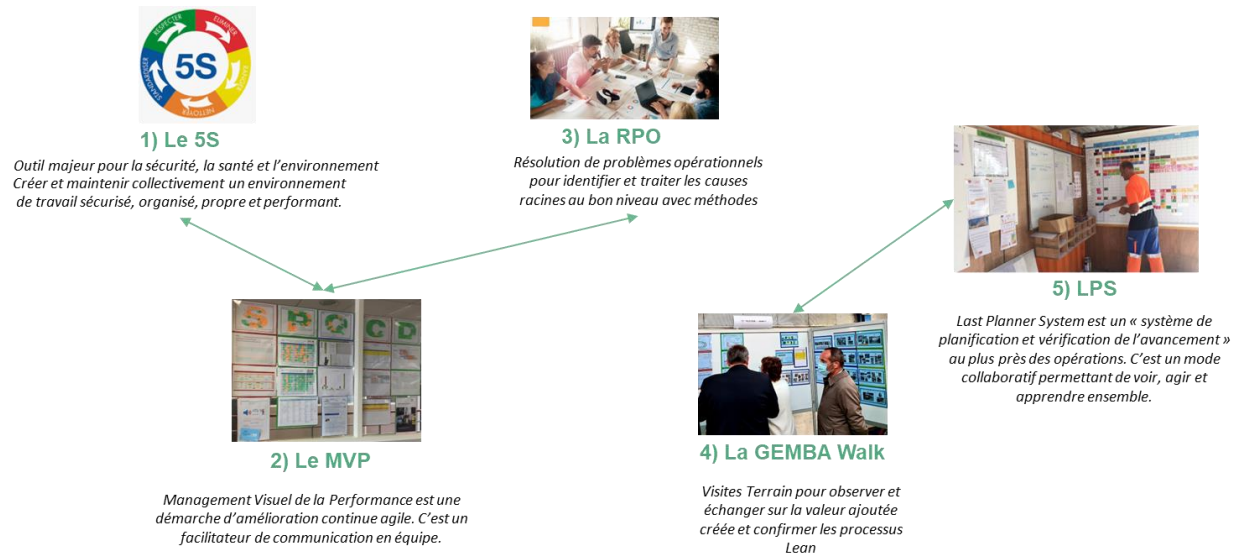


Figure 1: Les 5 standards Lean chez Equans France [6]

1.2.2. Adoption du BIM

La Direction Innovation et Transformation Digitale (ITD), un service au sein de l'entité Equans Solutions Engineering (ESE) d'Equans, est chargée des activités de développement et de déploiement des outils de conception assistée par ordinateur nécessaires à la mise en place de la démarche BIM. Les activités de ESE comprennent principalement la réalisation des offres de prix, la conception technique et énergétique, la réalisation des plans et des maquettes numériques, le dimensionnement... Au sein de ESE, ITD (Innovation et Transformation Digitale) assure également les missions de conseil et de formation pour faire monter en compétence les opérationnels internes à l'entreprise sur les sujets de la modélisation et du management des informations d'un bâtiment BIM. Depuis 2014, ITD a formé 1172 personnes aux fondamentaux de la méthodologie BIM et l'utilisation du logiciel REVIT à différents niveaux de spécialisation, allant du niveau 1 qui enseigne les bases de la modélisation, au niveau 2 qui permet d'aborder les bonnes pratiques dans un projet BIM et de résoudre les problèmes courants, jusqu'au niveau REVIT familles qui permet de modéliser et de produire des familles selon le standard établi par Equans.

Depuis juillet 2021, mon projet de thèse est encadré et financé par la Direction Industrialisation et Méthodes de ESE, dont Monsieur Lionel Chevalier est le représentant. Les résultats du sondage effectué lors du lancement de cette thèse confirment que la modélisation paramétrique est une compétence acquise et maîtrisée dans la plupart des agences Equans (Figure

2). Rappelons que ce sondage avait pour objectif de réaliser une évaluation quantitative de la maturité du partenaire industriel en matière de Lean Construction et du BIM, comme mentionné dans la section précédente. Les résultats de ce sondage montrent que les maquettes numériques BIM produites par les ingénieurs d'études sont souvent utilisées pour la détection des conflits lors des réunions de synthèse. Cependant, d'après l'enquête menée, les autres usages (ou dimensions) BIM tels que la planification des travaux (4D), l'estimation des coûts (5D), l'analyse énergétique et la durabilité de la construction (6D), ainsi que le suivi de la maintenance (7D) et de la sécurité (8D) sont encore en cours de développement (Figure 2). Parmi ces usages, l'amélioration de la planification des travaux en utilisant les données de la maquette numérique est devenue une priorité, ce qui correspond à la quatrième dimension du BIM.

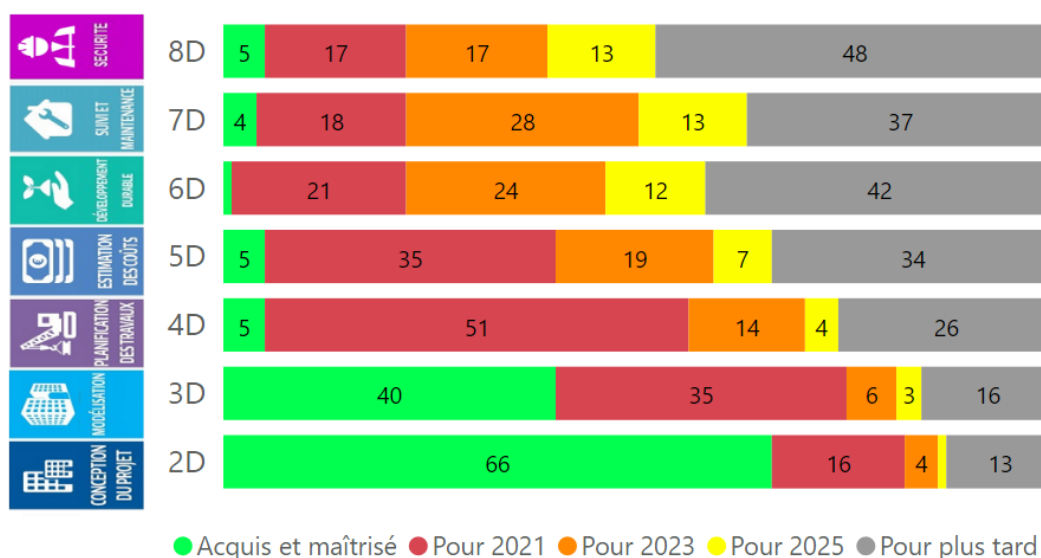


Figure 2: Priorisation des usages BIM au sein d'Equans, les chiffres sont en nombre de répondants sur une population de 100 participants à l'enquête

1.3. Difficultés liées à la planification des travaux

Afin de répondre à la demande de l'entreprise de passer à la modélisation BIM 4D, il est essentiel de comprendre les méthodes actuellement utilisées pour planifier les travaux chez Equans. Nous entendons par le terme « travaux » les activités liées à la phase de montage qui fait partie du processus installation d'une affaire chez Equans (voir Figure 3). Pour ce faire, j'ai mené une étude sur le terrain en m'immergeant dans un véritable projet de construction IMACIF à Nantes, en tant

qu'assistante du responsable de projet Gael Nedelka, pendant une période d'environ 4 mois. Au cours de cette période, j'ai collaboré étroitement avec les équipes du projet pour effectuer une planification efficace et assurer un suivi rigoureux de l'avancement physique et des heures travaillées, en utilisant les méthodes conventionnelles de gestion de projet. Suite à cette expérience réussie, j'ai été sollicitée par le directeur de l'agence d'Angers pour partager mon expertise et aider à la planification de deux projets en cours, en raison de l'abandon de la planification des projets par ses équipes. J'ai également eu la chance de rencontrer d'autres directeurs et responsables de projets importants du service Bâtiments et Ouvrages Complexes (BOC), ce qui m'a permis de compléter mes connaissances et d'affiner mes compétences en gestion de projet.

De manière générale, nous avons constaté que les responsables de projets planifiaient manuellement leurs chantiers sur un tableur Excel. La plupart d'entre eux utilisent les données de chiffrage du projet, produites en phase avant-vente pour quantifier la charge de travail par tâche. Cette phase avant-vente correspond au processus commercial qui marque le début des processus de pilotage d'une affaire chez Equans (voir Figure 3). Les données de chiffrage du projet sont principalement incluses dans les feuilles de métrés et de quantitatifs du matériel, ainsi que dans le devis fourni au client. Quant aux opérations de mise en œuvre des équipements et leurs enchaînements, celles-ci sont déterminées de façon subjective en fonction de l'expérience du responsable, son niveau de précision et sa connaissance propre du métier. Lorsque nous examinons différents exemples de plannings de montage, nous constatons que chaque planification est unique et n'a pas une structure standardisée.

En plus de l'absence de standards, produire un planning pour un chantier nécessite une semaine complète de travail intense pour une affaire de taille moyenne (entre 5 à 10M€). En effet, cela exige de compiler des données de deux sources distinctes : les métrés et les quantitatifs sous Excel d'un côté, et le devis client au format qdv (Quick Devis) de l'autre. Le coût initial de création de planning et de sa mise à jour pour les travaux d'installation, hors maintenance, représente environ 0.91% du chiffre d'affaires de la filiale Axima d'Equans, ce qui est significatif étant donné que les projets doivent dégager une marge de 3%.

En raison de sa nature chronophage et coûteuse, la planification des travaux est souvent négligée. Voire, certains chefs de chantier considèrent qu'un planning constamment en mouvement et jamais respecté n'a aucun intérêt. Pourtant, l'expérience montre que les entreprises qui réussissent sont celles qui préparent et planifient le mieux leurs actions, ce qui leur permet d'anticiper les risques

et de les prévenir. La planification est également une étape cruciale dans le cycle de vie d'un projet, car elle permet de suivre et de comparer l'avancement physique des travaux et les dépenses tout au long de l'exécution. Ces mesures sont indispensables pour identifier les écarts et prendre les bonnes décisions au bon moment.

Ces raisons industrielles et les verrous scientifiques issus de la littérature ont été examinés pour déterminer si l'automatisation de la planification des travaux serait bénéfique pour l'entreprise Equans. Les résultats ont montré que la mise en place d'un tel processus offrait de nombreux avantages.

Tout d'abord, l'automatisation de la planification permettrait d'améliorer considérablement l'efficacité opérationnelle. Les responsables de projets pourraient utiliser le temps qu'ils passent actuellement à planifier manuellement les travaux pour se concentrer sur des tâches à forte valeur ajoutée telles que la prise de décisions importantes et la résolution de problèmes complexes.

De plus, la planification automatique permettrait de réduire les erreurs humaines, ce qui aurait un impact positif sur la qualité des résultats. Les outils de planification automatique peuvent facilement analyser les données et proposer des plans optimisés en fonction des contraintes et des objectifs du projet de construction.

Enfin, l'automatisation de la planification peut aider à réduire les coûts grâce à l'optimisation de l'utilisation des ressources. Les responsables de projet pourraient également utiliser les données collectées par les outils de planification automatique pour identifier les éléments où des améliorations pourraient être apportées afin d'optimiser l'utilisation des ressources ou même recourir à des algorithmes avancés permettant le lissage de l'utilisation des ressources.

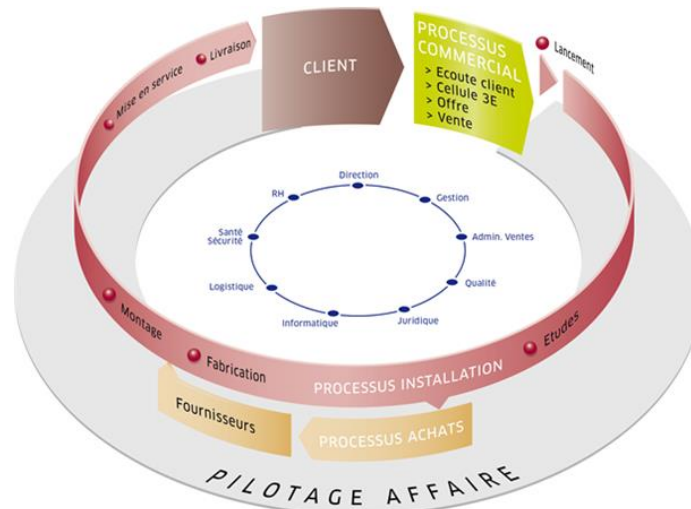


Figure 3: Processus de pilotage d'une affaire chez Equans

1.4. Conclusion

Au cours de ce chapitre, nous avons exposé le contexte industriel qui a donné lieu à l'émergence de ce projet de thèse. L'objectif de ce projet est d'employer conjointement le Lean Construction et le BIM afin d'optimiser les performances des projets de construction. Nous avons constaté que malgré le fort potentiel de complémentarité entre ces deux approches, elles sont souvent mises en œuvre de manière indépendantes dans les pratiques de l'entreprise EQUANS. De plus, une enquête réalisée au sein de l'entreprise a révélé que les collaborateurs d'EQUANS ont une sensibilisation limitée aux techniques du Lean Construction, en particulier en ce qui concerne la planification collaborative LPS[®]. Par ailleurs, l'entreprise semble manquer de connaissances approfondies sur les différentes dimensions du BIM autres que la modélisation 3D, ce qui entraîne une sous-utilisation des données de la maquette numérique. En outre, nous avons souligné dans ce chapitre la complexité de la planification manuelle des travaux sur le chantier, ainsi que les coûts qui en découlent. Ces constatations nous ont conduit à identifier un besoin urgent au sein d'EQUANS, qui consiste à mettre en place une planification des travaux basée sur l'approche LPS[®] et les données de la maquette numérique BIM.

Chapitre 2 : *État de l'art*

Sommaire

- 2.1. Etat des lieux du secteur de la construction
 - 2.2. Fondamentaux du Lean Construction
 - 2.2.1. Origine et évolution
 - 2.2.2. Définitions et principes
 - 2.2.3. Boîte à outils du Lean Construction
 - 2.2.4. Tendances de digitalisation des outils conventionnels
 - 2.3. Fondamentaux du BIM
 - 2.3.1. Origine et évolution
 - 2.3.2. Définitions
 - 2.3.3. Fonctionnalités du BIM
 - 2.4. Analyse des interactions entre le Lean Construction et le BIM
 - 2.5. Analyse des outils combinant le LPS[®] et le BIM
 - 2.6. Motivations – Questionnements scientifiques
 - 2.7. Méthodologie de recherche
 - 2.8. Conclusion
-

Dans le précédent chapitre, nous avons exposé l'origine et le contexte du projet de thèse, ainsi que les besoins industriels. Le présent chapitre se concentre sur un examen approfondi de l'état de l'art scientifique dans notre domaine de recherche, en commençant par un rappel des transitions numériques, énergétiques et industrielles qui affectent le secteur de la construction. Nous aborderons ensuite les concepts du Lean Construction et du BIM qui offrent des opportunités permettant d'accroître la compétitivité du secteur dans le contexte de ces transitions. A la lumière de cet état de l'art, nous proposerons une analyse approfondie des interactions entre ces deux approches, en examinant spécifiquement l'interaction entre la méthode de planification du Lean Construction, le LPS[®] et le BIM. Enfin, nous présenterons nos motivations et questionnements scientifiques, ainsi que la méthodologie de recherche adoptée.

2.1. Etat des lieux du secteur de la construction

Depuis 1976, la productivité de l'industrie de la construction n'a pas évolué et accuse un retard par rapport aux autres secteurs d'activité dans la plupart des pays (voir Figure 4) [8]. A l'encontre, la valeur ajoutée par heure travaillée dans l'industrie augmentait considérablement. L'écart s'est creusé depuis le milieu des années 90, au détriment de l'industrie de la construction qui n'a pas su tirer part des avantages offerts par l'internet moderne, contrairement au secteur manufacturier. [9]. Ce constat est valable dans le monde entier, avec un écart de 127% depuis 1995 en France. En revanche, il est plus modéré au Royaume-Uni et en Allemagne, qui sont des pays précurseurs dans l'industrialisation de la construction [10].

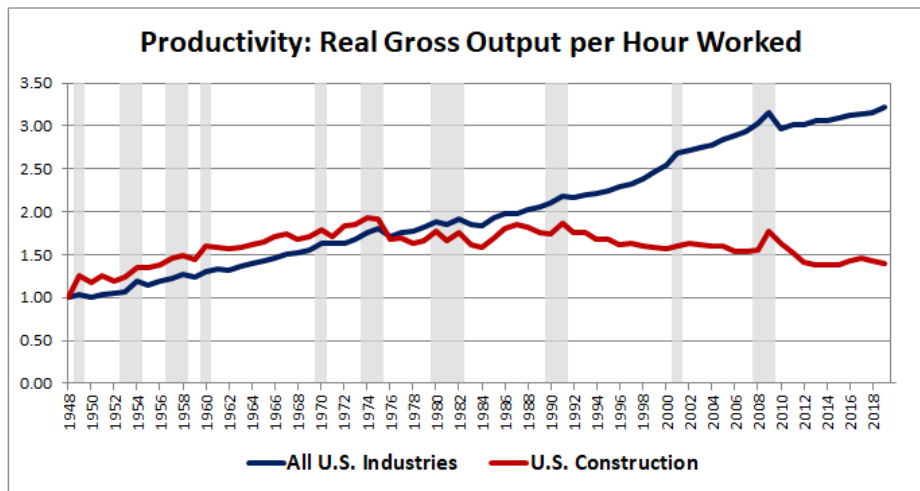


Figure 4: Evolution de la valeur ajoutée par heures travaillées dans la construction et l'industrie aux Etats Unies (Noah Smith, 2021)

Selon une étude du Center for integrated facility engineering (CIFE) [11], l'adoption de la philosophie Lean Manufacturing, qui vise à éliminer les gaspillages, est un élément clé pour améliorer la performance de l'industrie. En revanche, le secteur de la construction a tendance à conserver des méthodes traditionnelles de construction qui se concentrent sur l'efficacité des activités de transformation, sans éliminer les opérations à non-valeur ajoutée. A titre d'exemple, les gaspillages en construction représentent 58% du temps passé par les compagnons sur les chantiers (Figure 5) [12].

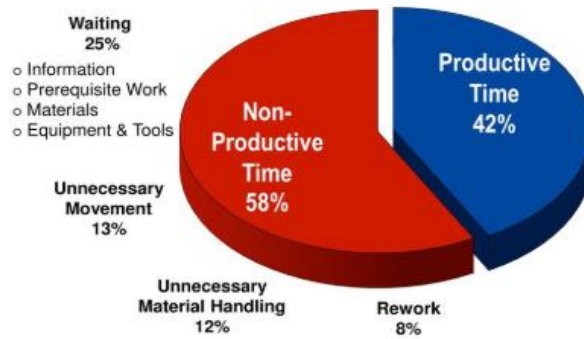


Figure 5: Répartition des temps productifs et improductifs dans le secteur de la construction [12]

Au fil des décennies, l'approche traditionnelle de la construction a montré ses limites en termes de performances de projet. Les données révèlent que la majorité des projets de construction, soit environ 72%, connaissent des retards de livraison, avec un dépassement de délai contractuel moyen de l'ordre de 38%. De même, 63% des projets excèdent les budgets alloués de 24%, et les non-conformités sont responsables d'une augmentation de 6% du coût global du projet de construction [13]. Par ailleurs, le secteur de la construction présente un niveau élevé de décès et de risques professionnels, représentant jusqu'à 30 à 40% des décès professionnels dans le monde [14], ainsi qu'un niveau de satisfaction client relativement faible [13].

Pour accroître la productivité du secteur de la construction, il est crucial d'améliorer la performance des travailleurs individuels, étant donné que la main d'œuvre représente environ 40% du budget d'un projet [15]. Cette amélioration de la performance nécessitera la mise en place d'une nouvelle méthode de gestion de projet qui mettra l'accent sur l'identification et l'élimination des gaspillages dans les flux de construction.

Vient s'ajouter à ces performances insatisfaisantes la faible adoption des technologies numériques dans le secteur de la construction [16]. En effet, aux États-Unis, la construction se classe à l'avant-dernière place en terme de digitalisation tandis qu'en Europe, elle arrive en dernier après l'agriculture [16]. Cette situation est due en partie à la faible rentabilité du secteur qui se traduit par un faible investissement dans les innovations. En effet, seulement 1% du chiffre d'affaire du secteur de la construction est investi dans la recherche et le développement, contre 5 à 6% pour l'industrie automobile [9]. Pourtant, le secteur de la construction offre de nombreuses opportunités d'automatisation potentielles [17]. Malgré les initiatives de digitalisation dans le secteur de la construction, les résultats obtenus ne sont pas encore satisfaisants. Les technologies de l'information et le communication (TIC) ont été employées, mais elles n'ont pas encore réussi

à répondre aux attentes des professionnels du secteur. En outre, très peu de solutions ont été développées pour la planification et le contrôle des travaux sur le chantier, contrairement aux processus administratifs et de conception qui ont largement bénéficié des avantages des TIC [18].

Dans l'industrie manufacturières, la planification et le contrôle de la production étaient initialement générés par les systèmes de planification des ressources de production « Manufacturing Resource Planning » (MRP), qui ont évolué vers des progiciels de gestion intégrée « Enterprise Resource Planning » (ERP). Ces derniers couvrent de manière native les processus des différents services d'une entreprise à travers leurs multiples modules, tels que la finance, les ventes, la production, la logistique et les ressources humaines [19]. Aujourd'hui, les ERP généralistes sont largement utilisés par de nombreuses entreprises de divers secteurs d'activité.

Dans le domaine de la construction, un des rares articles traitant le sujet des systèmes d'information de ce secteur annonce un taux d'usage de 48% selon les résultats d'un sondage réalisé en 2007 [20]. Cependant, seuls 4% des utilisateurs mettent en œuvre les modules de gestion de projets des ERP, et seulement 16% sont satisfaits du niveau d'intégration de leur système d'information [20]. Cette situation serait en partie due à la difficulté et au coût élevé pour établir des connexions entre les différents modules ERP, ce qui pousse les entreprises à utiliser une multitude d'applications ou de modules ERP qui ne communiquent pas entre eux. Cela entraîne des saisies redondantes d'informations relatives à un bâtiment (en moyenne 7 fois), et donne en conséquence lieu à des îlots de données incohérentes [15].

En plus des défis techniques et financiers liés à l'interopérabilité des logiciels, l'intégration est ralentie par la culture enracinée de méfiance et de rivalité entre les acteurs de la construction, qui découle en grande partie de la fragmentation considérable du secteur [21]. En France, le secteur de la construction compte environ 392 000 entreprises nationales, soit environ 10% de toutes les entreprises, alors que sa contribution au PIB ne représente que 5% [9]. De plus, la plupart des entreprises de construction sont des micros-entreprises comptant entre 1 et 9 employés et représentant 91,6 % du total des entreprises de construction, tandis que le nombre de PME (Petites et moyennes entreprises), d'ETI (Entreprise de taille intermédiaire) et de grandes entreprises est relativement faible (voir Figure 6) [18].

Proportion of Firms by Size Category				
Size (No. of Employees)	Micro (1-9)	Small (10-49)	Medium (50-249)	Large (250+)
GB ¹	89.8	9.4	0.6	0.1
France ²	91.6	7.7	0.7	0.1
Germany ²				
Structural Firms Only	69	27	3.7	0.4
All Construction Firms	95			
US	81.1	16.3	2.4	0.1
1. Size bands for UK are 1-7, 8-59, 60-299, over 299				
2. Medium Size Band 50-199				
Source: DTI, Hauptverband der Bauindustrie, Service, Economique et Statistique, US Census Bureau				

Figure 6: Structure du secteur de la construction par taille d'entreprise dans quatre pays différents (Dave, 2013)

Aujourd'hui, il est largement admis que la collaboration entre les parties prenantes d'un projet et l'intégration de leurs outils informatiques sont considérées comme des éléments clés pour optimiser la qualité, les délais et les coûts d'un projet de construction. Ainsi, des approches novatrices telles que le Lean Construction et le BIM, commencent à être utilisés dans l'industrie de la construction pour favoriser la collaboration et l'intégration des outils informatiques, ce qui permet d'améliorer la performance globale des projets et du secteur [22]. Ils ne sont désormais pas encore devenus une pratique courante [23].

2.2. Fondamentaux du Lean Construction

2.2.1. Origine et évolution

Les démarches d'optimisation existent depuis fort longtemps dans la construction. Ces approches trouvent d'abord leurs origines dans les méthodes de travail à la chaîne développées par Henry Ford en Amérique. Elles ont ensuite largement évolué au Japon à l'issue de la seconde guerre mondiale et ont été formalisées à travers le Toyota Production System (TPS). Dans le secteur du BTP (bâtiment et travaux publics), Frank Gilbreth repéra en 1890 le potentiel d'amélioration de ce secteur à travers l'application de certaines approches de gestion de la production utilisées dans l'industrie automobile. Il s'est intéressé, par exemple, à la suppression des gestes inutiles du processus de pose des briques en vue d'améliorer l'efficacité des maçons et minimiser leur fatigue [15]. Néanmoins, les méthodes du Lean Construction ont réellement commencé à se structurer qu'à la fin du XX^{ème} siècle. Des chercheurs tels que Koskela, Ballard, Howell, Schonberger, Harmond et Peterson ont commencé à explorer l'application des techniques industrielles du juste-à-temps JIT dans le secteur du BTP, avec pour objectif d'intégrer la notion de flux dans les processus de construction. Cette notion de flux est à la base de la théorie de production TFV (Transformation

Flow Value), développée spécifiquement pour la construction [24]. Cette théorie considère que la construction, tout comme l'industrie manufacturière, est un système de production qui doit répondre aux trois dimensions suivantes : transformation, flux et valeur ajoutée perçue par le client. A partir de 1992, Ballard pose les premières bases de la méthode de planification collaborative LPS®. Cette méthode a continué à évoluer et est devenue l'outil phare du Lean Construction. Ce n'est qu'en 1993 que le terme « Lean Construction » a été introduit lors de la première conférence de l'IGLC (International Group of Lean Construction) qui rassemble chaque année des chercheurs et des professionnels du monde entier. Ces mesures ont ensuite conduit à la création de l'association Lean Construction Institute (LCI) qui promeut la philosophie Lean Construction à travers le monde. La Figure 7, proposée par la doctorante, résume les étapes clés de l'évolution du Lean vers le Lean Construction.

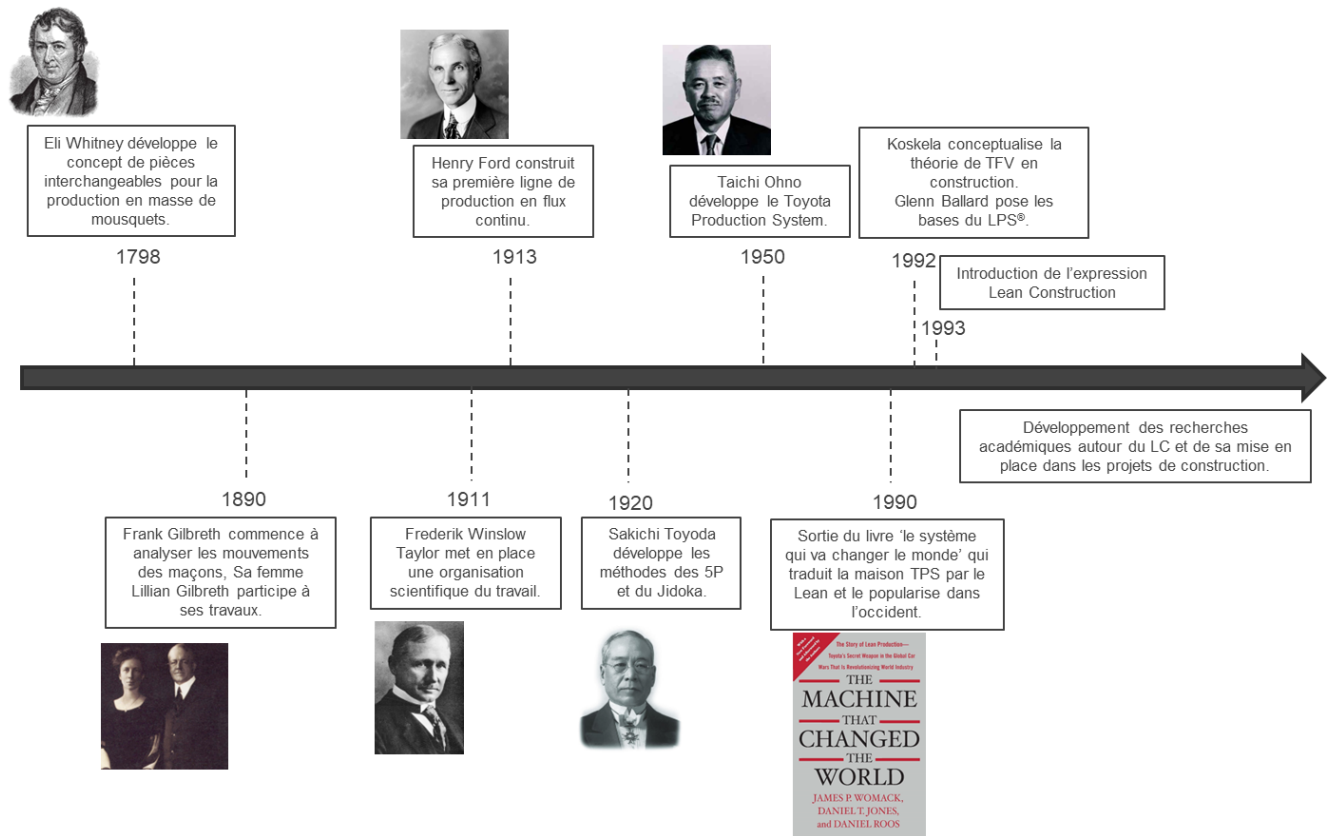


Figure 7: Evolution du Lean.

2.2.2. Définitions et principes

Depuis la naissance du Lean Construction, il y a eu un débat sur la définition de ce nouveau paradigme. Au cours d'une conférence de IGLC en 1999, Howell a présenté le Lean Construction comme une nouvelle forme de management de la production appliqué à la construction, qui se caractérise notamment par la clarté des objectifs du processus de livraison, la maximisation de la performance pour le client et du projet, la conception simultanée du produit et des processus, ainsi que le contrôle de la production durant tout le cycle de vie du produit [25]. En 2002, Lauri Koskela, Greg Howell, Glenn Ballard & Iris Tommelein ont proposé la définition suivante [26]: « Le Lean Construction est une manière de concevoir des systèmes de production de façon à minimiser les gaspillages de matériels, de temps et d'efforts afin de générer le maximum de valeur possible. » Dans un rapport du Construction Industry Institute CII en 2004, Diekman et al. ont mentionné [27] que le Lean construction « est un processus continu d'élimination des gaspillages, de recherche de la satisfaction et du dépassement des exigences du client, qui se concentre sur toute la chaîne de valeur et qui cherche la poursuite de la perfection dans l'exécution des projets de construction ». Dans le glossaire du Project Production System Laboratory [28], le Lean Construction est considéré comme équivalent au Lean Project Delivery System LPDS, qui applique la pensée Lean à la conception et la réalisation des projets. Le LPDS se caractérise notamment par la mobilisation précoce des acteurs responsables de l'exécution des travaux et l'ajout de périodes tampon pour absorber les variabilités du système de production.

Bien que différents formalismes aient été proposés, la communauté scientifique n'a pas encore réussi à établir une définition unique au Lean Construction. Cependant, il est certain que le Lean Construction repose sur un ensemble de principes pour gérer la production dont la création de la valeur pour le client, la chasse aux gaspillages, le maintien des flux, le travail en équipe et l'implication des collaborateurs, et l'amélioration continue [25]. La question de la nécessité d'une théorie Lean Construction est encore un sujet d'actualité. Pour certains, cette théorie n'est pas indispensable et ne l'a jamais été dans l'industrie. Pourtant, les résultats positifs du TPS (Toyota Production System) sont bien visibles. Pour d'autres, cette théorie est essentielle pour étendre les principes du Lean à d'autres disciplines telles que le comportement organisationnel et l'économie. Cela permettrait par exemple d'étudier et de mieux gérer les comportements humains au sein des organisations et d'employer efficacement les ressources rares d'une société [29]. Enfin, ces opinions contradictoires reflètent deux cultures différentes [30]. D'une part une culture japonaise qui valorise les connaissances intuitives, interprétatives, ambiguës, non linéaires et difficiles à

réduire à une équation scientifique. D'autre part, une culture américaine qui valorise uniquement les connaissances formelles, univoques, systématiques et scientifiques.

2.2.3. Boîte à outils du Lean Construction

Il convient de souligner que le Lean est une culture qui ne se résume pas à une boîte à outils. En revanche, les outils Lean sont importants pour mobiliser la force du collectif vers un changement en profondeur des mentalités et de l'entreprise. Le chapitre 15 du livre « Design and Construction : Building in Value » propose plusieurs techniques et outils du Lean Construction (ou du Lean Project Delivery System (voir Figure 8) regroupés en quatre catégories selon Koskela et al. : Lean production management, Lean design, Lean supply, Lean assembly [26]. Les techniques appliquées dans le Lean use et le Project définition n'ont pas été développés dans ce document de référence [26] publié par Koskela et al. Il convient de noter que ces méthodes qui seront présentées dans cette section ne sont pas exhaustives. Elles sont susceptibles d'évoluer en fonction des avancés des recherches dans ce domaine.

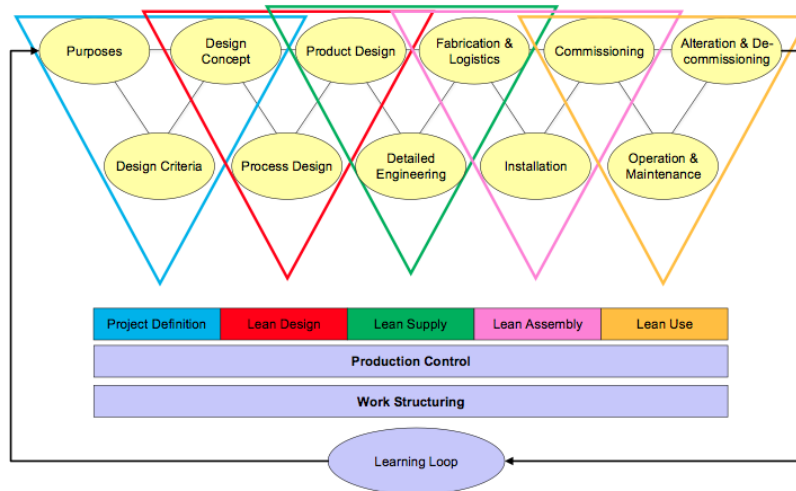


Figure 8 : Lean Project Delivery System [28]

2.2.3.1. Lean production management

La gestion de la production est un élément central du Lean Construction qui englobe l'ensemble du projet, depuis sa conception et jusqu'à la livraison de l'ouvrage fini au client. Elle repose sur la structuration (ou planification) du travail et sur le contrôle de la production, qui constituent les deux fonctions clés du Last Planner System actuel, développé depuis les années 90 [29]. Initialement, cet outil visait à mesurer l'avancement hebdomadaire (Percent Plan Complete

PPC) en comparant ce qui allait être fait (WILL) avec ce qui était réellement réalisé (DID), en utilisant une check-list des activités de la semaine. Il s'agit de mettre en place les derniers composants du LPS[®] actuel « Weekly work planning » et « Learning ». Suite à l'analyse des causes des écarts identifiés, il est apparu le besoin de préparer les tâches en amont en vue de lever toutes les contraintes qui entravent la réalisation de certaines opérations. Ce processus permet de comparer ce qui peut être fait (CAN) avec ce qui sera réalisé (WILL) et est appelé « Lookahead planning ». Ce rituel est initié en moyenne six semaines avant le démarrage des travaux, et est tenu chaque semaine durant toute la durée de l'exécution. Chaque entreprise est censée vérifier le cadre contractuel de ses tâches, leurs conditions de sécurité, les budgets alloués, la disponibilité des plans, du matériel et de la main d'œuvre ainsi que la réalisation préalable des opérations prérequis. Cette étape est une application concrète des techniques de flux tirés, qui consistent à déclencher la fabrication d'un produit uniquement lorsque le client (interne ou externe à l'entité) en a besoin. Dans le secteur de la construction, une organisation en flux tirés permet d'introduire les ressources et les informations dans le système de production uniquement lorsqu'il est capable de les absorber ou lorsque les dates d'échéances se rapprochent [31].

Grâce à ces deux fonctions du lookahead planning et du weekly work planning, il a été supposé qu'un taux de PPC de 100% pourrait être atteint. Cependant, des retards de planification ont été constatés en raison d'une préparation dans un mauvais ordre des tâches, ce qui entraînait des dérapages du planning. Pour remédier à ce problème, la planification collaborative « Phase schedule » a été greffée aux fonctions initiales du LPS[®]. C'est Neenan Mike Daley [31] qui a été le premier à mettre en place ce processus de planification tout corps d'état en utilisant des post-it collés au mur d'une grande salle (connue sous le nom de Obeya dans le jargon Lean) pour construire un planning rétroactif pour chaque phase du projet tout en respectant les délais indiqués dans le planning des jalons principaux « Master schedule ». Cette dernière fonction permet de déterminer ce qui doit être fait (SHOULD) et d'orienter dans le bon ordre le processus de préparation des tâches dans le cadre du « Lookahead Planning ». La Figure 9 illustre ces étapes du LPS[®] que nous venons de décrire. La mise en place de ce système n'est pas limitée à la phase de réalisation, comme on peut l'observer dans les pratiques actuelles, et peut au contraire être appliqué à n'importe quelle phase du projet, y compris la conception. Contrairement au planning traditionnel à flux poussés, le LPS[®] fonctionne en flux tirés [31], et permet de définir avec consensus les tâches qui peuvent être réalisées et de les transformer en un engagement pour garantir

leur réalisation. La mise en place de ces rituels implique une participation active de ceux qui réalisent le travail « les last planners », ce qui les rend acteurs de la démarche. Leur participation est essentielle, car ils sont en mesure d'apporter des informations sur la faisabilité de la réalisation des tâches et de contribuer à l'amélioration de la fiabilité de la planification [15].

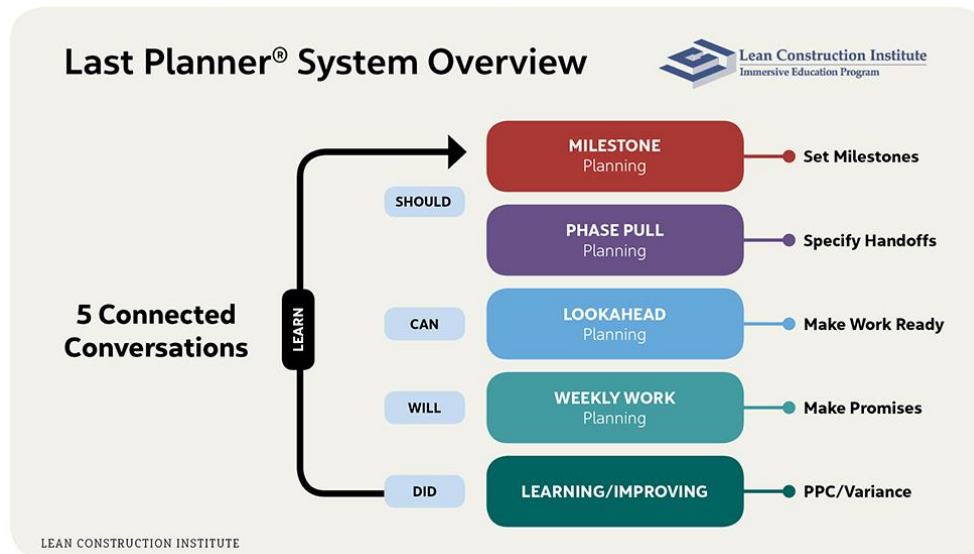


Figure 9: Les étapes du LPS® [32]

Si le projet comprend des éléments répétitifs, il est possible d'utiliser le planning cadencé « Takt-time Planning » dans le cadre d'une démarche LPS®. Cette méthode de planification simplifie le processus de préparation des tâches en standardisant des séquences de travail et en les cadencant au rythme de la demande du client [33].

2.2.3.2. Lean conception

La poursuite des principes de la théorie TFV (Transformation Flow Value) se traduit par une conception intégrée de l'ouvrage et de ses processus de construction, de maintenance et de déconstruction. Pour atteindre cet objectif, plusieurs techniques peuvent être utilisées selon Koskela et al. [26]. Nous les résumons comme suit :

- La première technique consiste à constituer des équipes pluridisciplinaires qui rassemble toutes les parties prenantes d'un projet, y compris les acteurs impliqués dans la phase de conception. Cette approche favorise la participation de chacun dans la prise des décisions clés, et permet de mieux aligner les objectifs et les attentes de l'ensemble des parties prenantes. Du fait que la présence continue et simultanée de l'ensemble des

acteurs n'est pas possible, la bonne pratique est d'alterner des réunions d'alignement réalisées en large comité pour déterminer les tâches à réaliser, et des sessions de travail individuel ou en petit groupe pour exécuter ces tâches.

- La deuxième technique correspond à suivre la stratégie Set-based design. Cette technique de conception permet d'explorer un large éventail de solutions avant de décider d'une « baseline » finale. L'idée est de passer d'une logique de « Concevoir avant de tester » à une logique de « Tester avant de concevoir ». Certes, prolonger la phase de conception pour gagner du temps semble contre-intuitif. Cependant, cette évaluation des options empêche la remise en cause de la conception finale et donc induit un temps de développement réduit.
- La dernière technique propose de mettre en place des structures intégrées. Dans le Lean conception, l'anticipation de toutes les phases est nécessaire. Les décisions prises en phase conception doivent englober la gestion des modifications demandées par le client, l'exploitation de l'ouvrage, les méthodes d'assemblage et de fabrication, la configuration de la chaîne d'approvisionnement, etc... Toutes les parties prenantes et les experts concernés participent à cette prise de décision. Cette conception intégrée du produit et des processus passe par l'éradication des spécialisations et des modèles contractuels qui encouragent le travail en silo. De ce fait, l'éducation des ingénieurs d'étude et des réalisateurs respectivement à la conception des processus et du produit s'avère nécessaire. Pour favoriser ce type de structures, la mise en place des accords commerciaux intégrés comme Integrated Project Delivery IPD est une piste pleine de potentiel.

2.2.3.3. Lean approvisionnement

Le supply chain management, ou gestion de la chaîne d'approvisionnement, consiste à améliorer les flux de matière, de service, d'information et de coût liés à la chaîne d'approvisionnement depuis l'achat de la matière première jusqu'à la livraison du produit fini. Le supply chain management dans la construction implique la participation de nombreuses entreprises, allant jusqu'à des centaines voire des milliers, dont les relations sont principalement établies sur des demandes spécifiques d'un projet, plutôt que sur l'amélioration de la performance globale de la chaîne d'approvisionnement. Pour mettre en œuvre une chaîne d'approvisionnement allégée, il

est nécessaire d'utiliser de nombreuses techniques pendant la phase de conception détaillée du produit, sa fabrication et sa logistique tel que souligné par Koskela et al. [26]. Ces techniques sont déployées selon les étapes suivantes :

- Standardiser et utiliser des pièces interchangeables pour réduire les temps de conception et de validation que requiert généralement les produits conçus et fabriqués sur commande. De plus, les composants standards simplifient l'assemblage, stimulent l'apprentissage des compagnons via la répétition et limitent les problèmes de concordance entre les matériels.
- Préfabriquer des éléments pour simplifier l'installation finale, à condition que leur gestion logistique soit efficace.
- Mettre en place des relations long-terme avec les fournisseurs, en concluant des accords multi-projets et long-terme avec un nombre limité de fournisseurs. Cette approche encourage toutes les parties concernées à rationaliser leurs processus et offre la possibilité d'apprendre des erreurs des expériences antérieures. Cette approche favorise également la collaboration et la confiance entre les partenaires, ce qui peut conduire à une amélioration continue de la performance globale de la chaîne.
- Consolider le transport des commandes. Cela implique de regrouper les commandes et la livraison des matériaux nécessaires au même moment, afin de réduire les coûts de passation des commandes et de transport. Il est généralement recommandé de s'approvisionner auprès de fournisseurs à proximité géographique, ce qui réduit les temps de transport et peut améliorer la flexibilité de la chaîne d'approvisionnement en cas de besoin urgent de matériaux ou de changements de dernière minute.

2.2.3.4. Lean assemblage

L'assemblage allégé propose un ensemble de techniques qui couvrent les étapes de fabrication, de logistique, d'installation et de mise en service [26]. Voici quelques-unes de ces techniques :

- Les livraisons juste-à-temps : dans une approche Lean, la coordination entre la chaîne d'approvisionnement et l'assemblage est primordiale pour que les matériels soient commandés et reçus sur le terrain au bon moment, tout en limitant le stockage.
- La manutention unique du matériel : qui consiste à acheminer du matériel directement vers l'endroit où il sera installé sans devoir le stocker au préalable. Si cela n'est pas possible, il

est recommandé de décharger le matériel près de la position finale et dans la portée de la grue.

- La simulation des opérations (First run studies) : les opérations, qu'elles soient répétitives ou non, sont réalisées dans un cadre le plus réaliste possible entre trois et six semaines avant la date effective de leur exécution. Ces simulations permettent de trouver la meilleure façon d'exécuter une tâche et ses contraintes tout en identifiant les compétences et les moyens nécessaires et celles disponibles.
- Le développement de la polyvalence : des compagnons polyvalents peuvent installer de multiples systèmes et limiter ainsi la fragmentation des processus liées à la spécialisation et aux frontières contractuelles.
- L'amélioration des conditions de travail des compagnons : l'organisation, la sécurité et la propreté sont des objectifs attendus sur un chantier. L'application de la méthode 5S permet d'atteindre ces avantages. Les 5S font référence à cinq mots japonais : Seiri (trier), Seiton (Ranger), Seiso (Nettoyer), Seiketsu (Standardiser), Shitsuke (Maintenir et faire respecter).

2.2.4. Tendances de digitalisation des outils conventionnels

Depuis quelques années, le secteur de la construction a connu une intensification de la dynamique de la numérisation. La pandémie de coronavirus ainsi que les mesures restrictives qui en ont découlé ont agi comme des catalyseurs pour l'adoption des outils numériques dans le BTP, en particulier ceux qui facilitent la gestion de projets à distance. Ces derniers reproduisent virtuellement l'expérience des méthodes conventionnelles du Lean Construction. Parmi ces outils, nous retrouvons des plateformes dédiées à la création et au pilotage des plannings chemin de fer en utilisant la méthode LPS[®]. En France, Teamoty et LeanCo sont les plateformes les plus connues [34]. Lors des réunions de planification participative (phase scheduling), ces logiciels permettent de créer des plannings spatio temporels après un paramétrage manuel des zones de l'ouvrage à construire et des séquences de travail par zone. De plus, les participants peuvent faire plusieurs simulations via ces outils afin d'optimiser le planning généré. En utilisant ces outils, il est également possible de piloter l'avancement du projet et d'accéder à des indicateurs clés tels que l'indicateur PPC (Percent Plan Complete), qui sont intégrés dans un tableau de bord du projet.

Outre la planification et le suivi de l'avancement, les feuilles de contrôle des non-conformités sont désormais remplacées par des outils de gestion et de levée des réserves. La détection et le suivi de ces réserves (ou défauts de non-conformité) nécessitent souvent la gestion d'un grand nombre d'informations et d'interlocuteurs pour les corriger avant la livraison du bâtiment. La dématérialisation offre un potentiel énorme dans ce domaine. La saisie numérique des réserves permet de centraliser et de partager l'information entre tous les intervenants d'un chantier, comme le propose Batiscript [35]. Dans plus, la numérisation permet de limiter la perte d'informations sur les non-conformités améliorant ainsi la qualité de l'ouvrage livré au client. De plus, la génération automatique de comptes rendus est un autre avantage de ces outils, permettant de gagner un temps considérable. Enfin, ces logiciels conformes à la philosophie de réduction des gaspillages et de création de valeur, sont devenus des outils indispensables pour le Lean Construction à l'ère du numérique.

La numérisation présente un potentiel évident et transforme d'ores et déjà les modes d'implémentation du Lean Construction en mettant l'accent sur la communication et la collaboration en temps réel. A l'avenir, le développement des technologies de l'information continuera à changer les pratiques conventionnelles du Lean Construction pour réaliser le rêve du chantier ultra-efficace [36].

2.3. Fondamentaux du BIM

2.3.1. Origine et évolution

La naissance de la modélisation des données du bâtiment est intrinsèquement liée aux débuts de l'informatique, et plus précisément au développement de la conception assistée par ordinateur (CAO). Ce concept a émergé à la fin des années 1950, lorsque le Dr. Hanratty a créé un programme de fabrication assistée par ordinateur (CAM) appelé Pronto (Program for Numerical Tooling Operations) pour General Electric. Le premier logiciel de CAO avec une interface graphique, appelé « Sketchpad », a été développé par Ivan Sutherland au MIT Lincoln Labs en 1963. Aujourd'hui, la CAO et la CAM ont fusionné pour former une seule branche, et Hanratty est considéré comme le pionnier de ce domaine.

En 1962, Douglas C. Englebart publie l'article « Augmenting Human Intellect » mettant en avant des idées sur l'architecture de demain suggérant une conception paramétrique basée sur les objets et des bases de données relationnelles [37]. Il a évoqué la possibilité suivante : « L'architecte commence à entrer une série des spécifications et de données d'une dalle de plancher de quinze centimètres d'épaisseur, des murs en béton de trente centimètres d'épaisseur et de deux mètres et demi de hauteur dans l'excavation, et ainsi de suite. Lorsqu'il a fini, la structure prend forme à l'écran. En continuant à ajuster les détails de la structure, les listes de spécifications s'étoffent et évoluent pour représenter la pensée sous-jacente de la conception d'un ouvrage ». Rappelons que la conception paramétrique est un processus basé sur un raisonnement algorithmique qui permet d'exprimer des paramètres et des contraintes qui définissent, codent, et clarifient la relation entre l'intention et la réponse de conception [38].

En 1975, un article publié dans AIA Journal par Charles M. Eastman décrit un prototype qui se rapproche du BIM appelé « Building Description System (BDS) ». Ce système descriptif du bâtiment intègre plusieurs fonctionnalités du BIM telles que [39] les interactions entre les différents éléments du bâtiment, l'extraction de coupes et de plans, la mise à jour automatique de l'ensemble des vues en cas de modification, l'analyse quantitative de matériels et l'estimation des coûts, ainsi que les avantages liés à la planification et aux commandes de matériel. Eastman a poursuivi ses travaux sur le BDS et a créé un peu plus tard, en 1977, un langage graphique pour la conception interactive GLIDE (Graphical Language of Interactive Design) qui présentait la plupart des caractéristiques de la plateforme actuelle du BIM.

Dans les années 1980, plusieurs études ont été menées en Europe et aux Etats Unies conduisant à la création de plusieurs systèmes BIM [40]. Par exemple, le logiciel ArchiCAD développé par Gabor Bojar en Hongrie en 1987. Plus au nord, Tekla a complété sa première version du système BIM en combinant ses dessins avec ses bases de données relationnelles. En 1988, l'entreprise Parametric Technology Conception PTC a publié et commercialisé son logiciel de modélisation paramétrique Pro/ENGINEER. Revit, quant à lui, a été créé par deux anciens collaborateurs de PTC, Irwin Jungreis and Leonid Raiz, qui ont fondé leur propre société Charles River Software à Cambridge dans les années 2000. Cette dernière a été rachetée par Autodesk en 2002.

En Europe, le concept de la modélisation paramétrique était appelé « Product Information Models », tandis qu'aux Etats Unies il était connu sous le nom de « Building Product Model ». Ces

deux appellations ont ensuite fusionné pour donner naissance au « Building Information Model » [40]. Ce terme a été utilisé pour la première fois en 1995 dans un article coécrit par les deux chercheurs Nederveen et Tolman. Il a cependant été popularisé jusqu'en 2003 par l'éditeur de logiciels Autodesk [41]. Après quelques années de développements, la première conférence dédiée aux réalisations du BIM a eu lieu en 2005, en présence d'un large public d'industriels et d'académiques [40].

2.3.2. Définitions

Il existe différentes définitions du BIM qui ne convergent pas nécessairement [42]. Le NIBS (National Institute of Building Sciences), un organisme américain qui vise à transformer les pratiques de gestion de l'information dans la construction au moyen de normes et de standards, définit le BIM comme « une représentation digitale des caractéristiques physiques et fonctionnelles d'un ouvrage, elle constitue une base de connaissance partagée des informations liées à un ouvrage qui peut être utilisée pour la prise de décisions durant tout le cycle de vie du bâtiment » [43]. Selon Sacks et al. [44], le BIM est défini comme « une technologie de modélisation et un ensemble de processus permettant de produire, communiquer et analyser des modèles de bâtiments ». Ils distinguent deux concepts : « Building Information Modeling » et « Building Information model ». Le premier met l'accent sur les processus de modélisation et de partage des modèles, tandis que le second concept se réfère aux objets résultants, à savoir « modèles ou maquettes numériques ». Certains professionnels ont identifié trois notions différentes associées à l'acronyme BIM [45] [46], qui dépendent de la déclinaison de son « M » :

- Building Information **Model** : il s'agit du conteneur des données décrivant les caractéristiques physiques et fonctionnelles de l'ouvrage. Ces informations sont représentées visuellement sous forme d'un modèle 3D intelligent, appelé également « maquette numérique ». Ces données peuvent décrire différents aspects de l'ouvrage : géométriques, techniques, réglementaires, financiers, environnementaux ... et peuvent être partagées, enrichies et utilisées par l'ensemble des parties prenantes d'un projet et sur toute la durée de vie du bâtiment.
- Building Information **Modeling** : c'est l'ensemble des technologies et des processus qui permettent aux professionnels de l'architecture, de l'ingénierie et de la construction (AEC)

de créer un modèle virtuel contenant des informations sur l'ensemble du cycle de vie de l'ouvrage, de la conception à la construction jusqu'à sa démolition et son démantèlement.

- **Building Information *Management*** : qui vise à superviser la définition et l'organisation des processus d'échanges des données collaboratifs de l'ouvrage, par exemple à travers l'élaboration et la mise à jour de la convention BIM ou l'implémentation et l'administration d'une plateforme d'échange numérique.

Volks et al. [47] différencient deux perspectives du BIM, que nous résumons dans Tableau 1:

- Une définition réduite « little bim » : qui se limite à la maquette numérique et aux processus et aspects techniques liés à la création de ces modèles.
- Une définition étendue du BIM « BIG BIM » proposée par Finith Jernigan [48]. Cette définition implique la gestion de l'information en vue d'améliorer la compréhension et ne se limite pas à un modèle unique ou une seule base de données. Au contraire, il est considéré comme une série de modèles et de bases de données interconnectés. Selon Volks et al. [47], le BIG BIM prend en compte plusieurs aspects interdépendants tels que les considérations fonctionnelles, informationnelles, techniques, organisationnelles et juridiques (voir Figure 10).

Little bim	BIG BIM
CAD	BIM
2D 3D	4D 5D 6D
Modèle incomplet	Modèle complet
Expertise en modélisation	Expertise en collaboration
Mentalité en silo	Partage de la donnée
Pertes d'informations	Donnée évolue constamment
Pas de recette et coûts du terrain	Intégration des recette et coûts du terrain
Bénéfices internes à l'entreprise	Bénéfices pour l'ensemble de l'écosystème
Peu de changement sur les méthodes de travail	Nouvelles opportunités de travail
Internet peut être une référence	Internet est central

Tableau 1: Caractéristiques du little bim et du BIG BIM (SkyBIM, 2013).

Les aspects fonctionnels, que nous appelons également fonctionnalités ou usages du BIM, font références aux services et aux données de sorties générés par l'utilisation d'une maquette numérique pour répondre à une demande spécifique du client à une étape particulière du projet [47]. Dans la section suivante, nous approfondirons l'exploration de ces fonctionnalités du BIM. Comme nous pouvons le voir sur la Figure 10, les aspects informationnels et organisationnels sont déterminés en fonction des fonctionnalités BIM à développer dans le cadre d'une phase donnée du

projet. Pour mieux comprendre cette relation entre les deux aspects, prenons l'exemple suivant : si l'objectif est d'effectuer un bilan énergétique d'un bâtiment, des informations précises sont requises (comme les valeurs des coefficients de transmission thermique U des composants, le niveau de rayonnement ou encore l'orientation de l'immeuble). Toutefois, ces données requises peuvent ne pas être incluses dans la maquette numérique elle-même. Dans ce cas, il est nécessaire d'effectuer un échange structuré de données entre la maquette numérique et l'application de calcul énergétique. Les aspects informationnels du BIM ont donc pour objectif de fournir une structure informationnelle appropriée pour les données et de faciliter un échange de données réussi entre les différents logiciels utilisés dans ce processus. En réponse aux besoins d'interopérabilité, le format d'échange ouvert Industry Foundation Classes (IFC) conçu par buildingSmart est utilisé. L'IFC est un modèle conceptuel de données orienté objet qui décrit de manière standard, structurée et exhaustive les éléments d'une maquette, ainsi que leurs propriétés et les relations entre eux [49]. Des sous-ensembles du schéma IFC, appelés Model View Definition (MVD), peuvent également être extraits pour fournir des informations utiles pour des flux de travail ou des utilisations spécifiques. Les informations requises sont définies à l'avance dans le protocole d'échange d'informations (Information Delivery Manual IDM) et sont encapsulées dans les vues MVD. Une fois les aspects fonctionnels et informationnels d'un projet BIM ont été déterminés, les caractéristiques techniques de la maquette numériques sont définies en tenant compte du niveau de détail (Level of Detail LoD) des informations requises. Ces spécifications techniques décrivent les processus de capture, de traitement des informations et de création de la maquette numérique. Finalement, les aspects organisationnels et juridiques soulèvent des questions concernant les droits et les responsabilités liés à l'utilisation et à la modification des données contenues dans la maquette numérique, ainsi que les rôles et les obligations des parties prenantes en matière de données fournies.

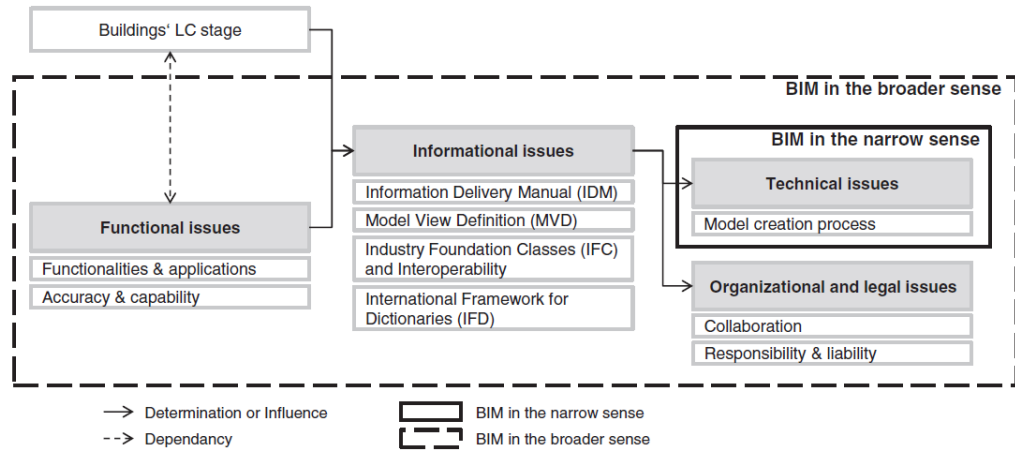


Figure 10: Liens entre les différents aspects du BIM : fonctionnels, informationnels, techniques, organisationnels et juridiques [47].

2.3.3. Fonctionnalités du BIM

Un modèle BIM est conçu pour répondre à des cas d'utilisation spécifiques et prédéfinis appelés cas d'usage. Comme expliqué antérieurement, les fonctionnalités du modèle BIM sont des services qui répondent à des besoins des clients pour une ou plusieurs phase(s) du projet. Selon les exigences de chaque étape du projet, des paramètres spécifiques sont ajoutés aux informations existantes contenues dans la maquette numérique. Ces cas d'usages permettent donc d'élargir les utilisations BIM en ajoutant des dimensions supplémentaires. Actuellement, il existe huit dimensions du BIM, qui incluent la modélisation 3D, la planification 4D, les coûts 5D, l'environnement 6D, la maintenance 7D et la sécurité 8D. Au-delà de la 4^{ème} dimensions, l'appellation 'dimension' est utilisé indirectement pour désigner les usages possibles de la maquette numérique BIM [50]. En effet, Le Tableau 2 propose une liste non exhaustive des usages potentiels pour chaque dimension BIM. Ensuite, nous allons décrire quelques-uns des usages mentionnés qui nous ont servi à alimenter les colonnes de notre matrice pondérée des interactions entre le LC et le BIM que nous présentons dans la section suivante 2.4.

Tableau 2: Quelques usages BIM par dimension

Dimensions BIM	Usages BIM
3D	Visualisation, navigation et partage des maquettes
	Modélisation et production de livrables
	Détections des conflits
	Détection et contrôle des défauts
	Simulation, analyse et optimisation des performances physiques et fonctionnelles
4D	Visualisation et animation des plannings d'exécution
	Analyse des conflits spatio-temporels
	Génération automatique des tâches
	Optimisation des séquences de construction
	Suivi de l'avancement
	Suivi des approvisionnements
	Support à la logistique
5D	Extraction des quantités
	Estimation des coûts
6D	Estimation de l'empreinte carbone
7D	Suivi des performances
	Suivi des opérations de maintenance des équipements
8D	Vérification des règles de santé et de sécurité au travail
	Identification des risques de sécurité
	Formation à la sécurité et à la gestion des urgences

Visualisation, navigation et partage des maquettes

La visualisation en temps réel de maquettes numériques est un avantage significatif du BIM. Contrairement aux dessins techniques, la représentation réaliste des modèles permet aux personnes non-expertes de comprendre la conception, ce qui facilite la communication et la prise de décision dès les premières phases de conception et tout au long du projet [51] [52]. Actuellement, plusieurs visionneuses BIM sont disponibles et permettant aux utilisateurs d'interagir avec le modèle, de faire des visites guidées et des revues de conception. Les architectes peuvent ainsi proposer plusieurs variantes de conception à leur client, tandis que les ingénieurs peuvent expliquer l'ordre d'assemblage d'une structure [53]. Par ailleurs, la visualisation des données grâce au BIM peut offrir des avantages commerciaux et marketing pendant les négociations [54]. De plus, les

plateformes collaboratives BIM favorisent la collaboration en fournissant des environnements cloud multi-utilisateurs où les parties prenantes peuvent accéder à un grand nombre de documents et de modèles numériques pour consultation ou modification en fonction de leurs droits [55].

Modélisation et production de livrables

Un logiciel BIM dispose d'une fonctionnalité permettant de propager automatiquement toutes les modifications apportées à la maquette numérique vers les rapports et les livrables correspondants. Cette fonctionnalité offre plusieurs avantages, notamment la réduction des erreurs de conception, la préservation de l'intégrité et de la cohérence entre l'ensemble des vues et des livrables, ainsi que des économies significatives en termes de temps et de coûts. Certains outils BIM plus avancés permettent également des liens bidirectionnels, qui permettent de mettre à jour une maquette numérique à partir des fichiers liés aux objets de ce modèle [51].

Détection des conflits

La coordination BIM consiste à identifier et résoudre les interférences de plusieurs éléments d'une même discipline et entre différentes disciplines en utilisant des maquettes numériques. Son objectif est de garantir la constructibilité de l'ouvrage et de prévenir les problèmes avant la réalisation, ce qui permet de réduire les erreurs de conception et les coûts du projet. Il existe trois types de conflits (clashes), à savoir les conflits durs (hard), les conflits souples (soft) et les conflits logiques [51]. Les conflits durs (hard) surviennent lorsque deux objets occupent le même espace, tels que les unités de conditionnement d'air qui entrent en collision avec une poutre placée par un ingénieur en structure. Les conflits souples (soft ou clearance clash), quant à eux, apparaissent lorsque deux objets sont trop proches et qu'il n'y a pas suffisamment d'espace pour l'accès, l'isolation, la sécurité, la maintenance, etc. Enfin, les conflits liés à la logique de construction comprennent une dimension temporelle et incluent les problèmes de constructibilité. Ils surviennent lorsque certains composants entravent le montage et la construction d'autres composants, empêchent l'accès, l'entretien et le démontage de certains équipements, ou sont difficiles à installer en raison de l'ordre d'exécution des travaux. Ce dernier type de conflit peut donc être modélisé comme un conflit soft mais avec une dimension temporelle [56]. Contrairement aux méthodes traditionnelles de détection de conflits, qui utilisent des dessins 2D et une table de dessin lumineuse, les outils BIM tel que Navisworks ou Solibri permettent de détecter automatiquement les interférences spatiales et de les

signaler de manière structurée et pertinente grâce à des règles d'analyse de clash. Une étude menée par Leite et al. a comparé la détection de clashes traditionnelle et automatique, et a constaté que la détection automatique a permis d'identifier un grand nombre de conflits qui avaient échappés aux ingénieurs effectuant le processus manuellement [57]. Cependant, l'analyse manuelle a permis de repérer l'absence de certains éléments dans le modèle, ce qui a conduit à l'omission de quelques conflits. Il est donc important de compléter les résultats de la détection automatique grâce au BIM par l'avis d'experts [58].

Visualisation et animation des plannings

La combinaison d'une maquette numérique en 3D avec un planning de construction représentant la dimension temporelle crée un modèle BIM 4D (voir Figure 11). Contrairement aux méthodes traditionnelles où la planification et la conception sont séparées, la planification 4D permet d'identifier les impacts de la planification sur la logistique du site en simulant les processus de construction et en visualisant l'état du site à tout moment. Cette approche permet aux sous-traitants de mieux comprendre les étapes du projet, de détecter les contradictions dans l'enchaînement des activités, de délimiter les zones de stockage, de définir les accès, l'emplacement des éléments de sécurité et les flux de matériel. Enfin, la planification 4D permet de « construire avant de construire » pour améliorer la compréhension globale du projet et réduit les erreurs, les retards et les coûts [59].

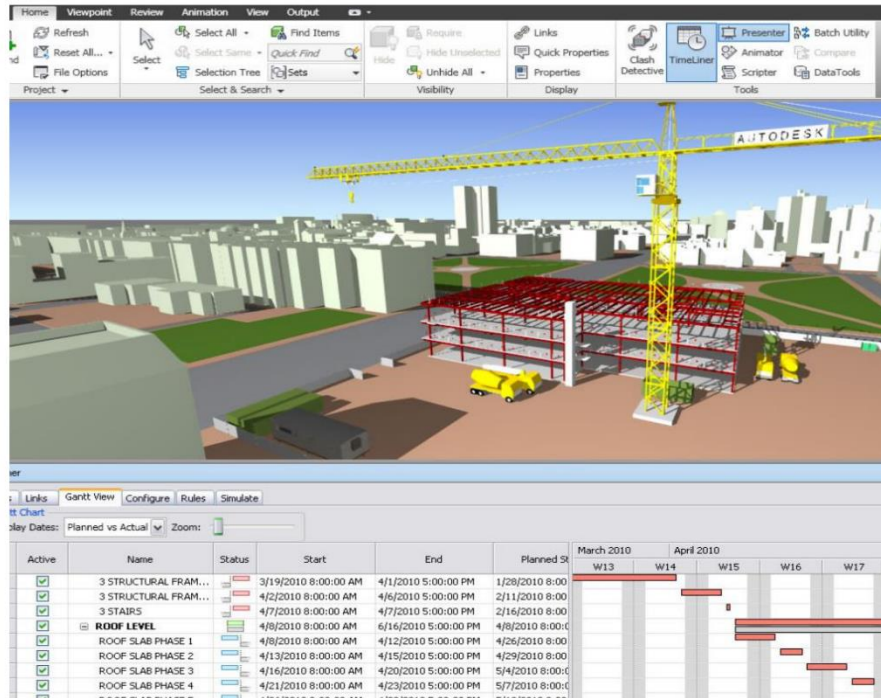


Figure 11: Exemple de modèle 4D incluant des éléments logistiques [60]

Génération automatique des tâches

Toujours dans le cadre de la planification 4D, certains outils avancés du BIM 4D utilisent des bibliothèques de méthodes de construction en vue de créer automatiquement les tâches des plannings, leurs prérequis et leurs liens avec les éléments d'une maquette numérique [51]. Cependant, ces outils résultent de travaux de recherche orientés vers le métier du gros œuvre et leurs usages ne sont pas encore validés sur des projets de construction réels, en particulier dans les métiers de second œuvre [61]. Par exemple, De Vries et al. [62] ont développé un algorithme en 2007 qui génère automatiquement une planification des travaux de structure en analysant les relations d'adjacence entre les éléments d'une maquette numérique, ainsi que les durées des tâches en fonction des types d'équipements hébergés dans une base de données externe. Une autre étude a proposé un système permettant de générer automatiquement plusieurs variantes de plannings de gros œuvre à un stade précoce de la conception [63]. Il est important de noter qu'à ce stade, les éléments utilisés dans les maquettes numériques sont représentés de manière générique et avec un faible niveau de détail. Pour compléter ce processus, Kataoka utilise des modèles de savoir-faire en construction contenant des conditions et des règles pour décomposer les éléments génériques en composants, ainsi que les attributs et les tâches de montage de chaque composant avec leurs prédécesseurs et leurs successeurs.

Suivi de l'avancement

Au cours de la phase de réalisation de l'ouvrage, le modèle 4D peut être utilisé comme support pour suivre l'avancement des travaux. Les méthodes les plus basiques et encore manuelles consistent à utiliser des courriers électroniques et des applications sur des tablettes pour collecter les données liées à la progression des travaux. Les technologies géospatiales, telles que la radio-identification (RFID), les QR codes, les Ultra Large Bande (UWB), les systèmes d'informations géographiques (GIS), et le système de positionnement mondial (GPS), sont des moyens un peu plus avancés de capture et de collecte et de transmission des coordonnées des composants d'un ouvrage sur le site de construction [64]. Les méthodes les plus récentes emploient la vision par ordinateur, un domaine qui utilise des techniques d'intelligence artificielles pour analyser, dériver et interpréter des informations directement à partir d'images et de vidéos. Des techniques de numérisation telles que les scanners laser et la photogrammétrie peuvent également être utilisées pour créer des nuages de points 3D [65]. Des algorithmes d'intelligence artificielles sont ensuite utilisés pour superposer avec précision les modèles 4D planifiés et réels, afin de mettre en évidence visuellement les écarts entre les deux [66]. Par exemple, Bosché utilise l'algorithme Iterative Closest Point (ICP) pour mettre en correspondance les nuages de points correspondant respectivement à la maquette 4D planifiée et au modèle réel [67] (voir Figure 12).

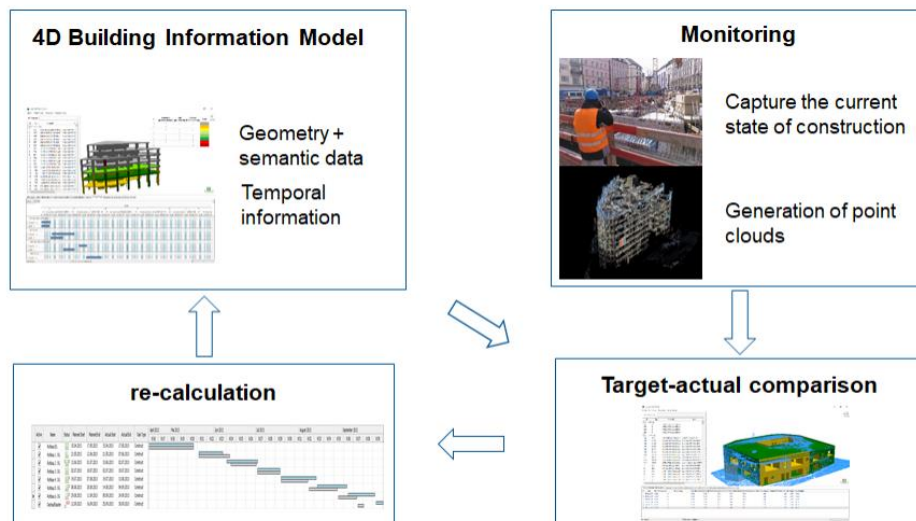


Figure 12: Concept du suivi d'avancement automatisée via le BIM et les technologies de capture de la donnée du terrain

Extraction des quantités et l'estimation des coûts

Les outils BIM permettent d'extraire les quantités des composants, les surfaces et les volumes des espaces à partir de la maquette numérique, ce qui facilite le report des informations dans des tableaux de nomenclatures [68]. Ces quantitatifs sont appropriés pour réaliser des estimations de coûts approximatives. L'obtention d'estimations plus précises dépendra du degré de définition des éléments de la maquette numérique. Par exemple, bien que les logiciels BIM puissent fournir les dimensions des semelles en béton ou la surface des murs, ils ne peuvent pas calculer la quantité de ferrailage contenu dans les semelles ni le nombre de poteaux introduits dans les murs si ces éléments n'ont pas été inclus dans la maquette numérique [44]. De plus, il est important de souligner que la fonctionnalité de quantification des outils BIM ne peut pas se substituer au travail d'un chiffrageur, qui est capable d'évaluer les conditions particulières du projet qui peuvent impacter le coût global. De ce fait, l'utilisation de cette fonctionnalité doit être envisagée comme un moyen pour soulager les chiffrageurs du travail laborieux de calcul des quantités, afin de leur permettre de consacrer plus de temps à l'examen des particularités du projet et de la constructibilité de l'ouvrage.

Vérification des règles de santé et de sécurité au travail

Le BIM 8D est couramment utilisé pour identifier et prévenir les risques en intégrant les règles de sécurité dans la maquette numérique et le modèle 4D. Cette approche permet de détecter les dangers automatiquement avant même le démarrage des travaux [69]. Dans le cas du projet Yas Island à Abu Dhabi, les espaces occupés par les équipes de soudage ont été modélisés sous forme de cylindres. Ceci a permis d'identifier les zones à risque où deux équipes de soudeurs travaillaient simultanément en détectant les collisions entre ces cylindres [44].

2.4. Analyse des interactions entre le Lean Construction et le BIM

L'association du Lean Construction et du BIM suscite actuellement beaucoup d'intérêt. Bien que ces concepts aient été développés et mis en œuvre séparément, des études ont montré une forte complémentarité entre eux [70]. Les premières applications conjointes de ces approches ont été fructueuses comme en témoigne certains projets de construction phares tel que le centre médical Sutter [71]. Suite à une analyse conceptuelle et analytique des synergies entre le Lean Construction

et le BIM, Sacks et al. ont révélé 56 interactions explicites entre les 24 principes du Lean et les 18 fonctionnalités du BIM prises en comptes dans leur étude [51]. De ces interactions, 52 se sont révélées positives, dont 48 ont été prouvées empiriquement. La matrice proposée par Sacks et al. [51] explique chaque interaction de manière théorique ou à l'aide d'exemples concrets issus de la littérature. L'étude a également révélée que le BIM soutient fortement trois principes du Lean [72]. Nous les résumons comme suit :

- 1) La réduction de la variabilité du produit par l'obtention de la qualité du premier coût.
- 2) La réduction de la variabilité des processus de production et l'amélioration des flux.
- 3) La réduction des temps de cycle de la construction. Le temps de cycle correspond à la durée entre le début et la fin d'un processus.

En premier lieu, l'utilisation du BIM pour les échanges visuels, combinée aux fonctions de détection précoce des défauts de conception et à l'évaluation anticipée des performances de l'ouvrage (énergétique, acoustique, thermique...), contribuent à améliorer la cohérence et la qualité globale de l'ouvrage final. Ces capacités permettent également de limiter la variabilité du produit, principalement due aux changements initiés par le client, ce qui réduit les gaspillages liés aux reprises des non-conformités et aux attentes d'informations. En deuxième lieu, la variabilité des processus de production est minimisée grâce à la réduction des erreurs humaines. Ces avantages sont obtenus par les multiples fonctionnalités du BIM tels que l'automatisation des processus de calcul des quantitatifs d'équipements, l'identification rapide des interférences, le report des modifications d'une maquette numérique sur toutes ses vues respectives, le transfert direct des instructions de fabrication aux machines à commandes. De plus, l'animation des séquences de construction en 4D et la simulation des méthodes de production permettent d'améliorer la sécurité, d'identifier les goulots d'étranglement et d'optimiser les flux de production. En troisième lieu, l'utilisation du BIM permet une rapide évaluation des performances structurelles, thermiques et acoustiques, ainsi que des estimations des coûts, ce qui réduit considérablement le temps nécessaire à la conception. L'étude de cas du centre médical Sutter [71] illustre comment le BIM a permis de réduire le temps de chiffrage du projet de plusieurs mois à seulement deux ou trois semaines. Par ailleurs, la génération automatique des tâches, la collaboration autour d'un modèle 4D et la simulation optimisent le processus de planification opérationnelle et réduit les temps de cycle des opérations.

Il est clair que l'utilisation du BIM contribue à atteindre les objectifs du Lean Construction. Certains experts qualifient même le BIM comme étant un outil Lean [73]. De même, le Lean facilite l'introduction du BIM en encourageant la collaboration, la rigueur et la prévisibilité [72]. Selon Tauriainen et al. [74], les outils du Lean tels que les salles de pilotage (War room en anglais ou Obeyas en japonais), le Last Planner System[®] et le set-based design aident à surmonter les obstacles liés aux relations humaines qui entravent la mise en œuvre correcte de la démarche BIM.

Jusqu'à présent, nous avons décrit comment les fonctionnalités du BIM peuvent contribuer à la mise en œuvre des principes du Lean Construction. Cependant, il est également important de se demander comment les outils du Lean Construction peuvent bénéficier des fonctionnalités du BIM. Existe-t-il des points de convergence entre les fonctionnalités du BIM et les techniques du Lean Construction ? Quels sont les points de convergence les plus explorés et les plus prometteurs ?

Pour répondre à ces questions, nous avons suivi la méthodologie développée par Sacks et al. [51]. Nous avons également exploité les résultats de notre précédent article publié en 2021 [75]. Notre étude nous a permis de proposer une matrice pondérée (voir Figure 13) qui présente les occurrences d'usage en combinant des outils du Lean Construction et des fonctionnalités du BIM (présentés dans les sections 2.2.3 et 2.3.3) et ceci à travers 65 publications identifiées durant la phase d'exécution des projets. Ces articles ont été sélectionnés de façon systématique en utilisant les mots clés suivants : "Lean", "BIM", "building information modeling", "IT", "information technology", "site", et "execution". Cette recherche bibliographique a permis de constater que l'interaction la plus étudiée dans la littérature concerne l'utilisation combinée des fonctions de visualisation du planning 4D et de suivi de l'avancement du BIM avec les techniques de structuration et de contrôle de la production en utilisant la démarche LPS[®]. Ce domaine de gestion de la production est également au centre des travaux de Sacks et al., étant donné que 45 des interactions de sa matrice originale portent sur ce champ d'étude [29]. Par ailleurs, Koskela et al. [72] affirment que la réussite de tous les projets Lean-BIM qu'ils ont étudiés peut-être attribuée à l'utilisation de la planification collaborative LPS[®] tout au long du projet. Par conséquent, l'union BIM-LPS[®] paraît très prometteuse pour renforcer la synergie entre le Lean Construction et le BIM en phase d'exécution d'un projet. Nous aborderons plus en détail dans la section suivante les différents outils existants permettant d'appliquer conjointement la technique LPS[®] avec les fonctions du BIM.

BIM capabilities / Lean techniques	Automated generation of tasks	Clash detection	Cost Estimating	Defect detection and control	Drawing and document production	Manage site logistics	OHS rules checking	Optimization of construction sequences	Procurement tracking	Progress tracking	Quantity takeoff	Safety hazards identification	Safety training and emergency management	Time-space conflict analysis	Visualization of construction schedules	Visualization, navigation and sharing models	Total
Work structuring (MS, PS, LBS)	2	6	3	3	2	6	1	3	5	18	8	3	1	9	17	13	100
Production control	2	6	3	3	2	6	2	2	7	17	7	3	1	7	17	12	97
Total quality management	1	7	2	6	2	4	4	1	1	6	6	4	2	3	7	7	63
Just-in-time deliveries	2	2		2		9	3	1	9	6	4	3	2	2	8	4	57
Big rooms		6	2	7	3					6	6			2	7	10	49
Precast		3	1	2	2	4	1		4	6	5	1	1	2	7	4	43
First run studies	1	1		2	1	2	2	1	1	2	1	2	1	1	4	2	24
Exploration of alternatives	1	2	1	2	1					1	3				4	4	19
Improved work conditions	1	1		1	1	2	2	1	1	1	1	2	1	1	2	1	19
Set integrated contracts (IPD)	1	2		1		1	1			2	1	1	1		2	3	16
Takt time planning	1	1		1		1	1	2	1	1	1	1	1	2	1	1	16
Multi-skilling	1	1		1		1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	14
Standardization		1		1		2			1	1	2				2	2	12
Line Balancing (Heijunka)		1	1		1	1	1			1	1	1		1	1	1	11
Preassembly (Kitting)				1		1			1						2	2	7
Transport orders consolidation						2			1	1					2	1	7
Total	13	40	13	33	15	42	19	12	33	70	47	22	12	31	84	68	554

Figure 13: Matrice pondérée des interactions entre les techniques du Lean Construction et les fonctionnalités du BIM [75].

2.5. Analyse des outils combinant le LPS[®] et le BIM

L'exploration de l'utilisation du BIM pour la planification et le contrôle de la production conformément aux principes du Lean Construction a été relativement peu explorée. En effet, bien que les outils BIM de planification 4D répondent à certaines exigences du Lean Construction en matière de planification, leur utilisation reste peu développée en ce qui concerne la gestion et le contrôle de la production [76]. La plupart de ces outils se limitent à établir une planification de premier niveau « Master schedule ». La planification détaillée des opérations sur site, l'analyse des contraintes de ces opérations et l'affectation des ressources ne sont pas permises par ces outils. Or, pour mettre en place une gestion de production efficace en flux tirés, une préparation anticipée des tâches est nécessaire pour éliminer toutes les contraintes qui pourraient entraver leurs réalisations, en utilisant l'étape du Lookahead planning [29]. Le Tableau 3 présente une évaluation des fonctions des outils BIM 4D les plus utilisés dans le domaine de la gestion de la production.

Tableau 3: Evaluation des fonctions de certains outils BIM 4D dans le domaine de la gestion de la production [29]

Outils BIM 4D / Fonctions	Autodesk Navisworks	Synchro	Vico Office	Tekla Construction Manager	Tekla BIMsight	Solibri Model Checker	Autodesk 360 Plan
Visualisation d'un modèle intégré	✓	✓	✓	✓	✓	✓	
Simulation 4D	✓	✓	✓	✓		✓	
Visualisation des constructions temporaires		✓	✓				
Détection des interférences	✓	✓	✓	✓	✓	✓	
Affectation des ressources		✓					
Analyse des contraintes des tâches			✓				✓
Accès aux informations des tâches							✓

La communauté scientifique a réagi à ces constats en développant des outils numériques de planification et de contrôle de la production basés sur la méthode LPS[®]. Il convient de souligner que la plupart des systèmes présentés ci-dessous sont issues de travaux de recherches et ne sont pas des produits commerciaux.

En 1999, Choo et al. [77] ont développé une application de base de données afin d'accompagner les conducteurs de travaux dans l'élaboration systématique des plannings hebdomadaires (Weekly work plans). Il s'agit d'un programme informatique alimenté par des données hébergées dans une base de données Microsoft Access qui contient des informations sur les lots de travaux à effectuer et les ressources de l'entreprise pouvant être utilisées (les ouvriers et les équipements disponibles). Il convient de rappeler qu'un lot de travail (work package en anglais) consiste en un ensemble de tâches cohérentes souvent effectuées dans une même zone. Le système Workplan présente plusieurs avantages tels que l'aide aux utilisateurs dans la définition des lots de travaux, la vérification des contraintes, l'allocation des ressources (Figure 14), la production des plannings hebdomadaires et des rapports d'avancement des travaux, ainsi que l'analyse des raisons d'échecs et l'évaluation du reste à faire (Learning). Toutefois, ce système présente certaines limites en raison de son manque d'ergonomie et de l'absence de certaines fonctionnalités telles que la décomposition des lots de travaux en sous opérations, l'affectation de responsables aux contraintes et l'intégration avec une maquette numérique.

Resource Assignment Update

Work Package No: 97-309-C-1000
Assignment: PH Roof-Area B: Rough-in Roof Drains

Scheduled for this Week		28	29	30	1	2	3	4
Laborer ID	Work Desc.	S	M	T	W	T	F	S
Gibert Alias	Sheet Metal	0.00	0.00	0.00	4.50	8.00	5.50	8.00

Laborer Cost: 966.24

Equipment ID		Status	S	M	T	W	T	F	S
Wheel loader	Rented		0.00	0.00	0.00	0.00	8.00	8.00	0.00

Equipment Cost: 2640
Total Cost: 3608.24

Remaining Work

Is there any remaining work to be performed for this work package? Yes No

	Unit Cost	Amount	Extended Price
Laborer	\$15.00	900	13,500.00
Equipment	\$25.00	700	17,500.00
Total			31,000.00

Was this week's work for 97-309-C-1000 completed as scheduled?

Figure 14: Page de mise à jour des affectations de ressources d'un lot de travail dans Workplan [77]

Pendant la même période, Chua et al. [78] ont présenté un système de planification qui ne prend pas seulement en compte les contraintes de type « Processus » qui concerne les relations entre les activités, mais également les contraintes associées à la disponibilité des ressources (main d'œuvre, matériel, équipements, espaces, ...) et des informations contractuelles (contrats, plans, approbations, ...) (voir Figure 15). Ce système appelé Integrated Production Scheduler (IPS) est

décrit par Chua et al. comme une personne ou un groupe qui établit des plannings de construction en utilisant des informations intégrées afin d'obtenir des plannings d'anticipation (Lookahead plans) plus fiables. De plus, IPS utilise la communication en réseau via Internet et une base de données XML pour recueillir et distribuer les informations du projet au client, aux sous-traitants et aux fournisseurs [79]. Ces derniers peuvent en particulier consulter les plannings, demander des informations ou confirmer la période de disponibilité des ressources et des informations relatives aux activités. Tout comme l'outil présenté précédemment « Workplan », IPS n'inclus pas l'ensemble des modules requis pour implémenter le LPS® et n'aborde pas l'intégration avec la maquette numérique [18].

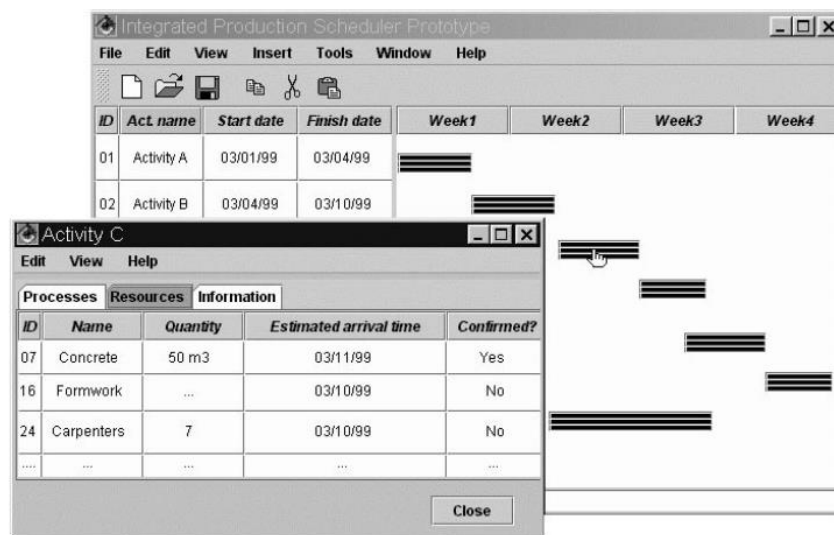


Figure 15: Exemple des contraintes d'une activité gérées dans IPS

LEWIS (Lean Entreprise Web-based Information System) représente une innovation dans le domaine des systèmes d'information, étant le premier à intégrer des plans 2D ou 3D issues de AutoCAD, et des données de planification et de contrôle de la production. Ce système a été développé en 2003 à l'université de Teesside par Sriprasert et Dawood. LEWIS intègre une base de données relationnelle qui collecte de manière semi-automatique ou manuelle des données provenant de différentes fonctions supports tels que la conception, la gestion des contrats, la comptabilité, l'achat, les inventaires, l'assurance qualité, la sécurité et la gestion des risques. Ce processus de collecte de données permet de répondre aux besoins de planification en aidant les parties prenantes à prendre des décisions critiques pour le chantier. Cependant, il convient de noter que la collecte semi-automatique de ces informations à partir des applications et des bases de données opérationnelles n'a pas été développée. Grâce aux informations provenant des fonctions

supports, il est possible d'obtenir des renseignements sur les statuts des contraintes relatives aux activités de production durant la phase de préparation Lookahead. Le système d'information LEWIS offre la possibilité de réaliser des requêtes multidimensionnelles en utilisant les services OLAP (On-Line Analysis Processing) ou des requêtes spécifiques via SQL (Structure Query Language) pour aider les décideurs. Les utilisateurs peuvent ainsi vérifier l'avancement en fonction de différents critères, tels que la date, la zone de travail, la discipline, la tâche et la personne responsable. Il est également possible d'utiliser une autre fonctionnalité permettant de visualiser la liste des tâches programmées pour le mois suivant [80].

Par ailleurs, LEWIS propose une fonctionnalité de visualisation 4D pour une activité donnée qui intègre différents types de contraintes tels que les interférences physiques, les contraintes contractuelles liées au respect de certains jalons client, les budgets alloués et les autorisations de démarrage des travaux, ainsi que les contraintes de disponibilité des ressources et des informations nécessaires (voir Figure 16).

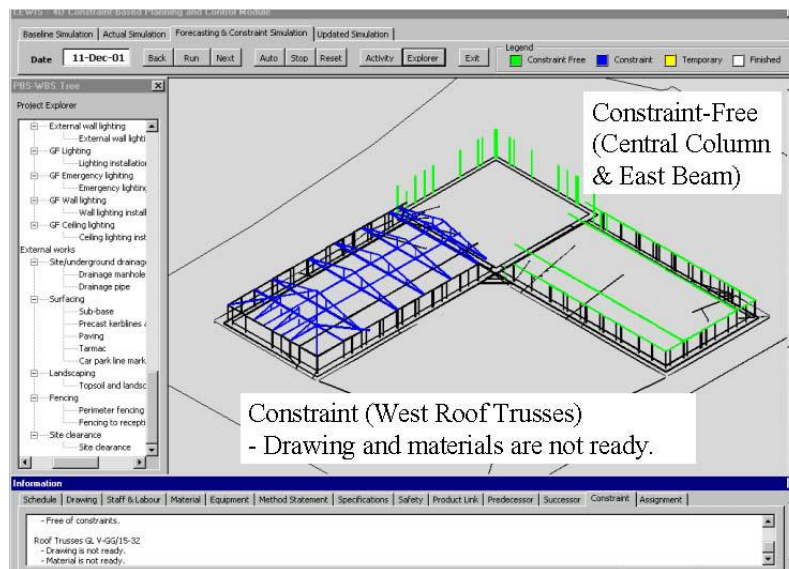


Figure 16: Exemple de visualisation 4D des contraintes de type ressources et informations dans LEWIS ; La tâche d'installation de la charpente (surlignée en bleu) ne peut pas démarrer car les plans et le matériel ne sont pas encore disponible [80].

L'un des objectifs de ce système était également d'impliquer les collaborateurs dans le processus de planification. Pour atteindre cet objectif, LEWIS permet aux conducteurs de travaux et aux chefs de chantiers de décomposer et de détailler les tâches dont toutes les contraintes ont été levées lors de la phase Lookahead. De plus, les instructions et les informations pertinentes peuvent être envoyées directement sur les ordinateurs portables de poche (PC Pocket) des compagnons. Ces

appareils sans fils permettent également de collecter les commentaires (feedbacks) des ouvriers et les données concernant la progression des travaux.

En 2006, le Center of Integrated Facility Engineering [81] a développé une approche de conception et de construction virtuelle (VDC). Cette approche utilise des technologies avancées pour repenser les produits, les processus et l'organisation des projets de construction [82]. Elle combine les principes du Lean Construction, de l'Integrated Concurrent Engineering (ICE) et du BIM pour atteindre des performances alignées avec les objectifs du client (voir Figure 17). Cette approche appuie la volonté d'intégrer les données du produit contenues dans la maquette numérique BIM et les informations relatives aux processus issues des ateliers LPS®.

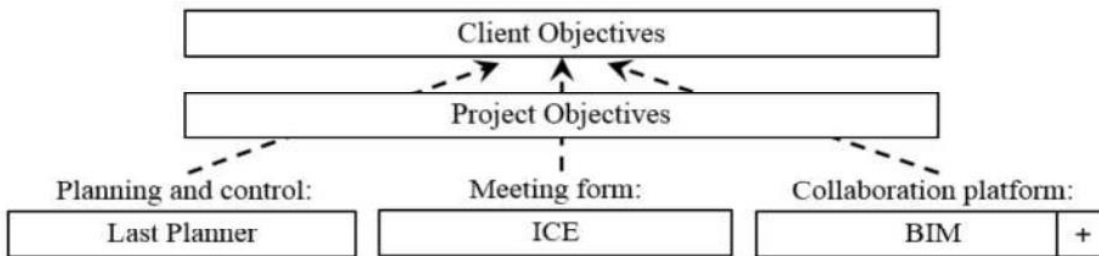


Figure 17: Aperçu du modèle VDC de l'entreprise Skanska Norway [82]

En 2009, Sacks et al. [76] ont développé le système CONWIP (Controlled Work in Progress) dans le but de maintenir les stocks et les en-cours au minimum, une caractéristique fondamentale d'une organisation en flux tirés. Ce système utilise des symboles visuels semblables à des feux de circulation pour afficher les statuts des travaux sur une vue 3D d'un ouvrage (voir Figure 18). Cela permet de guider les équipes vers les zones où les activités peuvent être effectuées et d'assurer finalement la continuité des séquences de travaux.

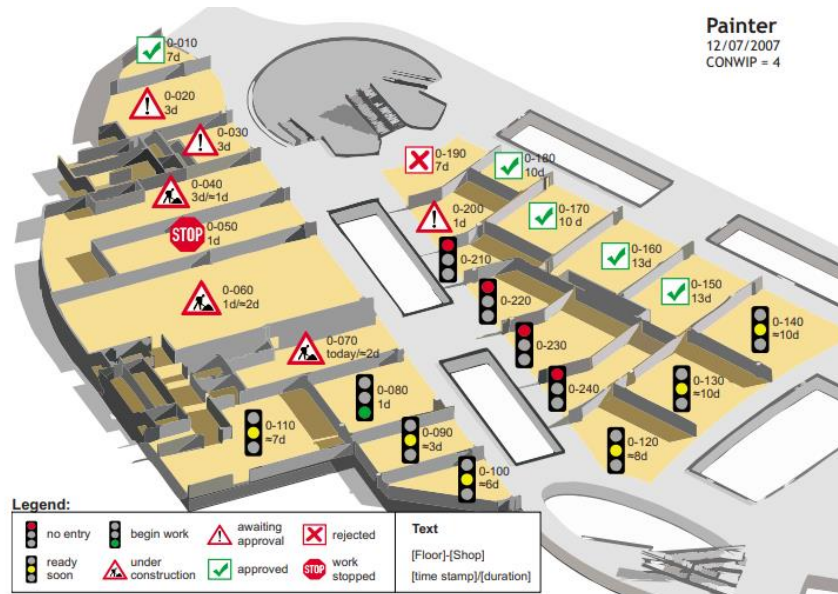


Figure 18: Aperçu des statuts des activités du peintre via l'outil CONWIP

Ce travail a ensuite été enrichi par l'ajout de nouvelles fonctionnalités en vue de soutenir les étapes antérieures au suivi de l'avancement des travaux. L'architecture de ce nouveau système appelé KanBIM met en avant plusieurs interfaces supportant les étapes de préparation des tâches (Lookahead planning) et de planification court-terme (Weekly work planning). Nous retrouvons également une maquette numérique dans KanBIM conçue pour fédérer des informations interdépendantes sur le produit et les processus de construction [83], en appliquant des méthodes de construction, en agrégeant des objets de la maquette et en les associant aux lots de travaux générés, ainsi qu'en générant des objets pour représenter les équipements temporaires dans le modèle. Les ouvriers mettent ensuite à jour le statut de ces processus, ce qui permet une gestion efficace de l'avancement des travaux. KanBIM présente une innovation avec l'introduction de deux indicateurs au niveau de chaque tâche : l'indice de maturité (Maturity index MI) et l'indice de flux tiré (Pull flow index PFI). Le premier indicateur permet de déterminer si une tâche est suffisamment mature pour être exécutée, c'est-à-dire si toutes les contraintes ont été levées, tandis que le second indicateur donne un ordre de priorité dans l'exécution des tâches qui sont matures [84]. Dans la Figure 19, ces deux indicateurs ont été modélisés dans la vue 3D sous forme de symboles, avec l'indice de maturité représenté par un niveau de charge de batterie et l'indice de flux tiré schématisé par des étoiles.

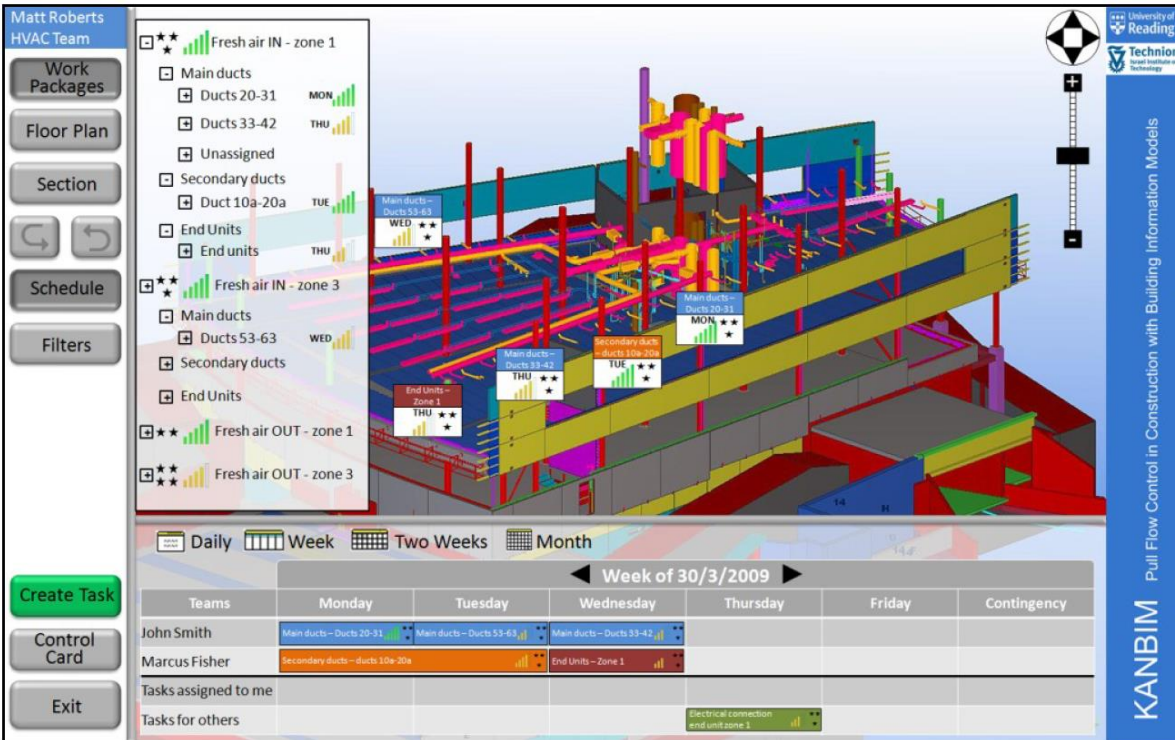


Figure 19: Aperçu de l'interface KanBIM.

Les progrès réalisés grâce à l'utilisation de KanBIM présentent des similitudes avec un autre outil appelé VisiLean qui a été développé dans le cadre de la thèse doctorale soutenue par Dave Bhargav [18] en 2013. Aujourd'hui, VisiLean est une application Web commercialisée qui permet aux utilisateurs de planifier et de contrôler leurs projets de construction en utilisant la méthode LPS®. Cette plateforme offre une interface web permettant de visualiser simultanément les informations relatives au produit et aux processus en associant des éléments d'une maquette numérique avec les tâches planifiées. En outre, cette solution dispose d'une application mobile qui permet de transmettre les informations techniques des tâches à réaliser aux compagnons et de recueillir des informations sur la levée des contraintes de ces tâches et sur la progression des travaux sur le chantier [29]. Les statuts des tâches sont reportées sur la maquette numérique via un code couleur (rose : la tâche n'est pas encore prête pour l'exécution, vert clair : toutes les contraintes de la tâche sont levées et la tâche est prête pour exécution, violet : tâche démarrée, vert foncé : tâche terminée, jaune : problème identifié, rouge : tâche en arrêt, noir : contrôle qualité approuvé...).



Figure 20: Résumé des fonctionnalités de VisiLean [85]

Malgré les nombreux avantages qu'offre VisiLean, cette solution continue de dépendre de processus manuels. Par exemple, l'association manuelle des objets de la maquette numérique aux tâches planifiées lors des ateliers de planification collaborative LPS[®] est une étape très chronophage. Par ailleurs, ces liens ne permettent pas d'enrichir les caractéristiques des tâches notamment en termes de quantités de matériels nécessaires et des coûts associés. Par conséquent, les informations contenues dans la maquette numérique ne sont pas utilisées de manière optimale, ce qui ne permet pas d'exploiter pleinement le potentiel du BIM. En plus de la visualisation intuitive de la progression sur une maquette, une vraie intégration entre le LPS[®] et le BIM au niveau de l'information doit prendre en compte plusieurs fonctions telles que la génération automatique de tâches, l'estimation automatique des coûts des tâches, l'exportation et la manipulation personnalisées des données ainsi que la simulation des processus. La matrice d'interaction entre le LPS[®] et le BIM proposée par Schimanski et al. [86] répertorie toutes les utilisations connues jusqu'à présent pour assurer une intégration complète entre ces deux concepts (voir Figure 21).

Column key	BIM functionalities Last Planner® principles	Sacks et al. [10]						Authorship of this study			Oskouie et al. [9]		
		Reuse of model data for predictive analysis	Automated generation of drawings and contents	Rapid generation and evaluation of multiple construction plan alternatives			Online/electronic object-based communication			Customized data retrieval & manipulation		Facilitating real-time construction tracking and reporting	
				Automated cost estimation (4)	Automated generation of drawings and contents (8)	Automated generation of construction tasks (11)	Construction process simulation (12)	4D simulation of construction schedules (13)	Visualization of process status (14)	Online communication of product and process information (15)	Provision of context for status data collection on site/off site (18)	IFC toolkits & Visual programming allow for developing customized applications (19*)	BIM objects can be highlighted/visualized for application-specific purposes (20*)
	Reduce cycle times												
C	Reduce production cycle duration	12	22	25	25	25	26	26				61	61
E	Reduce batch size		53				30	30	30				
	Select an appropriate production control approach												
H	Use pull systems						34	34	34	58	58, 59	62	62
I	Level the production									57	58, 59, 60	62	62
	Use visual management												
L	Visualize production methods					40		38			60		
M	Visualize production process					40	34	34			60, 61, 62		
	Design the production system for flow and value												
N	Simplify			-41	-41								
P	Use only reliable technology		54				-42	-42	-42	57			
Q	Ensure the capability of the production system		54			58, 59					60		
R	Ensure comprehensive requirement capture										59, 60		

* refer to added BIM functionalities to the original BIM-Lean interaction matrix.

Figure 21: Matrice d'interactions entre le BIM et le LPS® [86]

2.6. Motivations – Questionnements scientifiques

En se basant sur la première question de recherche et sur la revue de littérature présentée dans les sections précédentes, il est possible de conclure que l'interaction la plus forte entre le Lean Construction et le BIM est celle qui relie les fonctions de visualisation du BIM à la démarche de planification collaborative Last Planner System®. Cette co-application du BIM et du LPS® est considérée comme une pratique du BIM 4D, qui est très attendue par l'entreprise Equans pour améliorer ses techniques de planification et de contrôle de la production. Plusieurs travaux de recherche ont été menés sur ce sujet et ont donné lieu à des technologies numériques qui soutiennent la démarche LPS® et permettent la création de liens avec la maquette numérique BIM. Néanmoins, la plupart des outils examinés n'ont pas encore la capacité de gérer toutes les étapes du LPS® de manière efficace et ne permettent pas une véritable intégration avec le BIM en termes d'exploitation des données contenues dans la maquette numérique. Par conséquent, la génération automatique des tâches à partir des données de la maquette numérique est un axe de recherche très

intéressant qui pourrait favoriser une véritable intégration entre le BIM et le LPS[®]. De plus, les résultats de notre analyse des données présentes dans les maquettes numériques BIM d'Equans montrent que celles-ci ne contiennent pas toutes les informations nécessaires et utiles à la planification, ce qui justifie le besoin d'intégrer d'autres sources de données complémentaires.

L'objectif central de ce travail de recherche est donc d'exploiter pleinement les données opérationnelles d'un projet de construction, y compris les données de la maquette numérique BIM, pour automatiser la création d'un planning de montage. Cette contribution est essentielle pour instaurer une méthode de planification cohérente et homogène au sein d'Equans et pour libérer les responsables de projets des tâches chronophages de planification manuelle. Cette automatisation permettra aux décideurs de se concentrer sur des tâches plus stratégiques et d'améliorer la qualité de la planification. Bien que l'automatisation de la planification ne soit pas une préoccupation nouvelle, mon sujet de recherche se distingue par sa réalisation dans un environnement industriel pour la discipline du génie climatique, ce qui constitue une avancée significative dans l'utilisation des technologies de l'information et de la communication pour le secteur de la construction. Notre contribution présente deux particularités majeures. Tout d'abord, elle répond à une problématique peu explorée dans les travaux de recherche existant notamment dans les métiers de second œuvre tels que le génie climatique, contrairement à ceux qui se concentrent sur le gros œuvre [61]. De plus, nos travaux ont pour objectif d'utiliser des données de sources multiples, et non seulement celles figurant dans la maquette BIM [62] [63] [87]. D'abord, nous utilisons les données de chiffrage issues de la phase avant-vente d'un projet pour générer un pré-planning. Ensuite, nous utilisons les données de la maquette numérique modélisée en phase études d'exécution pour mettre à jour le planning produit (comme indiqué dans la Figure 22). La raison pour laquelle nous avons choisi cette orientation pour notre travail est liée aux exigences du plan qualité de l'entreprise Equans. En effet, la création d'un planning de montage est nécessaire dès le début du projet, avant même le démarrage de la modélisation du bâtiment. A ce stade, l'entreprise dispose uniquement des quantitatifs d'équipements nécessaires et des temps de pose estimés lors du chiffrage du projet. Ces informations sont donc utilisées pour réaliser une pré-planification du montage. De plus, il est important d'établir un lien entre cette pré-planification et les données de la maquette numérique d'exécution, qui sont générées un peu plus tard en phase de conception détaillée du projet. Ceci permettrait de comparer les données issues de la phase de chiffrage et de la phase d'études d'exécution et d'assurer une continuité dans l'usage de ces données opérationnels, ce qui est

essentiel pour valider la cohérence du projet dans son ensemble. Cette méthode innovante permet une meilleure optimisation du processus de planification et pourrait avoir un impact significatif sur l'efficacité globale du projet.

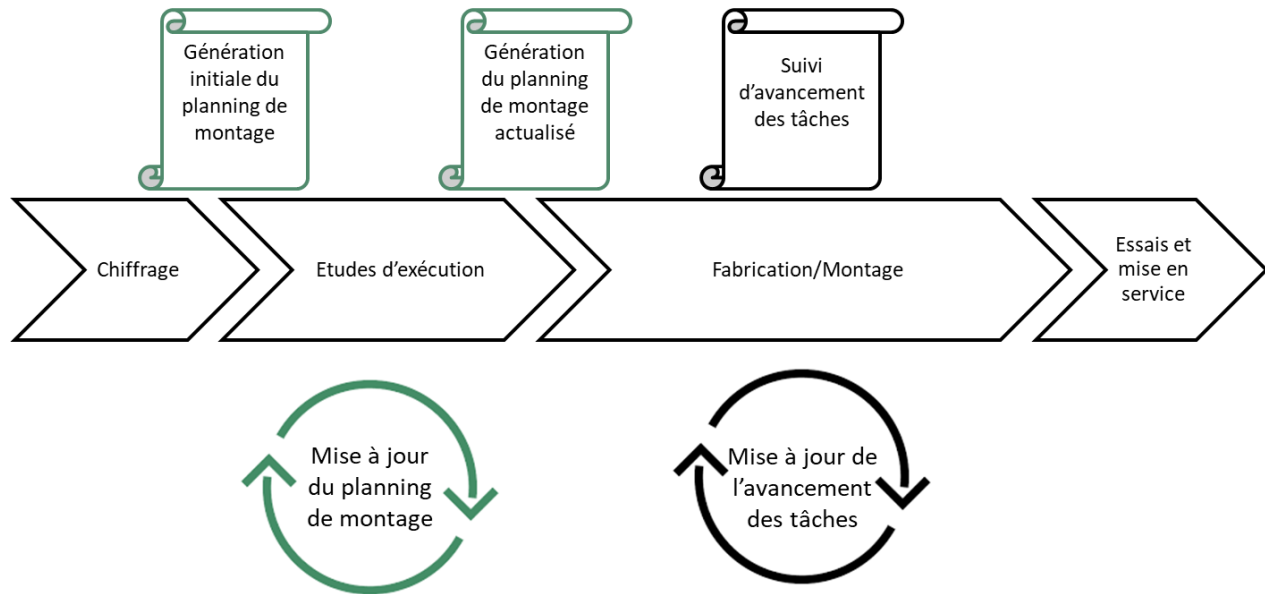


Figure 22: Objectifs et périmètre de la thèse (les résultats attendus de ce travail sont encadrés en vert)

2.7. Méthodologie de recherche

Dans cette partie nous ferons un rappel rapide de la méthodologie de recherche avant d'arriver à notre proposition de démarche scientifique à entreprendre dans un contexte industriel. Dans tout projet de recherche, il est essentiel de déterminer une approche ou méthodologie de recherche à suivre afin de cerner le(s) problème(s) à résoudre. Cette méthodologie se compose d'un ensemble de techniques et de procédures utilisées pour collecter, analyser et interpréter des informations relatives un à sujet de recherche spécifique. Une méthodologie de recherche est établie en croisant la vision philosophique du chercheur concernant la thématique de recherche, la méthodologie de recherche adaptée à cette vision, et les méthodes permettant de concrétiser la stratégie de recherche en actions concrètes. Cette définition est conforme à la proposition de Creswell et est présentée graphiquement dans la Figure 23 [88]. Il est important de rappeler que la vision philosophique traduit les croyances ontologiques (l'étude de ce que signifie le mot « être » et du sens à donner à « la réalité ») et la posture épistémologique du chercheur (l'étude de comment l'on acquiert les connaissances). En ce qui concerne les méthodologies de recherches, il existe 3

typologies: qualitative, quantitative et mixte. Les méthodes de recherches qualitatives sont traditionnellement utilisées dans les sciences sociales, tandis que les méthodes quantitatives sont largement exploitées par les sciences naturelles. Quant aux méthodes mixtes, elles combinent les méthodes qualitatives et quantitatives [89].

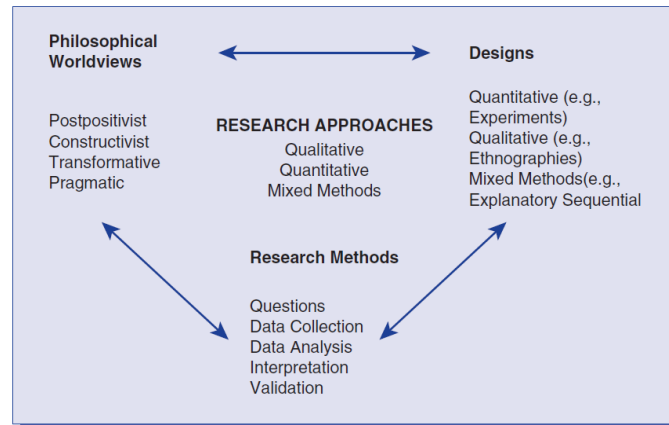


Figure 23: Approche de recherche à l'interconnexion de la vision philosophique, de la stratégie et des méthodes de recherche [88].

La question que nous avons formulée pour notre sujet de recherche « Comment améliorer la performance des projets de construction en combinant le Lean et le BIM en phase exécution » relève à la fois de la gestion de projets de construction et des sciences de l'information. D'une part, la gestion de projets de construction est un domaine d'étude situé à la jonction des sciences naturelles (ou exactes) et sociales [90]. D'autre part, les sciences de l'information sont communément considérées comme des sciences exactes, bien que certains chercheurs défendent leurs caractère compréhensif, en affirmant que leurs objectif d'étude ne se limite pas à l'information en elle même, mais englobe également la compréhension des processus d'échanges et de partage de l'information comme l'a noté Fondin [91]. En raison de la nature interdisciplinaire de notre sujet de recherche, qui se situe à la frontière des sciences naturelles et sociales, nous avons opté pour une approche pragmatique combinant des méthodes quantitatives et qualitatives pour la collecte et l'analyse des informations. Cette triangulation des techniques d'investigation permet de compenser les biais propres à chaque méthode et d'assurer la validité des analyses menées comme le souligne Savoie-Zajc [92].

Nous avons décidé d'utiliser la méthode Constructive Research Approach (CRA) pour résoudre la question de recherche que nous avons formulée précédemment. La CRA est née de la certitude du courant pragmatique en philosophie des sciences de la possibilité de contribuer significativement à la théorie à travers l'analyse profonde de ce qui marche dans la pratique [93]. Cette méthode est

apparue pour la première fois dans le domaine de la comptabilité de gestion. Elle s'est ensuite répandue dans d'autres disciplines telles que la gestion industrielle et la gestion des systèmes d'information [94].

Selon Lukka [95], la CRA est définie comme une méthodologie qui crée des « constructions » innovantes pour résoudre des problèmes du monde réel, et contribue par voie de conséquence au domaine dans lequel elle est appliquée. La notion centrale de cette approche « la nouvelle construction » est une notion abstraite avec une infinité de réalisations potentielles. Ces réalisations peuvent être des modèles, des diagrammes, des plans, des structures organisationnelles, des produits commercialisables et des conceptions de systèmes d'information. Ce qui caractérise ces réalisations c'est qu'elles sont inventées et développées et non découvertes. Dès lors, l'application de la CRA apporte à la fois une contribution pratique et théorique.

La Figure 24 présente les mécanismes de travail dans la CRA qui va de l'identification de la pertinence pratique et théorique du problème vers la conception et la validation de la construction.

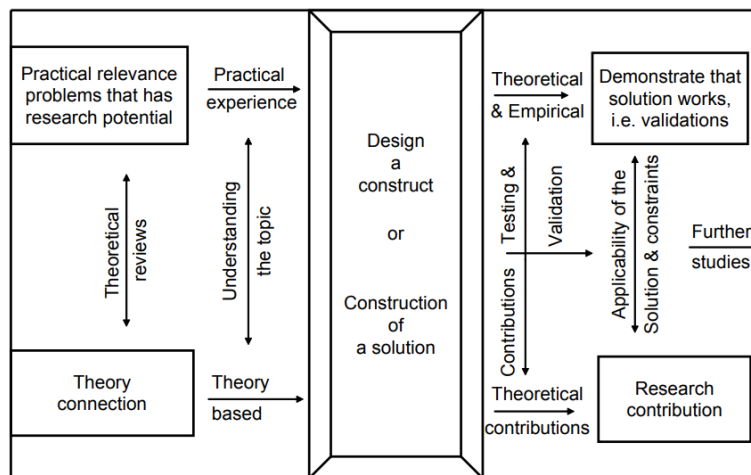


Figure 24: Mécanisme de travail dans la Constructive Research Approach

En se basant sur notre question de recherche, nous avons sélectionné le processus de Lukka [95] décrivant les sept étapes de la CRA qui sont :

1. *Trouver un problème pertinent sur le plan pratique. Ce problème doit avoir des fondements théoriques (Chapitre 1 et 2):* le sujet idéal est celui dont la pertinence pratique est difficile à cerner ou est simplement sous analysé dans la littérature.
2. *Etudier la possibilité d'une collaboration long terme avec la/les organisation(s) cible(s) (Chapitre 1):* une équipe constituée à la fois du chercheur et de membres du

partenaire industriel est dévoué au projet. Un accord formel traitant les sujets de financement, d'accès à la donnée et les conditions de diffusion des résultats est conclu.

3. *Acquérir une connaissance approfondie sur le sujet sur le plan pratique et théorique (Chapitre 2) :* le chercheur analyse le status quo de l'organisation cible pour comprendre les facteurs explicites et implicites du problème étudié. De plus, la connaissance préalable des bases théoriques du champ de recherche est essentielle pour inspirer la formalisation d'une solution et démontrer la contribution théorique de l'étude.
4. *Concevoir et développer une solution pour résoudre le problème, et qui apporte une contribution théorique (Chapitre 3) :* il est important de noter que le transfert de solutions prêtes à l'emploi n'est pas une application de la CRA. Comme précisé précédemment, la CRA soutient la production d'innovations notamment à travers le développement de prototypes.
5. *Implémenter et tester la solution (Chapitre 3 et 4) :* l'innovation doit être testée du point de vue technique et fonctionnel. Le plus souvent, la solution est commercialisée au sein de l'organisation partenaire et testée sur des sites pilotes.
6. *S'interroger sur le champ d'application et la transférabilité de la solution (Chapitre 4) :* l'objectif est d'analyser les résultats et les conditions de leurs obtentions. Si le marché test est concluant, il est intéressant d'aborder la question du transfert de cette innovation vers d'autres organisations. Si non, il est toujours judicieux d'examiner les causes d'échecs des tests.
7. *Identifier et analyser les contributions théoriques (Conclusion et perspectives) :* le chercheur explique les implications des résultats de son étude sur les théories prévalentes.

Au cours de notre travail de recherche, nous avons suivi rigoureusement les étapes de la CRA pour garantir la qualité et la fiabilité de notre recherche. Nous avons fait référence aux chapitres de notre manuscrit correspondant à chacune des étapes de cette méthodologie. Chaque chapitre permet de décrire de manière précise et convaincante la façon dont nous avons appliqué cette méthodologie CRA à notre problématique de recherche.

2.8. Conclusion

Après une analyse approfondie de la littérature, nous avons mis en évidence la faible productivité du secteur de la construction et les raisons sous-jacentes, principalement le manque d'adoption rapide des méthodes de construction allégées telles que le « Lean Construction » et des nouvelles technologies comme la modélisation des informations du bâtiment « BIM ». Nous avons ensuite présenté ces deux approches, en détaillant leurs origines, définitions, principes, techniques, et leurs cas d'usages, avant d'analyser en profondeur les interactions possibles entre ces deux méthodologies. Nous avons effectué cette analyse en utilisant une matrice pondérée, ce qui a permis d'identifier une interaction prometteuse pour le secteur. Cette dernière relie les fonctions de visualisation du BIM à la démarche de planification collaborative LPS[®]. Suite à cette constatation, nous nous sommes orientés vers les travaux de recherches qui ont aboutis au développement d'outils combinant le LPS[®] et le BIM en vue d'identifier des verrous scientifiques pertinents. Nous avons observé que la plupart des outils développés jusqu'à présent ne permettent pas une véritable intégration entre le LPS[®] et le BIM en termes d'exploitation des données produites par chacune de ces méthodes. Il est essentiel de prendre en compte plusieurs fonctions, notamment la génération automatique des tâches du planning des phases du LPS[®], pour une intégration complète. Dans le but de promouvoir une véritable intégration, notre objectif initial était de générer automatiquement les tâches du planning collaboratif réalisé lors des rituels LPS[®] (phase schedule) à partir des données de la maquette numérique. Cependant, en alignant cette problématique avec les besoins de l'entreprise, nous avons affiné notre orientation finale. Ainsi, l'objectif principal de l'outil développé dans le cadre de cette thèse est de générer automatiquement un planning de montage spécifique au domaine du génie climatique, en utilisant plusieurs sources de donnée, telles que les données de chiffrage produites en phase avant-vente du projet et les données de la maquette numérique BIM issue des études d'exécution. Pour formuler cet objectif, nous avons pris en compte les intérêts de notre partenaire industriel tout en respectant les exigences académiques et en suivant les principes de l'approche de recherche « Constructive Research Approach », une méthodologie rigoureusement appliquée pour répondre à notre question de recherche.

Chapitre 3 : *Conception et développement d'un outil de planification automatique*

Sommaire

- 3.1. Spécification des besoins pour la planification du montage
 - 3.2. Etudes de faisabilité
 - 3.2.1. Contraintes temporelles de planification
 - 3.2.2. Quantitatif du matériel et temps de mise en œuvre
 - 3.2.3. Planification standard du savoir-faire métier
 - 3.3. Proposition d'un outil de planification automatique de la phase de montage
 - 3.3.1. La base de données
 - 3.3.2. Traitement des données
 - 3.3.3. Interface utilisateur
 - 3.4. Planification avec un lissage des ressources humaines
 - 3.4.1. Formulation du problème
 - 3.4.2. Construction du modèle
 - 3.4.3. Solution du modèle
 - 3.4.4. Validation et mise en œuvre
 - 3.5. Discussion et conclusion
-

Dans ce chapitre, qui constitue le cœur de nos travaux, nous présenterons les différentes étapes de conception et de développement de la solution de génération automatique d'un planning de montage, en réponse aux verrous scientifiques et industriels identifiés dans les chapitres précédents. Nous commençons par décrire les exigences de l'utilisateur de la solution, en mettant en avant les aspects métier. Nous poursuivons par l'examen de la faisabilité de la solution en tenant compte des données d'entrées disponibles au sein de l'entreprise et en identifiant les difficultés rencontrées. Nous présenterons ensuite l'architecture de la solution et les développements effectués. Nous exposerons par la suite nos travaux sur l'optimisation de la planification par le lissage des ressources. Enfin, nous concluons ce chapitre par une synthèse de nos résultats et une discussion.

3.1. Spécification des besoins pour la planification du montage

Dans tout projet numérique, il est important de spécifier toutes les fonctionnalités du système digital avant tout développement. Ces exigences fonctionnelles spécifient le comportement du système et la façon dont il répondra aux besoins des utilisateurs [96]. Nous avons élaboré ces fonctions à partir de l'état de l'art [97] [18] et des retours des futurs utilisateurs potentiels avec lesquels nous avons échangé lors de la phase d'immersion sur le terrain (cf. 1.3). Ces fonctionnalités [98] font partie de la spécification des exigences utilisateurs (URS), qui a été rédigée en concordance avec les besoins de l'entreprise. La spécification des exigences utilisateurs couvre à la fois le sujet de la planification automatisée d'une affaire et le suivi de l'avancement. La Tableau 4 résume l'ensemble des fonctionnalités définies. Elles ont été regroupées en sept catégories, à savoir : l'administration des privilèges des utilisateurs, le paramétrage des contraintes de planification, la génération initiale du planning, l'estimation de la charge, la mise à jour du planning, la modification du planning et le suivi de l'avancement. Ces catégories ont été déterminées pour structurer et faciliter la présentation des fonctionnalités de la solution.

Nous avons décidé de concentrer nos travaux sur la planification automatique du montage pour les métiers du génie climatique, étant donnée la nature des activités de l'entreprise EQUANS. Ainsi, pour des contraintes de temps, les fonctionnalités liées au « suivi de l'avancement » ne seront pas traitées dans le cadre de notre prototype de planification automatique. Dans le même esprit, nous ne traiterons pas les fonctionnalités liées à « l'administration des privilèges des utilisateurs », car nous visons à développer un outil de preuve de concept qui ne présentera que les principales fonctions de la future application. Toutefois, nous sommes conscients que les habilitations des utilisateurs sont un élément important à prendre en compte dans le développement d'une application industrialisée pour une utilisation au sein de l'entreprise Equans.

Tableau 4: Exigences fonctionnelles de l'application de planification automatique et de suivi de l'avancement issues de l'URS

Fonctionnalités		
Catégorie	N°	Description
Administration des privilèges des utilisateurs	1	L'utilisateur pourra associer son projet de planification à une affaire.
	2	L'interface « utilisateur » permettra d'administrer les privilèges associés aux groupes utilisateurs.
	3	L'interface « utilisateur » devra permettre d'administrer les gammes de mise en œuvre.
Paramétrage des contraintes de planification	4	L'application permettra de configurer des paramètres généraux de planification tels que : <ul style="list-style-type: none"> • La durée journalière de travail pour chacun des jours de la semaine • Les jours non travaillés
	5	L'utilisateur doit pouvoir saisir des contraintes temporelles liées au planning de construction client. Une contrainte pourra par exemple être constituée des propriétés suivantes : <ul style="list-style-type: none"> • Bâtiment • Niveau • Zone • Date de début de disponibilité • Date de fin de disponibilité
	6	L'utilisateur pourra définir des zones qui permettront de grouper des locaux et ainsi grouper les opérations associées aux locaux.
	7	Des prérequis prédéfinis issus d'autres lots mais dont dépendent les activités CVC pourront être configurés pour être insérés dans le planning d'exécution. Ci-dessous une liste non exhaustive de tâches prédéfinies : <ul style="list-style-type: none"> • Eclairage et coffrets provisoires d'alimentation • Mise à disposition des alimentations • Exécution des réservations • Locaux techniques disponibles et hors d'eau
Génération initiale du planning	8	L'application doit permettre de générer de manière automatique un planning d'exécution.
	9	Le planning de montage devra être visible depuis l'interface de l'application sous forme d'un diagramme de GANTT.
	10	Le diagramme de GANTT pour être configurable avec une résolution à la journée, semaine ou mois

	11	<p>L'application doit permettre d'afficher les tâches et les de les filtrer selon les critères suivants :</p> <ul style="list-style-type: none"> • Géographique (bâtiment, niveau, zone, local) • Système • Super famille • Famille • Groupe • Article
	12	<p>Les articles (composants d'un système) associés à une tâche pourront être consultables, ils pourront contenir les informations suivantes :</p> <ul style="list-style-type: none"> • Manufacturier • Référence interne • Quantité • Temps de mise en œuvre unitaire
Estimation de la charge	13	<p>L'interface de planification permettra d'afficher une estimation des ressources nécessaires à la réalisation de l'ensemble des tâches à la semaine.</p>
Mise à jour du planning	14	<p>Le planning en cours pourra être comparé aux résultats des études pour identifier des éventuelles différences de matériels, le résultat de cette comparaison devra être présenté à l'utilisateur.</p>
Modification du planning	15	<p>Des prérequis (contraintes chantier, disponibilités des bâtiments et zones chantier) pourront être ajoutés à la création d'un nouveau projet ou bien ajoutés et/ou modifiés en cas d'évolution chantier (modifications des jalons par la MO, ajustements dues aux études).</p>
	16	<p>La durée théorique, la répartition (dates) et les ressources configurées pour chacune des tâches seront modifiables par l'utilisateur.</p>
	17	<p>L'utilisateur pourra modifier l'ordonnancement des tâches.</p>
Suivi de l'avancement	18	<p>L'application de planification permettra de faire un suivi de l'avancement chantier au niveau des tâches à l'aide des propriétés suivantes :</p> <ul style="list-style-type: none"> • Heures prévues • Avancement physique en % • Total heures autorisées • Total heures passées • Ecart horaire par rapport à l'avancement • Ecart par rapport à l'estimation initiale • Prévision calculée (estimation de temps requis pour clôturer la tâche) • Reste à engager
	19	<p>Les informations de suivi du chantier pourront être présentées dans la même fenêtre que la planification ou bien dans une fenêtre dédiée si nécessaire.</p>

3.2. Etudes de faisabilité

Après avoir exposé les exigences fonctionnelles de notre preuve de concept, il est nécessaire de procéder à une évaluation de la faisabilité technique de la solution. Cela consistera à examiner la disponibilité et la cohérence des trois catégories d'informations qui conditionnent l'opération de planification automatique [61] [62] [63] à savoir : (i) les contraintes temporelles de planification, (ii) le quantitatif du matériel en phase appel d'offre puis en phase de conception détaillée avec les temps de mise en œuvre respectifs et (iii) la planification standard du savoir-faire métier.

Afin de mener à bien cette évaluation, il est nécessaire de collecter des données concrètes et représentatives de l'activité du groupe Equans à partir d'un projet réel. Pour ce faire, en concertation avec les équipes encadrantes de la thèse, nous avons opté pour le projet de construction du centre chirurgical et interventionnel (CCI) de Rennes. Il s'agit d'un projet type dont les données ont été structurées et rendues disponibles pour les besoins de nos travaux. Ce projet vise à construire un plateau technique chirurgical, interventionnel et de soins critiques, qui rassemblera tous les blocs chirurgicaux et les salles de radiologie interventionnelle du centre hospitalier universitaire (CHU). Ce projet représente un chiffre d'affaires significatif s'élevant à 16M€ pour le lot chauffage, ventilation et climatisation (CVC) et 4,8M€ pour le lot plomberie (PLB). L'exécution de ce projet a commencé en juin 2020 et devrait durer 28 mois. Ce projet devra nous permettre de tester dans de bonnes conditions notre preuve de concept. Il est important de noter que la structure et les sources des données d'entrées que nous détaillerons ci-dessous sont identiques pour tous les projets de l'entité Bâtiments et Ouvrages Complexes (BOC) d'Equans voire d'autres départements utilisant les mêmes outils de chiffrage et de modélisation paramétrique. Les données du projet CCI ont donc été utilisées à titre indicatif pour illustrer nos travaux. Ainsi, notre processus de planification automatique peut être dupliqué pour n'importe quel autre projet de l'entité BOC.

3.2.1. Contraintes temporelles de planification

Il s'agit des dates butoirs fixées par la maîtrise d'œuvre dans le planning contractuel signé par les corps d'états techniques. Ce planning est équivalent au planning des jalons principaux « Master schedule » de la méthode LPS[®]. Il met en avant les macro-tâches propres à chaque métier, par niveau voire par zone de l'ouvrage, avec leurs délais respectifs de réalisation. La Figure 25

présente un extrait du planning contractuel du projet du CCI Rennes où les jalons des corps d'état techniques pour les différentes zones du niveau 1 sont surlignées en orange. Les activités liées à l'installation des réseaux et des locaux techniques gérées par Equans sont incluses dans cette planification. Cependant, le niveau de détail de cette planification reste insuffisant pour mener les travaux sur le terrain. Il est donc nécessaire de réaliser une planification détaillée des tâches des différentes disciplines, que ce soit de manière collaborative ou non, tout en respectant les échéances indiquées. Les jalons serviront donc de contraintes pour le début et la fin de la réalisation des tâches du planning détaillé qui sera généré automatiquement par notre outil.

La planification présentée sur la Figure 25 ne prend pas en compte toutes les contraintes temporelles liées à l'interdépendance entre les activités détaillées des différentes disciplines. Dans le cadre d'une planification dédiée au métier du génie climatique, nous prendrons en compte les dates de fin de réalisation des tâches prérequis pilotées par les autres corps de métier en tant que contrainte dans la planification. Par exemple, la mise en œuvre des réseaux hydrauliques ne peut démarrer avant que les locaux ne soient hors d'eau et que les étais ne soient retirés par le lot gros œuvre.

Chapitre 3 : Conception et développement d'un outil de planification automatique

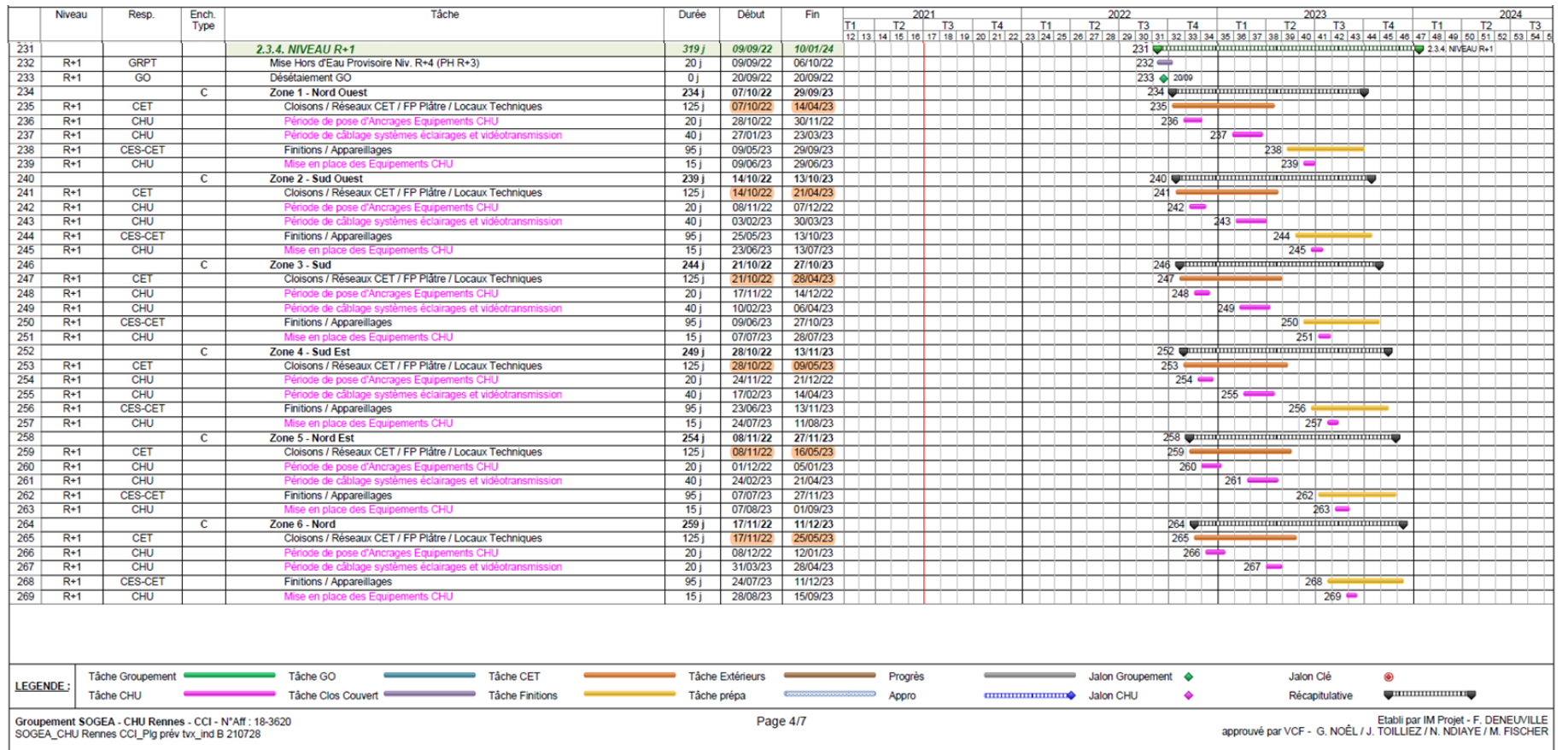


Figure 25: Extrait du planning contractuel du projet de construction du centre chirurgical et interventionnel de Rennes [99]

3.2.2. Quantitatif du matériel et temps de mise en œuvre

En prenant en compte l'orientation de la solution envisagée, les quantitatifs de matériels nécessaires à la réalisation d'un projet doivent provenir de deux sources de données : celles du chiffrage créées en phase avant-vente pour générer très tôt un planning initial, et celles de la maquette numérique BIM modélisée en phase de conception détaillée pour la mise à jour du planning. Pour aider le lecteur à mieux comprendre le travail important accompli sur cette partie, nous allons détailler dans ce qui suit les sources ainsi que le contenu de chaque type de données.

a- Données issues du chiffrage

En phase avant-vente, les responsables de chiffrage de l'entreprise Equans utilisent des données du dossier de consultation des entreprises (DCE) pour établir un devis client en réponse à un appel d'offre. Le DCE comprend plusieurs éléments tels que le cahier des clauses techniques particulières (CCTP), la décomposition du prix global et forfaitaire (DPGF), des plans au format PDF ou DWG, des maquettes numériques au format ifc ou au format natif Revit rvt pour 30% des projets (chiffre estimé en 2017), etc. Au regard des incohérences de modélisation identifiées dans les maquettes numériques du DCE (exemples : surdimensionnement des gaines verticales, réseaux dessinés en double...), les chiffreurs d'EQUANS évitent d'utiliser ce support pour l'extraction automatique des quantitatifs de matériel. Ce constat est aussi observé dans la littérature [100] [101]; Les maquettes numériques en phase appel d'offre contiennent uniquement 50% des informations nécessaires pour le chiffrage du projet et ces dernières sont souvent erronées. De plus, les objets modélisés dans ces maquettes BIM ne respectent pas un protocole de codification commun entre les parties prenantes.

De ce fait, une étape intermédiaire à l'établissement du devis se rajoute aux chiffreurs pour réaliser le relevé manuel des métrés et des quantitatifs du matériel à partir des pièces fournies au DCE (plans 2D, maquettes, spécifications...) dans un fichier Excel nommé « Feuille de métrés ». L'usage de ce document est généralisé pour l'ensemble des chiffreurs faisant partie du « Service Projet centralisé » de Nantes d'Equans. Trois types de fichiers de métrés sont disponibles pour chacune de ces spécialités étudiées : aéraulique, hydraulique et désenfumage. Ces derniers permettent de répertorier les quantités de matériels ainsi que leurs caractéristiques telles que leurs emplacements, leurs appartenances à un système, leurs dimensions, leurs débits, etc (voir Figure

27). Le matériel est identifié dans les feuilles de métré par le biais d'un code « groupe ». Chaque groupe de matériel appartient à une « famille » et chaque famille appartient à une « super famille ». Cette classification est utilisée par les équipes de chiffrage au sein d'Equans (voir Figure 26). Pour illustrer ce processus, prenons l'exemple de la gaine flexible repérée par le code groupe GNF dans la feuille de métré aéraulique du projet CCI de Rennes (deuxième ligne de la colonne matériel Figure 27). Cette gaine est le seul groupe de la famille des gaines flexibles GNF, qui elle-même fait partie de la super famille « Gaine », comme le montre la Figure 28. Par ailleurs, il existe plusieurs articles dans le groupe GNF ayant des propriétés distinctes, telles que le diamètre ou la typologie du matériau. Cela entraîne des temps de mise en œuvre unitaires (en h/ml) et des coûts unitaires (en €/ml) différents, comme illustré dans la Figure 29.

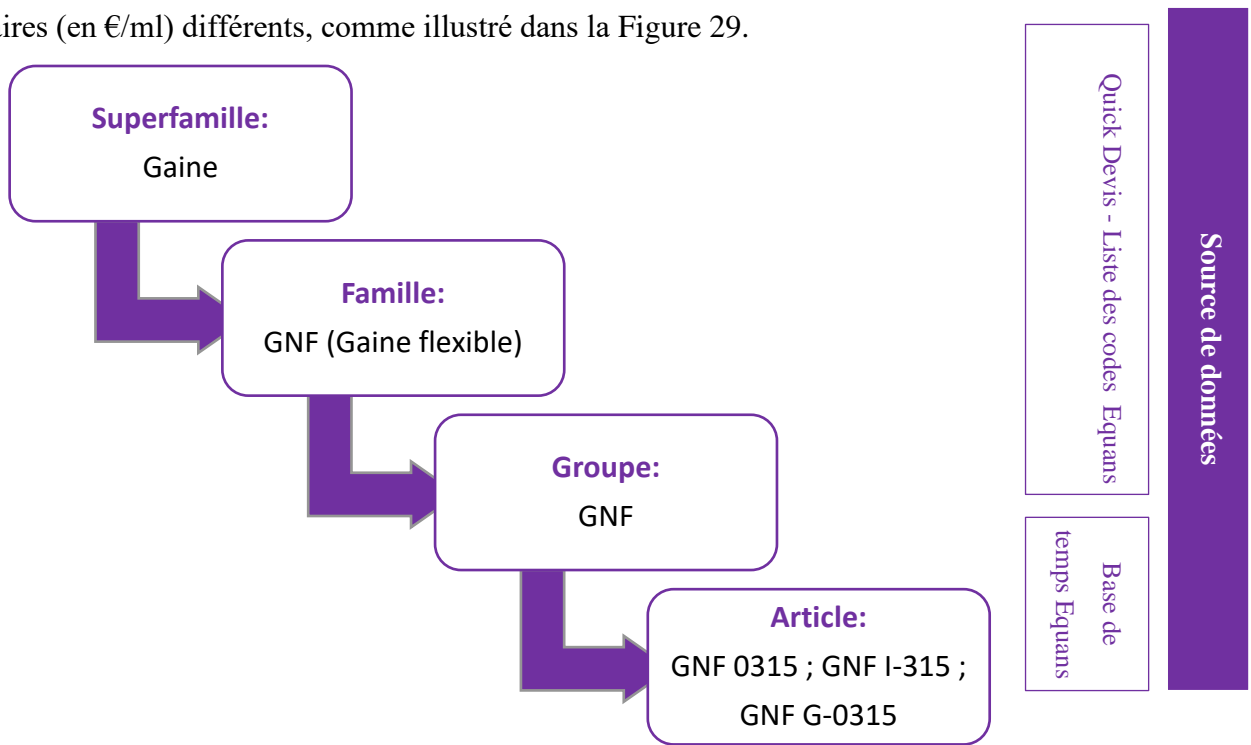


Figure 26: Exemple de classification du groupe d'équipement des gaines flexibles

Cependant, les propriétés des groupes d'équipements recensées dans la feuille de métré ne sont généralement pas exhaustives, ce qui empêche l'identification des codes des articles correspondants (de la base de temps) contenant la donnée temporelle indispensable à la planification. Prenons toujours l'exemple de la gaine flexible ayant un diamètre de 315mm dans la feuille de métrés (voir Figure 27). Nous ne pouvons pas déterminer avec certitude si cet équipement correspond à l'article GNF 0315 (conduit flexible en aluminium) ou au GNF I-315 (conduit flexible en aluminium isolé), ayant des temps de mise en œuvre unitaire identiques de 0.2 h/ml, voire au

GNF G-0315 (gaine circulaire flexible semi rigide non isolé) pour lequel chaque mètre linéaire est installé en 1h (voir Figure 26 et Figure 29).

Figure 27: Extrait de la feuille de métré aéraulique du projet CCI de Rennes

FAMILLE / DESIGNATION		SUPER FAMILLE	FAMILLI	GROUPI	DESCRIPTION	SPECIALI	BI_SAP	BI_SAP / DESIGNATION
GAINE CIRCULAIRE AUTRES		GAINES	GNC	GNC	GAINE CIRCULAIRE AUTRES	CVC	3HNA	Divers Aéraulique (3HNA)
		GAINES	GNC	GCA	GAINE CIRCULAIRE ACIER NOIR	CVC	3HNA	Divers Aéraulique (3HNA)
		GAINES	GNC	GCS	GAINE CIRCULAIRE SPECIALE	CVC	3HNA	Divers Aéraulique (3HNA)
		GAINES	GNC	GCT	GAINE CIRCULAIRE TEXTILE	CVC	3HNA	Divers Aéraulique (3HNA)
		GAINES	GNC	GCV	GAINE CIRCULAIRE PLASTIQUE	CVC	3HNA	Divers Aéraulique (3HNA)
		GAINES	GNC	GCY	GAINE CIRCULAIRE POLYESTER	CVC	3HNA	Divers Aéraulique (3HNA)
		GAINES	GNC	GNC	GAINE CIRCULAIRE AUTRES	CVC	3HNA	Divers Aéraulique (3HNA)
		GAINES	GNC	GOB	GAINE OBLONGUE	CVC	3HNA	Divers Aéraulique (3HNA)
		GAINES	GNC	GPO	GAINE DE DEPOUSSIERAGE	CVC	3HNA	Divers Aéraulique (3HNA)
GAINE FLEXIBLE		GAINES	GNF	GNF	GAINE FLEXIBLE	CVC	3GNF	Gaine Flexible (3GNF)
		GAINES	GNF	GNF	GAINE FLEXIBLE	CVC	3GNF	Gaine Flexible (3GNF)
GAINE RECTANGULAIRE AUTRES		GAINES	GNR	GNR	GAINE RECTANGULAIRE AUTRES	CVC	3HNA	Divers Aéraulique (3HNA)
		GAINES	GNR	GNR	GAINE RECTANGULAIRE AUTRES	CVC	3HNA	Divers Aéraulique (3HNA)
		GAINES	GNR	GRA	GAINE RECTANGULAIRE ACIER NOIR	CVC	3HNA	Divers Aéraulique (3HNA)
		GAINES	GNR	GRS	GAINE RECTANGULAIRE SPECIALE	CVC	3HNA	Divers Aéraulique (3HNA)
		GAINES	GNR	GRT	GAINE RECTANGULAIRE TEXTILE	CVC	3HNA	Divers Aéraulique (3HNA)
		GAINES	GNR	GRV	GAINE RECTANGULAIRE P.V.C.	CVC	3HNA	Divers Aéraulique (3HNA)
		GAINES	GNR	GRY	GAINE RECTANGULAIRE POLYESTER	CVC	3HNA	Divers Aéraulique (3HNA)

Figure 28: Extrait de la liste des codes utilisées par le service chiffrage d'Equans

1	A	B	C	D	E	F	G	H	I
1	Reference	Description	Unité	Coût unitaire	Remj	Temps unitaire	Fournisseur	Article	Commentaire
327	GNF 0100	Conduit flexible en aluminium M0 y compris 2 colliers plats / ml DN 100	ml	2.25	0	0.2	OUEST VENTIL	ALUFLEX 113 Gaine circulaire flexible DN 100 - y/c 2 colliers	
328	GNF 0125	Conduit flexible en aluminium M0 y compris 2 colliers plats / ml DN 125	ml	2.49	0	0.2	OUEST VENTIL	ALUFLEX 113 Gaine circulaire flexible DN 125 - y/c 2 colliers	
329	GNF 0160	Conduit flexible en aluminium M0 y compris 2 colliers plats / ml DN 160	ml	2.94	0	0.2	OUEST VENTIL	ALUFLEX 113 Gaine circulaire flexible DN 160 - y/c 2 colliers	
330	GNF 0200	Conduit flexible en aluminium M0 y compris 2 colliers plats / ml DN 200	ml	3.17	0	0.2	OUEST VENTIL	ALUFLEX 113 Gaine circulaire flexible DN 200 - y/c 2 colliers	
331	GNF 0250	Conduit flexible en aluminium M0 y compris 2 colliers plats / ml DN 250	ml	3.82	0	0.2	OUEST VENTIL	ALUFLEX 113 Gaine circulaire flexible DN 250 - y/c 2 colliers	
332	GNF 0315	Conduit flexible en aluminium M0 y compris 2 colliers plats / ml DN 315	ml	4.79	0	0.2	OUEST VENTIL	ALUFLEX 113 Gaine circulaire flexible DN 315 - y/c 2 colliers	
333	GNF 0355	Conduit flexible en aluminium M0 y compris 2 colliers plats / ml DN 355	ml	5.11	0	0.3	OUEST VENTIL	ALUFLEX 113 Gaine circulaire flexible DN 355 - y/c 2 colliers	
334	GNF 0400	Conduit flexible en aluminium M0 y compris 2 colliers plats / ml DN 400	ml	6.04	0	0.3	OUEST VENTIL	ALUFLEX 113 Gaine circulaire flexible DN 400 - y/c 2 colliers	
335	GNF 0450	Conduit flexible en aluminium M0 y compris 2 colliers plats / ml DN 450	ml	6.87	0	0.3	OUEST VENTIL	ALUFLEX 113 Gaine circulaire flexible DN 450 - y/c 2 colliers	
336	GNF 0500	Conduit flexible en aluminium M0 y compris 2 colliers plats / ml DN 500	ml	8.41	0	0.3	OUEST VENTIL	ALUFLEX 113 Gaine circulaire flexible DN 500 - y/c 2 colliers	
337	GNF 0560	Conduit flexible en aluminium M0 y compris 2 colliers plats / ml DN 560	ml	5.73	0	0.3	OUEST VENTIL	ALUFLEX 113 Gaine circulaire flexible DN 560 - y/c 2 colliers	
338	GNF 0630	Conduit flexible en aluminium M0 y compris 2 colliers plats / ml DN 630	ml	10.06	0	0.3	OUEST VENTIL	ALUFLEX 113 Gaine circulaire flexible DN 630 - y/c 2 colliers	
339	GNF G-0080	Gainé circulaire flexible semi rigide alu non isolé MO DN 080 y compris 2 colli	ml	2.51	0	0.25	VIM	827800 + 2 x GA 80 3m 12/100mm Flexible semi rigide alu non isolé MO + COF 80 (4xq) Collier de serrage fil lot de 4	
340	GNF G-0100	Gainé circulaire flexible semi rigide alu non isolé MO DN 100 y compris 2 colli	ml	2.85	0	0.35	VIM	827801 + 2 x GA 100 3m 12/100mm Flexible semi rigide alu non isolé MO + COF 100 (4xq) Collier de serrage fil lot de 4	
341	GNF G-0125	Gainé circulaire flexible semi rigide alu non isolé MO DN 125 y compris 2 colli	ml	3.65	0	0.4	VIM	827802 + 2 x GA 125 3m 12/100mm Flexible semi rigide alu non isolé MO + COF 125 (2xq) Collier de serrage fil lot de 2	
342	GNF G-0160	Gainé circulaire flexible semi rigide alu non isolé MO DN 160 y compris 2 colli	ml	3.83	0	0.5	VIM	827803 + 2 x GA 160 3m 12/100mm Flexible semi rigide alu non isolé MO + COF 160 Collier de serrage fil	
343	GNF G-0200	Gainé circulaire flexible semi rigide alu non isolé MO DN 200 y compris 2 colli	ml	5.05	0	0.7	VIM	827804 + 2 x GA 200 3m 12/100mm Flexible semi rigide alu non isolé MO + COF 200 Collier de serrage fil	
344	GNF G-0250	Gainé circulaire flexible semi rigide alu non isolé MO DN 250 y compris 2 colli	ml	6.6	0	0.8	VIM	827805 + 2 x GA 250 3m 12/100mm Flexible semi rigide alu non isolé MO + COF 250 Collier de serrage fil	
345	GNF G-0315	Gainé circulaire flexible semi rigide alu non isolé MO DN 315 y compris 2 colli	ml	7.52	0	1	VIM	827806 + 2 x GA 315 3m 12/100mm Flexible semi rigide alu non isolé MO + COF 315 Collier de serrage fil	
346	GNF G-0355	Gainé circulaire flexible semi rigide alu non isolé MO DN 355 y compris 2 colli	ml	11.27	0	1.1	VIM	827807 + 2 x GA 355 3m 12/100mm Flexible semi rigide alu non isolé MO + COF 355 Collier de serrage fil	
347	GNF G-0400	Gainé circulaire flexible semi rigide alu non isolé MO DN 400 y compris 2 colli	ml	13	0	1.2	VIM	827808 + 2 x GA 400 3m 12/100mm Flexible semi rigide alu non isolé MO + COF 400 Collier de serrage fil	
348	GNF G-0450	Gainé circulaire flexible semi rigide alu non isolé MO DN 450 y compris 2 colli	ml	25.08	0	1.4	VIM	827809 + 2 x GA 450 3m 12/100mm Flexible semi rigide alu non isolé MO + COF 450 Collier de serrage fil	
349	GNF G-0500	Gainé circulaire flexible semi rigide alu non isolé MO DN 500 y compris 2 colli	ml	30.09	0	1.5	VIM	827810 + 2 x GA 500 3m 12/100mm Flexible semi rigide alu non isolé MO + COF 500 Collier de serrage fil	
350	GNF I-0100	Conduit flexible en aluminium isolé MO/M1 y compris 2 colliers plats / ml -lr	ml	3.13	0	0.2	OUEST VENTIL	SONOFLEX 21 Gaine circulaire flexible isolée DN 100 - y/c 2 colliers	
351	GNF I-0125	Conduit flexible en aluminium isolé MO/M1 y compris 2 colliers plats / ml -lr	ml	3.28	0	0.2	OUEST VENTIL	SONOFLEX 21 Gaine circulaire flexible isolée DN 125 - y/c 2 colliers	
352	GNF I-0160	Conduit flexible en aluminium isolé MO/M1 y compris 2 colliers plats / ml -lr	ml	3.86	0	0.2	OUEST VENTIL	SONOFLEX 21 Gaine circulaire flexible isolée DN 160 - y/c 2 colliers	
353	GNF I-0200	Conduit flexible en aluminium isolé MO/M1 y compris 2 colliers plats / ml -lr	ml	4.39	0	0.2	OUEST VENTIL	SONOFLEX 21 Gaine circulaire flexible isolée DN 200 - y/c 2 colliers	
354	GNF I-0250	Conduit flexible en aluminium isolé MO/M1 y compris 2 colliers plats / ml -lr	ml	5.05	0	0.2	OUEST VENTIL	SONOFLEX 21 Gaine circulaire flexible isolée DN 250 - y/c 2 colliers	
355	GNF I-0315	Conduit flexible en aluminium isolé MO/M1 y compris 2 colliers plats / ml -lr	ml	6.07	0	0.2	OUEST VENTIL	SONOFLEX 21 Gaine circulaire flexible isolée DN 315 - y/c 2 colliers	

Figure 29: Extrait de la base de temps utilisée par le service chiffrage d'Equans

Nous avons vu jusqu'à présent que la feuille de métré ne contient ni les informations temporelles liées aux équipements, ni l'ensemble des propriétés d'un équipement permettant de

reconstituer une référence article ayant un temps de mise en œuvre unitaire dans la base de temps. L'absence de ces données rend la tâche de planification impossible à partir des feuilles de métrés uniquement. Nous allons maintenant examiner si les informations contenues dans le devis client peuvent répondre à ces besoins.

Les chiffreurs, sur la base des données recensées sur les feuilles de métré, produisent un devis en intégrant la liste des articles nécessaires dans les sections correspondantes de la trame DPGF fournie par le client via le logiciel Quick Devis¹. Les quantités d'articles sont ainsi groupées selon la structure du DPGF client. Dans le devis, nous pouvons trouver les références des articles avec leurs quantités et leurs temps de mise en œuvre unitaires. La Figure 30 donne un aperçu sur l'onglet « Nomenclature » du devis du projet CCI de Rennes. A titre d'exemple, les gaines flexibles utilisées dans ce projet sont en aluminium isolé ce qui correspond à l'article GNF I-∅ (∅ pour diamètre). La colonne MOU (voir Figure 30) représente le temps de main d'œuvre (ou mise en œuvre) unitaire en heure (h). Cependant, nous remarquons que les informations contextuelles des équipements (propriétés géographiques et systémiques), initialement présentes dans les feuilles de métrés, sont perdues au profit de la décomposition souhaitée par le client (DPGF). Ces deux caractéristiques s'avèrent également indispensables pour produire un planning spatio-temporel et par système.

OPTS	REFERENCE	LIBELLE	FABRICANT	UNITE	Qte Des	FQ/ST U (EUR)	FQ/ST Rem. (N)	FQ/ST Abart. (N)	FQ/ST U Brut (EUR)	FQ/ST U Net (EUR)	FQ/ST Total Brut (EUR)	FQ/ST Total Net (EUR)	MO U (h)	MO L (h)
	GNF I-0250	Conduit flexible en aluminium isolé MQ/M1 y compris 2 colliers plats / m - intérieur MQ / isolant M1 / extérieur M1 - 10 ml, compacté DN 250	LORFLEX	m	229	4,71			4,71	4,71	1 078,59	1 078,59	0,20	
	GNF I-0315	Conduit flexible en aluminium isolé MQ/M1 y compris 2 colliers plats / m - intérieur MQ / isolant M1 / extérieur M1 - 10 ml, compacté DN 250	LORFLEX	m		6,21			6,21	6,21			0,20	
	GNF I-0315	Conduit flexible en aluminium isolé MQ/M1 y compris 2 colliers plats / m - intérieur MQ / isolant M1 / extérieur M1 - 10 ml, compacté DN 115	LORFLEX	m		6,21			6,21	6,21			0,20	
	GNF I-0315	Conduit flexible en aluminium isolé MQ/M1 y compris 2 colliers plats / m - intérieur MQ / isolant M1 / extérieur M1 - 10 ml, compacté DN 115	LORFLEX	m	60	6,21			6,21	6,21	372,60	372,60	0,20	
					Total GAINES FLEXIBLE (GNF)	289					7 656,94	7 656,94		

ARTICLE	UNITE	QTE	FQ/ST	COÛT UNITAIRE	COÛT TOTAL
GNF I-0250	m	229	4,71	1 078,59	1 078,59
GNF I-0315 (1)	m		6,21		
GNF I-0315 (2)	m		6,21		
GNF I-0315 (3)	m	60	6,21	372,60	372,60
TOTAL		289			7 656,94

Figure 30: Aperçu sur l'onglet "Nomenclature" du devis du projet CCI de Rennes

Dans notre étude de cas, nous avons constaté que les informations nécessaires à la planification spatio-temporelle des travaux étaient fragmentées entre les feuilles de métrés et le devis client, deux environnements hétérogènes qui ne communiquent pas entre eux. Cette gestion inadéquate

¹ Outil utilisé par les équipes de chiffrage d'Equans pour la réalisation des devis en réponse à un appel d'offre client.

des informations entrave l'exploitation optimale de ces données opérationnelles [102]. En conséquence, il est impératif de contextualiser les articles chiffrés dans le devis pour pouvoir générer une planification automatique spatio-temporelle et qualitative à partir des données de chiffrage.

Nous recommandons donc de changer la perception de l'entreprise sur l'utilité de l'outil Quick devis, d'un simple outil de création des devis client vers un outil fournissant également les données nécessaires à la planification pour les clients internes qui sont les équipes d'exécution. En attendant une solution pérenne, nous devons recueillir les données manquantes pour remplir les conditions nécessaires à la planification automatique en utilisant les informations disponibles dans les feuilles de métrés complétées par les références d'articles manquantes.

b- Données issues de la maquette numérique BIM

La maquette numérique issue de la phase d'études d'exécution a été considérée comme la source de données la plus fiable pour la mise à jour du planning, en comparaison avec les données obtenues des bilans aérauliques et hydrauliques à partir d'Optimiz². En effet, ces derniers se limitent à la description des équipements de production d'énergie tels que la centrale de traitement d'air et les groupes froid, ainsi que et les terminaux tels que les bouches de soufflage ou d'aspiration et les ventilo-convecteurs, sans inclure les informations relatives aux longueurs des réseaux de distribution d'air et d'eau représentés par les gaines et les tuyauteries. En revanche, la maquette numérique BIM contient tous ces éléments cités, y compris les longueurs de gaines et de tuyauteries. Néanmoins, nous avons remarqué que le niveau de détail des maquettes produites ne permet pas de générer automatiquement un planning d'exécution car les informations relatives à la fabrication des pièces, à leurs assemblages et à leurs installations sur le chantier ne sont pas précisées sur les objets modélisés. Entre autres, le temps de mise en œuvre de chaque élément n'est pas inclus dans les propriétés des éléments modélisés, et il n'existe pas de référentiel indiquant les durées réelles d'installation sur chantier. Un exemple de gaine modélisée avec Revit pour le projet du CCI de Rennes est présenté dans la Figure 31 avec ses caractéristiques sous forme de propriétés à gauche (diamètre, débit...) et de type d'équipement à droite (code famille, code repère...)

² Outil utilisé aux bureaux d'études d'exécution d'Equans pour réaliser des bilans aérauliques et hydrauliques.

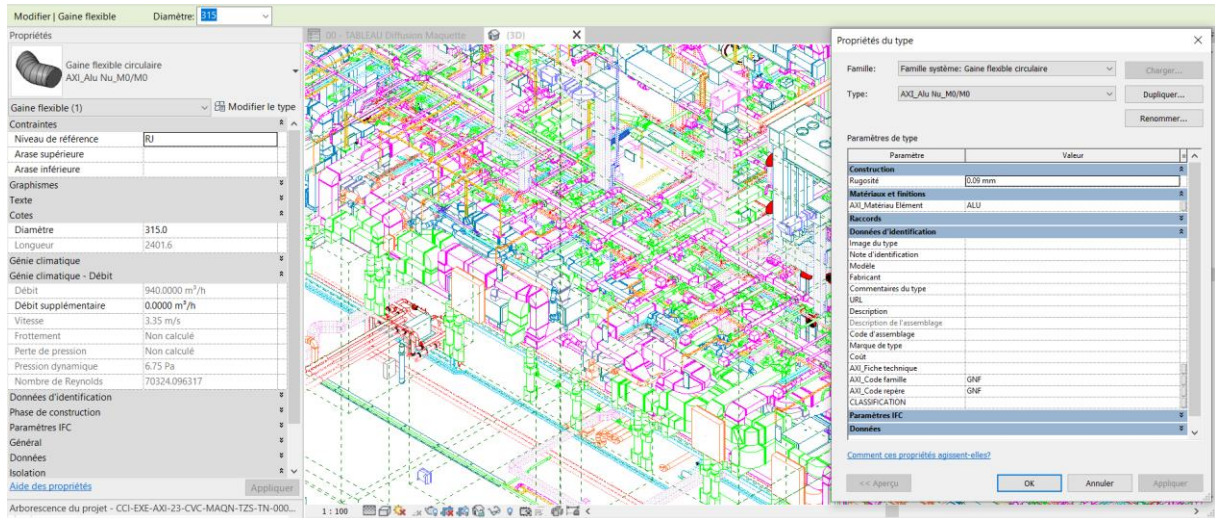


Figure 31: Capture de la maquette 3D du CCI de Rennes avec les propriétés d'une instance de la famille gaine flexible circulaire de type AXI_Alu_Nu_Mo/Mo

Dans le but d'améliorer la précision des modèles numériques avec les données temporelles, nous avons examiné la possibilité d'utiliser le référentiel de temps utilisé pour le chiffrage des projets. Cela nécessite de faire correspondre la codification des articles pendant la phase d'avant-vente avec celle utilisée pendant la phase d'études d'exécution.

Dans un premier temps, nous avons procédé à une analyse et une comparaison des méthodes de repérage des équipements utilisées dans chaque phase. Durant la phase avant-vente, le système de repérage correspond à la liste des codes présentée dans la section précédente. En revanche, durant la phase d'études d'exécution, les ingénieurs ont recours à deux types de repérages : le premier est spécifique au client et varie d'un projet à un autre, tandis que le deuxième est lié aux familles Revit utilisées en interne pour la modélisation. Ces familles génériques sont mises à disposition par ITD à l'ensemble des dessinateurs via une bibliothèque interne. La deuxième codification présentée dans la Figure 32 est susceptible d'être confrontée à celle utilisée lors du chiffrage.

Liste des valeurs possibles pour les paramètres AXI_Code famille et AXI_Code repère				
AXI_Code famille	Signification code famille	Code SAP	AXI_Code repère	Signification code repère
ACL	Armoire de climatisation	1CLM	ACL	Armoire de climatisation
ACS	Accessoires sanitaires	2ACS	ACS	Accessoires sanitaires
ACS	Accessoires sanitaires	2ACS	ART	Armoire de toilette
ACS	Accessoires sanitaires	2ACS	BLU	Bandeau lumineux
ACS	Accessoires sanitaires	2ACS	BDD	Barre de douche handicapé
ACS	Accessoires sanitaires	2ACS	BAR	Barre de relevage
ACS	Accessoires sanitaires	2ACS	BPS	Barre porte-serviettes
ACS	Accessoires sanitaires	2ACS	CSS	Convecteur sèche-serviettes
ACS	Accessoires sanitaires	2ACS	CJT	Couvre joint
ACS	Accessoires sanitaires	2ACS	DEH	Distributeur équipement hygiénique
ACS	Accessoires sanitaires	2ACS	DSP	Distributeur papier
ACS	Accessoires sanitaires	2ACS	DSL	Distributeur savon liquide
ACS	Accessoires sanitaires	2ACS	DSM	Distributeur serviette papier
ACS	Accessoires sanitaires	2ACS	MSE	Meuble sous évier
ACS	Accessoires sanitaires	2ACS	MIR	Miroir

Figure 32: Extrait du référentiel Equans de repérages des familles Revit

Dans un premier temps, nous avons analysé approximativement la correspondance entre les codes « groupe » utilisés en chiffrage et les codes « repères » utilisés sur la maquette. Il a été constaté que 320 codes « groupe » (soit 68%) correspondent aux même code « repère » dans le référentiel de repérage des maquettes. Les autres codes de groupes ont soit un équivalent codé de manière différente, soit aucun équivalent. Il est important de noter que certains codes groupes (environ 26 codes) représentent des prestations particulières telles que les frais d'assurance, les frais d'études, de synthèse, de transport et n'ont donc pas besoin d'un équivalent du côté de la maquette.

En un deuxième temps, nous avons essayé de reconstituer un code article existant dans la base de temps à partir des propriétés d'un objet modélisé dans la maquette numérique BIM.

A titre d'exemple, nous avons extrait les valeurs des propriétés de l'objet représenté dans la Figure 31 et les avons consignées dans le Tableau 5. Il s'agit d'une gaine flexible ayant un code repère GNF qui correspond au code groupe correspondant à ce type de matériel dans la base de chiffrage.

Tableau 5: Propriétés de l'instance de gaine flexible présentée dans la Figure 31

Propriété	Valeur
Diamètre	315 mm
Matériau	Aluminium
Rugosité	0.09 mm
Débit	940 m ³ /h
Pression dynamique	6.75 Pa
Vitesse	3.35 m/s

Il existe trois articles dans le référentiel de chiffrage qui peuvent correspondre à cet objet, à savoir : GNF 0315 (conduit flexible en aluminium 0.2 h/ml), GNF I-315 (conduit flexible en aluminium isolé 0.2 h/ml), ou GNF G-0315 (gaine circulaire flexible semi rigide non isolé 1h/ml). Etant donné que nous ne disposons pas d'informations suffisantes pour déterminer si cette gaine est isolée ou non, il nous est impossible de déterminer avec certitude l'article à retenir. Ainsi, nous sommes confrontés à la même problématique que celle rencontrée lors de notre tentative de reconstitution d'un code article à partir des données des feuilles de métrés.

Par conséquent, pour mettre à jour le planning à partir de la maquette numérique, il est nécessaire de caractériser la base de temps et de conserver ces caractéristiques initiales sur nos maquettes. La caractérisation de la base de temps implique que chaque article soit doté d'un ensemble de propriétés qui le caractérise, car le temps de mise en œuvre de cet équipement varie

en fonction de la combinaison de ces caractéristiques. Ces informations peuvent être stockées dans un référentiel technique d'équipements. Toutes les propriétés d'un modèle d'équipement doivent être présentes dans chaque instance de cet équipement modélisée dans la maquette numérique. De plus, les valeurs attribuées à ces propriétés doivent définir le temps de mise en œuvre correspondant à partir du référentiel technique. La mise en place de ce référentiel technique d'Equans a été initiée depuis 2016. Le référentiel technique est maintenu à jour et alimente aujourd'hui les applications du métier de sprinklage. Toutefois, l'exploitation de ce référentiel pour les métiers de CVCD (chauffage, ventilation, climatisation, désenfumage) et de plomberie a été laissé de côté en raison du nombre important d'équipements utilisés dans ces disciplines et de l'absence d'un projet concret à l'échelle de l'entreprise pour assurer la continuité des données produites en phase avant-vente et en phase d'études d'exécution. Dans le cadre du prototype de la solution de planification automatique que nous proposerons par la suite, nous avons associé une référence article commune par catégorie d'équipement, en fonction du code repère de l'équipement pour le gros matériel et les terminaux, puis en tenant compte du code repère et du diamètre pour les gaines et les canalisations. L'attribution de cette référence article a été réalisée en masse via un script Dynamo que nous présenterons dans la section 3.3.1.

3.2.3. Planification standard du savoir-faire métier

La génération automatique d'un planning de montage repose sur un troisième type de données indispensable : celui des gammes de mise en œuvre des équipements [61]. Elles représentent l'enchaînement des opérations nécessaires pour installer un équipement spécifique, et doivent être prévues dans le temps de pose estimé pour ce même équipement. Jusqu'à présent, cette connaissance métier était détenue par les responsables de projets sans avoir été formalisée à un niveau de détail suffisant pour permettre une planification automatique. Par conséquent, nous avons entrepris la rédaction et la standardisation de ces gammes de mise en œuvre. Cette démarche s'appuie sur des exemples de plannings fournis par les responsables de projets de l'entreprise Equans, ainsi que sur des réunions impliquant ces mêmes profils de collaborateurs Equans pour recueillir leurs savoir-faire métier.

Afin de capitaliser l'expérience et accéder à cette donnée importante, nous avons organisé 18 ateliers, chacun d'une durée approximative de deux heures, avec en moyenne deux responsables

de projets par atelier. Cinq ateliers ont été spécifiquement consacrés aux activités de plomberie. La plupart des participants ont été sollicités par le biais du réseau professionnel de l'encadrant de thèse, Lionel Chevalier, qui travaille pour l'entreprise Equans. Afin de renforcer notre travail, nous avons invité d'autres personnes à participer, sélectionnées au hasard à partir de la liste des employés d'Equans occupant un poste de responsable de projet. Au total, 18 personnes ont assisté aux ateliers sur les 77 personnes contactées qui nous ont permis de consolider notre travail.

Durant les sessions de travail organisées, nous avons d'abord construit, en collaboration avec les experts métiers, une logique de construction globale pour les métiers du CVCD et de PLB à la maille des super familles d'équipements (voir Figure 33).

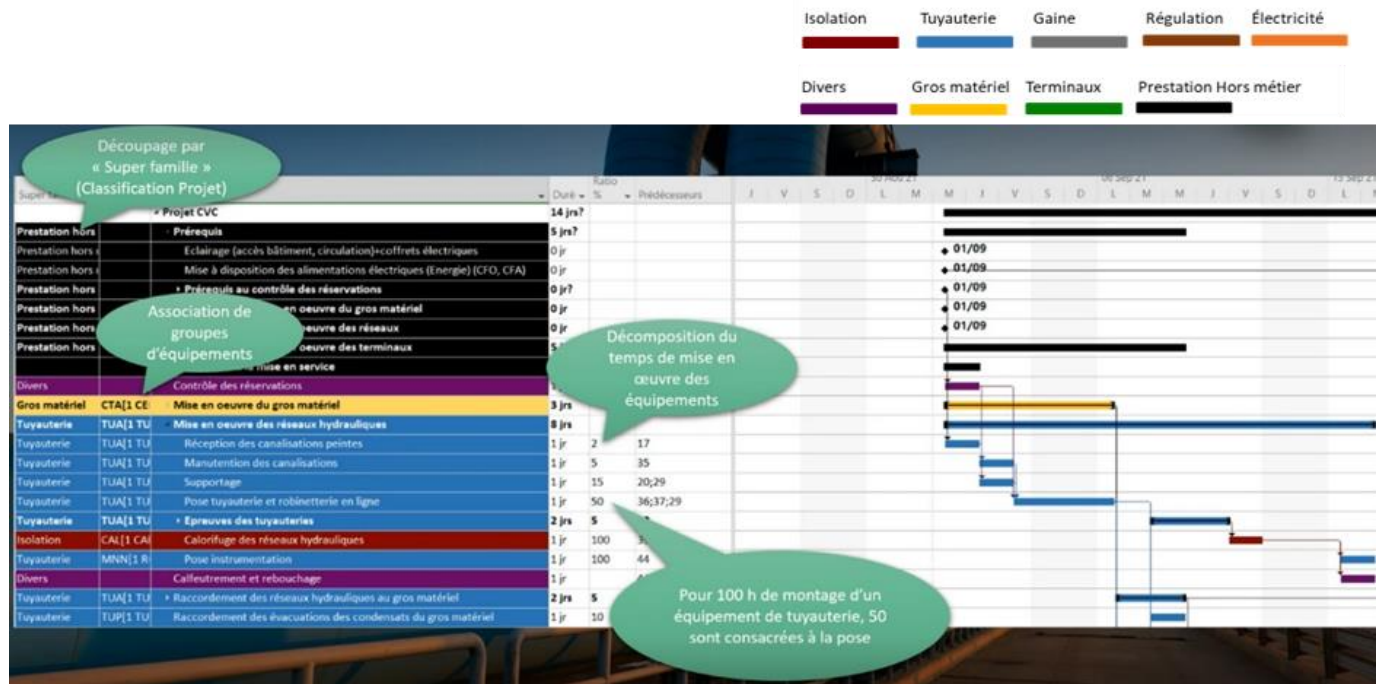


Figure 33: Extrait du visuel du séquençement standard établi et affiné avec les responsables de projets.

Ce séquençement a ensuite été affiné en détaillant, pour chaque groupe d'équipement, ses opérations de mise en œuvre avec des ratios associés permettant de décomposer le temps de mise en œuvre unitaire de l'équipement sur ses opérations respectives. Bien que cette tâche ait été longue et fastidieuse, nous avons réussi à traiter 453 des 480 groupes d'équipement existants. Les 27 groupes restant n'ont presque jamais été utilisés par les participants.

Pour illustrer nos propos, prenons l'exemple du tube acier noir distribution (groupe TAD) dont les étapes d'installation et les ratios associés à chaque étape ont été décrits dans le Tableau 6. Selon les données fournies, il est estimé que 3% du temps unitaire estimé de mise en place de cet

équipement est consacré à la réception des canalisations, tandis que 5% du temps unitaire est consacré à leur manutention. Par ailleurs, la manutention de ces réseaux nécessite la réception préalable de la commande de réseaux ainsi que la disponibilité des moyens de manutention. Pour simplifier la lecture, certaines opérations sont regroupées au sein de macro-opérations mères.

Il est crucial de comprendre que la standardisation des gammes de mise en œuvre et l'élaboration de modes opératoires sont des éléments fondamentaux pour toute entreprise qui adopte une approche Lean. En effet, en standardisant les processus de travail, une entreprise peut s'assurer que chaque employé exécute les tâches de manière uniforme et conforme aux meilleures pratiques de l'industrie. Cela permet également de réduire les variations dans les processus, de minimiser les erreurs et de maximiser la qualité.

Tableau 6 : Gamme de mise en œuvre du groupe TAD (tube acier noir distribution)

Macro-opérations	Opérations	Ratio temps (%)	Prédécesseurs		
			Macro-opérations	Opérations	
Mise en œuvre des réseaux hydrauliques	Réception des canalisations peintes, raccords et robinetterie	3	Prérequis à la mise en œuvre des réseaux	Locaux disponibles et hors d'eau	
				Traçage du trait de niveau 1m fini	
				Etanchéité des terrasses et des locaux	
				Retrait des étais	
				Ecart d'un niveau avec gros œuvre	
		Plateau sécurisé (trous, garde-corps...)			
	Manutention des canalisations, raccords et robinetterie	5	Mise en œuvre des réseaux hydrauliques	Réception des canalisations peintes, raccords et robinetterie	
				Disponibilité des moyens de manutention	
	Supportage	20	Prérequis à la mise en œuvre des réseaux	Retrait des étais	
				Contrôle des réservations non conformes	
Pose tuyauterie et robinetterie en ligne	65	Mise en œuvre des réseaux hydrauliques	Manutention des canalisations, raccords et robinetterie		
			Supportage		
Epreuve des tuyauteries	5	Mise en œuvre des réseaux hydrauliques	Pose tuyauterie et robinetterie en ligne		
Contrôle de bon montage des réseaux hydrauliques	1		Raccordement des réseaux hydraulique au gros matériel		
			Raccordement des réseaux hydraulique aux terminaux		
			Raccordement des évacuations de condensats des terminaux		
			Raccordement au conduit de gaz des terminaux		
Mise en eau définitive et contrôle de la qualité d'eau	1		Contrôle de bon montage des réseaux hydrauliques		

3.3. Proposition d'un outil de planification automatique de la phase de montage

Dans les sections précédentes, nous avons examiné les différentes fonctionnalités nécessaires que doit satisfaire notre outil de planification automatique, ainsi que les données d'entrées requises pour son fonctionnement. Dans cette partie, nous allons nous concentrer sur la conception et le développement de notre preuve de concept de l'outil de planification automatique. Nous avons opté pour une application Web à trois couches comprenant une base de données, une couche de traitement des données et une interface utilisateur. Le choix d'une application web présente plusieurs avantages, notamment l'accessibilité à partir de n'importe quel système d'exploitation et la possibilité de travailler simultanément dans le cloud. Par ailleurs, les travaux de recherches récentes optent de plus en plus pour ces solutions Web pour ces mêmes raisons [18] [97].

La Figure 34 présente l'architecture de l'outil de planification automatique [98] qui a été développé pour répondre aux objectifs énoncés dans la section 2.6 de notre thèse.

La première couche de notre application est la base de données. Cette dernière est utilisée pour stocker toutes les données essentielles à la planification, telles que définies dans la section 3.2. Ces données proviennent des feuilles de métrés, de la maquette numérique BIM, de la planification standard du savoir-faire métier et des contraintes temporelles de planification saisies par l'utilisateur via l'interface web.

La seconde couche est la couche de traitement des données. Cette couche est responsable de la transformation des données stockées dans la base de données pour générer une planification spatio-temporelle en fonction des demandes de l'utilisateur. Elle utilise des algorithmes avancés pour analyser et transformer les données d'entrée en une planification précise et fiable.

Enfin, la troisième couche est l'interface utilisateur. Cette dernière permet aux utilisateurs d'interagir avec l'outil de planification automatique en utilisant une interface facile à utiliser. L'interface doit être intuitive et permettre à l'utilisateur de saisir facilement les données d'entrée et de visualiser les résultats.

De manière générale, l'exploitation des données collectées en vue de produire un planning automatique constitue une manifestation d'une gestion optimisée (ou allégée) de l'information du bâtiment que nous traduisons par du Lean BIM "management". Dans la suite de cette section, nous

détaillerons la conception et le développement de chacune des couches constitutives de notre application.

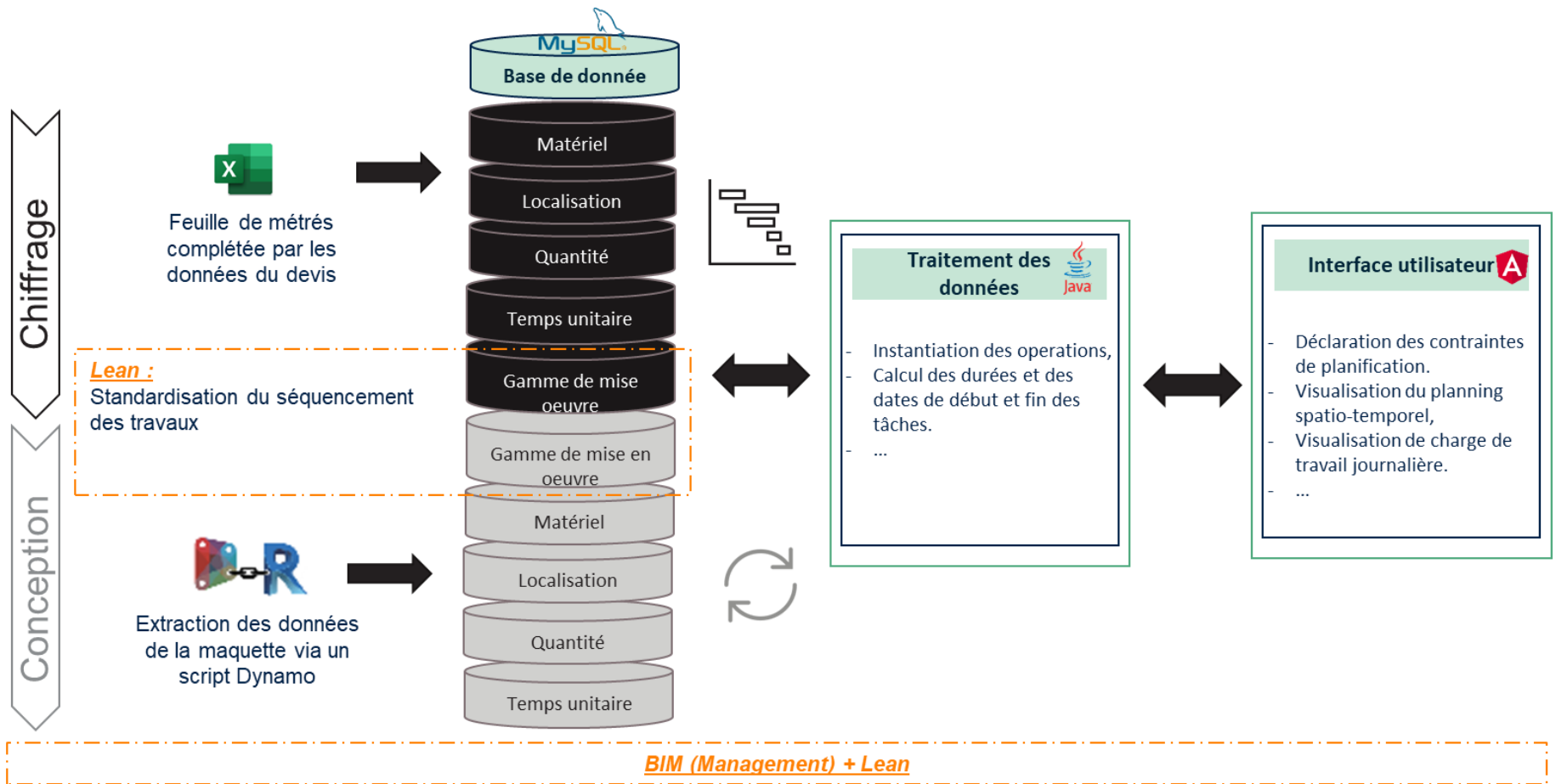


Figure 34: Architecture de la solution développée.

3.3.1. La base de données

a- Modélisation conceptuelle et physique des données

La couche d'accès aux données a été modélisée sous la forme d'une base de données relationnelle MYSQL. Le modèle conceptuel de données MCD de notre système présenté dans la Figure 35, est constitué de plusieurs entités (représentées par des blocs jaunes) reliées entre elles par des associations (représentées par des blocs bleus). Le MCD est une représentation schématique abstraite et de haut niveau qui permet de comprendre aisément les relations entre les différentes données d'un système d'information à concevoir. Chaque entité est la représentation d'un élément matériel ou immatériel ayant une fonction dans le système et possède une liste de propriétés ou d'attributs qui la caractérisent. De plus, chaque instance d'une entité possède une clé primaire (identifiant) qui lui est propre, qui est représenté dans notre MCD par l'attribut surligné commençant par « id ». En outre, une association ou relation représente les liens sémantiques qui peuvent exister entre plusieurs entités. La cardinalité d'une association permet de décrire le nombre minimum et maximum d'instances qui peuvent participer à la relation. Pour faciliter la compréhension au lecteur, ces entités et associations ont été regroupées en quatre catégories, chacune représentant une typologie de données distincte. Ces catégories sont identifiées par des rectangles en pointillées sur la Figure 35.

Les entités de notre système se résument comme suit :

- L'entité « t_level » représente l'ensemble des niveaux d'un ouvrage identifiés pendant la phase avant-vente. Etant donné que plusieurs équipements peuvent être installés dans un même niveau, la cardinalité entre l'entité t_level et l'entité t_article est de type 0-n. De ce fait, ces équipements peuvent faire partie de différents systèmes avec des quantités variables, ce qui explique l'ajout des attributs 'quantité' et 'système' au niveau de l'association « t_level_article ».
- L'entité « t_article » regroupe les références des articles telles que définies dans la base de temps de la phase avant-vente, avec leurs descriptions, leurs temps de pose unitaires, leurs unités et leurs prix unitaires. Par ailleurs, chaque article appartient à un seul et unique groupe selon la classification utilisée par le service de chiffrage de projet, d'où la cardinalité 1-1 de l'association « appartient à ».

- L'entité « t_group » contient la liste des groupes de la classification des équipements, avec les familles, les super familles correspondantes, ainsi que les spécialités. Un groupe peut contenir plusieurs articles d'où la cardinalité 0-n.
- L'entité « t_operation » représente la liste des opérations standards de mise en œuvre des équipements, avec leurs propriétés telles que le nom de l'opération, l'opération parent, le type d'opération et le jalon. Les deux derniers attributs sont utilisés uniquement pour les activités hors métier CVCD et plomberie. Selon la planification du savoir-faire métier (cf. section 3.2.3), un groupe d'équipement est associé à une ou plusieurs opérations avec des ratios différents permettant de composer le temps de mise en œuvre unitaire de l'équipement. De ce fait, la cardinalité de l'association entre les entités « t_group » et « t_operation » est de type 1-n. Dans le sens inverse, une opération standard peut être associée à des groupes multiples avec des ratios différents, d'où la cardinalité 0-n. Par ailleurs cette entité a une relation réflexive vers elle-même, avec une cardinalité de 0-n et 0-n, car chaque opération peut avoir une opération prérequis issue de cette même entité, et chaque opération peut être un prérequis pour plusieurs autres opérations.
- L'entité « t_level_model » correspond à la liste des niveaux tels qu'ils sont représentés dans la maquette numérique BIM. Chaque niveau présent dans la maquette peut avoir 0 à 1 niveau correspondant dans les données du projet en phase avant-vente. De plus, plusieurs équipements peuvent être modélisés dans un même niveau du modèle 3D, cela justifie la cardinalité 0-n entre cet entité et « t_element_model ».
- L'entité « t_element_model » contient la liste des objets présents dans la maquette numérique, avec leurs propriétés essentielles telles que le nom du bâtiment, le niveau, le système d'appartenance, la catégorie d'équipements, le code repère et la référence de l'article attribuées via le script Dynamo. Chaque instance³ ne peut être présente que dans un seul niveau (cardinalité 1-1 pour l'association « contient »). De plus, chaque objet de la maquette dispose d'une seule référence article (cardinalité 1-1 pour l'association « correspond à »).
- L'entité « working_days » désigne le nombre d'heures théorique de travail par jour.

³ Objet ou élément modélisé dans la maquette numérique.

A partir de ce modèle conceptuel, nous avons développé le modèle logique puis physique des données conformément aux règles de l'art [103]. Le modèle physique des données (MPD) est une représentation plus adaptée aux exigences des logiciels de bases de données, permettant ainsi de préparer son implémentation concrète. La Figure 36 illustre la structure finale de notre base de données composée de 10 tables.

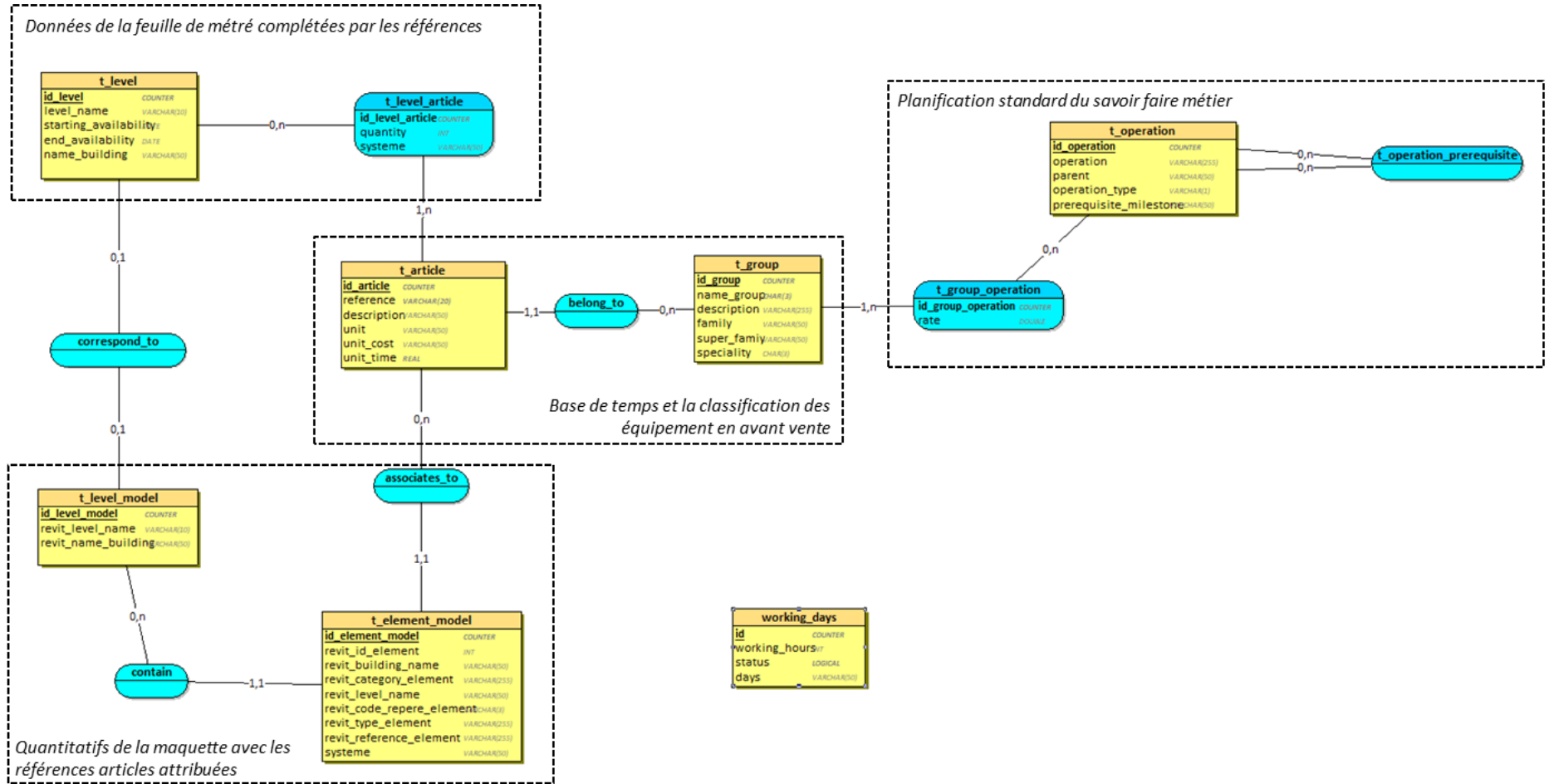


Figure 35: Modèle conceptuel de notre base de données.

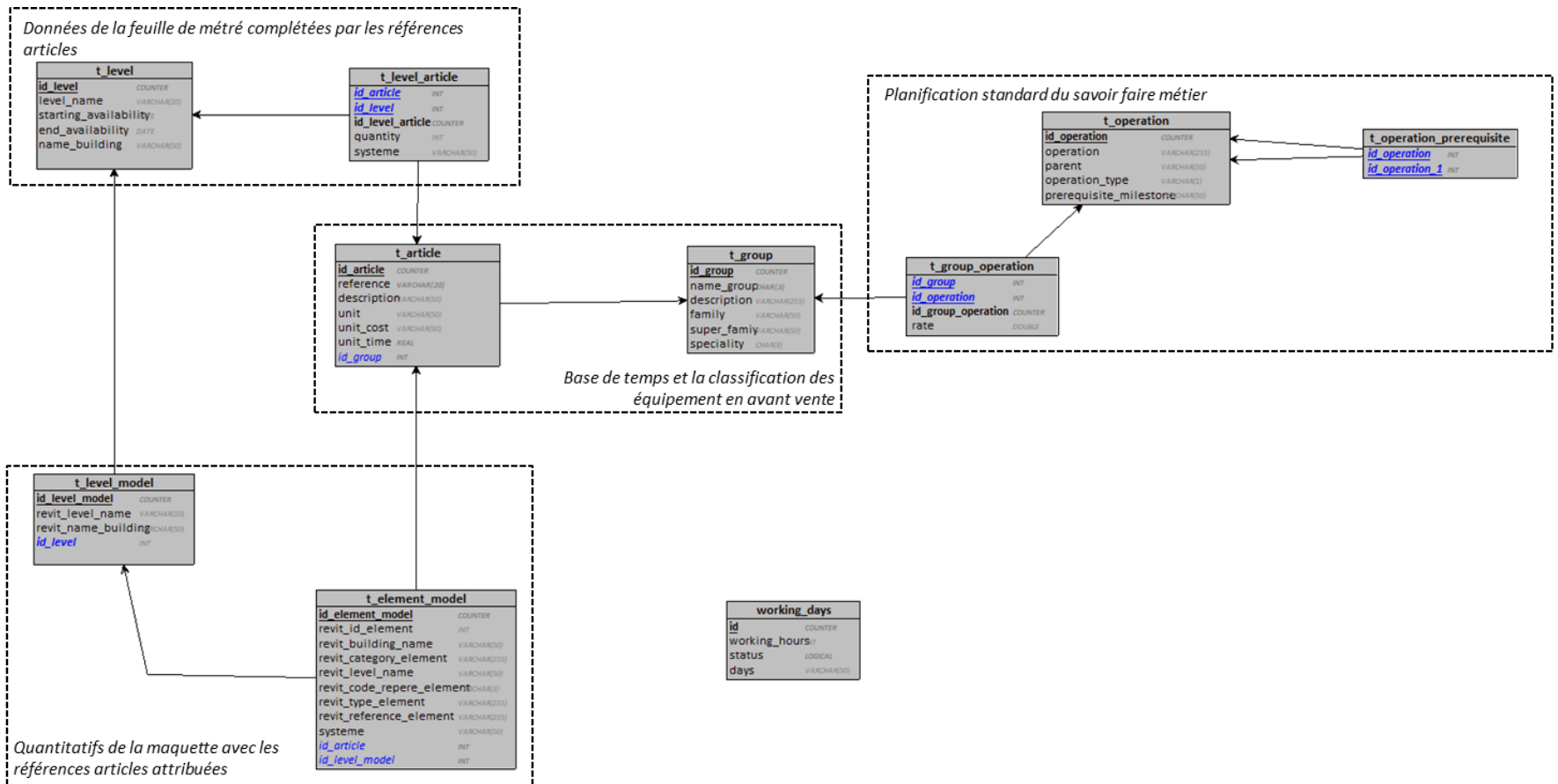


Figure 36: Modèle physique de notre base de données.

b- Modes de remplissage de la base de données par catégorie de données

Dans cette procédure, chaque catégorie de données est remplie de manière cohérente, ce qui facilite l'accès, la recherche et la mise à jour de l'information. Les différentes étapes suivies pour les renseigner sont les suivantes :

- Données de la feuille de métrés complétée par les références des articles : dans le cadre de notre développement, nous avons pris en charge la conversion manuelle des données brutes provenant de la feuille de métrés, en des tables organisées. Ces tables ont ensuite été converties en format feuille de calcul open document (.ods) pour permettre leurs importations dans les tables appropriées de notre base de données sous MySQL. Pour simplifier les tests, nous avons réduit l'échantillon de travail aux équipements composant les systèmes hydrauliques qui sont issus de la feuille de métrés hydraulique pour la planification automatique du projet CCI de Rennes.
- Base de temps et la classification des équipements en avant-vente : cette catégorie de données est invariable pour chaque projet. Elle a été traitée de la même manière que la catégorie mentionnée précédemment.
- Planification standard du savoir-faire métier : ces données ne varient pas d'un projet à un autre. Ainsi, leurs modes d'importation est identique à la catégorie précédente.
- Quantitatifs de la maquette avec les références d'articles attribuées : nous avons automatisé l'importation des quantitatifs et des paramètres des objets modélisés sur la maquette numérique réalisée sous Revit, en développant un script Dynamo dédié. L'algorithme contient 8 groupes de scripts que nous avons identifié par des codes couleurs sur la Figure 37. Parmi ces groupes, cinq ont été développés pour extraire les données relatives à cinq catégories d'équipements représentés dans la maquette Revit qui sont : les équipements de génie climatique (rose), les canalisations (bleu ciel), les accessoires de canalisation (bleu foncé), les gaines (violet clair) et les accessoires de gaine (violet foncé). En simultanément avec la génération de la liste des équipements, deux groupes de script distincts sont utilisés pour exporter le nom du bâtiment à partir du titre du fichier (gris) et pour recueillir une liste des niveaux représentatifs pour le projet en phase études d'exécution (vert). Nous avons remarqué une divergence dans la codification de ces niveaux entre les données provenant de l'avant-vente et celles issues des études d'exécution. Le dernier groupe de script (orange)

permet d'établir une connexion et de faciliter la communication avec notre base de données. L'implémentation de cette interopérabilité entre l'environnement Revit et notre base de données a nécessité l'utilisation d'une bibliothèque supplémentaire nommée 'Slingshot' en plus des nœuds de programmation propres à Revit. Par ailleurs, nous avons employé le langage de programmation Python pour personnaliser certaines opérations qui ne peuvent être exécutées par les nœuds disponibles dans l'interface Dynamo. Parmi celles-ci, l'attribution des références articles a été effectuée en utilisant un code Python (voir Figure 38). Finalement, le lancement du script est déclenché par l'utilisateur en appuyant sur le bouton 'start' du lecteur Dynamo (voir Figure 39), ce qui permet d'alimenter les tables correspondantes de la base de données.

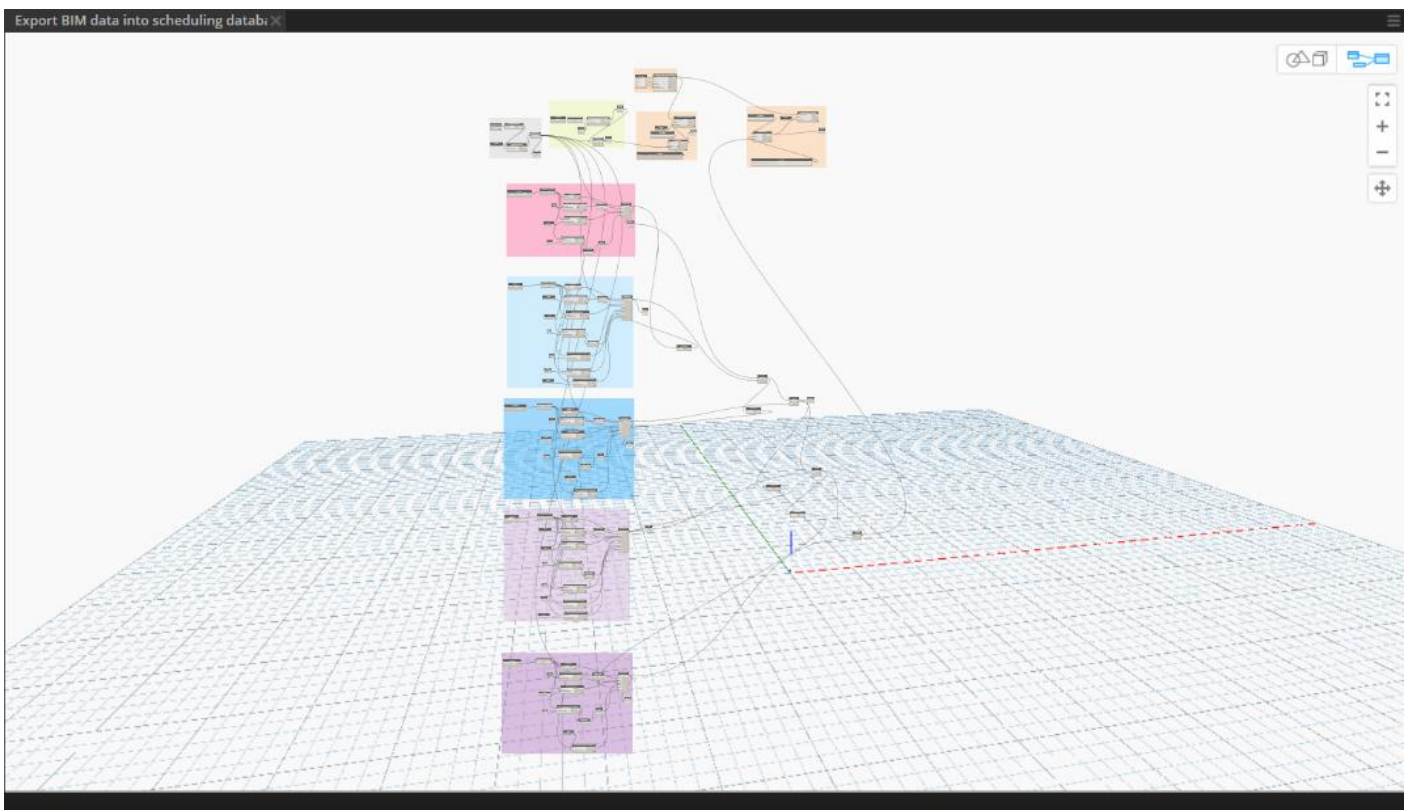


Figure 37: Aperçu des groupes de notre script Dynamo dédié à l'extraction automatique des quantitatifs de la maquette vers notre base de données.

```

Python Script
9 levels = IN[1]
10 ids = IN [0]
11 repere = IN [2]
12 building = IN[3]
13 types = IN [4]
14 len = IN[5]
15 taille = IN[6]
16 longueur = IN[7]
17 system = IN[8]
18 output = []
19 article =
{"ø100":1903,"ø125":1904,"ø160":1905,"ø200":1906,"ø250":1907,"ø315":1908,"
ø355":1909,"ø400":1910,"ø450":1911,"ø500":1912,"ø560":1913,"ø630":1914,"ø7
10":1915,"ø800":1916,"ø900":1917}
20 gcv = {"ø125":2030,"ø250":2036,"ø315":2038,"ø200":2034}
21 gcx =
{"ø100":2121,"ø125":2122,"ø250":2125,"ø350":2127,"ø400":2128,"ø315":2126,"
ø200":2124,"ø300":2126}
22 autres= {"GRG":4548,"GRX":2481}
23 j=0
24 # Placer votre code au-dessous de cette ligne
25 for i in ids:
26     if repere[j]=="GCG" :
27         output.append([len,building,i,levels[j],repere[j],"Gaine", types
[j],article[taille[j]],taille[j],system[j],longueur[j]])
28         len=len+1
29         j=j+1
▶ Exécuter      Enregistrer les modifications      Rétablir
    
```

Figure 38: Extrait du code python utilisé dans un nœud du script dédié à l'extraction des données des longueurs de gaines.

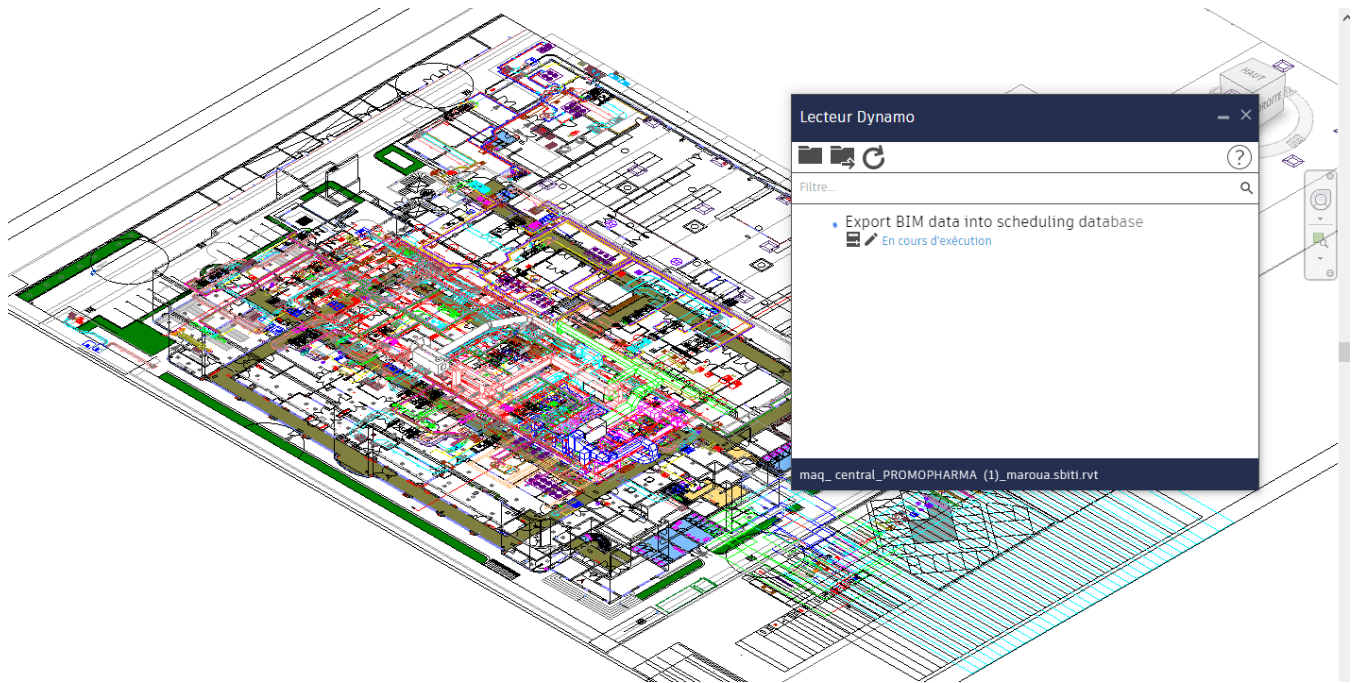


Figure 39: Lecteur Dynamo permettant de lancer le script développé

Les données contenues dans chacune des tables de notre base de données sont exposées en annexes 1 à 10.

3.3.2. Traitement des données

Cette couche représente la partie centrale et « intelligente » de notre système de planification automatique. Il s'agit du serveur backend qui assure la transformation des données initiales de la base de données en données finales correspondant aux tâches du planning de montage d'un projet. Ce serveur communique avec la couche d'accès aux données et l'interface utilisateur. Il a été développé en utilisant le langage de programmation Java. La Figure 40 représente les principales étapes de traitement des données ainsi que les interactions avec les deux autres couches de notre application. Ces étapes comprennent notamment l'instanciation des tâches par bâtiment, par niveau, par type de système et par super famille, ainsi que le calcul des durées, des dates de début et de fin prévisionnelles des tâches à partir des données provenant de la phase avant-vente (AV) et celles des études d'exécution (EE). Les dates d'exécution des tâches calculées prennent bien évidemment en compte les temps de travail théoriques par jour de la semaine, ainsi que les contraintes liées à la disponibilité des niveaux et à la fin d'exécution des travaux prérequis des autres corps de métiers. Une fois toutes les données de planification prêtes, le serveur backend calcule la charge de travail journalière et les ressources à prévoir tout au long de l'exécution du projet.

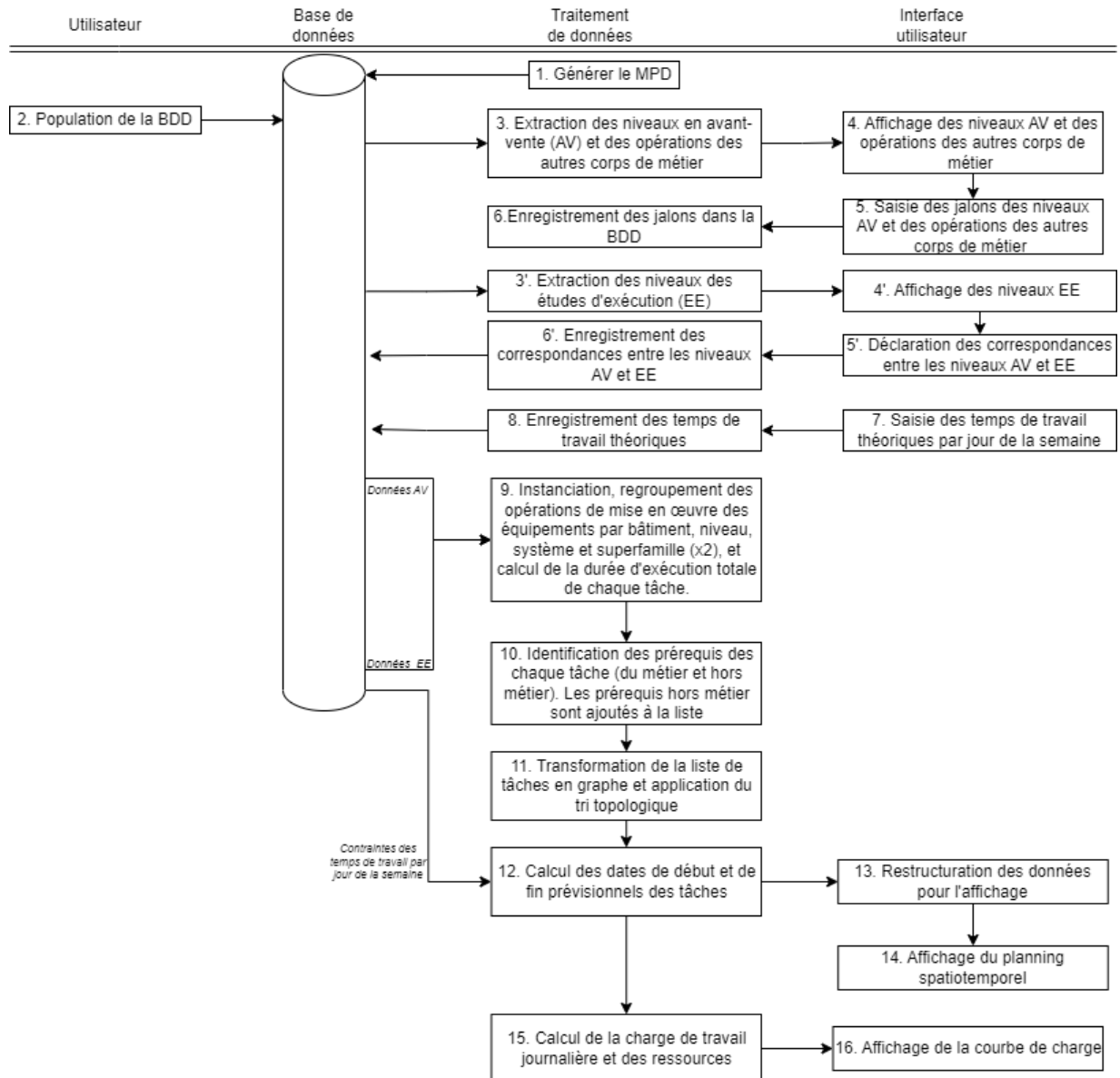


Figure 40: Processus de traitement des données et ses interactions avec la base de données et l'interface utilisateur.

La planification des séquences d'opérations de montage de notre projet a requis une étape préliminaire de tri des tâches, de manière à ce que chaque tâche soit ordonnancée après son prédécesseur et avant son successeur dans la liste des opérations. Initialement, nous avons effectué un tri par permutation qui n'a pas donné les résultats escomptés.

Suite à une revue de littérature, nous avons identifié que la théorie des graphes, notamment l'algorithme de tri topologique, peut s'avérer utile pour la modélisation et la résolution de ces problèmes de planification [104]. Pour appliquer cet algorithme, il est nécessaire de parcourir l'ensemble des sommets et des arcs/arêtes d'un graphe. Deux principales stratégies

d'exploration peuvent être utilisées : le parcours en largeur (Breadth-First Search BFS) et le parcours en profondeur (Depth-First Search DFS). Le descriptif de ces méthodes est présenté dans l'annexe 11.

Après avoir examiné les avantages et les inconvénients de ces deux techniques d'exploration, nous avons opté pour le parcours en profondeur DFS pour effectuer le tri topologique. En effet, cette technique d'exploration est moins coûteuse en calcul et la documentation sur la mise en œuvre de cet algorithme est abondante [105]. Par ailleurs, pour appliquer l'algorithme DFS, il était nécessaire de transformer nos données en un format de graphe. Il existe deux méthodes courantes pour représenter un graphe informatiquement (voir Figure 41), à savoir par une matrice d'adjacence ou par un ensemble de listes d'adjacences [106]. Nous avons choisi d'utiliser la deuxième méthode, les listes d'adjacence, pour simplifier la transformation des données.

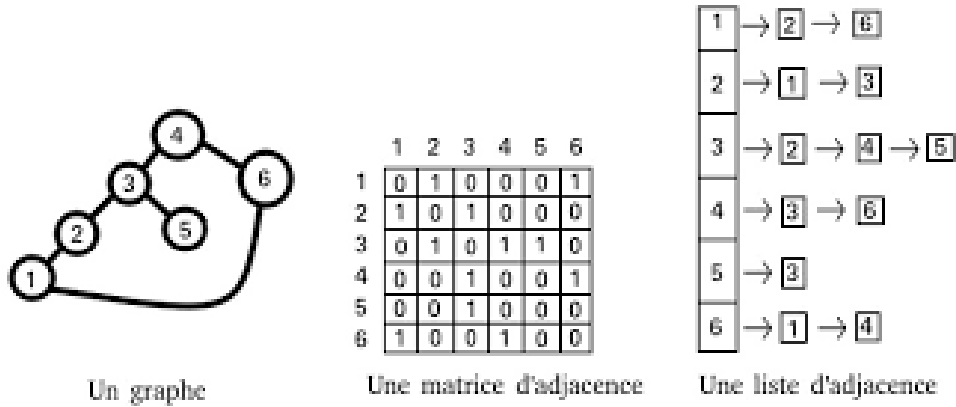


Figure 41: Les deux représentations d'un graphe en machine (matrice d'adjacence et listes d'adjacence)

Le modèle mathématique explicité ci-dessous résume les calculs réalisés à travers les algorithmes développés en six équations.

$$D_{ij}(x) = \sum_{z_{ij}} D_x(z_{ij}) \tag{1}$$

Avec
$$D_x(z_{ij}) = t(z) \times \tau_x(z) \times q(z_{ij}) \tag{2}$$

$$D_s(x) = \begin{cases} \max_{p_x \in P_x} D_f(p_x) & , \text{ si } P_x \neq \emptyset \text{ and } \max_{p_x \in P_x} D_f(p_x) > T_s(j_x) \\ T_s(j_x) & , \text{ sinon} \end{cases} \tag{3}$$

$$D_f(x) = \begin{cases} D_s(x) + y \text{ tel que } D_{ij}(x) - d_{D_s+y} - d_{D_s+y-1} - \dots - d_{D_s+1} - d_{D_s} = 0, \text{ si } D_{s+y}(x) < T_f(j_x) \\ T_f(j_x) & , \text{ sinon} \end{cases} \tag{4}$$

$$W(w) = \sum_{\{x \mid D_s(x) < w < D_f(x)\}} \frac{D_{ij}(x)}{D_f(x) - D_s(x)} \quad (5)$$

$$r(w) = \frac{W(w)}{d_w} \quad (6)$$

Avec :

$D_{ij}(x)$: Durée utile totale pour effectuer une tâche x au bâtiment i et au niveau j .

$D_x(z_{ij})$: Durée utile pour effectuer l'opération x pour le matériel z localisé dans le bâtiment i et au niveau j .

$t(z)$: Temps d'installation unitaire du matériel z .

$\tau_x(z)$: Taux associé à un opération x dédiée à la mise en œuvre du matériel z .

$q(z_{ij})$: Quantité du matériel z à installer dans le bâtiment i et au niveau j .

$D_s(x)$: Date de début prévisionnelle de l'opération x .

P_x : Ensemble des prérequis de l'opération x .

$T_s(j_x)$: Date de début de disponibilité du niveau j où s'effectuera l'opération x .

$D_f(x)$: Date de fin prévisionnelle de l'opération x .

y : Nombre de jours travaillés et suffisants pour réaliser la tâche x .

d_w : Nombre d'heures d'ouverture du jour w .

$T_f(j_x)$: Date de fin de disponibilité du niveau j où s'effectuera l'opération x .

$W(w)$: Charge de travail du jour w en heures.

$r(w)$: Nombre d'ouvriers nécessaires pour le jour w .

En utilisant ce modèle mathématique simple, nous sommes en mesure de produire de manière automatique les données qui composent le planning spatio-temporel affiché dans l'interface Web que nous exposons dans la suite.

3.3.3. Interface utilisateur

La couche de présentation que nous avons mise en place permet à l'utilisateur d'interagir avec notre application. Cette interface a été développée en utilisant le framework Angular. Elle comporte un onglet dédié aux "Contraintes de planification" où l'utilisateur est invité à saisir les informations suivantes :

- Les dates de début et de fin de disponibilité des niveaux (voir Figure 42).
- Les jalons de réalisation des opérations prérequis hors métier ayant un impact sur les activités menées par Equans (voir Figure 43).
- Les jours de la semaine travaillés et les heures d'ouverture (voir Figure 44).

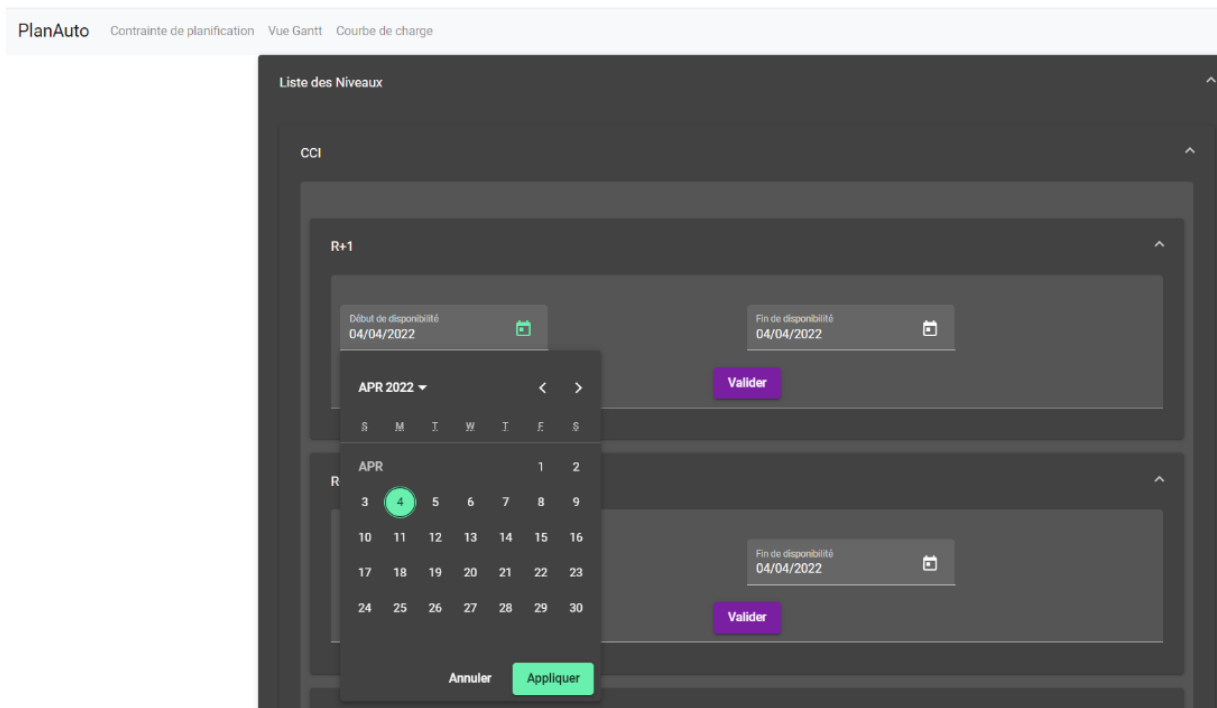


Figure 42: Saisie des contraintes de disponibilité des niveaux déclarés en phase avant-vente

Prérequis	Date de fin de prérequis
Eclairage (accès bâtiment, circulation)+coffrets électriques	04/04/2022
Mise à disposition des alimentations	04/04/2022
Traçage des trémies	04/04/2022
Traçage du trait de niveau 1m fini	04/04/2022
Traçage des cloisons	04/04/2022
Exécution des réservations	04/04/2022
Locaux techniques disponibles et hors d'eau	04/04/2022

Figure 43: Saisie des jalons de réalisation des prérequis hors métier

Jour	Nombre d'heures travaillées par jour	Action
<input checked="" type="checkbox"/> Lundi	16	Envoyer
<input checked="" type="checkbox"/> Mardi	16	Envoyer
<input checked="" type="checkbox"/> Mercredi	16	Envoyer
<input checked="" type="checkbox"/> Jeudi	8	Envoyer
<input checked="" type="checkbox"/> Vendredi	8	Envoyer
<input type="checkbox"/> Samedi	0	Envoyer
<input type="checkbox"/> Dimanche	0	Envoyer

Figure 44: Déclaration des jours de la semaine travaillés (coché) et des heures d'ouverture

Malheureusement, nous n'avons pas été en mesure de traiter la saisie des dates de disponibilité à l'échelle de la zone car les informations relatives aux zones du bâtiment ne sont pas systématiquement renseignées dans les feuilles de métrés ou les maquettes numériques.

Pour mettre à jour le planning, l'utilisateur doit absolument préciser au préalable la correspondance entre la désignation des niveaux en AV et celle en EE via l'onglet « Mise à jour planning » (voir

Figure 45). Cette étape est nécessaire en raison de l'écart existant dans la codification de ces niveaux entre les données provenant de l'avant-vente et celle issue des études d'exécution, comme nous l'avons précisé dans la section 3.3.1.

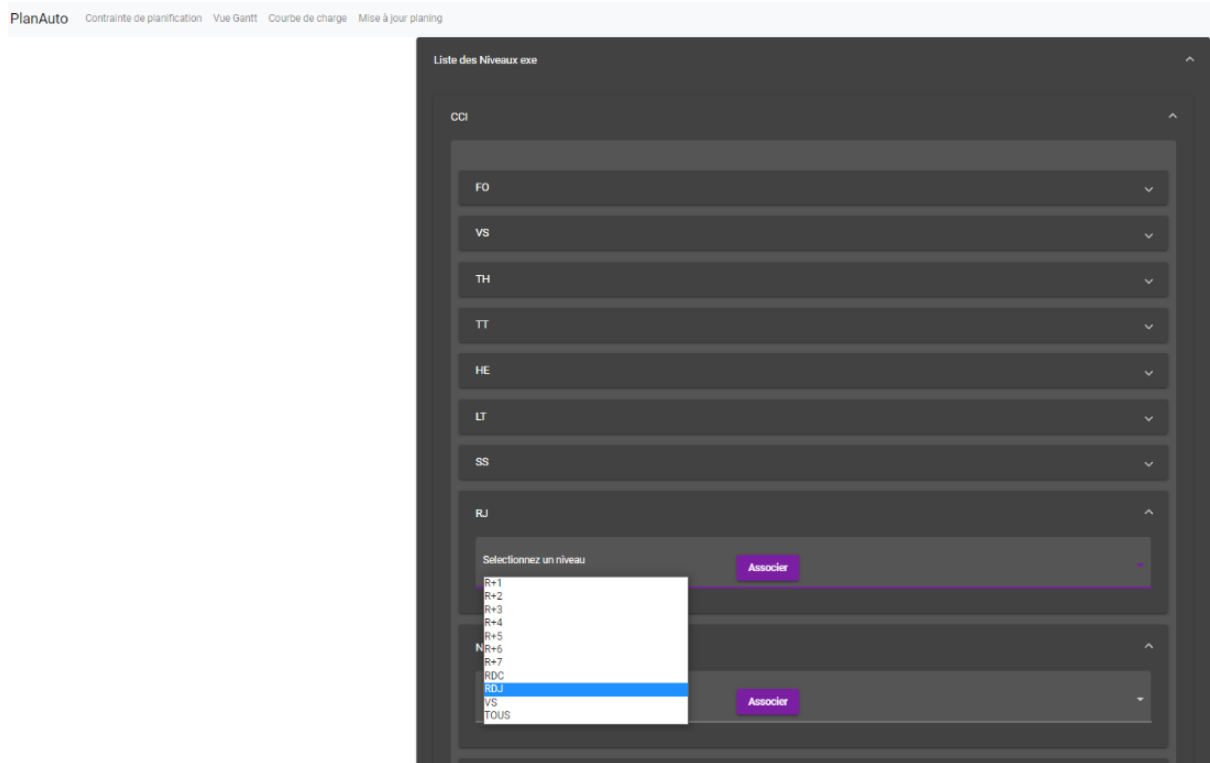


Figure 45: Déclaration des correspondances entre la désignation des niveaux en phase AV et EE

A partir de ces contraintes, des données de chiffrage et de la maquette numérique présents dans notre base de données, la couche de traitement opère les transformations nécessaires pour générer et mettre à jour le planning de montage. Le planning résultant est présenté sous forme d'un diagramme de GANTT affiché dans la page « Vue Gantt » et se rapproche du planning spatio temporel créé lors du rituel de planification collaborative de la méthode LPS[®]. Le diagramme GANTT montre les tâches à effectuer selon plusieurs niveaux hiérarchique (bâtiment → niveau → type de système → opération parent → opération), et nous avons utilisé le composant Angular « GANTT chart » mis à disposition par la société Syncfusion pour le créer. Cependant, contrairement à un affichage LPS[®], les tâches de notre planning ne sont pas représentées dans la partie centrale du visuel sous forme de chemin de fer en vue de conserver le niveau de détail de planification issue de la planification standard du savoir faire métier. Un affichage sous forme de chemin de fer nous obligera à planifier avec un niveau de détail plus faible pour éviter l'intercalage des tâches d'un même niveau voire d'une même zone sur une même période de temps. De plus, ce

type de visuel en chemin de fer nécessite l'usage d'un composant informatique spécifique, inexistant à ce jour, ou le développement de ce composant à partir de zéro.

La Figure 46 montre une vue macro du planning généré pour les différents niveaux du bâtiment. Pour une vue détaillée, il suffit d'ouvrir les onglets correspondants comme illustré dans la Figure 47. Les colonnes "Début PRJ", "Fin PRJ" et "Durée utile PRJ" affichent respectivement les dates de début et de fin ainsi que les durées calculées à partir des données de chiffrage. Ces informations sont également représentées visuellement dans la vue GANTT par des barres vertes. De plus, les calculs effectués à partir du modèle 3D sont présentés dans les colonnes « Durée EXE », « Début EXE » et « Fin EXE ». Dans la vue GANTT, ces informations sont traduites par des barres orange. Le planning peut être affiché par année, semestre, trimestre, mois ou jour selon les préférences de l'utilisateur. Dans les exemples illustrés dans la Figure 46 et la Figure 47, nous avons choisi de présenter les résultats par trimestre et par mois.

L'utilisateur peut accéder aux informations détaillées des tâches en effectuant un double clic sur celles-ci. Une palette s'ouvre alors, composée de quatre onglets :

- Onglet « Général » : contient les informations sur les dates de début, de fin et la durée de la tâche (voir Figure 48.a).
- Onglet « Dépendances » : explicite l'ensemble des prédécesseurs de la tâche sélectionnée (voir Figure 48.b).
- Onglet « Ressources » : énumère les équipements liés à cette tâche, définis lors de la phase avant-vente, avec leur quantités (voir Figure 48.c). Ces équipements sont ceux cochés dans la liste.
- Onglet « Notes » : liste les équipements concernés par cette tâche, définis lors de la phase d'études d'exécution avec leur quantités et propriétés extraites de la maquette numérique (voir Figure 48.d).

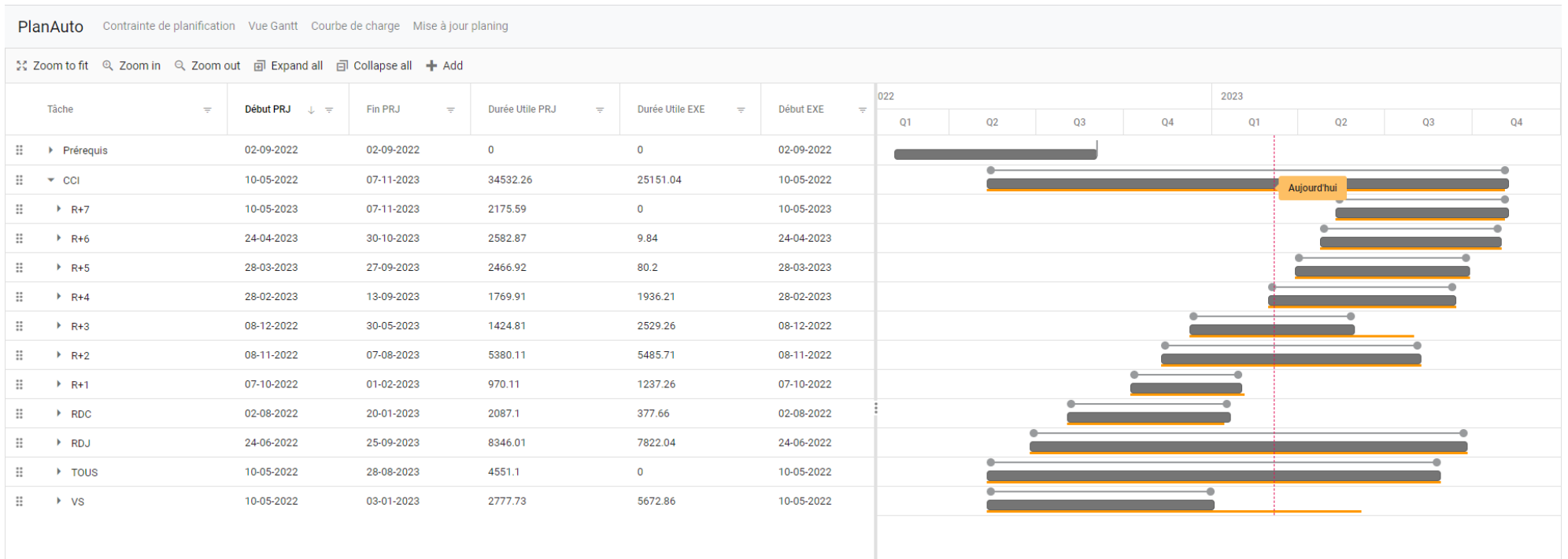


Figure 46: Vue macro du planning généré.

Chapitre 3 : Conception et développement d'un outil de planification automatique

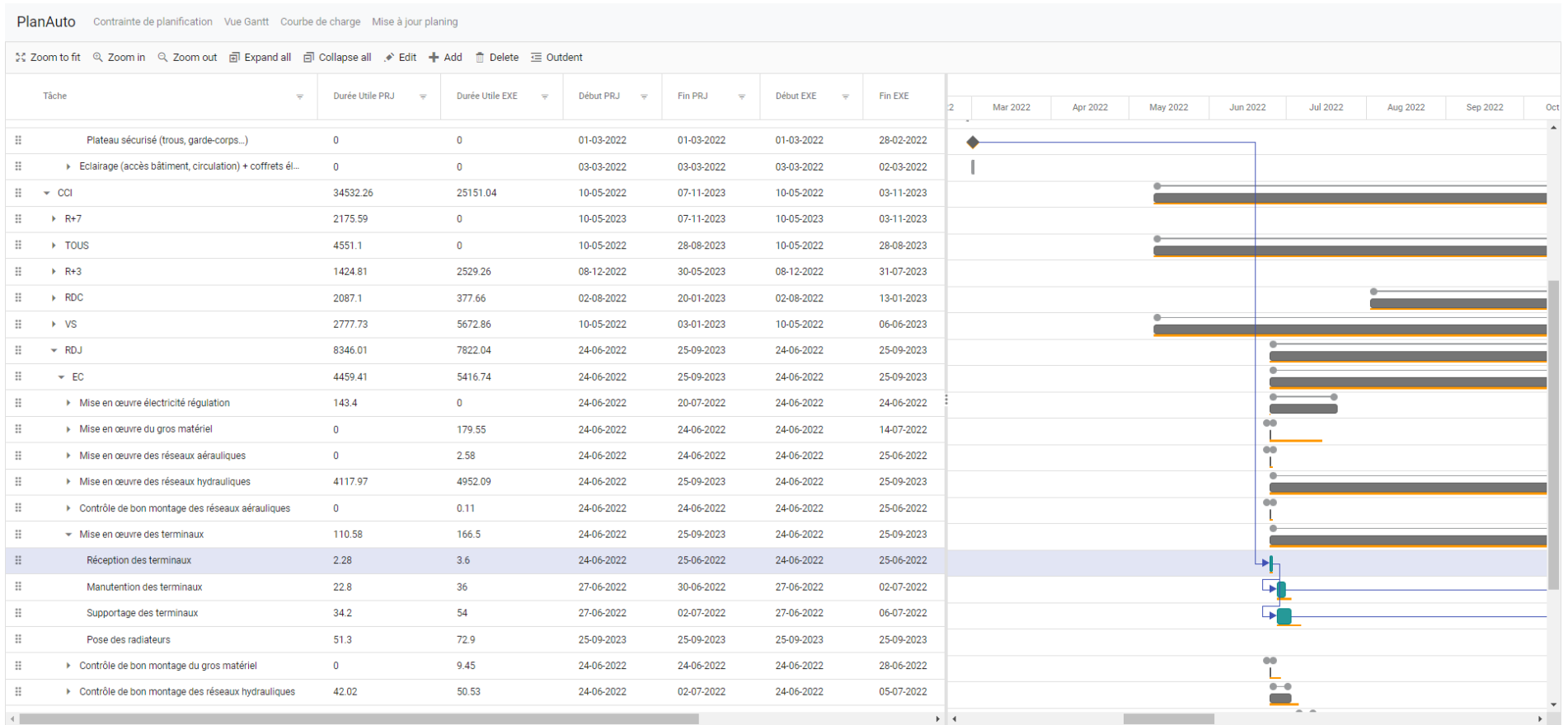


Figure 47: Vue détaillée des opérations de mises en œuvre des terminaux du système d'eau chaude EC au niveau RDJ, et ses prérequis.

Task Information [X]

GENERAL DEPENDENCY RESOURCES NOTES

Tâche: Réception des terminaux

Début PRJ: 24-06-2022

Fin PRJ: 25-06-2022

Début EXE: 24-06-2022

Fin EXE: 25-06-2022

ID: 181.00

SAVE CANCEL

(a)

Task Information [X]

GENERAL DEPENDENCY RESOURCES NOTES

+ Add [Delete]

ID	Name	Type	Offset
87	87-Locaux disponibles et hors d'eau	Finish-Start	0 hours
11	11-Etanchéité des terrasses et des ...	Finish-Start	0 hours
90	90-Retrait des étais	Finish-Start	0 hours
275	275-Plateau sécurisé (trous, garde-...	Finish-Start	0 hours

SAVE CANCEL

(b)

Task Information [X]

GENERAL DEPENDENCY RESOURCES NOTES

ID	Name	Unit	Group
<input type="checkbox"/>	4553 PMS	4 x 0h/u	GROS MATERIEL
<input type="checkbox"/>	4206 PRY	17 x 1h/u	TERMINAUX
<input checked="" type="checkbox"/>	4214 RAD	38 x 3h/u	TERMINAUX
<input type="checkbox"/>	547 RBS 040	300 x 0.6h/u	TUYAUTERIE
<input type="checkbox"/>	4216 RBT 015	38 x 0h/u	TUYAUTERIE

SAVE CANCEL

(c)

Task Information [X]

GENERAL DEPENDENCY RESOURCES NOTES

B I U [Text] Segoe UI 10 pt [Color] [Font Size] [Align] [List] [Dropdown]

* Groupe: RAD -- Système: -- Type:RAD2.2 - Type 20 - 800x600h -- Quantité: 4.00 u x3h/u
 * Groupe: RAD -- Système: -- Type:RAD2.3 - Type 20 - 1000x750h -- Quantité: 8.00 u x3h/u
 * Groupe: RAD -- Système: -- Type:RAD2.4 - Type 20 - 1000x900h -- Quantité: 9.00 u x3h/u
 * Groupe: VNC -- Système: -- Type:CVC_VNC_2T-Carosse_Mural -- Quantité: 9.00 u x2h/u
 * Groupe: RAD -- Système: -- Type:RAD2.6 - Type 20 - 1400x900h -- Quantité: 28.00 u x3h/u
 * Groupe: RAD -- Système: -- Type:RAD2.5 - Type 20 - 1000x900h -- Quantité: 5.00 u x3h/u

SAVE CANCEL

(d)

Figure 48: Informations détaillées d'une opération. (a) Onglet des informations générales. (b) Onglet des prédécesseurs. (c) Onglet « Ressources » affiche les équipements issus du chiffreage associés à cette tâche (les éléments cochés). (d) Onglet « Notes » liste les équipements issus de la maquette numérique associés à cette tâche.

Enfin, l'outil développé permet de calculer automatiquement la charge de travail quotidienne du projet afin de fournir une estimation des ressources humaines nécessaires par jour. Ce calcul s'effectue en cumulant les heures de travail prévisionnelles par jour des tâches actives issues de la planification automatique. Ces informations sont représentées par des courbes de charges. La courbe rose indiquant le nombre d'heures à effectuer et la courbe bleue indiquant le nombre d'ouvriers requis (voir Figure 50), disponibles dans la page « Courbe de charge » de notre application (voir Figure 49). A travers une extraction des données de la courbe de charge représentées sur la voir Figure 49 via l'outil Postman, nous observons que ce projet requiert 8 personnes en moyenne par jour. En comparant cette dernière valeur avec la moyenne de ressources nécessaires (égale à 8.53 ouvriers) calculée en utilisant les données d'entrées initiales de l'affaire (volume d'heures total pour monter l'ensemble des équipements chiffrés 38238 h en 112 semaines sachant que la durée d'ouverture du chantier est de 40h par semaine), nous observons une cohérence avec les résultats obtenues grâce à notre application.

Cependant, la charge de travail journalière obtenue via notre application de planification automatique n'est pas lissée, ce qui entraîne une variabilité dans l'usage des ressources humaines. Dans la section suivante, nous aborderons les travaux menés dans le cadre de notre tentative de lisser les ressources à travers une planification optimisée utilisant des techniques du domaine de la recherche opérationnelle.

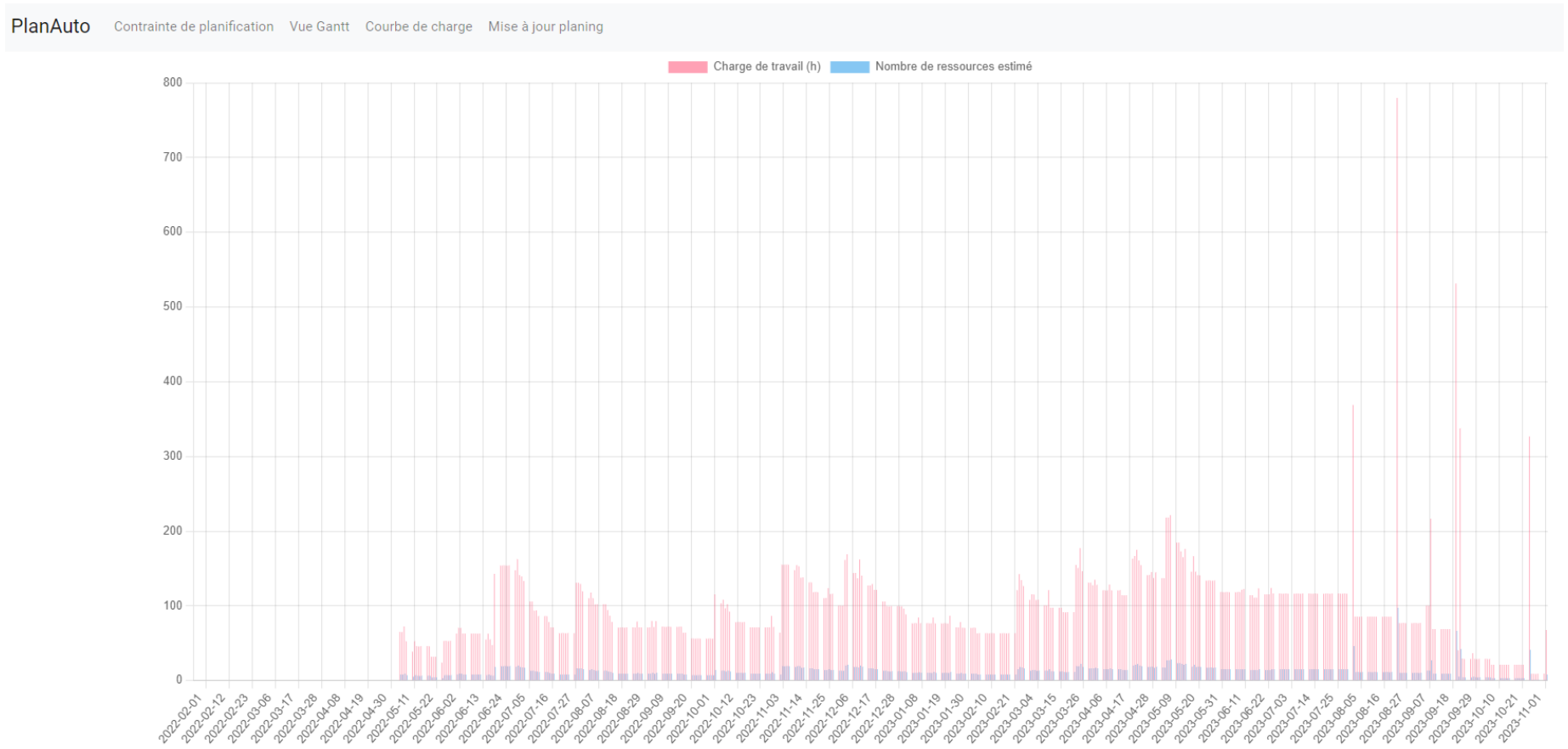


Figure 49: Estimation de la charge de travail et des ressources requis.

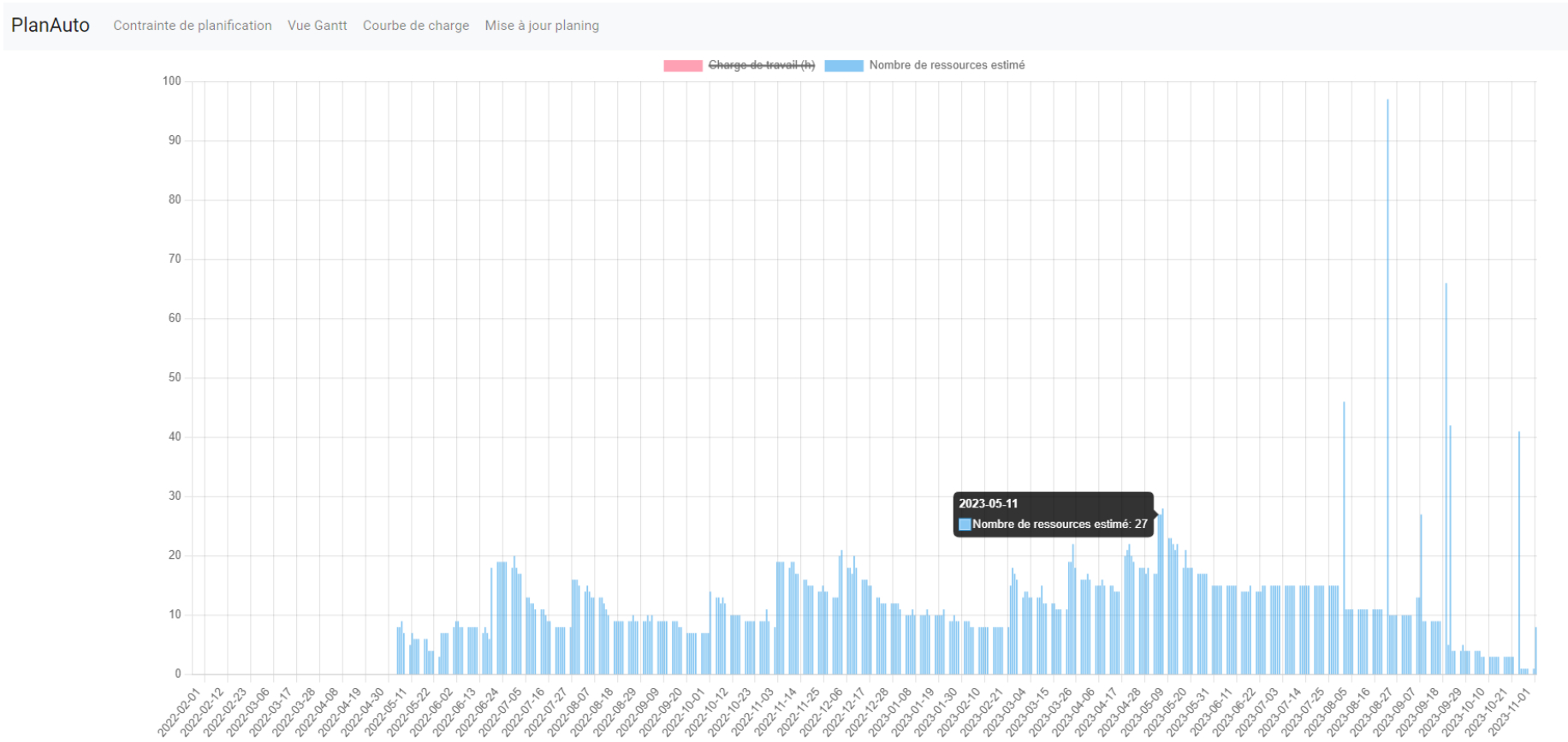


Figure 50: Estimation du nombre d'ouvriers requis.

3.4. Planification avec un lissage des ressources humaines

Nous avons cherché à ce stade à planifier dans le temps les tâches d'un projet, toujours pour le lot du génie climatique, de manière à lisser le nombre de ressources requis par jour sur la durée d'exécution [107]. Il s'agit de résoudre un problème d'optimisation en utilisant des techniques du domaine de la recherche opérationnelle qui est une branche de mathématique appliquée orientée vers la recherche des meilleures décisions. Cette branche suit une méthode de résolution des problèmes bien définie que nous décrivons dans la Figure 51. Nous avons suivi ces étapes pour résoudre le problème de lissage des ressources dans la planification.

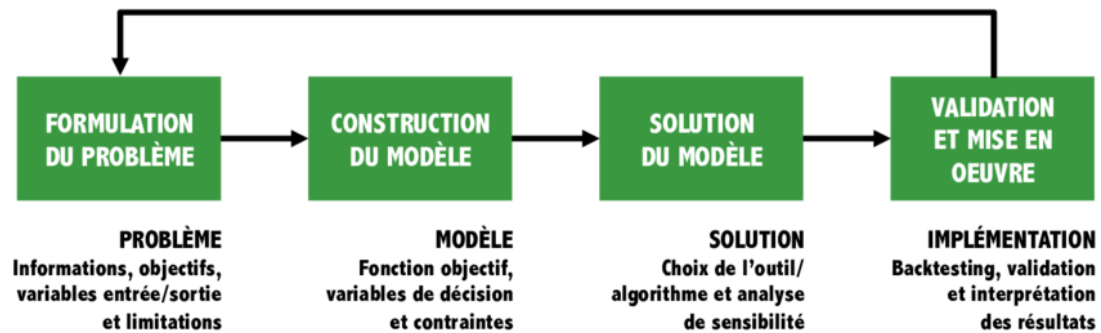


Figure 51: Méthode de résolution d'un problème de recherche opérationnelle [108]

3.4.1. Formulation du problème

L'objectif de cette étude d'optimisation est de concevoir une planification des tâches du métier du génie climatique permettant un lissage du nombre d'ouvriers requis par jour. Les données d'entrées de cette problématique d'optimisation consistent en la liste des tâches du projet, leurs durées et leurs contraintes. Les « contraintes » font référence aux liens de dépendances entre les tâches et aux jalons d'ouverture et de fermeture des niveaux où les activités seront exécutées. Ces données ont été extraites de notre outil de planification automatique développé pour notre projet via l'outil Postman. Afin de simplifier les tests de notre modèle d'optimisation, nous avons constitué quatre ensembles de données de taille réduite dont les dimensions sont présentées dans le Tableau 7. La durée du projet a été évaluée pour chaque ensemble en déterminant la différence entre la date de fermeture maximale et la date d'ouverture minimale des niveaux d'exécution des

tâches. Le Tableau 8 présente une vue détaillée de l'ensemble N°2 sélectionné à titre d'exemple. Les tâches de type « prérequis » correspondent aux activités des autres corps de métiers et leurs dates de réalisation sont préalablement connues (égale à la date d'ouverture du niveau, elle-même identique à la date de fermeture Tableau 8). De plus, les durées de ces tâches prérequis sont nulles car notre étude est focalisée uniquement sur la planification des travaux du lot génie climatique. Comme le projet, correspondant à l'ensemble de données N°2, doit se dérouler en 8 jours (voir Tableau 7) et la durée totale requise pour réaliser toutes ces tâches est d'environ 32 jours, il est important d'estimer au préalable le nombre de ressources nécessaires pour l'exécution de ce projet.

Tableau 7: Taille des ensembles de données utilisées lors des tests du modèle d'optimisation

Ensemble de données	Nombre de tâches	Durée du projet
N°1	5 tâches	8 jours
N°2	7 tâches	8 jours
N°3	10 tâches	8 jours
N°4	36 tâches	16 jours

Tableau 8: Détail des informations contenues dans l'ensemble N°2

Identifiant de la tâche	Nom du bâtiment	Nom du niveau	Nom de la tâche	Durée de la tâche (jours-homme)	Identifiant des prédécesseurs	Date d'ouverture du niveau	Date de fermeture du niveau
1	CCI	RDJ	Réception des terminaux	0.29		24/06/2022	01/07/2022
2	CCI	RDJ	Pose régulation (instrumentation)	17.93	5	27/06/2022	01/07/2022
3	CCI	RDJ	Manutention des terminaux	2.85	1 et 5	24/06/2022	01/07/2022
4	CCI	RDJ	Pose des radiateurs	6.41	3 et 2	24/06/2022	01/07/2022
5	CCI	RDJ	Supportage	4.28	6 et 7	24/06/2022	01/07/2022
6	Prérequis	Prérequis	Retrait des étais	0.00		24/06/2022	24/06/2022
7	Prérequis	Prérequis	Locaux disponibles et hors d'eau	0.00		25/06/2022	25/06/2022

3.4.2. Construction du modèle

Maintenant que les objectifs et les données d'entrées de notre système d'optimisation sont claires, nous allons définir les paramètres et les variables qui seront utilisés dans notre modèle

mathématique. Ensuite, nous formulerons notre fonction objective à minimiser et les contraintes à satisfaire.

a- Paramètres

$I = \{1, 2, \dots, i, \dots, N\}$: ensemble des tâches i où N est le nombre de tâches totales considérées.

$P = \{i \in I / i \text{ est de type « Prérequis »}\}$: ensemble des tâches des corps de métiers hors génie climatique.

$P_j = \{i \in I / i \text{ est prérequis de } j\}$: ensemble des tâches i qui sont prédécesseurs à la tâche j .

$T = \{0, 1, \dots, t, \dots, D-1\}$: ensemble des index des dates en jour t du projet du début à sa fin où $D-1$ correspond à l'index de la date de fin du projet.

D : Nombre de jours disponibles pour réaliser le projet.

d_i : durée utile pour la réalisation de la tâche i (en jour-homme).

JS_i : index de la date d'ouverture de la zone dans laquelle sera exécutée la tâche i .

JF_i : index de la date de fermeture de la zone dans laquelle sera exécutée la tâche i .

\bar{R} : Nombre moyen des ressources nécessaires au projet.

b- Variables

$$x_{it} = \begin{cases} 1, & \text{si la tâche } i \text{ est active à l'index de la date } t. \\ 0, & \text{sinon.} \end{cases}$$

S_i : date de début de la tâche i .

F_i : date de fin de la tâche i .

r_{it} : ressources nécessaires à la réalisation de la tâche i à l'index de la date t .

R_t : ressources totales requis à l'index de la date t .

c- Fonction objective

Le lissage des ressources passe par la minimisation de la dispersion du nombre d'ouvrier requis par jour R_t autour du nombre moyen des ressources nécessaires au projet $\bar{R} = \frac{1}{D} \sum_{t=0}^D R_t$. Cela se traduit par la minimisation de l'écart type des ressources dans la fonction objective.

$$\min \frac{1}{D} \sum_{t=0}^D (R_t - \bar{R})^2 = \min \frac{1}{D} \sum_{t=0}^D \left(\sum_{i=1}^N r_{it} \cdot x_{it} - \bar{R} \right)^2 = \min \frac{1}{D} \sum_{t=0}^D \left(\sum_{i=1}^N \frac{d_i \cdot x_{it}}{\sum_{k=0}^D x_{ik}} - \bar{R} \right)^2$$

d- Contraintes

- La première contrainte (C1) traduit le fait que la tâche i est un prédécesseur de la tâche j ($i \in P_j$) :

$$F_i \leq S_j \text{ équivale}nt \text{ à } \max_{t \in T} (t * x_{it}) \leq \min_{\substack{t \in T \setminus \{0\} \\ x_{jt} \neq 0}} (t * x_{jt}) \quad (C1)$$

- La date de réalisation des tâches de type « prérequis » $i \in P$ est identique à l'index de la date d'ouverture du niveau JS_i :

$$\forall i \in P, x_{iJS_i} = 1 \quad (C2)$$

- Aussi, ces tâches de type « prérequis » ne sont actives qu'à une seule et unique date :

$$\forall i \in P, \sum_{t=0}^D x_{it} = 1 \quad (C3)$$

- Chaque tâche i est active entre la date d'ouverture et la date de fermeture du niveau dans lequel elle sera exécutée :

$$\forall t \in [0, JS_i[, \quad x_{it} = 0 \quad (C4)$$

$$\forall t \in [JF_i, D [, \quad x_{it} = 0 \quad (C5)$$

- Chaque tâche du lot génie climatique est au moins active à une date t :

$$\forall i \in I \setminus P, \sum_{t=0}^D x_{it} \geq 1 \quad (C6)$$

3.4.3. Solution du modèle

En raison de la nature discrète de notre ensemble de variables binaires x_{it} , notre problème d'optimisation est classé comme un problème d'optimisation combinatoire. Ce type de problème est souvent résolu à l'aide de méthodes généralistes d'optimisation, appelées métaheuristiques, qui utilisent une exploration diversifiée de l'espace de solutions pour identifier les zones d'intérêt. L'algorithme génétique est l'une de ces métaheuristiques largement utilisées dans la résolution de problèmes d'optimisation combinatoire [109]. Cependant, bien que ces méthodes soient efficaces pour trouver des solutions (quasi) optimales, elles ne peuvent garantir la solution optimale [108].

L'algorithme génétique fait partie des métaheuristiques évolutionnistes. Il est basé sur le phénomène biologique de sélection naturelle (voir Figure 52). Ce dernier est appliqué à une population de solutions potentielles souvent générée initialement au hasard. Chaque solution est assimilée à un individu dont la survie « sélection » dépend de sa capacité à s'adapter à son environnement, c'est-à-dire de sa performance par rapport à la fonction objective « évaluation ». Les bons individus participent à la création de la future génération de population en se reproduisant

« croisement » avec d'autres individus. Les individus peuvent également muter « mutation » pour créer des nouvelles solutions au problème. La population se renouvelle selon ces principes jusqu'à l'atteinte d'un certain critère d'arrêt (temps, nombre d'itérations, convergence, ...). Dans notre étude, nous avons implémenté cet algorithme sur Python en utilisant la bibliothèque « *geneticalgorithm* ». La taille des populations a été configurée à 10000 individus (ou solutions). Les probabilités de croisement et de mutation ont été paramétrés à 50% et 30% respectivement. Le nombre d'itération maximal fixé à 1000 générations a été choisi comme critère d'arrêt. Finalement, nous avons testé ce programme développé sur Python sur les 4 ensembles de données présentées dans la section 3.4.1, et les résultats de ces tests seront présentés dans la partie suivante.

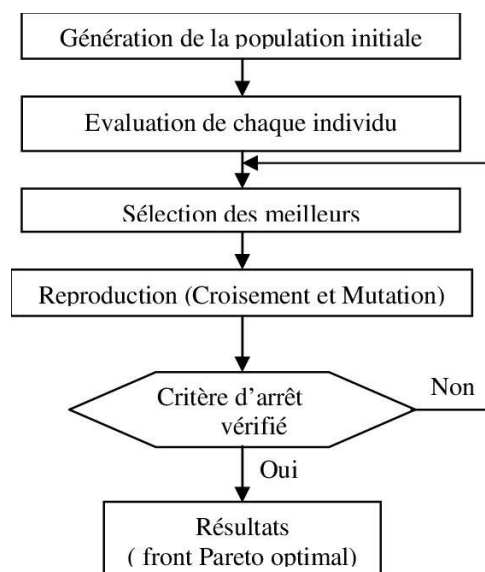


Figure 52: Principe de fonction d'un algorithme génétique [110]

3.4.4. Validation et mise en œuvre

Il est important de souligner que la validation du modèle est une étape cruciale dans tout projet de modélisation. Cette étape de validation consiste à valider la pertinence du modèle construit en le soumettant à différents tests pour vérifier s'il produit des résultats cohérents. Nous avons utilisé les quatre ensembles de données du Tableau 7 pour tester notre programme. Dans ce cas précis, les résultats obtenus pour les trois premiers ensembles de données suggèrent que le modèle est capable de résoudre le problème de manière satisfaisante (voir Tableau 9). Cependant, le fait que l'ensemble de données N°4 ne puisse pas être résolu de manière satisfaisante avec l'algorithme génétique suggère que d'autres approches de résolution doivent être envisagées pour traiter des problèmes plus complexes. Cela peut s'expliquer par le fait que l'algorithme génétique

converge vers des solutions quasi-optimales surtout lorsque la taille des variables augmente considérablement (576 variable x_{it} pour l'ensemble N°4).

Nous avons illustré dans le Tableau 10 les résultats obtenus pour les variables x_{it} en considérant les données d'entrées de l'ensemble N°2 (voir Tableau 8). Chaque tâche de cette matrice résultante est active lorsque la valeur de x_{it} est égale à 1. Pour chaque tâche active, la durée requise pour cette tâche est identique pendant les jours où elle est active, et est calculée en divisant la durée totale de la tâche par le nombre total de jours où elle est active. Notre analyse de cette matrice révèle que toutes les contraintes des dépendances entre les différentes tâches ont été respectées. De même, les jalons d'ouverture et de fermeture des différents niveaux ont été correctement pris en compte. A titre d'exemple, le Tableau 8 nous indique que la maintenance des terminaux (tâche 3) est précédée des activités de réception des terminaux (tâche 1) et de la mise en place du supportage (tâche 5). En utilisant les résultats présentés dans le Tableau 10, il est proposé de maintenir les terminaux le 26/06/2022, une fois les activités de réception des terminaux et de mise en place du supportage prévues pour le 24/06/2022 et le 25/06/2022 respectivement, terminées.

Tableau 9: Temps de calcul et valeur de la fonction objective obtenus pour les quatre ensembles de données.

Ensemble de données	Nombre de tâches (i)	Durée du projet (t)	Nombre de variables $x_{it} = i*t$	Temps de calcul	Valeur de la fonction objective
N°1	5 tâches	8 jours	40	3 min 27s	0.108
N°2	7 tâches	8 jours	56	10 min 55s	2.743
N°3	10 tâches	8 jours	80	15 min 52 s	0.1086
N°4	36 tâches	16 jours	576	4 j 3h 51 min 05 s	2062.5567

Tableau 10: Matrice résultante de l'exécution de notre programme pour l'ensemble des données N°2.

	Tâche 1	Tâche 2	Tâche 3	Tâche 4	Tâche 5	Tâche 6	Tâche 7
24/06/2022	1	0	0	0	0	1	0
25/06/2022	0	0	0	0	1	0	1
26/06/2022	0	0	1	0	0	0	0
27/06/2022	0	1	0	0	0	0	0
28/06/2022	0	1	0	0	0	0	0
29/06/2022	0	1	0	0	0	0	0
30/06/2022	0	1	0	0	0	0	0
01/07/2022	0	0	0	1	0	0	0

Il convient de souligner que les résultats obtenus pour de ce type de problème ne sont pas uniques. Si aucune optimisation n'est considérée dans la planification, même lorsqu'elle est effectuée manuellement, l'ordonnancement des tâches pour l'ensemble des données N°2 peut prendre la forme de la matrice présentée dans le Tableau 11. Cette matrice permet de comparer l'utilisation des ressources avec et sans l'application de notre algorithme d'optimisation (voir Figure 53). Il est évident que notre algorithme permet de lisser l'utilisation des ressources autour de la moyenne permise ($\bar{R}= 3.97$ pour les données de l'ensemble N°2). La fonction objective obtenue grâce à l'optimisation est également plus faible, ce qui justifie l'objectif de minimisation de cette valeur par notre modèle proposé.

Tableau 11: Exemple de matrice d'ordonnancement des tâches de l'ensemble des données N°2 sans prise en compte de l'usage des ressources.

	Tâche 1	Tâche 2	Tâche 3	Tâche 4	Tâche 5	Tâche 6	Tâche 7
24/06/2022	1	0	0	0	1	1	1
25/06/2022	0	1	1	0	0	0	1
26/06/2022	0	1	0	0	0	0	0
27/06/2022	0	1	0	0	0	0	0
28/06/2022	0	1	0	0	0	0	0
29/06/2022	0	1	0	0	0	0	0
30/06/2022	0	0	0	1	0	0	0
01/07/2022	0	0	0	0	0	0	0

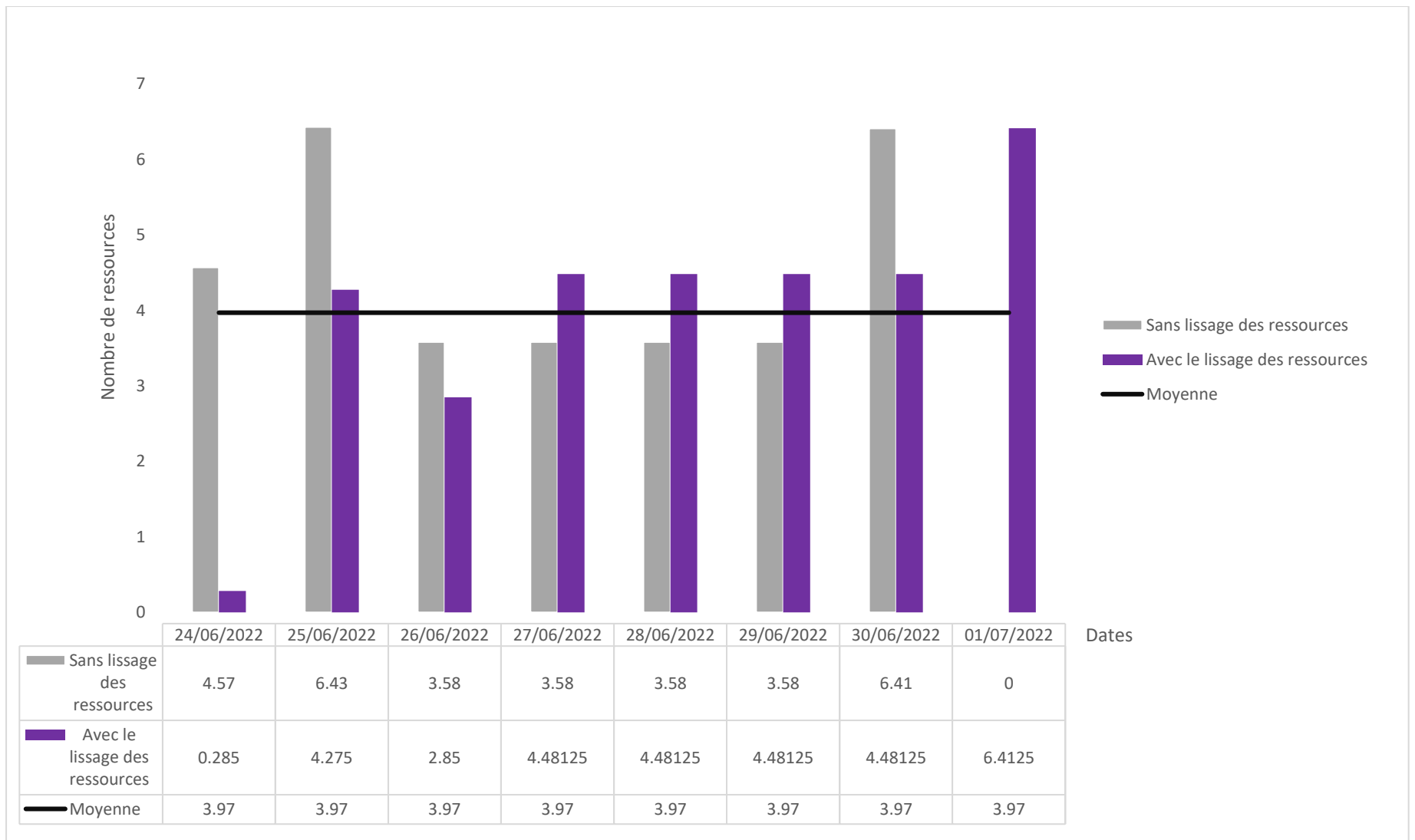


Figure 53: Nombre de ressources requis avec et sans lissage des ressources pour l'ensemble des données N°2

3.5. Discussion et conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté notre outil de planification automatique et détaillé les différentes étapes de conception et de développement qui ont permis de répondre à 15 des 19 fonctionnalités identifiées dans la spécification des besoins utilisateurs. Cette spécification a été élaborée en étroite collaboration avec l'entreprise Equans, qui souhaitait améliorer le pilotage global de ses affaires.

L'outil que nous avons développé s'appuie sur différentes sources de données d'entrées, notamment les feuilles de métrés, les maquettes numériques, les jalons imposés par le client et les standards de gammes de mise en œuvre des équipements. Nous avons ainsi veillé à ce que notre application soit en mesure de prendre en compte l'ensemble des informations pertinentes pour une planification efficace et précise. La solution proposée exploite ces informations et utilise un ensemble d'équations et d'algorithmes développés en vue de produire automatiquement un planning de montage en phase avant-vente et de le mettre à jour en phase d'étude d'exécution. Bien que le planning généré soit spatio-temporel, l'affichage utilisé est celui d'un planning de type GANTT et non celui du planning chemin de fer. Néanmoins, le contenu du résultat produit automatiquement par notre application se rapproche et apporte plus de détail que celui créé manuellement lors de l'étape « phase scheduling » d'une démarche LPS[®] classique.

En détaillant les étapes clés de mise en œuvre de chaque équipement, le planning généré par notre outil est beaucoup plus précis que les plannings produits manuellement par les responsables de projets (voir Figure 54). En revanche, les plannings manuels se limitent souvent à expliciter uniquement les macro-opérations qui sont utiles pour le suivi des interférences avec les autres corps de métier et le suivi financier de l'affaire, sans fournir suffisamment de détails sur les tâches spécifiques à effectuer pour chaque équipement sur le site de construction. Ce niveau de détail est crucial pour garantir une gestion efficace et précise du projet sur le chantier, ainsi qu'une coordination optimale entre les différentes équipes du projet.



Figure 54: Extrait du planning tout corps d'état du CCI de Rennes créé par l'entreprise générale et complété manuellement par le responsable de ce projet côté Equans Mr. Thomas SEMENNOU.

Toutefois, nous avons dû faire face à certains défis lors de la conception et du développement de la solution, notamment en raison de l'indisponibilité de certaines données d'entrée. Ainsi, nous avons mis en place des solutions palliatives pour lever les problèmes de l'absence des temps d'installation des équipements sur les feuilles de métrés et les maquettes numériques. Pour y arriver nous avons été amenés à solliciter et travailler directement avec les équipes du terrain. La résolution définitive de ces problématiques nécessite une orientation stratégique d'Equans vers la création de valeur ajoutée à partir des données produites, en assurant leur maintien et en élargissant l'utilisation des outils opérationnels pour faciliter la prise de décision. Finalement, le problème d'indisponibilité de standard décrivant les étapes d'installation des équipements et leurs enchaînements a été traité à la source en organisant plusieurs ateliers qui nous ont permis de capitaliser le savoir-faire métier des experts dans le domaine et de le formaliser.

Il est important de souligner que l'utilisation de cet outil de planification automatique présente de nombreux avantages en termes de gains de temps et d'efficacité pour les entreprises. Tout d'abord, grâce à sa capacité à traiter rapidement et de manière efficace des données complexes, il permettrait de réduire considérablement le temps nécessaire à la planification des projets. En effet, dans des conditions idéales de complétude des données d'entrées, il pourrait économiser en moyenne une semaine complète de travail chronophage réalisé aujourd'hui manuellement par chaque responsable de projet sur chaque affaire. Cela présente une économie de temps et de coût considérable pour les entreprises, permettant aux décideurs de se concentrer sur des tâches plus importantes telles que la prise de décisions et la résolution de problèmes. Par ailleurs, le processus de capitalisation sur les données opérationnelles de l'entreprise pour créer une

valeur ajoutée représentée par un planning automatique est une manifestation d'une gestion allégée des informations du bâtiment (du Lean BIM « management »). A terme, l'outil permettrait aux chefs de chantier et les compagnons de suivre l'avancement des projets au quotidien et d'améliorer, par la collecte des heures consommées par tâche, les temps d'installations unitaires des équipements de la base nationale des articles de façon continue.

Enfin, dans ce chapitre, nous avons présenté un moyen de planification qui permet de rationaliser l'utilisation des ressources humaines, en tenant compte des compétences et des disponibilités de chaque membre de l'équipe. Cela permet de maximiser l'efficacité de l'équipe tout en minimisant les risques de surcharge de travail ou de retards dans la réalisation des tâches. Cependant, il est important de souligner que le modèle de planification que nous avons proposé nécessite encore des développements supplémentaires pour permettre l'optimisation des plannings de taille conséquente. En effet, pour les projets de grande envergure impliquant de nombreuses équipes et des tâches complexes, le modèle peut devenir plus difficile à gérer et nécessite une adaptation pour répondre aux exigences spécifiques de chaque projet.

Chapitre 4 : *Evaluation de l'outil de planification automatique*

Sommaire

- 4.1. Introduction sur les méthodes d'évaluation
 - 4.2. Sélection des méthodes d'évaluation de notre outil de planification automatique
 - 4.3. Résultats des tests fonctionnels
 - 4.4. Résultats de l'évaluation analytique
 - 4.5. Discussion et conclusion
-

Le présent chapitre traite l'évaluation de notre solution de planification automatique des travaux de montage qui a été conçue et développée en prenant compte des données de l'avant-vente et des études d'exécution. Les résultats de l'évaluation de cet outil sont présentés en détail, avec une description de la méthode de construction de la grille d'évaluation utilisée pour mesurer les performances de l'outil. Nous exposons également les choix méthodologiques que nous avons faits pour vérifier et interpréter les résultats obtenus à partir de notre outil.

4.1. Introduction sur les méthodes d'évaluation

L'évaluation des solutions représente une étape essentielle du processus de recherche, surtout en ce qui concerne la vérification et la validation des « constructions⁴ » élaborées dans le cadre d'une approche Constructive Research Approach (CRA). Dans le domaine des technologies de l'information, l'évaluation requiert la définition de mesures appropriées qui sont en lien avec divers aspects tels que les fonctionnalités, l'exhaustivité, la cohérence, la précision, les performances, la fiabilité, la facilité d'utilisation, ainsi que l'adaptation à l'organisation et d'autres attributs de qualité pertinents. Il convient de souligner que l'évaluation est effectuée en tenant compte des exigences de l'environnement de travail [111]. Plusieurs méthodes d'évaluation sont disponibles dans la littérature, comme synthétisé dans le Tableau 12 par Hevner et al.

Tableau 12: Méthodes d'évaluation d'une solution proposée dans le domaine des technologies de l'information [111].

1.Observationnelle	Etude de cas : Etudier en détail la mise en œuvre de la solution dans l'environnement de travail.
	Etude sur le terrain : Suivre l'usage de la solution dans de multiples projets.
2.Analytique	Analyse statique : Examiner et déterminer les qualités statiques de la solution (telles que la complexité)
	Analyse d'architecture : Etudier l'adaptabilité de la solution avec l'architecture technique du système d'information.
	Optimisation : Démontrer les propriétés optimales inhérentes à la solution ou fournir des limites d'optimalité de son comportement.
	Analyse dynamique : Examiner et déterminer les qualités dynamiques de la solution (telles que la performance).
3.Expérimentale	Expérience contrôlée : Etudier les qualités de la solution dans un environnement contrôlé (par exemple la simplicité d'utilisation).
	Simulation : Exécuter la solution avec des données artificielles.
4.Test	Test fonctionnel : Exécuter des interfaces de la solution pour découvrir les défaillances.
	Test structurel : Exécuter des tests de couverture du code (par exemple la couverture des chemins d'exécution)

⁴ terme utilisé dans la méthode CRA pour désigner les solutions construites

5.Descriptive	Argumentaire justifié : Utiliser les informations de travaux de recherches pertinents pour justifier l'utilité de la solution.
	Scénarios : Construire des scénarios détaillés sur l'usage de la solution pour démontrer son utilité.

4.2. Sélection des méthodes d'évaluation de notre outil de planification automatique

Dans le contexte de notre recherche, nous avons recouru à diverses méthodes d'évaluation des solutions numériques mentionnées précédemment afin de vérifier et valider la cohérence de notre outil de planification automatique. Nous récapitulons les méthodes d'évaluation utilisées de la manière suivante :

- Etude de cas : nous avons utilisé les données d'un projet de construction réel, à savoir le centre chirurgical et interventionnel CCI de Rennes, piloté par des responsables de projets au sein du partenaire industriel Equans. Dans le cadre de cette thèse, nous avons pu accéder aux données de chiffrage et à la maquette numérique de ce projet, malgré la sensibilité et la confidentialité de ce type d'informations. Nous avons utilisé ces informations dans nos développements, conformément à la méthode d'évaluation reposant sur l'études de cas.
- Analyse d'architecture : nous avons appliqué cette méthode en amont du développement de notre solution. En effet, nous avons évalué des sources de données autres que les feuilles de métrés, devis et les maquettes numérique issues des études d'exécution, qui pourraient alimenter notre solution de planification automatique. Par exemple, nous avons examiné si les maquettes numériques fournies dans le dossier de consultation des entreprises pouvaient répondre à notre besoin de planification automatique en phase avant-vente. De plus, nous avons vérifié si l'outil interne chez Equans dédié à la réalisation des bilans aérauliques et hydrauliques, appelé « Optimiz», pouvait permettre la mise à jour du planning en phase études d'exécution. Ce diagnostic préalable des systèmes d'informations opérationnels de l'entreprise partenaire a permis de déterminer les sources de données les plus fiables pour parvenir aux résultats souhaités.
- Tests fonctionnels : Chaque nouvelle fonctionnalité développée a été testée pour valider son bon fonctionnement et corriger les défaillances identifiées. La pertinence des calculs

résultants a également été vérifiée. Nous présentons quelques résultats de ces tests dans la section 4.3.

- **Analyse dynamique et statique :** Afin de valider la conformité de notre solution aux exigences des utilisateurs présentés dans la section 3.1, nous avons organisé un atelier de démonstration avec six responsables de projets confirmés à la fin de la phase de développement. Ces responsables ont en moyenne vingt ans d'expérience et gèrent des projets de chiffre d'affaires supérieur à 15 M€. Ces participants reflètent le profil des futurs utilisateurs potentiels de notre application. Au cours de cette session d'évaluation, nous avons présenté la mise en œuvre concrète des fonctionnalités couvertes par notre solution, telles que définies dans la spécification des besoins utilisateurs. Les commentaires constructifs des participants ont permis de valider certaines fonctionnalités, de les améliorer et d'identifier les fonctions manquantes. Une grille d'appréciation a été fournie à chaque examinateur à la fin de l'atelier pour synthétiser les échanges (voir annexe 12). Nous nous sommes inspirés du questionnaire d'évaluation de l'outil VisiLean réalisé par Dave [18] pour la construction de cette grille. Notre questionnaire comprend des questions générales sur l'expertise des participants et leur sensibilité autour des techniques du Lean Construction et du BIM. Aussi, nous évaluons à travers cette grille l'utilité et la fiabilité de notre solution. De plus, nous avons invité les participants à rappeler les modifications à apporter sur les fonctionnalités mises en œuvre et les fonctionnalités manquantes qui doivent être rajoutées à la spécification des exigences utilisateurs. Nous présentons dans la section 4.4 les appréciations des évaluateurs dégagées à partir de nos échanges ouverts avec eux et de l'analyse des résultats du questionnaire.

4.3. Résultats des tests fonctionnels

Les tests fonctionnels de notre application ont consisté à vérifier le déroulement d'une liste d'actions attendues afin de s'assurer de la conformité du comportement de notre outil. Ces actions correspondent aux fonctionnalités spécifiées par les utilisateurs (cf. section 3.1). Une grande partie de ces tests a été consacrée à la vérification de l'exactitude des calculs résultants du traitement des données d'entrée pour la planification automatique.

Pour illustrer cette partie, prenons un exemple concret. Nous avons vérifié la cohérence des durées des tâches calculées en utilisant le modèle mathématique expliqué dans la section 3.3.2. L'interface

utilisateur affiche une durée de 2.28 h pour l'opération de réception des terminaux au niveau rez-de-jardin (RDJ) et pour le système d'eau chaude (EC), comme nous pouvons le voir dans la Figure 47, 38 radiateurs déclarés dans le chiffrage en phase avant-vente sont associés à cette tâche (voir Figure 48.c). Ces radiateurs ont un temps d'installation unitaire de 3h (voir Figure 48.c). Sachant que le ratio temps dédié à cette opération, dans la planification standard du savoir-faire métier, pour le groupe de radiateurs RAD est de 2%, la durée résultante des calculs devrait être 2.28 h. Cette dernière correspond bien à la valeur affichée par notre outil (voir Figure 47, colonne Durée utile PRJ).

$$38 \text{ unités} \times \frac{3h}{\text{unité}} \times \frac{2}{100} = 2.28 h$$

Nous avons procédé ensuite à une vérification de la durée calculée à partir des données provenant de la maquette numérique en phase d'étude d'exécution (voir Figure 48.d), pour la même opération. Cette vérification a été effectuée pour les 54 radiateurs RAD de taille différentes (3h/unité) et les 9 ventilo-convecteurs VNC (2h/unité) modélisés dans la maquette. La durée calculée pour la tâche de réception de ces terminaux devrait être à 3.6 heures, ce qui correspond à la valeur affichée par notre outil de planification automatique (voir Figure 47, colonne Durée utile EXE).

$$(54 \text{ unités RAD} \times \frac{3h}{\text{unité}} + 9 \text{ unités VNC} \times \frac{2h}{\text{unité}}) \times \frac{2}{100} = 3.6 h$$

Pendant le développement, d'autres tests ont été réalisés sur des échantillons de tâches afin de vérifier leurs liens de dépendances, leurs dates de début et de fin, ainsi que la cohérence des équipements affichés par l'interface utilisateurs par rapport au contenu initial de la base de données.

4.4. Résultats de l'évaluation analytique

La méthode d'évaluation analytique de notre outil a été effectuée sous forme de focus groupe⁵, dans le but d'analyser de manière critique la mise en œuvre des fonctionnalités décrites dans la spécification des besoins utilisateurs. Les commentaires des responsables de projets ayant participé à cette session d'évaluation ont été résumés dans le Tableau 13. Ce tableau reprend les éléments de la spécification des exigences utilisateur (Tableau 4) enrichis des informations

⁵ une forme de d'étude qualitative qui prend forme au sein d'un groupe spécifique culturel, sociétal ou idéologique, afin de déterminer la réponse de ce groupe et l'attitude qu'il adopte au regard d'un produit, d'un service, d'un concept ou de notices.

relatives à l'étendue de couverture de notre outil pour chaque fonctionnalité et des commentaires des évaluateurs. Dans le champ commentaire, nous avons également inclus des arguments justifiant la couverture partielle de certaines fonctionnalités par notre solution.

Tableau 13: Couverture des fonctionnalités de la spécification utilisateur par notre preuve de concept et les commentaires d'évaluation des responsables de projets (gris : hors périmètre, vert : fonctionnalité développée, jaune : fonctionnalité partiellement développée, orange : fonctionnalité non développée, violet : nouvelle fonctionnalité identifiée).

Fonctionnalités			Outil développé	Résultats de l'évaluation
Catégorie	N°	Description	Couvre la fonctionnalité	Commentaires
Administration	1	L'utilisateur pourra associer son projet de planification à une affaire.		
	2	L'interface utilisateur permettra d'administrer les privilèges associés aux groupes utilisateurs.		
	3	L'interface utilisateur devra permettre d'administrer les gammes de mise en œuvre.		
Contraintes de planifications	4	L'application permettra de configurer des paramètres généraux de planification tels que : <ul style="list-style-type: none"> • La durée journalière de travail pour chacun des jours de la semaine • Les jours non travaillés 		Il est important de déclarer les jours de congés, les jours fériés et les semaines neutralisées lors de la configuration des paramètres généraux de la planification. Il serait intéressant de préciser, pour les jours travaillés, si le travail est en journée ou la nuit pour permettre un calcul réaliste du coût de la main d'œuvre.
	5	L'utilisateur doit pouvoir saisir des contraintes temporelles liées au planning de construction client. Une contrainte pourra par exemple être constituée des propriétés suivantes : <ul style="list-style-type: none"> • Bâtiment • Niveau • Zone • Date de début de disponibilité • Date de fin de disponibilité 		Rien n'a été signalé pour les parties couvertes de cette fonctionnalité. La déclaration des jalons de disponibilités des zones d'un ouvrage n'a pas été développée car le champs zone n'est pas systématiquement renseigné par les chiffreurs dans les feuilles de métrés.
	6	L'utilisateur pourra définir des zones qui permettront de grouper des locaux et ainsi grouper les opérations associées aux locaux.		Cette fonctionnalité n'a pas été développée vu l'absence de données sur les locaux dans les feuilles de métrés tout comme les zones.
	7	Des prérequis prédéfinis issus d'autres lots mais dont dépendent les activités CVC pourront être configurés pour être insérés dans le planning d'exécution. Ci-dessous une liste non exhaustive de tâches prédéfinies : <ul style="list-style-type: none"> • Eclairage et coffrets provisoires d'alimentation 		Les dates de fin de réalisation des prérequis hors métier doivent être configurés par bâtiment, par niveau et par zone.

		<ul style="list-style-type: none"> Mise à disposition des alimentations Exécution des réservations Locaux techniques disponibles et hors d'eau 		
Génération initiale du planning	8	L'application doit permettre de générer de manière automatique un planning d'exécution.		Il faut augmenter le rythme de travail sur toute une séquence de travail (en augmentant les ressources) si le jalon est dépassé avec une seule ressource au lieu de contraindre uniquement la date de fin de réalisation de la dernière tâche de la séquence. Cela permettra de lisser la charge sur toute la durée du projet. Ce feedback implique un changement majeur dans notre modèle mathématique de calcul des dates de début et de fin des tâches.
	9	Le planning de montage devra être visible depuis l'interface de l'application sous forme d'un diagramme de GANTT.		
	10	Le diagramme de GANTT pour être configurable avec une résolution à la journée, semaine ou mois		
	11	<p>L'application doit permettre d'afficher les tâches et les filtrer selon les critères suivants :</p> <ul style="list-style-type: none"> Géographique (bâtiment, niveau, zone, local) Système Super famille Famille Groupe Article 		Ajouter un filtre par ressource et par champs personnalisables. Lors du développement, les opérations ont été groupées par zone géographique et par système pour simplifier la lecture. Grâce à ce regroupement, nous avons limité le nombre de tâche du planning aérialique du projet CCI de Rennes à 300 lignes. Si notre planning affichait autant de tâches que d'article, il serait représenté en 4575 ligne en avant-vente et 37465 lignes en phase étude d'exécution. Par contre, l'utilisateur peut consulter les articles concernés par chaque opération dans la palette de détail de la tâche.
	12	<p>Les articles (composants d'un système) associés à une tâche pourront être consultables, ils pourront contenir les informations suivantes :</p> <ul style="list-style-type: none"> Manufacturier Référence interne Quantité Temps de mise en œuvre unitaire 		<p>Il serait intéressant d'intégrer les caractéristiques de diamètre et de section des canalisations et des gaines dans le détail des articles associés à une tâche.</p> <p>Le nom du manufacturier n'est pas présent dans les sources de données utilisées.</p>

Estimation de la charge	13	L'interface de planification permettra d'afficher une estimation des ressources nécessaires à la réalisation de l'ensemble des tâches à la semaine.		Il serait intéressant d'ajouter des filtres à la courbe de charge pour afficher des données par niveau, par zone et par ressource.
Mise à jour du planning	14	Le planning en cours pourra être comparé aux résultats des études pour identifier des éventuelles différences de matériels, le résultat de cette comparaison devra être présenté à l'utilisateur.		Mettre en évidence les écarts entre les valeurs en chiffrage et en études d'exécution de façon visuelle à travers un code couleur est une piste d'amélioration à considérer.
Modification du planning	15	Des prérequis (contraintes chantier, disponibilités des bâtiments et zones chantier) pourront être ajoutés à la création d'un nouveau projet ou bien ajoutés et/ou modifiés en cas d'évolution chantier (modifications des jalons par la MO, ajustements dus aux études).		L'ajout de tâches, la modification des durées et des dates des tâches existantes est possible via l'outil. Cependant, elle n'entraîne pas une modification sur les opérations successeurs. Il est important de garder une traçabilité sur l'historique des modifications apportées au planning.
	16	La durée théorique, la répartition (dates) et les ressources configurées pour chacune des tâches seront modifiables par l'utilisateur.		
	17	L'utilisateur pourra modifier l'ordonnancement des tâches.		
	20	Affecter des ressources humaines (noms) par tâche.		
Suivi de l'avancement	18	L'application de planification permettra de faire un suivi de l'avancement chantier au niveau des tâches à l'aide des propriétés suivantes : <ul style="list-style-type: none"> • Heures prévues • Avancement physique en % • Total heures autorisées • Total heures passées • Ecart horaire par rapport à l'avancement • Ecart par rapport à l'estimation initiale • Prévision calculée (estimation de temps requis pour clôturer la tâche) • Reste à engager 		
	19	Les informations de suivis chantier pourront être présentées dans la même fenêtre que la planification ou bien dans une fenêtre dédiée si nécessaire.		

Partage des données	21	Imprimer et exporter le planning vers Ms Project pour plus de flexibilité à l'usage et la possibilité de partage des données avec le client, les sous-traitants, ...		
---------------------	----	--	--	--

Au cours de nos échanges avec les participants, nous avons pu recueillir leurs commentaires concernant les fonctionnalités présentées. Nous avons ensuite utilisé des questions fermées dans notre grille d'évaluation finale pour collecter leurs appréciations générales sur l'utilité et la fiabilité de notre solution. La Figure 55 illustre la tendance des retours des responsables de projets aux sept questions fermées posées sur une échelle de Likert. Les sept questions sont les suivantes :

1. La solution traite-elle une vraie problématique rencontrée par les responsables de projets ?
2. Le besoin auquel répond la solution est-il toujours d'actualité ?
3. La solution est-elle utile pour la planification d'un projet de construction ?
4. Les résultats fournis par la solution sont-ils précis et fiables ?
5. Le temps de calcul des données de sortie est-il raisonnable ?
6. La solution couvre-t-elle l'ensemble des fonctionnalités indispensables ?
7. Seriez-vous prêt à utiliser cette solution sur un site pilote ?

Dans l'ensemble, les participants ont indiqué que la solution proposée était pertinente et utile pour répondre à un véritable défi en gestion de projets de construction, qui reste actuel. Néanmoins, deux des trois participants restent sceptiques quant à la précision et l'exactitude des calculs réalisés par notre outil. En ce qui concerne le temps nécessaire pour le calcul et le traitement des données, 83% des acteurs présents l'ont jugé raisonnable. Enfin, 67% des personnes présentes seraient prêtes à tester notre solution sur un site pilote.

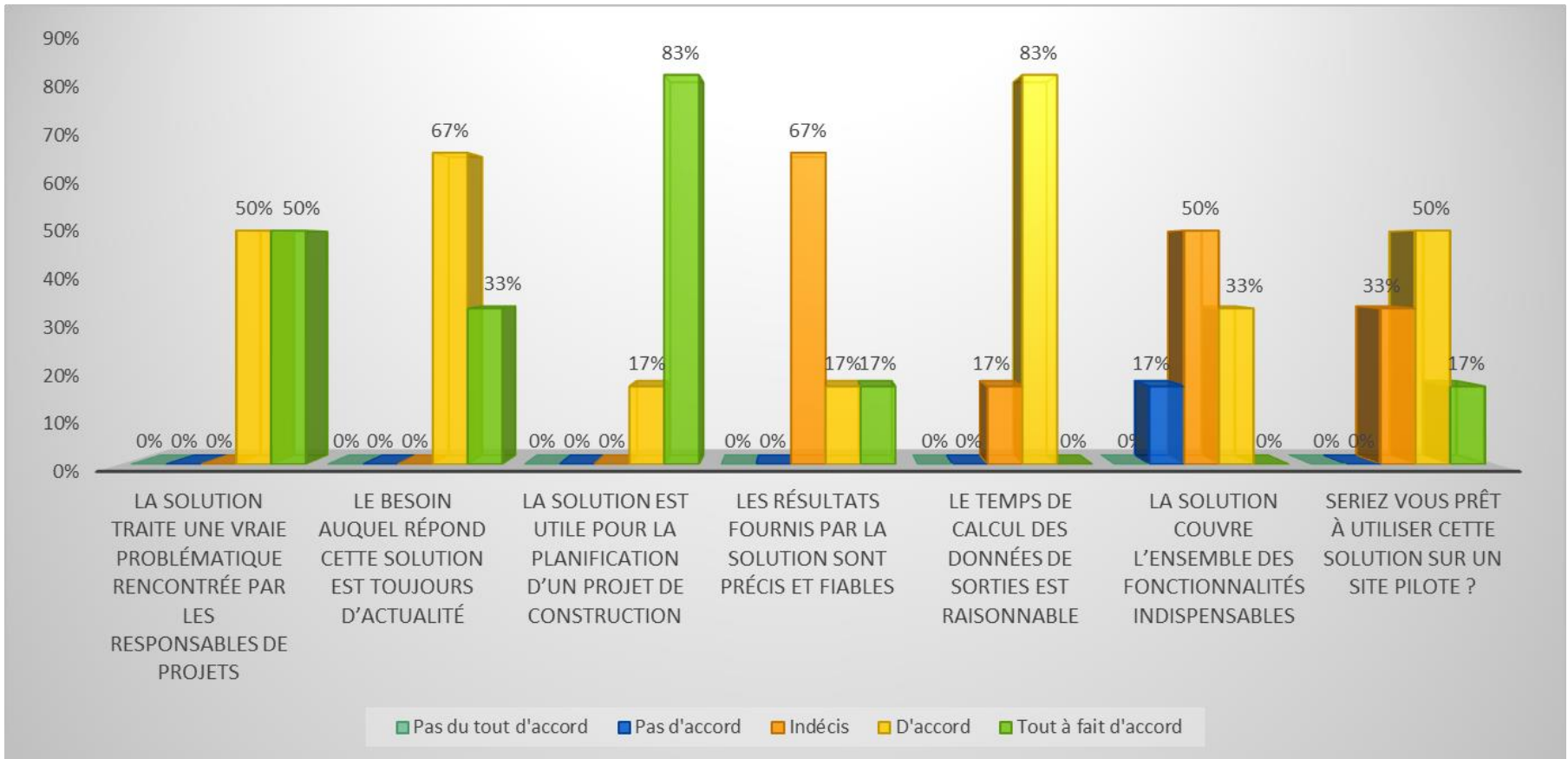


Figure 55: Appréciations générales des participants vis-à-vis de notre preuve de concept sur une échelle de Likert

4.5. Discussion et conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté les résultats de l'évaluation de notre outil de planification automatique en utilisant différentes méthodes issues de la littérature telles que les tests fonctionnels et l'évaluation analytique. Cette étape est primordiale dans tout processus de recherche et plus particulièrement dans la méthodologie CRA, car elle permet de vérifier la validité des solutions produites.

D'une part, les tests fonctionnels de notre solution, effectués tout au long du développement, reposent sur des données factuelles d'un projet de construction réel piloté par Equans. Ces tests ont confirmé l'exactitude et la cohérence des calculs effectués automatiquement par notre outil de planification.

D'autre part, l'évaluation analytique de notre outil a été réalisée sous forme de focus groupe auquel six responsables de projets expérimentés ont été conviés. Durant cet atelier, nous avons pu collecter les fonctionnalités manquantes dans notre spécification des exigences utilisateurs, ainsi que les propositions d'amélioration dans l'implémentation des fonctionnalités couvertes par notre outil. Une grille d'évaluation a été construite et utilisée pour orienter les échanges durant ce processus à travers laquelle les évaluateurs nous ont fait part de l'utilité et du besoin persistant pour la solution proposée. Néanmoins, certains participants restent sceptiques quant à la précision et l'exactitude des calculs effectués automatiquement par notre système malgré les résultats concluants de nos tests fonctionnels.

Cette attitude peut découler de plusieurs raisons telles qu'une expérience négative vécue par le passé à l'usage d'une technologie d'automatisation, un besoin de maîtrise du contenu de la planification par le biais de processus manuels voire une résistance au changement des habitudes traditionnelles. Par conséquent, il est important de comprendre dans le futur les préoccupations sous-jacentes à ce doute envers les solutions d'automatisation pour aider les utilisateurs à se sentir plus à l'aise avec ces technologies et à tirer pleinement parti de leurs avantages.

Conclusion et perspectives

Conclusion

Dans cette thèse, nous avons examiné l'intégration de deux approches fréquemment utilisées de manière autonome pour améliorer les processus de construction et la gestion des données d'un ouvrage : le Lean Construction et le BIM. Plus précisément, nous avons étudié comment ces deux méthodologies peuvent être combinées en phase d'exécution d'un projet, en reliant les informations liées à la conception d'un produit à ses processus de construction. L'état de l'art nous a permis d'identifier une interaction et une synergie intéressante à explorer entre la technique phare du Lean Construction appelée LPS[®] et les fonctions de visualisation du BIM. Cette interaction a été explorée dans plusieurs travaux de recherche, qui ont donné lieu à des outils permettant de mettre en pratique virtuellement la démarche LPS[®] et de créer des liens entre les tâches des plannings produits et la maquette numérique BIM du projet. Cependant, nous avons constaté une insuffisance de l'intégration réelle entre le système de planification du chantier LPS[®] et le modèle BIM en ce qui concerne l'exploitation des données. De plus, l'état de l'art montre qu'une vraie intégration entre le LPS[®] et le BIM au niveau de l'information doit prendre en compte plusieurs fonctions dont la génération automatique des tâches du planning des phases du LPS[®]. Ainsi, notre premier objectif était de générer automatiquement les tâches du planning collaboratif réalisé lors des rituels LPS[®] (phase schedule) à partir des données de la maquette numérique, afin de contribuer à la promotion d'une véritable intégration. Ensuite, en confrontant cette problématique au besoin de l'entreprise, nous avons affiné notre orientation finale. L'objectif principal de l'outil développé dans le cadre de cette thèse est de générer automatiquement un planning de montage spécifique au domaine du génie climatique, ainsi que de le mettre à jour en utilisant plusieurs sources de données notamment celles provenant du chiffrage en phase avant-vente du projet et celles de la maquette numérique BIM issue des études d'exécution. Pour formuler cet objectif, nous avons dû concilier les intérêts de notre partenaire industriel avec les exigences académiques en accord avec les principes de la méthodologie Constructive Research Approach.

Ainsi, notre contribution majeure réside dans la conception et le développement d'une application Web permettant de générer automatiquement un planning spatio-temporel. Cette

application capitalise sur diverses sources de données telles que les feuilles de métrés, la maquette numérique, les jalons imposés par le client et les standards de gammes de mise en œuvre des équipements. La mise en place de cette solution a nécessité plusieurs développements informatiques, incluant la gestion des bases de données, la programmation en Java et Angular, ainsi que le développement de scripts visuels avec Dynamo Revit et la programmation en Python.

Lors de la mise en place de notre outil de planification nous avons été confrontés à diverses difficultés dès le début en raison de la nature incomplète et hétérogène des données d'entrées provenant de plusieurs sources. Afin de surmonter ces défis, nous avons dû compléter les informations manquantes dans les ensembles des données utilisés pour la conception et le développement de notre prototype. A titre d'exemple, nous avons entrepris un travail laborieux de rédaction et de standardisation des opérations de mise en œuvre des équipements qui constitue un savoir-faire métier détenu par les responsables de projets Equans mais qui n'avais jamais été formalisé. De plus, l'absence de certaines données d'entrées, telles que les informations sur les zones ou les locaux, a limité la mise en œuvre complète de certaines fonctionnalités décrites dans la spécification des besoins utilisateurs, faisant partie du champ d'application du projet doctoral. Toutefois, pour développer une solution durable à l'échelle de l'entreprise, il est essentiel d'entreprendre une véritable transformation organisationnelle et technologique pour garantir la saisie rigoureuse et la préservation des données des projets afin d'éviter toute perte éventuelle dès les premières phases des projets. L'adoption d'un système de codification standard des données, tel que l'Omniclass ou l'Uniclass, permettrait également de résoudre certains problèmes d'incompatibilité sémantique entre les données, qui constituent aujourd'hui un obstacle à la stabilité de notre outil.

Un autre défi significatif rencontré lors de la réalisation de ce travail fut les contraintes d'utilisation de certains composants informatiques. Cette difficulté a été amplifiée par la nécessité pour la doctorante d'acquérir des compétences dans le domaine du développement informatique. Bien que le recours au framework Angular ainsi qu'à ses différentes bibliothèques a permis de simplifier la création de la structure de l'application, certaines bibliothèques, notamment celle utilisée pour le digramme de GANTT, présentent des limites en matière de personnalisation.

Enfin, même si l'outil développé permet une planification automatique prenant en compte les contraintes contractuelles, les résultats obtenus ne sont pas optimaux en termes de répartition quotidienne de la charge de travail et de gestion de la main-d'œuvre. Bien que nous ayons résolu

ce problème en utilisant un algorithme génétique en Python pour lisser les ressources, ces résultats n'ont pas été intégrés à la couche de traitement des données de notre application, qui a été développée en Java.

Au-delà de l'utilité opérationnelle de l'outil développé et les limites de ce prototype, ce travail participe à une ambition plus globale d'Equans visant à garantir la continuité des données tout au long du cycle de vie d'un projet de construction. Cette solution constitue une nouvelle avancée de développement technologique ouvrant la voie à plus d'efficacité dans la gestion des informations d'un bâtiment par l'exploitation des diverses données opérationnelles du projet produites de sa conception à sa construction jusqu'à sa démolition et son démantèlement.

A l'avenir, la continuité des données pourra être assurée grâce à la mise en place d'un entrepôt de données (Data Warehouse) qui sera alimenté par des données provenant de multiples logiciels opérationnels utilisés tout au long des différentes phases des projets de construction. Cette approche propose une nouvelle vision conceptuelle de la gestion allégée des informations du bâtiment, que nous intitulez Lean BIM "management". Dans cette approche, la maquette numérique est utilisée, en complément d'autres systèmes opérationnels, comme une source de données permettant d'alimenter une base de données centrale avec les informations nécessaires et pertinentes. Cette approche peut contribuer à surmonter les obstacles liés à la propriété intellectuelle des données, qui peuvent entraver le développement du BIM. En effet, la maquette numérique ne transmettrait plus les informations protégées par les organisations. Nous aborderons ce point plus en détail dans nos perspectives.

Perspectives

Le travail réalisé dans cette thèse représente une première étape dans l'automatisation de la planification en exploitant les données opérationnelles d'un projet. Cependant, de nombreuses perspectives s'ouvrent à nous pour continuer d'avancer dans ce domaine.

Perspectives court terme :

L'industrialisation de notre outil de planification automatique à l'échelle de l'entreprise Equans nécessite un travail approfondi visant à réduire les pertes et à harmoniser les données d'entrées issues du chiffrage et de la maquette numérique BIM. De plus, la solution finale devra intégrer toutes les fonctionnalités [98] décrites dans la spécification des besoins utilisateurs (cf. 4.4) y compris celles relatives au suivi de l'avancement. Ainsi, l'utilisation de notre application devrait s'étendre aux autres phases des rituels LPS[®] en intégrant par exemple la levée des contraintes des tâches, le planification hebdomadaire et le suivi de l'indicateur PPC [86]. Par ailleurs, afin de faciliter l'adoption par les futurs utilisateurs, il est essentiel de concevoir une interface intuitive et ergonomique.

Perspectives moyen terme :

La solution proposée pourrait être à l'avenir combinée avec d'autres outils de suivi d'avancement en temps réel et automatique. Ces outils utilisent des méthodes avancées qui combinent des moyens de collecte des données de progressions tels que les drones et les viseurs de casque, ainsi que des algorithmes d'extraction et de mesure de cette progression comme l'algorithme Structure from Motion (SfM), Convolutional Neural Network (CNN), Support Vector Machines (SVM), ... [112]. Par ailleurs, les heures consommées par tâche saisies dans l'outil, de manière manuelle ou automatique, pourraient être utilisées pour affiner les temps d'installations unitaires des équipements de la base nationale des articles, en utilisant des techniques de big data.

Perspectives long terme :

Il serait pertinent d'étendre l'automatisation de la planification via notre outil à d'autres étapes du projet impliquant d'autres acteurs tels que les études, l'approvisionnement, la fabrication, les essais et la logistique.

Ces avancés nécessiteraient l'exploitation des données massives provenant de diverses sources opérationnelles et de différentes parties prenantes du projet. L'intégration de ces données permettrait une meilleure visibilité et une coordination plus efficace des activités liées à la construction, ce qui contribuerait à l'industrialisation de ce secteur. Selon des recherches récentes, l'amélioration de la résilience de la chaîne d'approvisionnement de la construction (construction supply chain CSC) apporterait des avantages significatifs dans ce processus et nécessiterait une attention accrue à l'avenir [113]. Ce concept définit la capacité de la CSC à résister aux fluctuations en ajustant et en optimisant de manière dynamique les ressources des projets de construction afin de faire face aux impacts des facteurs incertains [114]. Pour atteindre cette résilience, les entreprises de construction doivent disposer de fortes capacités organisationnelles, managériales et technologiques [113].

Sur le plan organisationnel, il est nécessaire d'étudier et de prendre en compte l'ensemble des interactions entre les acteurs principaux d'un projet sur tout son cycle de vie. Sur le plan managérial, les études dans le domaine de la gestion de la chaîne d'approvisionnement de la construction doivent s'étendre au-delà de la gestion des matériaux, des équipements, des risques et de la construction écologique. Enfin, sur le plan technologique, l'adoption accélérée des nouvelles innovations émergentes telles que l'intelligence artificielle, le jumeau numérique et les outils d'intégration de données multi-sources, ainsi que l'utilisation des techniques déjà établies comme la RFID, le BIM et la blockchain, permettraient d'améliorer la résilience de la CSC [113].

Un exemple concret serait l'intégration et la structuration des données massives et multi-sources des projets dans un entrepôt de données adapté. Les entrepôts de données, communément appelés «Data Warehouse » sont des plateformes utilisées pour recueillir, ordonner, journaliser et stocker des informations provenant de multiples bases de données opérationnelles, fournissant ainsi une base pour l'aide à la décision en entreprise [115]. Dans le contexte de la gestion de projets de construction, les données sources proviennent des systèmes opérationnels tels que les systèmes d'estimations, de suivi des performances du projet, de gestion des contrats ou des nomenclatures d'équipements (voir Figure 56). Ces données sont ensuite chargées et synchronisées dans l'entrepôt de données du projet (Project Data Warehouse PDW) en suivant le processus ETL (Extract Transform Load). L'entreprise peut créer des sous-ensembles de cet entrepôt de données (Data mart) pour fournir des données spécifiques à un besoin ou à un groupe particulier d'utilisateurs.

Ces données structurées sont ensuite exploitées pour le reporting, l'exploration de données (data mining) et la réalisation de diverses analyses, facilitant ainsi la prise de décisions stratégiques.

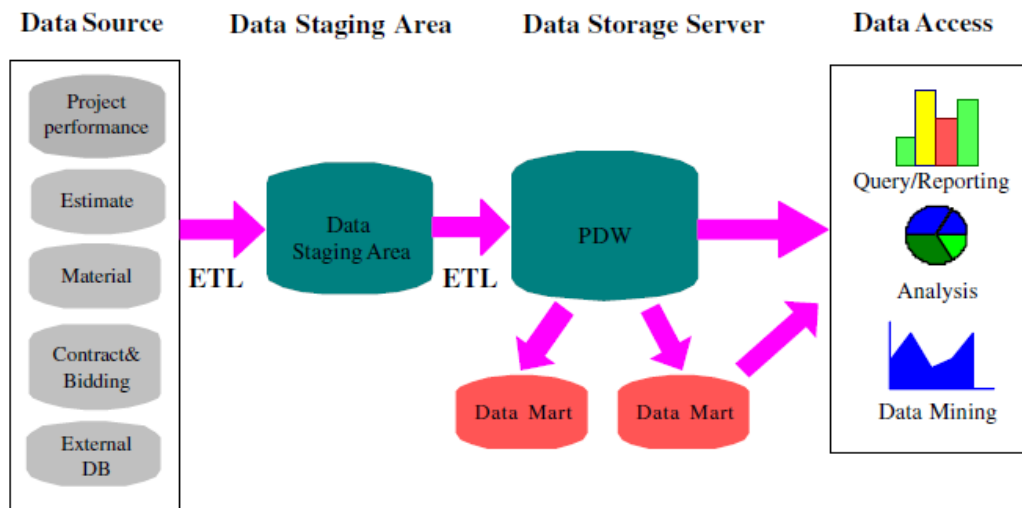


Figure 56: Architecture d'un entrepôt de données de projet de construction [115].

Malgré les avantages et la popularité de cette technologie dans l'industrie manufacturière, l'utilisation des entrepôts de données reste encore très limitée dans le secteur de la construction. Toutefois, il est convaincant que l'adoption de cette technologie et d'autres innovations émergentes peut permettre une évolution disruptive dans la transformation du secteur de la construction, lui permettant ainsi de rester compétitif. Cette évolution vers une nouvelle ère du Lean Construction, caractérisée par l'intelligence et l'interconnexion entre les machines, les humains et le matériel, est souvent appelée l'ère du Smart Lean par certains experts, tels que Demir [116].

Références

- [1] United Nations, «World population projected to reach 9.6 billion by 2050 – UN report,» 2013.
- [2] Equans France, «Brochure Equans France,» 2021.
- [3] Equans, «Nos fondamentaux,» 2021.
- [4] Equans, «Contenus nationaux Qualité,» 2022.
- [5] DSO Equans, «Orga DSO_nov22,» 2022.
- [6] DSO Equans, «Le Lean chez Equans,» 2022.
- [7] DSO Equans, «Feuille de route Organisation & Transformation 2022».
- [8] Noah Smith, «What happened to construction productivity? Part 1: Measurement,» *Noahpinion*, 30 Septembre 2021.
- [9] Ministère chargé du logement, «L'industrialisation de la construction,» 2021.
- [10] G. Demonet, «La transformation digitale, un gisement de productivité dans la construction,» 2019.
- [11] Center for Integrated facility engineering, «Application of new production philosophy to construction,» 1992.
- [12] McCarthy, *Production Management Across a Programme of Design Projects*, 2016.
- [13] R. Alfredo, L. Nguyen et K. D. Kashiwagi Jacob, «Identifying the Global Performance of the Construction Industry,» *Journal for the Advancement of Performance Information & Value*, 2016.
- [14] S. Aziz, R. Osei-Kyei et H. Mary, «A critical analysis of safety performance indicators in construction,» *International Journal of Building Pathology and Adaptation*, 2020.
- [15] D. Patrick, *Le Lean appliqué à la construction*, Eyrolles, 2016.
- [16] Mckinsey & Company, «Digital America: A tale of the haves and have-mores,» 2015.
- [17] J. Novak, M. Purta, T. Marciniak, K. Ignatowicz, K. Rozenbaum et K. Yearwood, «The rise of Digital Challengers,» Digital Mckinsey, 2018.

- [18] B. Dave, «Developing a Construction Management System Based on Lean Construction and Building Information Modeling,» Haifa, Israel, 2013.
- [19] D. Bergerot, «ERP quelles promesses,» La Lettre d’ADELI, 2012.
- [20] O. Tatari, D. Castro-Lacouture et M. J. Skibniewski, «Current state of construction enterprise information systems: survey research,» *Construction Innovation*, pp. 310-319, 2007.
- [21] M. N. M. Nasrun, B. Nazim et B. A. Yusni, « Impact of Fragmentation Issue in Construction Industry: An Overview,» chez *MATEC Web of Conferences*, 2014.
- [22] E. Poirier, D. Forgues et S. Staub-French, «Collaboration through innovation: implications for expertise in the AEC sector,» *Construction Management and Economics*, 2016.
- [23] D. F. & S. S.-F. Erik Poirier, «Collaboration through innovation: implications for expertise in the AEC sector,» *Construction Management and Economics*, 2016.
- [24] Kraemer, Henrich, Koskela et M. Kagioglou, «4th International Salford Centre for Research and Innovation Symposium,» chez *How Construction Flows Have Been Understood in Lean Construction*, Salford, United Kingdom, 2007.
- [25] A. Mossman, «26th Annual Conference of the International Group for Lean Construction,» chez *What is lean construction: another look.*, Chennai, India, 2018.
- [26] Koskela, Howell, Ballard et Tommelein, *Design and Construction: Building in Value*, Oxford, UK: Elsevier, 2002.
- [27] Diekmann, James, M. Krewedl, J. Balonick, T. Stewart et S. Won, «Application of Lean Manufacturing Principles to construction,» CII Report 191, 2004.
- [28] Project Production Systems Laboratory, «P2SL Glossary,» [En ligne]. Available: <https://p2sl.berkeley.edu/glossary/knowledge-center-glossaryatoz/>.
- [29] P. Tzortropoulos, M. Kagioglou et L. Koskela, *Lean Construction: Core concepts and new frontiers*, Routledge, 2020.
- [30] I. Nonaka et H. Takeuchi, *The Knowledge-Creating Company: How Japanese Companies Create the Dynamics of Innovation*, OUP USA, 1995.
- [31] H. G. Ballard, «The Last Planner System of Production Control,» Birmingham, 2000.

- [32] Lean Construction Institute, «The Last Planner System Overview,» [En ligne]. Available: <https://www.leanconstruction.com.au/blog/who-or-what-is-the-last-planner-and-why-should-i-care/attachment/the-last-planner-system-overview/#>.
- [33] A. Schöttle, «27th Annual Conference of the International Group for Lean Construction (IGLC),» chez *The Beauty of a Phase-Overlapping Last Planner System® With Incorporated Takt*, 2019.
- [34] M. Sbiti, K. Beddiar, D. Beladjine et R. Perrault, «Field management solutions supporting foreman executive tasks,» chez *23th International International Conference on Lean Construction, Lean Principles and Theory (ICLCLPT 2021)*, Amsterdam , 2021.
- [35] Batiscript, «Levée des réserves à l’heure du numérique,» 01 Octobre 2021. [En ligne]. Available: <https://www.batiscript.com/gestion-reserves-numerique/>.
- [36] D. Selim-Tugra, «The Future of Lean Construction,» 25 Septembre 2022. [En ligne]. Available: <https://leanconstructionblog.com/the-future-of-lean-construction.html>.
- [37] E. Douglas, «Augmenting Human Intellect: A Conceptual Framework,» *Stanford Research Institute*, 1962.
- [38] W. Jabi, *Parametric Design for Architecture*, Laurence King Publishing, 2013.
- [39] C. Eastman, «General purpose building description systems,» *Computer-Aided Design*, 1976.
- [40] Naim, «Generative Design for BIM,» 11 Mars 2015. [En ligne]. Available: <https://yeswebim.wordpress.com/2015/03/11/history-of-bim/>.
- [41] A. Borrmann, M. König, C. Koch et J. Beetz, *Building Information Modeling : Technology Foundations and Industry Practice*, Switzerland: Springer, 2018.
- [42] B. Abbasnejad et H. I. Moud, «BIM and Basic Challenges Associated with its Definitions, Interpretations and Expectations.,» *International Journal of Engineering Research and Applications*, 2013.
- [43] NIBS, «National BIM Standard Version 1 - Part 1: Overview, Principles, and Methodologies,» Décembre 2007. [En ligne]. Available: https://buildinginformationmanagement.files.wordpress.com/2011/06/nbimsv1_p1.pdf.

- [44] R. Sacks, G. L. Charles Eastman et P. Teilholz, *BIM Handbook: A Guide to Building Information Modeling for Owners*, USA: John Wiley & Sons: Hoboken, 2008.
- [45] Biblus, «Modeling, Model and Management: the three M's of BIM and the right BIM tools,» 1 Avril 2021. [En ligne]. Available: <https://biblus.accasoftware.com/en/modeling-model-and-management-the-three-ms-of-bim-and-the-right-bim-tools/>.
- [46] K. Beddiar et F. Imbault, *BIM et énergétique du bâtiment: De la conception à l'exploitation*, Dunod, 2017.
- [47] R. Volk, J. Stengel et F. Schultmann, «Building Information Modeling (BIM) for existing buildings — Literature,» *Automation in Construction*, p. 109–127, 2014.
- [48] F. Jernigan, *BIG BIM little bim: The Practical Approach to Building Information Modeling*, 2007.
- [49] buildingSmart, «Qu'est-ce que les IFC? (Industru Foundation Classes),» [En ligne]. Available: <https://bimstandards.fr/travailler-avec-les-ifc/qu-est-ce-que-les-ifc/>.
- [50] A. Koutamanis, «Dimensionality in BIM: Why BIM cannot have more than four dimensions,» *Automation in Construction*, 2020.
- [51] R. Sacks, L. Koskela, B. A. Dave et R. Owen, «Interaction of Lean and Building Information Modeling in Construction,» *JOURNAL OF CONSTRUCTION ENGINEERING AND MANAGEMENT*, pp. 968-980, 2010.
- [52] B. J. Gledson et D. Greenwood, «The adoption of 4D BIM in the UK construction industry: An Innovation diffusion approach,» *Engineering Construction & Architectural Management*, 2017.
- [53] M. Johansson, M. Roupé et P. Bosch-Sijtsema, «Real-time visualization of building information models (BIM),» *Automation in Construction*, 2015.
- [54] M. Hugo, «Maquette numérique 3D pour la construction : visualiser les connaissances métier et interagir avec des dispositifs immersifs,» Vélizy, 2016.
- [55] S. Boeykens et K. Nys, «International Association for Shell and Spatial Structures (IASS) Symposium,» chez *Interactive bi-directional BIM model and application linking*, Amsterdam (Netherlands), 2015.

- [56] I. D. Tommelein et S. Gholami, «20th Annual Conference of the International Group for Lean Construction,» chez *Root causes of clashes in building information models*, 2012.
- [57] F. Leite, B. Akinci et J. H. Garrett, «Construction Research Congress,» chez *Identification of Data Items Needed for Automatic Clash Detection in MEP Design Coordination*, 2009.
- [58] M. Leonard, «Le BIM 4D et la détection des interférences,» Montréal, 2012.
- [59] D. T. P. Dang et M. Tarar, «Impact of 4D modeling on construction planning process,» Göteborg, Sweden, 2012.
- [60] K. Whitlock, F. H. Abanda, M. B. Manjia, C. Pettang et G. E. Nkeng, «4D BIM for Construction Logistics Management,» *CivilEng MDPI*, 2021.
- [61] H. Y. K. M. G.-F. Fouad Amer, «Automated Methods and Systems for Construction Planning and Scheduling: Critical Review of Three Decades of Research,» *Journal of Construction Engineering and Management*, 2021.
- [62] B. De Vries et J. Harink, «Generation of a construction planning from a 3D CAD model,» *Automation in Construction*, 2007.
- [63] M. Kataoka, «Automated generation of construction plans from primitive geometries,» *Journal of Construction Engineering Management*, 2008.
- [64] T. Omar et M. L.Nehdi, «Data acquisition technologies for construction progress tracking,» *Automation in Construction*, 2016.
- [65] A. Braun, S. Tuttas, U. Stilla et A. Borrmann, BIM-Based Progress Monitoring. In *Building Information Modeling - Technology Foundations and Industry Practice*, Springer, 2018.
- [66] A. Guerriero, S. Kubicki, F. Berroir et C. Lemaire, « International Conference on Engineering, Technology and Innovation (ICE/ITMC),» chez *BIM-enhanced collaborative smart technologies for LEAN construction processes*, Madeira, Portugal, 2017.
- [67] F. Bosché, «Plane-based registration of construction laser scans with 3D/4D building models,» *Advanced Engineering Informatics*, 2015.
- [68] B. MediaConstruct, «Comment rédiger une convention BIM,» 2018.
- [69] J. Teizer et J. Melzner, BIM for Construction Safety and Health in Building Information Modeling : *Technology Foundations and Industry Practice*, Springer, 2015.

- [70] A. F. Onyango, «Interaction between Lean Construction and BIM. How effectiveness in production can be improved if lean and BIM are combined in the design phase: A literature review,» STOCKHOLM, SWEDEN, 2016.
- [71] L. Khemlani, «AECbytes,» 06 Mars 2009. [En ligne]. Available: https://www.aecbytes.com/feature/2009/Sutter_IPDCaseStudy.html.
- [72] B. D. Koskela, A. Kiviniemi, P. Tzortzopoulos et R. Owen, Implementing lean in construction : lean construction and BIM, CIRIA, 2013.
- [73] G. Ningappa, BIM a Lean Tool?: Use of Lean and Building Information Modeling (BIM) in the Construction Process; Does BIM make it Leaner?, Lambert Academic Publishing, 2011.
- [74] M. Tauriainen, P. Marttinen, B. Dave et L. Koskela, «The Effects of BIM and Lean Construction on Design Management Practices,» *Procedia Engineering*, 2016.
- [75] M. Sbiti, K. Beddiar, D. Beladjine, R. Perrault et B. Mazari, «Toward BIM and LPS Data Integration for Lean Site Project Management: A State-of-the-Art Review and Recommendations,» *Buildings, MDPI*, 2021.
- [76] R. Sacks, M. Treckmann et O. Rozenfeld, «Visualization of Work Flow to Support Lean Construction,» *Journal of Construction Engineering and Management*, 2009.
- [77] H. J. Choo, I. D. Tommelein, G. Ballard et T. R. Zabelle, «WORKPLAN: Constraint-based database for work package scheduling,» *J. Constr. Eng. Manag*, pp. 125, 151–160, 1999.
- [78] D. K. Chua, S. L. Jun et B. S. Hwee, «INTEGRATED PRODUCTION SCHEDULER FOR CONSTRUCTION LOOK-AHEAD PLANNING,» 1999.
- [79] D. K. H. Chua, J. Shen et S. H. Bok, «Constraint-Based Planning with Integrated Production Scheduler over Internet,» *Journal of Construction Engineering and Management*, 2003.
- [80] E. Sriprasert et N. Dawood, «Multi-constraint information management and visualisation for collaborative planning and control in construction,» *Electronic Journal of Information Technology in Construction*, 2003.
- [81] A. Khanzode, M. A. Fischer, D. Reed et G. Ballard, «A Guide to Applying the Principles of Virtual Design & Construction (VDC) to the Lean Project Delivery Process,» 2006.

- [82] R. Fosse, G. Ballard et M. Fischer, «25th Annual Conference of the International Group for Lean Construction,» chez *Virtual Design and Construction: Aligning BIM and Lean in Practice*, Heraklion, Greece, 2017.
- [83] R. Sacks, R. Barak, B. Belaciano, U. Gurevich et E. Pikas, «KanBIM Workflow Management System : Prototype implementation and field testing,» *Lean Construction Journal*, 2013.
- [84] R. Sacks, M. Radosavljevic et R. Barak, «Requirements for Building Information Modeling based Lean Production Management Systems for Construction,» *Automation in Construction*, 2010.
- [85] L. Khemlani, «VisiLean: BIM Integrated Lean Construction Planning,» 26 Mai 2021. [En ligne]. Available: <https://www.aecbytes.com/review/2021/VisiLean.html>.
- [86] C. P. Schimanski, C. Marcher, G. P. Monizza et D. T. Matt, «The Last Planner® system and building information modeling in construction execution: From an integrative review to a conceptual model for integration,» *Applied Sciences, MDPI*, 2020.
- [87] H.-W. Wang, J.-R. Lin et J.-P. Zhang, «Work package-based information modeling for resource-constrained scheduling of construction projects,» *Automation in Construction*, 2020.
- [88] J. W. Creswell et J. D. Creswell, *Research Design : Qualitative, Quantitative, and Mixed Methods Approaches*, SAGE Publications, Inc, 2017.
- [89] L. Kohn et W. Christiaens, *Reflets et perspectives de la vie économique*, 2014.
- [90] Dainty, «A review and critique of construction management research methods,» pp. 1533-1543, 2007.
- [91] H. Fondin, *Documentaliste-Sciences de l'Information*, 2001.
- [92] Savoie-Zajc, *Dictionnaire des méthodes qualitatives en sciences humaines et sociales*, Armand Collin., 1996.
- [93] W. James, *Pragmatism and Four Essays From the Meaning of Truth.*, Meridian books, 1960.
- [94] K. A. Piirainen et R. A. Gonzalez, «Seeking Constructive Synergy: Design Science and the Constructive Research Approach,» chez *Proceedings of the 8th international conference on Design Science at the Intersection of Physical and Virtual Design*, 2013.

- [95] L. Kari, Case study research in logistics, Publications of the Turku School of Economics and Business Administration, 2003.
- [96] N. Pouillard, «Comment rédiger les spécifications fonctionnelles de votre projet ?,» 10 Mai 2022. [En ligne]. Available: <https://www.appvizer.fr/magazine/operations/gestion-de-projet/specifications-fonctionnelles>.
- [97] C. P. Schimanski, N. L. Pradhan, D. Chaltsev, G. P. Monizza et D. T. Matt, «Integrating BIM with Lean Construction approach: Functional requirements and production management software,» *Automation in Construction*, 2021.
- [98] M. Sbiti, D. Beladjine, K. Beddiar et B. Mazari, «Leveraging Quantity Surveying Data and BIM to Automate Mechanical and Electrical (M & E) Construction Planning,» *Applied Sciences, MDPI*, 2022.
- [99] Deneuille, «Planning prévisionnel des travaux du CCI de Rennes indice B du 28/07/2021,» 2021.
- [100] P. Smith, «29th World Congress International Project Management Association (IPMA),» chez *Project cost management with 5D BIM*, Westin Playa Bonita, Panama, 2015.
- [101] A. B. Arago, J. R. Hernando, F. J. L. Saez et J. C. Bertran, «Quantity surveying and BIM 5D. Its implementation and analysis based on a case study approach in Spain,» *Journal of Building Engineering*, 2021.
- [102] W. A. Balkhy, R. Sweis et Z. Lafhaj, «Barriers to Adopting Lean Construction in the Construction,» *Building, MDPI*, 2021.
- [103] Nemiche, «Analyse et conception des systèmes d'information,» 2009.
- [104] K. Zampieri et S. Rivière, 2018.
- [105] The Algorists, «Topological Sort : DFS, BFS and DAG,» 28 Novembre 2017. [En ligne]. Available: <https://efficientcodeblog.wordpress.com/2017/11/28/topological-sort-dfs-bfs-and-dag/>.
- [106] C. Solnon, «Théorie des graphes et optimisation dans les graphes,» [En ligne]. Available: <https://perso.liris.cnrs.fr/christine.solnon/polyGraphes.pdf>.

- [107] S. Hartmann et D. Briskorn, «An updated survey of variants and extensions of the resource-constrained project scheduling problem.,» *European Journal of Operational Research*, 2022.
- [108] S. T. Giraldo, R. Cardin, S. E. Restrepo et D. Pino, *Recherche Opérationnelle Appliquée à la Gestion Industrielle*, Industrial Optimisation Press, 2016.
- [109] M. Ç. Mutlu, «A brand and bound algorithm for resource leveling problem,» Middle East, 2010.
- [110] B. MerdjaouiIdir et B. Belaidi, «Journée de Mécanique JM'2006, EM Polytechnique,» chez *Optimisation Multi-Objectifs des paramètres d'usinage par Algorithmes Génétiques*, Bordj El ahri Algiers, 2006.
- [111] Hevner, A. R, T. Salvatore, Salvatore, Park, J. Park, Ram et Sudha, «Design Science in Information Systems Research,» *Management Information Systems Quarterly*, 2004.
- [112] S. U. Rehman, Muhammad, M. T. Shafiq et F. Ullah, «utomated Computer Vision-Based Construction Progress Monitoring: A Systematic Review,» *Buildings MDPI*, 2022.
- [113] L. Liao, C. Yang et L. Quan, «Construction supply chain management: A systematic literature review and future development,» *Journal of Cleaner Production*, 2023.
- [114] M. M. Queiroz, S. F. Wamba, C. J. C. Jabbour et M. C. Machado, «Supply chain resilience in the UK during the coronavirus pandemic: A resource orchestration perspective,» *International Journal of Production Economics* , 2022.
- [115] T. Rujirayanyong et J. J. Shi, «A project-oriented data warehouse for construction,» *Automation in Construction*, 2006.
- [116] S.-T. Demir, «The future of Lean Construction,» 25 Septembre 2022. [En ligne]. Available: <https://leanconstructionblog.com/the-future-of-lean-construction.html>.
- [117] IREM de Lyon, «Qu'est ce qu'un graphe ?,» 2018. [En ligne]. Available: https://math.univ-lyon1.fr/irem/Formation_ISN/formation_parcours_graphes/graphe/1_notion_graphe.html.
- [118] Oxford Economics, «Future of Construction: A Global forecast for construction to 2030,» 2021.
- [119] COLEO, «Quelle est la part des gaspillages sur chantiers ?,» 12 Mai 2020. [En ligne]. Available: <https://www.coleo.co/article-quelle-est-la-part-des-gaspillages-sur-chantiers/>.

- [120] Kostango, «3M (Muda, Mura, Muri),» [En ligne]. Available: <https://www.kostango.com/definition/3m-muda-mura-muri>.
- [121] Schonberger Richard J, World class manufacturing. The Free Press, New York. 253 p., New York: The Free Press, 1986.
- [122] Jeffrey K. Liker, The Toyota Way: 14 Management Principles from the World's Greatest Manufacturer, McGraw-Hill , 2004.
- [123] A. Fakhimi, J. M. Sardroud et A. Salman, «How can Lean, IPD and BIM Work Together?,» chez *33rd International Symposium on Automation and Robotics in Construction*, 2016.
- [124] DSI Equans France, «Notre Patrimoine & Feuille de route».
- [125] ITD, «Plaquette ITD compacte».
- [126] SkyBIM, *SkyBIM Cloud based management & real-time costing of BIM projects*, 2013.
- [127] Y. Ibrahim, T. Lukins, X. Zhang, E. Trucco et A. Kaka, «Towards automated progress assessment of workpackage components in construction projects using computer vision,» *Advanced Engineering Informatics*, 2009.
- [128] H. Kim, K. Anderson, S. Lee et J. Hildreth, «Generating construction schedules through automatic data extraction using open BIM (building information modeling) technology,» *Automation in Construction*, 2013.
- [129] H. Liu et M. Al-Hussein, «BIM-based integrated approach for detailed construction scheduling under resource constraints,» *Automation in Construction*, 2015.

Annexes

Annexe 1 : Extrait du contenu de la table t_level

phpMyAdmin - Serveur: MySQL:3306 - Base de données: schedule_data - Table: t_level

Affichage des lignes 0 - 10 (total de 11, traitement en 0,0007 seconde(s))

```
SELECT * FROM `t_level`
```

	id_level	end_availability	name_building	level_name	starting_availability
<input type="checkbox"/>	1	2023-06-16	CCI	R+1	2022-10-07
<input type="checkbox"/>	2	2023-08-07	CCI	R+2	2022-11-08
<input type="checkbox"/>	3	2023-07-31	CCI	R+3	2022-12-08
<input type="checkbox"/>	4	2023-09-13	CCI	R+4	2023-02-28
<input type="checkbox"/>	5	2023-09-27	CCI	R+5	2023-03-28
<input type="checkbox"/>	6	2023-10-30	CCI	R+6	2023-04-24
<input type="checkbox"/>	7	2023-11-07	CCI	R+7	2023-05-10
<input type="checkbox"/>	8	2023-05-30	CCI	RDC	2022-08-02
<input type="checkbox"/>	9	2023-09-25	CCI	RDJ	2022-06-24
<input type="checkbox"/>	10	2023-08-28	CCI	VS	2022-05-10
<input type="checkbox"/>	11	2023-08-28	CCI	TOUS	2022-05-10

Annexe 2 : Extrait du contenu de la table t_article

phpMyAdmin - Serveur: MySQL:3306 - Base de données: schedule_data - Table: t_article

	id_arti	description	procurement_leadti	reference	unit	unit_co	unit_ti	id_grc
		Type : 1 ...						
<input type="checkbox"/>	14	Aérotherme hélicoïde Marque : France AIR	2	AER EC-015,3KW/2000 u	373.38	4	23	
		Type : 2 ...						
<input type="checkbox"/>	15	Aérotherme hélicoïde Marque : France AIR	2	AER EC-018,1KW/1800 u	391.68	4	23	
		Type : 3 ...						
<input type="checkbox"/>	16	Aérotherme hélicoïde Marque : France AIR	2	AER EC-020,3KW/3500 u	442.57	5	23	
		Type : 1 ...						
<input type="checkbox"/>	17	Aérotherme hélicoïde Marque : France AIR	2	AER EC-022,3KW/1700 u	422.4	4	23	
		Type : 4 ...						
<input type="checkbox"/>	18	Aérotherme hélicoïde Marque : France AIR	2	AER EC-024,3KW/3400 u	457.41	5	23	
		Type : 2 ...						
<input type="checkbox"/>	19	Aérotherme hélicoïde Marque : France AIR	2	AER EC-032,4KW/3100 u	472.38	5	23	
		Type : 3 ...						
<input type="checkbox"/>	20	Aérotherme hélicoïde Marque : France AIR	2	AER EC-034,4KW/5300 u	643.15	6	23	
		Type : 1 ...						
<input type="checkbox"/>	21	Aérotherme hélicoïde Marque : France AIR	2	AER EC-036,8KW/2800 u	521.76	5	23	
		Type : 4 ...						
<input type="checkbox"/>	22	Aérotherme hélicoïde Marque : France AIR	2	AER EC-044,4KW/5200 u	664.86	6	23	
		Type : 2 ...						
<input type="checkbox"/>	23	Aérotherme hélicoïde Marque : France AIR	2	AER EC-051,6KW/4600 u	712.79	6	23	
		Type : 3 ...						

Annexe 3 : Extrait du contenu de la table t_level_article

Affichage des lignes 0 - 24 (total de 4575, traitement en 0,0003 seconde(s))

SELECT * FROM `t_level_article`

Options

	id_level_article	quantity	id_article	id_level	system	local
<input type="checkbox"/>	1	2	3521	6	EC	A
<input type="checkbox"/>	2	2	5377	6	EC	A
<input type="checkbox"/>	3	2	3969	6	EC	A
<input type="checkbox"/>	4	10	4657	6	EC	A
<input type="checkbox"/>	5	1	4657	6	EC	D
<input type="checkbox"/>	6	24	4657	6	EC	D
<input type="checkbox"/>	7	2	3521	6	EC	A
<input type="checkbox"/>	8	2	5377	6	EC	A
<input type="checkbox"/>	9	2	3969	6	EC	A
<input type="checkbox"/>	10	10	4657	6	EC	A
<input type="checkbox"/>	11	1	4657	6	EC	D
<input type="checkbox"/>	12	8	4657	6	EC	D
<input type="checkbox"/>	13	1	3521	6	EC	A
<input type="checkbox"/>	14	1	5377	6	EC	A
<input type="checkbox"/>	15	1	3969	6	EC	A

Annexe 4 : Extrait du contenu de la table t_group

Affichage des lignes 0 - 24 (total de 496, traitement en 0,0022 seconde(s))

SELECT * FROM `t_group`

Options

	id_group	description	family	name_group	speciality	super_family
<input type="checkbox"/>	1	ARMOIRE DE CLIMATISATION HYGIENE	ACL	ACH	CVC	GROS MATERIEL
<input type="checkbox"/>	2	ARMOIRE DE CLIMATISATION	ACL	ACL	CVC	GROS MATERIEL
<input type="checkbox"/>	3	ACCESSOIRES SANITAIRES	ACS	ACS	PLB	TERMINAUX
<input type="checkbox"/>	4	ARMOIRE DE TOILETTE	ACS	ART	PLB	TERMINAUX
<input type="checkbox"/>	5	BARRE DE RELEVAGE	ACS	BRR	PLB	TERMINAUX
<input type="checkbox"/>	6	DISTRIBUTEUR SACHET HYGIENIQUE	ACS	DSF	PLB	TERMINAUX
<input type="checkbox"/>	7	DISTRIBUTEUR PAPIER	ACS	DSP	PLB	TERMINAUX
<input type="checkbox"/>	8	DISTRIBUTEUR DE SAVON	ACS	DSS	PLB	TERMINAUX
<input type="checkbox"/>	9	DISTRIBUTEUR SERVIETTE PAPIER	ACS	DSV	PLB	TERMINAUX
<input type="checkbox"/>	10	MAIN COURANTE	ACS	MCR	PLB	TERMINAUX
<input type="checkbox"/>	11	MIROIR	ACS	MIR	PLB	TERMINAUX
<input type="checkbox"/>	12	PORTE BALAI ET BALAI	ACS	PBB	PLB	TERMINAUX
<input type="checkbox"/>	13	POUBELLE	ACS	PBM	PLB	TERMINAUX
<input type="checkbox"/>	14	PORTE SAVON	ACS	PSV	PLB	TERMINAUX
<input type="checkbox"/>	15	PATERE	ACS	PTR	PLB	TERMINAUX

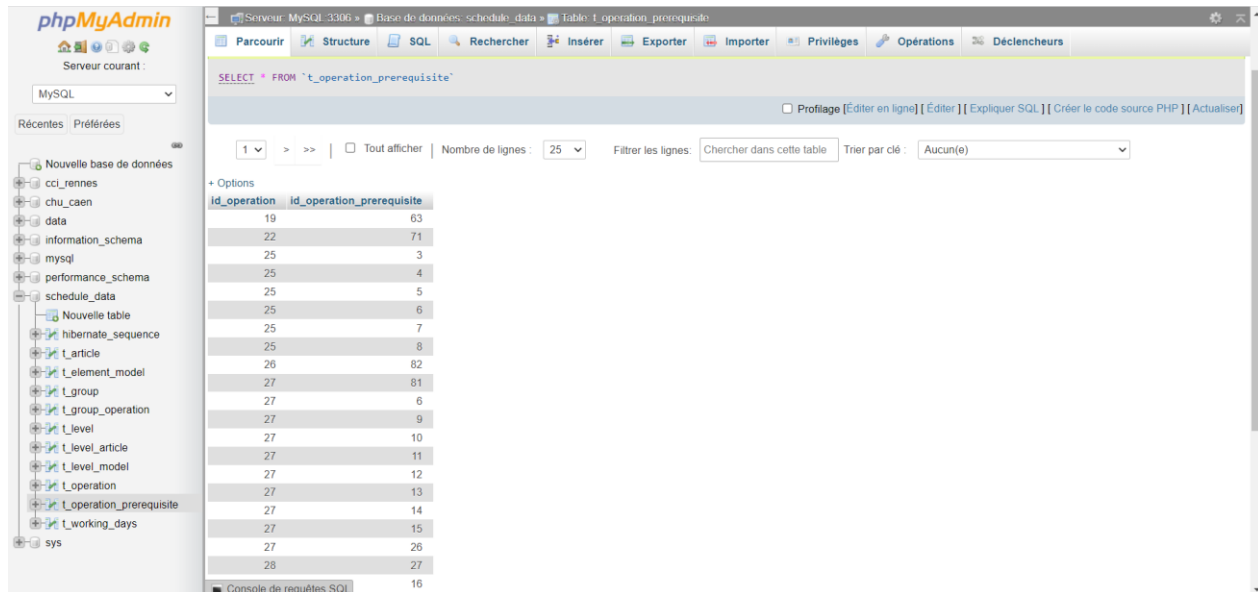
Annexe 5 : Extrait du contenu de la table t_operation

id_operati	operation	operation_type	parent	prerequisite_milestone
18	Retrait des états	P	Prérequis à la mise en œuvre des réseaux	2022-02-28
19	Pose des armatures de faux-plafond	P	Prérequis à la mise en œuvre des terminaux	2022-02-28
20	Peinture	P	Prérequis à la mise en œuvre des terminaux	2022-02-28
21	Zone à accès limité	P	Prérequis à la mise en œuvre des terminaux	2022-09-01
22	Pose du faux plafond	P	Prérequis à la mise en œuvre des terminaux	2022-06-01
23	Livraison des documents d'études	P	Prérequis à la mise en service	2022-02-01
24	Finitions lot menuiserie	P	Prérequis à la mise en service	2022-03-01
25	Contrôle des réservations non conformes	NULL	Contrôle des réservations non conformes	NULL
26	Réception et contrôle du gros matériel	NULL	Mise en œuvre du gros matériel	NULL
27	Manutention du gros matériel	NULL	Mise en œuvre du gros matériel	NULL
28	Pose et assemblage du gros matériel	NULL	Mise en œuvre du gros matériel	NULL
29	Réception des canalisations peintes, raccords et t...	NULL	Mise en œuvre des réseaux hydrauliques	NULL
30	Manutention des canalisations, raccords et robinet...	NULL	Mise en œuvre des réseaux hydrauliques	NULL
31	Supportage des canalisations	NULL	Mise en œuvre des réseaux hydrauliques	NULL
32	Pose tuyauterie et robinetterie en ligne	NULL	Mise en œuvre des réseaux hydrauliques	NULL
33	Epreuves des tuyauteries	NULL	Mise en œuvre des réseaux hydrauliques	NULL
34	Calorifuge des réseaux hydrauliques	NULL	Mise en œuvre des réseaux hydrauliques	NULL
35	Pose instrumentation	NULL	Mise en œuvre des réseaux hydrauliques	NULL
36	Caufeusement et rebouchage	NULL	Caufeusement et rebouchage	NULL
37	Raccordement hydraulique du gros matériel	NULL	Raccordement des réseaux hydrauliques au gros maté...	NULL
38	Raccordement de trop plein et vidange du gros maté...	NULL	Raccordement des réseaux hydrauliques au gros maté...	NULL
39	Raccordement des évacuations des condensats du ...	NULL	Raccordement des évacuations des condensats du ...	NULL

Annexe 6 : Extrait du contenu de la table t_group operation

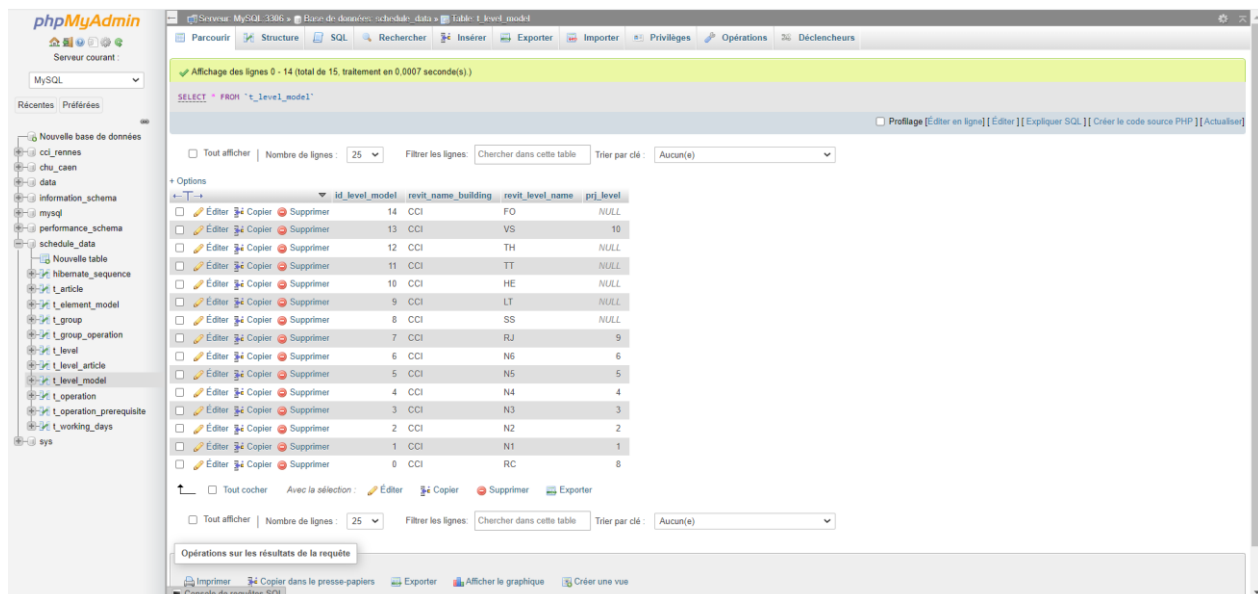
id_group_operation	rate	id_group	id_operation
1	0.08	1	26
2	0.3	1	27
3	0.57	1	28
4	0.05	1	59
5	0.08	2	26
6	0.3	2	27
7	0.57	2	28
8	0.05	2	59
9	0.2	22	41
10	0.2	22	42
11	0.55	22	44
12	0.05	22	70
13	0.02	23	60
14	0.2	23	61
15	0.3	23	62

Annexe 7 : Extrait du contenu de la table t_operation_prerequisite



id_operation	id_operation_prerequisite
19	63
22	71
25	3
25	4
25	5
25	6
25	7
25	8
26	82
27	81
27	6
27	9
27	10
27	11
27	12
27	13
27	14
27	15
27	26
28	27
16	16

Annexe 8 : Extrait du contenu de la table t_level_model



id_level_model	revit_name_building	revit_level_name	pri_level
14	CCI	FO	NULL
13	CCI	VS	10
12	CCI	TH	NULL
11	CCI	TT	NULL
10	CCI	HE	NULL
9	CCI	LT	NULL
8	CCI	SS	NULL
7	CCI	RJ	9
6	CCI	N6	6
5	CCI	N5	5
4	CCI	N4	4
3	CCI	N3	3
2	CCI	N2	2
1	CCI	N1	1
0	CCI	RC	8

Annexe 9 : Extrait du contenu de la table t_element_model

Server: MySQL:3306 » Base de données: schedule_data » Table: t_element_model

Affichage des lignes 0 - 24 (total de 37465, traitement en 0.0012 seconde(s))

SELECT * FROM `t_element_model`

id_element_model	revit_category_element	diameter	revit_id_element	revit_building_name	revit_level_name	quantity	revit_code_repere_element	system	revit_type_element	id_article	id_level_model
0	Équipement de génie climatique		3594805	CCI	N2	1000			VEX 39	0	NULL
1	Équipement de génie climatique		3594809	CCI	N2	1000	CTA		CTA 39	0	NULL
2	Équipement de génie climatique		3595111	CCI	N2	1000	SOC		AXI_SOC_Socde-Beton	0	NULL
3	Équipement de génie climatique		3595350	CCI	N2	1000	CTA		CTA 59	0	NULL
4	Équipement de génie climatique		3595351	CCI	N2	1000	CTA		VEX 59	0	NULL
5	Équipement de génie climatique		3595430	CCI	N2	1000	CTA		VEX 69	0	NULL
6	Équipement de génie climatique		3595542	CCI	N2	1000	CTA		CTA 63	0	NULL
7	Équipement de génie climatique		3595582	CCI	N2	1000	CTA		CTA 64	0	NULL
8	Équipement de génie climatique		3595612	CCI	N2	1000	CTA		CTA 65	0	NULL
9	Équipement de génie climatique		3595929	CCI	N2	1000	SOC		AXI_SOC_Socde-Beton	0	NULL
10	Équipement de génie climatique		3598731	CCI	N2	1000	CTA		CTA 52	0	NULL
11	Équipement de génie climatique		3598743	CCI	N2	1000	CTA		CTA 57	0	NULL
12	Équipement de génie climatique		3598745	CCI	N2	1000	CTA		VEX 53	0	NULL
13	Équipement de génie climatique		3598746	CCI	N2	1000	CTA		VEX 57	0	NULL

Annexe 10 : Extrait du contenu de la table t_working_days

Server: MySQL:3306 » Base de données: schedule_data » Table: t_working_days

Affichage des lignes 0 - 6 (total de 7, traitement en 0.0006 seconde(s))

SELECT * FROM `t_working_days`

id	day	working_hours	status
1	MONDAY	16	1
2	TUESDAY	16	1
3	WEDNESDAY	16	1
4	THURSDAY	8	1
5	FRIDAY	8	1
6	SATURDAY	0	0
7	SUNDAY	0	0

Opérations sur les résultats de la requête

Imprimer Copier dans le presse-papiers Exporter Afficher le graphique Créer une vue

Annexe 11 : Rappel des principes du tri topologique

Le tri topologique consiste à ordonner linéairement les sommets d'un graphe G orienté acyclique tel que si $G = (S, A)$ contient l'arc (u, v) , le sommet u apparaît avant le sommet v [104]. Pour plus de précision, un graphe est composé d'un ensemble de points appelés sommets (S) et d'un ensemble de lignes appelées arêtes ou arcs (A) qui relient certains sommets entre eux [117]. Lorsqu'un graphe ne possède pas de cycle et que ces arcs sont orientés, il est orienté acyclique (voir Figure 57).

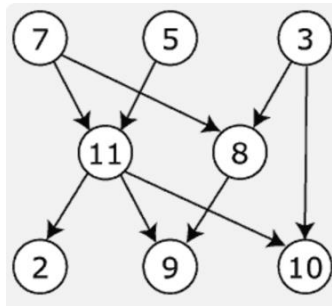


Figure 57: Exemple d'un graphe orienté acyclique

Comme beaucoup d'autres problèmes de graphes, le tri topologique nécessite de parcourir l'ensemble des sommets et des arcs/arêtes d'un graphe. Il existe deux principales stratégies d'exploration (voir Figure 58) :

- le parcours en largeur (Breadth-First Search BFS) qui consiste à explorer les sommets du graphe niveau par niveau, à partir d'un sommet donné.
- le parcours en profondeur (Depth-First Search DFS) qui consiste, à partir d'un sommet donné, à suivre un chemin le plus loin possible, puis à faire des retours en arrière pour reprendre tous les chemins ignorés précédemment.

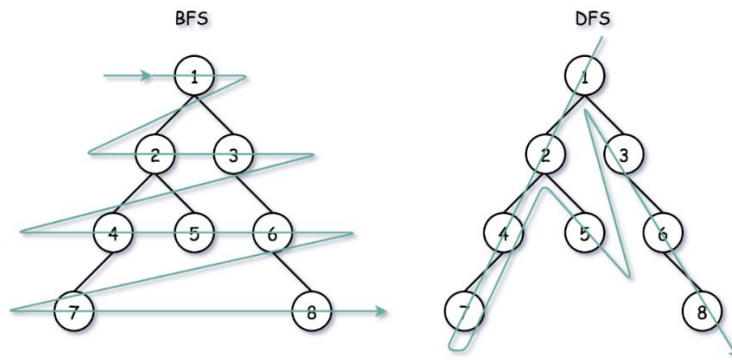


Figure 58: Deux principales techniques d'exploration des sommets d'un graphe (le parcours en largeur BFS et le parcours en profondeur DFS)

Annexe 12 : Grille d'évaluation de notre outil de planification automatique

Evaluation du prototype de la solution d'automatisation de la planification

Background professionnel

- Nom et prénom :
- Poste occupé en entreprise :
- Région :
- Nombre d'années d'expérience :
- Taille des projets pilotés :

6. Votre sensibilité au Lean Construction

Je ne connais pas	J'apprend	J'utilise	Je suis expert	Je forme
-------------------	-----------	-----------	----------------	----------

7. Votre sensibilité au BIM

Je ne connais pas	J'apprend	J'utilise	Je suis expert	Je forme
-------------------	-----------	-----------	----------------	----------

Questions clés :

- La solution traite une vraie problématique rencontrée par les responsables de projets.

Pas du tout d'accord	Pas d'accord	Indécis	D'accord	Tout à fait d'accord
----------------------	--------------	---------	----------	----------------------

- Le besoin auquel répond cette solution est toujours d'actualité.

Pas du tout d'accord	Pas d'accord	Indécis	D'accord	Tout à fait d'accord
----------------------	--------------	---------	----------	----------------------

- La solution est utile pour la planification d'un projet de construction.

Surement pas	Probablement pas	Possible	Très probablement	Surement
--------------	------------------	----------	-------------------	----------

- Les résultats fournis par la solution sont précis et fiables.

Surement pas	Probablement pas	Possible	Très probablement	Surement
--------------	------------------	----------	-------------------	----------

- Le temps de calcul des données de sorties est raisonnable.

Pas du tout d'accord	Pas d'accord	Indécis	D'accord	Tout à fait d'accord
----------------------	--------------	---------	----------	----------------------

- La solution couvre l'ensemble des fonctionnalités indispensables.

Pas du tout d'accord	Pas d'accord	Indécis	D'accord	Tout à fait d'accord
----------------------	--------------	---------	----------	----------------------

- Préciser les modifications à apporter sur l'existant

.....

- Préciser les fonctionnalités manquantes

.....

- Quelles sont, selon vous, les perspectives d'avenir pour cette thématique de recherche ?

.....

- Seriez vous prêt à utiliser cette solution sur un site pilote ?

Surement pas	Probablement pas	Possible	Très probablement	Surement
--------------	------------------	----------	-------------------	----------

- Commentaires généraux

.....
