

Industrialisation de la filière Hors-Site

Interreg



Cofinancé par
l'Union Européenne
Kofinanziert von
der Europäischen Union



Grande Région | Großregion



CAP CONSTRUCTION
ensemble, construisons durable



Wallonia Clusters

Avec la participation de



Mars 2026

KÉA

3 rue Danton, 92240 Malakoff / T. 33 (0)1 40 84 74 00 / www.kea-partners.com

Cap Construction • Tous droits réservés • Kéa & Partners 2026

Confidentialité

Ce rapport (le projet « Industrialisation de la filière Hors-Site ») a été élaboré par Kéa & Partners et/ou ses filiales ou entités affiliées (collectivement, « Kéa ») à la demande exclusive de Cap Construction, en vue de soutenir la promotion stratégique de la filière de la Construction Hors-Site en Grande Région.

Le Rapport est destiné en priorité à l'usage de Cap Construction, des membres du consortium concerné et, le cas échéant, des autorités européennes compétentes, conformément aux règles de diffusion, de confidentialité et de publication applicables au projet. Toute autre diffusion à des tiers ou au public devra être appréciée au regard de ces règles ainsi que des éventuelles dispositions spécifiques convenues entre les parties.

Les informations contenues dans ce Rapport sont issues de sources considérées comme fiables, mais Kéa n'a pas procédé à une vérification indépendante de leur exactitude ou de leur exhaustivité. Les analyses et conclusions reposent sur des jugements formulés à partir de ces informations.

Kéa n'assume aucune responsabilité pour toute utilisation du Rapport par des tiers, sauf disposition contraire prévue dans un accord écrit spécifique ou résultant des obligations applicables au projet.

Le Rapport ne constitue ni un conseil d'investissement, ni une garantie de performance future, ni une recommandation quant à la réalisation d'une transaction.

Kéa n'est pas tenue d'actualiser le Rapport pour refléter des événements ou développements survenus après sa date de remise.

Ce Rapport est incomplet sans les analyses détaillées et la présentation orale qui l'accompagnent.

Pour toute question relative à ce document, merci de contacter :

Karim Hatem

Senior Partner

karim.hatem@kea-yllos.com

+33 6 07 56 49 88

Sommaire

| | |
|---|-----------|
| I. Introduction..... | 6 |
| II. Etat des lieux de la maturité industrielle de la construction hors site en grande région | 7 |
| A. Niveau de maturité du marché hors site en grande région : une base industrielle solide, des marchés encore insuffisamment structurés | 7 |
| B. Cartographie de la maturité industrielle : des pratiques hétérogènes selon les territoires | 8 |
| III. Analyse des filières d'excellence industrielle transposables | 9 |
| A. Rationnels de sélection des filières industrielles à étudier | 9 |
| B. Secteur aéronautique et naval | 10 |
| 1. Modèles organisationnels intégrés : sécuriser productivité, qualité et coûts par le passage de projets à des petites et moyennes séries | 10 |
| 2. Logiques collaboratives et écosystèmes partenaires : industrialiser le « design to manufacture » par co-développement, gouvernance partagée et référentiels communs..... | 11 |
| 3. Standardisation des processus et modularisation des produits : transformer des programmes unitaires en systèmes industriels répliquables sur tout le cycle de vie..... | 12 |
| C. Secteur de l'énergie..... | 13 |
| 1. Priorisation des segments énergie : réseaux intelligents et éolien comme filières privilégiés à transposer..... | 13 |
| 2. Modèle organisationnel intégré et performance industrielle : piloter l'écosystème et réduire structurellement les coûts de coordination..... | 13 |
| 3. Logiques collaboratives et standardisation : renforcer la compétitivité par co-conception, KPI partagés et interopérabilité, tout en gérant les dissociations possibles entre projet et standard | 14 |
| IV. Fiches de bonnes pratiques industrielles | 15 |
| A. Etude de cas | 15 |
| 1. Intégration du design à la production chez Airbus (FAL A320) et Naval Group : cellules d'ingénierie concurrente et pilotage par flux | 15 |
| 2. Programmes de co-développement Airbus, Premium Aerotec et Spirit & gouvernance modulaire de Naval Group sur les chantiers partenaires..... | 17 |
| 3. Sections modulaires Airbus, blocs pré-équipés Naval Group et architectures standardisées de maintenance MRO..... | 18 |
| 4. Pilotage intégré Creos sur Smart Grid Luxembourg et coordination transfrontalière Amprion–Elia...19 | |
| 5. Co-conception turbine–réseau au sein de l'OFATE et gouvernance technique partagée sur les interconnexions régionales..... | 20 |
| 6. Postes modulaires pré-équipés Creos et plateformes turbines standardisées Nordex et Siemens Gamesa | 21 |
| B. Facteurs clés d'industrialisation – synthèse transverse structurée | 21 |

V. Analyse de l'impact et de la transférabilité des leviers à la construction hors site 22

| | | |
|----|--|----|
| A. | Transférabilité des leviers d'industrialisation au segment de la construction hors-site résidentielle collective..... | 22 |
| 1. | Positionnement de la construction hors site de logements collectifs de 2 à 4 étages (R+2 à R+4) comme segment prioritaire d'industrialisation..... | 22 |
| 2. | Cadre d'analyse de la transférabilité des leviers d'industrialisation..... | 23 |
| 3. | Identification des familles de leviers transférables au segment résidentiel collectif R+2 à R+4 | 23 |
| 1. | Leviers prioritaires à fort potentiel et fortement intégrable | 25 |
| 2. | Leviers à impact conditionnés par des prérequis de maturité..... | 25 |
| 3. | Leviers de soutien à activer en complément | 27 |
| 4. | Leviers non stratégiques à ce stade..... | 27 |
| C. | Freins spécifiques à la grande région et modalités d'adaptation | 27 |

VI. Recommandations stratégiques et opérationnelles29

| | | |
|----|---|----|
| A. | Principes directeurs de la feuille de route d'industrialisation..... | 29 |
| B. | Axes de recommandations opérationnelles | 29 |
| 1. | Structurer le socle prioritaire d'industrialisation | 29 |
| 2. | Séquencer l'activation des leviers à transférabilité conditionnelle | 30 |
| 3. | S'appuyer sur les leviers de soutien comme accélérateurs | 31 |
| C. | Cadre d'expérimentation proposé..... | 31 |
| D. | Feuille de route séquencée | 33 |
| 1. | Phase 1 – Court terme (0–18 mois) : structurer les fondations industrielles | 34 |
| 2. | Phase 2 – Moyen terme (18–48 mois) : transformer l'expérimentation en système industriel..... | 34 |
| 3. | Phase 3 – Long terme (48 mois et plus) : passer à l'échelle au niveau de la Grande Région et consolider le modèle industriel..... | 35 |

VII. Conclusion..... 37

Glossaire..... 37

Référence..... 40

Figures

| | |
|---|----|
| Figure 1 - Matrice de positionnement de pays par maturité de projets et d'entreprises | 7 |
| Figure 2 – Evaluation de la maturité industrielle par pays et par axe d'industrialisation | 8 |
| Figure 3 – Secteurs industriels de références et leviers d'industrialisation | 10 |
| Figure 4 – Schéma de l'écosystème partenaire aéronautique..... | 11 |
| Figure 5 – Gouvernance européenne multisite d'Airbus pour la production du A320 | 16 |
| Figure 6 - Programmes de co-développement naval d'innovation intégré..... | 17 |
| Figure 7 - Décomposition en sous-ensemble de la conception type d'un modèle Airbus..... | 18 |
| Figure 8 - Schéma de la modularisation des pièces de production entre fournisseurs et donneurs d'ordre..... | 19 |
| Figure 9 – Coordination des écosystèmes entre l'Allemagne et le Belgique lors du projet ALLEGrO | 20 |
| Figure 10 – Standardisation de la solution smart grid par Creos Luxembourg..... | 21 |
| Figure 11 – Matrice de hiérarchisation des leviers d'industrialisation de la filière construction hors-site | 24 |
| Figure 12 - Schéma du modèle contractuel de l'Integrated Project Delivery | 28 |
| Figure 13 - Feuille de route stratégique et opérationnelle..... | 33 |

I. Introduction

Contexte et portée de l'étude

La construction Hors Site constitue un levier structurant de transformation de la filière construction face aux enjeux convergents de productivité, de qualité, de décarbonation, de résilience industrielle et de maîtrise des délais. Dans un contexte durablement marqué par la rareté de la main-d'œuvre, la pression sur les coûts, le renforcement des exigences environnementales et la nécessité d'améliorer les conditions de travail, l'industrialisation des modes constructifs apparaît comme une condition de soutenabilité économique et environnementale du secteur.

La présente étude s'inscrit dans ce cadre. Réalisée pour le compte de CAP Construction dans le cadre du projet européen INTERREG Grande Région Greater Green+, elle vise à contribuer au positionnement de la Grande Région comme territoire de référence de la transition écologique et de l'économie circulaire. La mission se concentre exclusivement sur les aspects organisationnels, industriels et opérationnels du Hors Site, à l'exclusion des enjeux juridiques, normatifs et réglementaires traités dans un cadre distinct

Champs d'intervention de l'étude

L'objectif de l'étude est de produire une analyse comparative, analytique et opérationnelle des leviers d'industrialisation applicables à la construction Hors Site en Grande Région, en s'appuyant sur les enseignements issus de filières industrielles matures telles que l'automobile, l'aéronautique, l'agroalimentaire, la chimie, la cosmétique ou l'énergie. L'ambition est d'identifier des modèles de performance, des pratiques collaboratives et des organisations industrielles transférables, tout en tenant compte des spécificités structurelles du secteur de la construction.

L'analyse vise à caractériser le niveau de maturité industrielle de la filière Hors Site, à identifier les écarts entre capacités industrielles, pratiques opérationnelles et niveaux de demande, et à en analyser les facteurs explicatifs selon les territoires. Elle a pour finalité de dégager des leviers concrets de structuration et de montée en échelle de la filière.

Le périmètre couvre l'ensemble de la chaîne de valeur du Hors Site, depuis la conception et l'ingénierie jusqu'à la production industrialisée, la logistique et l'assemblage sur site. Il intègre les dimensions transverses essentielles à l'industrialisation : standardisation et modularisation des systèmes constructifs, organisation industrielle et automatisation des processus, pratiques collaboratives et structuration des supply chains, intégration du numérique (BIM, jumeaux numériques, MES, ERP), ainsi que la prise en compte des enjeux de durabilité, d'économie circulaire et d'agilité.

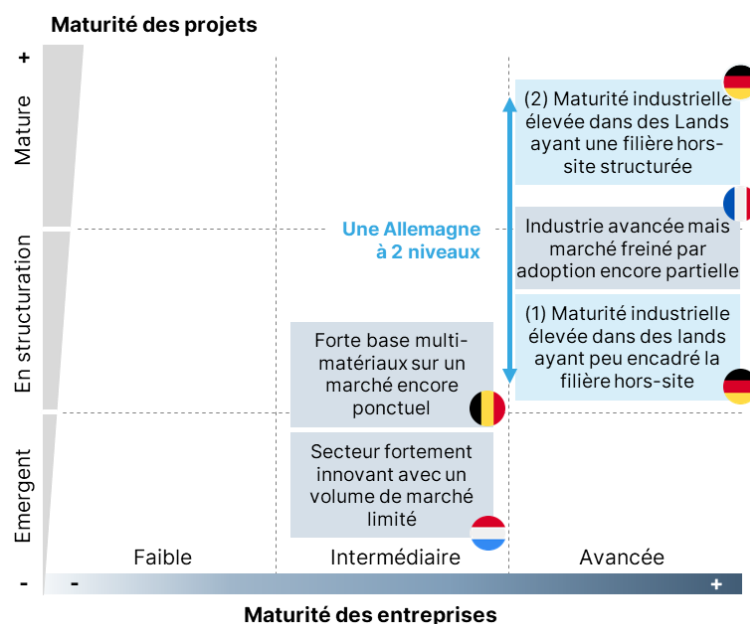
L'étude est conçue comme un outil d'aide à la décision à destination des acteurs publics et privés de la filière construction-rénovation en Grande Région, visant à nourrir une vision stratégique partagée et à poser les bases d'actions opérationnelles en faveur de l'industrialisation du Hors Site.

II. Etat des lieux de la maturité industrielle de la construction hors site en grande région

A. Niveau de maturité du marché hors site en grande région : une base industrielle solide, des marchés encore insuffisamment structurés

L'analyse met en évidence un désalignement structurel entre le niveau de préparation industrielle de la filière et la maturité effective des marchés. La Grande Région dispose d'outils industriels capables d'absorber une montée en charge significative, mais la demande reste insuffisamment structurée et prévisible pour saturer durablement ces capacités.

Figure 1 - Matrice de positionnement de pays par maturité de projets et d'entreprises



Dans le Grand Est français, le taux de pénétration du Hors Site demeure de l'ordre de 2 à 5 % selon les segments, alors même que les capacités industrielles existantes permettraient de traiter des volumes sensiblement supérieurs. Les acteurs maîtrisent la préfabrication béton et bois, ainsi que des solutions modulaires, mais la demande reste fragmentée. Le levier principal réside dans la structuration des marchés, en particulier via la commande publique, la standardisation des typologies de projets et la clarification des cadres contractuels.

En Wallonie, ce taux est estimé à environ 1 %. Les entreprises démontrent une capacité à réaliser des projets techniquement complexes, intégrant des modules 3D et des solutions multi-matériaux, mais sur des volumes irréguliers. L'absence de cadre national homogène freine la répétabilité des projets. Des opportunités existent néanmoins pour structurer des « corridors » de projets récurrents permettant de lisser la charge industrielle dans le temps.

Le Luxembourg affiche également un taux de pénétration proche de 1 %. Les acteurs y sont particulièrement dynamiques sur l'innovation de procédés, notamment en matière de performance énergétique et de construction bois. Toutefois, la taille réduite du marché domestique limite mécaniquement les volumes. L'enjeu clé consiste à inscrire ces capacités dans une logique d'export transfrontalier afin de capter les volumes des marchés voisins et de générer des effets d'échelle.

En Allemagne, la situation est plus contrastée. Le taux de pénétration du Hors Site atteint environ 20 % dans la construction résidentielle, traduisant une maturité nettement supérieure. Les entreprises de Sarre et de Rhénanie-Palatinat disposent d'un outil industriel très avancé, mais le marché reste hétérogène et dépendant des politiques propres à chaque Land. Cette configuration aboutit à une « Allemagne à deux vitesses », combinant des zones à forte maturité industrielle et d'autres où la structuration de la filière reste incomplète.

B. Cartographie de la maturité industrielle : des pratiques hétérogènes selon les territoires

La comparaison des pratiques industrielles selon plusieurs axes de maturité confirme l'hétérogénéité des niveaux d'adoption au sein de la Grande Région. Les dimensions analysées incluent notamment la digitalisation et le BIM, la standardisation et la préfabrication 2D et 3D, l'automatisation et la robotisation, l'intégration des principes de Design for Manufacturing & Assembly (DfMA), les écosystèmes collaboratifs et la culture Lean.

Figure 2 – Evaluation de la maturité industrielle par pays et par axe d'industrialisation

| Axe de maturité | France (Grand Est) | Belgique (Wallonie) | Luxembourg | Allemagne (Sarre/RP) |
|---|--|--|---|--|
| BIM & digitalisation | Usage encore peu diffusé dans la conception et la coordination de projets ● | Utilisation en progression dans plusieurs domaines (ossature bois, modulaire, béton) ● | Forte digitalisation dans les solutions les plus innovantes, mais adoption variable ● | Large diffusion du BIM et d'outils numériques dans la préfabrication industrielle ● |
| Standardisation & préfabrication 2D/3D | Standards utilisés dans le béton et le bois, montée du modulaire 3D ● | Forte diversité de solutions proposées : bois, acier, béton, etc. ● | Approche structurée mais limitée par les faibles volumes domestiques ● | Longue tradition de préfabrication : systèmes standardisés et industrialisés ● |
| Automatisation & robotisation | Automatisation partielle dans certaines usines (découpe, assemblage) ● | Usage variable selon les sites (CNC, automatisation ponctuelle, etc.) ● | Automatisation limitée dans un tissu d'acteurs de petite taille ● | Niveau le plus élevé, avec robotisation et procédés avancés ● |
| Design for Manufacturing & Assembly (DfMA) | Le socle DfMA est présent chez les acteurs les plus structurés, indispensable à l'activité ● | Approche présente dans les solutions modulaires et ossatures métalliques/bois ● | Utilisation partielle, surtout dans les concepts les plus innovants ● | Forte intégration du DfMA dans la conception des systèmes préfabriqués ● |
| Écosystèmes collaboratifs / IPD | Acteurs industrialisés présents mais chaîne de valeur encore fragmentée ● | Existence de coopérations locales et d'initiatives sectorielles ● | Collaboration encore limitée à des initiatives ponctuelles ● | Filière plus établie mais dépendante des organisations régionales ● |
| Économie circulaire & durabilité | Forte dynamique autour des matériaux bas carbone et du recyclage ● | Développement actif de matériaux biosourcés et hybrides ● | Exigences élevées sur la performance environnementale et l'efficacité énergétique ● | Maturité modérée, tirée par la filière bois y compris dans la rénovation ● |
| Culture Lean / industrialisation des process | Présente dans certaines usines mais encore limitée sur les chantiers ● | Culture industrielle partiellement développée dans les filières bois/métal ● | Approche Lean peu répandue dans un tissu d'acteurs réduits ● | Culture industrielle fortement ancrée, issue de décennies de pratiques préfabriquées ● |
| Evaluation générale de la maturité | Adoption largement déployée mais hétérogène ● | Adoption partielle, inégale à l'échelle nationale ● | Initiatives émergentes, peu homogènes ● | Pratiques fortement déployées et industrialisées ● |

Sources: Etude préliminaire sur le Hors-site dans la Grande Région

● Appréciation de maturité Kéa

L'Allemagne se positionne comme la référence régionale, avec une diffusion large du BIM et des outils numériques, une forte intégration du DfMA dans la conception des systèmes préfabriqués, ainsi qu'un niveau élevé d'automatisation et de robotisation. La culture industrielle y est profondément ancrée, résultant de décennies de pratiques standardisées.

La France présente une adoption plus hétérogène. Si certains acteurs structurés disposent d'un socle DfMA solide et de capacités d'automatisation partielle, la diffusion des pratiques reste inégale, en particulier sur les chantiers. Les écosystèmes collaboratifs demeurent fragmentés, malgré l'existence d'acteurs industrialisés de premier plan.

La Wallonie affiche une diversité marquée de solutions techniques et une progression de l'usage du BIM, mais l'automatisation reste variable selon les sites. Les coopérations existent, mais restent souvent locales et peu systématisées à l'échelle de la filière.

Le Luxembourg se caractérise par des initiatives innovantes mais encore peu homogènes, portées par un tissu d'acteurs de taille limitée. Les exigences élevées en matière de performance environnementale tirent certaines pratiques vers le haut, sans pour autant permettre une industrialisation à grande échelle.

Dans l'ensemble, la filière Hors Site de la Grande Région repose sur une base industrielle réelle et crédible. Toutefois, la maturité d'adoption des pratiques industrielles reste très différenciée selon les territoires, confirmant la nécessité d'actions ciblées de structuration de la demande,

d'alignement des référentiels et de diffusion des standards pour enclencher une dynamique d'industrialisation durable.

III. Analyse des filières d'excellence industrielle transposables

A. Rationnels de sélection des filières industrielles à étudier

L'analyse des filières d'excellence industrielle transposables à la construction Hors Site en Grande Région repose sur un principe directeur : identifier des secteurs ayant déjà résolu, à grande échelle, les problématiques structurantes que rencontre le Hors Site pour passer d'une logique de projets isolés à une logique d'industrialisation répétable. Dans cette perspective, la sélection des filières s'appuie sur la capacité démontrée de ces industries à conjuguer complexité technique, exigences de qualité et contraintes de délais, tout en stabilisant la performance industrielle dans la durée.

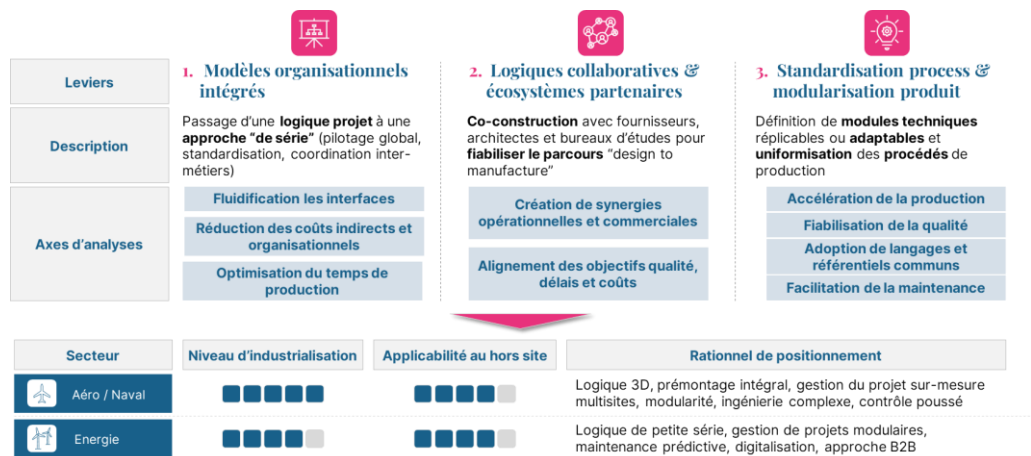
Trois leviers d'industrialisation constituent le cadre d'analyse commun retenu pour comparer les secteurs, structurer l'extraction de bonnes pratiques et évaluer leur potentiel de transposition au Hors Site. Le premier levier correspond à la mise en place de modèles organisationnels intégrés. Il recouvre le passage d'une logique « projet » à une approche « de série », fondée sur un pilotage global, une coordination inter-métiers industrialisée et une standardisation progressive des modes opératoires. Ce levier vise prioritairement la fluidification des interfaces, la réduction des coûts indirects et l'optimisation du temps de production. Le second concerne les logiques collaboratives et les écosystèmes partenaires. Il recouvre la co-construction structurée avec les fournisseurs, les architectes, les bureaux d'études et les intégrateurs, dans une logique de « design to manufacture », afin de fiabiliser les interfaces, réduire les itérations tardives et aligner les objectifs de qualité, de délais et de coûts. Ce levier vise la création de synergies opérationnelles et commerciales, l'alignement des objectifs et l'adoption de langages et référentiels communs. Le dernier levier concerne la standardisation des processus et la modularisation des produits. Il recouvre la définition de modules techniques répliquables ou adaptables et l'uniformisation des procédés de production, afin d'accélérer la production, fiabiliser la qualité et faciliter la maintenance sur le cycle de vie complet.

Dans ce cadre, les filières aéronautique et navale ont été retenues car elles combinent une logique « 3D », des pratiques de prémontage intégral, une gestion multisite de programmes complexes et une modularité structurante adossée à une ingénierie exigeante et à des dispositifs de contrôle poussés. Elles apportent un référentiel robuste pour industrialiser des systèmes à forte complexité, tout en orchestrant des chaînes de valeur distribuées et en maintenant une exigence de conformité élevée. Le secteur de l'énergie a été retenu car il met en œuvre, sur des périmètres distincts mais complémentaires, des logiques de petite à moyenne série, une gestion de projets modulaires, une digitalisation avancée et une approche majoritairement B2B qui structure des relations contractuelles et opérationnelles alignées sur la performance des actifs. Les segments énergie étudiés, notamment les réseaux intelligents et l'éolien, constituent des terrains d'observation privilégiés de la standardisation, de la modularité technique et de l'interopérabilité entre acteurs, dans des environnements régulés et multiparties prenantes.

L'ambition de la présente partie n'est pas de décrire ces secteurs de manière encyclopédique, mais de formaliser, de manière opérationnelle et transposable, les mécanismes industriels qui expliquent leur capacité à industrialiser la complexité. Chaque levier est ainsi analysé en termes de logiques organisationnelles, de modes de gouvernance, de standards mobilisés, de conditions de succès et de points de vigilance, avec une attention particulière portée aux

interfaces « conception–industrialisation–production » et à la stabilité des référentiels sur l'ensemble du cycle de vie.

Figure 3 – Secteurs industriels de références et leviers d'industrialisation



B. Secteur aéronautique et naval

1. Modèles organisationnels intégrés : sécuriser productivité, qualité et coûts par le passage de projets à des petites et moyennes séries

Dans les filières aéronautique et navale, l'industrialisation repose sur une transformation explicite de la logique de production : le passage d'une organisation orientée « projet » vers une organisation orientée « série » ou « flux » constitue le levier central pour stabiliser la performance industrielle. Cette transformation est d'autant plus critique que ces secteurs doivent absorber simultanément des hausses de cadence, une complexité de configuration élevée, des exigences de conformité strictes et des chaînes de valeur multisites.

Le premier axe d'analyse concerne la fluidification des interfaces par la réduction des frictions inter-métiers. Les donneurs d'ordre mettent en place un pilotage global unifié, appuyé par des dispositifs structurants de gestion de la donnée et de la configuration, afin de supprimer les zones grises entre le design, l'industrialisation et la production. Cette logique s'incarne par des pratiques de « configuration management » et de « data share management » permettant de partager une définition produit unique et d'assurer la cohérence entre les sites. Les transferts de configuration entre usines sont encadrés par des règles communes, réduisant les reprises d'études en aval et limitant les écarts d'application. Dans le même temps, les sites mettent en place des équipes pluridisciplinaires colocalisées, réunissant l'ingénierie, la supply chain, la qualité et la production, afin d'arbitrer en temps réel et de limiter les modifications tardives de conception, particulièrement coûteuses après le gel de configuration ou lorsque les sous-ensembles sont déjà engagés en production. Par équipes colocalisées, on entend un dispositif où les représentants clés de ces différentes fonctions, ainsi que les industriels concernés, sont intégrés dans une même boucle décisionnelle dès l'amont, permettant d'évaluer en continu les choix de conception au regard des contraintes industrielles.

S'ajoute à cela la réduction des coûts indirects par industrialisation de la coordination et de la gestion des écarts. Les directions industrielles systématisent des processus de reporting, de suivi de jalons, de gestion des non-conformités et de validation des décisions, afin d'éviter les boucles informelles et les arbitrages implicites qui dégradent la productivité d'ingénierie. Ce suivi outillé contribue à rendre les performances inter-sites comparables, à fiabiliser les décisions de priorisation et à réduire le temps consacré à l'ingénierie corrective. Par ailleurs, les fonctions support complexes, telles que les méthodes, les achats techniques ou la qualité, sont mutualisées au niveau programme afin de limiter les duplications, diffuser un référentiel commun et garantir une cohérence d'application des standards sur l'ensemble du périmètre industriel.

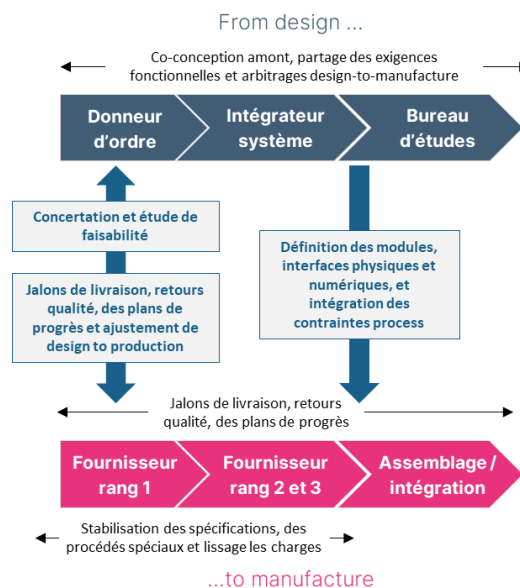
Enfin, l'optimisation des cycles de production par l'accélération des cadences et la bascule vers un pilotage par flux constitue également une dimension structurante. Les unités de production évoluent d'un pilotage par projet vers un pilotage par flux ou par série, intégrant des principes de lean, de takt time et de synchronisation des lignes. Les ateliers sont conçus selon des architectures modulaires, segmentées en zones fonctionnelles standardisées, afin de limiter les temps intermédiaires, stabiliser les temps de cycle et faciliter les ajustements de capacité. Dans une logique multisite, le pilotage par flux permet de gérer des lots sur-mesure par client tout en respectant une cadence industrielle globale, en absorbant des montées en charge et en limitant l'instabilité de planning.

Cette séquence met en évidence une implication transposable : la digitalisation constitue un prérequis pour sécuriser la donnée et coordonner les métiers, mais l'accélération industrielle repose d'abord sur des choix organisationnels explicitement orientés vers la réduction des frictions d'interface, la standardisation du pilotage et l'industrialisation de la décision.

2. Logiques collaboratives et écosystèmes partenaires : industrialiser le « design to manufacture » par co-développement, gouvernance partagée et référentiels communs

L'industrialisation dans l'aéronautique et le naval repose sur un écosystème de relations partenaires structurées, conçu pour fiabiliser la trajectoire « from design to manufacture ». Dans ces secteurs, la performance globale ne dépend pas uniquement de l'outil interne du donneur d'ordre, mais de la capacité à synchroniser, dans la durée, les contributions de bureaux d'études, d'intégrateurs, de fournisseurs de rang 1, puis de rangs 2 et 3, jusqu'aux activités d'assemblage et d'intégration.

Figure 4 – Schéma de l'écosystème partenaire aéronautique



Un premier axe consiste à créer des synergies par co-innovation et partage explicite des contraintes industrielles. Les donneurs d'ordre organisent le co-développement amont des pièces et sous-ensembles critiques avec les fournisseurs de rang 1. L'objectif est d'intégrer le plus tôt possible les contraintes de fabrication, d'assemblage et de qualification, afin de limiter les itérations de conception et de réduire le risque de redesign en cours de programme. Cette logique s'appuie également sur des plateformes techniques fédérant industriels, centres de recherche et universités, qui mutualisent des moyens d'essais, accélèrent la diffusion des innovations process et renforcent l'ancrage local de la filière.

Une deuxième brique vise l'alignement des objectifs de coûts, de délais et de qualité par des dispositifs de gouvernance multi-acteurs. Les maîtres d'œuvre déploient des programmes

structurés de développement fournisseurs (« Supplier Development Programs ») fixant des objectifs communs, des plans d'amélioration conjoints et un accompagnement méthodologique orienté performance opérationnelle. Ces alliances industrielles s'appuient sur des tableaux de bord partagés et des rituels d'arbitrage qui rendent visibles les priorités à l'échelle de la chaîne : On-Time Delivery, qualité première monte, cadence, robustesse planning, et pilotage des risques. L'enjeu clé réside dans la capacité à décider au niveau du programme plutôt qu'au niveau de chaque acteur, afin de réduire les optimisations locales et les désalignements de responsabilités.

Un troisième élément, déterminant pour réduire les non-qualités, concerne l'adoption d'éléments de langage commun et la convergence des référentiels techniques. Les filières harmonisent les spécifications, les protocoles et les standards d'échanges de données afin de réduire les interprétations divergentes, les écarts d'application et les réclamations qualité. Cette harmonisation passe notamment par des formats de données interopérables (exemples de formats mentionnés dans le livrable : STEP, IFC) garantissant que bureaux d'études, sous-traitants, chantiers et activités de maintenance lisent une information industrielle identique du design jusqu'aux opérations. Dans cette logique, la co-conception amont porte à la fois sur le partage des exigences fonctionnelles, la définition des modules et interfaces physiques et numériques, et l'intégration des contraintes process, afin de sécuriser la trajectoire de conception et d'industrialisation.

L'enseignement transposable est double : d'une part, la collaboration efficace n'est pas un attribut relationnel, mais une architecture de gouvernance, de KPI et de standards communs ; d'autre part, l'interopérabilité des données et des référentiels est une condition opérationnelle de la performance collective, car elle détermine directement le niveau de reprise, de non-conformité et de litige.

3. Standardisation des processus et modularisation des produits : transformer des programmes unitaires en systèmes industriels répliquables sur tout le cycle de vie
Dans l'aéronautique et le naval, la standardisation et la modularisation constituent le mécanisme par lequel des programmes historiquement « unitaires » deviennent des systèmes industriels répliquables, plus rapides et moins coûteux, et ce sur l'ensemble du cycle de vie. L'objectif n'est pas de supprimer la variabilité client, mais de la contenir dans des enveloppes maîtrisées, en standardisant les interfaces, les séquences process et les modes de qualification.

La première finalité porte sur l'accélération de la production par la répétitivité et la stabilisation des flux. L'industrie aéronautique décompose des systèmes complexes en modules techniques répliquables (structures avion, blocs, sous-systèmes pré-équipés) afin de transformer des productions unitaires en séquences répétitives à forte productivité, facilement dupliquées d'une ligne ou d'un site à l'autre. Cette approche est complétée par la définition de gammes process standardisées : séquences fixes, outillages réutilisables, postes de montage récurrents, visant à réduire les temps de changement, stabiliser les temps de cycle et améliorer la prévisibilité des cadences.

La seconde concerne la fiabilisation de la qualité par la réduction de la variabilité. Les équipes d'ingénierie produit et process simplifient les interfaces et les rendent aussi standard que possible, afin de diminuer la variabilité de montage et réduire les défauts liés à l'assemblage de configurations spécifiques. Cette simplification permet en parallèle de concentrer un contrôle qualité poussé sur les points critiques. Les ateliers organisent des tests et des qualifications au niveau module, avant l'intégration finale, afin de détecter les non-conformités en amont et de limiter l'apparition de défauts en chaîne sur les avions ou les navires complets.

Enfin, la dernière porte sur la facilitation de la maintenance, en intégrant la logique modulaire dès la conception du cycle de vie. Les bureaux d'études conçoivent des architectures modulaires permettant le remplacement rapide de sous-systèmes, réduisant les immobilisations en maintenance et améliorant la disponibilité opérationnelle. Les services de maintenance (MRO) relient la documentation technique standardisée au jumeau numérique afin de sécuriser

l'identification des pièces, fiabiliser les opérations, capitaliser les retours d'expérience et renforcer la boucle de contrôle qualité sur la durée.

L'enseignement transposable au Hors Site est structurant : la modularisation produit et la standardisation process ne se résument pas à une bibliothèque de composants, mais forment un « système industriel » complet, articulant architecture produit, règles d'interface, séquences de production, protocoles de test et référentiels documentaires, avec un bénéfice direct sur la montée en cadence, la qualité première passe et la maintenabilité.

C. Secteur de l'énergie

1. Priorisation des segments énergie : réseaux intelligents et éolien comme filières privilégiées à transposer

Dans le secteur de l'énergie, l'analyse priorise les segments dont les pratiques industrielles sont les plus transposables à la filière Hors Site, en raison de leur combinaison entre modularité technique, logique de petite à moyenne série et forte intégration numérique. Deux segments ressortent comme particulièrement pertinents : les technologies de réseaux intelligents et les composants et systèmes éoliens.

Les technologies de réseaux intelligents regroupent la fabrication d'équipements de postes HT/MT, de systèmes de protection, d'automatismes de réseau et de solutions de flexibilité. Ces équipements sont configurés en moyennes, voire grandes séries, selon les exigences des gestionnaires de réseau de transport et de distribution (TSO/DSO) et selon les spécificités réglementaires. Le caractère industriel de ce segment repose sur l'existence de modules standardisés (capteurs, RTU, IED, convertisseurs, équipements de communication) que les intégrateurs assemblent ensuite en configuration projet pour répondre à des exigences réseau européennes fortement régulées.

Les composants et systèmes éoliens couvrent les sous-ensembles de turbines (nacelles, pales, générateurs, convertisseurs, systèmes de contrôle) produits en moyennes séries, puis adaptés aux caractéristiques de chaque parc, site et raccordement réseau. L'industrialisation s'appuie sur des plateformes produit modulaires (familles de turbines, variantes de tours, systèmes de stockage ou de compensation), permettant de mutualiser la conception tout en offrant des variantes adaptées aux contraintes de vent, d'accès et aux exigences de raccordement électrique.

L'analyse souligne en parallèle l'existence d'une chaîne de valeur locale et régionale significative : les industriels de la Grande Région contribuent à la chaîne de valeur européenne des équipements réseau et éoliens en fournissant des composants clés (acier, structures, appareillage électrique, électronique de puissance) et en disposant de capacités manufacturières permettant de soutenir des ramp-ups ciblés sur les projets de renforcement de réseau, d'interconnexions et de parcs éoliens, via des partenariats pan-européens.

Trois paramètres transversaux justifient la pertinence de ces segments : la gestion de projets modulaires, qui structure les lots d'équipements et permet de répéter des « blocs » techniques sur plusieurs sites ; la maintenance prédictive, qui s'appuie sur les données SCADA et les capteurs terrain pour optimiser la disponibilité ; et l'approche B2B, qui cadre les relations partenaires en alignant les exigences de performance des actifs avec les contraintes d'investissement et de régulation.

2. Modèle organisationnel intégré et performance industrielle : piloter l'écosystème et réduire structurellement les coûts de coordination

Dans l'énergie, la performance industrielle dépend fortement de la capacité à organiser des programmes multi-acteurs et multi-lots en limitant les frictions d'interface et les réingénieries. Une organisation à logique de production en série, appliquée aux programmes énergie, améliore structurellement la performance industrielle par trois mécanismes complémentaires : un pilotage intégré et une coordination fluidifiée, une standardisation appuyée par le

numérique pour réduire les coûts, et une fiabilisation des délais par industrialisation et capitalisation.

Le pilotage intégré des programmes énergie consolide la planification des lots d'équipements et de réseaux, tout en coordonnant de manière intégrée les bureaux d'études, les OEM, les EPC et les opérateurs de réseau. Ce pilotage réduit les frictions d'interface entre maillons de la chaîne de valeur, notamment lorsque les responsabilités sont fragmentées entre conception, réalisation et exploitation. Il se renforce par des plateformes de données partagées regroupant les informations de conception (schémas électriques, modèles de réseau, contraintes de protection) et d'exploitation (charges, incidents, interventions), facilitant la prise de décision entre TSO/DSO et fournisseurs.

La standardisation et le numérique interviennent ensuite comme optimisateurs de coûts. La définition de familles de postes, de cellules HT/MT et de plateformes produits éoliens (fondations, tours, systèmes de conversion) limite les réingénieries projet par projet et réduit le temps passé en études et en coordination. L'utilisation systématique de modèles numériques et de jumeaux d'actifs (sous-stations digitales, modèles dynamiques de parcs éoliens) diminue les coûts d'essais physiques, de mise au point site et de résolution d'incidents répétitifs.

Enfin, la fiabilisation des délais repose sur une approche industrialisée qui séquence les projets en flux industriels, combinant préfabrication off-site de modules, tests en usine et déploiement sur site, plutôt qu'une suite d'opérations uniques entièrement reconfigurées à chaque projet. Cette logique réduit le lead time entre commande et mise en service. La digitalisation des référentiels techniques et des retours d'expérience permet de capitaliser les standards de conception et d'exécution, ce qui améliore les délais, la qualité de réalisation et la sécurisation des jalons de raccordement au réseau.

L'implication transposable au Hors Site est directe : l'organisation intégrée est un levier de compétitivité en soi, car elle transforme la coordination multi-acteurs en un processus industrialisé, réduit les coûts indirects et fiabilise les délais par capitalisation.

3. Logiques collaboratives et standardisation : renforcer la compétitivité par co-conception, KPI partagés et interopérabilité, tout en gérant les dissociations possibles entre projet et standard

Dans la filière énergie, des logiques collaboratives structurées et une standardisation modulaire des produits et des processus renforcent la compétitivité des acteurs. Cette dynamique repose sur une articulation étroite entre la création de synergies par co-conception, l'alignement des objectifs via des cadres contractuels et des KPI partagés, et l'harmonisation d'un vocabulaire industriel commun fondé sur des standards d'interopérabilité.

La création de synergies résulte de plateformes de co-conception associant en amont ingénieries, fabricants d'appareillage électrique et intégrateurs digitaux, en lien avec les TSO/DSO, les développeurs de parcs énergie et les OEM. Ces consortiums agrègent les retours d'expérience sur les architectures réseau et les configurations de parcs, accélérant la convergence technique et l'alignement des pratiques. L'alignement qualité-délais-coûts est ensuite renforcé par des cadres contractuels définissant des KPI partagés, tels que la disponibilité, le raccordement et le respect des jalons, afin d'aligner l'exécution des projets sur une logique de performance des actifs. Des revues de conception et qualité conjointes permettent d'identifier en amont les risques de non-conformité et de non-qualité, notamment au regard des grid codes et des normes IEC, réduisant les écarts de coûts liés aux modifications tardives.

La standardisation et la modularisation produisent des gains tangibles sur la production, la qualité et la maintenance. La modularisation des postes électriques, la validation de plateformes produit et de sous-systèmes éoliens optimisent la préfabrication, les tests et l'assemblage, ce qui réduit les temps de mise en service. La standardisation des composants critiques limite la variabilité inter-projets et stabilise les performances attendues. La répétabilité

des procédures de test et de validation améliore la conformité réglementaire et réduit les risques d'incident d'exploitation. Enfin, les architectures modulaires simplifient le remplacement des sous-systèmes, optimisent la gestion des pièces de rechange et accélèrent la maintenance corrective ; l'uniformisation des données techniques et des historiques d'intervention renforce l'efficacité des algorithmes de maintenance prédictive et améliore la disponibilité des actifs.

Pendant, le livrable souligne explicitement que, dans certains cas, une dissociation survient entre logiques collaboratives amont en mode projet et standardisation au niveau des plateformes produit. Dans ces configurations, les échanges portent davantage sur le dimensionnement d'un site spécifique que sur une logique de standards, et la collaboration vise d'abord la faisabilité et la performance du projet plutôt que la répétabilité industrielle. Les décisions clés sont prises en phase amont par le donneur d'ordre dans une logique d'optimisation technico-économique, tandis que les plateformes standardisées (turbines, familles de composants, architectures de contrôle communes) sont conçues indépendamment par les OEM puis adaptées par configuration. L'industrialisation progresse alors par plateformes produit sans remise en cause des contraintes spécifiques du projet en phase amont ; la standardisation vise des gains d'échelle, mais demeure partiellement orthogonale aux logiques collaboratives. Dans ce cas, la collaboration n'induit pas systématiquement des standards partagés.

L'enseignement opérationnel est clair : lorsque partenariat amont et industrialisation sont disjoints, il devient nécessaire d'introduire explicitement des points de standardisation définis dans les projets et d'outiller la transition entre projet et produit. Autrement dit, l'industrialisation repose non seulement sur l'existence de plateformes standard, mais sur la capacité à organiser la conversion des exigences projet en composants, interfaces et procédures standardisés, de manière outillée et gouvernée

IV. Fiches de bonnes pratiques industrielles

A. Etude de cas

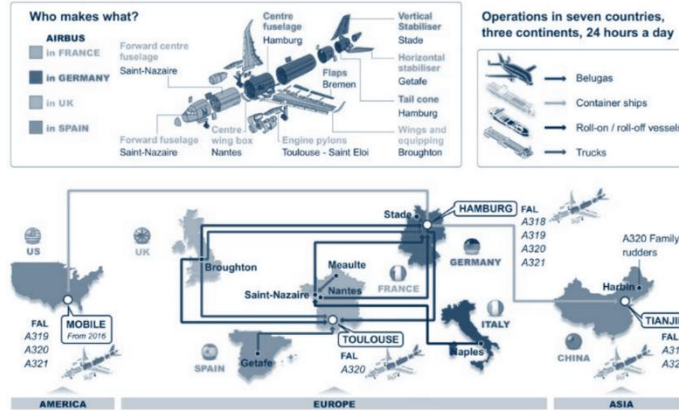
1. Intégration du design à la production chez Airbus (FAL A320) et Naval Group : cellules d'ingénierie concurrente et pilotage par flux

Les cas d'Airbus et de Naval Group illustrent de manière structurante l'impact d'une intégration étroite entre conception, ingénierie et production sur la performance industrielle. Sur la Final Assembly Line (FAL) A320, Airbus doit simultanément absorber des hausses de cadence significatives et gérer une complexité élevée de configurations clients. De son côté, Naval Group opère sur des programmes à forte intensité capitalistique et technique, nécessitant une coordination en temps réel entre études et production, sur des périmètres multisites et multi-métiers.

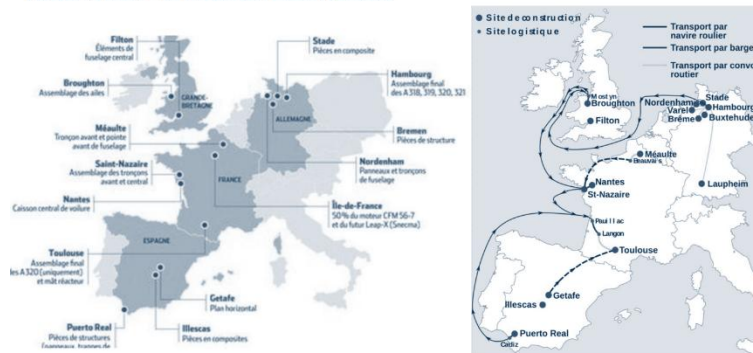
Figure 5 – Gouvernance européenne multisite d’Airbus pour la production du A320

I. Les métropoles, cœurs du système productif mondial

<http://www.modernairliners.com/airbus-a320-introduction/airbus-a320-assembly/>



I. Les métropoles, cœurs du système productif mondial



Dans ces deux contextes, le passage d’organisations en silos vers un modèle d’usine intégrée, pilotée par les flux, répond à un objectif commun : réduire les frictions inter-métiers, limiter les retards d’intégration et contenir les coûts liés aux rework. Cette transformation repose d’abord sur une proximité physique et organisationnelle accrue entre les équipes de conception, d’ingénierie et de production. Sur la FAL A320, la colocalisation des équipes engineering, méthodes et qualité au plus près de la ligne permet de traiter rapidement les écarts de définition, de sécuriser les arbitrages techniques et de réduire les modifications tardives sur tronçons et postes d’assemblage. Cette organisation favorise une résolution des problèmes en temps réel, directement en flux, plutôt qu’a posteriori.

Le pilotage systématique par flux constitue un autre levier structurant de performance. Airbus déploie des principes de takt time, de lignes synchronisées et de séquençage standard sur la FAL A320 afin de stabiliser la cadence, lisser la charge industrielle et réduire les temps d’attente entre opérations critiques. Cette approche transforme la gestion de la complexité en un problème de séquençage industriel maîtrisé, plutôt qu’en une succession d’arbitrages projet par projet.

La standardisation des approches de pilotage joue enfin un rôle déterminant dans la maîtrise des coûts indirects et la diffusion des bonnes pratiques. Chez Naval Group, la mise en place de revues de maturité produit-process, de points d’avancement structurés par lots et d’une gestion outillée des écarts améliore la coordination entre métiers et programmes. Cette structuration du pilotage permet de comparer les performances entre sites, d’objectiver les décisions et de diffuser progressivement des référentiels communs à l’échelle de l’organisation.

Les conditions de succès identifiées incluent la mise en place d’une gouvernance centralisée du design à l’industrialisation avec des KPI partagés (cadence, First Time Yield, temps d’intégration), la décomposition des usines en zones industrielles modulaires avec des routines

d'atelier standardisées, la structuration d'une base documentaire unique (PLM, référentiels, procédures) et le déploiement d'un management de proximité pluridisciplinaire. Les obstacles rencontrés portent principalement sur les résistances internes liées à la redéfinition des frontières métier, l'hétérogénéité des outils numériques historiques et la charge initiale d'investissement et de formation.

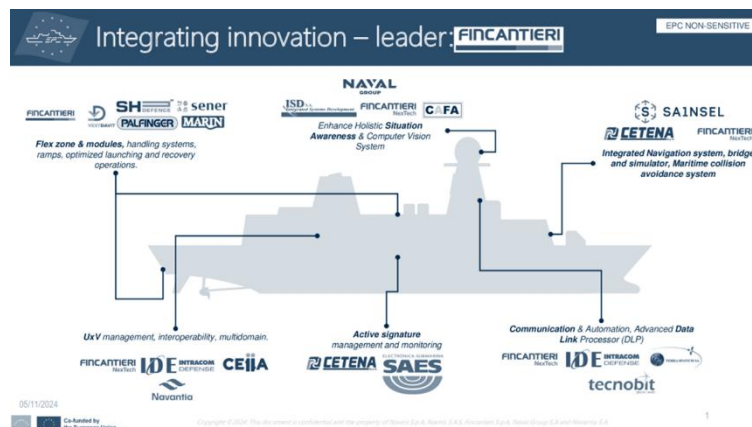
Les résultats observés sont significatifs : une diminution du rework de l'ordre de 20 à 30 %, une stabilisation des cadences malgré une montée en complexité, une réduction de plusieurs jours du cycle d'assemblage final et une amélioration mesurée de la qualité première monte. Ces enseignements démontrent que l'intégration design-production constitue un levier direct de compétitivité industrielle.

2. Programmes de co-développement Airbus, Premium Aerotec et Spirit & gouvernance modulaire de Naval Group sur les chantiers partenaires

Le deuxième cas met en lumière le rôle structurant du co-développement et de la gouvernance modulaire dans des chaînes de valeur industrielles fortement distribuées. Dans les programmes Airbus, des fournisseurs tels que Premium Aerotec et Spirit contribuent à environ 60 % de la valeur produite. La performance globale du programme dépend donc directement de la capacité à aligner cette chaîne de valeur diffuse. Historiquement, certains retards, surcoûts et non-qualités trouvent leur origine dans des transmissions d'exigences incomplètes et des interprétations divergentes entre acteurs.

Airbus répond à ces enjeux par la mise en place de programmes structurés de co-développement amont. Cette démarche intègre dès les phases initiales l'ensemble des contraintes industrielles des fournisseurs, réduisant la complexité et les redesigns en cours de programme. Le co-développement agit comme un catalyseur de programme, en diffusant les pratiques lean, les standards qualité et les exigences de performance à l'ensemble de l'écosystème. En parallèle, Naval Group déploie une gouvernance modulaire avec ses chantiers partenaires, structurée autour de périmètres techniques clairement définis et de responsabilités partagées.

Figure 6 - Programmes de co-développement naval d'innovation intégré



Une bonne pratique réside dans le pilotage homogène du programme. Des tableaux de bord partagés entre donneurs d'ordre et fournisseurs permettent de piloter les priorités, d'escalader les risques et de décider au niveau du programme plutôt qu'au niveau de chaque entité. Cette logique limite les optimisations locales et favorise une vision systémique de la performance.

Enfin l'adoption d'un référentiel commun constitue également méthode recommandée. L'harmonisation du vocabulaire technique et l'interopérabilité des données alignent l'ensemble des parties prenantes sur une définition produit unique, réduisant les non-qualités liées aux erreurs de définition et aux écarts d'interprétation.

Les conditions de succès identifiées incluent une structuration progressive à partir de pratiques communes entre partenaires clés, un alignement contractuel des objectifs de coûts, de délais et de qualité via des KPI partagés, et la mobilisation de clusters régionaux pour mutualiser moyens d'essais, plateformes technologiques et dispositifs de formation. Les obstacles rencontrés tiennent à la maturité industrielle hétérogène des partenaires, aux habitudes contractuelles freinant la responsabilité réellement partagée, et au non-alignement initial des formats techniques et outils de conception.

Les résultats obtenus sont tangibles : une réduction de 20 à 40 % des non-conformités, un gain supérieur à 10 points d'On-Time Delivery en 18 mois, une diminution du time-to-industrialisation et une amélioration mesurée de la charge d'ingénierie. Ce cas démontre que la performance industrielle est indissociable de la structuration de l'écosystème fournisseur.

3. Sections modulaires Airbus, blocs pré-équipés Naval Group et architectures standardisées de maintenance MRO

Le troisième cas illustre la transformation de productions historiquement unitaires en systèmes industriels répliquables grâce à la modularisation produit et à la standardisation des processus. Les productions aéronautiques et navales sont traditionnellement marquées par une forte spécificité client, générant une complexité élevée en ingénierie, en production et en maintenance. Les leaders sectoriels ont progressivement basculé vers des logiques de plateformes modulaires afin d'augmenter la répétitivité, de fiabiliser la qualité et de réduire les coûts sur l'ensemble du cycle de vie.

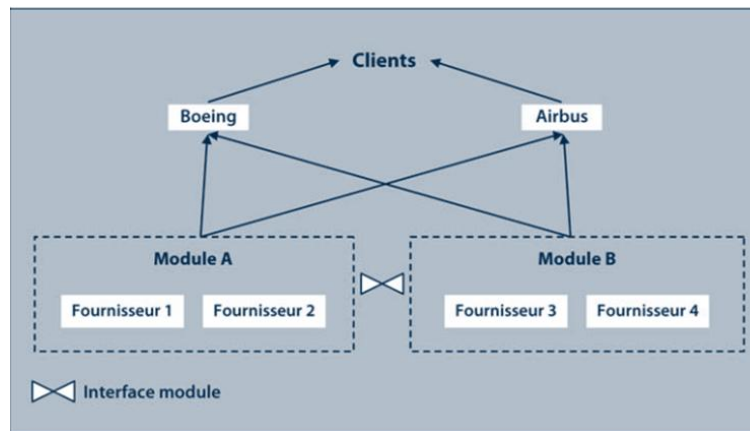
Cette transformation s'appuie d'abord sur la décomposition des produits en sections ou blocs modulaires. Airbus structure ses modèles en sections standardisées, tandis que Naval Group décompose ses navires en blocs pré-équipés, ce qui permet de transformer une conception unitaire en séquences maîtrisées et industrialisables. La standardisation des interfaces entre ces sections ou blocs constitue un levier complémentaire déterminant, en réduisant la variabilité d'assemblage et en améliorant la qualité première monte.

La fiabilisation du processus repose également sur des tests et des qualifications réalisés au niveau de chaque section ou bloc, en amont de l'intégration finale. Cette approche permet de détecter précocement les défauts et d'éviter leur propagation lors des phases d'assemblage global. Enfin, l'adoption d'architectures modulaires pour la maintenance complète le dispositif industriel : les équipes MRO s'appuient sur des modules identifiés et documentés, facilitant le remplacement rapide des sous-systèmes et réduisant les temps d'immobilisation des actifs.

Figure 7 - Décomposition en sous-ensemble de la conception type d'un modèle Airbus

| Structure | Avionique | Propulsion | Cabine | Génération et distribution électrique |
|--|---------------------------------------|--|------------------------|---------------------------------------|
| (GKN, Latécoère, Messier-Dowty, Spirit Aerosystems) | (Honeywell, Rockwell Collins, Thalès) | (General Electric, Rolls-Royce, Snecma, Pratt & Whitney) | (Zodiac, EADS Sogerma) | (Thalès, Rockwell Collins, Honeywell) |
| Réalisation de l'outil de production (Serin, Dedienn Aerospace, Seroma, Garigues) | | | | |
| Conception et ingénierie (Bureau d'études) (Aeroconseil, Altran Group, Atos origin, Latelec, Safran) | | | | |
| Services de support (IGE+XAO, Dassault Systèmes, IBM, PTC, Kuehne+Nagel, DHL) | | | | |

Figure 8 - Schéma de la modularisation des pièces de production entre fournisseurs et donneurs d'ordre



Les conditions de succès incluent la formalisation d'une architecture produit standardisée, la constitution d'une base de modules qualifiés réutilisables, l'outillage des bureaux d'études via des systèmes PLM et de jumeaux numériques, et la standardisation des sites de production en outillages, gammes et plans de tests. Les obstacles portent principalement sur l'investissement initial requis, les arbitrages entre modularisation et personnalisation client, et certaines rigidités contractuelles.

Les résultats observés incluent une réduction significative du temps d'assemblage, une amélioration du rendement au premier passage (FTY), une réduction des coûts de maintenance et une amélioration des plans de montée en cadence.

4. Pilotage intégré Creos sur Smart Grid Luxembourg et coordination transfrontalière Amprion–Eria

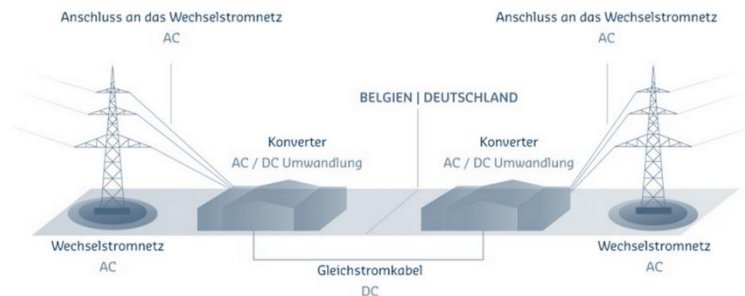
Le quatrième cas met en évidence l'impact d'un pilotage organisationnel intégré dans un contexte de projets énergétiques complexes et transfrontaliers. La Grande Région connaît une accélération des projets de renforcement des réseaux électriques, de développement éolien et de raccordements offshore, impliquant de multiples acteurs (TSO, DSO, OEM, EPC, intégrateurs digitaux) et des cadres réglementaires nationaux distincts.

La mise en place d'un pilotage intégré unique de l'ingénierie réseau constitue un levier structurant de performance. L'expérience Smart Grid Luxembourg montre que la centralisation du pilotage réduit significativement les frictions entre les métiers électriques, le génie civil et les fonctions numériques, en clarifiant les responsabilités et en accélérant les arbitrages.

Cette organisation est renforcée par le déploiement de plateformes de données techniques partagées, qui facilitent la coordination entre opérateurs de pays différents et réduisent la durée des arbitrages techniques en assurant l'accès à une information unique et cohérente.

Par ailleurs, la préfabrication et la qualification en amont de modules électriques ont permis, sur certains parcs éoliens du Grand Est, de réduire sensiblement les délais de mise en service malgré la variabilité des sites. L'utilisation conjointe du BIM et de jumeaux numériques de sous-stations complète ce dispositif en diminuant le recours aux essais physiques et en optimisant les réglages de protection, contribuant ainsi à une meilleure fiabilité globale des projets.

Figure 9 – Coordination des écosystèmes entre l’Allemagne et la Belgique lors du projet ALLEGrO



Les résultats incluent une diminution de 15 à 25 % des coûts d’ingénierie, une réduction d’environ 20 % du temps de mise en service, une amélioration de la disponibilité réseau et une réduction des erreurs d’intégration. Les obstacles rencontrés concernent la multiplication des versions documentaires, la variabilité des pratiques entre pays et la résistance à l’harmonisation des standards.

5. Co-conception turbine–réseau au sein de l’OFATE et gouvernance technique partagée sur les interconnexions régionales

Les projets énergie transfrontaliers de la Grande Région illustrent un niveau élevé de complexité systémique, combinant hétérogénéité réglementaire, diversité des acteurs et exigences techniques élevées sur les interfaces turbine–réseau. Les projets analysés impliquent développeurs éoliens, fabricants de turbines, opérateurs de réseaux, bureaux d’ingénierie et clusters transnationaux, dont l’OFATE constitue une plateforme structurante. Dans ce contexte, la performance industrielle dépend moins de l’optimisation d’un maillon isolé que de la capacité collective à concevoir un système cohérent, conforme aux exigences de plusieurs pays, sans générer de reprises tardives ou de litiges.

La mise en place d’une Design Authority multi-acteurs constitue un levier structurant de gouvernance technique. Cette instance partagée garantit la cohérence globale des projets en arbitrant les choix d’architecture, en sécurisant la compatibilité entre turbines, réseaux et systèmes de contrôle-commande, et en dépassant une logique de décisions fragmentées prises séparément par chaque partie prenante. Elle transforme la coordination technique en un processus industrialisé et reproductible.

Cette gouvernance est renforcée par la co-validation des études critiques et l’alignement sur des référentiels techniques communs. La validation conjointe des études de charges, des modèles dynamiques et des réglages de protection, associée à l’adoption de normes IEC et des cadres ENTSO-E, réduit les écarts d’interprétation et limite fortement les reprises tardives. L’instauration de jalons qualité conjoints complète ce dispositif en engageant l’ensemble des acteurs sur des points de passage structurants.

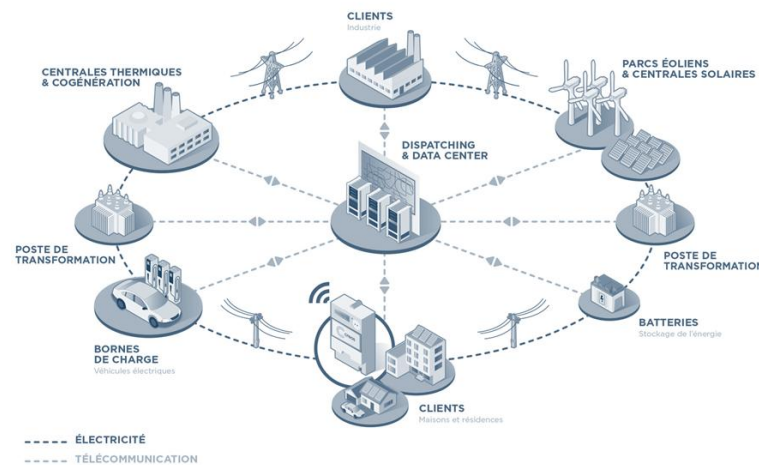
Les obstacles identifiés concernent principalement l’hétérogénéité persistante des exigences nationales, la réticence de certains OEM à partager des modèles dynamiques pour des raisons de confidentialité, et le décalage des temporalités entre raccordement réseau et installation des turbines. Malgré ces freins, les projets structurés autour de ces pratiques affichent des résultats tangibles : amélioration de la qualité des études système, accélération des délais de raccordement et réduction d’environ 50 % des non-conformités.

L’enseignement clé est que la co-conception turbine–réseau, lorsqu’elle est gouvernée et outillée, constitue un levier majeur de sécurisation industrielle dans des environnements complexes.

6. Postes modulaires pré-équipés Creos et plateformes turbines standardisées Nordex et Siemens Gamesa

Le sixième cas illustre la traduction opérationnelle de la standardisation et de la modularisation dans la filière énergie, à travers des solutions déployées à l'échelle industrielle dans la Grande Région. L'industrialisation s'appuie sur des postes HT/MT modulaires pré-équipés, des plateformes turbines standardisées, des architectures SCADA homogènes et des dispositifs de maintenance prédictive intégrés. Ces choix visent à déplacer la valeur ajoutée vers l'amont industriel, réduire la variabilité sur site et fiabiliser les délais et la qualité.

Figure 10 – Standardisation de la solution smart grid par Creos Luxembourg



La standardisation des postes HT/MT mise en œuvre par Creos constitue un levier structurant d'industrialisation. Les postes modulaires s'appuient sur des cellules standardisées, des architectures de contrôle-commande homogènes et des procédures FAT/SAT harmonisées. Cette approche réduit fortement la variabilité d'exécution sur site, sécurise la qualité des installations et simplifie l'intégration avec les systèmes existants grâce à la standardisation des interfaces électriques et des modèles de données.

Le développement de plateformes turbines standardisées par Nordex et Siemens Gamesa complète cette dynamique. Les familles de turbines et les modules interchangeables permettent de mutualiser la conception tout en conservant des variantes adaptées aux contraintes locales. Cette modularité facilite la préfabrication, les tests en usine et la montée en cadence, tout en maintenant un haut niveau de performance technique et de conformité réglementaire.

Enfin, le pré-assemblage et la qualification en usine, combinés à des architectures SCADA harmonisées, constituent un levier clé de fiabilisation. Les modules critiques sont testés en amont, réduisant le temps d'installation et les risques d'erreur, tandis que la standardisation des IED, des protocoles et des RTU renforce l'interopérabilité et la maintenance prédictive.

Les résultats observés sont significatifs : réduction d'environ 40 % du temps d'installation HT/MT, baisse de 35 % de la variabilité qualité et amélioration durable de la disponibilité des actifs. L'enseignement central est que la standardisation produit, lorsqu'elle est couplée à une gouvernance et à des référentiels communs, constitue un levier direct de compétitivité industrielle.

B. Facteurs clés d'industrialisation – synthèse transverse structurée

L'analyse consolidée des six cas met en évidence cinq facteurs clés d'industrialisation, qui apparaissent de manière récurrente et convergente. Ces facteurs ne constituent pas des bonnes

pratiques isolées, mais un système cohérent qui conditionne la capacité à industrialiser durablement des activités complexes.

La gouvernance intégrée du design à la production constitue un levier central. Les organisations les plus performantes mettent en place une gouvernance centralisée pilotant l'ensemble de la chaîne, depuis la conception jusqu'à l'exécution. Cette organisation limite les frictions inter-métiers, accélère les arbitrages et réduit le rework. Elle repose sur la coordination d'équipes pluridisciplinaires autour de processus standardisés et de KPI partagés, transformant la prise de décision en un processus industrialisé.

La performance industrielle repose également sur un co-développement structuré avec l'écosystème. La capacité à intégrer les partenaires en amont, dans une logique de co-conception et de responsabilité partagée, conditionne la robustesse des trajectoires industrielles. Le verrouillage progressif des spécifications, l'alignement contractuel sur la performance et l'accompagnement des partenaires permettent de réduire les redesigns tardifs, de sécuriser l'On-Time Delivery et d'améliorer la qualité globale.

Le partage de langages et de référentiels communs, fondé sur l'interopérabilité, constitue un autre pilier structurant. L'élimination des divergences documentaires et des écarts d'interprétation s'appuie sur la diffusion de formats de données communs, de référentiels uniques et de standards partagés. Cette continuité de la donnée agit comme un levier direct de réduction des erreurs d'interface et d'accélération des arbitrages techniques.

Le pilotage par la performance, combiné à une forte capacité de capitalisation, apparaît comme un facteur déterminant de maîtrise industrielle. Les organisations les plus avancées déploient des KPI partagés, des dispositifs de gestion outillée des écarts et des mécanismes structurés de retour d'expérience. Cette approche permet de maîtriser la supply chain, les coûts indirects, les délais et la montée en cadence sans dégradation de la qualité.

Enfin, la standardisation des interfaces et la modularisation produit permettent de transformer des projets unitaires en petites et moyennes séries industrialisables. Le développement de bibliothèques de modules qualifiés, réutilisables ou de plateformes produit répliquables stabilise les temps de cycle, fiabilise la qualité et facilite la maintenance sur l'ensemble du cycle de vie.

V. Analyse de l'impact et de la transférabilité des leviers à la construction hors site

A. Transférabilité des leviers d'industrialisation au segment de la construction hors-site résidentielle collective

1. Positionnement de la construction hors site de logements collectifs de 2 à 4 étages (R+2 à R+4) comme segment prioritaire d'industrialisation

Le logement collectif de faible et moyenne hauteur constitue, au sein de la filière construction Hors Site, le segment présentant le meilleur compromis entre potentiel d'industrialisation et faisabilité opérationnelle à l'échelle de la Grande Région. Ce segment se caractérise par une homogénéité programmatique élevée, une stabilité réglementaire relative et une répétitivité fonctionnelle suffisante pour permettre l'activation de leviers industriels issus de filières matures.

D'un point de vue fonctionnel et technique, les opérations reposent majoritairement sur des trames structurelles récurrentes, des portées standardisées, des noyaux verticaux similaires et des distributions fonctionnelles répétitives. Les exigences réglementaires en matière de structure et de sécurité incendie demeurent relativement stabilisées sous le seuil du R+4, ce qui

limite la variabilité normative et réduit les risques de reconfiguration projet par projet. Cette stabilité constitue un prérequis essentiel à toute logique de standardisation et de modularisation.

Sur le plan économique et opérationnel, le logement collectif de 2 à 4 étages est porté par des volumes significatifs, en particulier dans les marchés publics et parapublics, ainsi que dans les opérations de logement intermédiaire et social. Ces marchés offrent un potentiel de massification compatible avec une logique de série courte ou moyenne, condition indispensable à la rentabilisation des investissements organisationnels et industriels liés au Hors Site. À l'inverse, les segments plus complexes (IGH, ouvrages très spécifiques) ou trop diffus (maison individuelle sur-mesure) ne permettent pas, à ce stade, d'atteindre un seuil critique suffisant pour enclencher une industrialisation structurée à l'échelle régionale.

L'implication structurante est que le logement collectif de R+2 à R+4 constitue un segment pivot : suffisamment simple pour être industrialisé, suffisamment volumique pour générer des effets d'échelle, et suffisamment représentatif pour servir de socle à une montée en maturité progressive de la filière Hors Site en Grande Région.

2. Cadre d'analyse de la transférabilité des leviers d'industrialisation

La transférabilité des leviers d'industrialisation vers la construction Hors Site ne peut être appréciée de manière générique. Elle repose sur une analyse croisée de deux dimensions structurantes : l'impact potentiel des leviers sur la performance industrielle du segment de la résidence collective à étage et leur faisabilité effective dans le contexte organisationnel, économique et territorial de la Grande Région.

La première dimension, l'impact, recouvre la capacité des leviers à améliorer de manière mesurable la productivité globale, la fiabilité des délais, la qualité première passe et la répétitivité industrielle. L'analyse considère l'ensemble de la chaîne de valeur, depuis la conception et l'ingénierie jusqu'à la production off-site, la logistique et l'assemblage sur site. Les leviers retenus doivent démontrer un effet structurant sur la réduction des itérations tardives, des non-qualités et des coûts indirects, qui constituent aujourd'hui les principaux facteurs de contre-performance du secteur.

La seconde, la faisabilité, évalue la compatibilité des leviers avec les spécificités de la filière construction Hors Site en Grande Région. Elle intègre la maturité industrielle hétérogène des acteurs, la fragmentation de la chaîne de valeur, la prégnance de la logique projet, la diversité des cadres nationaux et la capacité réelle à coordonner des écosystèmes transfrontaliers. Un levier à fort impact théorique peut ainsi se révéler peu transférable à court terme s'il suppose un niveau de standardisation, de gouvernance ou d'investissement incompatible avec la réalité du terrain.

Le croisement de ces deux dimensions permet de structurer une hiérarchisation robuste des leviers, distinguant ceux qui peuvent constituer un socle d'industrialisation activable à court terme de ceux qui relèvent d'une trajectoire de transformation plus progressive.

3. Identification des familles de leviers transférables au segment résidentiel collectif R+2 à R+4

L'analyse industrielle et des filières matures met en évidence trois grandes familles de leviers d'industrialisation, différenciées par leur niveau d'impact et leur complexité de transposition à la construction résidentielle collectif de 2 à 4 étages.

Les leviers prioritaires regroupent les leviers à fort impact et à forte transférabilité. Ces leviers constituent le socle de l'industrialisation Hors Site. Ils agissent principalement sur la réduction de la variabilité, la fluidification des interfaces et la stabilisation des processus. Ils ne requièrent pas de transformation capitalistique lourde, mais reposent sur des choix organisationnels,

méthodologiques et de gouvernance. Ils incluent la standardisation des interfaces techniques, la modularisation fonctionnelle « invisible client », le pilotage industriel intégré et le partage de référentiels communs.

Les leviers sous condition rassemblent des leviers à très fort impact, mais dont la mise en œuvre est conditionnée à des prérequis de maturité plus élevés. Ces leviers, tels que la gouvernance industrielle intégrée, le co-développement structuré ou la capitalisation industrielle outillée, permettent des gains significatifs à moyen terme, mais supposent un alignement avancé des acteurs, des volumes sécurisés et une capacité de pilotage collective renforcée. Ils relèvent davantage d'une seconde séquence de déploiement.

La troisième famille correspond aux leviers de soutien. Ces leviers, notamment numériques et liés à la montée en compétences, sont indispensables pour accompagner la transformation, mais ne constituent pas, à eux seuls, des déclencheurs d'industrialisation. Leur efficacité dépend directement de leur articulation avec les leviers structurants des deux premières familles.

B. Analyses détaillées et hiérarchisation des sous-segments transférables

La hiérarchisation des sous-segments transférables repose sur une analyse croisée de deux dimensions déterminantes pour la filière Hors Site de la Grande Région. La première dimension concerne l'impact réel des leviers sur la performance industrielle, appréhendée à travers les gains de productivité, la fiabilisation des délais, la réduction des non-qualités et, plus largement, la capacité à structurer une logique de répétitivité. La seconde dimension concerne la complexité de transposition, entendue comme la difficulté organisationnelle, technique, économique et culturelle à déployer ces leviers dans un environnement caractérisé par une forte fragmentation des acteurs et une maturité industrielle hétérogène. Cette lecture combinée permet de distinguer des trajectoires de déploiement différenciées, allant de leviers immédiatement activables à des leviers relevant d'un horizon plus long.

Figure 11 – Matrice de hiérarchisation des leviers d'industrialisation de la filière construction hors-site

| | | | |
|---------------|---------------|--|--|
| Impact | Fort | Leviers sous condition <ul style="list-style-type: none"> • Co-développement structuré et gouvernance numérique partagée • Capitalisation industrielle et standardisation des méthodes • Pré-assemblage industriel et qualification en usine | Leviers prioritaires <ul style="list-style-type: none"> • Standardisation des interfaces techniques • Modularisation fonctionnelle « invisible client » • Pilotage industriel intégré et gouvernance de conception et industrialisation • Harmonisation d'un référentiel et d'un langage commun |
| | Faible | Leviers non-stratégique <ul style="list-style-type: none"> • Automatisation lourde / Capex • Standardisation architecturale visible imposée | Leviers de soutien <ul style="list-style-type: none"> • Montée en compétences et acculturation industrielle • Animation de filière et dispositifs de mutualisation |
| | | Limitée | Elevée |
| | | Transférabilité | |

1. Leviers prioritaires à fort potentiel et fortement intégrable

Standardisation des interfaces techniques

La standardisation des interfaces techniques apparaît comme le levier le plus structurant et le plus immédiatement transférable au segment du résidentiel à plusieurs étages. Elle consiste à stabiliser les points de contact entre les sous-systèmes du bâtiment (structure, façades, planchers, noyaux de circulations verticales, lots techniques) indépendamment des choix architecturaux visibles. Cette approche permet de contenir la variabilité là où elle génère le plus de coûts et d'aléas, à savoir aux interfaces, sans contraindre la diversité formelle des projets. Dans le logement collectif s'élevant à 4 étages, la répétitivité des trames et des distributions rend cette standardisation particulièrement pertinente. Les gains attendus portent sur la réduction des reprises en phase chantier, la fiabilisation des délais d'assemblage et l'amélioration de la qualité première passe.

Modularisation fonctionnelle « invisible client »

La modularisation fonctionnelle « invisible client » constitue un prolongement direct de la standardisation des interfaces. Elle vise à industrialiser en priorité les sous-ensembles à faible valeur perçue mais à fort poids technique et économique, tels que les noyaux, les salles d'eau, les gaines techniques ou certaines parties structurelles. En concentrant l'effort de standardisation sur ces éléments, la filière peut générer des effets d'échelle significatifs tout en préservant la capacité de personnalisation des logements. Sur le segment du résidentiel de R+2 à R+4, la répétitivité des logements et des circulations rend cette approche particulièrement efficace.

Pilotage industriel intégré et gouvernance de conception et industrialisation

Le pilotage industriel intégré, couvrant conjointement la conception, l'industrialisation et l'exécution, constitue un levier prioritaire et un préalable à tout déploiement efficace du hors site à l'échelle. Il s'agit de dépasser la logique historiquement séquentielle de la filière construction – fondée sur l'intervention successive et cloisonnée des architectes, bureaux d'études techniques et entreprises – pour instaurer un pilotage global orienté performance industrielle.

Cette structuration historique en silos constitue aujourd'hui l'un des principaux freins à l'industrialisation, en multipliant les itérations tardives, les arbitrages contradictoires et les reconfigurations coûteuses en phase aval. Le pilotage intégré vise au contraire à organiser l'alignement amont des acteurs clés, la clarification des responsabilités, la mise en place de jalons communs de décision et la convergence progressive des contraintes architecturales, techniques, industrielles et logistiques dès les phases initiales des projets.

Dans le contexte du hors site, ce levier permet de réduire significativement les itérations tardives, qui figurent parmi les principales sources de dérive de coûts et de délais, et de créer les conditions d'une collaboration structurelle plutôt que transactionnelle entre acteurs.

Harmonisation d'un référentiel et d'un langage technique commun

Le partage de référentiels et de langages communs complète ce socle. La définition de référentiels techniques partagés, de règles d'interface et de conventions de modélisation constitue une condition opérationnelle de la coopération inter-entreprises, en particulier dans un contexte transfrontalier. Pour le logement collectif R+2–R+4, la mutualisation de ces référentiels à l'échelle régionale permettrait de réduire les frictions entre acteurs, de faciliter la réplique des projets et de sécuriser la montée en charge industrielle.

2. Leviers à impact conditionnés par des prérequis de maturité

Certains leviers d'industrialisation présentent un potentiel de création de valeur très élevé pour la construction hors-site résidentielle collective, mais leur activation effective est conditionnée à des prérequis organisationnels, économiques et culturels qui ne sont pas systématiquement

réunis à l'échelle de la Grande Région. Ces leviers relèvent d'une seconde séquence d'industrialisation, une fois stabilisé le socle constitué par la standardisation des interfaces, la modularisation fonctionnelle et le pilotage intégré.

Co-développement structuré et gouvernance numérique partagée

Le co-développement structuré avec les fournisseurs et partenaires industriels constitue un levier majeur pour le segment du résidentiel collectif de 2 à 4 étages. Il permet d'intégrer en amont les contraintes de fabrication, de transport, de tolérances dimensionnelles et d'assemblage, réduisant ainsi les itérations de conception et les reconfigurations tardives.

Ce levier est particulièrement pertinent pour les sous-ensembles critiques tels que les noyaux (circulations verticales telles que les ascenseurs et escaliers), les façades industrialisées ou les lots techniques pré-équipés. Toutefois, il suppose un niveau élevé de confiance, de transparence et de partage des risques, encore peu répandu dans la filière construction, ainsi qu'un cadre contractuel adapté.

La maquette numérique et les environnements BIM collaboratifs constituent à ce titre un socle indispensable. Ils ne peuvent être réduits à de simples outils de représentation, mais doivent être conçus comme des supports de gouvernance partagée, de décision collective et de synchronisation des acteurs. En l'absence de règles communes de modélisation, de responsabilités clairement établies sur les données et de processus stabilisés, la numérisation tend à reproduire, voire amplifier, les dysfonctionnements existants.

En outre, en l'absence de projets suffisamment répétitifs et de volumes sécurisés, le retour sur investissement du co-développement demeure incertain pour les acteurs industriels.

Capitalisation industrielle et standardisation des méthodes

La capitalisation industrielle et la standardisation des méthodes constituent un troisième levier sous condition. La capacité à capitaliser les retours d'expérience, à formaliser des standards opératoires et à diffuser les apprentissages d'un projet à l'autre est un facteur clé de montée en performance dans les filières industrielles matures.

Dans le logement collectif à deux étages et plus, cette capitalisation permettrait de stabiliser les temps de cycle, d'améliorer la qualité première passe et de réduire les coûts indirects. Toutefois, elle suppose l'existence d'un minimum de continuité entre projets, tant en termes d'équipes que de solutions techniques, condition rarement remplie aujourd'hui dans un contexte de forte fragmentation et de concurrence projet par projet.

Pré-assemblage industriel et qualification en usine

Le pré-assemblage et la qualification en usine représentent un levier à très fort impact potentiel sur la fiabilité des délais et la qualité, en déplaçant une part significative de la valeur ajoutée vers l'amont industriel.

Néanmoins, ce levier ne peut être appréhendé comme une simple transposition mécanique d'opérations traditionnellement réalisées sur chantier. Certaines opérations voyagent mal ou génèrent des risques techniques et économiques disproportionnés (par exemple les plaques de plâtre jointoyées, sensibles aux fissurations lors du transport), tandis que les surcoûts liés à la rigidification excessive des ensembles peuvent annuler les gains attendus.

La généralisation du pré-assemblage suppose donc une adaptation des modes constructifs, le recours à des matériaux plus compatibles avec la préfabrication et le transport, ainsi qu'une acceptation de rendus architecturaux et de finitions potentiellement différents de ceux issus des pratiques traditionnelles in situ.

Sur le segment de logements de R+2 à R+4, ce levier est techniquement pertinent, mais sa mise en œuvre durable est conditionnée à la standardisation préalable des interfaces, à une logistique maîtrisée et à des volumes suffisants pour absorber les surcoûts initiaux liés à l'organisation industrielle.

L'implication structurante est que ces leviers ne doivent pas être activés isolément ni prématurément. Ils constituent une trajectoire de maturité, à enclencher une fois les fondamentaux organisationnels et techniques stabilisés.

3. Leviers de soutien à activer en complément

Les leviers de soutien jouent un rôle essentiel dans l'accompagnement et la pérennisation de l'industrialisation du logement collectif, notamment en à étage, mais ils ne peuvent, à eux seuls, déclencher le passage à l'échelle. Leur efficacité dépend directement de leur articulation avec les leviers structurants et sous condition précédemment identifiés.

Montée en compétences et acculturation industrielle

L'industrialisation du logement collectif hors site implique une évolution profonde des pratiques professionnelles, tant du côté de la conception que de la production et du chantier. La diffusion des principes de Design for Manufacturing and Assembly, la compréhension des logiques de série et l'appropriation des contraintes industrielles sont des conditions nécessaires à la réussite de la transformation.

Toutefois, la formation ne produit d'effets durables que si elle s'inscrit dans des projets concrets et répétitifs, permettant aux équipes de capitaliser effectivement leurs apprentissages.

Animation de filière et dispositifs de mutualisation

Les dispositifs d'animation de filière, clusters et plateformes d'échange jouent un rôle complémentaire, particulièrement pertinent dans le contexte transfrontalier de la Grande Région. Ils permettent de partager les bonnes pratiques, d'aligner progressivement les référentiels et de créer une dynamique collective. Leur impact reste toutefois indirect et dépend de leur capacité à se connecter à des projets opérationnels et à des décisions industrielles concrètes.

4. Leviers non stratégiques à ce stade

Enfin, certains leviers présentent à la fois un impact limité ou très conditionnel et une faible transférabilité dans le contexte actuel de la filière Hors Site.

L'automatisation lourde et la robotisation engagées en amont de toute standardisation relèvent de cette catégorie. Bien que leur impact théorique puisse être élevé, les volumes insuffisants, la variabilité résiduelle des projets et les investissements requis limitent fortement leur pertinence à court et moyen terme.

De même, la standardisation architecturale visible imposée présente un faible impact sur l'industrialisation réelle et une transférabilité limitée, en raison des résistances du marché et des contraintes réglementaires. Ces leviers doivent être considérés en dernier ressort, une fois les fondamentaux de l'industrialisation stabilisés.

C. Freins spécifiques à la grande région et modalités d'adaptation

Dans le contexte spécifique de la Grande Région, l'analyse de la transférabilité doit La transposition des leviers d'industrialisation au hors-site résidentiel collectif en R+2 à R+4 en Grande Région se heurte à un ensemble de freins structurels, qui ne sont pas spécifiques au Hors Site mais y produisent des effets amplifiés. Ces freins doivent être explicitement intégrés dans la trajectoire d'industrialisation afin d'éviter les impasses opérationnelles.

Le premier frein réside dans la fragmentation des maîtrises d'ouvrage et des commandes. La multiplicité des donneurs d'ordre, la variabilité des stratégies d'achat et l'absence de

programmation pluriannuelle limitent la capacité des acteurs industriels à investir dans des solutions standardisées. En l’absence de visibilité sur les volumes, les acteurs privilégient des optimisations projet par projet, au détriment de la répétitivité industrielle. Une modalité d’adaptation consiste à cibler en priorité les maîtrises d’ouvrage publiques et parapubliques, plus à même de structurer des pipelines de projets R+2–R+4 et de favoriser la standardisation. Une modalité complémentaire serait de faire évoluer la boîte à outils contractuelle, notamment en permettant le recours à des formes contractuelles de type Integrated Project Delivery, y compris dans le cadre des marchés publics, afin de sortir d’une logique strictement fondée sur le moins-disant et de favoriser l’alignement des intérêts économiques des acteurs autour de la performance globale.

Figure 12 - Schéma du modèle contractuel de l'Integrated Project Delivery



Le second concerne l’hétérogénéité des cadres nationaux et des pratiques professionnelles au sein de la Grande Région. Les différences réglementaires, contractuelles et culturelles complexifient la mutualisation des solutions et freinent la diffusion des standards. Plutôt que de viser une harmonisation complète, la trajectoire d’adaptation doit privilégier des standards techniques « noyau dur », compatibles avec des déclinaisons nationales, en particulier sur les interfaces et les sous-ensembles invisibles.

D’autre part, la prégnance de la logique projet et à la faible capitalisation inter-projets constituent également un enjeu pour la filière. La discontinuité des équipes, des partenaires et des solutions techniques empêche l’accumulation d’expérience industrielle. L’adaptation passe par la constitution de cercles restreints d’acteurs volontaires autour de projets pilotes, permettant de créer des îlots de continuité et de capitalisation avant un élargissement progressif.

Enfin, la capacité logistique et organisationnelle constitue un frein souvent sous-estimé. L’industrialisation du Hors Site suppose une synchronisation fine entre production off-site, transport et assemblage, dans un contexte transfrontalier complexe. L’adaptation passe par une montée en puissance progressive, ciblant des périmètres géographiques limités et des chaînes logistiques courtes, afin de sécuriser les premiers retours d’expérience.

L’enjeu central n’est donc pas de lever simultanément l’ensemble de ces freins, mais de construire une trajectoire réaliste et séquencée, centrée sur la construction hors-site de résidence R+2 à R+4, permettant de démontrer la création de valeur industrielle avant un déploiement à plus grande échelle.

VI. Recommandations stratégiques et opérationnelles

A. Principes directeurs de la feuille de route d'industrialisation

L'industrialisation du logement collectif hors site résidentiel de R+2 à R+4 en Grande Région ne peut résulter ni d'une généralisation technologique, ni d'une juxtaposition d'initiatives isolées. Elle repose sur la construction progressive d'un système industriel partagé, fondé sur des leviers à forte transférabilité, activés dans un ordre séquentiel, testés dans des projets réels et déployés à l'échelle régionale par capitalisation. Dans ce contexte, l'interconnexion entre les pays de la Grande Région constitue un levier structurant, à la fois parce que les chaînes de valeur et les marchés sont déjà transfrontaliers, et parce que la masse critique nécessaire à l'industrialisation dépasse les frontières nationales.

L'enjeu n'est pas de transformer immédiatement l'ensemble de la filière, mais de rendre la répétitivité possible, puis rentable, sur un segment homogène, avant toute montée en complexité. Le logement collectif résidentiel de 2 à 4 étages constitue le principal périmètre permettant aujourd'hui de concilier stabilité réglementaire, volumes suffisants et potentiel de standardisation, dans le contexte spécifique de la Grande Région. Ce choix segmentaire doit être pensé dès l'origine dans une logique transfrontalière, afin d'agréger les volumes à l'échelle de la Grande Région et d'assurer une cohérence des standards au-delà des cadres nationaux. La feuille de route proposée repose sur trois principes structurants, directement issus des enseignements des parties précédentes.

Le premier principe est celui de la focalisation segmentaire stricte. L'industrialisation ne peut être crédible que si elle s'applique à un périmètre homogène en termes de typologies, de contraintes réglementaires et de modes constructifs. Le segment du logement collectif résidentiel présente des caractéristiques morphologiques et normatives suffisamment stables pour permettre la standardisation des interfaces, la modularisation fonctionnelle et la capitalisation inter-projets. Toute extension prématurée à des segments plus complexes introduirait une variabilité incompatible avec une logique industrielle.

Le second principe est la priorité aux leviers organisationnels et de gouvernance sur les leviers capitalistiques. Les gains de productivité et de fiabilité résultent d'abord de la réduction de la variabilité, de l'alignement amont des acteurs, de la stabilisation des processus décisionnels et du pilotage intégré conception-industrialisation-exécution, bien avant l'automatisation ou les investissements lourds. Dans le Hors Site résidentiel collectif, la structuration d'une gouvernance partagée, l'existence de référentiels communs, l'usage de la maquette numérique comme outil de décision collective et la mise en place de cadres contractuels favorisant l'alignement des intérêts (type IPD, y compris en commande publique) constituent les véritables déclencheurs de performance.

La logique expérimentale territorialisée représente également un axe structurant substantiel. Compte tenu de la fragmentation des acteurs et de l'hétérogénéité des maturités en Grande Région, l'industrialisation doit progresser par îlots, à travers des projets pilotes réels, portés par des acteurs volontaires, sur des périmètres géographiques maîtrisés. La capitalisation et la diffusion ne peuvent intervenir qu'après validation opérationnelle de la création de valeur.

B. Axes de recommandations opérationnelles

1. Structurer le socle prioritaire d'industrialisation

La priorité consiste à constituer un noyau restreint et stable d'acteurs volontaires couvrant l'ensemble de la chaîne de valeur : maîtrises d'ouvrage disposant de pipelines de projets de construction résidentielle R+2 à R+4, agences d'architecture, bureaux d'études, industriels de la préfabrication et entreprises d'assemblage. Ce noyau doit être engagé dans une logique inter-

projets, fondée sur la répétition, la capitalisation et l'acceptation de règles communes. Dans une perspective d'échelle business, ce noyau gagne à intégrer des acteurs issus de plusieurs pays de la Grande Région, afin de mutualiser les volumes, partager les référentiels et créer une profondeur de marché suffisante.

Cette structuration ne vise pas l'harmonisation immédiate des solutions industrielles, irréaliste à court terme compte tenu de la diversité des systèmes constructifs et des modèles économiques des fabricants, mais l'alignement sur des principes partagés : logique de pilotage intégré, anticipation des contraintes industrielles en conception, discipline de réduction de la variabilité non créatrice de valeur et acceptation d'arbitrages collectifs au profit de la performance globale.

La sécurisation de typologies cibles et de volumes associés constitue un second pilier prioritaire. Il s'agit d'identifier, avec les maîtrises d'ouvrage, des familles de projets R+2–R+4 à forte récurrence morphologique et fonctionnelle (logement social, logement intermédiaire, résidences assimilées), et de les inscrire dans une programmation pluri-opérations permettant de sortir d'une logique strictement opportuniste. Ce n'est pas la taille unitaire d'un projet qui conditionne l'industrialisation, mais la continuité et la répétitivité d'un ensemble de projets comparables dans le temps.

Le pilotage intégré conception–industrialisation–chantier, déjà identifié comme levier prioritaire en Partie V, doit être opérationnalisé dès cette phase. Il implique l'alignement amont des acteurs clés, l'instauration de jalons industriels communs, la clarification des responsabilités et l'arbitrage précoce des choix impactant la fabricabilité, la logistique et l'assemblage. Cette gouvernance intégrée constitue un préalable à toute activation ultérieure de leviers techniques plus structurants.

Enfin, l'évolution des cadres contractuels doit être engagée en cohérence avec cette logique collective. La mise en place de contrats-cadres pluri-projets, incluant les industriels et intégrateurs, et l'exploration de formes contractuelles de type Integrated Project Delivery, y compris en contexte de commande publique, sont des conditions clés pour sortir d'une logique de moins-disant et aligner les intérêts économiques des acteurs sur la performance globale et la réduction des coûts complets.

2. Séquencer l'activation des leviers à transférabilité conditionnelle

Une fois le socle prioritaire stabilisé, la trajectoire d'industrialisation peut intégrer des leviers à très fort impact, mais dont l'activation est conditionnée à un niveau de maturité collective suffisant.

La mise en place d'une gouvernance industrielle multi-acteurs ciblée constitue un premier levier sous condition. Cette gouvernance vise à instaurer une capacité de décision collective sur les invariants industriels du segment hors site résidentiel de 2 à 4 étages, tout en laissant aux projets leur capacité d'adaptation. Elle doit rester volontairement circonscrite à des périmètres restreints, afin d'éviter les lourdeurs organisationnelles et de préserver l'agilité des acteurs. Elle peut se traduire par l'implémentation systématique d'un RACI adapté à chaque projet, défini et validé en amont, idéalement avant appel d'offres, permettant de clarifier les délégations, de prévenir la dilution des responsabilités et de stabiliser l'organisation sans rigidifier excessivement le dispositif.

Cette gouvernance doit également transparaître dans l'usage des outils numériques, en particulier le BIM et les plateformes collaboratives. Elles doivent être positionnés comme des supports des standards et des référentiels, et non comme des solutions en soi. Leur valeur réside dans leur capacité à assurer la continuité de l'information et à réduire les erreurs d'interface, à condition que les processus sous-jacents soient stabilisés.

Le co-développement structuré sur des sous-ensembles critiques représente un second levier sous condition. Appliqué aux noyaux, façades industrialisées ou lots techniques pré-équipés, il permet d'intégrer en amont les contraintes industrielles et logistiques, réduisant ainsi les

reconfigurations tardives. Ce co-développement doit s'appuyer sur des engagements réciproques clairs et rester sélectif, afin de garantir un retour sur investissement pour les partenaires impliqués.

La capitalisation industrielle inter-projets constitue un troisième levier déterminant. Elle repose sur la standardisation des méthodes, la formalisation des retours d'expérience et la continuité des équipes et des solutions techniques d'un projet à l'autre. Dans le contexte de la Grande Région, cette capitalisation ne peut émerger que si un minimum de récurrence est organisé autour de projets de type R+2 à R+4 similaires. Cette capitalisation transfrontalière permet de consolider des standards communs et de sécuriser une base de volumes élargie, indispensable à la viabilité économique des investissements industriels futurs.

Enfin, le pré-assemblage et la qualification en usine doivent être déployés de manière progressive, une fois les interfaces stabilisées et la logistique maîtrisée. Ce levier permet de déplacer la valeur ajoutée vers l'amont industriel, de réduire les aléas chantier et d'améliorer la qualité première passe, mais il suppose des volumes suffisants pour absorber les coûts d'organisation initiale.

3. S'appuyer sur les leviers de soutien comme accélérateurs

Les leviers de soutien jouent un rôle essentiel dans l'accompagnement et la diffusion de la trajectoire d'industrialisation, sans en constituer les moteurs principaux.

La montée en compétences ciblée, notamment autour des principes de Design for Manufacturing and Assembly appliqués au logement collectif, constitue un autre levier de soutien. La formation doit être ancrée dans des projets pilotes concrets, afin de transformer les apprentissages en pratiques opérationnelles et de diffuser progressivement une culture industrielle partagée.

Enfin, l'animation de filière territorialisée permet de mutualiser les apprentissages, d'aligner progressivement les référentiels et de créer une dynamique collective. Son efficacité dépend directement de sa connexion à des projets opérationnels et à des décisions industrielles concrètes.

C. Cadre d'expérimentation proposé

Le cadre d'expérimentation opérationnel constitue le dispositif central de mise en œuvre de la trajectoire d'industrialisation proposée. Il vise à traduire les leviers identifiés et hiérarchisés en Partie I en pratiques effectives, testées dans des projets réels de logement collectif résidentiel hors site, soumis à des contraintes économiques, techniques et calendaires comparables à celles rencontrées dans les opérations courantes de la filière. L'objectif n'est pas de démontrer la faisabilité conceptuelle du Hors Site, mais de produire des preuves opérationnelles de création de valeur industrielle mesurable, condition indispensable à un passage à l'échelle crédible dans le contexte de la Grande Région.

La finalité de cadre est d'abord de sécuriser la transférabilité réelle des leviers prioritaires identifiés, en particulier la standardisation des interfaces, la modularisation fonctionnelle dite « invisible client », le pilotage intégré de la conception à l'assemblage et le partage de référentiels techniques communs. Ces leviers doivent être éprouvés dans des configurations concrètes afin d'en mesurer les effets sur la productivité, les délais, la qualité et la stabilité des coûts. La finalité est ensuite de créer les conditions d'une continuité inter-projets, permettant la capitalisation industrielle, la stabilisation progressive des méthodes et la réduction de la variabilité d'un projet à l'autre. Enfin, le cadre d'expérimentation a vocation à fournir aux acteurs publics et privés de la filière des éléments factuels objectifs, permettant d'arbitrer rationnellement les choix d'investissement, d'organisation et de standardisation.

Son périmètre est volontairement restreint afin de maximiser les chances de succès et d'éviter les effets de dilution. Il se limite strictement au segment du logement collectif résidentiel R+2 à

R+4, considéré comme le seul segment combinant aujourd'hui un niveau suffisant de répétitivité programmatique, une stabilité réglementaire relative et un potentiel de massification compatible avec une logique d'industrialisation progressive. Les projets retenus doivent relever de constructions neuves, mobiliser des modes constructifs compatibles avec le Hors Site, principalement fondés sur la préfabrication 2D et, de manière ciblée, sur des hybridations 2D/3D, et présenter des typologies répétitives en termes de trames, de distributions et de sous-ensembles techniques. Le périmètre géographique doit être circonscrit à des zones transfrontalières cohérentes de la Grande Région, afin de maîtriser la complexité logistique et organisationnelle inhérente au contexte multi-pays. Ce choix n'est pas uniquement logistique, il vise également à tester, dès l'expérimentation, la capacité des acteurs à opérer sur un marché transfrontalier intégré et à agréger une échelle business compatible avec une logique industrielle.

Les projets éligibles à l'expérimentation correspondent à des opérations de logements collectifs portées par des programmes à forte récurrence fonctionnelle, tels que le logement social, le logement intermédiaire ou des résidences assimilées. Ils doivent présenter des exigences architecturales compatibles avec une standardisation technique non visible pour l'utilisateur final et des contraintes économiques fortes en matière de coûts et de délais, rendant la recherche de gains de productivité particulièrement pertinente. Plutôt que de fixer un seuil de taille unitaire arbitraire, l'éligibilité repose sur la capacité du projet à s'inscrire dans une logique de série courte ou moyenne à l'échelle d'un pipeline de projets comparables, condition essentielle pour justifier l'investissement organisationnel et industriel requis. À l'échelle de la Grande Région, ce type d'opérations est déjà largement répandu, souvent avec un recours partiel à la préfabrication, sans pour autant s'inscrire dans une logique industrielle stabilisée. Le cadre d'expérimentation vise précisément à structurer cette pratique diffuse en un système reproductible.

La réussite du dispositif repose sur la mobilisation ciblée d'un nombre limité d'acteurs, positionnés de manière complémentaire sur la chaîne de valeur, et engagés dans une logique de continuité sur plusieurs projets successifs. Les maîtrises d'ouvrage jouent un rôle structurant dans ce cadre. Il s'agit principalement de bailleurs sociaux, d'opérateurs publics ou parapublics et d'aménageurs disposant d'un portefeuille de projets suffisamment dense pour permettre une approche inter-projets. Leur engagement porte sur la sécurisation des volumes, l'acceptation de standards techniques partagés et la capacité à arbitrer entre personnalisation marginale et performance industrielle.

Les maîtrises d'œuvre et les ingénieries, qu'il s'agisse d'agences d'architecture ou de bureaux d'études, doivent être en mesure d'intégrer dès l'amont les contraintes industrielles et de limiter la variabilité non nécessaire. Elles doivent surtout intervenir de manière répétée sur des projets comparables afin de capitaliser les apprentissages et de stabiliser les pratiques. Dans la logique d'un pilotage intégré, leur contribution ne se limite pas à la conception, mais s'étend à l'anticipation de la fabricabilité, des tolérances, des interfaces et des séquences d'assemblage.

Les industriels de la préfabrication et les constructeurs Hors Site occupent une position centrale dans le dispositif. Il s'agit notamment de préfabriquant béton ou bois, ainsi que de fabricants de modules fonctionnels tels que les salles d'eau, les noyaux ou les façades industrialisées. Leur rôle consiste à définir et fiabiliser les standards d'interface, à stabiliser les processus de fabrication et à contribuer au pré-assemblage des sous-ensembles critiques. Leur engagement est conditionné à une visibilité suffisante sur la répétitivité des projets, seule à même de justifier l'investissement organisationnel requis. Les entreprises de travaux et les intégrateurs, enfin, assurent la synchronisation entre l'usine et le chantier, la maîtrise de l'assemblage sur site et la réduction des aléas d'exécution. Leur implication suppose une clarification des responsabilités et une stabilité des solutions techniques mises en œuvre.

La mise en œuvre opérationnelle du cadre d'expérimentation repose sur une logique de progressivité et de discipline. Chaque projet expérimental doit intégrer un périmètre explicitement défini de standardisation des interfaces, une liste volontairement limitée de modules fonctionnels standardisés et un pilotage intégré structuré autour de jalons industriels

communs. Un référentiel technique partagé doit être établi dès la phase amont et utilisé comme base commune tout au long du projet. Les projets ne doivent pas être considérés comme indépendants, mais comme des séquences successives d'apprentissage, dans lesquelles les enseignements du premier projet alimentent directement le suivant, sans remise à zéro des choix structurants. Cette continuité constitue la condition indispensable à l'émergence d'une véritable capitalisation industrielle.

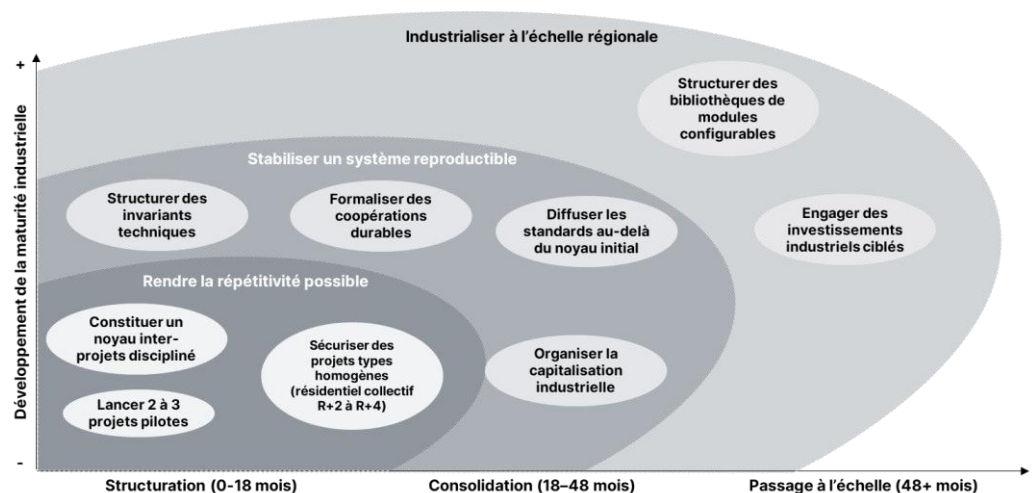
La gouvernance du cadre d'expérimentation doit rester volontairement légère afin de préserver l'agilité des acteurs. Elle repose sur une instance de pilotage technique restreinte, chargée de valider les invariants industriels, de suivre les écarts et de décider des ajustements nécessaires sur la base de critères objectifs. La crédibilité du dispositif repose sur la mesure systématique de la performance, à travers des indicateurs couvrant la réduction des délais globaux et des délais chantier, les gains de productivité en conception et en exécution, la diminution des non-qualités et la stabilité des coûts entre projets successifs. Un projet expérimental est considéré comme concluant non lorsqu'il est simplement livré, mais lorsqu'il peut être reproduit avec moins de variabilité, moins de réingénierie et une fiabilité accrue.

Le logement collectif résidentiel hors-site R+2 à R+4 constitue le point d'entrée opérationnel le plus crédible pour structurer une filière Hors Site industrialisée en Grande Région. La réussite de cette trajectoire repose sur la discipline organisationnelle, la standardisation des interfaces et l'alignement progressif des acteurs, bien avant toute considération technologique. Elle dépend également sur la capacité à articuler les dynamiques nationales dans une logique d'interconnexion régionale, condition de la masse critique, de la robustesse économique et de la pérennité du modèle industriel. Cette approche permet de construire une industrialisation durable, adaptée aux spécificités territoriales et capable de créer de la valeur à l'échelle régionale.

D. Feuille de route séquencée

La feuille de route proposée vise à organiser la trajectoire d'industrialisation de la construction hors site et plus précisément du segment concernant la résidence collective allant de 2 à 4 étages en Grande Région selon une logique progressive, réaliste et cumulative. Elle repose sur l'idée centrale que l'industrialisation ne peut être décrétée ni importée ex nihilo, mais qu'elle se construit par séquences successives, chacune répondant à un objectif précis de maturité industrielle, organisationnelle et collective. Cette trajectoire est structurée en trois phases distinctes, correspondant à des horizons temporels différenciés et à des niveaux croissants d'ambition et de complexité.

Figure 13 - Feuille de route stratégique et opérationnelle



1. Phase 1 – Court terme (0–18 mois) : structurer les fondations industrielles

La première phase a pour objectif principal de rendre la répétitivité techniquement et organisationnellement possible sur le segment hors-site du logement collectif résidentiel de 2 étages à 4 étages. Elle constitue une phase de structuration des fondamentaux, sans laquelle aucune industrialisation crédible ne peut émerger.

Cette phase repose en premier lieu sur la constitution d'un noyau restreint d'acteurs volontaires. Ce noyau doit réunir des maîtrises d'ouvrage, des maîtrises d'œuvre, des bureaux d'études, des industriels de la préfabrication et des entreprises d'assemblage prêts à s'engager sur plusieurs projets successifs selon des règles communes. L'ambition n'est pas de fédérer l'ensemble de la filière, mais de créer des conditions de confiance, de stabilité et de discipline suffisantes pour expérimenter de nouvelles pratiques industrielles sans dilution des responsabilités. L'instance constituée doit être en mesure d'arbitrer collectivement les choix structurants, notamment ceux qui conditionnent la fabricabilité, la logistique, les tolérances et les séquences d'assemblage.

Parallèlement, cela implique la sélection ciblée de typologies de projets résidentiel R+2 à R+4 homogènes, tant du point de vue morphologique que programmatique. Cette sélection doit privilégier des opérations de logements collectifs à forte récurrence fonctionnelle, portées par des maîtrises d'ouvrage disposant d'un pipeline de projets, afin d'introduire dès l'amont une logique inter-projets. L'objectif est de sortir d'une approche opportuniste pour instaurer une première continuité dans les choix techniques et organisationnels.

La constitution d'un noyau restreint d'acteurs volontaires constitue un autre pilier de cette phase. Ce noyau doit réunir des maîtrises d'ouvrage, des maîtrises d'œuvre, des industriels de la préfabrication et des entreprises de travaux prêts à s'engager sur plusieurs projets successifs, selon des règles communes. L'ambition n'est pas de fédérer l'ensemble de la filière, mais de créer des conditions de confiance et de stabilité suffisantes pour expérimenter de nouvelles pratiques industrielles sans dilution des responsabilités.

Enfin, cette phase se matérialise par le lancement de deux à trois projets pilotes réels de logement collectif hors site, conçus comme des supports d'expérimentation opérationnelle et non comme des démonstrateurs hors marché. Ces projets doivent intégrer dès la phase amont les standards d'interface définis, un périmètre limité de modularisation fonctionnelle et un pilotage intégré structuré autour de jalons industriels communs. La mise en place d'un référentiel technique partagé, utilisé tout au long du cycle de projet, constitue un livrable clé de cette phase. L'enjeu central est de produire des premiers retours d'expérience objectifs, permettant de valider la pertinence des choix opérés.

2. Phase 2 – Moyen terme (18–48 mois) : transformer l'expérimentation en système industriel

La deuxième phase vise à passer d'une logique d'expérimentation maîtrisée à une logique de système industriel naissant. Elle s'appuie directement sur les enseignements et les preuves produites lors de la phase 1, et suppose que les leviers prioritaires aient démontré leur capacité à générer des gains mesurables de performance.

Dans ce cadre, la standardisation ciblée de certaines interfaces critiques peut être structurée de manière plus robuste. Elle ne vise pas une harmonisation théorique universelle, mais l'identification d'un nombre limité d'invariants techniques réellement réutilisables sur les typologies sélectionnées, compatibles avec les cadres nationaux. L'objectif est de réduire les aléas d'assemblage, de fiabiliser les délais et de limiter les reprises chantier, en stabilisant les points de contact entre sous-systèmes. Cette standardisation doit rester centrée sur les interfaces à plus fort impact, et être construite à partir des retours d'expérience des projets pilotes, afin d'éviter des référentiels déconnectés des pratiques industrielles.

La structuration de coopérations durables entre acteurs constitue un second axe clé. Il s'agit de formaliser les relations engagées lors de la phase expérimentale sous la forme de partenariats

plus stables, intégrant des engagements réciproques en matière de volumes, de délais et de performance. Ces coopérations peuvent prendre la forme de co-développements ciblés sur des sous-ensembles critiques, dès lors que le retour sur investissement est démontré. Elles doivent s'appuyer sur une gouvernance numérique partagée, la maquette numérique jouant un rôle de support de décision collective et de maîtrise des changements.

La capitalisation industrielle inter-projets doit également être mise en place de manière systématique. Les méthodes, les séquences de production, les règles d'interface, les conventions de modélisation et les choix organisationnels validés doivent être formalisés, documentés et diffusés au sein du noyau d'acteurs. Cette capitalisation repose sur la continuité des équipes et des solutions techniques, condition indispensable à la stabilisation des performances. Dans le contexte de la Grande Région, elle suppose un effort spécifique de structuration des retours d'expérience à l'échelle transfrontalière.

Enfin, la phase 2 prépare les conditions d'une montée en puissance logistique et industrielle. Le pré-assemblage et la qualification en usine peuvent être déployés de manière plus systématique, dès lors que les interfaces prioritaires sont stabilisées, que la logistique est maîtrisée et que les volumes deviennent suffisants. Ce déploiement doit rester pragmatique, en tenant compte des opérations qui « voyagent mal » et des surcoûts potentiels liés à la rigidification des ensembles : il implique une évolution des modes constructifs, des matériaux et, le cas échéant, des rendus acceptés, afin de préserver la viabilité économique.

3. Phase 3 – Long terme (48 mois et plus) : passer à l'échelle au niveau de la Grande Région et consolider le modèle industriel

La troisième phase correspond à un horizon de maturité avancée, dans lequel l'industrialisation du logement collectif hors site R+2 à R+4 devient un mode opératoire structurant à l'échelle de la Grande Région. Elle ne peut être engagée que si les phases précédentes ont permis de démontrer de manière robuste la création de valeur industrielle, et si les mécanismes de gouvernance, de contractualisation et de capitalisation sont stabilisés.

Cette phase vise d'abord la diffusion élargie des standards, des référentiels et des pratiques industrialisées au-delà du noyau initial d'acteurs. Les invariants techniques et organisationnels validés peuvent alors être proposés à un périmètre plus large de projets, tout en conservant un socle commun garantissant la répétitivité et la fiabilité. Cette diffusion doit être accompagnée par des dispositifs de montée en compétences et d'acculturation, afin de maintenir un niveau homogène de maturité industrielle.

C'est également dans cette phase que peut être envisagée, de manière crédible, la structuration de bibliothèques de modules génériques configurables et réutilisables à grande échelle. Cette perspective suppose que la variabilité ait été suffisamment contenue en amont, que les interfaces soient stabilisées et que la capitalisation inter-projets permette d'éviter une inflation de variantes. La bibliothèque n'est pas un point de départ, mais l'aboutissement d'une discipline industrielle progressive.

Elle ouvre enfin la possibilité d'investissements industriels plus structurants, notamment en matière d'outillage, de lignes de préfabrication dédiées ou d'automatisation ciblée. Les filières industrielles matures montrent que ces investissements ne produisent des gains durables que lorsqu'ils s'appuient sur des volumes sécurisés, des standards stabilisés et une gouvernance claire. Dans le contexte de la Grande Région, cette condition implique une coordination renforcée entre maîtrises d'ouvrage publiques et parapubliques, capables de structurer une demande prévisible à moyen terme.

Sur le plan organisationnel, la phase 3 correspond à l'émergence de véritables écosystèmes industriels territorialisés, capables de fonctionner selon une logique de série courte ou moyenne, tout en conservant une capacité d'adaptation aux spécificités locales. L'industrialisation robuste repose sur la capacité à combiner la standardisation des invariants et

la flexibilité sur les paramètres non critiques, plutôt que sur une uniformisation totale des produits.

Cette maturité permet enfin d'envisager une extension raisonnée du périmètre vers des segments adjacents, dès lors que les fondamentaux industriels sont consolidés. Cette extension doit rester progressive et fondée sur l'analyse des écarts de complexité, afin d'éviter toute remise en cause des acquis.

VII. Conclusion

L'industrialisation de la construction Hors Site en Grande Région ne constitue ni une rupture technologique à opérer, ni une généralisation rapide de solutions existantes, mais une trajectoire de transformation progressive fondée sur la discipline organisationnelle, la réduction de la variabilité et la construction d'un système industriel partagé. La filière dispose d'une base industrielle crédible, de compétences techniques avérées et de références opérationnelles significatives, mais sa performance demeure structurellement contrainte par la fragmentation de la commande, la prédominance de la logique projet et l'absence de continuité inter-projets. Le principal frein à l'industrialisation ne réside donc pas dans l'outil productif, mais dans l'incapacité collective à rendre la répétitivité possible, puis économiquement soutenable.

L'analyse des filières industrielles matures montre que la création de valeur industrielle durable repose sur des mécanismes convergents : une gouvernance intégrée reliant conception, industrialisation et production, des logiques de co-développement structurées avec l'écosystème et une standardisation des interfaces et des processus permettant de contenir la variabilité sans appauvrir l'offre. Ces enseignements confirment que la digitalisation et l'automatisation n'agissent efficacement qu'en aval de choix organisationnels stabilisés. Transposée au Hors Site, cette lecture conduit à privilégier une industrialisation par le système plutôt que par l'accumulation de solutions techniques.

Dans ce cadre, le logement collectif résidentiel R+2 à R+4 apparaît comme le segment pivot de la transformation. Il constitue le seul périmètre combinant, à l'échelle de la Grande Région, une stabilité réglementaire suffisante, une homogénéité morphologique propice à la standardisation et des volumes compatibles avec une logique de série courte ou moyenne. Toute dispersion prématurée vers des segments plus complexes introduirait une variabilité incompatible avec une trajectoire industrielle crédible. La focalisation segmentaire constitue ainsi un prérequis stratégique, et non une option.

La hiérarchisation des leviers d'industrialisation met en évidence la nécessité d'activer en priorité un socle à forte transférabilité : standardisation des interfaces critiques, modularisation fonctionnelle ciblée sur les sous-ensembles à fort impact industriel, pilotage intégré de la conception à l'assemblage et partage de référentiels communs. Les leviers à très fort impact, tels que la gouvernance industrielle multi-acteurs, le co-développement structuré, la capitalisation inter-projets et le pré-assemblage généralisé, relèvent d'une séquence ultérieure, conditionnée à la stabilisation de ce socle. Les outils numériques, la formation et l'animation de filière jouent un rôle de soutien indispensable, sans pouvoir se substituer aux leviers structurants.

La trajectoire de déploiement proposée repose sur une logique de preuve avant diffusion. L'industrialisation doit progresser par projets réels, répétés, portés par un nombre restreint d'acteurs engagés dans une logique de continuité, sur des périmètres géographiques maîtrisés. La mesure systématique des gains de productivité, de fiabilité des délais, de réduction des non-qualités et de stabilité des coûts constitue une condition essentielle de crédibilité et de passage à l'échelle. En synthèse, la construction Hors Site en Grande Région peut devenir un levier majeur de compétitivité, de soutenabilité et de résilience industrielle, à condition d'assumer que l'industrialisation est d'abord un exercice de discipline collective, de priorisation et de constance dans les choix structurants.

Glossaire

- **ALLEGRO**: Interconnexion électrique haute tension courant continu (HVDC) entre l'Allemagne et la Belgique permettant l'échange transfrontalier d'électricité et l'intégration des énergies renouvelables
- **Architecture modulaire**: Conception d'un système complexe découpé en modules standardisés, interchangeables et qualifiés indépendamment

- **Assemblage off-site** : Assemblage de sous-ensembles ou modules dans un environnement industriel contrôlé, avant transport et intégration finale sur site, afin de réduire les aléas chantier et améliorer la qualité
- **BIM** (Building Information Modeling) : Méthode de modélisation numérique intégrée permettant de centraliser les données techniques d'un ouvrage sur l'ensemble de son cycle de vie
- **Bloc pré-équipé** : Sous-ensemble industriel assemblé et testé en usine intégrant plusieurs fonctions avant installation finale sur site
- **Cadence industrielle** : Rythme stabilisé de production permettant de lisser la charge industrielle et de sécuriser délais, qualité et coûts
- **Capitalisation industrielle** : Processus structuré de collecte, formalisation et réutilisation des retours d'expérience pour améliorer la performance future
- **Cellule HT/MT** : Équipement électrique assurant la distribution et la protection des réseaux Haute Tension / Moyenne Tension
- **Co-conception** : Démarche collaborative intégrant en amont concepteurs, industriels et exploitants afin d'optimiser fabricabilité, coûts et performances
- **Co-développement** : Mode de développement partagé entre donneur d'ordre et fournisseurs engageant conjointement responsabilité technique et performance
- **Design Authority** : Instance de gouvernance garantissant la cohérence technique globale d'un système multi-acteurs
- **Design-to-Manufacture** : Approche de conception intégrant dès l'origine les contraintes industrielles de fabrication, d'assemblage et de maintenance
- **Design for Manufacturing & Assembly (DfMA)** : Méthodologie de conception visant à optimiser un produit pour sa fabrication et son assemblage afin de diminuer coûts, délais, risques de non-qualité et complexité industrielle sur l'ensemble du cycle de vie
- **Donneur d'ordre** : Entreprise responsable du pilotage global d'un programme industriel et de la coordination de sa chaîne de valeur
- **DSO** (Distribution System Operator) : Gestionnaire de réseau de distribution électrique
- **EPC** (Engineering, Procurement and Construction) : Entreprise assurant l'ingénierie, l'approvisionnement et la construction d'un projet industriel clé en main.
- **Effet d'échelle** : Réduction des coûts unitaires résultant de l'augmentation des volumes standardisés
- **ENTSO-E** : Réseau européen des gestionnaires de transport d'électricité
- **FAL** (Final Assembly Line) : Ligne d'assemblage final d'un produit complexe, notamment dans l'aéronautique
- **FAT** (Factory Acceptance Test) : Essais réalisés en usine pour vérifier la conformité fonctionnelle d'un équipement avant livraison
- **FTY** (First Time Yield) : Indicateur mesurant le taux de production conforme sans retouche
- **Gammes process** : Séquences standardisées d'opérations de fabrication définissant les étapes industrielles d'un produit
- **GICAN / GIFAS** : Groupements professionnels représentant respectivement les industries navales et aéronautiques françaises
- **Grid Code** : Ensemble de règles techniques régissant le raccordement et l'exploitation des installations électriques au réseau
- **IED** (Intelligent Electronic Device) : Équipement électronique intelligent assurant protection, contrôle et communication dans les réseaux électriques
- **Interopérabilité** : Capacité de systèmes différents à échanger et exploiter des données de manière cohérente
- **Jumeau numérique** : Représentation numérique dynamique d'un actif physique permettant simulation, exploitation et maintenance prédictive
- **KPI** (Key Performance Indicator) : Indicateur clé de performance mesurant l'atteinte d'objectifs industriels
- **Lead Time** : Délai total entre la commande et la mise en service d'un produit ou équipement
- **Lean** : Méthode de management visant l'élimination des gaspillages et l'optimisation des flux
- **Maintenance prédictive** : Maintenance basée sur l'analyse de données permettant d'anticiper les défaillances
- **MRO** (Maintenance, Repair and Overhaul) : Activités de maintenance lourde, réparation et révision d'actifs industriels
- **OEM** (Original Equipment Manufacturer) : Fabricant d'équipements d'origine intégrés dans des systèmes complexes
- **OFATE** : Office franco-allemand pour la transition énergétique
- **OTD** (On-Time Delivery) : Taux de livraison dans les délais contractuels

- **PLM** (Product Lifecycle Management) : Système de gestion centralisée des données produit sur tout le cycle de vie
- **PMO** (Project Management Office) : Structure de pilotage transverse assurant gouvernance, planification et reporting des projets
- **Poste HT/MT** : Installation électrique assurant transformation, protection et distribution de l'énergie
- **RACI** : Outil de clarification des rôles et responsabilités dans un projet, définissant pour chaque tâche ou décision qui est Responsable (R : réalise l'action), Accountable (A : en porte la responsabilité finale et valide), Consulted (C : est consulté pour avis) et Informed (I : est informé des décisions ou avancées)
- **Ramp-up** : Montée progressive des volumes de production jusqu'à cadence nominale
- **Référentiel technique** : Base documentaire standardisée définissant règles, spécifications et méthodes communes
- **RTU** (Remote Terminal Unit) : Équipement assurant la collecte et la transmission de données terrain vers les systèmes de supervision
- **R+2 à R+4** : Typologie de bâtiments comprenant un rez-de-chaussée et deux à quatre niveaux supplémentaires, correspondant à des logements collectifs de faible et moyenne hauteur, présentant une forte répétitivité fonctionnelle et un potentiel élevé d'industrialisation hors site
- **SAT** (Site Acceptance Test) : Essais réalisés sur site après installation pour valider la conformité opérationnelle
- **SCADA** (Supervisory Control And Data Acquisition) : Système de supervision et de pilotage en temps réel des installations industrielles
- **Smart Grid** : Réseau électrique intelligent intégrant automatisation, numérique et flexibilité
- **Standardisation** : Définition de règles, composants et processus communs afin de réduire la variabilité
- **Supply chain industrielle** : Ensemble coordonné des acteurs, flux physiques, informationnels et décisionnels contribuant à la production d'un système industriel
- **Takt Time** : Cadence cible de production alignée sur la demande client
- **TSO** (Transmission System Operator) : Gestionnaire de réseau de transport électrique

Référence

- 3D Natives – Premier bâtiment résidentiel imprimé en 3D en Allemagne (Beckum, NRW), 2020
- 3D Printing Industry – PERI completes Germany’s first serial 3D printed housing project using COBOD technology (DREIHAUS, Heidelberg), 2023
- ADEME – Exemple de projet « XYLO 2027 – Préfabrication d’éléments d’ossatures bois en hors-site »
- AIA California Council – Integrated Project Delivery: Case Studies – 2010–2012
- Bauma (Messe München) – Additive Manufacturing in Construction – Industry Insights, 2022–2024
- Commission européenne – Advanced Manufacturing at the Heart of a Resilient, Sustainable and Competitive Europe
- Construction Management Association of America – The Impact of Rework on Construction – Compilation de références Love et al. – 2012
- Creos Luxembourg – Rapport annuel 2024
- Creos Luxembourg – Vision & Technologies Smart Grid
- COBOD International – COBOD technology enables up to 30% faster and 10% more cost-effective construction, 2022
- Dassault – Construction durable : trajectoires et investissements
- Deloitte – Modular construction and industrialised building, 2021
- DGE – Comité stratégique de la filière aéronautique – Contrat 2024–2027
- EFFRA – EU Net Zero Manufacturing Landscape
- Ellia Group – ALEGrO : la dernière jonction est réalisée
- GICAN – Cahier du Maritime dans les Territoires 2025
- GICAN – Notes de position – Enjeux capacitaires de la future LPM
- GICAN – Rapport annuel d’activités 2024–2025
- GIFA – Programme de performances industrielles
- GIFAS – Rapport sur la coopération entre la recherche académique et la filière industrielle aéronautique et spatiale
- GIFAS – Supply Chain : un écosystème intégré et cohérent
- Hors Site Campus - Rapport « L’industrialisation de la construction », 2021
- IEC – IEC 61850
- IPT Fraunhofer – Industry 4.0: Networked, Adaptive Production
- IPT Fraunhofer – Resilience in Aviation
- Jansson G., Johnsson H., Engström S. – Platforms in Industrialised House-Building – Construction Management and Economics – 2013
- Koskela L. – The Foundations of Lean Construction – 2000
- Kuzmanovska I. – DfMA in Building Design and Construction: Uses and Abuses – 2019
- Lessing J. – Industrialised House-Building: Concept and Processes – Lund University – 2006
- Love P., Irani Z., Edwards D. – A Rework Reduction Model for Construction Projects – IEEE Transactions on Engineering Management – 2004
- McKinsey & Company – Modular Construction: From Projects to Products – 2019
- Ministère de l’Économie, des Finances et de la Souveraineté industrielle et numérique – Résultats de l’enquête menée auprès d’entreprises françaises du secteur aéronautique
- Pomponi F., Moncaster A. – Embodied Carbon Mitigation and Reduction in the Built Environment – Journal of Environmental Management – 2016
- Rankohi S., Widen K., Thuesen C. – Developing a Construction-Oriented DfMA Deployment Framework – Buildings (MDPI) – 2023
- RIBA – DfMA Overlay to the RIBA Plan of Work – Construction Playbook UK – 2020
- Roland Berger – Aerospace Supply Chain: Resilience Report – 2024
- Skywin – Aerospace Cluster of Wallonia

- Space Aero – Relations industrielles collaboratives
- The European Steel Association – Position Paper on the Net-Zero Industry Act: Resilient Wind Energy Made in Europe
- VoxelMatters – First tenants move into 3D printed housing in Lünen, Germany, 2023
- World Economic Forum – Shaping the Future of Construction: A Breakthrough in Mindset and Technology – 2016

Kéa est un cabinet de conseil français et européen en stratégie et transformation.

Cabinet à rayonnement international et multi-spécialiste, il couvre l'ensemble des **enjeux de direction générale**

Nous allions des savoir-faire distinctifs de **stratégie** et de **transformation** pour apporter aux dirigeants des **modèles créateurs de valeur** et construire ensemble l'économie de demain :

- ▶ *Anticiper le futur* et poser l'intention stratégique
- ▶ *Concevoir et piloter le programme de transformation* associé pour et avec toutes les parties prenantes (collaborateurs, écosystèmes, filières...)
- ▶ *Créer les conditions structurelles et culturelles* favorables à la mise en mouvement et à la réalisation tangible de cette transformation

Nos **220 consultants en France** et **900 consultants dans le monde** œuvrent aux côtés de nos clients à « entreprendre les transformations pour une économie souhaitable » : notre mission réaffirmée lors de notre passage Entreprise à Mission.

3 rue Danton, 92240 Malakoff
T. 33 (0)1 40 84 74 00 / www.kea-partners.com

KÉA