

# CIGI QUALITA MOSIM 2023

## Planification et optimisation de la logistique de la construction

NADIA BAHRIA<sup>1</sup>, SALIM HEDFI<sup>2</sup>, AMIN CHAABANE<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Université de Tunis El Manar, OASIS  
École Nationale d'Ingénieurs de Tunis (ENIT)  
BP 37, le Belvédère 1002 Tunis - Tunisie  
École Polytechnique Internationale Privée de Tunis, CRI  
Rue du Lac d'Annecy, Tunis 1053 - Tunisie  
[nadia.bahria@enit.utm.tn](mailto:nadia.bahria@enit.utm.tn)

<sup>2</sup> École Polytechnique Internationale Privée de Tunis, CRI  
Rue du Lac d'Annecy, Tunis 1053 - Tunisie  
[salim.hedfi.1@ens.etsmtl.ca](mailto:salim.hedfi.1@ens.etsmtl.ca)

<sup>3</sup>Ecole de Technologie Supérieure  
Montréal, Québec, Canada  
[Amin.Chaabane@etsmtl.ca](mailto:Amin.Chaabane@etsmtl.ca)

---

**Résumé** – La conception manuelle de la chaîne logistique dans un projet de construction peut engendrer une organisation peu efficace qui entraîne des surcoûts et des dépassements de délais. En plus, le manque de coordination entre les différents acteurs de la chaîne logistique ralentit le projet et augmente les coûts. Les méthodes d'optimisation et de planification de la chaîne logistique dans l'industrie de la construction sont moins développées par rapport à l'industrie manufacturière. Ceci souligne l'intérêt à adapter des méthodes existantes dans l'industrie manufacturière au cas de la construction. Une étude des modèles existants dans la littérature nous a permis de développer un nouveau modèle qui sert comme un outil d'aide à la décision et intervient depuis la phase de conception du projet. Il permet aussi l'intégration des différents acteurs et leurs coopérations. Le modèle permet la gestion des phases des projets de construction. Il offre au preneur de décision la possibilité d'avoir une vision globale sur les activités de production, la gestion des livraisons, la gestion des stocks et la gestion des rôles de chaque acteur dans la chaîne logistique.

**Mots clés** – construction modulaire, optimisation, planification, sélection des fournisseurs, aide à la décision.

**Abstract** – The manual design of the supply chain in a construction project can lead to an inefficient organization that leads to additional costs and time overruns. In addition, the lack of coordination between the various actors in the supply chain slows down the project and increases costs. Supply chain optimization and planning methods in the construction industry are less developed compared to the manufacturing industry. This underlines the interest in adapting existing methods in the manufacturing industry in the case of construction. A study of the existing models in the literature allowed us to develop a new model which serves as a decision support tool and intervenes in the design phase of the project. It also allows for the integration of different actors and their cooperation. The model allows the management of construction projects, according to phases. It offers the decision-maker the possibility of having a global vision of production activities, delivery management, inventory management and the management of the roles of each actor in the supply chain.

**Keywords** – modular construction, optimization, planning, supplier selection, decision support.

---

### 1 INTRODUCTION

Au cours de ces dix dernières années, le taux d'urbanisation dans le monde entier est passé de 51.2% en 2010 à 57% en 2022. Cela a engendré l'augmentation de la population urbaine de 3,57 milliards en 2010 à 4,4 milliards en 2022.

Cette croissance se manifeste par la continuité des zones urbaines à étendre leurs réseaux, ce qui a engendré l'augmentation du niveau de complexité des projets de construction. Dans les projets de construction, on trouve des éléments standardisés et partagés. Cependant, un projet de construction peut avoir des caractéristiques qui le rendent unique par rapport aux autres. Parmi ces caractéristiques, on cite : la méthode d'accès au site de construction, le climat où on doit construire notre bâtiment et finalement les réglementations des

régions.

En dépit de leurs caractéristiques, les projets de construction contiennent plusieurs acteurs qui interviennent tout au long du projet. On commence par l'expression du besoin par le client, en passant vers l'entrepreneur principal qui exprime à son tour ce besoin à l'équipe du projet qu'il choisit. Nous avons également les fournisseurs de plusieurs niveaux, et même des sous-traitants qui participent aux projets. Cette diversité et ce niveau de complexité demandent une bonne coordination entre les acteurs du projet afin d'être efficaces et efficaces. Le et al. (2018), Chaabane et al. (2018) et Berden (2017) constatent le besoin d'une intégration importante des différents acteurs de la chaîne pour en améliorer l'efficacité. L'intégration consiste à associer les parties prenantes au processus décisionnel afin de prendre en

compte au plus tôt les différentes contraintes et attentes en jeu.

À travers la littérature, nous avons constaté que le flux d'information dans les projets de construction s'avère être insuffisant, ce qui engendre des retards dans les projets.

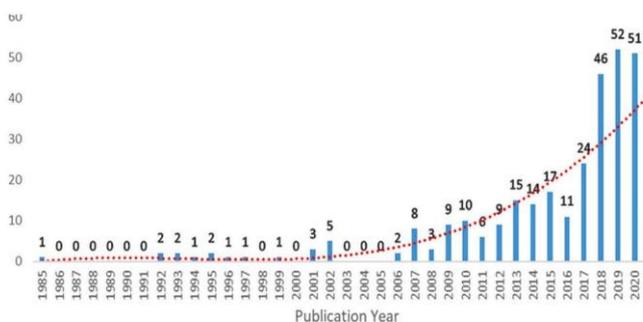
Face à ces défis, l'industrie de construction se trouve dans l'obligation d'introduire de nouvelles technologies dans l'ensemble de ses processus afin de mieux organiser les projets, éviter les dysfonctionnements tout au long de la chaîne logistique et pour optimiser les ressources. C'est pour ce fait que certaines entreprises ont eu recours à la digitalisation et à l'utilisation des outils d'aide à la décision. Ces derniers se manifestent sous la forme d'environnement de développement de produits en temps réel et aussi sous la forme d'outil d'optimisation.

C'est dans cette perspective que s'inscrit ce travail de recherche qui vise à mettre en place un modèle de planification de la chaîne logistique qui permet l'intégration des différents acteurs depuis la phase de conception du produit. Pour ce faire, nous allons étudier quelques modèles traités dans la littérature. Notre objectif est d'offrir à travers le modèle d'optimisation développé, la possibilité au preneur de décisions d'avoir une vision globale sur l'ensemble de la chaîne logistique dans un temps d'exécution convenable afin de prendre la bonne décision au bon moment.

Le reste de cet article est organisé comme suit : la section 2 présente un état de l'art sur le problème étudié. Dans la section 3, le problème traité sera présenté. Le modèle mathématique sera exposé dans la section 4. Dans la section 5, les résultats sont présentés et commentés afin de démontrer l'intérêt de l'optimisation et de la planification de la chaîne logistique de construction. Enfin, la section 6 conclut cet article.

## 2 REVUE DE LA LITTÉRATURE

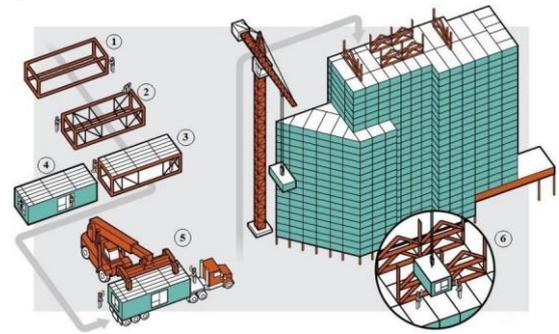
Avant de commencer la revue de la littérature sur la construction modulaire, nous présentons dans la figure 1 les publications des articles qui traitent la thématique de la construction modulaire ainsi que leur évolution depuis les années 1985 vers les années 2021.



**Figure 1. Évolution des publications dans les dernières années (Hussein et al. (2021))**

Nous remarquons que le nombre de publications entre les années 1985 et 2006 qui traite la construction modulaire est très faible ou presque nul. À partir de 2007, la thématique de la construction modulaire commence à être traitée de plus en plus dans la littérature. Dans les années 2018 à 2020, nous constatons l'évolution considérable du nombre de publications sur la construction modulaire et la gestion de la chaîne logistique dans ce type de construction.

La construction modulaire (hors site) est une solution innovante dans le secteur de l'industrie de la construction qui vient combler le besoin en standardisation. Ce concept ressemble ainsi au domaine manufacturier tel que le domaine de l'aéronautique. Selon une nomenclature bien déterminée, on divise une structure entière en un nombre de sections préfabriquées produites dans un environnement de l'usine. Ces sections sont transportées sur le chantier (site de construction) pour être installées directement (Jin et al. 2018). La construction modulaire permet de minimiser les coûts et les pertes de matériaux, offre une meilleure gestion des ressources, optimise la durée du projet, optimise les stocks sur les sites de construction, offre une meilleure qualité et permet finalement une meilleure gestion de la chaîne logistique. Nous présentons un processus de la construction hors site dans la figure 2.



**Figure 2. Les étapes de la construction modulaire**

Nous avons les étapes 1, 2, 3 et 4 qui représentent les étapes de production de notre section préfabriquée. L'étape 5 représente la livraison de la section préfabriquées vers le site de construction. L'étape 6 est la dernière étape, c'est l'installation de la section préfabriquées dans son emplacement final.

La construction modulaire ; permet de minimiser les coûts et les investissements réalisés dans les projets de construction. La production des unités préfabriquées dans les usines distantes permet de minimiser la perte des matériaux, d'augmenter la qualité et de réduire la durée des projets de construction.

Pour livrer les sections préfabriquées à temps sur le site de construction les entreprises dans ce domaine se trouvent dans l'obligation de concevoir des chaînes logistiques robustes (Jin et al. (2018)).

Dans la littérature, nous apercevons que la construction modulaire est liée le plus aux termes : management des projets, planification, industrie de la construction, optimisation, planification de la production, sélection des fournisseurs, management de la chaîne logistique, building information modeling et prise de décision.

Selon Hussein et al. (2021), la construction modulaire offre plusieurs bénéfices par rapport à la construction traditionnelle. Parmi les bénéfices, nous citons :

- Accélère la production des bâtiments et réduit la durée des projets ;
- Réduit la perte des ressources et les coûts des projets ;
- Augmente la qualité des produits ;
- Offre la possibilité d'utiliser des matériaux verts.

Cependant, malgré tous ces avantages que la construction modulaire offre, il reste toujours des défis à surmonter. En revanche, il est difficile de mettre en place la chaîne logistique dans le cas de la construction modulaire. Cela est dû à la complexité et à la fragmentation élevée de la chaîne d'approvisionnement dans la construction modulaire par rapport à la chaîne d'approvisionnement traditionnelle. La chaîne

d'approvisionnement dans la construction hors site est une chaîne à plusieurs échelons, nous commençons par un dessin détaillé des composants préfabriqués. Après la validation, les dessins sont envoyés en usine où les composants préfabriqués seront produits. Après la production des composants préfabriqués, ces derniers sont stockés et transportés à temps vers le site de construction pour être installés dans leurs emplacements finaux.

Selon Behera et al. (2015), les informations générées par plusieurs sources et sur plusieurs niveaux donnent la naissance à la redondance et à la mauvaise gestion du flux d'information. Cela a un impact négatif sur la performance de la chaîne logistique, parmi les inconvénients qui seront engendrés, nous mentionnons : une productivité faible, dépassement des coûts et des délais, un manque de coordination entre les différents acteurs, ce qui peut générer des conflits entre les partenaires.

Selon Kim et al. (2013), l'utilisation des nouvelles technologies telles que le BIM « Building information modeling » donne la possibilité d'améliorer la coordination entre les différents acteurs et la planification des projets de construction tout en partant des données de conception du produit. C'est pour ce fait que plusieurs recherches se reposent sur le développement de plusieurs modèles d'optimisation afin de répondre à ce besoin d'améliorer la planification des projets de construction depuis la phase de conception du produit.

Dans leur travail, Chiu et al. (2011) ont développé un modèle mathématique dans l'industrie manufacturière (production des vélos). Ce modèle vise à l'amélioration de la performance opérationnelle dans la partie relative à la conception du produit et de la chaîne logistique.

D'autres auteurs ont étudié les risques des acteurs sur la résilience de la supply chain de construction (Li et al., 2018). Ainsi, la sélection et l'évaluation des intervenants sont à la base de la résilience de la chaîne d'approvisionnement. Par exemple, la flexibilité du fournisseur est un facteur décisif dans le choix de la construction (Gosling et al., 2010).

Paksoy et al. (2019) et (Novitasari et al., 2021) ajoutent à la gestion de chaîne logistique le concept de Green Supply Chain Management. Il s'agit dans ce concept d'inclure à la gestion de chaîne logistique des pratiques comme l'efficacité énergétique, la réduction des gaz à effet de serre, la diminution des déchets, etc.

### 3 DESCRIPTION DU PROBLEME

#### 3.1. Présentation de l'architecture simplifiée

La version digitale 3D de l'architecture simplifiée va nous aider à mieux comprendre notre relation entre ses différents composants. Nous présentons dans les figures 3 et 4 la version digitale 3D de l'architecture. Cette dernière se compose essentiellement de quatre modules. Les quatre modules sont considérés comme des éléments préfabriqués.

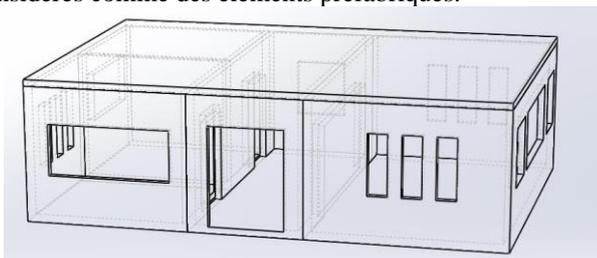


Figure 3. Vue d'ensemble de l'architecture simplifiée choisie

Ils sont obtenus à partir de l'assemblage d'un ensemble d'éléments de base. Les éléments de base permettent de construire les différents modules. Nous allons présenter l'élément de base. Ensuite, nous dresserons un tableau de la nomenclature pour notre bâtiment final.

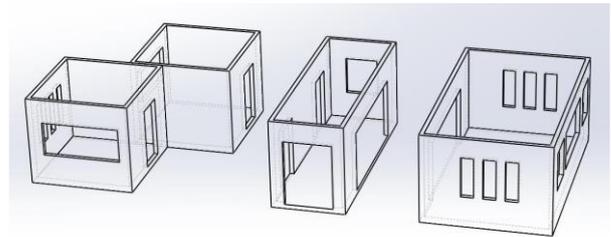


Figure 4. Vue éclatée de l'architecture simplifiée choisie

#### 3.2. Présentation de l'élément de base utilisé dans l'architecture

Dans notre exemple, nous avons choisi un élément de base dans la construction modulaire en bois. Cet élément est composé d'un nombre précis de poutres en bois dont quelques-unes sont verticales et les autres sont montées horizontalement pour servir comme une fixation supplémentaire. Ensuite, nous avons deux contreplaqués qui sont fixés sur les deux facettes extérieure et intérieure. À l'intérieur nous injectons de la laine soufflée qui sert comme une couche d'isolation. Nous obtenons à la fin l'élément présenté dans la figure 5. Nous pouvons ajouter une isolation supplémentaire sur la face extérieure de cet élément dans certains cas et dans les assemblages qui le demande.

Nous pouvons attribuer des modifications sur cet élément afin de répondre aux besoins clients tels que la personnalisation des ouvertures pour les portes et les fenêtres. Aussi, nous prenons en considération des passages de l'installation électrique ainsi que la plomberie. Cet élément peut être monté ensemble en série pour donner soit les murs du bâtiment soit le sol et le toit.

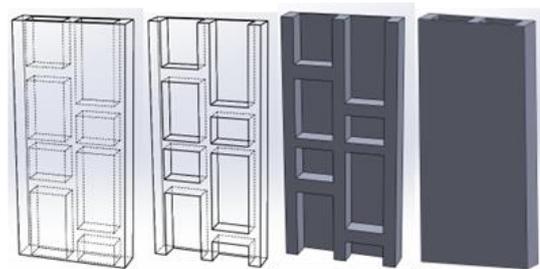


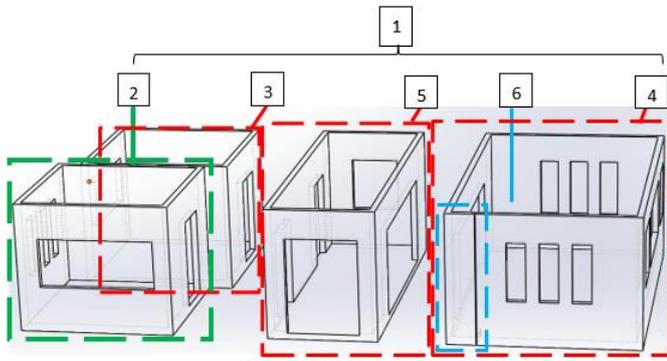
Figure 5. L'élément de base de construction

#### 3.3. Nomenclature de l'architecture simplifiée

On présente dans le tableau 1 la nomenclature de notre architecture et dans la figure 6 la vue éclatée associée.

Tableau 1. Composition de l'architecture choisie pour le test de notre modèle.

Réf	Élément	Type
1	Architecture d'étage d'une maison	Produit fini
2	Chambre 2	Module
3	Chambre 1	Module
4	Salon	Module
5	Couloir	Module
6	Élément de base	Composant



**Figure 6. Vue éclatée et détaillée de l'architecture simplifiée choisie**

Suite au choix de l'architecture simplifiée pour le test du modèle, nous allons développer la matrice de transition en se basant sur l'approche utilisée dans l'exemple traité par Chiu et al. (2011).

La matrice de transition (tableau 2) permet de représenter la modularité de notre architecture. La composition de notre bâtiment final sera représentée en fonction des modules, et ces derniers seront représentés en fonction des éléments de base

**Tableau 2. Matrice de transition**

	S/P	Processus de production					
		1	2	3	4	5	6
Bâtiment final	1	1	0	0	0	0	0
Module	2	-1	1	0	0	0	0
	3	-1	0	1	0	0	0
	4	-1	0	0	1	0	0
	5	-1	0	0	0	1	0
Élément de base	6	0	-21	-39	-58	-30	1

### 3.4. Description des colonnes de la matrice de transition

Dans la matrice, nous attribuons chaque processus de production à une colonne. Les processus de production permettent de réaliser les éléments de base comme ils peuvent aussi réaliser les modules. Donc la nature du processus peut être un processus de production ou un processus d'assemblage.

### 3.5. Description des lignes de la matrice de transition

Les lignes sont attribuées à chaque élément de base, module, et au bâtiment final. Selon la méthodologie que Chiu et al. (2011) ont adoptée, nous décomposons un produit sur plusieurs modules qui sont de même décomposés. Dans notre cas, la décomposition nous aidera à réaliser la modularité de notre architecture. Chaque module est composé d'un ensemble d'éléments de base selon une quantité bien déterminée. L'assemblage des modules se fait en respectant deux conditions ; il faut respecter les contraintes physiques (volume des modules) ainsi l'ordre chronologique de l'assemblage des modules (Chiu et al. (2011)).

## 4 MODELE MATHEMATIQUE

Dans la partie suivante, nous allons exposer le modèle mathématique développé. Nous présentons aussi les hypothèses de travail prises en considération lors du développement du modèle mathématique. Le but des hypothèses est de relaxer certaines contraintes, elles stipulent que :

- Tous les fournisseurs sont capables de réaliser les activités prévues au moment voulu ;
- Un processus ne peut avoir qu'un seul processus successeur actif ;
- Un processus ne peut produire qu'un seul élément ;
- Les éléments mobiles doivent être produits par un autre fournisseur que l'entrepreneur principal du projet ;
- Les éléments de base sont disponibles en tout temps et dans les bonnes quantités ;
- On ne produit pas de surplus ;
- Tous les moyens de transport requis sont disponibles au moment voulu ;

Les processus de production peuvent utiliser d'autres matières premières qui ne sont pas considérées comme préfabriquées.

### 4.1 Ensembles

- P Ensemble des processus de production ;
- S Ensemble des éléments mobiles, fixes et des modules ;
  - U,  $U \subset S$  Ensemble des éléments mobiles ;
  - V,  $V \subset S$  Ensemble des éléments fixes ;
- I, J Ensemble des fournisseurs ;
- T Ensemble des périodes du projet.

### 4.2 Paramètres

- D Délai maximal du projet ;
- FT Intervalle de temps gelé ;
- $TT_{ij}$ ,  $i \in I$ ,  $j \in J$ ,  $i \neq j$   
Temps de transport entre le fournisseur i et le fournisseur j ;
- $T_{sp}$ ,  $s \in S$ ,  $p \in P$  Matrice de transition ;
- $C_{pi}$ ,  $p \in P$ ,  $i \in I$   
Coût unitaire de production d'un processus par jour chez un fournisseur ;
- $CT_i$ ,  $i \in I$   
Coût unitaire de transport par livraison chez un fournisseur
- $CS_i$ ,  $i \in I$   
Coût unitaire de stockage par jour chez un fournisseur ;
- $Q_p$ ,  $p \in P$   
La quantité à produire par un fournisseur ;
- $B_{s,p}$ ,  $s \in S$ ,  $p \in P$   
La quantité requise d'éléments de base pour qu'un processus produise un élément, un module ou le produit final
- $\alpha_{i,p}$ ,  $i \in I$ ,  $p \in P$   
L'activité productive (avancement par jour) d'un processus de production chez un fournisseur dans la production d'un élément
- $\beta_{s,p}$ ,  $s \in S$ ,  $p \in P$   
La quantité d'éléments produite par un processus.
- Lot(s)  
Taille des lots de produit s pour le transport

### 4.3 Variables de décision

- $Y_p$ ,  $p \in P$ , Variable binaire représentant le choix d'un processus (p), elle vaut « 1 » si le processus est choisi, « 0 » sinon ;

- $X_{p,i,t}$ ,  $p \in P$ ,  $i \in I$ ,  $t \in T$ , Variable binaire représentant le choix d'un fournisseur (i) pour le processus (p) à la période (t), vaut « 1 » s'il est choisi, « 0 » sinon ;
- $e_{s,i,j,t}$ ,  $s \in S$ ,  $i \in I$ ,  $j \in I$ ,  $i \neq j$ ,  $t \in T$ , Variable binaire représentant l'envoi d'un lot d'éléments d'un fournisseur (i) vers un fournisseur (j) à la période (t), vaut « 1 » si l'envoi est effectué, « 0 » sinon ;
- $E_{s,i,j,t} = e(s, i, j, t) \times \text{Lot}(s)$ ,  $s \in S$ ,  $i \in I$ ,  $j \in I$ ,  $i \neq j$ , Variable représentant la quantité de lot d'élément (s) envoyé d'un fournisseur (i) vers un fournisseur (j) à la période (t) ;
- $R_{s,i,t}$ ,  $s \in S$ ,  $i \in I$ ,  $t \in T$ , Variable représentant la réception d'un lot d'élément (s) chez un fournisseur (i) à la période (t) ;
- $stk_{i,t,s}$ ,  $i \in I$ ,  $t \in T$ ,  $s \in S$ , Variable indiquant la taille du stock chez un fournisseur (i) d'élément (s) à la période (t).
- $Transit_{i,t,s}$ ,  $i \in I$ ,  $t \in T$ ,  $s \in S$ , Variable de décision représentant la quantité des éléments (s), transitant depuis le fournisseur (i) à la période T.

#### 4.4 Fonction objectif

La fonction objectif est la somme de trois coûts. Elle a pour but de minimiser les coûts de notre chaîne logistique. Ce coût est composé du coût de la production (C1), le coût de transport (C2) et le coût de stockage (C3).

$$\text{Minimize Coût} = C1 + C2 + C3 \quad (\text{Eq.1})$$

$$C1 = \sum_{p \in P} \sum_{i \in I} \sum_{t \in T} [C_{p,I} \times X_{p,I,t}] \quad \forall p \in P, i \in I, t \in T \quad (\text{Eq.2})$$

$$C2 = \sum_{s \in U} \sum_{i \in I} \sum_{t \in T} [E_{s,i,j,t} \times CT_i] \quad \forall s \in U, i \in I, j \in I, i \neq j, t \in T \quad (\text{Eq.3})$$

$$C3 = \sum_{s \in S} \sum_{i \in I} \sum_{t \in T} [stk_{i,t,s} \times CS(i)] \quad \forall s \in S, i \in I, j \in I, t \in T \quad (\text{Eq.4})$$

#### 4.5 Les contraintes du modèle

##### a) Obligation de choisir parmi les processus disponibles un et uniquement un seul processus de production pour délivrer le produit final

Pour éviter la confusion de sélectionner deux processus pour réaliser le produit final. Il s'agit de contraindre le programme à choisir un et un seul des processus disponibles pour la réalisation du produit final ( $s = 1$ ). Contrairement à la contrainte suivante, le processus choisi pour la réalisation du produit final n'ayant pas de successeur.

$$\sum_{p \in P} [Ts_p \times Y_p] = 1 \quad \forall p \in P, s \in S, s = 1 \quad (\text{Eq.5})$$

##### b) Cohérence entre la quantité des éléments produits et la quantité des éléments consommés par les processus de production dans la configuration de l'architecture.

Dans cette contrainte, il s'agit de s'assurer que la quantité d'éléments consommés par un processus de production ( $T_{s,p}$ ) a été produite par un autre processus de production ( $Q_p$ ). Par exemple, si on a un processus de production qui consomme « N » éléments, il faut que cette quantité « N » soit produite par un autre processus de production. Il faut que la somme des éléments consommés et les éléments produits soient nuls. Cette contrainte ne concerne pas le produit final qui est le bâtiment final, car il n'est pas consommé.

$$\sum_{p \in P} [T_{s,p} \times Y_p \times Q_p] = 0 \quad \forall p \in P, s \in U \quad (\text{Eq.6})$$

##### c) Production des quantités requises dans une période « t ».

Cette contrainte vise à assurer que les périodes de l'activité productive d'un processus de production chez un fournisseur soient suffisantes pour répondre à la production des besoins de nomenclature sans être en retard ni les dépasser. L'équation indique que la productivité ( $\alpha_{ip}$ ) d'un processus chez un fournisseur (i) multiplié par la période à laquelle on a sélectionné le fournisseur qui réalise le processus concerné ( $X_{(p,i,t)}$ ) doit être égale à la quantité fixée dans la nomenclature ( $Q_p$ ).

$$\sum_{t \in T} \sum_{i \in I} X_{(p,i,t)} \times \alpha_{i,p} - Y_p \times Q_p = 0 \quad (\text{Eq.7})$$

$$\forall t \in T, i \in I$$

##### d) Restriction sur les expéditions

L'objectif de l'ensemble des équations dans cette contrainte et d'assurer la cohérence du modèle et de n'expédier que les éléments produits en amont. Ainsi, nous ne pouvons envoyer que des éléments ou des modules qu'en étant certains d'avoir un délai suffisant pour les recevoir avant l'échéance de l'horizon de planification.

Nous avons choisi d'interdire les expéditions entre la période 1 et la période  $t = FT$ . Le freeze time noté « FT » représente le temps de transport max entre deux fournisseurs  $Tt(i, j)$ . Ceci permet la cohérence du modèle en évitant un envoi des marchandises dans une période qui ne pourra pas être comptabilisé dans l'intervalle du temps de notre projet.

Dans l'équation, nous exprimons que chaque réception à une date « t » est en relation avec une date d'expédition réalisée à une date «  $Te = t - Tt(i, j)$  ». Par la suite d'un point de vue algorithmique si lors de l'exécution de notre modèle on a  $t < Te$  on aura comme résultat une date d'expédition négative. Par la suite, on ne peut pas obtenir de solution.

$$E_{S,i,j,t} = 0, \quad \forall s \in U, (i, j) \in I, i \neq j, t \in [1, FT] \quad (\text{Eq.8})$$

De la même manière, afin d'éviter des transports trop tardifs, nous avons fixé une date butoir pour les expéditions. Cette date correspond à «  $t = D - FT$  ». La date «  $t = D - FT$  » garantit que pour chaque expédition effectuée, sa réception peut être comptabilisée dans la durée fixée pour notre projet et ne dépasse pas l'échéance.

$$E_{S,i,j,t} = 0, \quad \forall s \in U, (i, j) \in I, i \neq j, t \in [D - FT, D] \quad (\text{Eq.9})$$

L'équation (Eq. 10) indique qu'il est impossible pour un fournisseur d'expédier des éléments vers lui-même.

$$E_{S,i,i,t} = 0, \quad \forall s \in U, i \in I, t \in T \quad (\text{Eq.10})$$

L'équation (Eq. 11) impose de n'effectuer des envois de lots que vers des fournisseurs actifs qui ont été sélectionnés pour le processus successeur. Ceci est exprimé dans la variable de décision ( $E_{s,j,t}$ ) qui est la quantité envoyée par le fournisseur (j) vers le fournisseur (i). Cette quantité doit être égale au besoin du processus (p) qui est notée ( $B_{s,p}$ ) dans la période ( $X_{p,i,t} \times \alpha_{ip}$ ) pour toutes les périodes (t) sélectionnées.

$$\sum_{j \in I, i \neq j} \sum_{t \in T} E_{s,j,i,t} = \sum_{p \in P} \sum_{t \in T} X_{p,i,t} \times \alpha_{i,p} \times B_{s,p} \quad \forall s \in U \quad (\text{Eq.11})$$

##### e) Réception des marchandises

L'ensemble des marchandises expédiées depuis un fournisseur sont reçues chez un autre fournisseur après un délai qui correspond à un temps de transport entre les deux fournisseurs.

Ceci est exprimé par la contrainte qui stipule que la quantité reçue notée ( $R_{sit}$ ) doit être égale à la quantité ( $E_{sijt}$ ) expédiée à la période  $T_e = t - Tt(i, j)$ . Ainsi, aucune marchandise ne disparaisse en cours de route durant toute la période du projet. La somme des quantités reçues doit être égale à la quantité envoyée.

**Tableau 3. Matrice de transition**

S/P	1	2	3	4	5	6
1	1	0	0	0	0	0
2	-1	1	0	0	0	0
3	-1	0	1	0	0	0
4	-1	0	0	1	0	0
5	-1	0	0	0	1	0
6	0	-21	-39	-58	-30	1

## 5 EXPERIMENTATIONS

Nous allons tout d'abord définir les environnements logiciel et matériel des simulations. Ensuite, notre expérience numérique portera sur l'exécution du modèle mathématique avec les instances de l'architecture simplifiée à un seul étage présenté.

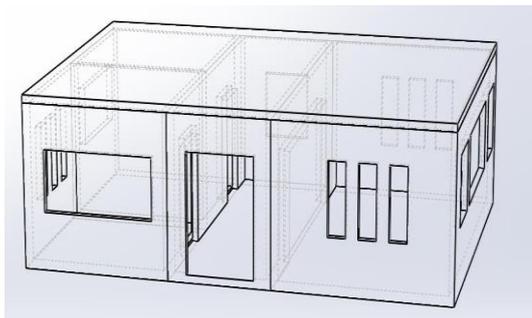
### 5.1. Définition des environnements logiciels et matériel utilisé

Pour ces tests, on a utilisé la configuration suivante :

- Matériel : Ordinateur de l'étudiant  
Intel(R) Core (TM) i7-6700 CPU @ 3.40 GHz  
4 cores et 8 threads  
32 GB Ram
- Logiciel  
Windows 10  
Anaconda browser  
Python 3.8  
Spyder 4.1.5  
Solveur MILP « Gurobi »

### 5.2. Données d'entrée

Dans ce premier scénario, nous allons exécuter notre modèle mathématique sur l'architecture simplifiée à un seul étage présenté dans la figure 7.



**Figure 7. Architecture simplifiée à un seul étage**

La matrice de transition utilisée dans ce premier test est représentée dans le tableau 3. Cette dernière nous permet de réaliser une structure simple qui est un seul étage d'un bâtiment. Les instances utilisées dans ce test sont : 6 processus de production, 6 éléments entre les éléments de base, les modules et le bâtiment final, 4 fournisseurs, 24 coûts de production, 24 valeurs de productivité, 16 temps de transport, 4 coûts de transport, 4 coûts de stockages.

### 5.3. Résultats et interprétation

Dans la partie suivante, nous allons présenter les résultats obtenus après la simulation ainsi que les résultats en ce qui concerne les différentes variables de décision.

La valeur de la fonction objectif indique le coût de notre chaîne logistique qui est 50310.2\$. Les différents coûts de production, de transport, et de stockage se divisent respectivement comme suit : 248.6\$, 44104\$, 5957.6\$.

Chaque fournisseur est assigné pour la réalisation d'un processus de production bien spécifique. Après la production des éléments, le fournisseur s'occupe de la livraison de l'élément produit vers le fournisseur actif suivant, le fournisseur suivant peut être localisé dans une autre usine distante qui fabrique un autre module ou le fournisseur suivant peut être localisé sur le site de construction.

Les différents coûts de la chaîne logistique

Pour ces données, on a obtenu une solution optimale après 121.7min équivalent à 2h. On présente les différents résultats dans le tableau 4.

**Tableau 4. Coûts optimaux**

Coût de production	Coût du transport	Coût de stockage	Coût total
248.6 \$	44104.0 \$	5957.6 \$	50310.2 \$

#### 5.3.1. Ordonnancement et planification des processus de production

Suite à l'optimisation de la variable de décision  $X_{p,i,t}$ , nous présentons la figure 8 qui contient l'ordonnancement des différents processus de production (p), chez les différents fournisseurs (i) dans des périodes bien spécifiques (t).

Nous remarquons que la solution donnée après la résolution du modèle par le solveur « Gurobi » est comme suit :

- Le processus de production numéro 6 est assigné à trois fournisseurs qui sont respectivement : fournisseur 2, fournisseur 3 et fournisseur 4.

Processus de production	Fournisseur	Période																							
		72	73	74	75	76	77	78	79	80	81	82	83	84	85	86	87	88	89	90	91	92	93	94	95
Processus 6	2																								
	3																								
	4																								
Processus 5	1																								
Processus 4	1																								
Processus 3	1																								
Processus 2	1																								
Processus 1	1																								

**Figure 8. Ordonnancement et planification des processus de production**

Ces trois fournisseurs s'occupent de la production de l'élément de base 6 qui va être utilisée pour la fabrication des différents modules.

- Les processus de production des modules 5, 4, 3, et 2 et le processus de fabrication de bâtiment final 1 sont assignés au fournisseur numéro 1. On voit que la période de production dans les processus de production est interrompue par des périodes d'inactivité. Ces périodes d'inactivité limitent la production des éléments et des modules. Ces derniers seront produits en juste à temps et utilisés lorsqu'ils sont nécessaires. Par la suite, on diminue les stocks et on élimine le gaspillage et la production des surplus.

### 5.3.2. Taux d'activité des processus

Dans la figure 9, nous présenterons les différentes périodes d'activité en pourcentage pour les différents processus afin de cerner le processus le plus critique dans notre solution.

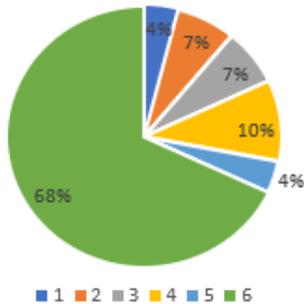


Figure 9. Périodes d'activité

D'après le graphe suivant, on peut identifier que le processus 6 est le processus critique et le plus actif parmi les autres processus de production. Ceci est traduit par le besoin de produire le besoin des autres processus de production dans une durée réduite.

### 5.3.3. Évolution des stocks dans notre solution

Suite à l'optimisation de la variable de décision  $stki,t,s$ , nous présentons dans cette partie l'évolution des stocks de (s) chez les fournisseurs (i) à la période (t).

Dans la figure 10 de l'évolution des stocks, on représente le niveau du stock des différents éléments de base (élément 6), modules (élément 2, 3, 4 et 5) et le bâtiment final (élément 1) dans l'intervalle de temps de la période 84 jusqu'à la période 100. Le niveau de stock de l'élément 1 au cours de la période de production augmente comme suit :

- Un niveau de stock égal à 0.25 dans la période 85 ;
- Un niveau de stock égal à 0.5 dans l'intervalle de période entre la période 86 et 90 ;
- Un niveau de stock égal à 0.75 dans l'intervalle de période entre la période 91 et 95 ;
- Un niveau de stock égal à 1 dans la période 96.

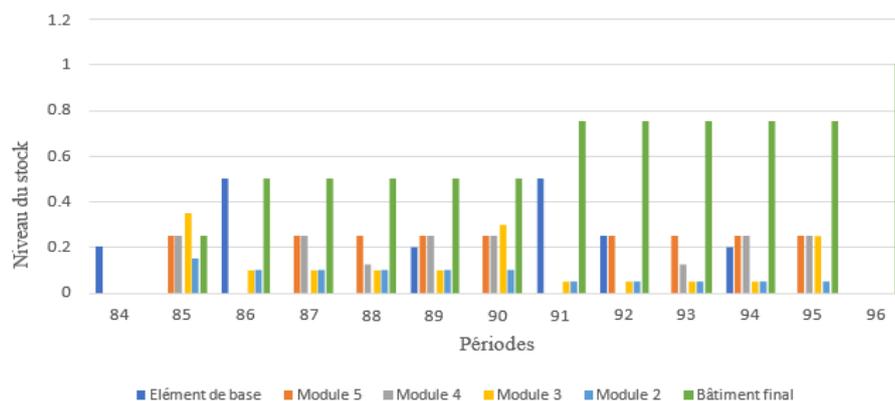


Figure 10. Evolution des stocks

Au cours de cet intervalle de temps, le niveau de stock a tendance à l'augmentation, cela est traduit par la production du bâtiment final (élément 1). Le stock en élément 1 est égal à 1 et est traduit par la fabrication du bâtiment final qui est achevé.

Par analogie, lors de l'augmentation du niveau du stock en élément 1 dans ces périodes, nous avons les stocks des modules 2, 3, 4, 5 et de l'élément de base ont tendance à la diminution. Cette diminution est traduite par la consommation des éléments de base par les processus de production des modules et la consommation des modules par le processus de production du bâtiment final. Nous remarquons que dans la période 96, le niveau des stocks de ces modules ainsi que les éléments de base est nul. Les modules 2, 3, 4 et 5 ont été consommés par le processus de production du bâtiment final, par la suite on n'a plus de stock de modules (après la période 95). On constate que le niveau de stock de l'élément de base 6 varie durant cet intervalle de temps où on a une valeur de stock qui est comprise entre « 0 » et une valeur « > 0 ». Le niveau de stock positif est traduit par la réception des éléments de base depuis les fournisseurs. Toutefois, le niveau de stock nul est traduit par la consommation totale des éléments de base dans notre stock par les processus de production.

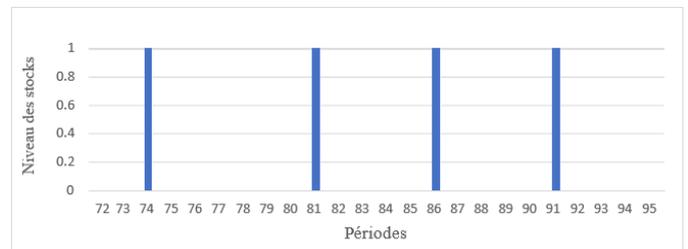


Figure 11. Évolution des stocks de l'élément 6 chez le fournisseur 2

Dans la figure 11, nous présentons l'évolution des stocks en élément 6 chez le fournisseur 2. On constate que seulement dans les périodes 74, 81, 86 et 91, nous avons un stock égal à 1. Le stock chez le fournisseur 2 dans ces périodes se traduit par la capacité de stockage chez le fournisseur 1 (site de construction) qui atteint son maximum et qui ne peut plus recevoir de la marchandise. Durant les expéditions des marchandises, il faut respecter la capacité de stockage chez le fournisseur 1.

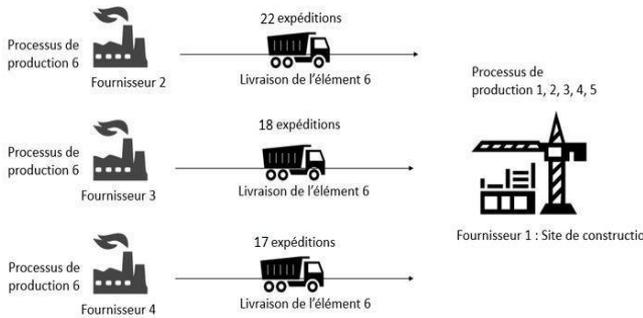
### 5.3.4. Les expéditions effectuées par les fournisseurs

L'optimisation de la variable de décision  $Es,i,j,t$  nous a donné la planification optimale des expéditions entre les différents fournisseurs. Par la suite, nous allons présenter les différents résultats obtenus. Les fournisseurs choisis dans la solution sont les fournisseurs : 2, 3 et 4 qui vont livrer au fournisseur 1 les éléments mobiles.

Pour bien étudier les livraisons ainsi que les quantités envoyées et les périodes dans lesquelles les fournisseurs vont expédier les éléments, nous avons étudié les résultats des différentes expéditions ainsi que les différentes quantités.

Dans cette partie, on remarque que les périodes d'expédition varient d'un fournisseur à un autre. Elles ne sont pas identiques, nous constatons qu'au cours d'une même période, un fournisseur pourrait ne pas réaliser des livraisons de marchandises, alors que les autres fournisseurs expédieront.

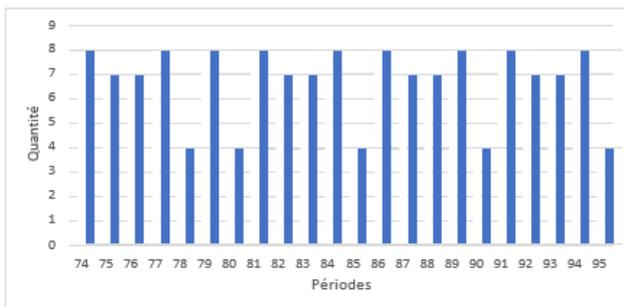
On souligne que pour le fournisseur 2, on a des quantités variables lors des expéditions alors que pour les fournisseurs 3 et le fournisseur 4, on a une quantité fixée qui est envoyée dans chaque expédition. On présente la figure 12 pour mieux visualiser la solution obtenue.



**Figure 12. Présentation de la solution de la chaîne logistique obtenue**

### 5.3.5. Les réceptions de la marchandise

Dans cette partie, nous présentons les différentes périodes de réception avec la quantité reçue de l'élément 6 chez le fournisseur 1, suite à l'optimisation de la variable de décision de réception des marchandises  $R_{s,i,t}$ .



**Figure 13. Réception des marchandises**

Dans cette partie, nous exposons la réception des différentes marchandises chez le fournisseur 1. La quantité totale des marchandises doit être égale au besoin du fournisseur pour la production. Dans ce scénario, la quantité expédiée  $E_{s,i,j,t}$  est égale à la quantité reçue  $R_{s,i,t}$  :  $R_{sit} = E_{sijt} = 148$ .

## 6 CONCLUSION

Dans ce travail, nous avons développé un modèle mathématique et réussi à fournir une solution optimale pour la planification de la chaîne logistique. Cette solution présente un outil d'aide à la décision dans la logistique de la construction morcelée entre de nombreux acteurs. Ce modèle offre ainsi la possibilité d'intégrer la coopération entre les acteurs depuis la phase de conception du projet. La visibilité supplémentaire dans les projets de construction permet au preneur de décision d'anticiper tous types d'aléas qui peuvent surgir dans l'entame du projet et qui peuvent ralentir certaines activités, ce qui leur permet de mieux gérer les coûts et la durée du projet.

Comme perspectives, nous pouvons augmenter les instances du bâtiment et traiter une architecture plus complexe qui représente un bâtiment à plusieurs étages. Le preneur de décision pourrait introduire le nombre des phases voulues et la durée de chaque phase et aurait une vision globale sur la gestion des activités de production, la sélection des fournisseurs, la gestion des livraisons, la gestion des stocks et la gestion des rôles de chaque acteur dans chaque phase du projet.

## 7 REFERENCES

- Behera, P., Mohanty, R. P., & Prakash, A. (2015). Understanding construction supply chain management. *Production Planning & Control*, 26(16), 1332-1350.
- Berden, M. (2017). Analysis of construction logistics calculation models and factors that obstruct their development. (D2.1). Amsterdam : Amsterdam University of Applied Sciences.
- Chaabane, A., As'ad, R., & Bahroun, Z. (2018). Towards a BIM-Based Construction Supply Chain Planning Modeling Framework. *International Conference on Project Logistics*, June 28-29 2018, Hull, United Kingdom, ISBN: 978-1-5272-2642-5
- Chiu, Ming-Chuan, and Gül Okudan. (2011). An integrative methodology for product and supply chain design decisions at the product design stage. *Journal of Mechanical Design* 133(2).
- Gosling, J., Purvis, L., & Naim, M. M. (2010). Supply chain flexibility as a determinant of supplier selection. *International Journal of Production Economics*, 128(1), 11-21.
- Hussein, M., Eltoukhy, A. E., Karam, A., Shaban, I. A., & Zayed, T. (2021). Modelling in off-site construction supply chain management: A review and future directions for sustainable modular integrated construction. *Journal of cleaner production*, 310, 127503.
- Jin, R., Gao, S., Cheshmehzangi, A., & Aboagye-Nimo, E. (2018). A holistic review of off-site construction literature published between 2008 and 2018. *Journal of Cleaner Production*, 202, 1202-1219.
- Kim, H., Anderson, K., Lee, S., & Hildreth, J. (2013). Generating construction schedules through automatic data extraction using open BIM (building information modeling) technology. *Automation in Construction*, 35, 285-295.
- Le, P. L., Elmughrabi, W., Dao, T.-M., & Chaabane, A. (2018). Present focuses and future directions of decision-making in construction supply chain management : A systematic review. *International Journal of Construction Management*, 1-20.
- Li, C. Z., Xu, X., Shen, G. Q., Fan, C., Li, X., & Hong, J. (2018). A model for simulating schedule risks in prefabrication housing production: A case study of six-day cycle assembly activities in Hong Kong. *Journal of cleaner production*, 185, 366-381.
- Novitasari, M., & Agustia, D. (2021). Green supply chain management and firm performance: The mediating effect of green innovation. *Journal of Industrial Engineering and Management*, 14(2), 391-403.
- Paksoy, T., Weber, G. W., & Huber, S. (2019). Lean and green supply chain management. *International Series in Operations Research & Management Science*, 273.