

# Lean Construction pour une Livraison de Projets Durables : Améliorer l'Efficacité pour Atteindre les Objectifs de Développement Durable

Dr. Esra Tepeli<sup>1</sup>, [etepeli@purdue.edu](mailto:etepeli@purdue.edu)

<sup>1</sup> *Purdue University, Construction Management Technology, États-Unis d'Amérique*

**RESUME** Le secteur de la construction subit une pression croissante pour réaliser des projets rentables et respectueux de l'environnement. Lean Construction (LC) fournit un cadre pour améliorer l'efficacité en minimisant les déchets et en optimisant l'utilisation des ressources, ce qui le rend bien aligné sur les objectifs mondiaux de durabilité tels que les Objectifs de Développement Durable des Nations Unies (ODD). Cet article explore l'application stratégique des principes LC pour promouvoir des pratiques durables tout au long du cycle de vie de la construction. En examinant l'alignement de LC sur les ODD, nous proposons un cadre pour intégrer les pratiques Lean afin d'améliorer les résultats environnementaux, sociaux et économiques. L'article met en évidence la manière dont LC contribue à des objectifs tels que l'action climatique, l'efficacité des ressources et les villes durables. En outre, des études de cas et des meilleures pratiques sont analysées pour démontrer des mises en œuvre réussies, offrant des informations précieuses aux professionnels de la construction qui cherchent à équilibrer l'efficacité et la durabilité.

**Mots-clefs** Lean Construction (LC), Livraison de Projets Durables, Objectifs de Développement Durable des Nations Unies (ODD).

**Modalité de présentation** Présentation orale

## I. INTRODUCTION

Le secteur de la construction joue un rôle clé dans l'économie mondiale, mais il est aussi l'un des principaux consommateurs de ressources et responsables d'environ 39 % des émissions de carbone (Kibert 2007). Cela a renforcé l'importance d'intégrer des pratiques durables pour réduire l'impact environnemental et optimiser les ressources (Griggs et al. 2013). Les objectifs de développement durable des Nations Unies (ODD ONU), en particulier l'ODD 11 (Villes et communautés durables), l'ODD 12 (Consommation et production responsables) et l'ODD 13 (Action pour le climat), mettent l'accent sur l'équilibre entre croissance économique, protection de l'environnement et équité sociale (Nations Unies 2015).

La Lean Construction (LC), dérivée du Lean Manufacturing, vise à maximiser la valeur en minimisant les déchets et en rationalisant les processus de construction (Jørgensen et al. 2008).

Utilisée stratégiquement, la LC peut soutenir les objectifs de durabilité. Cependant, son intégration dans le cycle de vie des projets reste limitée en raison des pratiques traditionnelles, de l'inefficacité et de la perception des initiatives durables comme des charges supplémentaires (Gareis et al. 2013).

La LC offre une méthodologie puissante pour améliorer l'efficacité et la durabilité, mais son adoption au sein du secteur de la construction, notamment en termes de contribution aux efforts mondiaux de durabilité, a été limitée (Salem et al. 2006). Il manque un cadre clair qui lie les principes Lean à l'obtention de résultats en matière de durabilité (Brones et al. 2015).

Cette étude explore l'intégration de la LC tout au long du cycle de vie des projets de construction afin de promouvoir le développement durable. Elle propose un cadre conceptuel qui guide les professionnels dans l'amélioration des résultats environnementaux, sociaux et économiques en minimisant les déchets, en optimisant les ressources et en favorisant la collaboration entre les parties prenantes.

## II. REVUE DE LA LITTÉRATURE

L'intérêt pour l'intersection entre la LC et la durabilité a augmenté au cours des dernières années. Les premiers travaux de Koskela (1992) et de Ballard et Howell (2003) ont démontré comment les principes Lean réduisent les inefficacités, principalement en minimisant les déchets et en améliorant le flux de travail. Des recherches ultérieures ont exploré l'alignement des pratiques Lean sur les objectifs environnementaux, comme l'application du système Last Planner de Koskenvesa et Koskela (2010) pour optimiser l'utilisation des ressources et améliorer l'efficacité des projets.

Des études récentes confirment le potentiel de la LC à soutenir la durabilité. Alves & Tsao (2014) ont montré comment la LC améliore l'efficacité des ressources conformément à l'ODD 12, tandis qu'Ogunbiyi et al. (2013) ont souligné son rôle dans la collaboration et l'engagement des parties prenantes, contribuant à l'ODD 11. Toutefois, des obstacles persistent, notamment la résistance culturelle, le manque de mesures d'impact durable, et le décalage entre les objectifs de projet à court terme et les ODD à long terme (Olaniran et al., 2019).

Si les recherches existantes démontrent les bénéfices de la LC sur l'efficacité et la réduction des déchets, elles restent souvent centrées sur des outils ou cas spécifiques, sans proposer de cadre conceptuel global aligné avec le développement durable (Parry 2006).

Ce travail vise à combler cette lacune en proposant un cadre conceptuel qui intègre les principes de la LC aux ODD, offrant une feuille de route adaptable à divers types et échelles de projets. Basé sur des cas concrets et des meilleures pratiques, ce cadre vise à renforcer l'efficacité tout en améliorant les résultats environnementaux, sociaux et économiques.

La méthodologie, détaillée dans la section suivante, repose sur l'analyse de cas, des entretiens avec les parties prenantes et une revue des meilleures pratiques pour identifier des stratégies efficaces d'intégration de la LC dans des projets durables. Cette approche répond aux limites relevées dans la littérature en proposant une solution concrète et évolutive pour le secteur.

### III. MÉTHODOLOGIE / ÉLABORATION DU PROCESSUS

#### A. L'approche de recherche

Les pratiques de la LC, notamment Last Planner System (LPS), Just In Time (JIT) - la livraison juste à temps - et l'amélioration continue (Kaizen), ont démontré leur efficacité pour optimiser les opérations et améliorer la productivité dans les projets de construction. Toutefois, le potentiel de la LC en matière de développement durable, notamment en lien avec les Objectifs de Développement Durable (ODD) de l'ONU, reste encore peu exploité.

Les principes de la LC s'alignent naturellement sur les efforts de développement durable, comme en témoignent plusieurs correspondances clés :

- **Minimisation des déchets** : l'élimination des activités sans valeur ajoutée soutient l'**ODD 12** (Consommation et production responsables).
- **Efficacité des ressources** : la livraison JIT et les flux optimisés réduisent la consommation d'énergie, en cohérence avec l'**ODD 13** (Action pour le climat).
- **Collaboration accrue** : la démarche collaborative de Lean renforce l'engagement des parties prenantes, contribuant à l'**ODD 11** (Villes et communautés durables).
- **Bénéfices sociaux et économiques** : l'amélioration de la productivité et des conditions de travail soutient l'**ODD 8** (Travail décent et croissance économique).

Toutefois, plusieurs défis entravent l'intégration LC-développement durable : résistance au changement, arbitrage entre performance immédiate et investissements de durabilité à long terme, et absence de mesures standardisées pour évaluer les impacts de LC sur la durabilité.

Pour répondre à ces enjeux, cette étude développe un cadre conceptuel qui relie les principes Lean à des stratégies durables. Le cadre aborde également les bénéfices sociaux et économiques liés à l'engagement des parties prenantes et à l'amélioration des conditions de travail.

La méthodologie combine des approches qualitatives et quantitatives :

- **Études de cas** : analyse de projets intégrant avec succès LC et développement durable, en lien avec les ODD.
- **Entretiens semi-structurés** : menés auprès de professionnels pour identifier défis et meilleures pratiques.
- **Enquêtes** : menées auprès d'acteurs du secteur pour évaluer les pratiques actuelles et cerner les lacunes.

Les données ont été traitées par analyse thématique afin d'identifier les tendances récurrentes et d'extraire des indicateurs clés (réduction des déchets, efficacité énergétique, impacts sociaux). Ces résultats alimentent la construction du cadre de mise en œuvre, visant à guider les professionnels vers des projets alignés sur les ODD.

#### B. La méthodologie et le développement du cadre conceptuel

Cette section présente une approche structurée pour aligner les pratiques de LC avec les Objectifs de Développement Durable (ODD) de l'ONU, en vue d'améliorer systématiquement les résultats

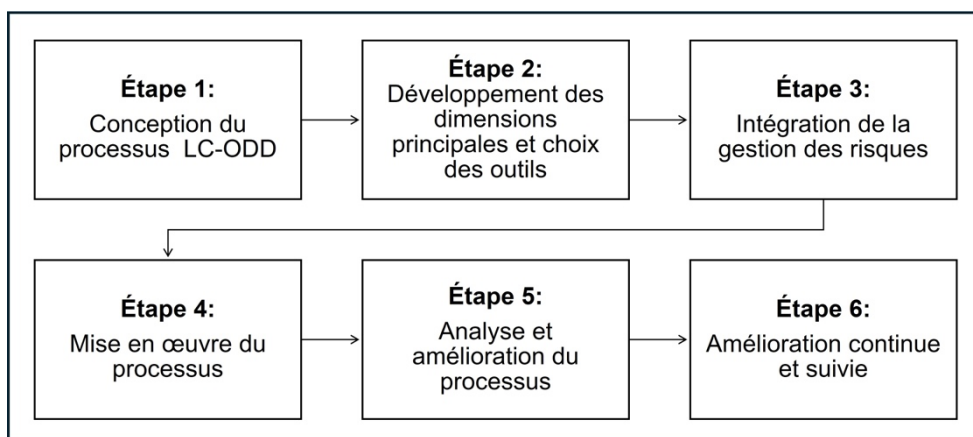
environnementaux, sociaux et économiques. Elle vise une exécution de projet efficace sur le plan des ressources, respectueuse du climat et socialement responsable.

Le cadre proposé est conçu pour être applicable à différents types et échelles de projets. Il repose sur les étapes suivantes :

- **Analyse du projet et définition des objectifs** : identifier les objectifs du projet ainsi que les ODD pertinents.
- **Sélection des méthodes LC** : choisir les outils et pratiques Lean adaptés aux objectifs du projet et de durabilité.
- **Mise en œuvre des méthodes LC** : mettre en œuvre les méthodes de LC sélectionnées tout au long du cycle de vie du projet.
- **Évaluation des résultats** : mesurer l'impact des pratiques LC à l'aide d'indicateurs clés de performance (ICP) liés aux ODD.

Le cadre a été validé à travers des projets pilotes, permettant d'évaluer son efficacité et d'ajuster son application à des projets plus vastes et complexes. Ces résultats fournissent des recommandations pratiques pour sa généralisation.

La modélisation du processus, illustrée à la Figure 1, propose une démarche étape par étape pour intégrer durablement la LC dans la gestion de projet. Les éléments clés du processus – données d'entrée, méthodes, outils et résultats – sont synthétisés dans le Tableau 1 (Annexe).



**FIGURE 1.** Modélisation du cadre conceptuel (LC-ODD) pour intégrer la LC aux ODD

### 1. La conception du processus et l'alignement sur les ODD

Cette étape identifie les défis critiques des pratiques de construction actuelles et aligne le cadre LC proposé sur les ODD, tels que l'ODD 11 (Villes durables), l'ODD 12 (Consommation responsable) et l'ODD 13 (Action climatique). Les outils comprennent :

- Revue de la littérature et analyse des lacunes pour identifier les limites existantes.
- Matrice de cartographie des ODD reliant les principes Lean aux ODD, par exemple, Value Stream Mapping (VSM) - Cartographie de la chaîne de valeur - pour l'efficacité des ressources.
- Analyse des parties prenantes pour identifier les intérêts et les responsabilités des parties prenantes concernant les objectifs de durabilité.

- Sélection des outils Lean pour identifier les principaux outils Lean (par exemple, Last Planner System, Kaizen, Value Stream Mapping) à intégrer en fonction des exigences spécifiques du projet.
- Évaluation des risques et des opportunités à l'aide d'outils tels que l'analyse SWOT pour identifier les risques et les opportunités potentiels liés à l'intégration du Lean aux ODD.

## 2. Le développement des dimensions principales du processus et le choix des outils

Dans cette étape, le cadre intègre les outils Lean dans toutes les phases de construction (conception, approvisionnement, construction, exploitation) pour améliorer la durabilité. Les principaux outils comprennent :

- Integrated Project Delivery (IPD) - Gestion Intégrée de Projet - pour améliorer la collaboration entre les parties prenantes. Il s'agit d'un modèle de gestion de projet dans lequel tous les acteurs du projet collaborent dès le début du projet, partageant les risques et les récompenses. L'objectif est d'optimiser la performance du projet en favorisant une communication et une coopération accrues entre les parties prenantes, afin d'atteindre les objectifs de qualité, de coûts et de délais (Graham, 2011).
- Modélisation des informations du bâtiment (BIM) pour simuler et optimiser les processus de construction dans un souci de durabilité.
- Cartographie de la chaîne de valeur (VSM) pour réduire les activités sans valeur ajoutée et améliorer l'efficacité des ressources.

## 3. L'intégration de la gestion des risques

Cette étape identifie et gère les risques associés à la LC et au développement durable, en se concentrant sur les défis tels que l'adoption de matériaux respectueux de l'environnement, la résistance des parties prenantes et les impacts environnementaux imprévus. Les outils comprennent :

- Risk Breakdown Structure (RBS) - l'arborescence des événements risqués - pour identifier et analyser les risques liés à l'application du cadre conceptuel avec LC et la durabilité.
- Analyse des modes de défaillance et de leurs effets (AMDE) pour hiérarchiser les risques en fonction de leur impact sur les résultats du projet et les objectifs ODD.

## 4. La mise en œuvre du processus dans l'étude de cas

Un projet pilote représentatif est sélectionné pour tester la faisabilité et l'efficacité du cadre conceptuel dans l'amélioration des résultats en matière de durabilité. Les outils et méthodes comprennent :

- Définition des critères de sélection d'un projet pilote en fonction de l'échelle du projet, de sa complexité et de ses objectifs de durabilité.
- Feuille de route de mise en œuvre détaillant les échéanciers, les responsabilités et les besoins en ressources.

- Cycle PDCA (Plan-Do-Check-Act) pour mettre en œuvre le processus de manière itérative afin de garantir une amélioration continue.
- Intégration BIM avec LC pour surveiller et visualiser les améliorations des processus Lean et les impacts sur la durabilité (par exemple, la consommation d'énergie, l'efficacité des matériaux) tout au long du cycle de vie du projet.

#### 5. L'analyse et l'affinement du processus

Au cours de cette étape, des données quantitatives et qualitatives sur les résultats du projet (par exemple, l'utilisation des ressources, l'empreinte carbone, la gestion des coûts) sont collectées pendant la mise en œuvre du projet pilote afin d'évaluer et d'affiner l'efficacité du processus. Les principaux outils comprennent :

- Techniques de collecte de données, notamment des enquêtes, des entretiens et une surveillance par capteurs pour recueillir des données pertinentes.
- Analyse statistique et analytique des données, notamment analyse de régression, analyse de corrélation et outils de visualisation pour évaluer l'impact des pratiques Lean sur la durabilité et pour analyser la relation entre les pratiques Lean et la performance en matière de durabilité.
- Indicateurs de performance en matière de durabilité tels que le pourcentage de réduction des déchets, la consommation d'énergie, la consommation d'eau et l'efficacité des matériaux pour mesurer l'impact sur la durabilité.
- Analyse de sensibilité pour tester l'impact des changements dans les variables du projet sur les résultats en matière de durabilité.
- Événements Kaizen pour recueillir des commentaires et identifier les domaines potentiels d'amélioration.

#### 6. L'amélioration continue et le suivi

Le cadre affiné est appliqué à plusieurs projets à des fins de validation et de normalisation pour une application cohérente et plus large dans le secteur de la construction. Des mécanismes de suivi et d'évaluation continus sont établis, notamment :

- Évaluations post-projet pour évaluer le succès, recueillir des informations, capturer les leçons apprises et les commentaires pour les améliorations futures, surveiller les performances dans les dimensions de durabilité, d'efficacité et de risque.
- Audits périodiques de durabilité pour vérifier la conformité du projet aux normes de durabilité et aux objectifs ODD.
- Programmes de formation pour les chefs de projet et les équipes sur la LC et l'intégration du développement durable.

#### IV. L'ÉTUDE DE CAS ET LES RESULTATS

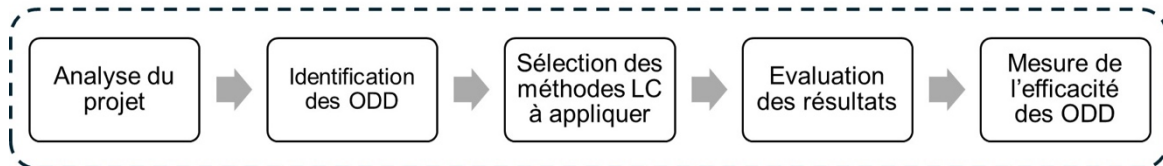
##### A. L'Intégration de la LC et de la Gestion Intégrée de Projet (IPD) dans un projet modulaire durable

Cette étude de cas examine l'intégration des pratiques de LC avec l'approche **Integrated Project Delivery (IPD)** - Gestion Intégrée de Projet- dans la construction d'un complexe de bureaux modulaire et écoénergétique. Le projet, d'une surface de 325 m<sup>2</sup> répartis sur deux étages, comprend une structure métallique, un plancher en acier/béton, et des panneaux muraux en acier formé à froid. L'objectif principal était d'atteindre des résultats durables tels que la **réduction des déchets**, l'**optimisation énergétique** et la **minimisation des émissions**, en cohérence avec les **ODD 12** (Consommation et production responsables) et **ODD 13** (Lutte contre les changements climatiques).

Une ligne de base a été définie sur la base des méthodes traditionnelles de construction utilisées pour des projets similaires, avec les indicateurs suivants :

- Déchets de matériaux : 15 % du total utilisé
- Durée de construction : 6 mois
- Consommation énergétique : 120 000 kWh
- Émissions : 50 tonnes équivalent CO<sub>2</sub>

L'objectif du projet était d'améliorer significativement ces indicateurs grâce à l'application des principes et outils de LC, démontrant ainsi les bénéfices de l'intégration LC + IPD dans une optique de développement durable.



**FIGURE 2.** Étapes de l'application du processus LC - ODD

**Figure 2** présente les **étapes d'application du cadre** dans l'étude de cas, depuis l'analyse initiale du projet jusqu'à la mesure de l'efficacité des ODD. Ce processus permet une intégration progressive et structurée des méthodes de Lean Construction (LC) aux objectifs de développement durable (ODD), en assurant un alignement cohérent entre stratégie de projet, outils LC déployés, et performance durable évaluée. Par ailleurs, avant d'engager la planification de la mise en œuvre du Lean dans une équipe peu familiarisée avec ces pratiques, une discussion collective a été facilitée afin de réfléchir aux raisons pour lesquelles ce projet revêtait une importance, tant à l'échelle individuelle que collective. Cette démarche visait à renforcer l'adhésion, à anticiper les résistances et à clarifier le rôle des pratiques Lean dans la réalisation d'un objectif commun.

##### B. L'application du processus

Les objectifs du projet comprenaient une **réduction de 40 % des déchets de matériaux** et **25 % de la consommation d'énergie**, grâce à la **préfabrication** et à une **planification efficace**. Un alignement en amont des parties prenantes a permis de définir des **indicateurs clés de**

**performance (KPI)** pour les émissions et l'efficacité énergétique, assurant une approche commune des objectifs durables. Des outils Lean tels que le **Last Planner System (LPS)** et le **Value Stream Mapping (VSM)** ont été utilisés pour optimiser les processus, tandis que l'intégration du **BIM** a permis une coordination en temps réel entre la préfabrication hors site et l'assemblage sur site.

L'équipe projet a utilisé une **Risk Breakdown Structure (RBS)** et une **Analyse des modes de défaillance et de leurs effets (AMDE/FMEA)** pour identifier et hiérarchiser les risques liés aux matériaux, aux processus, au transport, aux défauts en usine et aux émissions. Le modèle IPD a facilité une **répartition collective des risques**, renforçant la collaboration et la réactivité décisionnelle.

Pendant la phase de construction, l'accent a été mis sur l'utilisation efficace des équipements et la gestion des matériaux. Des capteurs IoT et des outils BIM ont permis un **suivi en temps réel** des progrès, de l'utilisation des ressources, de la consommation d'énergie et des émissions. Cette approche fondée sur les données a favorisé des **décisions éclairées** et un **raffinement continu des processus**.

Les données collectées ont permis d'analyser l'impact des pratiques Lean sur l'efficacité et les émissions. Les enseignements tirés ont conduit à des ajustements du cadre, comme l'**optimisation des plannings de commande des matériaux** pour limiter les besoins de stockage et l'**introduction de contrôles qualité supplémentaires** à des étapes clés de la préfabrication. Ces ajustements ont permis une **réduction supplémentaire de 5 % des déchets** et une **amélioration de 10 % de l'efficacité énergétique**. Une meilleure collaboration a favorisé une **culture d'amélioration continue**. Le cadre ainsi affiné a été testé sur des projets de plus grande envergure pour évaluer sa flexibilité. Les évaluations post-projet et audits de durabilité ont confirmé l'alignement avec les **ODD 11, 12 et 13**, tout en révélant une **forte satisfaction des parties prenantes** et des pistes d'amélioration continue.

### *C. Les résultats*

L'application conjointe de la LC et de l'IPD dans ce projet a produit les résultats suivants, comparés à la ligne de base traditionnelle. Les **figures 3 et 4** illustrent les principales améliorations observées : réduction des déchets, des délais, de la consommation énergétique et des impacts des risques.

#### **1. Réduction des déchets de matériaux :**

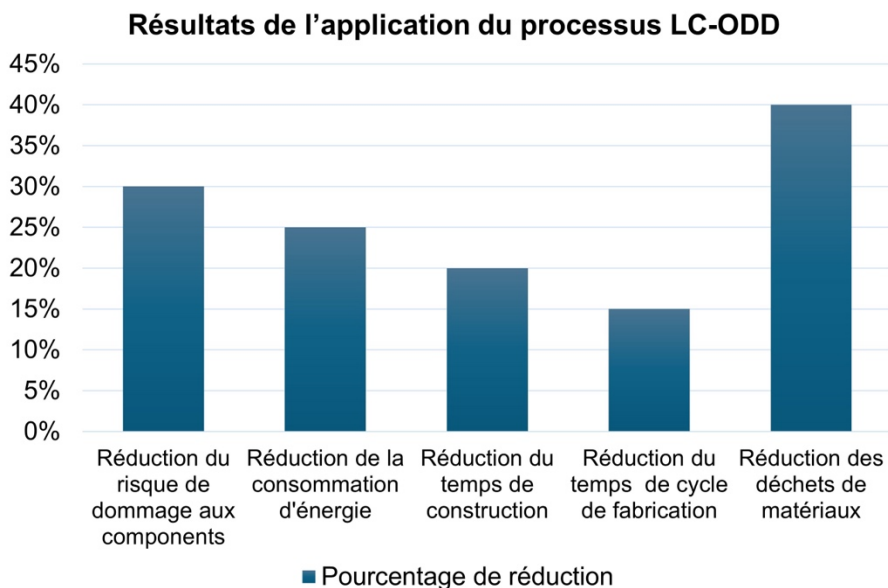
- **Référence traditionnelle** : 15 % de déchets.
- **Mise en oeuvre des outils LC** : 9 % de déchets (**réduction de 40 %**).
- **Amélioration** : la préfabrication et la livraison JIT ont conduit à une réduction de 40 % des déchets de matériaux, conformément à l'ODD 12. Cela a été réalisé en réduisant les commandes excessives, en minimisant les erreurs sur site et en éliminant les répétitions de travail.

#### **2. Réduction du temps de construction et amélioration de l'efficacité**

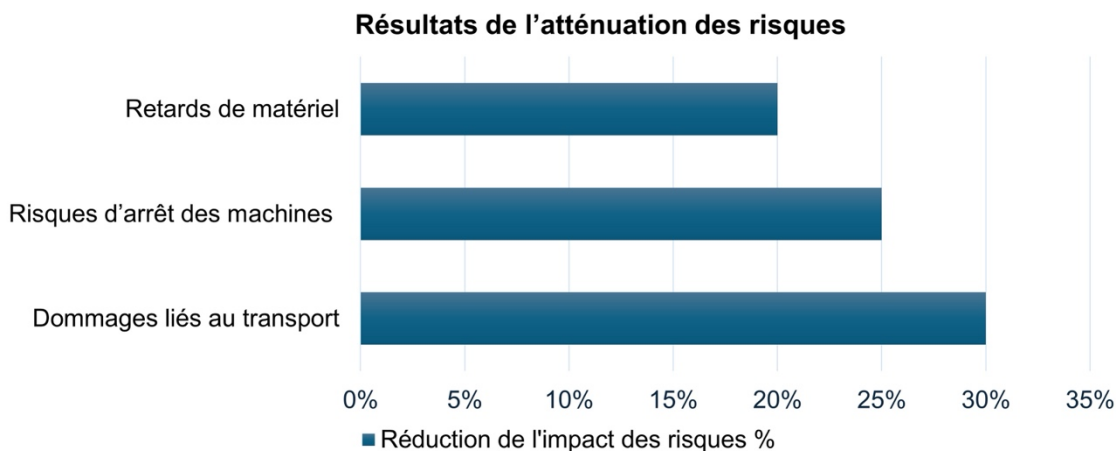
- **Référence traditionnelle** : 6 mois.
- **Mise en oeuvre des outils LC**: 4,8 mois (**réduction de 20 %**).

- **Amélioration** : les outils VSM et LPS ont amélioré l'efficacité du flux de travail, réduisant les temps de cycle de préfabrication de 15 % et le temps de construction global de 20 %. La fiabilité améliorée du calendrier a minimisé le temps d'inactivité des machines, réduisant la consommation de carburant et les émissions, contribuant ainsi à l'ODD 13. L'intégration BIM a facilité la coordination en temps réel, réduisant encore davantage les erreurs, les déchets de matériaux et les répétitions de travail.
3. **Optimisation énergétique et réduction des émissions**
- **Référence traditionnelle** : consommation d'énergie de 120 000 kWh ; émissions de CO2 de 50 tonnes.
  - **Mise en œuvre des outils LC** : consommation d'énergie de 90 000 kWh (**réduction de 25 %**) ; émissions de CO2 de 37,5 tonnes (**réduction de 25 %**).
  - **Amélioration** : Conditions contrôlées en usine (chauffage, éclairage, machines) ont optimisé la gestion énergétique, réduisant la consommation d'énergie de 25 % et diminuant les émissions pendant la construction, conformément à l'ODD 13 et soutenant la durabilité opérationnelle à long terme.
4. **Gestion collaborative des risques**
- **Référence traditionnelle** : risques élevés (dommages liés au transport, pannes, retards).
  - **Mise en œuvre des outils LC** : dommages liés au transport réduits de 30 % grâce à un meilleur emballage et suivi en temps réel, risques d'arrêt des machines réduits de 25%, retards de matériel réduits de 20%.
  - **Amélioration** : l'approche IPD a favorisé la gestion partagée des risques, améliorant la prise de décision et atténuant les retards potentiels. L'emballage amélioré et le suivi en temps réel ont réduit de 30 % les dommages causés aux modules préfabriqués pendant le transport, contribuant ainsi davantage à la réduction des déchets. L'AMDE a permis de réduire les temps d'arrêt des machines et les retards de livraison des matériaux, réduisant ainsi leur impact sur les délais du projet et les émissions.
5. **Prise de décision basée sur les données du projet**
- **Référence traditionnelle** : disponibilité limitée des données en temps réel.
  - **Mise en œuvre des outils LC** : outils de suivi en temps réel et analyses de données sur l'usage des équipements, carburant, efficacité.
  - **Amélioration** : l'utilisation d'outils de surveillance en temps réel et d'analyses de données a fourni des informations précieuses sur l'utilisation des équipements, la consommation de carburant et l'efficacité des processus. Cette approche basée sur les données du projet a permis à l'équipe du projet de prendre des décisions éclairées et d'affiner continuellement le processus.
6. **Engagement et satisfaction des parties prenantes**
- **Référence traditionnelle** : satisfaction modérée.
  - **Mise en œuvre des outils LC** : les parties prenantes ont exprimé un haut degré de satisfaction en raison de l'efficacité accrue, la réduction des coûts et la performance durable.

Dans l'ensemble, la mise en œuvre systématique du processus LC-ODD a permis des **améliorations significatives en matière de durabilité**, alignant les résultats du projet sur les objectifs des ODD. L'analyse statistique a révélé une forte corrélation entre les pratiques LC et les indicateurs de durabilité, confirmant le potentiel du cadre conceptuel pour renforcer l'efficacité et promouvoir la construction durable.



**FIGURE 3.** Résultats de l'application du processus LC – ODD



**FIGURE 4.** Réduction de l'impact des risques

L'**implication précoce des principales parties prenantes** a été essentielle pour aligner les objectifs et favoriser la collaboration, facilitant la responsabilité partagée, la gestion des risques et la prise de décision collaborative. Cela a contribué à une communication renforcée, une exécution optimisée et une réduction des risques. Bien que testé sur un projet modulaire, le **cadre reste adaptable** aux constructions traditionnelles ou hybrides, offrant une **flexibilité selon le type de projet**.

Malgré les résultats positifs, certains **défis ont été identifiés** : La résistance des parties prenantes peu familières avec les principes Lean a nécessité des actions ciblées de sensibilisation et de formation. La gestion de plusieurs parties prenantes aux intérêts divergents a ajouté une complexité organisationnelle. De plus, les investissements initiaux liés aux outils BIM, à la formation et aux dispositifs de gestion des risques ont pu constituer un frein à l'adoption.

Le succès du cadre repose sur l'accès à des technologies de suivi en temps réel, nécessaires à la collecte de données fiables sur les déchets, la consommation énergétique et la performance des processus – une exigence difficile à remplir dans certains contextes. Enfin, l'applicabilité du cadre dépend fortement des caractéristiques du projet (taille, complexité, engagement des acteurs), ce qui implique une adaptation nécessaire pour les projets plus complexes ou à grande échelle.

## V. CONCLUSION ET PERSPECTIVES

L'intégration des principes de LC à des modèles de gestion de projet collaboratifs comme l'IPD a démontré des améliorations significatives en matière de durabilité, d'efficacité et de réalisation de projets, conformément aux ODD 12 et 13. Cependant, une adoption plus large de ce cadre conceptuel nécessite de relever les défis de la résistance des parties prenantes, des coûts d'investissement initiaux et des contraintes spécifiques au projet.

En investissant dans la formation et les technologies numériques, en améliorant la collaboration des parties prenantes et en normalisant les meilleures pratiques, le secteur de la construction peut exploiter le potentiel de ce processus pour favoriser une réalisation de projets durables et résilients.

Le secteur de la construction se concentre de plus en plus sur les pratiques durables, et ce processus fournit un outil précieux pour combler l'écart entre les principes de LC et les objectifs de développement durable. La réduction du temps de construction et des émissions met en évidence le potentiel d'une application plus large de ce cadre dans les projets de construction écologique. Les recherches futures devraient se concentrer sur le perfectionnement des techniques de planification collaborative, l'exploitation des technologies numériques pour améliorer les capacités de surveillance et de prise de décision en temps réel, et l'élaboration de lignes directrices standardisées pour une application à l'échelle de l'industrie. Grâce à des améliorations continues et à l'engagement proactif des parties prenantes, le processus a le potentiel de révolutionner la réalisation de projets dans le secteur de la construction, contribuant à des environnements bâtis plus durables, plus efficaces et plus résilients.

## REFERENCES

Alves, T. C. L., & Tsao, C. C. Y. (2014). Lean construction - 2013: What's in it for construction projects? *In Proceedings of the 22nd Annual Conference of the International Group for Lean Construction, Oslo, Norway.*

Ballard, G., & Howell, G. (2003). Lean project management. *Building Research & Information*, 31(2), 119-133.

Brones, F., & de Carvalho, M. M. (2015). From 50 to 1: Integrating Sustainability Frameworks for Project Management. *Management of Environmental Quality: An International Journal*, 26(6), 752-763.

Gareis, R., Huemann, M., & Martinuzzi, A. (2013). Project Management and Sustainable Development Principles. *Project Management Institute (PMI)*.

Graham, S. (2011). *Integrated Project Delivery: A Guide to the Fundamentals of IPD*. RICS Books.

Griggs, D., Stafford-Smith, M., Gaffney, O., Rockström, J., Öhman, M. C., Shyamsundar, P., & Noble, I. (2013). *Sustainable Development Goals for People and Planet*. *Nature*, 495(7441), 305-307.

Jørgensen, B., & Emmitt, S. (2008). Lost in Transition: The Transfer of Lean Manufacturing to Construction. *Engineering, Construction and Architectural Management*, 15(4), 383-398.

Kibert, C. J. (2007). The Next Generation of Sustainable Construction. *Building Research & Information*, 35(6), 595-601.

Koskela, L. (1992). Application of the New Production Philosophy to Construction. Technical Report No. 72, Center for Integrated Facility Engineering, Stanford University.

Koskenvesa, A., Koskela, L., & Tolonen, T. (2010). The Last Planner System in a Construction Project. *Proceedings of the 18th Annual Conference of the International Group for Lean Construction (IGLC)*.

Ogunbiyi, O., Goulding, J. S., & Oladapo, A. (2013). An empirical study of the impact of lean construction techniques on sustainable construction in the UK. *Construction Innovation*, 13(1), 88-107.

Olaniran, H. F., Love, P. E. D., Edwards, D. J., Olatunji, O. A., & Matthews, J. (2019). Lean construction and sustainable development: Synergies, challenges and directions for future research. *Lean Construction Journal*, 2019, 1-19.

Parry, G. C., & Turner, C. E. (2006). Application of Lean Visual Process Management Tools. *Production Planning & Control*, 17(1), 77-86.

Salem, O., Solomon, J., Genaidy, A., & Minkarah, I. (2006). Lean Construction: From Theory to Implementation. *Journal of Management in Engineering*, 22(4), 168-175.

United Nations. (2015). Transforming Our World: The 2030 Agenda for Sustainable Development. *United Nations General Assembly Resolution A/RES/70/1*.

## ANNEXES

TABLEAU 1. Composants du processus avec les données d'entrée et de sortie, méthodes, et outils

Composants du processus	Données d'entrée	Méthodes et Outils	Données de sortie
<b>Étape 1:</b> Conception du processus et alignement sur les ODD	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Identification des défis critiques dans les projets de construction</li> <li>- Principes de Lean Construction</li> <li>- Cibles et ODD de l'ONU</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Revue de la littérature</li> <li>- Matrice de cartographie des ODD</li> <li>- Analyse des parties prenantes</li> <li>- Sélection des outils Lean (Last Planner System, Kaizen, Value Stream Mapping)</li> <li>- Évaluation des risques et des opportunités (analyse SWOT)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Objectifs du processus alignés sur ODD spécifiques</li> <li>- Principes Lean mis en correspondance avec les ODD</li> <li>- Identification des parties prenantes et de leurs rôles</li> <li>- Outils Lean identifiés et risques et opportunités potentiels</li> </ul>
<b>Étape 2:</b> Développement des dimensions principales et choix des outils	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Phases du cycle de vie du projet</li> <li>- Outils Lean à intégrer</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Livraison de projet intégrée (IPD)</li> <li>- Modélisation des informations du bâtiment (BIM)</li> <li>- Cartographie de la chaîne de valeur (VSM)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Processus de Lean Construction structuré intégrant les principes de développement durable</li> <li>- Outils Lean intégrés aux phases du cycle de vie pour améliorer la durabilité</li> </ul>
<b>Étape 3:</b> Intégration de la gestion des risques	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Risques identifiés liés au Lean et au développement durable</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Structure d'arborescence des risques (RBS)</li> <li>- Analyse des modes de défaillance et de leurs effets (AMDE)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Risques hiérarchisés et stratégies d'atténuation identifiées</li> <li>- Stratégie globale de gestion des risques intégrée au cadre</li> </ul>
<b>Étape 4:</b> Mise en œuvre du processus	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Sélection du projet pilote ou étude de cas</li> <li>- Information sur le projet</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Analyse du projet</li> <li>- Application du processus sur le projet</li> <li>- Cycle PDCA (Plan-Do-Check-Act)</li> <li>- Intégration BIM pour Lean</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Résultats sur la faisabilité et l'efficacité du processus</li> <li>- Données collectées sur les résultats environnementaux, sociaux et économiques</li> </ul>
<b>Étape 5:</b> Analyse et affinement du processus	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Données quantitatives et qualitatives du projet</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Techniques de collecte de données (enquêtes, entretiens, surveillance par capteurs)</li> <li>- Analyse statistique et analyse de données (régression, corrélation)</li> <li>- Indicateurs de performance en matière de développement durable</li> <li>- Analyse de sensibilité</li> <li>- Événements Kaizen</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Efficacité mesurée des pratiques Lean sur les résultats en matière de développement durable</li> <li>- Processus affiné basé sur l'analyse des données et le retour d'expérience des prenantes</li> </ul>
<b>Étape 6:</b> Amélioration continue et suivi	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Mises en œuvre du processus dans plusieurs projets</li> <li>- Leçons tirées des étapes précédentes</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Évaluations post-projet</li> <li>- Audits de durabilité</li> <li>- Programmes de formation</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Processus validé et standardisé</li> <li>- Mécanismes d'amélioration continue mis en place</li> <li>- Adoption et application plus larges des pratiques Lean pour le développement durable</li> </ul>