

Proposition d'une démarche générique pour la co-conception infrastructures et process industriels

Proposal for a general approach to infrastructure and industrial process co-design

Nhat-Tung Phan¹, Anne-Lise Huyet¹, Jean-Luc Paris¹, Aurélie Talon¹

¹ Université Clermont Auvergne, Clermont Auvergne INP, Institut Pascal, F-63000 Clermont Ferrand, France, {nhat_tung.phan, aurelie.talon}@uca.fr, {anne-lise.huyet, jean-luc.paris}@sigma-clermont.fr

RÉSUMÉ. La construction industrielle est confrontée à l'interaction complexe entre des infrastructures et des processus industriels au sein de ladite infrastructure, ce qui entraîne des conséquences préoccupantes sur l'environnement. Afin de promouvoir des pratiques de construction plus durables, il est impératif d'adopter de nouvelles méthodes de production et d'assemblage respectueuses de l'environnement. Cependant, la co-conception entre les infrastructures et les process industriels est encore insuffisante, ce qui entraîne des erreurs coûteuses de conception et de construction. Afin d'améliorer les performances globales des projets industriels, une coordination en temps réel et une communication efficace entre les deux briques essentielles, à savoir les infrastructures et les process industriels, sont primordiales. Dans cet article, nous proposons une approche systémique novatrice visant à renforcer la collaboration entre les infrastructures et les process industriels tout au long du processus de développement d'un projet industriel. Nous présentons également un outil de quantification intégrant des indicateurs clés des deux domaines, tels que l'optimisation financière, l'efficacité énergétique, la gestion des flux, la sécurité et la gestion holistique. Pour illustrer cette approche, nous exposons une étude de cas, suivie d'une analyse des résultats obtenus et des perspectives.

ABSTRACT. Industrial construction is confronted with the complex interaction between infrastructure and industrial processes within that infrastructure, with worrying consequences for the environment. In order to achieve more sustainable construction practices, it is imperative to adopt new environmentally-friendly production and assembly methods. However, co-design between infrastructure and industrial process is still insufficient, leading to costly design and construction errors. In order to improve the overall performance of industrial projects, real-time coordination and effective communication between the two essential components - infrastructure and industrial process - are crucial. In this paper, we propose an innovative systems approach to strengthen collaboration between infrastructures and industrial process throughout the development process of an industrial project. We also present a quantification tool integrating key indicators from both fields, such as financial optimization, energy efficiency, flow management, safety and holistic management. To illustrate this approach, we present a case study, followed by an analysis of the results obtained and prospects.

MOTS-CLÉS. Co-conception Infrastructures-Process industriels, approche systémique, fusion des deux écosystèmes, indicateurs centralisés.

KEYWORDS. Infrastructure-industrial process co-design, systemic approach, fusion of the two ecosystems, centralized indicators.

1. Introduction - Problématique

Le secteur du bâtiment produit des quantités massives de déchets et consomme de grandes quantités de ressources naturelles et d'énergie, qui représentent des enjeux importants en matière de consommation énergétique et d'impacts environnementaux (JORF, 2023). De plus, le domaine de la construction est souvent confronté à des défis importants en matière d'efficacité et de productivité, qui peuvent être attribués à plusieurs facteurs, notamment au manque d'interconnexion entre les différentes parties prenantes et aux dysfonctionnements dans la chaîne de valeur (Barbosa et al., 2017). Dans ce contexte, le domaine de la construction industrielle est particulièrement touché, en raison non seulement de la difficulté d'individualiser les impacts environnementaux et énergétiques liés aux bâtiments et à leurs fonctionnalités de base, mais aussi de la complexité dans la gestion des processus industriels qui y sont intégrés (ADEME, 2019). Dans la suite de cet article, le terme

« infrastructures » sera employé pour désigner l'ensemble des constructions existantes et neuves – bâtiments, réseaux, cheminements – des sites industriels. Afin d'avancer vers une construction plus durable, il est essentiel que l'industrie et les infrastructures adoptent de nouvelles méthodes de production et d'assemblage en rupture avec les pratiques actuelles. Pour atteindre cet objectif, il est primordial de développer des services, des produits et des process industriels respectueux de l'environnement, limitant la pollution, la consommation d'énergie et la production de déchets, tout en proposant des conditions de travail moins pénibles.

Les deux mondes – infrastructures et process industriels – sont en train d'évoluer vers des modèles plus stratégiques pour faire face aux grands enjeux présentés ci-dessus. Toutefois, la co-conception infrastructures-process industriels reste encore peu développée et souvent limitée à une collaboration entre différentes disciplines sans une approche structurée. En effet, nous remarquons que beaucoup d'erreurs de conception puis de construction, sont déclarées sur de nombreux chantiers industriels, engendrant des surcoûts énormes, de faibles productivités et un bilan carbone questionné, etc. (Michel and Rivaton, 2021). Ces erreurs sont probablement dues au manque de communication claire et cohérente entre les différentes équipes et parties prenantes impliquées dans le projet, au manque de coordination entre les organisations et les échanges des deux processus, ainsi qu'aux différences culturelles et linguistiques.

Bien que les deux systèmes aient des chronologies de développement quasiment similaires dans les grandes étapes, telles que : l'analyse des besoins, le cahier des charges, la conception, la réalisation, la mise en service et la fin de vie, ainsi que des outils de développement et des supports d'information de plus en plus proches, leur coordination en temps réel est nécessaire pour améliorer certaines étapes. En effet, leurs étapes sont décalées dans le temps, leurs langages sont propres, et surtout un manque de communication et de synchronisation entre ces deux mondes est souvent constaté. D'un point de vue strictement temporel, l'idéal serait que l'élaboration des infrastructures et du process industriel se fasse simultanément. D'un point de vue de la conception agile, une co-conception des deux univers conduit à des gains de temps et de coûts, ainsi qu'à une amélioration de la qualité globale du projet, du fait qu'une remise en cause dans l'un des deux univers doit se répercuter immédiatement dans l'autre.

Cet article propose une approche systémique novatrice visant à relier les deux écosystèmes et à améliorer leur collaboration tout au long du processus de développement pour que les deux projets infrastructures et process industriels avancent en interaction. Cette démarche aboutira à la création d'une méthodologie innovante pour accompagner le travail collaboratif et l'usage des données issues des modèles numériques des infrastructures et des process industriels. En favorisant la convergence de ces deux écosystèmes, cet article s'efforce de faire une contribution significative à l'industrie de la construction en mettant l'accent sur des critères d'optimisation spécifiques. Ces critères englobent l'amélioration de l'efficacité financière à la fois lors de la construction (frais de main-d'œuvre, coûts des matériaux, etc.) et de l'exploitation ultérieure (consommation électrique, consommation d'eau, etc.), mais aussi la maîtrise énergétique, l'optimisation des flux, les conditions de travail des occupants et la gestion holistique du projet. Cette étroite collaboration entre les infrastructures et les process industriels sera guidée par des objectifs concrets, permettant ainsi de concrétiser la vision d'un système plus durable, efficient et respectueux de l'environnement.

En résumé, cet article propose une approche novatrice visant à améliorer la construction industrielle en coordonnant de manière optimale les infrastructures et les process industriels. Cette démarche comprend trois étapes clés. Tout d'abord, elle consiste à définir séparément les deux systèmes, à savoir les Infrastructures et les Processus Industriels, en utilisant une approche systémique qui prend en compte les aspects fonctionnels, structurels et dynamiques de chaque système (Section 2). Ensuite, nous proposerons une chronologie fusionnée des deux systèmes en définissant des indicateurs centralisés et en les évaluant selon les normes correspondantes (section 3). Cette approche intégrée permet d'optimiser la coordination entre les parties prenantes impliquées

dans le développement des infrastructures et des processus industriels, réduisant ainsi les risques d'erreurs coûteuses et améliorant la qualité globale du projet. Enfin, l'article sera illustré par un cas d'étude concret, démontrant ainsi la pertinence et l'efficacité de cette approche en action (section 4). En alignant les objectifs, les délais et les critères d'évaluation, cette approche novatrice offre des perspectives prometteuses pour une construction industrielle durable, efficiente et respectueuse de l'environnement. Nous terminerons cet article par une conclusion incluant des perspectives de recherche à plus ou moins longs termes (section 5).

2. Etat des lieux

Les efforts actuels visant à améliorer la collaboration dans le domaine de la construction sont basés sur les bonnes pratiques d'autres industries telles que l'aérospatiale, l'automobile et l'industrie navale (Turk, 2020). Malheureusement, le domaine de la construction diffère fondamentalement de ces industries et ses échecs récurrents pourraient s'expliquer par un manque de connaissance de la nature systémique spécifique de la construction (Fernández-Solís, 2008). Cette nature systémique a été examinée dans la littérature (Bougrain and Carassus, 2003; De Blois et al., 2016; Fernández-Solís, 2008; Winch, 1998), mais elle n'a pas encore reçu l'attention qu'elle devrait avoir. Cette partie est axée sur l'analyse systémique de chaque écosystème dans sa globalité, en intégrant tous les composants du système et ses fonctions durant l'ensemble de son cycle de vie (de la conception à la gestion-exploitation-maintenance).

2.1. Approche systémique

L'analyse systémique a été développée par Le Moigne (1977) pour analyser des systèmes complexes. Cette dernière est utilisée de plus en plus dans les projets d'infrastructures (Allaire, 2012; Botton and Forgues, 2017) et largement dans les systèmes de processus industriels depuis longtemps (Bila Deroussy, 2015; Flaus and Georgakis, 2018; Stal-Le Cardinal, 2009). Cette approche considère que l'ensemble du projet est un système complexe interconnecté, dans lequel chaque composant a un impact sur l'ensemble du système, et où l'environnement et le système interagissent. Ainsi, l'analyse des interactions entre les différents éléments du système est essentielle pour comprendre comment le système fonctionne dans son ensemble. En utilisant cette approche, les professionnels de la construction peuvent mieux comprendre les impacts des différentes décisions sur l'ensemble du système, identifier les éventuels conflits entre les différents éléments et anticiper les conséquences de ces conflits. La mise en place d'une approche systémique permet également de favoriser une communication efficace entre les différentes parties prenantes impliquées dans le projet, de faciliter la prise de décisions éclairées et de maximiser l'efficacité du système dans son ensemble.

L'approche systémique cherche à comprendre la complexité à travers quatre notions de base en interaction, à savoir : le système, la complexité, la globalité et l'interaction, et d'une douzaine de notions complémentaires, plus techniques et orientées vers l'action, dont l'information, la finalité, la rétroaction, etc. (Donnadieu et al., 2003). En pratique, l'approche systémique se fonde principalement sur les outils de triangulation systémique (Donnadieu et al., 2003) et de modélisation systémique (Le Moigne, 2005). Nous allons utiliser dans cette recherche la triangulation systémique qui consiste à observer trois aspects différents mais complémentaires du système considéré (Donnadieu et al., 2003; Le Moigne, 1994) : l'aspect fonctionnel est relatif à ce que fait le système, c'est-à-dire à sa finalité ; l'aspect structurel concerne les composants du système, les différentes interactions entre ces composants et ainsi leurs taxinomies ; l'aspect dynamique concerne la nature évolutive du système, le comportement du système.

2.2. Système infrastructures

2.2.1. Aspect fonctionnel

Le système infrastructures est une représentation abstraite du contexte de conception et de réalisation des infrastructures. L'objectif de ce dernier est de modéliser l'ensemble des parties prenantes impliquées dans la construction des infrastructures, notamment les composantes humaines, matérielles et immatérielles qui interviennent dans les activités liées à son cycle de vie (Oumeziane et al., 2005). Le système infrastructures est considéré comme un niveau intermédiaire entre l'utilisateur et l'environnement dans lequel il est construit. Les représentations que ce niveau intègre doivent répondre à un certain nombre de fonctions d'usage permettant l'accomplissement des activités prévues en tenant compte de diverses conditions (voir Figure 1).

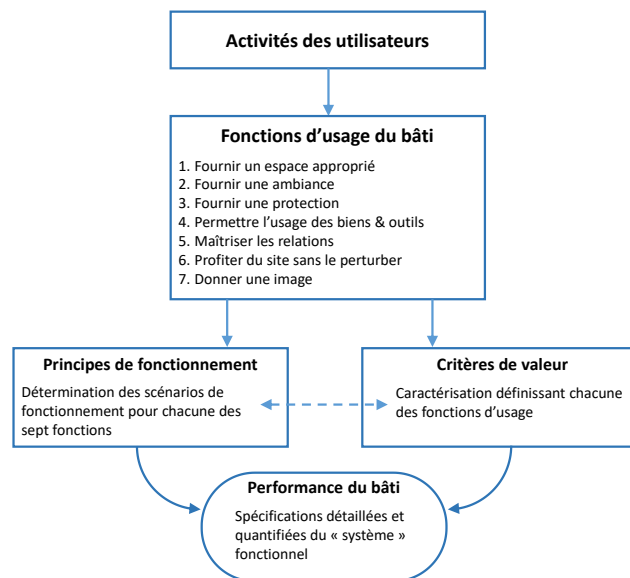


Figure 1. Articulation des concepts systémiques (Gobin, 2014)

2.2.2. Aspect structurel

L'ingénierie de construction suit un processus de gestion de projet très structuré en France, basé sur les phases définies par la loi MOP de 1985 (loi n° 85-704 du 12 juillet 1985 concerne la Maîtrise d'Ouvrage Publique et ses relations avec la maîtrise d'œuvre privée). Cette loi, accompagnée du Code de la Commande Publique, régule les relations entre la maîtrise d'ouvrage et la maîtrise d'œuvre dans le cadre des projets de construction publics en France. Elle recommande que les rôles des acteurs soient clairement définis et que les changements d'acteurs soient effectués à chaque phase du projet (voir Figure 2).

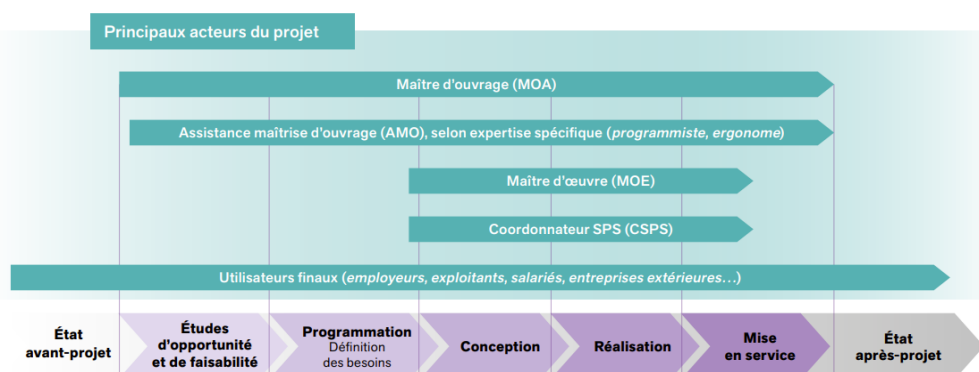


Figure 2. Axe classique du cycle de vie d'une construction (les étapes et les principaux acteurs) (INRS, 2021)

En répartissant les phases MOP sur le cycle de vie d'une construction, il est possible de suivre l'avancement du projet et d'assurer une gestion efficace de chaque étape.

2.2.3. Aspect dynamique

Dans la construction, la plupart des modèles, lois et approches existantes définissent le cycle de vie du bâtiment comme un axe linéaire qui ne supporte aucune parallélisation des tâches (Oumeziane, 2005). Cela signifie qu'il y a une suite chronologique d'étapes qui ne peuvent pas être effectuées en même temps. Parmi plusieurs étapes réparties sur l'axe du cycle de vie (Figure 2), seules certaines d'entre elles devraient être disposées sur un axe linéaire et se dérouler successivement dans le temps en respectant la loi MOP, à savoir : la conception, la réalisation et l'exploitation et la maintenance (O&M). Selon l'approche systémique dans l'étude de Oumeziane (2005), ces trois étapes nécessairement successives sortent de l'axe du cycle de vie et s'inscrivent dans un nouvel axe discrétisé par rapport au temps. Les graduations temporelles sur ce nouvel axe sont rapportées aux « états » du système (voir Figure 3). Le cycle de vie de la construction passe d'une « étape » caractérisant une évolution dans le temps, à un « état » caractérisant l'évolution d'un système (Johnson et al., 1970). Grâce à cette évolution, les différentes étapes du cycle de vie d'un système peuvent désormais s'exécuter en parallèle, offrant ainsi une meilleure flexibilité dans le processus de conception.

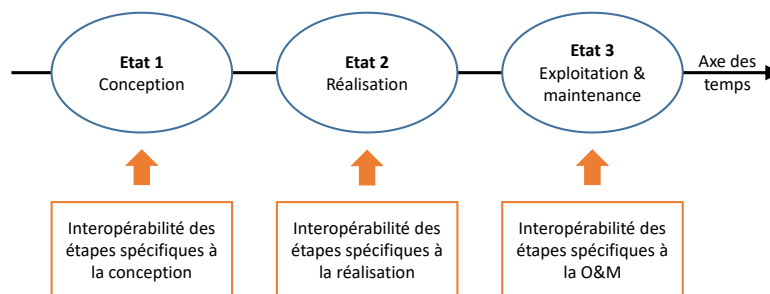


Figure 3. *Axe des états obligatoire successif (Oumeziane, 2005)*

Pour mieux comprendre le concept « état », nous prenons par exemple la conception d'un système bâtiment. Traditionnellement, l'étape de conception incluait plusieurs étapes telles que l'étude de budget, l'étude de faisabilité et l'esquisse, etc. Cependant, avec l'avènement de l'interopérabilité, ces étapes peuvent être intégrées dans un « état » de conception unique. Cet état est construit sur la base d'un premier niveau d'interopérabilité, tel que défini par Oumeziane (2005).

2.3. Système process industriels

2.3.1. Aspect fonctionnel

Avant d'établir un système de production, il est pertinent de fournir une définition générale d'un système. Selon la norme française NF E 90.001, un système est défini comme une combinaison de sous-systèmes qui forme un ensemble organique complexe ayant pour objectif de remplir une fonction globale. Dans le contexte industriel, un produit industriel est une création humaine conçue pour satisfaire les besoins de l'utilisateur tout en apportant une valeur ajoutée à une matière première. Partant de matériaux, de pièces, de sous-ensembles, etc., il élabore des produits de valeur supérieure et qui peuvent être : soit des produits finis (directement commercialisés), soit des produits intermédiaires servant à la réalisation des produits finis. Recevant le flux de matières d'œuvre et générant le flux de produits élaborés, le système de production est également alimenté en énergies et approvisionné en consommables auxiliaires. Ainsi, le système de production génère aussi des déchets divers. Par ailleurs, le fonctionnement du système de production nécessite différentes interventions humaines. L'illustration sur la Figure 4 permet de schématiser un système de production.

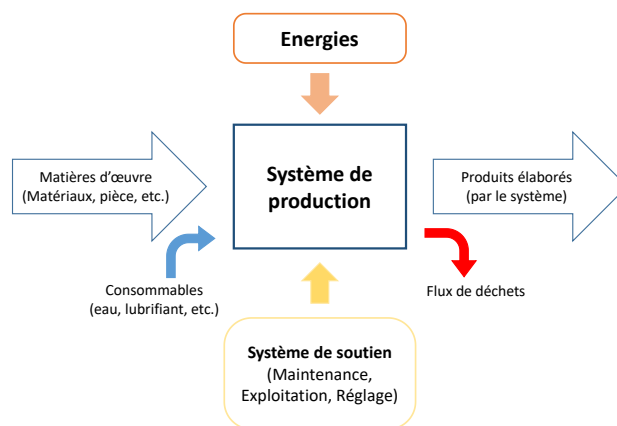


Figure 4. Exemple type des sous-systèmes d'un système industriel (selon la NF E 90.001)

2.3.2. Aspect structurel

Selon Pinel (2013), une entreprise manufacturière évalue les états de maturité de ses produits en considérant deux perspectives : la perspective technique et la perspective commerciale.

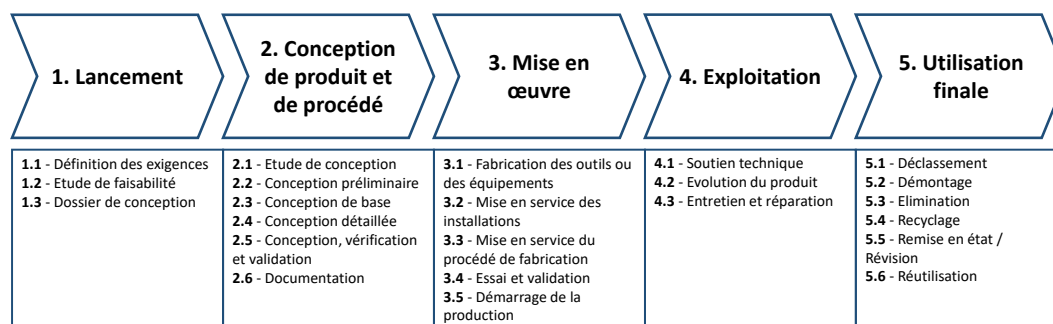


Figure 5. Phase de conception du cycle de vie produit (NF EN 16311, 2013)

La maturité commerciale est déterminée par les ventes physiques des produits. Le volume des ventes peut être en croissance, en phase de maturité ou en déclin (Kotler and Armstrong, 2010). Cela renvoie à une approche marketing du produit, qui étudie son évolution sur le marché. Cette approche comprend quatre phases successives : l'introduction du produit sur le marché, la croissance des ventes, la phase de maturité du marché et enfin le déclin. Cependant, cette notion de maturité s'applique uniquement aux produits fabriqués en série, ayant pour objectif la rentabilité financière.

En ce qui concerne la maturité technique, le cycle de vie est appréhendé de manière conceptuelle, conformément à la norme EN 16311. Il englobe toutes les phases considérées comme des étapes plus ou moins indépendantes, depuis la conception du produit (sa naissance) jusqu'à son retrait ou son démantèlement (voir la Figure 5). La maturité technique est évaluée à travers à la fois le produit théorique et le produit physique.

2.3.3. Aspect dynamique

Les entreprises industrielles sont confrontées à des pressions telles que le changement des habitudes de consommation et la mondialisation, ce qui affectent leur compétitivité et leur rentabilité (Pôle interministériel de prospective et d'anticipation des mutations économiques : PIPAME, 2013). Les entreprises les plus performantes investissent du temps et de l'argent pour améliorer les compétences de leur personnel et adapter leur système de management et d'organisation pour répondre à ces défis. Les objectifs des projets d'entreprise sont d'augmenter la rentabilité en réduisant les temps de cycle, en accélérant le débit de production, en réduisant les temps de mise sur le marché, en augmentant la valeur perçue par les clients et en augmentant la

quantité de valeur ajoutée générée par unité de temps (Messaoudene and Gramdi, 2007). Pour rester compétitives et durables, les entreprises doivent adapter leur système de production pour répondre aux exigences de flexibilité et de réactivité nécessaires pour faire face à un environnement en constante évolution.

2.4. Etapes de conception dans les deux écosystèmes

Les grandes étapes de réalisation d'un projet sont semblables pour les deux écosystèmes :

- **Études de faisabilité** : analyse approfondie pour décider de la réalisation du projet ;
- **Programmation** : définition précise des besoins et attentes du projet ;
- **Conception** : élaboration des plans détaillés en tenant compte des aspects techniques et créatifs ;
- **Réalisation** : construction effective du projet ;
- **Mise en service** : finalisation du projet et réception des espaces de travail ;
- **Fin de vie** : gestion de la période de déconstruction ou démolition du bâtiment, en prévoyant des solutions durables.

Bien que les étapes soient semblables, les délais de réalisation pour les deux écosystèmes divergent. Il s'agit là de l'un des freins à une approche de co-construction optimale : les contraintes et les alternatives possibles ne sont ainsi pas échangées entre les deux écosystèmes dans des délais appropriés.

3. Approche proposée

Comme énoncé précédemment, l'objectif du présent travail est de proposer une démarche permettant d'optimiser l'interaction entre deux écosystèmes Infrastructures / Process industriels. Pour ce faire, il est important d'identifier les points de départ possibles pour le développement de notre approche. Les trois enjeux principaux de l'approche proposée sont :

- **Enjeux technologiques** : ils englobent les besoins de communication entre les acteurs des infrastructures et de l'industrialisation (définitions des besoins et objectifs, palier les problèmes de temporalité divergente et de langages différents), ainsi que les besoins d'intégrer les données process et infrastructures dès la phase de programmation / conception, le plus en amont possible du projet ;
- **Enjeux scientifiques** : identification et quantification de l'impact des prises de décision sur l'interaction Infrastructures - Process industriels (coût, énergie, pénibilité, rentabilité, etc.) ;
- **Enjeux économiques** : donner de l'information pertinente à clairvoyance aux industriels pour une répartition financière optimale entre les deux écosystèmes.

3.1. Fusion des deux écosystèmes

3.1.1. Vision globale

La figure 6 présente les similitudes entre les étapes du cycle de vie des deux écosystèmes. Idéalement, le déclenchement des étapes suivantes devrait attendre l'achèvement des étapes précédentes des deux écosystèmes pour garantir un échange des besoins respectifs. Les indicateurs que nous proposons pour comparer plusieurs options de réalisation d'un projet « infrastructures et process industriels » sont indiqués en partie droite de cette figure.

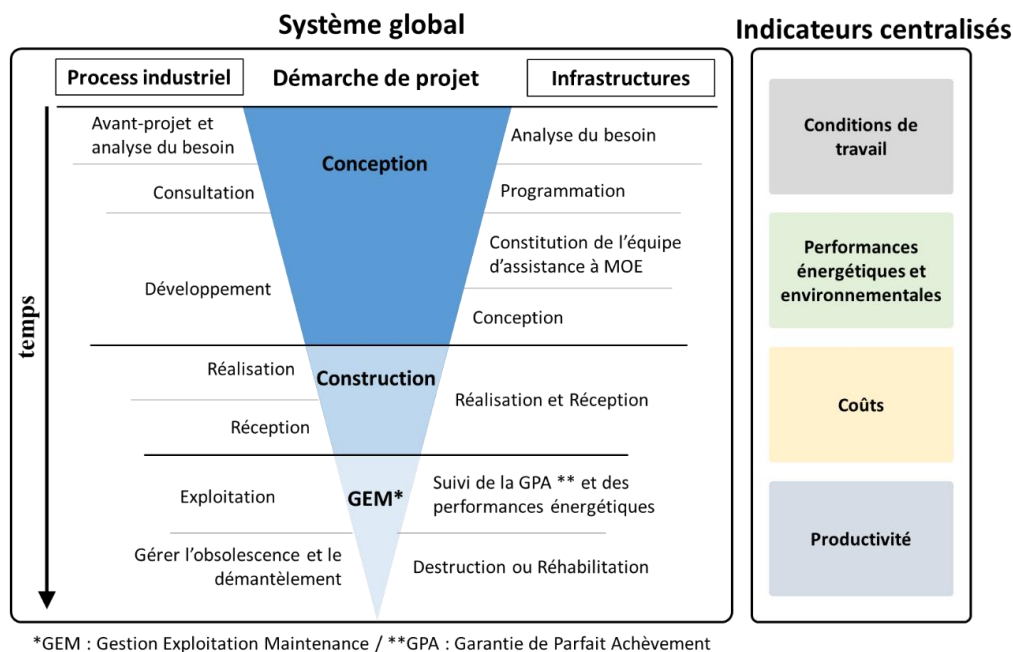


Figure 6. Fusion des deux écosystèmes

3.1.2. Vision détaillée

a) Acteurs, documentations et types de données de chaque écosystème

Dans cette section, nous formalisons la démarche conjointe de conception des infrastructures et du système industriel. Pour cela, nous procédons étape par étape en couplant les deux écosystèmes et en précisant les acteurs, la documentation générée ainsi que les données en entrée (voir le **Tableau 1**).

Industrialisation				Infrastructure			
Etapes	Acteurs	Documentation	Données d'entrée	Etapes	Acteurs	Documentation	Données d'entrée
<i>Avant-projet et Analyse du besoin</i>	Clients Responsable production Responsable méthode Responsable maintenance Responsable CHSCT Chef projet Equipe industrialisation	Etude de l'existant Analyse du besoin CdCF Process CdCF Machine	Texte Tableur Image	<i>Analyse du besoin</i>	MOA Utilisateurs Usagés	Rapport Diagnostic terrain Diagnostic bâti Expression des besoins Pré-étude de faisabilité	Textes Tableurs Anciens plans Anciens dossiers Anciens rapports
<i>Consultation Assistance MOA</i>	Clients Responsable production Responsable méthode Responsable maintenance Responsable CHSCT Chef projet Equipe d'industrialisation	Questionnaire AVP Plan CdCF Machines Analyse des risques Layout Budget Planning	Texte Tableur CAO 2D CAO 3D Calendrier Image	<i>Programme</i>	MOA AMO Programmist Chef de projet Géomètre Urbaniste	Programme Planning général Ancienne DOE pour l'existant Diagnostic + rapport géomètre	Texte Tableur
<i>Développement</i>	Chef de projet Equipe d'industrialisation MOE	Etudes mécaniques Etudes process Etudes électriques Etudes automatismes Etudes robotiques Plans Notice d'instruction Dossiers techniques Analyses des risques Notes de calcul Fiches recette Dossiers de formation	Texte Tableur CAO 2D CAO 3D Programmes informatiques Schémas électriques Simulation mécanique Simulation de flux Simulation robotique	<i>Constitution de l'équipe d'assistance</i>	MOA AMO Service marché Chef de projet	Programme ancien DOE Diagnostics (plomb, amiante, etc.) Dossier Consultation MOE Dossier administratif	Texte Tableur Maquette 3D Calendrier
				<i>Conception</i>	MOA MOE AMO Contrôleurs techniques CSPS	Dossier conception Etudes techniques Budget Planning d'opération Dossier de consultation aux entreprises	Texte Tableur Maquette 3D Calendrier
<i>Réalisation</i>	Chef de projet Equipe d'industrialisation MOE	Réalisation sous-ensembles Déclaration CE	Texte Tableur CAO 2D	<i>Travaux</i>	MOA AMO MOE	Dossiers d'exécution Etudes techniques Compte-rendu chantier	Texte Tableur Plan

	Ingénieur QSE	Plaque CE	CAO 3D		Contrôle technique Coordinateur sécurité Entreprise EXE Fournisseurs Fabricants Géomètre	Dossier sécurité PGCSPS – PSPS	Maquette 3D
<i>Réception</i>	Clients Chef de projet Responsable CHSCT Ingénieur QSE Equipe d'industrialisation Equipe de maintenance MOE	Fiche recette Vérification CdCF Vérification CE Plan prévention Tests Réglage Livraison Positionnement Raccordement Démarrage	Texte Tableur CAO 2D CAO 3D Maquette bâtiment				
<i>Exploitation</i>	Responsable CHSCT Responsable méthode Responsable production Responsable maintenance Opérateur	Fiche de poste Formation Suivi qualité LEAN Procédure intervention Procédure maintenance	Texte Tableur	<i>Suivi du parfaitement achèvement (GPA)</i>	MOA AMO MOE Usager entreprise	Rapport suivi GPA	Texte Tableur Plan Maquette 3D
				<i>Suivi des performances énergétiques</i>	MOA AMO MOE Entreprise Référence NRJ	Rapport du rendu énergétique	Données énergétiques
<i>Obsolescence et démentiellement</i>	Clients Chef de projet Responsable méthode Responsable maintenance Responsable CHSCT	Mettre à jour les données chantier et process	Maquette 3D BIM	<i>Rénovation ou Destruction</i>			

Tableau 1. Fusion des deux écosystèmes, vision détaillée

b) Identification des indicateurs des deux écosystèmes

- Infrastructures

Nous proposons d'intégrer une approche holistique dans l'évaluation de la performance énergétique des infrastructures. Cette approche se caractérise par une quantification des indicateurs de performance incluant les trois dimensions du concept de développement durable appliqué aux bâtiments comme présentés à la **Figure 7** ; ils intègrent le cycle de vie complet. Ces indicateurs couvrent : (i) la dimension économique, évaluée en termes de coût ; (ii) la dimension écologique, évaluée en termes d'impact sur l'environnement ; (iii) la dimension sociale, évaluée en termes de confort et de préservation de la santé des employés.

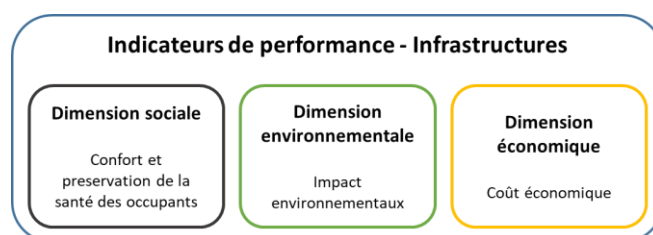


Figure 7. La conception énergétique des infrastructures s'articule autour de trois dimensions essentielles du concept de développement durable (Velázquez Romo, 2015)

- Process industriel

Afin de répondre à une concurrence économique intense, il est impératif d'optimiser la conception des systèmes de production en respectant diverses contraintes telles que les normes de qualité, la sécurité des processus de fabrication, les impacts environnementaux et les contraintes économiques. Dans ce contexte, il est crucial d'examiner toutes les alternatives fonctionnelles et techniques lors de la conception d'un système de production afin de trouver la solution la plus efficace. Une évaluation précise de la performance du système de production est essentielle pour parvenir à une conception et

une gestion opérationnelle optimales. Dans le cadre de l'amélioration du processus de coréalisation infrastructures - industrie, notre approche consiste à analyser le comportement d'un système de production et à évaluer des indicateurs clés tels que le taux de production et le niveau moyen des stocks intermédiaires, etc. Ces mesures permettent de représenter de manière significative la performance d'une ligne de fabrication (Ouazene, 2013).

- Indicateurs centralisés des deux écosystèmes

En tenant compte des dimensions essentielles présentées pour les deux mondes susmentionnés, il est nécessaire de développer un système d'indicateurs (voir le Tableau 2) qui non seulement fournit aux concepteurs des éléments de décision et l'accompagne dans le choix des éléments influençant la performance du système global, mais également permet d'évaluer la pertinence de la démarche adoptée. Il est primordial de noter que la sélection de chaque indicateur s'est basée sur une analyse rigoureuse des réglementations actuelles, à savoir : Code du travail, RE2020 (Réglementation Environnementale 2020), RT2012 (Réglementation Thermique 2012), norme ISO 15686-5, sites gouvernementaux, etc. dans chaque domaine considéré, assurant ainsi une approche scientifiquement fondée et en conformité avec les normes en vigueur.

Indicateurs		Domaines	Critères	Approche proposée	
Condition de travail	Pénibilité	Indus.	(i) Contraintes physiques marquées (manutention manuelle, postures pénibles, vibrations mécaniques) (ii) Rythmes de travail (travail de nuit, travail en équipes successives alternantes, gestes répétitifs) ; (iii) Environnements agressifs (bruit, agents chimiques dangereux, températures extrêmes, milieu hyperbare)	Démarche d'évaluation des risques professionnels. Réf : Articles L.4161-1 et D.4161-1 (Code du travail).	
			Energétiques et Environnementaux	Confort d'été	DH (degré-heure d'inconfort)
Energétiques	(i) Bbio (besoins bioclimatiques) ; (ii) C _{ep} (consommations en énergie primaire totale) ; (iii) C _{ep,nr} (consommations d'énergie primaire non renouvelable).				
Carbone	(i) IC _{énergie} (impact sur le changement climatique associé aux consommations d'énergie primaire) ; (ii) IC _{construction} (impact sur le changement climatique associé aux composants + chantier).				
Déchets de construction	Infra. & Indus.	(i) Quantité de déchets produits ; (ii) Taux du tri, du réemploi et de la valorisation des déchets ;		Facture d'enlèvement des déchets. Réf : Site ADEME expertise.	
Déchets de production	Indus.	Quantité de déchets produits par le procédé industriel ;			
Coûts	Construction	Infra.	(i) Matériaux de construction ; (ii) Main-d'œuvre ; (iii) Matériels et frais de chantier ; (iv) Etudes	Evaluation du coût global proposée par norme ISO 15686-5 Réf : ISO/TC 59, 2008.	
		Indus.	(i) Etudes (ii) Production (iii) Installation		
	Exploitation	Consommation électrique	Infra.	Consommation électrique annuelle des systèmes associés au bâtiment.	Estimer la consommation électrique moyenne des appareils considérés en prenant compte : puissance de l'appareil, durée d'utilisation sur l'année.
			Indus.	Consommation électrique annuelle du système de production.	Taux d'utilisation (heures par an) x Coût de l'énergie (kWh)
		Consommation en eau	Infra. & Indus.	Quantité d'eau consommée chaque année	Facture d'enlèvement d'eau. Site : Services eau France
	Entretien - Maintenance	Immobilisation	Indus.	Nombre de pièces stockées dans le système	Simulation de flux Réf : Draghici et al. (1998), Giard (2003).
			Infra. & Indus.	Coûts de l'entretien courant	Facture d'enlèvement.
	Productivité		Indus.	Nombre de pièces produites ; volume des en-cours ; taux occupation machine et temps de cycle principalement	Simulation de flux

Tableau 2. Ensemble des indicateurs des deux écosystèmes

3.2. Méthode d'évaluation des indicateurs

Dans le but d'obtenir une évaluation ciblée du système des indicateurs, nous avons élaboré une grille d'évaluation qui associe une note de 0 à 5 à chaque indicateur en fonction de sa valeur physique (voir le **Tableau 3**).

Nous prenons également en compte les connaissances et les normes établies dans les domaines considérés, telles que : RT2012 et RE2020 pour les indicateurs des performances énergétique et environnementale, Code de Travail pour les indicateurs de Condition de travail, etc. A titre d'information, la RE 2020, en vigueur depuis 2021, encourage la construction de bâtiments à faible impact environnemental en agissant sur l'isolation thermique, la production d'énergie et la réduction de l'empreinte carbone. Elle va au-delà de la RT 2012, en place depuis 2013, qui vise à réduire la consommation d'énergies dans les nouvelles constructions en améliorant l'isolation thermique. Bien que la RE2020 ne soit pas imposée aux infrastructures industrielles, nous la considérons comme un ensemble d'objectifs à atteindre. L'idéal étant d'obtenir la note maximale.

Catégorie	Critères	Valeur physique	Echelle de notation					
			0	1	2	3	4	5
Condition de travail	Contraintes physiques marquées	% des tâches réalisables sans contraintes physiques marquées	< 20%	20-40%	40-60%	60-80%	> 80%	Aucune contrainte
	Rythmes de travail	Rythme de travail	Intense	Soutenu	Modéré	Régulier	Flexible	-
	Environnements agressifs	Rythme d'exposition aux conditions environnementales extrêmes	Régulier	Occasionnel	Limité	Minimal	Condition favorable	-
Performances énergétique et environnementale	Confort d'été	Température intérieure maximale en °C	> 28°C	26°C-28°C	24°C-26°C	22°C-24°C	20°C-22°C	< 20°C
	Energétique	B _{bio} , C _{ep} , C _{ep, nr}	> 20% de la norme	> 10-20% de la norme	> 10% de la norme	< 0-10% de la norme	< 10-20% de la norme	< 20% de la norme
	Carbone	IC _{énergie} , IC _{construction}						
	Déchets de construction	% des matériaux utilisés se transforment en déchets						
	Déchets de production	% des déchets non-recyclés générés pendant la production	> 50%	30-50%	10-30%	5-10%	0-5%	0
Coût	Construction	En fonction des besoins spécifiques	Démolition et reconstruction complète	Extension majeure	Extension mineure	Réaménagement intérieur ou ajout d'espaces fonctionnels	Légères modifications	Pas de changement
	Consommation électrique	% de la consommation maximale	90-100%	70-89%	50-69%	30-49%	10-29%	0-9%
	Consommation en eau							
	Entretien - maintenance	% d'automatisation dans une chaîne de production						
Immobilisation	Nombres de produits restent en stock	Un très grand nombre	Un grand nombre	Un nombre substantiel	Un nombre modéré	Un nombre faible	Un nombre très faible	
Productivité	Nombre de pièces produites par rapport à un coût de production	Capacité de production	Aucune capacité	Très limitée	Limitée	Moyenne	Elevée	Maximale

Tableau 3. Grille d'évaluation des indicateurs centralisés

3.3. Discussion – Synthèse

Les indicateurs sélectionnés dans cette étude offrent une vue d'ensemble intégrée des deux domaines considérés. Ils sont en adéquation avec les informations disponibles aux premières étapes

d'un projet. Ensemble, ces indicateurs forment une base solide pour évaluer de manière complète les différentes alternatives de conception, en mettant particulièrement l'accent sur les aspects environnementaux, d'efficacité et de conditions de travail au sein des deux écosystèmes.

Afin de préserver l'intégrité des données tout en fournissant des informations pertinentes pour la prise de décision, les résultats de l'évaluation sont présentés sous forme d'indicateurs individuels, sans recourir à des coefficients de pondération subjectifs pour les agréger. Une fois ces résultats obtenus, ils peuvent être utilisés pour orienter des décisions pratiques grâce à un processus en cinq étapes (voir la Figure 8). Ce processus comprend l'identification des priorités du projet, la comparaison objective des performances des alternatives de conception, la prise de décision éclairée basée sur ces résultats, l'ajustement de la conception si nécessaire, ainsi que la communication et la justification des choix aux parties prenantes.

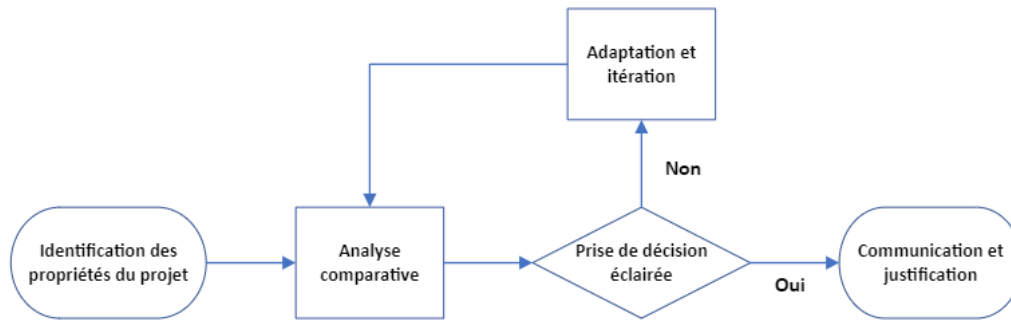


Figure 8. Schéma proposé pour l'application pratique de l'évaluation des indicateurs

Cette approche assure une méthode structurée d'évaluation et de prise de décision fondée sur des données objectives.

4. Cas d'étude

4.1. Présentation du cas d'étude

Cette section se concentre sur l'application de notre méthodologie à un cas d'étude réel situé sur un site industriel historique de 80 ans. Au fil des décennies, cet établissement a vu l'ajout itératif d'équipements et d'extension d'infrastructures pour les abriter.

Dans ce cas d'étude, l'objectif fixé par l'industriel est d'améliorer les flux de production en agissant sur l'utilisation éventuelle de convoyeurs automatisés et/ou en réorganisant l'espace de production. Cette réorganisation de l'espace de production peut impliquer une extension du bâtiment actuel. Cette étude englobe donc des analyses de flux pour évaluer les performances de la ligne de production, ainsi que des évaluations des performances énergétiques et environnementales des infrastructures. Ainsi, notre objectif primordial est d'atteindre des améliorations substantielles en termes d'efficacité opérationnelle et en termes de sobriété énergétique.

4.1.1. Caractéristiques générales du bâtiment I2PI

Sur la base des plans fournis par l'industriel, le bâtiment I2PI, une usine métallurgique, a une surface au sol de 3470m² pour la partie existante et de 4893m² pour l'option extension (voir **Figure 9**).

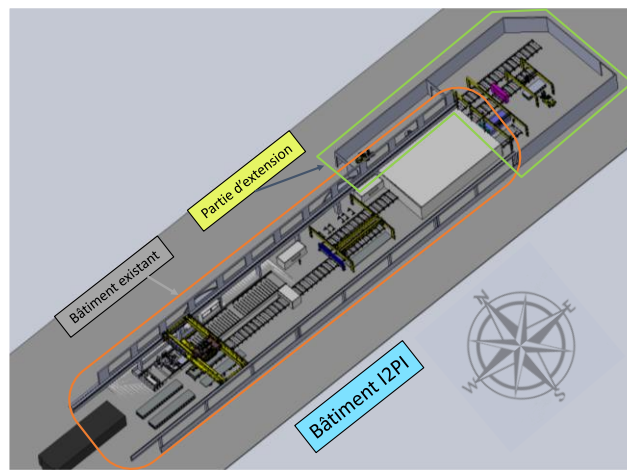


Figure 9. Schéma représentatif du bâtiment I2PI comprenant la partie existante et la partie d'extension

Sa hauteur de faîtage atteint 12m. La structure du bâtiment est constituée d'un radier en béton de 50cm d'épaisseur et d'une ossature en acier de type portique et panne pour la superstructure. La toiture, avec une pente de 5%, est composée d'une couverture en tôle d'acier de 2mm d'épaisseur. Les façades du bâtiment présentent les caractéristiques suivantes : la façade « Nord » comprend une paroi en béton de 20 cm d'épaisseur jusqu'à mi-hauteur, puis une paroi avec vitrage simple pour le reste de la hauteur ; la façade « Est » est constituée d'une paroi en béton de 15 cm d'épaisseur ; les façades « Sud » et « Ouest » sont composées de parois en tôle d'acier d'une épaisseur de 2mm.

En ce qui concerne les caractéristiques énergétiques, les aspects suivants sont pris en compte (données correspondant à l'utilisation actuelle du bâtiment) :

- **Activité** : le bâtiment comprend une seule zone, la zone de production, qui est maintenue à une température moyenne de 15 °C pendant les périodes de production. Il est supposé que l'atelier n'est pas climatisé mais est chauffé lorsque la température descend en dessous de 8 °C ;
- **Mode de production** : le travail s'effectue en 3*8h, 365 jours/an ;
- **Énergies utilisées** : l'électricité est utilisée pour les processus industriels, la manutention, l'éclairage et la ventilation, tandis que le gaz est utilisé pour le chauffage et les équipements sanitaires collectifs (ESC).

4.1.2. Ligne de fabrication et ses produits

Avant d'aborder en détail la ligne de production abritée dans le bâtiment I2PI, il convient de préciser que les produits sont différenciés par des couleurs distinctes, à savoir l'Orange, le Violet, le Bleu et le Vert chacun ayant une gamme et des temps de passage sur les postes différents. Le bâtiment I2PI est positionné entre deux bâtiments adjacents, désignés sous les noms de bâtiments A et B (voir **Figure 10**).

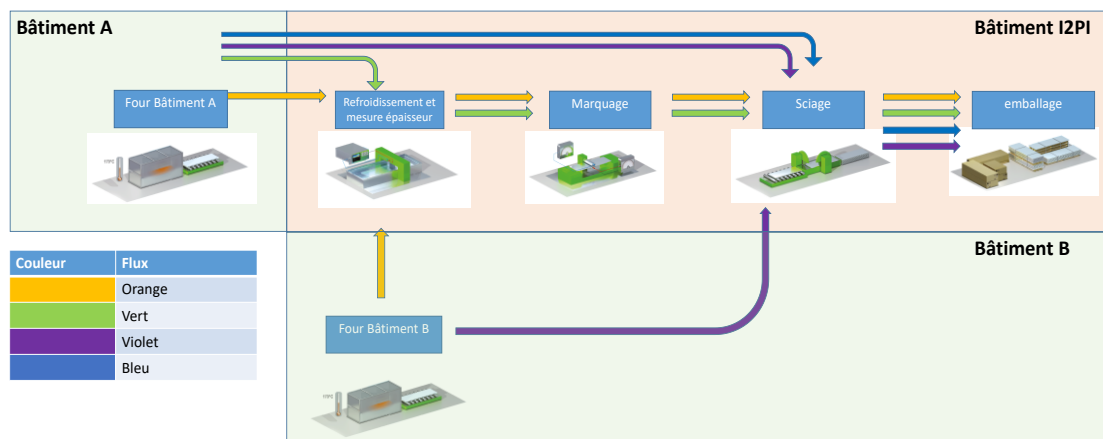


Figure 10. Schématisation de la ligne de production du bâtiment I2PI

La ligne de production du bâtiment I2PI est constituée de quatre machines essentielles, à savoir le dispositif de refroidissement et de mesure d'épaisseur des tôles, le système de marquage de la surface des tôles, la station de sciage et l'unité d'emballage. L'ensemble des caractéristiques générales de ces 4 machines est présenté dans le **Tableau 4**. Il est important de noter que les données exposées dans ce tableau résultent de la collecte d'informations empiriques provenant de l'industrie concernée.

Dans le bâtiment A, qui se trouve en dehors du périmètre d'étude, les tôles subissent un processus de chauffage dans des fours de revenu. Une partie de ces tôles, correspondant aux produits Bleu et Violet, est refroidie à l'air libre avant d'être acheminée vers le bâtiment I2PI, où elle sera soumise à une étape de mise à dimension sur le poste de sciage. En revanche, les produits Orange et Vert sont dirigés vers le bac de refroidissement situé au sein du bâtiment I2PI. De manière similaire, dans le bâtiment B, également situé en dehors de la zone d'étude, les tôles sont chauffées dans des fours de revenu. Une partie de ces tôles, correspondant au produit Violet, subit un processus de refroidissement à l'air libre avant d'être acheminée vers le bâtiment I2PI pour y être mise à dimension sur le poste de sciage. Le produit Orange, quant à lui, est transféré vers le bac de refroidissement spécifique au bâtiment I2PI. Les temps de transport et les consommations des différentes machines nous ont été fournies par l'industriel à partir de relevés sur une période d'un an.

Machine	Process				
	Refroidissement et mesure d'épaisseur	Marquage	Sciage	Emballage	Convoyeur
Capacité maximum (pièce)	6 (en simultané)	Pièce par pièce	2	Par paquet entier	-
	Note : Il faut 5 mins de chargement et 5 mins de déchargement par pièce, tout en faisant en même temps			Note : 8 pièces par paquet max Chaque paquet est d'une même famille	-
Taille Stock en non-automatique (paquet)	6	6	3	6	-
Règle de priorité dans stock	FIFO	FIFO	FIFO	FIFO	-
Consommation électrique annuelle (MWh)	5,80	10,00	39,72	12,00	25,00
Consommation en eau (L/jour)	100	-	-	-	-

Tableau 4. L'ensemble des caractéristiques des quatre machines de la ligne de production dans bâtiment I2PI

Dans le cadre de notre étude, nous nous sommes basés sur les données industrielles collectées afin d'alimenter les modèles de simulation stochastique de flux développés sous le logiciel Arena.

4.2. Scénarios envisagés

Différents scénarios ont été envisagés pour analyser les impacts énergétiques et opérationnels de la ligne de production au sein du bâtiment I2PI :

- Scénario 1 : le processus de production est entièrement confiné dans le bâtiment I2PI sans extension. Un manutentionnaire assure le transport des produits entre chaque poste de travail. Ce scénario met l'accent sur l'efficacité des opérations manuelles. Cependant, il peut y avoir des difficultés de circulation entre les machines, ce qui peut entraîner des inefficacités dans le flux de production ;
- Scénario 2 : une extension du bâtiment sera réalisée afin de linéariser le processus de production. Un manutentionnaire est chargé de transporter les produits le long de la ligne de production, en tenant compte de la nouvelle configuration de l'espace. Ce scénario permet une circulation plus fluide entre les machines, ce qui peut améliorer l'efficacité globale de la production ;
- Scénario 3 : basé également sur une extension du bâtiment visant à linéariser le processus de production, ce scénario intègre un système de convoyeurs automatisés pour transporter des produits entre les différents postes de travail. L'utilisation de ce système de convoyeurs permet d'optimiser l'efficacité et la fluidité des opérations, en réduisant la dépendance à la main-d'œuvre humaine et en minimisant les contraintes de temps ;
- Scénario 4 : dans ce scénario, le bâtiment I2PI existant est démoli et reconstruit pour intégrer une solution optimisée pour la ligne de production, en utilisant les connaissances acquises à partir des scénarios précédents.

L'ensemble des scénarios présentés est synthétisé dans le Tableau 5.

Scénario	1	2	3	4
Infrastructures	Bâtiment existant	Bâtiment existant + extension	Bâtiment existant + extension	Bâtiment neuf
Process industriel – type de transport	Manutentionnaire	Manutentionnaire	Convoyeurs automatisés	Solution optimisée des scénarios précédents

Tableau 5. Les scénarios envisagés dans l'étude de la performance du bâtiment I2PI

L'analyse de ces différents scénarios permettra de prendre des décisions éclairées quant à l'optimisation de la ligne de production, en tenant compte des considérations énergétiques, opérationnelles et économiques.

4.3. Résultats et analyse

4.3.1. Résultats

Étant donné que la réglementation RE2020 n'est pas encore applicable pour les bâtiments industriels, nous avons utilisé la réglementation thermique RT2012 pour effectuer les calculs énergétiques du bâtiment I2PI. De plus, nous sommes confrontés à un manque d'informations détaillées sur le système HVAC (chauffage, ventilation, climatisation d'air) du bâtiment I2PI. Les spécifications techniques précises de ces systèmes, tels que les types d'équipements utilisés, leur capacité, leur efficacité énergétique et leur configuration, ne sont pas disponibles. Ce manque d'informations limite notre capacité à effectuer une analyse approfondie de la performance énergétique du système HVAC. En raison de cette contrainte, nous nous concentrons principalement sur d'autres aspects énergétiques du bâtiment, tels que les déperditions thermiques et le Bbio (voir

Tableau 6). Les déperditions thermiques représentent les pertes de chaleur à travers l'enveloppe du bâtiment, tandis que le Bbio est une mesure du besoin bioclimatique du bâtiment. Nous présentons ensuite les résultats obtenus à l'aide du logiciel de simulation de flux Arena pour évaluer la productivité de notre ligne de production (voir **Tableau 6**). Ces résultats incluent les indicateurs représentant la productivité (nombre de pièces produites) et l'immobilisation des produits (nombre de pièces dans le système), ainsi que la consommation électrique de chaque scénario considéré.

Scénario		Scénario 1	Scénario 2	Scénario 3	Scénario 4
Infrastructures	Option	Bâtiment sans extension	Bâtiment avec extension		Bâtiment neuf
	Bbio / Bbio_max (points)	263 / 100	250 / 100		86 / 100
	Déperdition thermique totale (kW)	667,263	931,127		380,782
Process industriel	Option	Manutentionnaires	Manutentionnaires	Convoyeurs automatisés	Solution optimisée des scénarios précédents
	Nbr. De pièces produites (par an)	12708	15325	15695	
	Nbr. De pièces dans le système (moyenne)	1552	250,55	47,04	
	Consommation électrique en total / en maximum (kWh par an)	37146 / 67519	42076 / 67519	40790 / 92519	

Tableau 6. Ensemble des résultats issus des calculs énergétiques réalisés selon la RT2012 pour les options liées au bâtiment I2PI, ainsi que des calculs de productivité de la ligne de production

4.3.2. Analyse

Pour chacun des scénarios, à partir des données collectées et des résultats obtenus (étude sur les performances énergétiques et la productivité de la ligne de production du bâtiment I2PI), nous estimons les critères définis au Tableau 3 sur une échelle de 0 à 5 (de 0 la plus mauvaise évaluation à 5, la meilleure). Les estimations obtenues sont présentées sous forme de matrice de décision au Tableau 7.

Concernant les conditions de travail, l'utilisation d'un convoyeur automatisé réduit les contraintes physiques marquées. Les scénarios 3 et 4 obtiennent donc une meilleure note que les scénarios 1 et 2. L'estimation du Bbio provient de l'étude thermique réalisée. Les déchets de construction sont les plus importants (note de 0) lors de la démolition et reconstruction du bâtiment (scénario 4) et ils sont inexistantes (note de 5) lorsqu'aucuns travaux sur le bâtiment n'est réalisé (scénario 1). De la même manière, les coûts de construction sont les plus importants pour le scénario 4 que pour le scénario 1. L'estimation du critère « consommation électrique » est déduite des résultats du Tableau 6. L'estimation du critère « productivité » est également obtenue à partir des résultats du Tableau 6. Le scénario 3 est réduit à 4 (au lieu de 5, comme le meilleur des scénarios, le scénario 3), puisque nous estimons que la période de construction aura une incidence sur la productivité.

La pondération proposée, traduisant l'importance relative de chaque critère, accorde une plus grande importance aux coûts, puis aux performances énergétiques et environnementales et à la productivité et enfin aux conditions de travail. Pour chaque scénario, la somme du produit des évaluations par la pondération des critères fournit un score. Par comparaison relative des scénarios évalués, nous obtenons un classement des scénarios : du préféré (score maximal) au moins bon (score minimal). Ainsi, le classement du préféré au moins bon est : scénario 3, scénario 4, scénario 1 et scénario 2.

Catégorie	Critère	Pondération	Scénario			
			Scénario 1	Scénario 2	Scénario 3	Scénario 4
Conditions de travail	Contraintes physiques marquées	1	3	3	4	4
Performances énergétique et environnementale	Bbio	2	0	0	0	4
	Déchets de construction		5	2	2	0
Coût	Construction	3	5	2	2	0
	Consommation électrique (ligne de production)		2	2	3	3
	Immobilisation		0	3	5	5
Productivité	Nombre de pièces produites	2	4	4	5	4
Score			42	36	48	44

Tableau 7. Evaluation des 4 scénarios en utilisant la grille d'évaluation des critères

Le scénario 3 est le préféré aux autres dans la mesure où il présente les avantages suivants :

- Efficacité opérationnelle améliorée : les taux d'utilisation des machines sont élevés, indiquant une meilleure utilisation des ressources et une optimisation des opérations ;
- Flux de production plus fluide : le nombre moyen de pièces en stock est relativement faible, ce qui indique une gestion plus efficace du flux de production et une réduction des goulots d'étranglement potentiels ;
- Réduction de la dépendance à la main-d'œuvre humaine : l'utilisation de convoyeurs automatisés permet de réduire la nécessité de manutentionnaires pour le transport des produits, ce qui peut entraîner une réduction des coûts et une plus grande fiabilité du processus ;
- Meilleure planification et contrôle : l'automatisation du transport des produits permet une planification plus précise et un meilleur contrôle du flux de production, ce qui peut contribuer à une efficacité globale accrue ;
- Perspectives : l'extension du bâtiment offre également une flexibilité accrue pour faire face à une éventuelle croissance future de la production. Elle permet d'ajouter de nouvelles machines ou de modifier la configuration de la ligne de production pour s'adapter aux évolutions du marché.

5. Conclusion et perspectives

Notre étude a souligné les problèmes de communication entre les domaines des infrastructures et du process industriel, qui entraînent des erreurs de conception dans les sites industriels. Nous avons identifié que le principal défi réside dans la synchronisation des étapes de réalisation, afin d'avoir connaissance des besoins au bon moment. Pour résoudre cette problématique, nous avons proposé une approche générique de co-conception qui aligne les étapes chronologiques des deux domaines, tout en fournissant un système d'indicateurs axés sur des critères essentiels tels que les conditions de travail, les performances énergétiques et environnementales, les coûts et la productivité du process industriel. Nous avons également développé une grille d'évaluation d'indicateurs, qui fournit des informations importantes pour quantifier les décisions, en se basant sur les normes actuelles des domaines considérés. La démarche proposée a été appliquée sur un cas d'étude qui nous a permis d'appliquer l'outil de quantification proposé à un cas inspiré du réel. Cependant, il convient de noter que notre étude présente actuellement certaines limites. Des travaux sur l'interopérabilité des

différents logiciels utilisés dans les deux écosystèmes restent à mener pour garantir l'efficacité des échanges et la standardisation des données entre les différents acteurs.

Bibliographie

- ADEME, 2019. BATINDUS 2 - Etude énergétique et environnementale des bâtiments industriels.
- Allaire, D., 2012. Développement d'une approche systémique de la gestion patrimoniale d'un parc immobilier d'envergure nationale pour améliorer sa performance énergétique: une application menée sur le parc immobilier de l'Etat utilisé par le ministère de la défense (PhD Thesis). Paris Est.
- Barbosa, F., Woetzel, J., Mischke, J., 2017. Reinventing construction: A route of higher productivity. McKinsey Global Institute.
- Bila Deroussy, P., 2015. Approche systémique de la créativité: outils et méthodes pour aborder la complexité en conception amont (PhD Thesis). Paris, ENSAM.
- Boton, C., Forgues, D., 2017. The need for a new systemic approach to study collaboration in the construction industry. *Procedia engineering* 196, 1043–1050.
- Bougrain, F., Carassus, J., 2003. Bâtiment: de l'innovation de produit à l'innovation de service. Paris: Puca.
- De Blois, M., Lizarralde, G., De Coninck, P., 2016. Iterative project processes within temporary multi-organizations in construction: the self-, eco-, re-organizing projects. *Project Management Journal* 47, 27–44.
- Donnadieu, G., Durand, D., Neel, D., Nunez, E., Saint-Paul, L., 2003. L'Approche systémique: de quoi s'agit-il. Diffusion de la pensée systémique.
- Draghici, G., Brinzei, N., Filipas, I., 1998. La modélisation et la simulation en vue de la conduite des systèmes de production. *Les cahiers des enseignements francophones en Roumanie* 110–130.
- Fernández-Solís, J.L., 2008. The systemic nature of the construction industry. *Architectural Engineering and Design Management* 4, 31–46.
- Flaus, J.-M., Georgakis, J., 2018. Une approche systémique pour l'analyse de cybersécurité des systèmes industriels, in: 21e Congrès de Maîtrise Des Risques et Sûreté de Fonctionnement $\Lambda\mu 21$.
- Giard, V., 2003. Gestion de la production et des flux. Economica Paris.
- Gobin, C., 2014. Le bâtiment comme système. Techniques de l'Ingénieur.
- INRS, 2021. Conception des lieux et des situations de travail, Démarche de prévention.
- Johnson, R.A., Kast, F.E., Rosenzweig, J.E., Latombe, J.-Y., 1970. Théorie, conception et gestion des systèmes. (No Title).
- JORF, 2023. Produits et matériaux de construction du secteur du bâtiment (PMCB) [WWW Document]. Ministère Écologie Énergie Territoires. URL <https://www.ecologie.gouv.fr/produits-et-materiaux-construction-du-secteur-du-batiment-pmcb> (accessed 5.4.23).
- Kotler, P., Armstrong, G.M., 2010. Principles of marketing. Pearson Education India.
- Le Moigne, J.L., 2005. Les formalismes de la modélisation systémique. Séminaire Some physicochemical and mathematical tools for understanding of living systems. Repéré à [<http://www.intelligence-complexite.org/fileadmin/docs/0505formalismesvfr.pdf>].
- Le Moigne, J.-L., 1994. La théorie du système général: théorie de la modélisation. FeniXX.
- Le Moigne, J.-L., 1977. La théorie du système général, théorie de la modélisation, paris. PUF (nouvelle édition, 1990).
- Messaoudene, Z., Gramdi, J., 2007. Proposition d'un cadre conceptuel et systémique des systèmes de production lean. 7è Congrès international de Génie Industriel, Trois Rivières, Québec.
- Michel, B., Rivaton, R., 2021. L'industrialisation de la construction (Rapport construction hors-sit). Ministère chargé du logement.
- NF EN 16311, 2013.
- Ouazene, Y., 2013. Maîtrise des systèmes industriels: optimisation de la conception des lignes de production (PhD Thesis). Troyes.

- Oumeziane, H., Deshayes, P., Bocquet, J.-C., 2005. A Standard Design Process for the Building Sector, in: DS 35: Proceedings ICED 05, the 15th International Conference on Engineering Design, Melbourne, Australia, 15.-18.08. 2005.
- Oumeziane, H.A., 2005. Approche systémique pour une ingénierie du bâtiment intégrée: contribution à l'interopérabilité d'acteurs en conception avancée (PhD Thesis). Châtenay-Malabry, Ecole centrale de Paris.
- Pinel, M.M., 2013. L'introduction de la gestion du cycle de vie produit dans les entreprises de sous-traitance comme vecteur d'agilité opérationnelle et de maîtrise du produit.
- PIPAME, 2013. Relocalisations d'activités industrielles en France - Revue de littérature.
- Stal-Le Cardinal, J., 2009. Approche systémique de la prise de décision en entreprise (PhD Thesis). Université de Nantes.
- Turk, Ž., 2020. Interoperability in construction – Mission impossible? *Developments in the Built Environment* 4, 100018. <https://doi.org/10.1016/j.dibe.2020.100018>
- Velázquez Romo, E., 2015. Processus de conception énergétique de bâtiments durables (PhD Thesis). Paris, ENSAM.
- Winch, G., 1998. Zephyrs of creative destruction: understanding the management of innovation in construction. *Building research & information* 26, 268–279.