

Université
de Toulouse

THÈSE

En vue de l'obtention du
DOCTORAT DE L'UNIVERSITÉ DE TOULOUSE

Délivré par :
Institut National Polytechnique de Toulouse (INP Toulouse)

Discipline ou spécialité :
Systèmes industriels

Présentée et soutenue par :
Marie FALCON

le : mardi 24 septembre 2013

Titre :

Proposition d'un processus et d'outils pour industrialiser
la rénovation énergétique des bâtiments

Ecole doctorale :
Systèmes (EDSYS)

Unité de recherche :
Centre de Génie Industriel - Mines Albi

Directeur(s) de Thèse :
Lionel DUPONT - Professeur - Mines Albi - Directeur de thèse
Franck FONTANILI - Maître-assistant - Mines Albi - Codirecteur de thèse

Rapporteurs :
Maria DI MASCOLO - Chargée de recherches CNRS - INPG - Rapporteur
André THOMAS - Professeur des universités - ENSTIB - Rapporteur

Membre(s) du jury :
Bernard BAUDOIN - Professeur - Mines Douai - Président du jury
Bruno LADEVIE - Maître-assistant - Mines Albi - Examineur
Lionel DUPONT - Professeur - Mines Albi - Directeur de thèse
Franck FONTANILI - Maître-assistant - Mines Albi - Codirecteur de thèse
Antoine THUILLIER - Directeur de la recherche de TBC - Président de Syrthea - Invité

Avant-propos

Cette thèse était la première sur le thème de la rénovation énergétique industrialisée à l'**École des Mines d'Albi-Carmaux (ÉMAC)**. Elle a associé le Centre de Génie Industriel (CGI) au **centre de recherche RAPSODEE (centre de Recherche d'Albi en génie des Procédés des Solides Divisés, de l'Énergie et de l'Environnement)**. Elle avait un **objectif exploratoire et visait à lancer** de nouveaux travaux de recherche, notamment des thèses, sur les sujets identifiés comme pertinents.

Cette thèse a été **effectuée au sein de l'entreprise TBC dans le cadre d'une CIFRE** (Conventions Industrielles de Formation par la REcherche). Elle était liée à deux projets de recherche.

Le projet **SIRENE (Systèmes Industriels pour la Rénovation Énergétique)** s'est déroulé d'**août 2009 à octobre 2012**. Il était coordonné par TBC et soutenu financièrement par l'**ADEME (Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Énergie)**. Son objectif était d'**évaluer la faisabilité d'un processus industriel permettant une rénovation énergétique** des logements collectifs à moindre coût, délai minimum, haute qualité et bilan environnemental optimal.

Le projet **CRIBA (Construction et Rénovation Industrialisées Bois Acier)** a débuté en janvier **2013 et se poursuivra jusqu'en décembre 2015** (ADEME, 2013). Il est coordonné par Syrthea, une filiale de TBC. Il est accompagné **par l'ADEME dans le cadre de l'appel à manifestations d'intérêt « Bâtiments et îlots à énergie positive et bilan carbone minimum »** du programme Énergies Renouvelables et Décarbonées des **Investissements d'Avenir**. Il comprend une partie **recherche et une partie démonstration**. La recherche porte sur la **conception d'un système constructif bois/acier, préfabriqué en usine, pour l'isolation thermique des façades**. Elle comprend **également le développement de méthodes et d'outils logiciels pour réaliser la maquette numérique des bâtiments, configurer les produits de rénovation et planifier le chantier**. La démonstration a pour **objectif d'expérimenter le concept à l'échelle d'un îlot de bâtiments à rénover**.

Remerciements

« Celui qui dans la vie est parti de zéro pour n'arriver à rien dans l'existence n'a de merci à dire à personne. » Pierre DAC (Dac, 1972)

Comme je ne suis pas partie de zéro et que je suis arrivée à terminer cette thèse, je voudrais remercier sincèrement les personnes suivantes.

Tout d'abord, je tiens à remercier Bruno LADEVIE qui **m'a fait découvrir** le travail de fin d'études chez TBC sur l'industrialisation de la rénovation énergétique des logements collectifs. Son engagement dans ma thèse et son soutien ont été essentiels.

Je remercie vivement mon directeur de thèse, Lionel DUPONT, pour son implication et sa compréhension.

Je remercie également mon codirecteur de thèse, Franck FONTANILI, pour sa rigueur et son enthousiasme communicatif.

Je tiens aussi à remercier Antoine THUILLIER de **m'avoir** permis de réaliser cette thèse et confié la responsabilité des projets de recherche SIRENE et CRIBA.

J'adresse ensuite mes vifs remerciements à Maria DI MASCOLO et André THOMAS **d'avoir** été rapporteurs de ma thèse et à Bernard BAUDOIN **d'avoir** été président du jury.

Je tiens à remercier tous mes collègues de TBC, notamment ceux du service recherche, **avec qui j'ai plaisir à travailler.**

Je remercie toutes les personnes à l'École des Mines d'Albi-Carmaux, des centres Génie Industriel et RAPSODEE, qui ont suivi ma thèse de près ou de loin.

Merci également à toutes les personnes que **j'ai rencontrées et qui m'ont** fait part de leur expérience.

Je remercie l'ADEME pour le financement des projets de recherche SIRENE et CRIBA qui ont permis le déroulement de cette thèse.

Enfin, je remercie chaleureusement ma famille et mes amis de **m'avoir écoutée** et soutenue tout au long de la thèse.

Un remerciement particulier à Benjamin qui a supporté mes doutes et mes découragements.

J'adresse ma profonde reconnaissance à toutes les personnes **qui ont su m'encourager** quand j'en avais besoin.

Résumé

La France s'est engagée à diviser par quatre ses émissions de gaz à effet de serre entre 1990 et 2050. Cela impose une réduction considérable de la consommation d'énergie des bâtiments. En particulier, il faut réaliser des travaux de rénovation énergétique dans 500 000 logements par an. Actuellement, les rénovations sont réalisées de manière artisanale. La plupart des travaux sont effectués manuellement sur chantier avec une qualité de la mise en œuvre souvent insuffisante. Les délais sont rarement respectés et les coûts dérivent au cours du projet. Pour résoudre ces problèmes, ce travail de recherche propose d'industrialiser la rénovation. D'un point de vue technique, l'industrialisation consiste à concevoir et mettre en œuvre des solutions constructives qui s'adaptent à chaque bâtiment et assurent la maîtrise de la qualité. D'un point de vue organisationnel, elle vise à définir un processus de rénovation complet ainsi que les acteurs, outils et méthodes associés.

Cette thèse présente à la fois le produit (système constructif) et le processus d'industrialisation. Le système constructif est basé sur des panneaux multifonctionnels de grandes dimensions qui sont préfabriqués en usine et fixés sur les façades extérieures des bâtiments. Il réduit fortement le temps de mise en œuvre sur chantier, mais il impose de connaître précisément la géométrie des façades existantes. Pour cela, une technique de relevé tridimensionnel sans contact peut être utilisée pour créer rapidement une maquette numérique des bâtiments existants. Celle-ci servira pour les études énergétiques, structurelles, et architecturales et pour la configuration. Ensuite, un configurateur est proposé pour aider l'utilisateur à choisir les options des panneaux et réaliser leur calepinage (choix de leurs dimensions et positionnement sur les façades). Il permet d'éditer la gamme de montage des panneaux et un devis précis. D'autre part, un outil d'estimation est proposé pour établir les devis et planning initiaux d'après les études préliminaires. Cet outil sera alimenté par le retour d'expérience du configurateur. Enfin, un outil d'optimisation est présenté pour planifier le chantier en fonction du plan de charge des fabricants de panneaux et des ressources nécessaires pour la mise en œuvre. La fonction objectif peut comporter plusieurs critères, dont la minimisation de la durée du chantier, des stocks et de la durée de location des engins de levage.

Sommaire

| | |
|--|------------|
| Avant-propos | 3 |
| Remerciements | 4 |
| Résumé | 5 |
| Sommaire | 6 |
| Introduction | 8 |
| Chapitre 1 : Contexte et problématique | 9 |
| I) Des engagements internationaux pour lutter contre le changement climatique | 10 |
| II) Le secteur du bâtiment, premier consommateur d'énergie en France | 15 |
| III) Rénovation énergétique globale | 17 |
| IV) Problématique | 26 |
| Chapitre 2 : Concepts et outils | 29 |
| I) Industrialisation et rénovation industrialisée | 30 |
| II) Modélisation des processus | 35 |
| Chapitre 3 : De la rénovation artisanale à la rénovation industrialisée | 41 |
| I) Moyens financiers et humains pour atteindre les objectifs | 42 |
| II) Rénovation artisanale | 47 |
| III) Rénovation industrialisée | 54 |
| Chapitre 4 : Solutions proposées pour la rénovation industrialisée | 72 |
| I) Solutions pour le système constructif et le procédé de fabrication | 73 |
| II) Solutions pour le relevé 3D et la maquette numérique | 85 |
| III) Solutions pour la configuration de la rénovation | 95 |
| IV) Solutions pour la gestion de production | 104 |
| Chapitre 5 : Proposition d'un outil d'estimation pour les études préliminaires | 106 |
| I) La rénovation industrialisée entraîne une nouvelle organisation des acteurs | 107 |
| II) Limites de la réglementation sur l'industrialisation | 108 |
| III) Contractualisation et études préliminaires | 111 |
| IV) Outil d'estimation pour établir les devis et planning initiaux d'après les études préliminaires | 114 |
| Chapitre 6 : Outil de planification du chantier sous contraintes de ressources en lien avec la gestion de production des usines | 119 |
| I) Présentation de l'outil de planification | 120 |
| II) Transition entre le configurateur et l'outil de planification | 121 |
| III) Exemple d'application | 121 |
| IV) Étude bibliographique | 123 |
| V) Modèle discrétisé en programmation linéaire mixte du problème | 126 |
| VI) Modèle temps continu en programmation linéaire mixte du problème | 129 |
| VII) Phase de prétraitement | 131 |
| VIII) Autres approches : heuristiques et métaheuristiques | 134 |
| IX) Application | 135 |

| | |
|---|------------|
| X) Conclusion | 138 |
| Conclusion générale et perspectives | 139 |
| I) Conclusion générale | 140 |
| II) Perspectives | 142 |
| III) Retombées immédiates de la thèse | 143 |
| Bibliographie | 146 |
| Table des matières | 168 |
| Liste des figures | 173 |
| Liste des tableaux | 175 |
| Liste des abréviations | 176 |
| Annexe 1 : outil d'estimation avec exemple de projet | 179 |

Introduction

La rénovation énergétique des bâtiments est un sujet **d'actualité**. Pour preuve, le Gouvernement vient de lancer un plan de rénovation de 500 000 logements par an dès 2017 (Portail du Gouvernement, 2013). **C'est en effet une solution efficace pour réduire la facture énergétique de la France, mais aussi les émissions de gaz à effet de serre qui contribuent au changement climatique.**

Vu l'ampleur du parc de bâtiments à rénover, la question qui se pose est « Comment rénover autant de logements en si peu de temps ? » C'est une question de faisabilité technique, mais surtout d'investissement et de disponibilité des ressources humaines avec les techniques artisanales.

Pour y répondre, **cette thèse explore la possibilité d'industrialiser la rénovation énergétique des bâtiments.** Elle porte à la fois sur les produits et le processus industriel. Elle a pour objectif **d'apporter des éléments de réponse aux questions suivantes.** Comment adapter des produits standardisés à des bâtiments existants qui sont tous différents ? **Comment passer d'une vision projet à une vision processus ?** Quelles sont les conditions requises pour une rénovation industrialisée, sur les plans réglementaires notamment ? Quels sont les outils nécessaires tout au long du processus de rénovation ?

Chapitre 1 : Contexte et problématique

Cette thèse s'inscrit dans le contexte général de lutte contre le changement climatique auquel contribuent les émissions de gaz à effet de serre dues aux activités humaines. Des engagements ont été pris au niveau mondial, européen et français pour les réduire. En France, où le secteur du bâtiment est le premier consommateur d'énergie et le second émetteur de gaz à effet de serre, un vaste plan de rénovation de 500 000 logements par an a été lancé (Portail du Gouvernement, 2013).

l) Des engagements internationaux pour lutter contre le changement climatique

1) **Les émissions de gaz à effet de serre dues aux activités humaines contribuent au changement climatique**

a) Définitions du changement climatique

Le Groupe d'experts Intergouvernemental sur l'Évolution du Climat (GIEC), en anglais Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC), a été établi en 1988 par l'Organisation Météorologique Mondiale (OMM) et le Programme des Nations Unies pour l'Environnement (PNUE). Il est chargé de faire le point sur l'état des connaissances scientifiques relatives au changement climatique en s'appuyant sur des sources internationales sûres. Le GIEC a publié un premier rapport d'évaluation en 1990 (IPCC, 1990), un deuxième en 1995 (IPCC, 1995), un troisième en 2001 (IPCC, 2001), un quatrième en 2007 (IPCC, 2007) et un cinquième est prévu en 2014.

Dans son dernier rapport de synthèse sur les changements climatiques, le GIEC définit le changement climatique comme « **une variation de l'état du climat que l'on peut déceler (par exemple au moyen de tests statistiques) par des modifications de la moyenne et/ou de la variabilité de ses propriétés et qui persiste pendant une longue période, généralement pendant des décennies ou plus. Il se rapporte à tout changement du climat dans le temps, qu'il soit dû à la variabilité naturelle ou à l'activité humaine.** » (GIEC, 2007, p. 40).

La Convention-Cadre des Nations Unies sur les Changements Climatiques (CCNUCC) définit les changements climatiques comme « **des changements de climat qui sont attribués directement ou indirectement à une activité humaine altérant la composition de l'atmosphère mondiale et qui viennent s'ajouter à la variabilité naturelle du climat observée au cours de périodes comparables** » (Nations Unies, 1992, p. 4).

Ces deux définitions diffèrent par la restriction ou non du changement climatique aux variations du climat attribuées à l'activité humaine. La définition même du changement climatique est controversée.

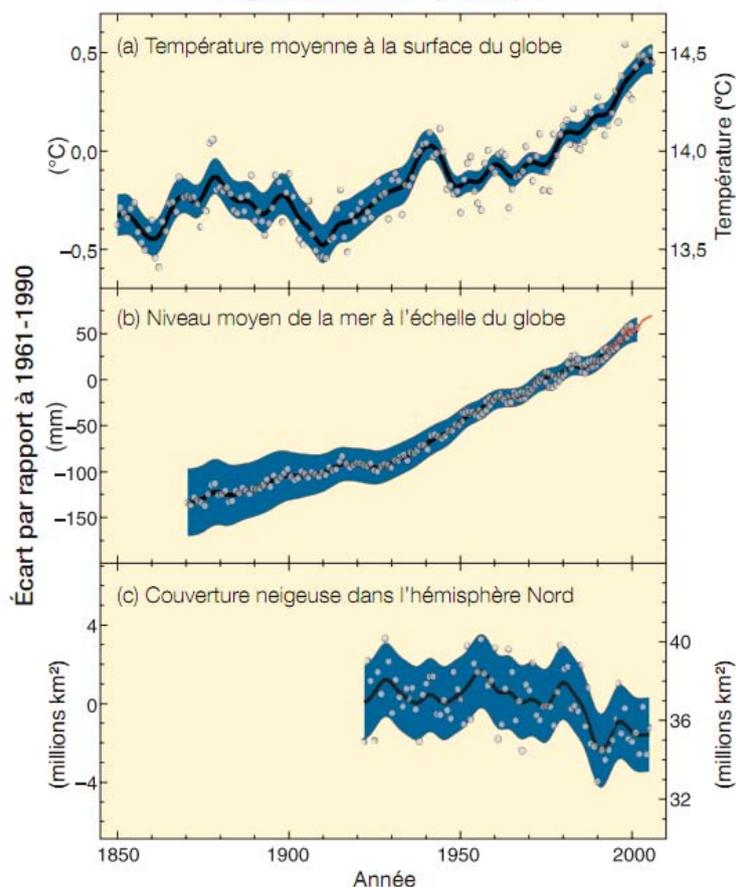
b) Mesures et impacts du changement climatique

Plusieurs critères permettent de mesurer le changement climatique.

Selon le GIEC, « le réchauffement du système climatique est sans équivoque. On note déjà, à l'échelle du globe, une **hausse des températures moyennes de l'atmosphère et de l'océan**, une **fonte massive de la neige et de la glace** et une **élévation du niveau moyen de la mer.** » (GIEC, 2007, p. 40).

La figure 1 montre les mesures retenues par le GIEC pour démontrer le réchauffement climatique (GIEC, 2007, p. 41).

Variations de la température et du niveau de la mer à l'échelle du globe et de la couverture neigeuse dans l'hémisphère Nord



Tous les écarts sont calculés par rapport aux moyennes pour la période 1961-1990.

Les courbes lissées représentent les moyennes décennales, et les cercles correspondent aux valeurs annuelles.

Les zones ombrées représentent les **intervalles d'incertitude** qui ont été estimés à **partir d'une analyse** poussée des incertitudes connues (a et b) et à partir des séries chronologiques (c).

Figure 1 : variations observées a) de la température moyenne à la surface du globe, b) du niveau moyen de la mer à l'échelle du globe et c) de la couverture neigeuse dans l'hémisphère Nord en mars-avril

Selon le GIEC, « il est probable que les changements climatiques auront un certain nombre **d'incidences irréversibles**. Si le réchauffement moyen de la planète excédait 1,5 à 2,5 °C par rapport à 1980-1999, le **risque d'extinction de 20 à 30 %** des espèces recensées à ce jour **serait probablement accru (degré de confiance moyen)**. Si la **température s'élevait de plus de 3,5 °C** environ, les modèles prévoient que 40 à 70 % des espèces recensées pourraient disparaître de la surface du globe. » (GIEC, 2007, p. 64).

c) Attribution du changement climatique à la hausse des émissions de gaz à effet de serre anthropiques

Le GIEC définit les Gaz à Effet de Serre (GES) comme des « constituants gazeux de l'atmosphère, tant naturels qu'anthropiques, qui absorbent et émettent un rayonnement à des longueurs d'onde données du spectre du rayonnement infrarouge thermique émis par la surface de la Terre, l'atmosphère et les nuages. C'est cette propriété qui est à l'origine de l'effet de serre. La vapeur d'eau (H₂O), le dioxyde de carbone (CO₂), l'oxyde nitreux (N₂O), le méthane (CH₄) et l'ozone (O₃) sont les principaux GES **présents dans l'atmosphère terrestre**. Il existe également des GES résultant uniquement des activités humaines, tels que les hydrocarbures halogénés et autres substances contenant du chlore et du brome, dont traite le Protocole de Montréal. Outre le CO₂, le N₂O et le CH₄, le Protocole de Kyoto traite, quant à lui, **d'autres GES tels que l'hexafluorure de soufre (SF₆), les hydrofluorocarbones (HFC) et les hydrocarbures perfluorés (PFC)**. » (GIEC, 2007, p. 91).

Selon le GIEC, « les émissions mondiales de GES imputables aux activités humaines ont **augmenté depuis l'époque préindustrielle** ; la hausse a été de 70 % entre 1970 et 2004 » (GIEC, 2007, p. 46).

Lors de son précédent rapport de synthèse sur les changements climatiques, le GIEC constatait : « à la lumière des nouveaux éléments dont on dispose et compte tenu des incertitudes qui persistent, on peut conclure que la majeure partie du réchauffement observé ces 50 dernières années est probablement dû à l'augmentation de la concentration des gaz à effet de serre » (GIEC, 2001, p. 58).

Cette conclusion a été précisée : « **l'essentiel de l'élévation de la température moyenne du globe observée depuis le milieu du XXe siècle est très probablement attribuable à la hausse des concentrations de GES anthropiques** » (GIEC, 2007, p. 49). Rappelons qu'anthropique signifie « dont la formation résulte essentiellement de l'intervention de l'homme » (Dictionnaire de français Larousse, [sans date]).

La figure 2 montre l'influence de plusieurs scénarios de stabilisation des émissions de gaz à effet de serre (GIEC, 2007, p. 30). Pour limiter la hausse de la température moyenne à la surface du globe à 2 °C, il faut réduire d'au moins 50 % les émissions de CO₂ en 2050 par rapport aux émissions en 2000.

| Catégorie | Concentration de CO ₂ au niveau de stabilisation (2005 = 379 ppm) ^b | Concentration d'équivalent-CO ₂ au niveau de stabilisation, y compris GES et aérosols (2005 = 375 ppm) ^b | Année du pic d'émissions de CO ₂ ^{a, c} | Variation des émissions mondiales de CO ₂ en 2050 (par rapport aux émissions en 2000) ^{b, c} | Écart entre la température moyenne du globe à l'équilibre et la température préindustrielle, selon la valeur la plus probable de la sensibilité du climat ^{d, e} | Écart entre le niveau moyen de la mer à l'équilibre et le niveau préindustriel dû à la seule dilatation thermique ^f | Nombre de scénarios évalués |
|-----------|---|--|---|--|---|--|-----------------------------|
| | ppm | ppm | année | % | °C | mètres | |
| I | 350-400 | 445-490 | 2000-2015 | - 85 à - 50 | 2,0-2,4 | 0,4-1,4 | 6 |
| II | 400-440 | 490-535 | 2000-2020 | - 60 à - 30 | 2,4-2,8 | 0,5-1,7 | 18 |
| III | 440-485 | 535-590 | 2010-2030 | - 30 à + 5 | 2,8-3,2 | 0,6-1,9 | 21 |
| IV | 485-570 | 590-710 | 2020-2060 | + 10 à + 60 | 3,2-4,0 | 0,6-2,4 | 118 |
| V | 570-660 | 710-855 | 2050-2080 | + 25 à + 85 | 4,0-4,9 | 0,8-2,9 | 9 |
| VI | 660-790 | 855-1 130 | 2060-2090 | + 90 à +140 | 4,9-6,1 | 1,0-3,7 | 5 |

Figure 2 : variation des émissions mondiales de CO₂ en 2050 (par rapport aux émissions en 2000) et élévation résultante, à l'équilibre et à long terme, de la température moyenne à la surface du globe et du niveau de la mer due à la seule dilatation thermique

Pour réduire l'impact du changement climatique, il faut donc, **au niveau mondial, diviser par deux les émissions de GES d'ici à 2050**. C'est l'objectif de plusieurs engagements internationaux. Comme les pays en voie de développement n'ont pas d'autre choix que d'augmenter leurs émissions de GES pour se développer, les pays industrialisés doivent diviser les leurs par quatre.

2) Des engagements internationaux pour réduire les émissions de gaz à effet de serre

a) Des engagements peu contraignants au niveau mondial

La prise de conscience mondiale a commencé avec la première conférence mondiale sur le climat à Genève en Suisse en 1979.

Le sommet de la Terre à Rio de Janeiro au Brésil en 1992 a donné lieu à la signature de la Convention-Cadre des Nations Unies sur les Changements Climatiques (CCNUCC). C'est un traité non contraignant, actuellement ratifié par 194 États, qui fixe l'objectif « de stabiliser [...] les concentrations de gaz à effet de serre dans l'atmosphère à un niveau qui empêche toute perturbation anthropique dangereuse du système climatique » (Nations Unies, 1992, p. 5). La CCNUCC distingue l'effort à fournir suivant les pays développés ou en développement : « sur la base de l'équité et en fonction de leurs responsabilités communes mais différenciées et de leurs capacités respectives » (Nations Unies, 1992, p. 5).

La plupart des États, à l'exception notable des États-Unis, ont ensuite adopté le protocole de Kyoto en 1997. Ce traité fixe des engagements chiffrés et légalement contraignants de réduction ou de limitation de leurs émissions de GES pour les pays dits de l'annexe B (pays industrialisés et en transition vers une économie de marché). L'objectif est de « réduire le total de leurs émissions de ces gaz d'au moins 5 % par rapport au niveau de 1990 au cours de la période d'engagement allant de 2008 à 2012 » (Nations Unies, 1998, p. 4).

L'accord de la conférence de Copenhague précise la hausse de température maximale pour limiter l'impact du changement climatique : « Nous nous accordons à penser qu'une forte diminution des émissions mondiales s'avère indispensable selon les données scientifiques et comme l'a établi le quatrième rapport d'évaluation du GIEC, en vue de réduire ces émissions pour que la hausse de la température de la planète reste inférieure à 2 °C, et entendons prendre, pour atteindre cet objectif, des mesures cadrant avec les données scientifiques et fondées sur l'équité » (CCNUCC, 2010, p. 6).

Lors de la conférence à Doha (Qatar) en 2012, un amendement a été ajouté au protocole de Kyoto pour fixer la durée de la deuxième période d'engagement et réviser à la hausse les engagements chiffrés en réduction des émissions de GES (Nations Unies, 2012). L'objectif est de « réduire leurs émissions globales de ces gaz d'au moins 18 % par rapport au niveau de 1990 au cours de la période d'engagement allant de 2013 à 2020 » (Nations Unies, 2012, p. 4). Mais cet accord est affaibli par le retrait du Canada, de la Russie et du Japon. Les signataires ne représentent plus que 15 % des émissions mondiales de gaz à effet de serre. Les deux plus gros pollueurs de la planète, États-Unis et Chine, ne sont toujours pas concernés.

La figure 3 montre la chronologie des différentes négociations et conférences au sein de la CCNUCC (Bedoy, Radanne, 2013, p. 34).

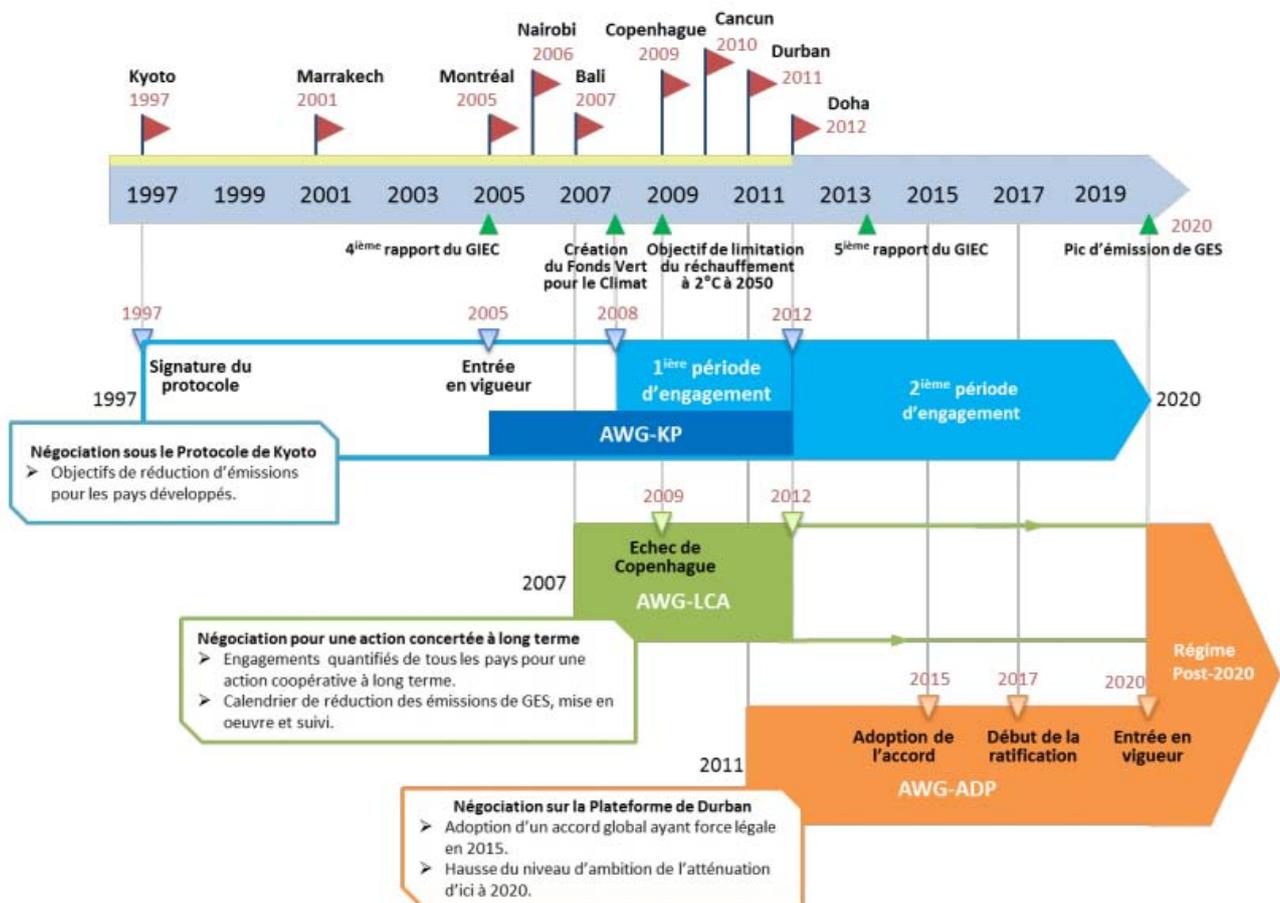


Figure 3 : frise chronologique des négociations au sein de la CCNUCC

b) Des engagements au niveau européen : les 3x20

L'Union Européenne joue un rôle moteur dans la lutte contre le changement climatique.

En 2008, l'Union Européenne a adopté le paquet « climat et énergie » (Commission européenne, 2009) qui prévoit **d'ici à 2020** :

- de réduire les émissions de gaz à effet de serre d'au moins **20 %** par rapport aux niveaux de 1990 ;
- de porter à **20 %** la part des sources renouvelables dans la consommation d'énergie ;
- d'améliorer de **20 %** l'efficacité énergétique.

Ce plan d'action, également appelé 3x20 en référence à ses trois objectifs, est composé de quatre textes législatifs adoptés en 2009 (EUR-Lex, 2009c, 2009b, 2009a, 2009d).

Il a été précisé en 2011 par la « feuille de route vers une économie compétitive à faible intensité de carbone à l'horizon 2050 » (EUR-Lex, 2011). Celle-ci fixe l'objectif de l'Union Européenne de « **réduire ses émissions de gaz à effet de serre à raison de 80 à 95 % d'ici 2050 par rapport au niveau de 1990** » et précise : « en tenant compte des efforts nécessaires que les pays en développement doivent fournir, cela permettra de réduire les émissions mondiales de 50 % **d'ici 2050** » (EUR-Lex, 2011, p. 3). **C'est donc une réduction d'un facteur 5 à 20 des émissions de gaz à effet de serre entre 1990 et 2050.**

Pour cela, la feuille de route précise diverses pistes pour les secteurs clés de l'économie, en particulier celui de la construction : « **L'analyse de la Commission montre que les émissions dans ce domaine pourraient être réduites d'environ 90 % d'ici 2050** » (EUR-Lex, 2011, p. 8).

L'objectif est donc de réduire les émissions de gaz à effet de serre d'un facteur 10 en 2050 par rapport à celles de 1990.

c) Des engagements au niveau français : le facteur 4

Suite au 3^{ème} rapport du GIEC, le rapport de Pierre RADANNE rendu à la Mission Interministérielle de l'Effet de Serre (MIES) évalue la réduction des émissions de gaz à effet de serre que la France doit appliquer. Le calcul est présenté de la façon suivante : « Une première inflexion des émissions pourrait consister à se fixer un objectif de 5 MdtC [milliards de tonnes de carbone] en 2050, ce qui correspondrait alors pour une population mondiale d'environ 10 Mds d'habitants à un quota par personne d'une demie tonne de carbone par an. [...] Puisque le niveau français d'émissions de dioxyde de carbone lié aux consommations énergétiques était de 1,8 tC/hab en 2000, atteindre ce niveau de 0,5 tC/hab constituerait précisément une division par 3,6. » (Radanne, 2004, p. 9). **En tenant compte de l'accroissement de la population française et des émissions supplémentaires générées par la croissance économique, il concluait : « C'est donc une division par 4,6 qu'il faudra alors finalement réussir »** (Radanne, 2004, p. 9).

En 2005, la France a inscrit ses engagements pour lutter contre le changement climatique dans la loi « POPE » (Légifrance, 2005) :

- **élaboration d'un plan climat** : « La lutte contre le changement climatique est une priorité de la politique énergétique qui vise à diminuer de 3 % par an en moyenne les émissions de gaz à effet de serre de la France. En conséquence, l'État élabore un « plan climat », actualisé tous les deux ans, présentant l'ensemble des actions nationales mises en œuvre pour lutter contre le changement climatique. » (Légifrance, 2005, p. 1) ;
- **objectif du facteur 4** : « En outre, cette lutte devant être conduite par l'ensemble des États, la France soutient la définition d'un objectif de division par deux des émissions mondiales de gaz à effet de serre d'ici à 2050, ce qui nécessite, compte tenu des différences de consommation entre pays, une division par quatre ou cinq de ces émissions pour les pays développés. » (Légifrance, 2005, p. 1).

En 2007, un processus de concertation politique, le « Grenelle Environnement » a associé plusieurs parties prenantes : associations écologistes, syndicats salariés et patronaux, collectivités locales, experts publics (Lascoumes, 2011).

Le Grenelle Environnement a abouti à une loi de programmation dite loi « Grenelle 1 » (Légifrance, 2009c) qui confirme l'engagement de la France d'appliquer le « facteur 4 » : « Dans cette perspective, est confirmé l'engagement pris par la France de diviser par quatre ses émissions de gaz à effet de serre entre 1990 et 2050 en réduisant de 3 % par an, en moyenne, les rejets de gaz à effet de serre dans l'atmosphère, afin de ramener à cette échéance ses émissions annuelles de gaz à effet de serre à un niveau inférieur à 140 millions de tonnes équivalent de dioxyde de carbone » (Légifrance, 2009c, p. 1).

Suite au Grenelle Environnement, le plan climat de la France a été actualisé en 2010 (MEEDDM, 2010 ; MEDDTL, 2010).

En France, deux grands secteurs sont particulièrement visés :

- les transports : très dépendants des énergies fossiles, en croissance continue que ce soit le transport des marchandises ou les déplacements périurbains ;
- le bâtiment, où l'on constate une croissance continue du parc bâti, une dégradation du parc ancien et l'apparition régulière d'appareils consommant de l'électricité : ordinateurs, sèche-linges, climatiseurs, grands écrans plats...

Le dernier rapport prospectif sur le facteur 4 en France (Brunetière et al., 2013) est paru en février 2013 en vue du colloque Facteur 4 qui s'est tenu le 21 mai 2013. Il indique : « La contribution du bâtiment s'établit au niveau du facteur 10, un peu supérieur au scénario proposé par le rapport Perthuis, où la baisse des émissions de l'ensemble résidentiel tertiaire était de 85 % » (Brunetière et al., 2013, p. 154). Le rapport cité date de 2011 (De Perthuis et al., 2011).

Les objectifs français correspondent tout à fait aux objectifs de l'Union Européenne, avec la réduction des émissions de gaz à effet de serre d'un facteur 10 dans le secteur du bâtiment.

II) Le secteur du bâtiment, premier consommateur d'énergie en France

En France, le bâtiment (résidentiel et tertiaire) est le secteur économique qui consomme le plus d'énergie, comme le montre la figure 4 (CGDD - SOeS, 2012, p. 12).

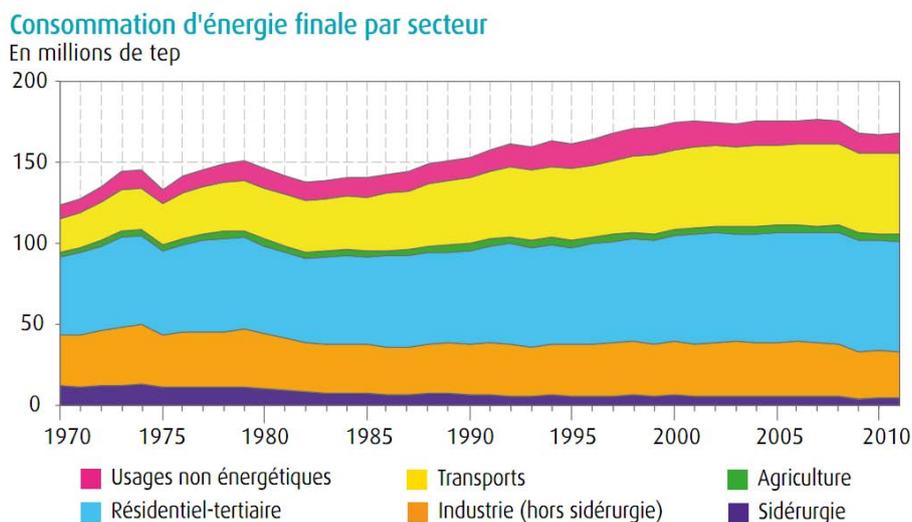


Figure 4 : consommation d'énergie finale par secteur en France de 1970 à 2011

Le secteur du bâtiment consomme 69 millions de tonnes d'équivalent pétrole par an, soit **44 % de l'énergie finale totale** et génère 74 millions de tonnes de CO₂ par an, soit **21 % des émissions nationales** (CGDD - SOeS, 2012). Notons que les émissions de gaz à effet de serre et la consommation d'énergie, bien que liées, ne varient pas proportionnellement. En effet, les émissions de gaz à effet de serre dépendent du type d'énergie utilisée.

Rappelons que l'énergie primaire est l'énergie n'ayant subi aucune conversion. La production d'énergie primaire correspond à l'extraction d'énergie puisée dans la nature et, par extension, à la production de certaines énergies « dérivées » (électricité dite « primaire » qui provient de centrales hydrauliques ou nucléaires, d'origine photovoltaïque, éolienne, géothermique). L'énergie finale est l'énergie délivrée aux consommateurs (électricité, essence, gaz, gazole, fioul domestique, etc.). La différence entre l'énergie primaire et l'énergie finale est l'énergie nécessaire pour produire, stocker et distribuer l'énergie finale à partir de l'énergie primaire.

En France (Légifrance, 2010, p. 5), « les coefficients de transformation de l'énergie finale en énergie primaire sont pris par convention égaux à :

- 2,58 pour les consommations et les productions d'électricité.
- 1 pour les autres consommations. »

Ces coefficients sont souvent critiqués pour ne pas tenir compte de toutes les pertes d'énergie. (Sidler, 2009) propose d'utiliser le coefficient de 3,23 pour l'électricité et de 1,1 pour le fioul et le gaz. Le coefficient utilisé pour l'électricité est difficile à déterminer, car il dépend du « mix » de production électrique, c'est-à-dire de la répartition de toutes les énergies (nucléaire, hydraulique, éolienne, photovoltaïque, gaz, fioul, charbon...) dans la production d'électricité. Or, dans une centrale thermique (qui produit de l'électricité à partir d'une source de chaleur), le rendement maximal de conversion de chaleur en électricité est déterminé par le cycle de Carnot.

En 2008, la France comptait 31,5 millions de logements.

Leur consommation d'énergie primaire conventionnelle est indiquée dans le tableau 1 (Marchal, Lagandré, 2008) en fonction du type de logements. Elle correspond à l'énergie primaire consommée pour le chauffage, le refroidissement, la production d'eau chaude sanitaire, la ventilation et l'éclairage du bâtiment. Elle s'exprime en kilowattheures par mètre carré et par an : kWh/(m².an).

La surface considérée était la Surface Hors d'Œuvre Nette (SHON) qui a été remplacée par la SHON_{RT} depuis la nouvelle réglementation thermique (RT 2012). Toutes deux sont basées sur la Surface Hors d'Œuvre Brute du bâtiment (SHOB) qui est égale à la somme des surfaces de plancher de chaque niveau du bâtiment. Pour obtenir, la SHON ou la SHON_{RT}, il faut déduire de la SHOB certaines surfaces, telles que les surfaces de combles et sous-sols non aménageables ou non aménagés (par exemple, les surfaces dont la hauteur sous plafond est inférieure à 1,80 m), les surfaces de balcons...

| | Nombre de logements | Consommation d'énergie primaire moyenne |
|-----------------------------|---------------------|---|
| Maisons individuelles | 16,6 millions | 298 kWh/(m ² .an) |
| Logements collectifs privés | 10,4 millions | 273 kWh/(m ² .an) |
| Logements sociaux | 4,5 millions | 199 kWh/(m ² .an) |

Tableau 1 : consommation d'énergie primaire moyenne par type de logements

Parmi les logements sociaux, 85 % sont des logements collectifs et 15 % sont des logements individuels.

Le bâtiment est l'un des secteurs économiques les plus favorables pour la réalisation du « facteur 4 ». Dans de nombreux pays, des travaux de recherche sont menés pour déterminer les mesures efficaces à prendre pour réduire la consommation d'énergie du parc de bâtiments existants. L'objectif est bien entendu beaucoup plus facile à atteindre en construction neuve

qu'en rénovation. C'est pourquoi la plupart des États instaurent des réglementations pour améliorer la performance énergétique des bâtiments neufs.

En France, concernant les bâtiments neufs, la loi « Grenelle 1 » (Légifrance, 2009c) prévoit :

- de limiter la consommation d'énergie primaire des bâtiments neufs à **50 kWh/(m².an) d'ici fin 2012** (ce qui est a été acté par la réglementation RT 2012) ;
- à l'horizon **2020**, de généraliser les **bâtiments neufs à énergie positive** (qui produisent plus d'énergie qu'ils n'en consomment).

La réglementation thermique RT 2012 est en application pour tous les bâtiments depuis le 1^{er} janvier 2013 (Légifrance, 2010, 2012). Elle définit trois critères à respecter :

- la **consommation conventionnelle d'énergie** d'un bâtiment pour le chauffage, le refroidissement, la production d'eau chaude sanitaire, l'éclairage artificiel des locaux, les auxiliaires de chauffage, de refroidissement, d'eau chaude sanitaire et de ventilation, déduction faite de l'électricité produite à demeure : définie par un coefficient noté Cep, exprimé en kWh/(m².an) d'énergie primaire ;
- le **besoin bioclimatique conventionnel en énergie** d'un bâtiment pour le chauffage, le refroidissement et l'éclairage artificiel : défini par un coefficient noté Bbio, sans dimension et exprimé en nombre de points ;
- la **température intérieure conventionnelle** d'un local, atteinte en été : définie par la valeur maximale horaire en période d'occupation de la température opérative notée Tic, en degrés Celsius.

La consommation conventionnelle maximale d'énergie primaire du bâtiment est de 50 kWh/(m².an), modulée notamment par la localisation et l'altitude du bâtiment.

Mais le taux de construction neuve (qui correspond au nombre de bâtiments neufs divisé par le nombre de bâtiments existants) est de 1,1 % par an. De plus, le taux de renouvellement des bâtiments (qui correspond au nombre de bâtiments démolis divisé par le nombre de bâtiments existants) est de seulement **0,07 % par an** (Poel et al., 2007). Cela signifie que le parc s'accroît, mais que très peu de bâtiments sont démolis pour être reconstruits.

Il est donc primordial de rénover les bâtiments existants pour réduire considérablement la consommation d'énergie du secteur du bâtiment. (Ouyang et al., 2009) présente une vue d'ensemble de la littérature scientifique sur les mesures de réduction de la consommation d'énergie pour les bâtiments résidentiels.

En France, un certain nombre de textes ou de rapport fixent des objectifs qualitatifs et quantitatifs à cette rénovation (voir partie III)3) :

- le rapport de la mission d'information sur l'effet de serre pour l'Assemblée Nationale de 2006 (MIES, 2006)
- la réglementation thermique pour les bâtiments existants de 2007 et 2008 (Légifrance, 2007, 2008)
- la loi « Grenelle 1 » sur la réduction de la consommation d'énergie du parc des bâtiments existants de 2009 (Légifrance, 2009c)

III) Rénovation énergétique globale

1) Définitions

a) Définitions de la rénovation

Le tableau 2 donne quelques définitions du terme « rénovation » qui est d'usage courant.

| Auteur | Définitions |
|---|---|
| (Dictionnaire de français Larousse, [sans date]) | <p>« Action de remettre à neuf par de profondes transformations : La rénovation d'un appartement. »</p> <p>« Transformation aboutissant à un meilleur état : La rénovation d'une doctrine. »</p> |
| (Encyclopédie Larousse en ligne, [sans date]) | <p>« Rénovation urbaine, procédure d'aménagement d'un quartier ancien impliquant l'acquisition des immeubles situés dans le périmètre visé, leur démolition puis une reconstruction planifiée de l'ensemble. »</p> |
| (Trésor de la Langue Française informatisé (TFLi), [sans date]) | <p>« A. – Reconstitution de quelque chose dans son état initial par remplacement d'éléments. Synonyme : régénération. »</p> <p>« B. – Fait de renaître, de reparaître. [...] Fait de reprendre ses forces, son énergie. [...] Remise en usage, en honneur. »</p> <p>« C. – RELIG. Action de réaffirmer. »</p> <p>« D. – Transformation, amélioration. »</p> <p>« E. – Remise en état, remise à neuf [...] Rénovation (urbaine). [S'oppose parfois à réhabilitation] « Opération d'urbanisme tendant à moderniser et à remodeler les quartiers anciens insalubres, ou ne répondant plus aux normes actuelles d'occupation des sols » (Jur. 1981). »</p> |

Tableau 2 : définitions du terme « rénovation »

Un des synonymes les plus fréquents de « rénovation » est « réhabilitation » dont le tableau 3 donne quelques définitions.

| Auteur | Définitions |
|---|---|
| (Dictionnaire de français Larousse, [sans date]) | <p>« Mesure individuelle, judiciaire ou légale, qui efface une condamnation pénale et ses conséquences (déchéance, incapacités, etc.). »</p> <p>« Fait de réhabiliter quelqu'un, quelque chose : Réhabilitation d'un homme politique. Réhabilitation d'un îlot insalubre. »</p> |
| (Trésor de la Langue Française informatisé (TFLi), [sans date]) | <p>« A. – DR. Rétablissement dans les droits et prérogatives dont on est déchu. 1. Cessation des effets d'une condamnation à la suite d'une erreur judiciaire, de la révision d'un procès. 2. DR. PÉNAL. Obtenir un jugement de réhabilitation. 3. DR. COMM. Relèvement des déchéances et incapacités frappant un failli. »</p> <p>« B. – P. ext. « 1. Fait de rétablir (quelqu'un, quelque chose) dans l'estime, dans la considération perdue, fait (pour quelqu'un, quelque chose) de retrouver cette estime, cette considération. 2. MÉD. Restauration d'un malade ou d'un handicapé à un mode de vie et d'activité le plus proche possible de la normale »</p> <p>« C. – ARCHIT. Opération d'urbanisme consistant dans le nettoyage et la remise en état d'un quartier ou d'un immeuble ancien. »</p> |

Tableau 3 : définitions du terme « réhabilitation »

b) Définitions de la rénovation énergétique globale

Une rénovation énergétique globale est **une remise en état d'un bâtiment existant aux performances thermiques dégradées au niveau d'un bâtiment récent avec des performances thermiques élevées.**

Ce **n'est pas tout à fait une remise à neuf**, car dans la plupart des cas, le budget du maître d'ouvrage est limitant. Mais les performances thermiques visées sont très élevées : au minimum le label BBC rénovation (Légifrance, 2009a), soit 80 kWh/(m².an), si possible le label BBC neuf (Légifrance, 2009a) qui est devenu la réglementation RT 2012 à 50 kWh/(m².an) (Légifrance, 2010), voire moins (ADEME, 2010).

Les travaux comprennent généralement l'isolation thermique de l'enveloppe du bâtiment (façades, toiture, plancher), le remplacement des menuiseries (fenêtres, portes), la mise en place ou le remplacement d'une ventilation mécanique contrôlée (VMC) performante, le remplacement des équipements de chauffage et production d'eau chaude sanitaire. Des équipements de production d'énergie renouvelable peuvent également être associés : panneaux solaires thermiques ou photovoltaïques, pompe à chaleur géothermique ou aérothermique...

Pour ne pas « tuer le gisement d'économies d'énergie », le guide ABC (Amélioration thermique des Bâtiments Collectifs) (Maugard, Pélegrin, 2011, p. 29) préconise de :

- « partir dans le bon sens », c'est-à-dire commencer par réduire les besoins d'énergie (grâce à l'isolation thermique), puis améliorer la performance des équipements (qui seront de plus faible puissance)
- « ne pas s'arrêter au milieu du gué », c'est-à-dire prévoir d'emblée des exigences de performance élevée, car les coûts fixes d'une rénovation peuvent être importants (le coût d'un échafaudage est le même quelle que soit l'épaisseur d'isolant posée à l'extérieur des murs). Il faut également intervenir de manière cohérente et non raisonner élément par élément. Par exemple, l'isolation des façades et le changement des menuiseries doivent être concomitants pour bien traiter le pont thermique à la jonction entre les deux éléments.

Bien souvent, les problématiques de la rénovation d'un bâtiment existant sont multiples. Elles peuvent être à la fois :

- énergétiques,
- environnementales,
- économiques,
- techniques,
- architecturales,
- urbanistiques,
- sociales,
- etc.

2) Alternatives à la rénovation énergétique

Les alternatives à la rénovation d'un bâtiment existant sont :

- effectuer la maintenance et le gros entretien (en remplaçant à l'identique ou au plus économique, par exemple le remplacement des chauffe-eau) ;
- reloger les habitants dans des bâtiments neufs construits ailleurs (selon la dernière réglementation thermique ou les labels BBC ou passif) ;
- démolir les bâtiments existants et reconstruire sur site (selon la dernière réglementation thermique ou les labels BBC ou passif).

Le tableau 4 présente les avantages et inconvénients des alternatives à la rénovation énergétique selon des critères de performance énergétique, économiques, environnementaux ou de faisabilité.

Par rapport à la maintenance et au gros entretien, la rénovation énergétique nécessite un investissement plus élevé, **mais permet d'atteindre une performance énergétique bien meilleure. Avec la hausse du coût de l'énergie et l'anticipation des futures réglementations thermiques, la rentabilité à long terme de la rénovation énergétique est sans doute meilleure. Malheureusement, les maîtres d'ouvrage privilégient encore trop souvent l'investissement le plus faible ou la rentabilité à court terme, si leurs moyens sont insuffisants.**

Par rapport à la construction neuve ou à la démolition-reconstruction, la rénovation énergétique **présente l'avantage considérable d'effectuer les travaux en site occupé, c'est-à-dire sans reloger les occupants. Cela nécessite une bonne coordination du chantier, mais est beaucoup plus facile à gérer pour le maître d'ouvrage. En effet, il n'y a pas forcément de surface disponible pour construire de nouveaux logements et les habitants sont souvent attachés à leur quartier. La démolition-reconstruction traite cet inconvénient, mais impose de trouver une solution de relogement pendant la durée des travaux de démolition et de reconstruction et d'organiser deux déménagements des habitants. Par contre, il est bien plus facile d'atteindre une performance énergétique élevée en construction neuve qu'en rénovation. Cela s'explique par le fait que l'on ne peut pas forcément traiter tous les points singuliers, par exemple, l'isolation du plancher du rez-de-chaussée.**

| | Maintenance et gros entretien | Rénovation énergétique | Construction neuve et relogement | Démolition-reconstruction |
|---|---|--|---|----------------------------------|
| Performance énergétique | très faible -- | plus ou moins élevée +- | très élevée ++ | très élevée ++ |
| Investissement | très faible ++ | plus ou moins élevé +- | élevé - | très élevé -- |
| Rentabilité | élevée à court terme, mais pas à long terme (hausse du prix de l'énergie) +- | plus ou moins élevée +- | plus ou moins élevée +- | plus ou moins élevée : +- ++ |
| Délai | très faible ++ | plus ou moins élevé +- | élevé - | très élevé -- |
| Énergie grise | faible + | plus ou moins élevée +- | élevée - | très élevée -- |
| Production de déchets | faible ++ | plus ou moins élevée +- | faible + | très élevée -- |
| Relogement des occupants | non | non, sauf quelques jours si travaux intérieurs | oui | oui |
| Déménagement des occupants dans un autre quartier | non | non | oui | non |

Tableau 4 : comparaison des alternatives à la rénovation énergétique

Dans le cadre du projet de recherche Annexe 50 de l'IEA (voir Chapitre 3-III)3a)i)), a été développé un outil d'aide à la décision pour la rénovation, nommé « Retrofit Advisor » (IEA ECBCS Annex 50, 2011f). Il permet de choisir entre réparation, rénovation et reconstruction selon plusieurs critères : économiques, environnementaux et sociaux, que l'on peut pondérer.

3) Des objectifs ambitieux de rénovation énergétique des logements existants

a) Rapport de la mission d'information sur l'effet de serre pour l'Assemblée Nationale de 2006

Un rapport pour l'Assemblée Nationale de la (MIES, 2006) prévoyait déjà la rénovation de 400 000 logements par an afin d'atteindre le « facteur 4 » compte tenu du faible taux de renouvellement des bâtiments : « **La durée de vie moyenne d'un bâtiment est supérieure à cent ans ; le renouvellement du parc, avec 300 000 logements construits, s'opère au rythme de 1 % par an. C'est dire que lorsqu'on construit ou qu'on rénove, il faut anticiper considérablement. En 2050, un tiers des logements présents aura été construit depuis l'année 2000, et deux tiers l'auront été avant l'année 2000. Si l'on s'attaquait uniquement au neuf, la réalisation de l'objectif de Kyoto pourrait être compromise par le seul secteur du bâtiment, à plus forte raison l'objectif de division par quatre des émissions de GES. La prise compte du parc existant est donc absolument incontournable. Ainsi la **rénovation de l'équivalent de 400 000 logements par an jusqu'en 2050**, constitue la seule façon d'atteindre l'objectif.** » (MIES, 2006, p. 134-135).

Ce rapport précise que « l'enjeu du "facteur quatre" dans le bâtiment est d'arriver à une **moyenne de l'ordre de 50 kWh, par m² et par an, pour le chauffage et pour l'eau chaude sanitaire en énergie primaire au plan national** (la consommation moyenne actuelle dans le parc ancien est de 328 kWh/m²/an) » (MIES, 2006, p. 135).

Ce plan de rénovation de 400 000 logements par an à 50 kWh/(m².an) en moyenne représente « une **création de 100 000 emplois par an** et un **investissement de l'ordre de 7 à 8 milliards d'euros par an, sur 45 ans** » (MIES, 2006, p. 136). Voir le chapitre 3-I) pour une démonstration plus explicite.

D'autre part, « la division par trois des consommations d'énergie du parc français de logements et de bureaux nécessite des investissements dans le parc actuel qui seraient compris entre 400 et 600 **milliards d'euros** » (MIES, 2006, p. 136).

La mission a étudié la proposition de « rendre obligatoire, lors des ventes, ou lors de gros travaux, la rénovation thermique des bâtiments datant d'avant 1975, afin de ramener leur niveau de consommation d'énergie primaire pour le chauffage à 50 kWh/m²/an » (MIES, 2006, p. 136). Elle estime que la mise en œuvre de cette proposition ne peut se faire sans préciser au préalable les financements.

À ce jour, cette proposition n'a pas été suivie d'effet et la rénovation thermique globale de tous les bâtiments existants n'est pas obligatoire.

En 2013, le Plan Bâtiment Durable, placé sous l'autorité du Ministère de l'Écologie, du Développement Durable et de l'Énergie (MEDDE), a mis en place un groupe de travail intitulé « Explorer l'obligation de rénovation énergétique dans le secteur résidentiel ». Comme son nom l'indique, ce groupe de travail va étudier la faisabilité d'une obligation de rénovation énergétique, ses modalités de mise en œuvre et ses impacts socio-économiques. Pour cela, il a lancé un appel à contributions dont une compilation est parue en mai 2013 (Groupe de travail du Plan Bâtiment Durable : « Explorer l'obligation de rénovation énergétique dans le secteur résidentiel », 2013).

b) Réglementation thermique pour les bâtiments existants de 2007

La dernière réglementation thermique pour les bâtiments existants date de 2007. Elle se décompose en deux parties :

- la réglementation thermique « élément par élément » : elle fixe les performances minimales de chaque élément rénové ou remplacé (par exemple, la résistance thermique minimale des murs extérieurs) (Légifrance, 2007) ;
- la réglementation thermique « globale » : elle fixe des performances minimales à atteindre qui sont plus élevées que dans la réglementation élément par élément. De plus, elle fixe une consommation d'énergie primaire maximale pour les cinq usages réglementaires (**chauffage, refroidissement, production d'eau chaude sanitaire, éclairage et auxiliaires de chauffage, de refroidissement, d'eau chaude sanitaire et de ventilation**). Elle s'applique seulement aux bâtiments de plus de 1000 m², achevés après 1948, lorsque le coût des travaux de rénovation « thermique » décidés par le maître d'ouvrage est supérieur à 25 % de la valeur hors foncier du bâtiment (Légifrance, 2008).

c) Loi « Grenelle 1 » de 2009

Concernant les bâtiments existants, la loi « Grenelle 1 » prévoit de réduire la consommation d'énergie du parc des bâtiments existants d'au moins 38 % d'ici à 2020. Pour cela, l'État français se fixe comme objectif la rénovation complète de 400 000 logements par an à compter de 2013 (Légifrance, 2009c). La consommation moyenne d'énergie avant et après rénovation n'est pas précisée.

Par contre, l'objectif est précisé pour le parc social : 800 000 logements sociaux, dont la consommation d'énergie primaire est supérieure à 230 kWh/(m².an), feront l'objet de travaux avant 2020, afin de ramener leur consommation annuelle en énergie primaire à des valeurs inférieures à 150 kWh/(m².an). Pour cela, il faudra rénover 70 000 logements sociaux par an à partir de 2011 (Légifrance, 2009c).

4) Pourquoi rénover les bâtiments ?

Même si nous nous concentrons sur la réduction de la consommation d'énergie et des émissions de CO₂, il ne faut pas oublier que la rénovation des bâtiments existants a également pour moteur la raréfaction des combustibles fossiles, la hausse du coût de l'énergie (qui représente une part de plus en plus importante du revenu des ménages), mais aussi d'autres raisons telles que la demande des habitants d'améliorer leur confort, la volonté du maître d'ouvrage de valoriser son patrimoine...

La problématique énergétique est une des problématiques de la rénovation des bâtiments existants. Dans certains cas, c'est la principale problématique. Dans d'autres cas, c'est une problématique secondaire, pas forcément identifiée.

La rénovation d'un bâtiment répond à 4 types de besoins fondamentaux de ses habitants :

- besoins physiologiques : confort thermique, accessibilité, espace...
- besoins de sécurité : résistance de la structure du bâtiment, sécurité incendie...
- besoins sociaux/d'estime : souvent liés à l'environnement, au quartier...
- besoins financiers : réduction des charges liées à l'énergie (pour se chauffer, s'éclairer...)

De nombreuses raisons autres qu'énergétiques conduisent à rénover/réhabiliter un bâtiment. Ces raisons diffèrent selon les acteurs : maître d'ouvrage/locataires...

- Pour économiser de l'argent : en diminuant la consommation d'énergie, les charges à payer par le locataire sont plus faibles. Le locataire économise donc de l'argent. Le bailleur peut aussi en économiser si ses locataires deviennent plus solvables, c'est-à-dire s'ils arrivent mieux à payer leur loyer, car ils paient moins de charges.
- Pour réduire la pollution : en émissions de CO₂ ou en émissions de particules fines (par exemple, les inserts bois).

- Pour améliorer le confort : thermique, acoustique (bruits internes ou externes) ou visuel.
- Pour augmenter la surface habitable : avec une extension ou surélévation du bâtiment, par ajout de balcon ou fermeture de loggia.
- Pour modifier l'arrangement des pièces : suppression de couloirs ou de cloisons (cuisine ouverte sur **le salon...**).
- Pour ajouter de nouvelles fonctionnalités de confort :
 - installation d'une ventilation mécanique contrôlée (VMC) ;
 - installation d'une régulation/programmation du chauffage ;
 - installation d'une antenne satellite, de prises multimédias ;
 - installation de prises électriques ;
 - pose de protections solaires ;
 - pose d'occultations plus performantes ;
 - motorisation des fermetures ;
 - accessibilité aux personnes à mobilité réduite ;
 - ajout d'un ascenseur, d'un escalier extérieur ;
 - ajout d'un cellier.
- Pour supprimer des fonctionnalités devenues obsolètes : équipements désuets ou non utilisés (bidets, vide-ordures, grilles d'**aération si VMC...**)
- Pour assurer la protection des personnes : sécurité incendie, sécurité de l'installation électrique, sécurité sanitaire (hygiène), **résistance de la structure du bâtiment...**
- Pour recréer du lien social : l'amélioration de l'habitat, notamment social, permet de remobiliser les habitants autour de leur logement/bâtiment/résidence et de donner une autre image de leur bâtiment/résidence/quartier.
- Pour revaloriser le patrimoine (pour le maître d'ouvrage qui souhaite revendre son bâtiment après rénovation) : la rénovation peut entraîner une augmentation de la valeur du bâtiment. Avec les nouvelles réglementations, de plus en plus exigeantes, les bâtiments anciens peu performants perdent de leur valeur ou trouvent moins facilement des acheteurs.
- Pour réduire le taux de vacance (pour le maître d'ouvrage) : lorsque l'offre de logements est suffisante, les locataires préfèrent un bâtiment récent ou adapté aux normes de confort actuelles. Les bâtiments anciens qui n'ont pas subi d'amélioration depuis leur construction sont généralement moins attractifs. Par exemple, à cause de la faible surface des pièces ou de leur agencement. Ils ont un taux de vacance plus élevé, c'est-à-dire que le maître d'ouvrage peine à trouver rapidement des locataires.

5) Les rénovations de logements sont actuellement insuffisantes

En résumé, l'État a fixé un certain nombre d'objectifs, mais peine à généraliser la rénovation énergétique, faute de moyens. Compte tenu de la très faible part de bâtiments anciens détruits, pour atteindre les objectifs de « facteur 4 », il faut rénover la plupart des bâtiments existants pour limiter leur consommation d'énergie primaire à 50 kWh/(m².an) d'ici 2050. En particulier, l'ensemble des bâtiments construits avant 1975, date de la première réglementation thermique, devra faire l'objet d'une rénovation thermique globale.

Selon le dernier état du logement, « au 1er juillet 2011, le **parc s'élève à 33,8 millions de logements en France métropolitaine et dans les départements d'outre-mer** (hors locaux d'hébergement). Avec 345 000 logements de plus, il progresse de 1,0 % en un an. » (CGDD - SOeS, 2013b)

Le tableau 5 présente la répartition en 2008 du parc français de logements selon l'ancienneté (CGDD - SOeS, 2013a).

59 % du parc, soit 18,9 millions de logements, a été **construit avant 1975**, c'est-à-dire avant la première réglementation thermique.

| Date de construction | Nombre de logements (en millions) |
|----------------------|-----------------------------------|
| Avant 1949 | 10,1 |
| 1949 - 1974 | 8,8 |
| 1975 - 1981 | 4,0 |
| 1982 - 1989 | 3,0 |
| 1990 - 1998 | 2,8 |
| Après 1998 | 3,2 |
| Total | 31,8 |

Tableau 5 : nombre de logements selon la date de construction (en 2008)

Ces logements sont majoritairement détenus par des particuliers. La distance (Berdoulay, Soubeyran, 2002) entre l'échelle du problème (le réchauffement climatique planétaire) et l'échelle de décision (chaque propriétaire de logement) ne peut être plus grande. Rénover son logement pour aider à la sauvegarde de la planète est une chose, avoir les moyens de le faire en est une autre. La fibre écologique des propriétaires ne saurait suffire à atteindre le facteur 4 en France.

L'étude Observatoire Permanent de l'amélioration ÉNergétique du logement (OPEN) classe les rénovations énergétiques de * à ***, comme indiqué dans le tableau 6 (OPEN, 2012).

| | |
|-----------------------------------|---|
| Rénovation énergétique * | La dimension de la performance énergétique est mal prise en compte. Il s'agit par exemple d'une toiture qui a été rénovée sans pose d'isolation ou bien de poses d'ouvertures de type minimum. Ces choix entraînent l'impossibilité de parvenir à une rénovation plus performante du logement avant le renouvellement des équipements qui viennent d'être mis en place. |
| Rénovation énergétique ** | Les travaux thermiques sont partiels, en complément d'interventions antérieures ou à poursuivre. Par exemple, l'isolation (des parois opaques ou des ouvertures médium ou optimum) a été réalisée mais le chauffage n'a pas été traité, ou un chauffage médium ou optimum a été posé mais l'isolation n'a pas été mise en œuvre. |
| Rénovation énergétique *** | Le chantier comprend des travaux d'isolation (par le toit OU par l'intérieur OU par la façade), la pose d'ouvertures médium ou optimum et la pose d'un chauffage performant médium ou optimum. |

Tableau 6 : classement des rénovations énergétiques selon l'OPEN

« En 2010, ce sont 135 000 logements (contre 100 000 en 2008) qui ont bénéficié d'une rénovation thermique satisfaisante » (OPEN, 2012, p. 5).

En tenant compte des travaux étalés sur plusieurs années, ce sont 300 000 logements qui ont été rénovés thermiquement de façon satisfaisante en 2010. L'OPEN note que « la motivation de faire des économies d'énergie est plus forte avec la hausse du prix des énergies et certains réflexes semblent acquis par les ménages. Le rythme annuel de rénovations thermiques *** devrait donc pouvoir se maintenir, mais il devrait progresser sensiblement

pour que le parc existant soit convenablement rénové sur le plan thermique dans 40 ans, **suivant l'objectif de réduction d'un facteur 4 des émissions de gaz à effet de serre fixé par le Parlement.** » (OPEN, 2012, p. 7).

Cette information est confirmée par le Club de l'Amélioration de l'Habitat (CAH) qui note : **« De même pour les résultats en 2020 du Grenelle de l'Environnement, qui, dans ces conditions de développement, selon les travaux du CIRED [Centre International de Recherche sur l'Environnement et le Développement], ne seraient qu'à 45 % de leur objectif »** (CAH, 2012).

Pour le parc de logements sociaux, des objectifs de rénovation ont été définis par la loi n°2003-710 du 1^{er} août 2003 qui instaure le Programme National de Rénovation Urbaine (PNRU) (Légifrance, 2003). Entre 2004 et 2013, il est prévu la démolition et la reconstruction de 250 000 logements, la résidentialisation de 400 000 logements et la réhabilitation de 400 000 logements.

Au 31 décembre 2007, près de 220 000 réhabilitations de logements étaient programmées dans le cadre du PNRU et environ 80 000 étaient engagées. Mais seulement 44 000 logements ont été réhabilités entre 2004 et 2007 dont 18 000 en 2007 (**Comité d'évaluation et de suivi de l'ANRU, 2008**).

Plusieurs facteurs peuvent expliquer ce décalage : « optimisme excessif des planificateurs initiaux, carences de la maîtrise d'ouvrage et de l'ingénierie locale, complexité des procédures administratives de l'ANRU » (**Comité d'évaluation et de suivi de l'ANRU, 2008, p. 28**).

Selon l'Observatoire National des Zones Urbaines Sensibles (ONZUS), « La réhabilitation occupe une place importante en volume au sein du PNRU avec une programmation de près de **324 000 logements**. L'USH estime ainsi que près de 50% des quartiers concernés par la rénovation urbaine devraient être réhabilités au terme du PNRU » (ONZUS, 2013, p. 67)

Mais la performance énergétique n'est pas toujours au rendez-vous. Ainsi, « sur l'échantillon des quartiers enquêtés (63 000 logements), 68% d'entre eux auront été connu une amélioration de ces performances. Cependant, **seulement 3% (soit 1 700 logements) auront obtenu le label BBC rénovation** ». (ONZUS, 2013, p. 67)

Actuellement, le nombre de rénovations annuelles est donc bien inférieur aux objectifs du Grenelle de l'environnement. De plus, pour les logements sociaux qui bénéficient du PNRU, il y a un retard important entre la programmation des réhabilitations, leur engagement et leur réalisation effective.

D'après le (Portail du Gouvernement, 2013), en **2012**, il y a eu **25 000 logements rénovés par an** dans le logement social et **125 000 logements rénovés par an** dans le logement privé.

On est loin des objectifs de la loi « Grenelle 1 » : rénovation complète de 400 000 logements par an à compter de 2013 et de 70 000 logements sociaux par an à partir de 2011. Il semble alors difficile de tenir les objectifs de réduction des émissions de gaz à effet de serre : le facteur 4.

Pour rattraper ce retard, le Gouvernement français a présenté le 21 mars 2013 un « Plan d'investissement pour le logement ». L'objectif est d'atteindre **500 000 logements rénovés par an, dont 120 000 logements sociaux, d'ici à 2017** (Portail du Gouvernement, 2013).

Les objectifs gouvernementaux sont donc ambitieux au regard de la situation actuelle, même si **la consommation maximale d'énergie après rénovation n'est pas précisée**. Ils ne sont pas cohérents par rapport aux textes réglementaires (Légifrance, 2005, 2009c) au niveau du nombre de logements à rénover ou des échéances à atteindre. Cela est principalement dû au **retard pris dans le nombre de logements rénovés qui impose d'augmenter les objectifs**. Mais le cap est donné : il faut parvenir le plus rapidement possible à un rythme de **rénovation de 500 000 logements par an avec une performance énergétique élevée**.

Ce plan s'accompagne de mesures destinées à garantir la qualité des travaux de rénovation et les économies d'énergies. Pour cela, le Gouvernement a fait le choix de conditionner les aides publiques, l'éco-Prêt à Taux Zéro (éco-PTZ) et le Crédit d'Impôt Développement Durable (CIDD), au recours à des professionnels se prévalant des signes de qualité « Reconnu Grenelle de l'Environnement » (RGE). (MEDDE, 2013)

« Cette obligation, qui entrera en vigueur à compter du 1er juillet 2014, stimulera la demande d'entreprises de qualité et incitera les professionnels à suivre une formation spécifique pour obtenir la certification et monter en compétences. 7 500 entreprises bénéficient aujourd'hui de la qualité RGE. On estime qu'il faudra développer cette filière et faire grimper ce chiffre jusqu'à **30 000** pour que les professionnels soient en mesure de réaliser 500 000 rénovations par an. Avec les organismes de formation et de certification existants, il est possible d'atteindre plus de **18 000 entreprises RGE d'ici mi-2014.** » (MEDDE, 2013, p. 1)

Un retard important a été pris dans la rénovation des bâtiments. Les objectifs de la loi Grenelle 1 sont loin d'être atteints. Si l'on veut respecter les engagements de réduction de la consommation d'énergie et d'émissions de gaz à effet de serre, il faut accélérer la cadence. C'est l'objectif du dernier plan gouvernemental qui prévoit, d'ici à 2017, de porter le nombre de logements rénovés chaque année à 500 000, dont 120 000 logements sociaux.

Dans le même temps, on peut se poser la question de la faisabilité d'un tel plan. Alors que l'on n'a pas atteint l'objectif de rénovation de 400 000 logements par an prévu dans la loi « Grenelle 1 », comment peut-on remplir des objectifs plus ambitieux ? À quelle performance, mais surtout à quel coût se fera la rénovation de tant de logements ?

IV) Problématique

1) **Comment atteindre les objectifs et résoudre les problèmes de la situation actuelle ?**

Pour respecter l'engagement de la France de diviser par 4 ses émissions de gaz à effet de serre d'ici 2050, il faut mettre en œuvre un vaste plan de rénovation des bâtiments. L'objectif à atteindre est de rénover l'ensemble du parc de logements existants, et en priorité ceux construits avant 1975 (date de la première réglementation thermique) d'ici à 2050 pour réduire leur consommation d'énergie primaire à 50 kWh/(m².an). Cela conduit à la rénovation d'environ 500 000 logements par an, ce qui génère 100 000 et 400 000 emplois et entre 12 et 37,5 milliards d'euros par an (MIES, 2006). Voir le chapitre 3-I) pour une démonstration plus explicite.

La problématique n'est sans doute pas le nombre de personnes nécessaires, mais plutôt leur formation pour réaliser des rénovations performantes. Le problème principal est surtout le montant des rénovations à assumer par les ménages pour réaliser des rénovations complètes. Il faut en outre veiller à ne pas « tuer » le gisement d'économies d'énergie, c'est-à-dire à ne pas raisonner à court terme en cherchant le retour sur investissement le plus court possible. Par exemple, les travaux d'isolation des murs extérieurs doivent être très performants du premier coup, car la part de la main-d'œuvre est de l'ordre de 80 à 90 % avec des techniques artisanales. Donc, une nouvelle intervention pour augmenter l'isolation ne sera jamais justifiée économiquement à l'avenir.

Il faut traiter chaque bâtiment dans son ensemble, et non élément par élément, voire un ensemble de bâtiments (îlot). Les économies de temps, de moyens, d'études et donc d'argent tendent à **regrouper les travaux**. Il faut par exemple profiter de l'isolation des façades pour **changer les menuiseries**. Cela permet de faciliter la mise en œuvre et de limiter les ponts thermiques aux jonctions entre l'isolant et les menuiseries.

De plus, il faut viser un haut niveau de performances du bâtiment rénové. En effet, les travaux d'amélioration thermique qui deviendront nécessaires dans quelques années seront très coûteux par rapport aux économies potentielles.

La construction et la rénovation sont actuellement réalisées de manière artisanale. La plupart des travaux sont réalisés sur place et sont encore très manuels. La qualité de la mise en œuvre est peu contrôlée et souvent insuffisante. Les délais sont rarement respectés, en partie à cause des aléas climatiques. Dans le cas de la rénovation par l'intérieur, le relogement des occupants constitue une contrainte supplémentaire.

Comment rénover autant de logements en si peu de temps ?

Comment réduire le délai des rénovations ?

Comment améliorer la qualité des rénovations ?

Comment réduire le coût des rénovations ?

Comment réduire l'impact (sur les habitants, sur l'environnement...) des rénovations ?

2) Améliorer la rénovation énergétique selon 4 critères : coût, délai, qualité et bilan environnemental

Aujourd'hui, la rénovation des bâtiments est non seulement freinée par son coût et son délai, mais aussi par le manque de compétences de la filière qui ne parvient pas à réaliser, en grand nombre, des rénovations performantes. Les objectifs gouvernementaux ne pourront donc pas être atteints avec les méthodes artisanales de rénovation des bâtiments : voir le chapitre 3-1) pour une démonstration plus explicite.

Il faut donc proposer un nouveau processus de rénovation permettant une rénovation énergétique avec un moindre coût, un délai minimum, une meilleure qualité et un bilan environnemental optimal.

Pour réduire le coût des rénovations, **il faut réduire le coût d'investissement, mais aussi le coût d'utilisation et in fine le coût de déconstruction**. Il faut donc raisonner en coût global (Gustafsson, 1998 ; Hasan, 1999 ; Verbeeck, Hens, 2005 ; Jakob, 2006).

Pour réduire le délai des rénovations, il faut surtout réduire le délai de pose des produits, **quitte à augmenter le délai d'études qui permettent d'atteindre de meilleures performances**.

Pour améliorer la performance des rénovations, il faut des produits innovants, mais aussi maîtriser la qualité de la pose.

Pour améliorer le bilan environnemental, **il faut réduire l'énergie grise des produits, c'est-à-dire la somme des énergies nécessaires pour fabriquer un produit** (Sartori, Hestnes, 2007 ; Huang et al., 2012). **Mais il faut aussi prendre en compte l'énergie nécessaire tout au long de la chaîne logistique, en particulier pour le transport** (Kara, Ibbotson, 2011 ; Mtalaa, Aggoune, 2010 ; Sawadogo, Anciaux, 2010 ; Sundarakani et al., 2010).

L'industrialisation a justement pour objectifs de réduire le coût et le délai et d'améliorer la qualité grâce à des méthodes industrielles : voir le chapitre 2-1). C'est donc une solution intéressante pour répondre à ces objectifs de rénovation énergétique.

3) Contribution scientifique et plan de la thèse

Cette thèse explore l'intérêt de l'industrialisation de la rénovation des bâtiments, notamment des immeubles de logements collectifs.

La première contribution scientifique de la thèse est la modélisation du processus de **rénovation industrialisée avec l'identification des verrous à lever**.

Un système constructif est proposé avec ses implications sur le processus de rénovation.

Les premières « briques » **d'un outil intégré pour la rénovation énergétique** sont présentées : élaboration de la maquette numérique, configuration des produits, estimation des coûts et du délai.

Enfin, un outil de planification du chantier sous contraintes de ressources en lien avec la gestion de production des usines a été développé plus particulièrement.

Le chapitre 2 présente les outils et concepts utilisés dans la suite de la thèse, notamment **des définitions de l'industrialisation et des méthodes de modélisation des processus**.

Le chapitre 3 expose la modélisation du processus de rénovation industrialisée et les verrous associés.

Le chapitre 4 détaille les solutions proposées pour le système constructif, le relevé 3D et la maquette numérique, la configuration et la gestion de production.

Le chapitre 5 présente les limites des procédures de contractualisation actuelles sur **l'industrialisation de la rénovation énergétique et un outil d'estimation** pour établir les devis et **planning initiaux d'après les études préliminaires**.

Le chapitre 6 présente un outil de planification du chantier sous contraintes de ressources en lien avec la gestion de production des usines.

Chapitre 2 : Concepts et outils

Cette thèse porte sur l'industrialisation du processus de rénovation énergétique des bâtiments. L'objet de ce chapitre est d'expliciter les différents termes et concepts utilisés. Nous allons traiter les points suivants :

- industrialisation et rénovation industrialisée
- processus et modélisation des processus

l) Industrialisation et rénovation industrialisée

1) Définitions

Le terme « industrialisation » se réfère au terme « industrie ». Nous commencerons donc par préciser ce second terme. Parmi les nombreuses définitions de l'« industrie », on peut retenir (Trésor de la Langue Française informatisé (TFLi), [sans date]) :

- dans un sens vieilli ou littéraire : une habileté à réaliser un travail, une ingéniosité, un savoir-faire. Par exemple, faire quelque chose avec beaucoup d'industrie.
- dans un sens vieilli et souvent péjoratif : une activité, un métier, généralement manuel(le) dont on tire ses moyens d'existence. Par exemple, exercer quelque industrie, une coupable industrie.
- avant la révolution industrielle : l'ensemble des activités économiques concourant à la production et à l'échange de marchandises, comprenant l'agriculture, le commerce, les transports, les services et la production artisanale et manufacturière. Par exemple, l'industrie agricole, commerciale, manufacturière.
- par métonymie : une entreprise, un établissement industriel.
- la définition courante actuellement : **l'ensemble des activités ayant pour objet l'exploitation des matières premières et des sources d'énergie, et leur transformation en produits fabriqués ainsi que chacune des branches de ce secteur économique**. Par exemple, favoriser le commerce et l'industrie, l'industrie automobile, agroalimentaire.

Dans la suite, nous retiendrons cette dernière acceptation.

On peut aussi distinguer trois définitions principales de l'adjectif « industriel » (Trésor de la Langue Française informatisé (TFLi), [sans date]) :

- relatif à l'industrie : le sens dépend alors de la définition d'« industrie » utilisée
- qui provient de l'industrie : par opposition à naturel ou artisanal
- où l'industrie s'est développée : dans le contexte d'utilisation pour un territoire

En ce qui concerne le terme « industrialisation », quelques définitions sont données dans le tableau 7.

Ces définitions distinguent deux contextes d'utilisation du terme « industrialisation » :

- pour un **secteur d'activités** (d'une activité à une branche de l'économie) : **l'industrialisation est l'application de techniques et procédés industriels à ce secteur d'activités**. Par exemple : l'industrialisation de l'agriculture. Le (Trésor de la Langue Française informatisé (TFLi), [sans date]) définit alors l'industrialisation comme un « processus complexe » avec pour finalité la « rationalisation et [la] hausse de productivité ».
- pour un **territoire** (ville, région, pays...) : **l'industrialisation est le développement de l'industrie ou l'implantation d'industries dans ce territoire**. Par exemple : l'industrialisation de la France. Le (Dictionnaire de français Larousse, [sans date]) définit également l'industrialisation comme un « processus social et économique » avec pour finalité l'« [accroissement de] la rentabilité des moyens de production et d'échange ».

Dans les deux contextes, l'industrialisation est vue comme un processus avec :

- comme entrée : un secteur d'activités ou un territoire non industrialisé
- comme sortie : un secteur d'activités ou un territoire industrialisé
- comme finalité : augmenter la productivité
- comme support : des techniques et procédés industriels

| Auteur | Définitions |
|--|--|
| (Dictionnaire de français Larousse, [sans date]) | <p>« Application des procédés de l'industrie à une activité : L'industrialisation de l'agriculture. »</p> <p>« Développement de l'industrie dans un État, une région : L'industrialisation d'une région agricole. (Processus social et économique visant à accroître la rentabilité des moyens de production et d'échange en la faisant davantage dépendre des progrès techniques et scientifiques et de la hiérarchisation de la structure sociale, l'industrialisation se marque par la concentration urbaine, la spécialisation professionnelle, la stratification sociale, l'écart accru entre les revenus.) »</p> |
| (Trésor de la Langue Française informatisé (TFLi), [sans date]) | <p>« A. – Processus complexe qui permet d'appliquer à un secteur, à une branche de l'économie, des techniques et des procédés industriels qui apportent rationalisation et hausse de productivité [...]. Industrialisation de l'agriculture. »</p> <p>« B. – Passage d'une économie à prépondérance agricole à une économie à prépondérance industrielle ; fait d'équiper d'industries une ville, une région, un pays [...]. Industrialisation capitaliste ; degré, forme, processus d'industrialisation ; industrialisation des pays sous-développés, des régions pauvres. »</p> |
| (Dictionnaire de l'Académie Française (9ème édition), [sans date]) | <p>« XIX e siècle. Dérivé d'industrialiser. Action d'industrialiser ou de s'industrialiser ; résultat de cette action. L'industrialisation de l'agriculture. L'industrialisation de la France, de l'Angleterre au XIX e siècle. Une région en voie d'industrialisation. »</p> |

Tableau 7 : définitions du terme « industrialisation »

2) Industrialisation d'un produit

Dans les entreprises, le terme « industrialisation » est employé pour signifier « industrialisation d'un produit » qui est une phase située « entre la conception et la réalisation d'un produit » (Canonne et al., [sans date]). C'est alors une phase située entre la conception et la mise production. Le but est de passer, par exemple, du prototype d'un nouveau véhicule à une production en série, de passer de quelques échantillons de produits cosmétiques à quelques milliers de flacons.

Comme le montre la figure 5 (AFIS, 2009), dans le cycle de vie traditionnel d'un projet industriel, l'industrialisation est la phase située entre la qualification de la définition du système et la qualification industrielle du système autorisant sa production de série (AFIS, 2009).

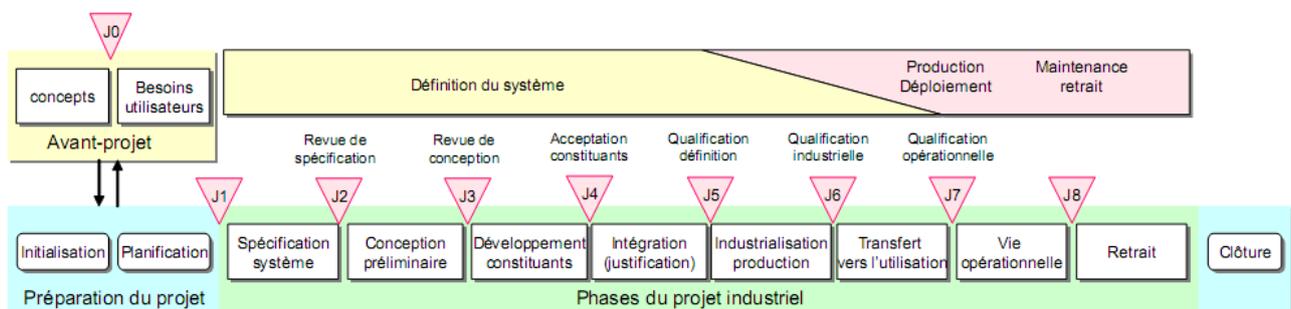


Figure 5 : cycle de vie traditionnel d'un projet industriel

Dans le cas d'un système en un seul exemplaire, les phases se succèdent. Les activités d'industrialisation et production sont réparties dans les phases de conception, développement et IVVQ (les jalons J5 et J6 sont confondus) (AFIS, 2009).

Dans le cas d'un système à exemplaires multiples, [...] une phase de préindustrialisation peut être réalisée pendant la conception préliminaire pour justifier la « fabricabilité » de la conception architecturale et contribuer à la justification des choix d'architecture. Cette éventualité sera d'autant plus affirmée que le système sera développé suivant les principes de l'ingénierie simultanée (AFIS, 2009).

L'industrialisation peut être définie comme « les moyens et méthodes nécessaires pour passer de recherches, d'études à un atelier ou une usine capable de livrer un produit répondant à un cahier des charges défini, dans le respect d'un budget, d'un délai et de l'éthique de l'entreprise » (Dal Pont, 2007). Elle est réalisée par le bureau des méthodes dans les industries manufacturières ou par le bureau d'études dans les industries de process (Dal Pont, 2007).

Les principales fonctions de l'industrialisation sont (Canonne et al., [sans date]) :

- de définir les procédés de fabrication et leur enchaînement,
- de concevoir, de faire réaliser et de gérer les outillages et installations nécessaires à la production,
- de suivre la mise en route de la fabrication,
- de comptabiliser les temps passés et de fiabiliser des temps prévisionnels.

Dans les industries de process, l'industrialisation d'un procédé est un « sous-ensemble (sous-processus) de l'industrialisation d'un produit » (Auroy, 2000). Elle démarre dès « la phase d'évaluation [du produit] où il est important d'identifier les voies d'accès au produit et leur faisabilité industrielle » (Auroy, 2000).

En résumé, l'industrialisation d'un produit peut être vue comme la restriction de l'industrialisation d'une activité à un seul produit, c'est-à-dire l'application de techniques et procédés industriels à ce produit. Dans le cycle de vie de ce produit, l'industrialisation est le passage de la conception de ce produit (avec réalisation éventuelle de quelques prototypes) à sa production « industrielle », c'est-à-dire selon des méthodes et procédés définis et contrôlés et bien souvent en grande série.

3) Industrialisation de la construction

Selon le groupe de travail 57 du CIB (International Council for Research and Innovation in Building and Construction, précédemment Conseil International du Bâtiment), l'industrialisation de la construction est une rationalisation des processus de travail dans le secteur de la construction pour atteindre l'efficacité économique, une meilleure productivité et qualité (CIB Task Group 57 « Industrialisation in Construction », 2010).

Ce rapport cite une définition d'Alistair GIBB : « *Industrialisation in construction is a change of thinking and practice to improve the production of construction to produce a high quality, customised built environment, through an integrated process, optimizing standardisation, organisation, cost and value, mechanisation and automation* » (CIB Task Group 57 « Industrialisation in Construction », 2010, p. 11). L'industrialisation dans la construction est un changement de la façon de penser et un changement de pratiques pour améliorer la production des constructions afin de créer un environnement construit personnalisé de haute qualité, à travers un processus intégré, l'optimisation de la standardisation, de l'organisation, du coût, de la valeur, de la mécanisation et de l'automatisation.

Ce rapport distingue notamment (CIB Task Group 57 « Industrialisation in Construction », 2010, p. 11-12) :

- les moteurs qui poussent à l'industrialisation :
 - besoin de sécurité,
 - besoin d'un meilleur contrôle de la qualité,
 - besoin d'une meilleure santé au travail,
 - besoin d'une meilleure protection de l'environnement,

- besoin d'une production moins onéreuse,
- manque de main-d'œuvre qualifiée ;
- **les conditions techniques nécessitées par l'industrialisation :**
 - outils mécanisés,
 - outils automatisés,
 - outils intelligents ;
- **les conséquences de l'industrialisation :**
 - production de masse personnalisée (mass customisation),
 - préfabrication,
 - standardisation,
 - modularisation.

Pour (Richard, 2005), **l'industrialisation est basée** sur la quantité. Un marché important peut **justifier l'investissement dans des stratégies et technologies capables, en retour, de simplifier la production de produits complexes.** Il identifie 5 degrés d'industrialisation : préfabrication, mécanisation, automatisation, robotisation et reproduction.

Pour (Alinaitwe et al., 2006), **les stratégies d'industrialisation de la construction peuvent être classées de deux manières différentes.**

La première distingue l'industrialisation « off-site » de l'industrialisation « on-site » :

- **l'industrialisation « off-site » (hors site) est basée sur l'hypothèse que les bâtiments peuvent aussi être fabriqués dans des usines.** Les composants de construction sont **préfabriqués, c'est-à-dire** produits en utilisant la mécanisation des usines, puis assemblés sur le chantier de construction. La préfabrication peut prendre différentes formes : composants préfabriqués, construction modulaire ou construction « manufacturée ».
- **l'industrialisation « on-site » (sur site) se réfère à l'application d'outils et de technologies avancées sur les chantiers de construction.** Le GPS (Ground Positioning System), **l'identification des éléments avec des codes-barres**, la livraison en juste à temps en sont quelques exemples.

La seconde distingue l'industrialisation du produit de l'industrialisation du processus.

- **l'industrialisation du produit se concentre sur les aspects technologiques du bâtiment.** L'industrialisation « off-site » et « on-site » sont toutes deux des exemples d'industrialisation de produits.
- **l'industrialisation du processus concerne la façon dont les acteurs coopèrent, de manière contractuelle et informelle.**

Pour (van Nederveen et al., 2009), les caractéristiques de la production industrielle sont la production de masse, la répétition et la standardisation, la fabrication hors site (dans un environnement conditionné, souvent dans une usine) et la production mécanique.

Dans le bâtiment, certaines de ces caractéristiques s'appliquent : la production de masse (construction de logements après-guerre, répétition et standardisation). Mais la production hors site et mécanique est habituellement appliquée seulement à des pièces ou éléments de bâtiment, comme les fenêtres, les portes, les éléments de murs ou les équipements de chauffage, ventilation et climatisation.

Pour (van Nederveen et al., 2009), **deux choses manquent pour l'industrialisation du bâtiment :**

- les technologies disponibles comme la conception paramétrique (*parametric design*), la maquette numérique (Building Information Modelling (BIM), voir chapitre 4-II), le calcul du coût et la production industrielle doivent être complètement intégrées.
- **un changement dans le processus de conception d'un bâtiment : passage d'une approche orientée client (*client-driven supply*) à une approche orientée fournisseur (*supply-driven demand*)**

Pour (Warszawski, 1999) , **l'industrialisation doit être située dans la théorie des trois vagues de développement établie par Toffler :**

- « Première vague : **ère agricole, il y a des milliers d'années**
- Deuxième vague : ère industrielle, il y a 300 ans
- Troisième vague : **ère de l'information** (post-industrielle), en cours »

Pour (Lessing, 2006), le concept de « **construction industrialisée de bâtiments d'habitation** » (*industrialised house-building*) est défini comme un processus de construction complètement développé avec une organisation adaptée pour le management, la préparation et le contrôle efficaces des activités, flux, ressources et résultats inclus pour lesquels des composants très développés sont utilisés afin de créer le plus de valeur pour le client. Il associe huit caractéristiques à ce concept :

- planification et contrôle des processus
- systèmes techniques développés
- fabrication hors site des composants du bâtiment
- relations à long terme entre les participants
- logistique intégrée dans le processus de construction
- point de vue orienté client
- **utilisation des technologies de l'information et de la communication**
- **mesure de performance systématique et réutilisation de l'expérience**

Selon (van Egmond, 2012), le processus d'industrialisation dans les pays de l'Europe de l'Ouest a impliqué des changements considérables des systèmes de production qui ont résulté du passage de la production manuelle à domicile à la production à grande échelle dans des usines. On attend de l'industrialisation qu'elle réduise les coûts grâce à une construction plus rapide, qu'elle augmente la qualité de la construction, qu'elle élimine la dépendance aux conditions climatiques et qu'elle améliore la coordination de la planification et de la construction.

En résumé, l'industrialisation de la construction, c'est le passage d'une organisation artisanale des acteurs (organisation spécifique pour chaque projet, travail manuel avec peu de machines utilisées, pas de répétabilité, séparation des corps de métiers...) à une organisation industrielle (processus commun à tous les projets, mécanisation et automatisation des tâches, méthodes industrielles, coordination des acteurs).

4) Définition d'une rénovation industrialisée

Des définitions précédentes, on retiendra que l'industrialisation concerne à la fois les produits, les processus et les acteurs.

Parmi les composantes de l'industrialisation de la construction, nous retenons pour la rénovation énergétique :

- la standardisation des produits ;
- la production de masse personnalisée : mass customisation ;
- la préfabrication ou industrialisation « off-site » (hors site) ;
- **l'automatisation ou la robotisation de la fabrication** ;
- la logistique intégrée dans le processus de construction ;
- la coopération entre les acteurs ;
- **l'approche processus au lieu de la vision projet** ;
- **l'utilisation des technologies de l'information et de la communication** : maquette numérique du bâtiment ;
- la reproduction à grande échelle (grand nombre de bâtiments à rénover).

Nous proposons la définition suivante :

Une rénovation énergétique industrialisée consiste à utiliser des produits de rénovation adaptés à un grand nombre de bâtiments, mais personnalisés, qui sont préfabriqués en usine de manière automatisée, et à gérer un processus de rénovation avec une logistique intégrée, des **technologies de l'information et de la communication** et une coopération entre les acteurs.

Concernant les produits, toute la difficulté de la rénovation énergétique industrialisée consiste à adapter des produits standards à des bâtiments existants tous différents. Des solutions sont proposées au chapitre 4-I) sur le système constructif et au chapitre 4-III) sur la configuration des produits.

Concernant le processus, la préfabrication nécessite une conception et une planification plus **importantes afin d'anticiper** les problèmes à traiter sur le chantier. En premier lieu, il est **impératif d'utiliser** des outils de relevé tridimensionnel. Les technologies existantes ou en cours de développement sont présentées dans le chapitre 4-II) afin de démontrer que leur utilisation est réaliste dès à présent. Ensuite, un outil de planification en lien avec la gestion de production des usines est décrit au chapitre 6.

Concernant les acteurs, la rénovation énergétique industrialisée est une rénovation globale **qui nécessite une nouvelle organisation des acteurs et un outil d'estimation proposés** au chapitre 5.

Le processus est au cœur de la rénovation industrialisée. C'est pourquoi il faut le modéliser pour identifier les verrous à lever.

II) Modélisation des processus

Dans cette partie, nous allons présenter l'approche processus, la modélisation d'entreprise et les principales méthodes de modélisation des processus.

1) **Définitions**

a) Processus

Selon (Hammer, Champy, 1993), « un processus opérationnel est une suite d'activités qui à partir d'une ou plusieurs entrées (*inputs*) produit un résultat (*output*) représentant une valeur pour un client ».

Selon (Vernadat, 1999), « un processus opérationnel est un ensemble partiellement ordonné d'activités d'entreprise dont l'exécution a pour but de contribuer à la réalisation d'un des objectifs de l'entreprise ».

Selon la norme ISO 9000 de 2005, un processus est un « ensemble d'activités corrélées ou interactives qui transforme des éléments d'entrée en éléments de sortie » (ISO, 2005).

Selon (Sienou, 2009), « le processus peut être donc défini comme étant une structure holistique d'activités organisées dans le temps et dans l'espace dans le but de réaliser une finalité donnée ».

b) Typologies de processus

Dans sa thèse, (Sienou, 2009) propose trois typologies de processus :

- Typologie selon la valeur (Porter, 1998),
- Typologie selon le mode de pilotage (Ritzman et al., 2004),
- Typologie selon la qualité (ISO, 2000).

c) Approche processus

L'approche processus est une vision de l'entreprise plus transversale. Elle est apparue dans les années 1990 suite au mouvement de reconfiguration de l'entreprise qui est « une remise **en cause fondamentale...** des processus pour obtenir des gains spectaculaires dans les **performances critiques...** » (Hammer, Champy, 1993). La reconfiguration est une méthode d'amélioration discontinue, par percée, qui se fait d'une manière incitative dans le but de faire un saut dans la performance globale (Sienou, 2009).

d) Modélisation en entreprise

Selon (Vernadat, 1999), « la modélisation en entreprise a pour objet la construction de modèles d'une partie déterminée d'une entreprise pour en expliquer la structure et le fonctionnement ou pour en analyser le comportement. » Elle est utilisée pour :

- « comprendre et analyser la structure et le fonctionnement de l'entreprise ;
- prévoir (de manière fiable) le comportement et les performances des processus opérationnels avant leur implantation ;
- choisir la (ou les) meilleure(s) alternative(s) d'implantation ;
- identifier les risques d'implantation à gérer ;
- justifier les choix d'implantation sur des critères liés aux ressources et aux coûts (méthodes de comptabilité par activités, par exemple) ;
- bâtir une vision commune du fonctionnement de l'entreprise et la communication facilement au plus grand ensemble possible du personnel. »

e) Reengineering

Le reengineering fait référence au Business Process Reengineering (BPR), en français Réingénierie des Processus d'Affaires (RPA) ou reconfiguration des processus.

Selon (Hammer, Champy, 1993), « le reengineering est une remise en cause fondamentale et une redéfinition radicale des processus opérationnels pour obtenir des gains spectaculaires dans les performances critiques que constituent aujourd'hui les coûts, la qualité, le service et la rapidité. »

Selon (Vernadat, 1999), « le reengineering est une remise en cause (pouvant être fondamentale) des processus opérationnels de l'entreprise dans le but d'apporter des gains significatifs en termes d'efficacité et de productivité. » Selon lui, les techniques de modélisation d'entreprise sont sous-jacentes aux techniques de reengineering d'entreprise.

Pour représenter les processus, on peut utiliser plusieurs types de modélisation. Pour ce travail, nous utilisons la modélisation fonctionnelle (SADT ou IDEF0) et la modélisation événementielle (BPMN).

2) **Modélisation fonctionnelle : SADT ou IDEF0**

a) Présentation de la modélisation fonctionnelle : SADT ou IDEF0

SADT (Structured Analysis and Design Technique) est une méthode d'analyse et de conception de systèmes qui a été inventée par Douglas Taylor Ross dans les années 1970 (Ross, 1977). **C'est une méthode d'analyse fonctionnelle qui décrit un système comme une décomposition d'activités ou de données.** Elle a été utilisée dans le projet APT (Automatic Programming Tool) du MIT (Massachusetts Institute of Technology). Puis elle a été développée dans le programme ICAM (Integrated Computer-Aided Manufacturing) de l'US Air Force (SofTech, Inc., 1981). Elle a alors été intégrée dans la méthode IDEF (ICAM Definition) qui permet de produire trois types de modèles :

- IDEF0 : modèle fonctionnel ;
- IDEF1 : modèle d'informations ;
- IDEF2 : modèle dynamique.

La méthode IDEF0 **a fait l'objet** en 1993 **d'une** proposition de normalisation (Federal Information Processing Standards Publication) qui a été retirée en 2002 (NIST, 1993, 2012). En effet, la méthode IDEF0 est devenue en 1998 un standard de **l'IEEE** (Institute of Electrical and Electronics Engineers) (IEEE, 1998).

Selon (Vernadat, 1999), « IDEF0 n'est autre que SADT adaptée aux besoins du programme ICAM ».

Lors d'une modélisation fonctionnelle, les méthodes SADT et IDEF0 cherchent à répondre aux questions suivantes (Vernadat, 1999) :

- « **Quelles fonctions sont mises en œuvre par le système ?**
- Quels objets sont traités par les fonctions ?
- Quels mécanismes ou ressources sont nécessaires à l'exécution des fonctions ? »

La notation graphique des méthodes SADT et IDEF0 est constituée de :

- boîtes pour représenter les activités ;
- flèches pour représenter les relations entre les activités.

Les flèches sont de quatre types (Vernadat, 1999) :

- entrées (flèches entrantes par la gauche) : objets (matières ou données) à traiter ou qui vont subir une transformation ;
- contrôles (flèches entrantes par le haut) : informations (**directives, procédures, règles...**) qui contraignent l'exécution de l'activité, mais ne sont pas modifiées par l'activité ;
- sorties (flèches sortantes par la droite) : objets (données, matières ou ressources) produits ou modifiés par l'activité ;
- mécanismes (flèches entrantes par le bas) : moyens (ressources humaines ou matérielles) nécessaires à l'exécution de l'activité.

La figure 6 représente la notation graphique des méthodes SADT ou IDEF0 avec une activité et les quatre types de flèches.

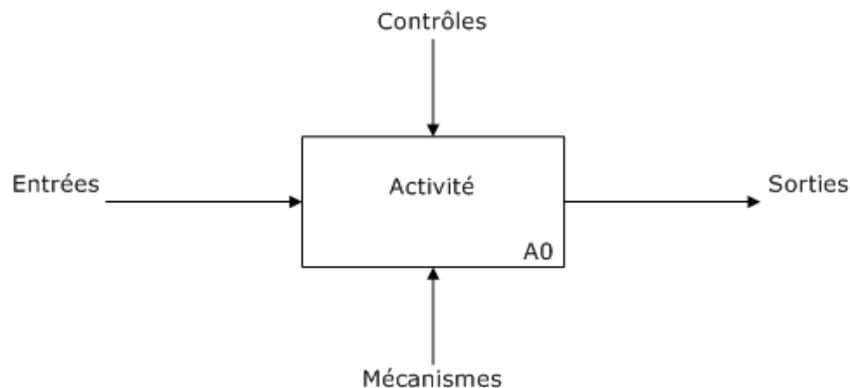


Figure 6 : notation graphique des méthodes SADT ou IDEF0

Selon (Vernadat, 1999), « l'identification des activités doit obligatoirement être un verbe, éventuellement suivi d'un complément d'objet (pour suggérer une action), alors que celle des entrées/sorties doit être un nom (représentant des entités) ».

Selon (Vernadat, 1999), « il est fondamental de bien comprendre que ces flèches ne représentent aucunement des notions de causalité, mais uniquement des relations de flux entre une activité source et une activité destinataire ».

Le diagramme de niveau supérieur est noté A-0. Il comprend une seule activité notée A0.

Le diagramme A0 décompose l'activité A0 en i activités : A1, A2, ..., Ai.

Le diagramme A1 décompose l'activité A1 en j activités : A11, A12, ..., A1j.

Le diagramme A2 décompose l'activité A2 en k activités : A21, A22, ..., A2k.

Et ainsi de suite.

La figure 7 (Waltman, Presley, 1993, p. 3) **représente la décomposition d'un diagramme A-0 en diagramme A0, qui est le parent du diagramme A2, lui-même parent du diagramme A23.**

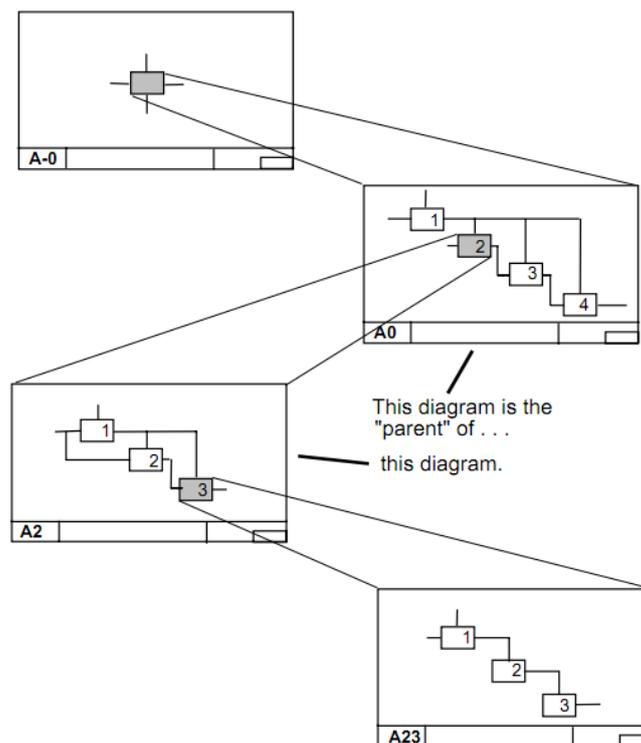


Figure 7 : décomposition des diagrammes de niveau supérieur en niveau inférieur dans les méthodes SADT ou IDEF0

b) État de l'art

Dans le secteur de la construction, la modélisation des processus peut être utilisée, soit pour modéliser le processus de construction neuve ou de rénovation, soit pour modéliser le processus de conception.

i) **Modélisation des processus de construction neuve des bâtiments**

(Austin et al., 1999) présente un processus de conception des bâtiments réalisé avec la méthode de modélisation IDEF0.

L'article commence par une revue de littérature sur les modèles de processus de conception et les techniques de modélisation. La méthodologie IDEF0 a été choisie comme la notation la plus appropriée. Elle est présentée plus en détail. (Court et al., 1996) est cité pour sa comparaison des techniques de modélisation, notamment IDEF.

L'objectif du modèle ADePT est de représenter les « *information requirements* » (c'est-à-dire les contraintes) et non d'indiquer comment chaque tâche de conception doit être entreprise.

La technique IDEF0 a été modifiée pour distinguer les informations d'entrée provenant des activités de la même discipline, d'autres disciplines et de sources externes comme le client, une autorité de régulation ou une étape précédente du processus de conception.

Le modèle du processus de conception, ou « Design Process Model » (DPM), représente le processus de conception détaillée du bâtiment. Ce processus est subdivisé en 5 sous-processus : conception architecturale, du génie civil, structurelle, mécanique et électrique.

Le DPM consiste en 150 diagrammes, 600 tâches de conception et 4600 « *information requirements* ». À titre d'exemple, les diagrammes A3, A34 et A342 sont présentés.

La localisation des « *information requirements* » est représentée dans des matrices : « *design deliverables matrix* ».

Le DPM générique a été testé et validé en réalisant 4 modèles spécifiques des projets tests. Ces tests ont prouvé que le modèle prend en compte plus de 90 % des activités de conception des projets tests.

(Park et al., 2010) présente un processus de conception du *Modular Parking Garage System* de la société néerlandaise Ballast Nedam : c'est un système de parking modulaire temporaire ou permanent qui utilise des éléments standards assemblables et démontables facilement. Dans cet article, la méthode de modélisation IDEF0 est utilisée pour le Business Process Reengineering : l'objectif est de redéfinir un Système de Réalisation des Projets (PDS) selon l'approche *bottom-up* en intégrant l'ingénierie système dans le BIM (Building Information Modelling). Les diagrammes AS-IS et TO-BE sont comparés.

Cet article est intéressant, car il concerne l'industrialisation du secteur du bâtiment et de la construction.

Il commence par commenter l'avancée de l'utilisation des ICT (Information and Communication Technologies) et du BIM (Building Information Modelling) dans le secteur du bâtiment et de la construction. Il présente les résultats d'une étude SmartMarket Report sur l'augmentation de la productivité grâce au BIM.

Puis il utilise la théorie des vagues de développement établie par Toffler pour expliquer pourquoi le secteur du bâtiment et de la construction ne s'est pas industrialisé.

Ensuite, il présente deux exemples d'industrialisation dans le secteur du bâtiment et de la construction : BoKlok (IKEA et Skanska) et Corus Living Solutions.

Les limites de l'approche orientée client permettent d'introduire l'approche *bottom-up*, tirée d'un article de (van Nederveen, Gielingh, 2009). L'ingénierie système est présentée : le problème posé est la fragmentation des « *enabling technologies or methodologies* ». Il faut donc développer et introduire un nouveau modèle basé sur le concept de demande orientée fournisseur « *supplier-driven demand* ».

L'idée de départ du travail de recherche est de proposer un intégrateur entre l'ingénierie système et le BIM. Pour cela, la méthode du **Business Process Reengineering** (BPR) et la méthode de modélisation IDEF0 sont utilisées.

La modélisation des processus AS-IS et TO-BE est présentée.

Les perspectives de recherche concernent :

- une modélisation IDEF0 plus détaillée ;
- une modélisation de tout le cycle de vie ;
- une modélisation orientée produit ;
- l'intégration d'autres approches et méthodologies pour l'industrialisation de la construction : *parametric design, configuration management, functional design...*

ii) Modélisation des processus de rénovation des bâtiments

(Akasah, Alias, 2009) présente un processus de maintenance des bâtiments historiques réalisé avec la méthode de modélisation IDEF0.

Il cite comme outils de modélisation de processus :

- les diagrammes de flux (*flow charts*) ;
- les réseaux de Petri ;
- Unified Modelling Language ;
- Integration Definition for Function Modelling (IDEF0).

Il présente la modélisation de processus réalisée par Zainal Abidin AKASAH dans sa thèse non publiée.

Il cite un article général sur les méthodes de modélisation : (Cooper et al., 1998).

Sur la méthode de modélisation IDEF0, il cite un document intéressant : (Waltman, Presley, 1993). Ce document est disponible en ligne sur un site internet qui présente une bibliographie importante sur les méthodes de modélisation (Whitman, [sans date]).

3) Modélisation événementielle : BPMN

BPMN est l'acronyme de Business Process Model and Notation. C'est une notation graphique développée par la Business Process Management Initiative (BPMI) qui est maintenant maintenue par l'Object Management Group (OMG). La dernière version, BPMN 2.0, date de 2011.

L'objectif principal de BPMN est de fournir une notation qui soit aisément compréhensible par tous les utilisateurs de l'entreprise, des analystes métier qui créent les ébauches initiales

des processus aux développeurs techniques responsables de l'implémentation de la technologie qui va exécuter les processus, et finalement aux utilisateurs qui vont gérer et monitorer ces processus (White, 2004).

BPMN définit un Business Process Diagram (BPD), en français diagramme de processus d'affaires, qui est basé sur une technique de diagrammes de flux pour créer des modèles graphiques des opérations métier. Un Business Process Model, en français modélisation des processus métier, est un réseau d'objets graphiques qui sont des activités (c'est-à-dire du travail) et les contrôles de flux qui définissent leur ordre de performance (White, 2004).

Un BPD est constitué d'un ensemble d'éléments graphiques de quatre catégories (White, 2004) :

- les objets de flux : événements, activités, branchements ;
- les objets de connexion : flux séquentiels, flux de message, associations ;
- les couloirs d'activités (*swimlanes*) : bassins, couloirs ;
- les artefacts : objets de données, groupes, annotations.

Un événement est quelque chose qui a lieu pendant l'exécution d'un processus. Il est représenté par un cercle. Les événements affectent le flux du processus et ont une cause ou un impact. Les trois types d'événements sont représentés en figure 8 (White, 2004) :

- les événements de début : repérés par un cercle ;
- les événements intermédiaires : repérés par deux cercles concentriques ;
- les événements de fin : repérés par un cercle gras.

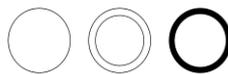


Figure 8 : représentation d'un événement de début (à gauche), d'un événement intermédiaire (au milieu) et d'un événement de fin (à droite) dans la notation BPMN

Une activité est une unité du travail qui doit être accompli. Elle est représentée par un rectangle arrondi, comme représenté en figure 9 (White, 2004). Il y a deux types d'activités :

- les tâches ;
- les sous-processus : repérés par un symbole +.



Figure 9 : représentation d'une activité dans la notation BPMN

Un branchement est utilisé pour contrôler la divergence et la convergence des séquences de flux. Il est représenté par un losange, comme représenté en figure 10 (White, 2004).



Figure 10 : représentation d'un branchement dans la notation BPMN

Le formalisme de BPMN 2.0 est présenté sous forme de poster par (Berliner BPM-offensive, [sans date]).

En résumé, les méthodes de modélisation permettent de modéliser le processus de rénovation en montrant les relations fonctionnelles et événementielles entre les activités, ainsi que les acteurs qui interviennent.

Chapitre 3 : De la rénovation artisanale à la rénovation industrialisée

Nous avons vu précédemment que le nombre de logements rénovés en France ces dernières années était loin des objectifs fixés. Ceci tient à la fois à une sous-estimation des coûts et des moyens humains nécessaires. Ce point sera traité en partie I).

Avant d'améliorer un système, le premier point est d'en étudier le fonctionnement actuel et d'en identifier les dysfonctionnements. Dans la partie II), nous étudions le processus de rénovation actuel (AS-IS) et identifions les principaux problèmes de la rénovation artisanale.

La partie III) propose une modélisation de ce que pourrait être un processus générique de rénovation industrialisée (TO-BE). Cette modélisation va nous permettre d'identifier les verrous techniques et organisationnels à résoudre pour rendre ce processus opérationnel.

I) Moyens financiers et humains pour atteindre les objectifs

La France s'est fixé des objectifs ambitieux. Les premières questions que l'on peut légitimement se poser sont celles des coûts et des moyens, notamment humains, nécessaires.

1) **Calcul du coût de la rénovation des logements**

Pour calculer le coût de la rénovation des logements, il faut connaître :

- le nombre de logements à rénover
- le coût moyen de la rénovation d'un logement

Pour le nombre de logements à rénover, on étudie trois scénarios :

- Grenelle de l'environnement : rénovation de 400 000 logements par an à compter de 2013, soit 3 960 000 logements rénovés d'ici 2020 ;
- rénovation d'ici 2050 des logements construits avant 1975 : environ 20 millions de logements, soit 500 000 logements rénovés par an ;
- rénovation d'ici 2050 des logements construits avant 2004 : environ 30 millions de logements, soit 750 000 logements rénovés par an.

Nous avons retenu deux hypothèses de coût : **30 000 €/logement ou 50 000 €/logement**. Le coût de rénovation dépend de nombreux facteurs : du type de logement (maison individuelle **ou logement collectif**), de l'année de construction, de la performance énergétique après rénovation, de contraintes techniques...

Selon l'Agence Nationale de l'Habitat (ANAH, [sans date]), le montant des travaux énergétiques et connexes est :

- compris entre 15 000 et 23 000 € HT pour atteindre une performance énergétique de 160 kWh/(m².an) ;
- **d'au moins 27 000 € pouvant aller jusqu'à 50 000 €** pour atteindre une performance énergétique de 90 kWh/(m².an).

Rappelons que les objectifs de facteur 4 se basent sur une consommation énergétique après rénovation de 50 kWh/(m².an) (MIES, 2006).

Le coût de la rénovation des logements correspond au nombre de logements à rénover **multiplié par le coût moyen de la rénovation d'un logement**. Ce calcul est effectué à coûts constants, il ne tient pas compte de l'inflation.

Par exemple, le coût de la rénovation d'ici 2050 des logements construits avant 1975, avec un coût moyen de rénovation de **30 000 € par logement, est égal à** :
 $20\,000\,000 \times 30\,000 = 600$ milliards d'euros.

Les résultats sont synthétisés dans le tableau 8.

| Hypothèses | |
|---|-------------------|
| Coût moyen de la rénovation d'un logement | |
| 30 000 €/logement | 50 000 €/logement |

| | Nombre de logements à rénover | Coût de la rénovation des logements | |
|--|--------------------------------------|--|-------------|
| Grenelle Environnement | 3 960 000 logements | 118,8 Md€ | 198 Md€ |
| | 400 000 logements/an | 12 Md€/an | 20 Md€/an |
| Logements construits avant 1975 | 20 000 000 logements | 600 Md€ | 1 000 Md€ |
| | 500 000 logements/an | 15 Md€/an | 25 Md€/an |
| Logements construits avant 2004 | 30 000 000 logements | 900 Md€ | 1 500 Md€ |
| | 750 000 logements/an | 22,5 Md€/an | 37,5 Md€/an |

Tableau 8 : coût de la rénovation des logements selon plusieurs scénarios

Analyse des résultats :

Suivant les scénarios envisagés et l'hypothèse sur le montant des travaux pour une **rénovation complète, l'investissement à réaliser pour** la rénovation des logements est compris entre 12 et 37,5 milliards d'euros par an.

Ces montants sont à comparer avec le chiffre d'affaires du secteur. La Fédération Française du Bâtiment (FFB) estime l'activité d'entretien-amélioration des logements à 42 milliards d'euros (FFB, 2013).

En considérant que ces travaux de rénovation viennent en complément de l'activité déjà existante et non en substitution, cela représente une augmentation du chiffre d'affaires de ce secteur d'environ 30 à 90 % !

Mais le problème qui se pose est la capacité des ménages français à investir ces montants élevés pour rénover leur logement de manière performante. Malgré les aides de l'État et même **parfois à cause d'elles**, on constate que ce ne sont pas les travaux les plus efficaces qui sont privilégiés, mais ceux qui bénéficient de plus de subventions, font l'objet de démarches commerciales importantes et sont faciles à réaliser.

Par exemple, le crédit d'impôt développement durable est une aide fiscale qui permet aux ménages de financer des dépenses d'équipement pour l'amélioration de l'efficacité énergétique de leur résidence principale (matériaux isolants, chaudières, fenêtres, équipements de production d'énergie renouvelable...). **Il est basé sur le coût des équipements et matériaux et ne couvre pas le coût de la main-d'œuvre (sauf pour l'isolation thermique des parois)**. Entre 2005 et 2008, le crédit d'impôt développement durable a bénéficié à 4,2 millions de ménages pour un montant de travaux déclarés de 23,6 milliards d'euros (dont 7,8 milliards de crédit d'impôt), soit un montant moyen de travaux de **5 660 € par logement** (Clerc et al., 2010). Ce montant correspond au remplacement d'un élément comme les fenêtres ou d'un équipement comme le système de chauffage, mais pas à une rénovation globale. Dans la plupart des cas, ces travaux ont été privilégiés, car le coût du matériel est élevé par rapport au coût de la main-d'œuvre.

De même, les éco-prêts à taux zéro sont des prêts d'une durée de 10 ans (pouvant être étendue à 15 ans par la banque) qui permettent de financer jusqu'à **30 000 € de travaux** d'amélioration de l'efficacité énergétique. Ils sont destinés à financer des rénovations globales ou des bouquets de travaux avec au moins 2 actions (isolation des toitures, des murs, des

parois vitrées et portes extérieures, installation d'équipements de chauffage ou de production d'eau chaude sanitaire...). **Ils couvrent la main-d'œuvre**, certains travaux annexes et la maîtrise d'œuvre.

Le bilan des Éco-Prêts à Taux Zéro (éco-PTZ), réalisé par la Société de Gestion du Fonds de Garantie de l'Accession Sociale à la propriété (SGFGAS), montre que les prêts émis en 2012 (SGFGAS, [sans date]) concernent à :

- 53,1 % des bouquets de travaux avec 2 actions (contre 70,8 % en 2009) ;
- 36,2 % des bouquets de travaux avec 3 actions ou plus (contre 26,2 % en 2009) ;
- 0,9 % des travaux de performance globale (contre 0,7 % en 2009) ;
- 9,8 % **des travaux d'assainissement (contre 2,3 % en 2009)**.

Pour les bouquets de travaux avec 2 actions, les combinaisons les plus fréquentes sont : « Isolation des toitures & Isolation des parois vitrées/portes » (26,4 %) et « Isolation des parois vitrées/portes & Chauffage/eau chaude » (16,4 %). Le montant moyen des travaux est respectivement de 13 861 € et 15 689 €. Même avec des produits performants, ces bouquets de travaux ne permettent qu'une rénovation partielle du logement et l'isolation des murs est bien souvent négligée au profit du remplacement des d'équipements de chauffage. Ce dernier cas est regrettable, car il faut d'abord réduire le besoin d'énergie (en isolant le bâtiment) avant de remplacer les équipements de chauffage (qui seraient sinon surdimensionnés).

Pour les bouquets de travaux avec 3 actions ou plus, la combinaison la plus fréquente est « Isolation des toitures & Isolation des murs & Isolation des parois vitrées/portes » (32,7 %), avec un montant moyen des travaux de 26 006 €. **D'autre part, la combinaison « Isolation des toitures & Isolation des murs & Isolation des parois vitrées/portes & Chauffage/eau chaude » qui se rapproche d'une rénovation énergétique globale a un montant moyen de 33 800 €. Elle représente 10,2 % des bouquets de travaux avec 3 actions ou plus, soit 3,7 % des éco-PTZ.**

En conclusion, les rénovations énergétiques globales représentent une faible part des travaux réalisés dans le cadre des éco-PTZ. Cependant, les bouquets de travaux avec 3 actions ou plus sont de plus en plus fréquents. De plus, on note une légère progression des travaux de performance globale pour lesquels est fixée une performance énergétique minimale à respecter (80 kWh/(m².an) si le logement consomme avant les travaux moins de 180 kWh/(m².an), 150 kWh/(m².an) sinon).

Le rapport d'évaluation du Grenelle de l'Environnement paru en octobre 2010 concluait que « dans le résidentiel privé et social, 250 000 logements ont été rénovés entre l'été 2009 et l'été 2010 grâce aux mesures incitatives du Grenelle » (Grimfeld et al., 2010, p. 14). **Mais l'on voit bien que les crédits d'impôt « développement durable » et les éco-PTZ servent à financer des travaux d'amélioration de la performance énergétique qui sont loin d'être suffisants pour des rénovations énergétiques globales.**

2) Calcul de la charge de travail générée par la rénovation des logements

Pour calculer la charge de travail générée par la rénovation des logements, il faut connaître :

- le nombre de logements à rénover ;
- la durée moyenne de la rénovation d'un logement à une personne ;
- le nombre de jours travaillés par an.

Pour le nombre de logements à rénover, on étudie les trois scénarios précédents.

Pour la durée moyenne de la rénovation d'un logement à une personne, on étudie deux hypothèses :

- **la rénovation d'une maison individuelle de 100 m²** de surface habitable avec 100 m² de toiture et de plancher, 100 m² de murs et 10 menuiseries ;
- **la rénovation d'un immeuble de 15 logements collectifs** (de 75 m² de surface habitable chacun) avec 625 m² de toiture et de plancher, 1 000 m² de murs et 5 menuiseries par logement.

On évalue les charges de travail unitaires pour :

- l'isolation des murs extérieurs : 10 m² par jour à deux personnes
- l'isolation de la toiture : 150 m² par jour à deux personnes
- l'isolation du plancher : 20 m² par jour à deux personnes
- le remplacement des menuiseries : 10 par jour à deux personnes
- l'installation d'une VMC double flux : 5 jours par logement à deux personnes
- le remplacement des équipements de chauffage : 2 jours par logement à deux personnes
- le remplacement des équipements d'eau chaude sanitaire : 1 jour par logement à deux personnes

La durée moyenne de rénovation artisanale est :

- d'environ 50 jours à une personne pour une maison individuelle (tableau 9) ;
- d'environ 35 jours à une personne pour un logement en immeuble collectif (tableau 10).

Ces deux valeurs peuvent être considérées comme des valeurs minimales et maximales pour l'ensemble du parc de logements.

| | Durée | Nombre de personnes | Charge de travail |
|---|-------------------|----------------------------|-------------------------------------|
| Isolation des murs | 10,0 jours | 2 personnes | 20,0 jours.personne/logement |
| Isolation de la toiture | 0,7 jours | 2 personnes | 1,4 jours.personne/logement |
| Isolation du plancher bas | 5,0 jours | 2 personnes | 10,0 jours.personne/logement |
| Remplacement des menuiseries | 1,0 jours | 2 personnes | 2,0 jours.personne/logement |
| Installation d'une VMC double flux | 5,0 jours | 2 personnes | 10,0 jours.personne/logement |
| Remplacement des équipements de chauffage | 2,0 jours | 2 personnes | 4,0 jours.personne/logement |
| Remplacement des équipements d'eau chaude sanitaire | 1,0 jours | 2 personnes | 2,0 jours.personne/logement |
| TOTAL | 24,7 jours | | 49,4 jours.personne/logement |

Tableau 9 : durée moyenne de la rénovation artisanale d'une maison individuelle

| | Durée | Nombre de personnes | Charge de travail |
|---|-------------------|----------------------------|-------------------------------------|
| Isolation des murs | 6,7 jours | 2 personnes | 13,4 jours.personne/logement |
| Isolation de la toiture | 0,3 jours | 2 personnes | 0,6 jours.personne/logement |
| Isolation du plancher bas | 2,1 jours | 2 personnes | 4,2 jours.personne/logement |
| Remplacement des menuiseries | 0,5 jours | 2 personnes | 1,0 jours.personne/logement |
| Installation d'une VMC double flux | 5,0 jours | 2 personnes | 10,0 jours.personne/logement |
| Remplacement des équipements de chauffage | 2,0 jours | 2 personnes | 4,0 jours.personne/logement |
| Remplacement des équipements d'eau chaude sanitaire | 1,0 jours | 2 personnes | 2,0 jours.personne/logement |
| TOTAL | 17,6 jours | | 35,2 jours.personne/logement |

Tableau 10 : durée moyenne de la rénovation artisanale d'un logement en immeuble collectif

Le nombre de jours travaillés par an est pris égal à 228 jours par an, ce qui correspond à l'année 2012.

La charge de travail générée par la rénovation des logements correspond au nombre de logements à rénover multiplié par la durée moyenne de la rénovation d'un logement à une personne. Le nombre de personnes nécessaires est obtenu en divisant cette charge de travail par le nombre de jours travaillés.

Par exemple, la charge de travail **générée par la rénovation d'ici 2050** des logements construits avant 1975, avec une durée moyenne de **la rénovation d'un logement à 50 jours** à une personne, est égale à : $500\,000 \times 50 = 25\,000\,000$ jours.personne/an. Le nombre de jours travaillés par personne est 228 jours par an. Le nombre de personnes nécessaires est donc : $25\,000\,000 / 228 = 109\,649$ personnes/an.

Les résultats sont synthétisés dans le tableau 11.

| Hypothèses | | | |
|---|--------------------------------------|--|----------------------|
| Durée moyenne de la rénovation d'un logement à une personne | | | |
| 35 jours.pers/logt | | 50 jours.pers/logt | |
| | Nombre de logements à rénover | Nombre de personnes nécessaires | |
| Grenelle Environnement | 400 000 logements/an | 61 754 personnes/an | 87 719 personnes/an |
| Logements construits avant 1975 | 500 000 logements/an | 77 193 personnes/an | 109 649 personnes/an |
| Logements construits avant 2004 | 750 000 logements/an | 115 789 personnes/an | 164 474 personnes/an |

Tableau 11 : charge de travail générée par la rénovation des logements selon plusieurs scénarios

Analyse des résultats :

Le nombre de personnes nécessaires pour réaliser les rénovations est à comparer avec le nombre d'actifs du secteur du bâtiment évalué à 1 482 000 en 2012 (FFB, 2013).

En considérant que ces travaux de rénovation viennent en complément de l'activité déjà existante et non en substitution, le nombre d'emplois lié à la rénovation des logements représente une augmentation de 4 à 11 % du nombre d'actifs du secteur du bâtiment.

En 2009, une étude du Boston Consulting Group (BCG, 2009) prévoyait que les mesures du Grenelle de l'Environnement concernant le bâtiment devaient assurer :

- 100 000 emplois en 2009,
- 400 000 emplois en 2013,
- 300 000 emplois en 2020.

Étant donné le taux de chômage, on ne peut que se réjouir de ces créations d'emplois, non délocalisables de surcroît !

Fin juin 2013, la France métropolitaine comptait 3 538 500 **demandeurs d'emploi inscrits à Pôle emploi** de catégorie A (sans emploi et tenus de faire des actes positifs de recherche d'emploi) (DARES, 2013).

Mais le problème qui se pose est la formation de ces nouveaux travailleurs du bâtiment. En effet, pour atteindre le niveau de performance requis en rénovation (consommation moyenne d'énergie primaire de 50 kWh/(m².an) pour atteindre le facteur 4), il ne faut pas se contenter

de remplacer certains éléments (comme les fenêtres ou le système de chauffage). Mais il faut **réaliser des rénovations complètes, mettre en œuvre des produits performants et soigner la mise en œuvre (notamment l'étanchéité à l'air et l'installation des équipements)**. Sinon, même si le nombre de rénovations sera important, les économies d'énergies et la réduction des émissions de CO₂ ne seront pas à la hauteur des objectifs. Et il ne sera jamais rentable de réaliser une nouvelle rénovation globale dans quelques années.

Un nouveau partenariat FEEBat (Formation aux Économies d'Énergie dans le Bâtiment) a été signé en mai 2013 pour former 11 000 personnes en 2013. Les structures actuelles de formation devront s'adapter pour faire face à l'afflux de personnes à former.

En conclusion, le calcul de la charge de travail et du coût des rénovations de logements a montré que le principal obstacle est le montant à investir pour réaliser des rénovations performantes.

Il faut donc, d'une part, réduire le montant des rénovations grâce à des gains de productivité et à l'amélioration du processus de rénovation et d'autre part, proposer des solutions de rénovation globale avec intégration de plusieurs fonctions dans un même produit.

Industrialiser la rénovation énergétique semble être une solution prometteuse pour répondre à ces deux problématiques.

II) Rénovation artisanale

1) **Le secteur de la construction est resté très artisanal**

Le secteur du bâtiment est, historiquement et techniquement, très dépendant de méthodes **artisanales qui sont d'ailleurs très souvent perçues comme un gage de qualité**. Excepté pour ce qui touche à la planification et la gestion d'affaires, les méthodes et outils du génie industriel y sont peu répandus. L'organisation des chantiers de construction ou de rénovation est un aspect qui ne revêt pas autant d'importance que les fonctions techniques associées aux différents corps de métier.

La littérature est assez pauvre en applications dans le secteur du bâtiment utilisant des outils du *lean manufacturing* (Holweg, 2007 ; Melton, 2005 ; Shah, Ward, 2003) : VSM (Value Stream Mapping), 5S, SMED (Single Minute Exchange of Die)..., ou plus généralement encore, des méthodes de logistique et d'assurance qualité.

Pourtant, la simple observation d'un chantier de construction, que ce soit pour une maison individuelle ou un bâtiment d'habitation ou commercial, met en évidence quelques points d'amélioration potentielle :

- désordre dans le stockage des matériaux et des outils ;
- **nombreuses opérations de découpe et d'ajustement des composants** directement sur le chantier, avec des outils pas toujours adaptés ;
- approvisionnement des composants dans des quantités trop importantes ou au contraire trop faibles ;
- nombreux déchets ;
- cloisonnement des métiers et faible polyvalence des ouvriers et techniciens ;
- nombreux retards ;
- **nombreuses réclamations des maîtres d'ouvrages** ;
- etc.

La figure 11 montre un ouvrier en train de découper une plaque d'isolant (polystyrène expansé) à la scie égoïne alors qu'il existe des appareils à fil chaud qui permettent une découpe plus précise sans production de déchets volatils (billes de polystyrène). On remarque aussi les nombreux déchets et le stockage des matériaux et des outils qui n'est pas bien organisé.



Figure 11 : chantier d'isolation par l'extérieur d'une maison individuelle en banlieue de Toulouse en 2010

À partir de quatre études de cas en Finlande, (Naaranoja, Uden, 2007) ont identifié les problèmes courants dans les projets de construction et proposé des améliorations basées sur le « *building trust* », le management de la connaissance et le lean construction.

Contrairement aux entreprises du secteur industriel qui disposent souvent de services **d'industrialisation et méthodes afin de préparer et organiser le travail**, les entreprises du bâtiment travaillent souvent « à vue » et prennent rarement en compte les effets de masse de **leur production. En effet, chaque bâtiment est unique, mais c'est aussi le cas de nombreux produits industriels pourtant fabriqués en série.**

La maquette numérique du bâtiment ou Building Information Modelling (BIM) permet de regrouper les vues de plusieurs experts sur un même modèle (van Nederveen, Tolman, 1992 ; Howard, Björk, 2008).

(Sacks et al., 2010) présente les besoins pour développer une maquette numérique basée sur des systèmes de management de la production lean. Des interfaces prototypes ont été évaluées par des entreprises de construction, mais des recherches futures sont nécessaires avant de disséminer le concept.

2) Problèmes de non-satisfaction du client dans le secteur du bâtiment

Il semble admis par tous que le bâtiment est un secteur d'activités où l'on rencontre fréquemment des problèmes de non-satisfaction du client liés :

- au non-respect du cahier des charges ;
- à un dépassement de délai ;
- à un dépassement de budget ;
- à une qualité insuffisante, voire à des malfaçons ;
- etc.

Les principaux facteurs qui permettent d'expliquer ce constat sont :

- le manque de formation des ouvriers : non-respect des règles de pose et de sécurité, de **la réglementation, peu de préparation des chantiers, mauvaise lecture des plans...** ;
- la mauvaise gestion des entreprises (la plupart de très petite taille) : mauvaise estimation du coût, mauvaise gestion du planning, **négligences sur la sécurité...** ;

- la mauvaise coordination entre les différents corps d'état : responsabilités mal définies, **méconnaissance des contraintes des autres intervenants...** ;
- etc.

Bien souvent, les problèmes rencontrés n'ont pas une cause unique, mais un ensemble de causes mal identifiées.

Prenons l'exemple de la pose des menuiseries (fenêtres) sur une maison individuelle en construction neuve. Un problème d'étanchéité d'une fenêtre peut résulter du non-respect des règles de pose, de la mauvaise préparation du support (le maçon n'a pas préparé l'encadrement de la baie pour recevoir la fenêtre), d'une erreur dimensionnelle dans la fabrication de la fenêtre, etc. De plus, les poseurs de menuiseries sont bien souvent des journaliers faiblement rémunérés par rapport au prix d'achat des fenêtres. Pour une maison individuelle, ils interviennent en général sur un chantier à la journée : ils arrivent le matin avec les fenêtres à poser et repartent une fois que les fenêtres sont posées. Que devraient-ils faire si le support n'est pas prêt ? Ils devraient refuser de poser les menuiseries et faire une réclamation auprès du maître d'œuvre **pour que le maçon vienne « dresser »** le support (préparer un encadrement de baie adapté aux dimensions de la fenêtre). Mais dans la plupart des cas, ils ne le font pas, car ils préfèrent « boucler » le chantier au plus vite pour ne pas revenir sur le chantier une autre fois. Ils peuvent aussi craindre de ne pas être choisis pour les chantiers suivants. Si l'encadrement de baie est trop grand par rapport à la fenêtre à poser, le poseur va combler l'écart avec les « moyens du bord », c'est-à-dire du plâtre voire de la mousse polyuréthane expansive, dont la durabilité n'est pas prévue pour cette application.

Pour corriger les problèmes de satisfaction du client évoqués précédemment, il faudrait avoir une vision d'ensemble des activités des différents corps d'état, de leurs contraintes respectives et de leurs relations. Il faudrait décrire les différentes étapes d'une rénovation du début à la fin, c'est-à-dire de la prise de contact avec le client à la réception finale du chantier **voire à la maintenance. Il faudrait étudier les produits mis en œuvre, mais aussi les intervenants, leurs outils (équipements, logiciels...), leurs contraintes (réglementaires, budget, délai...)...**

Pour cela, nous proposons d'adopter une approche processus et de modéliser le processus de rénovation, c'est-à-dire de créer un modèle pour représenter l'état actuel et futur et proposer des améliorations.

3) Étude du processus de rénovation artisanale auprès des bailleurs sociaux

Pour mieux connaître le processus de rénovation artisanale, nous avons interrogé en 2010-2011 six bailleurs sociaux (propriétaires de logements sociaux) :

- Nantes Habitat à Nantes (44) ;
- Immobilière des Chemins de Fer (ICF) à Dunkerque (59) ;
- Habitat 08 à Charleville-Mézières (08) ;
- Immobilière 3F à Paris (75) ;
- Pluralis à Voiron (38) ;
- Villogia à Villeneuve-d'Ascq (59).

Le processus de rénovation commence par l'évaluation des besoins d'amélioration du (ou des) bâtiment(s) existant(s) (voir tableau 12).

Les bailleurs sociaux ont l'obligation de rédiger un Plan Stratégique de Patrimoine (PSP) qui décrit l'état de leur parc de bâtiments et les évolutions prévues pour les 10 prochaines années. Il est remis à jour régulièrement. Il permet d'identifier les bâtiments à rénover en priorité, en fonction de leur performance énergétique, de mises en sécurité ou aux normes nécessaires (**électricité, accessibilité...**), mais aussi de critères sociaux. Par exemple, le taux de vacance (**pourcentage du temps où le logement n'est pas occupé**) est une indication sur la demande de logements sociaux à un endroit donné. Le PSP définit la stratégie du bailleur social pour

chaque bâtiment de son parc : faut-il le rénover, le démolir et reconstruire ou le vendre ? Pour ce qui est de la performance énergétique, le PSP est en général basé sur un Diagnostic de Performance Énergétique (DPE) qui est assez sommaire.

Pour chaque bâtiment à rénover, les bailleurs sociaux réalisent, par une équipe interne ou externe, un pré-diagnostic et une pré-étude plus ou moins poussés. Ceux-ci servent à vérifier la faisabilité technique et financière de la rénovation.

Certains bailleurs sociaux réalisent à ce moment-là une enquête sociale pour vérifier que les locataires pourront assumer la hausse de loyer nécessaire pour financer les travaux de rénovation. Ils étudient aussi l'intérêt de regrouper des logements (pour passer de T2-T3 à des T4-T5).

Chaque projet est alors soumis à une validation interne pour décider ou non de la rénovation du bâtiment et déterminer le programme de travaux en fonction du budget alloué.

| | Évaluer les besoins d'amélioration du (ou des) bâtiment(s) existant(s) | | | |
|---|---|---|---|-----------------------|
| | Identification des bâtiments à rénover | | Pré-étude | Décision |
| Nantes Habitat | Plan Stratégique de Patrimoine (PSP) | Pré-diagnostic | Enquête sociale | Validation en interne |
| Immobilière des Chemins de Fer (ICF) | Plan Stratégique de Patrimoine (PSP) | Visite des logements pour lister tous les travaux à effectuer | Pré-étude | Validation en interne |
| Habitat 08 | Plan Stratégique de Patrimoine (PSP) | Première étude thermique à l'état initial | Première étude thermique à l'état projet | Choix en interne |
| Immobilière 3F | Plan Stratégique de Patrimoine (PSP) | Vague idée de la performance thermique | Première étude thermique et diagnostic complémentaire (état projet) | Choix en interne |
| Pluralis | Plan Stratégique de Patrimoine (PSP) | Connaissance partielle de l'étiquette énergie (DPE) | Diagnostic technique du bâtiment par visite | Choix en interne |
| Vilogia | Plan Stratégique de Patrimoine (PSP) | Visite des logements pour lister tous les travaux à effectuer | Définition des travaux par le chargé d'opérations | Choix en interne |

Tableau 12 : processus de rénovation artisanale de six bailleurs sociaux (activités d'évaluation des besoins d'amélioration)

L'étude des travaux de rénovation peut alors commencer (voir tableau 13). Elle est assurée par une équipe de maîtrise d'œuvre qui comprend généralement un architecte, un ou plusieurs bureaux d'études, parfois un économiste de la construction... La plupart du temps, l'équipe de maîtrise d'œuvre est externe : elle est sélectionnée par appel d'offres. Mais certains bailleurs sociaux ont des équipes internes qui effectuent la maîtrise d'œuvre.

Certains bailleurs sociaux séparent les missions d'Ordonnancement, Pilotage et Coordination (OPC) et de coordination Sécurité et Protection de la Santé (SPS) de la mission de maîtrise d'œuvre. Ils font ce choix notamment lorsque les appels d'offres sont en séparés pour assurer une meilleure coordination du chantier.

Le maître d'ouvrage désigne un bureau de contrôle pour assurer la mission de contrôle technique de la construction. Celle-ci consiste à prévenir les sinistres par l'étude des éléments techniques en phase de conception et leur vérification en phase de réalisation.

L'étude de la rénovation comprend plusieurs phases :

- les diagnostics de l'état existant par des visites sur site, l'interrogation de toutes les personnes impliquées, certains contrôles destructifs pour vérifier la composition des parois...
- l'Avant-Projet Sommaire (APS) qui fournit une ou plusieurs solutions techniques avec une estimation du coût et du délai de la rénovation ;
- l'Avant-Projet Détaillé (APD) qui fournit les plans détaillés et le chiffrage définitif et aboutit à la rédaction du Cahier des Clauses Techniques Particulières (CCTP).

Le CCTP est un document qui rassemble les clauses techniques d'un marché public. Il est intégré au Dossier de Consultation des Entreprises (DCE).

Le maître d'ouvrage doit demander des autorisations administratives : déclaration préalable de travaux ou Permis de Construire (PC) en fonction des travaux à réaliser. Certains bailleurs sociaux les demandent avant la sélection des entreprises, d'autres après.

Une seconde étape de validation inclut généralement les locataires qui sont consultés sur les travaux à réaliser. Certains bailleurs sociaux proposent aux locataires de choisir les travaux d'embellissement de leur logement (tels que le remplacement des équipements sanitaires, des revêtements de sols et de murs...) dans la limite d'une somme forfaitaire.

| Étudier les travaux de rénovation du (ou des) bâtiment(s) existant(s) | | | | | | | |
|---|--|---|---|--|---------------------------------------|--|--|
| Constitution d'une équipe de maîtrise d'œuvre | | Étude | | | | Validation | |
| Nantes Habitat | Sélection d'une équipe de maîtrise d'œuvre | Sélection d'un bureau de contrôle, SPS et OPC | Avant-Projet Sommaire (APS) | Consultation des locataires | Avant-Projet Détaillé (APD) | Programme des travaux | |
| Immobilière des Chemins de Fer (ICF) | Sélection d'une équipe de maîtrise d'œuvre | | Études de maîtrise d'œuvre | | | Enquête sociale | Validation |
| Habitat 08 | Maîtrise d'œuvre en interne | | Études de maîtrise d'œuvre | | | | |
| Immobilière 3F | Maîtrise d'œuvre en interne | | Suit les études jusqu'à l'APD | | | Déclaration préalable de travaux ou PC | Concertation avec les locataires |
| Pluralis | Sélection d'une équipe de maîtrise d'œuvre | | Nombreux allers-retours entre l'équipe de maîtrise d'œuvre et le maître d'ouvrage | | | CCTP | Concertation avec les locataires (choix des travaux d'embellissement) |
| Vilogia | Sélection d'une équipe de maîtrise d'œuvre | Sélection d'un coordinateur SPS et OPC | APS : diagnostic complet et réunion avec tous les intervenants | APD : chiffrage définitif, plan détaillé | Étude financière de calcul des loyers | CCTP | Concertation avec les locataires (minimum 50 % des votes des locataires pour lancer les travaux) |

Tableau 13 : processus de rénovation artisanale de six bailleurs sociaux (activités d'étude des travaux de rénovation)

La **réalisation des travaux de rénovation** (voir tableau 14) débute par la sélection des entreprises d'après un appel d'offres. Celui-ci est **généralement en lots séparés, c'est-à-dire que les travaux sont séparés en lots (isolation, menuiseries, électricité...)** et que chaque entreprise répond à un ou plusieurs lots. Dans le cas contraire, des entreprises générales répondent à l'ensemble du marché de travaux.

Certains bailleurs sociaux demandent aux entreprises des « mémoires techniques » qui vont **au-delà du prix. L'entreprise doit expliquer comment elle compte effectuer les travaux, il y a des clauses sur l'optimisation du délai, la propreté du site...**

Une fois les autorisations administratives accordées, les travaux peuvent commencer.

Le chantier est coordonné par :

- le maître d'œuvre et éventuellement une personne assurant l'OPC ;
- un conducteur de travaux ;
- un représentant du bailleur social pour le pilotage social qui assure une permanence sur le chantier autre que les entreprises.

En effet, lors d'une rénovation en site occupé, il faut établir un planning très précis des interventions dans les logements en prenant rendez-vous avec les locataires.

| | Réaliser les travaux de rénovation du (ou des) bâtiment(s) existant(s) | | |
|---|---|--|--------------------------|
| | Sélection des entreprises | Préparation des travaux | Suivi du chantier |
| Nantes Habitat | Consultation des entreprises | Déclaration préalable de travaux ou PC | |
| Immobilière des Chemins de Fer (ICF) | Sélection des entreprises | | Suivi du chantier |
| Habitat 08 | Sélection des entreprises | Deuxième étude thermique à l'état projet | |
| Immobilière 3F | Sélection des entreprises | | Suivi du chantier |
| Pluralis | Sélection des entreprises | Déclaration préalable de travaux ou PC | Suivi du chantier |
| Vilogia | Sélection des entreprises d'après DCE avec mémoires techniques | Déclaration préalable de travaux ou PC | Suivi du chantier |

Tableau 14 : processus de rénovation artisanale de six bailleurs sociaux (activités de réalisation des travaux de rénovation)

4) Problèmes de la rénovation artisanale

Les premiers problèmes rencontrés sont la difficulté à récupérer la connaissance de la géométrie du bâtiment à rénover :

- Il est souvent difficile de recueillir les données sur le bâtiment existant : il y a peu d'informations à jour, les plans papier ne sont pas toujours disponibles et, s'ils sont présents, ils ne correspondent pas forcément **à l'état actuel**.
- Les mesures sont effectuées manuellement, donc sont très longues (par exemple, la prise de cotes de chaque menuiserie) et parfois impossibles à réaliser à la main (par exemple, la planéité en tout point d'une façade).
- Chaque diagnostic est livré sur un support différent (plan du géomètre, plan des façades...), **pas toujours numérisé et modifiable par le maître d'ouvrage (pour archivage)**.
- **La méconnaissance de l'état du bâtiment existant avec ses spécificités (points singuliers, problèmes rencontrés par les habitants...)** génère des incertitudes sur ses performances

actuelles et ne permet pas d'anticiper tous les problèmes de réalisation dès la phase de conception.

L'évaluation de la performance énergétique n'a pas encore toute sa place pour guider les travaux de rénovation :

- Elle est bien souvent effectuée uniquement par obligation ou pour obtenir certaines aides **qui sont conditionnées à l'atteinte d'un certain niveau de performance.**
- Les diagnostics externes ne sont pas toujours de bonne qualité, avec par exemple des erreurs dans la composition des parois, des préconisations de travaux et des calculs de rentabilité très sommaires ne permettant pas de choisir les travaux à effectuer en toute connaissance de cause.
- Les diagnostics réglementaires ne suffisent pas toujours à programmer une rénovation énergétique globale, car ils effectuent un calcul statique (**à l'équilibre**). Seuls les logiciels de Simulation Thermique Dynamique (STD), tels que Pleiades+COMFIE, tiennent compte **avec précision des apports d'énergie, de l'inertie et des échanges thermiques entre différentes zones d'un bâtiment.**
- Les simulations réglementaires et dynamiques sont actuellement réalisées avec des informations 2D. Il faut saisir toutes les informations à la main. ArchiWIZARD est un des rares logiciels **d'application de la RT 2012 qui permet d'importer un modèle 3D du bâtiment.**
- Il peut y avoir divergence entre les simulations réalisées et les produits effectivement mis en œuvre. **Les systèmes de garantie de performance énergétique sont peu utilisés.**

La maîtrise d'ouvrage a aussi sa part de responsabilités :

- Bien souvent, les rénovations sont partielles et non globales.
- Par exemple, les menuiseries ont été changées dans les années 1990, une ventilation mécanique contrôlée (VMC) a été installée dans les années 2000 et une Isolation Thermique par l'Extérieur (ITE) **est prévue cette année.** Dans le pire des cas, seuls les murs pignons (sans menuiseries) sont isolés et un simple ravalement de façade est effectué sur les autres murs extérieurs.
- **Souvent, les maîtres d'ouvrage appliquent la même recette : par manque d'informations ou par prudence, ils effectuent les travaux habituels.** Il y a également une **méconnaissance de l'intérêt des rénovations globales.** En effet, la performance énergétique dépend de tous les postes : il ne suffit pas de colmater une seule fuite (**d'énergie ou d'eau**) pour **supprimer les pertes d'une « passoire thermique » !**
- Le choix des travaux à effectuer est fait en fonction principalement des contraintes de coût : il dépend du financement du maître d'ouvrage (augmentation de loyer possible, subventions...).
- Les maîtres d'ouvrage publics reçoivent de moins en moins de subventions et doivent s'assurer de la faisabilité financière de la rénovation.
- Le calcul en coût global est peu développé et utilisé. Les travaux à faible retour sur investissement sont privilégiés.

La maîtrise d'œuvre a un rôle très important dans le choix des techniques de rénovation, artisanales ou industrialisées :

- **L'obligation de réaliser des appels d'offres pour la mission de maîtrise d'œuvre et la sélection des entreprises de pose** fait que les acteurs ne sont pas toujours les mêmes.
- Le maître d'œuvre **ne récupère pas forcément les plans réalisés lors des diagnostics** comme base pour ses plans. Il extrait seulement les informations qui lui sont pertinentes. De plus, il travaille en général avec ses propres logiciels.
- Hormis en conception-réalisation, le maître d'œuvre fait ses choix de conception sans anticiper sur toutes les contraintes de réalisation. Il choisit une famille de solutions techniques, mais ne vérifie pas toutes les contraintes. Il ne prend pas en compte toutes les contraintes de fabrication, de production, de transport ou de pose qui peuvent influencer sur le coût (par exemple, moins de chutes pour la fabrication, optimisation des chargements pour le transport).
- **Les plans d'exécution ne sont pas toujours bien réalisés. L'entreprise doit bien souvent les compléter, voire les faire elle-même.**

- Le maître d'œuvre peut proposer au maître d'ouvrage des solutions techniques innovantes et un allotissement non traditionnel (par exemple : macro-lots). S'il ne le fait pas, une même entreprise peut répondre à plusieurs lots, mais elle n'est pas sûre d'être retenue sur tous les lots où elle se positionne. Cela peut poser problème lorsqu'un même produit intègre plusieurs fonctions qui appartiennent à plusieurs lots (par exemple : panneau de façade intégrant les menuiseries).

D'autres problèmes apparaissent au niveau des entreprises chargées d'effectuer les travaux :

- Les entreprises qui répondent à l'appel d'offres ont peu d'informations sur le projet pour réaliser leur chiffrage. Chacune est contrainte de se rendre sur place pour prendre des mesures ou récupérer des informations complémentaires. Le maître d'œuvre et le maître d'ouvrage se sont en général déchargés de toute responsabilité sur les informations données aux entreprises : par exemple, le CCTP (Cahier des Clauses Techniques Particulières) précise bien souvent que les plans fournis ne sont pas contractuels et qu'il appartient aux entreprises de les vérifier sur place.
- Lorsque des plans sont fournis, ce sont généralement des plans en 2D.
- Les entreprises doivent en général ressaisir les plans pour les intégrer à leur propre système d'information.
- **Le calcul des coûts par l'entreprise est assez imprécis du fait du manque de données.**
- Le travail de conception des entreprises est parfois important.
- **Il y a souvent une incompréhension entre les choix de l'architecte (qui sont parfois vus par les entreprises comme des lubies coûteuses) et les contraintes techniques des entreprises (qui voudraient vendre des solutions éprouvées « sur étagère » ou leurs produits les plus rentables).**
- La réalisation est peu préparée : **un métré grossier permet d'évaluer les quantités de matériaux.**

Enfin, la qualité des travaux n'est pas toujours bien contrôlée :

- Les matériaux sont découpés et assemblés sur site. Si la prise de mesures était erronée, cela **n'a pas d'influence.**
- Le travail sur site est soumis aux intempéries et autres aléas de chantier (par exemple : grue non disponible).
- Il est difficile de vérifier la qualité de la pose sur site. **C'est au conducteur de travaux de le faire, mais il n'est pas forcément présent tous les jours sur le chantier.**

III) Rénovation industrialisée

1) Modélisation fonctionnelle IDEF0 du processus de rénovation industrialisée

La modélisation du processus industriel de rénovation a pour but de fournir une vue d'ensemble du processus que nous imaginons pour la rénovation thermique industrialisée des bâtiments. Elle permet de considérer le processus de rénovation dans sa globalité et de comprendre les interactions entre les différentes activités. Pour cela, la méthode de modélisation fonctionnelle IDEF0 (Integration DEfinition language 0) a été choisie.

Une première version de la modélisation du processus de rénovation industrialisée a été valorisée sous la forme d'un article (Falcon, Fontanili, 2010) et d'une présentation à la conférence scientifique ECPPM 2010 (8th European Conference on Product & Process Modelling) qui s'est tenue du 14 au 16 septembre 2010 à Cork en Irlande.

La version présentée dans les pages suivantes est une version plus détaillée et enrichie de plusieurs entretiens avec des maîtres d'ouvrages publics (bailleurs sociaux). Dans un souci de clarté, nous n'avons pas dessiné tous les flux nécessaires, notamment les flux verticaux (contrôles et moyens). Cette modélisation a fait l'objet d'un article (Falcon, 2011) et d'une présentation le 11 mai 2011 à Toulouse dans le cadre du congrès des doctorants EDSYS.

a) Diagramme A-0 : Rénover un (ou plusieurs) bâtiment(s)

Le diagramme A-0 de la modélisation IDEF0 est présenté à la figure 12. L'activité principale du processus de rénovation des bâtiments est naturellement « Rénover un (ou plusieurs) bâtiment(s) ».

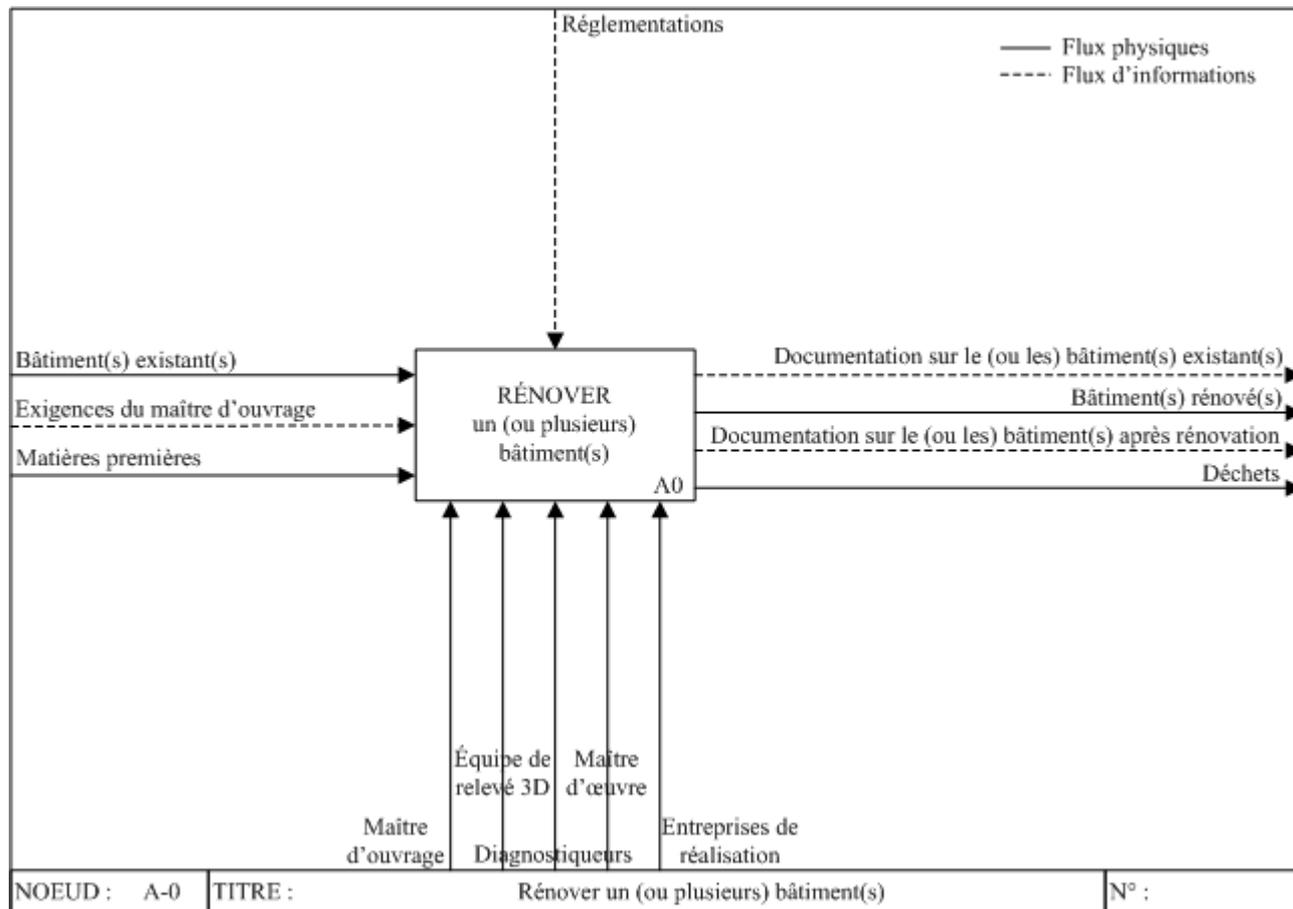


Figure 12 : diagramme A-0 de la modélisation IDEF0 du processus de rénovation industrialisée des immeubles de logements collectifs

Les flux entrants physiques sont le (ou les) bâtiment(s) existant(s) et les matières premières. L'emploi du pluriel pour désigner les bâtiments n'est pas anodin. En effet, au contraire d'un processus artisanal qui évolue d'un cas à l'autre, un processus industriel doit convenir et s'adapter à un grand nombre de cas. De plus, vu le nombre de bâtiments à rénover, l'effet de masse va jouer un rôle important. Les caractéristiques du (ou des) bâtiment(s) existant(s) (localisation, année de construction, logements individuels ou collectifs, nombre d'étages, etc.) permettent de déterminer s'il(s) correspond(ent) à la cible de bâtiments que nous avons identifiée : les bâtiments collectifs de forme générale simple, qui peuvent a priori être rénovés par l'extérieur. La cible principale est constituée des immeubles de logements sociaux, mais le concept s'applique tout à fait aux copropriétés (le processus de décision est par contre beaucoup plus long et complexe, car il y a plusieurs décisionnaires) ou aux bâtiments tertiaires. Le flux entrant d'informations contient les exigences du maître d'ouvrage, c'est-à-dire sa gestion du patrimoine, sa capacité de financement, ses contraintes sur la phase de chantier (travail en milieu occupé, réduction des nuisances), etc.

Les flux sortants physiques sont le (ou les) bâtiment(s) rénové(s) ainsi que des déchets dont on cherchera à réduire la quantité sur chantier par la préfabrication en usine. Les flux sortants d'informations sont les documentations sur le (ou les) bâtiment(s) existant(s) et après rénovation. Ces documentations rassemblent toutes les informations collectées et calculées. Les indicateurs de performance pourront être conventionnels, c'est-à-dire calculés selon une méthode réglementaire, comme la consommation en énergie primaire (en kWh/(m².an)) et les émissions de gaz à effet de serre (en kg_{éqCO2}/(m².an)). Ils pourront aussi représenter des informations plus subjectives. Par exemple, nous proposons de définir un indice de confort

individualisé qui tiendrait compte des besoins différents suivant le type d'occupants. Ainsi, pour un même logement, une personne âgée seule demandera une température de consigne de chauffage supérieure à celle d'un couple d'actifs avec enfants.

Le contrôle de cette fonction est l'ensemble des réglementations concernant la rénovation des bâtiments (réglementation thermique, plan local d'urbanisme, etc.). En particulier, la loi « Grenelle 1 » fixe les objectifs suivants pour les logements sociaux : la rénovation avant 2020 de 800 000 logements sociaux dont la consommation d'énergie primaire est supérieure à 230 kWh/(m².an) afin de ramener leur consommation annuelle en énergie primaire à des valeurs inférieures à 150 kWh/(m².an). Le pilotage du processus n'a pas été représenté dans cette modélisation. Le « **plan d'investissement pour le logement** », annoncé par le **Gouvernement français en mars 2013 fixe l'objectif de rénovation de 120 000 logements sociaux rénovation par an d'ici à 2017, sans préciser leur consommation d'énergie après rénovation.**

Les acteurs du processus de rénovation sont le maître d'ouvrage, l'équipe de relevé 3D, les diagnostiqueurs, le maître d'œuvre et les entreprises de réalisation. Le maître d'ouvrage pilote le processus de rénovation et sélectionne les autres intervenants. Il est à noter que les maîtres d'ouvrage publics sont soumis au Code des Marchés Publics (Légifrance, 2006) pour la sélection des entreprises.

b) Diagramme A0 : Rénover un (ou plusieurs) bâtiment(s)

L'activité principale du diagramme A-0 se décompose en 4 activités. Celles-ci sont représentées dans le diagramme A0 de la modélisation IDEF0 à la figure 13.

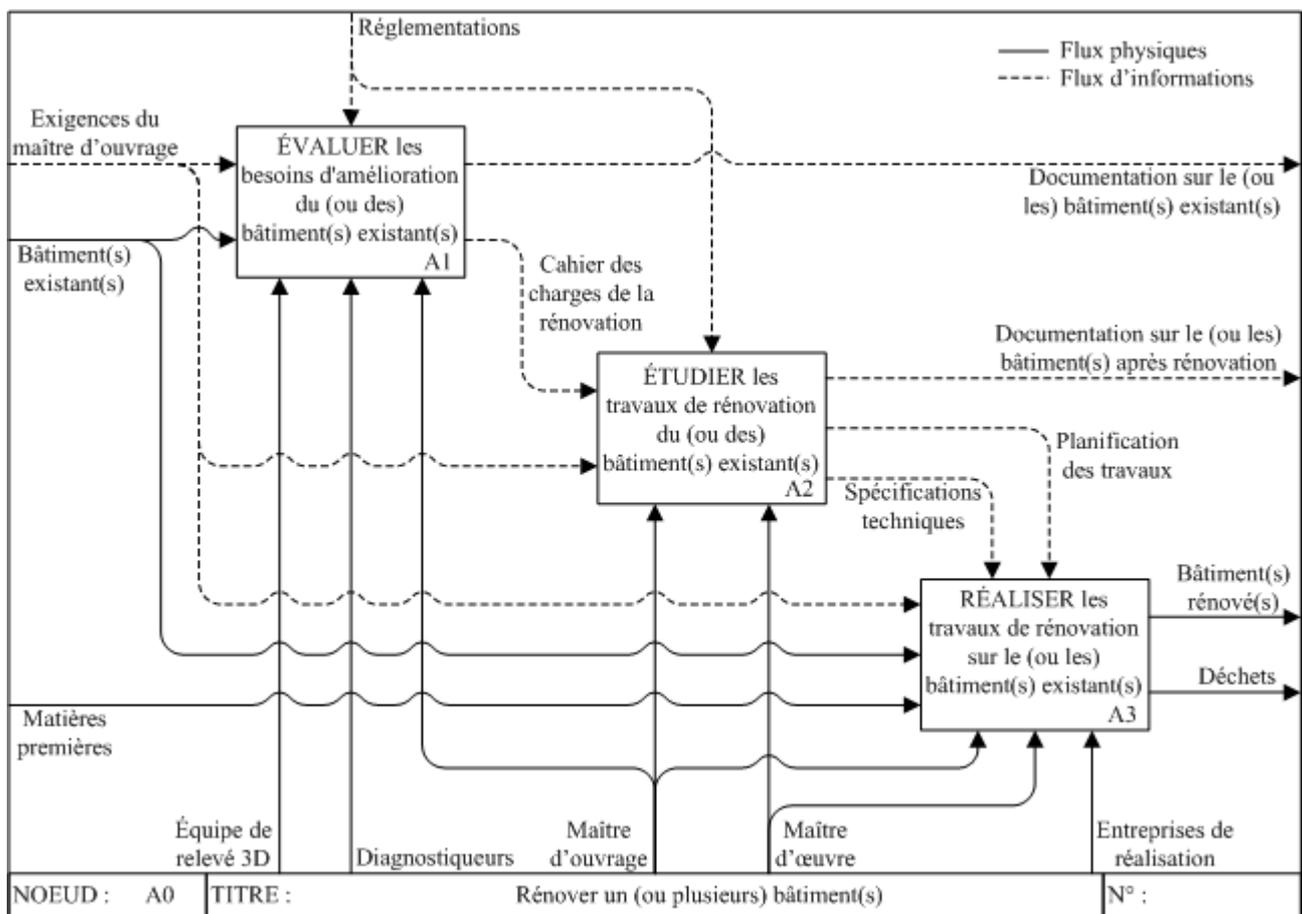


Figure 13 : diagramme A0 de la modélisation IDEF0 du processus de rénovation industrialisée des immeubles de logements collectifs

La première activité du diagramme A0 est « Évaluer les besoins d'amélioration du (ou des) bâtiment(s) existant(s) ». Elle consiste à acquérir une bonne connaissance du (ou des)

bâtiment(s) et à effectuer des études préliminaires afin de décider la poursuite ou l'abandon du projet de rénovation. La documentation sur le (ou les) bâtiment(s) existant(s) comprend le modèle 3D du (ou des) bâtiment(s) existant(s), les indicateurs de performance du (ou des) bâtiment(s) existant(s) et les diagnostics techniques.

Le cahier des charges de la rénovation est défini en choisissant parmi les besoins d'amélioration du (ou des) bâtiment(s) existant(s), eux-mêmes issus des diagnostics et des exigences du maître d'ouvrage, ceux qui seront traités. Le maître d'ouvrage fait appel à des experts pour effectuer le relevé 3D du (ou des) bâtiment(s) existant(s), les diagnostics techniques et l'évaluation de la performance énergétique. Le relevé 3D est très important dans le cadre d'un processus de rénovation industrialisée, car il permet de connaître avec précision la géométrie du bâtiment existant et en particulier de ses façades. En effet, pour éliminer les retouches sur le chantier, il faut concevoir et fabriquer des composants dont les formes et les dimensions correspondent exactement au bâtiment existant. De plus, une maquette numérique, issue du relevé 3D, permet à tous les intervenants de travailler sur les mêmes données et leur évite d'aller sur le site les uns après les autres au moment des études.

La seconde activité du diagramme A0 est « Étudier les travaux de rénovation du (ou des) bâtiment(s) existant(s) ». Elle consiste à concevoir la rénovation en fonction des exigences du maître d'ouvrage et des réglementations (notamment les objectifs de la loi « Grenelle 1 » et la réglementation thermique). Le cahier des charges de la rénovation est transformé en avant-projet puis en spécifications techniques tenant compte d'une préfabrication poussée. C'est le rôle du maître d'œuvre qui met à jour la maquette numérique pour représenter le (ou les) bâtiment(s) après rénovation et calcule les indicateurs de performance prévisionnels du (ou des) bâtiment(s) rénové(s). Les autorisations administratives sont demandées par le maître d'ouvrage et les travaux de rénovation sont planifiés.

La troisième activité du diagramme A0 est « Réaliser les travaux de rénovation sur le (ou les) bâtiment(s) existant(s) ». Elle correspond à la réalisation physique de la rénovation sur le chantier. Elle consiste à préfabriquer les composants en usine, à les transporter sur le chantier puis à les implanter sur le (ou les) bâtiment(s) existant(s). Afin de réduire la durée du travail sur chantier et d'améliorer la qualité de la rénovation, les composants seront conçus pour une implantation facile (assemblage entre eux et fixation au bâtiment). Ils peuvent intégrer des équipements tels que des câbles électriques, des conduites de ventilation, etc. Les bâtiments sont dits rénovés lorsque le maître d'ouvrage et le maître d'œuvre ont réceptionné les travaux de rénovation. La préfabrication des composants permet de travailler dans de meilleures conditions (à l'abri des aléas climatiques, avec un outillage approprié), d'améliorer la qualité et de réduire les nuisances sur chantier et notamment les déchets. En effet, la planification des travaux et le travail en usine permettent de réduire les ajustements et les découpes et les déchets sont plus faciles à traiter en usine.

c) Diagramme A1 : Évaluer les besoins d'amélioration du (ou des) bâtiment(s) existant(s)

L'activité A1 du diagramme A0 se décompose en 4 activités. Celles-ci sont représentées dans le diagramme A1 de la modélisation IDEF0 à la figure 14.

La première activité du diagramme A1 est « Effectuer le relevé 3D du (ou des) bâtiment(s) existant(s) ». Pour cela, plusieurs techniques peuvent être utilisées (voir chapitre 4-II) :

- le relevé topographique qui consiste à mesurer des angles et des distances pour obtenir les coordonnées tridimensionnelles des points significatifs du bâtiment ;
- la photogrammétrie qui consiste à prendre des photographies du bâtiment existant et à les orienter les unes par rapport aux autres pour obtenir une maquette numérique 3D du bâtiment ;
- la lasergrammétrie qui consiste à utiliser un scanner laser pour effectuer un balayage du bâtiment existant et relever un nuage de points tridimensionnels.

Le modèle 3D du bâtiment existant est ensuite utilisé pour évaluer l'état du (ou des) bâtiment(s) existant(s), c'est-à-dire sa performance thermique, son état de dégradation, ses

problèmes, ses atouts... Les diagnostics obligatoires (amiante, plomb, termites...) sont également réalisés. D'autres informations peuvent être nécessaires pour l'étude de la rénovation : par exemple, l'identification des voies d'accès au bâtiment est essentielle pour planifier le transport des composants. La documentation sur le (ou les) bâtiment(s) existant(s) rassemble le modèle 3D, les indicateurs de performance et les diagnostics techniques.

À partir des exigences du maître d'ouvrage et des diagnostics et indicateurs, sont déterminés les besoins d'amélioration du (ou des) bâtiment(s) existant(s), c'est-à-dire tout ce qui peut ou doit être réparé, remplacé, ajouté, optimisé...

La quatrième activité du diagramme A1 consiste à évaluer la faisabilité de la rénovation du (ou des) bâtiment(s) existant(s), c'est-à-dire à définir la possibilité technique et économique de traiter les besoins d'amélioration. Le cahier des charges de la rénovation liste les besoins d'amélioration sélectionnés et les exigences associées (coût, délai, contraintes diverses...).

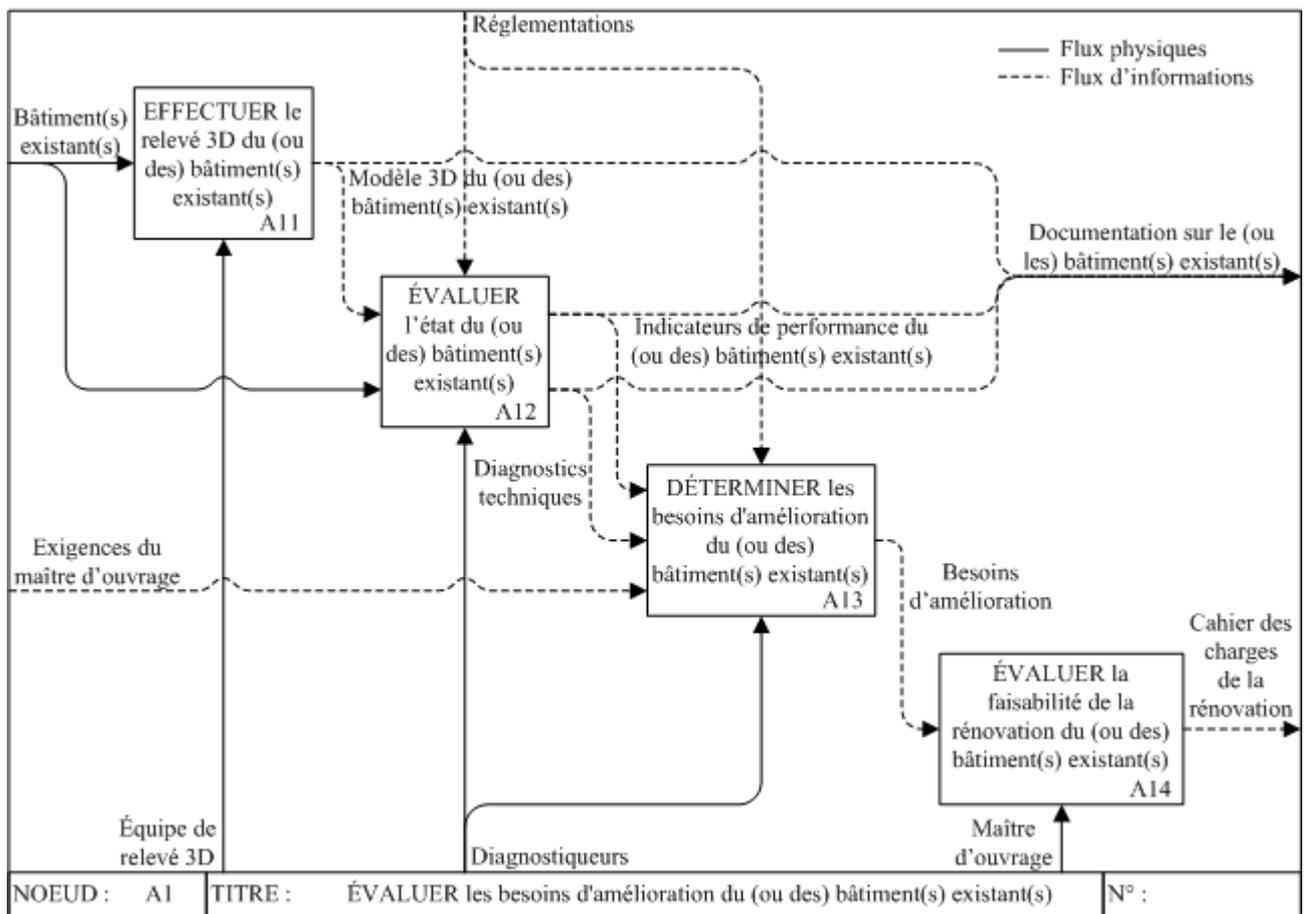


Figure 14 : diagramme A1 de la modélisation IDEF0 du processus de rénovation industrialisée des immeubles de logements collectifs

d) Diagramme A2 : Évaluer les travaux de rénovation du (ou des) bâtiment(s) existant(s)

L'activité A2 du diagramme A0 se décompose en 4 activités. Celles-ci sont représentées dans le diagramme A2 de la modélisation IDEF0 à la figure 15.

À partir du cahier des charges de la rénovation et des exigences du maître d'ouvrage, le maître d'œuvre, désigné par le maître d'ouvrage, réalise les avant-projets.

Le maître d'ouvrage demande les autorisations administratives nécessaires. Par exemple, il effectue une déclaration préalable de travaux ou le dépôt d'un permis de construire auprès de la mairie.

Le maître d'œuvre définit également les spécifications techniques des travaux de rénovation, c'est-à-dire la documentation sur le (ou les) bâtiment(s) (indicateurs de performance prévisionnels, plans...) après rénovation, la nomenclature des produits et les spécifications techniques nécessaires pour préparer les travaux.

La planification des travaux comprend la nomenclature des composants, le budget, le planning de réalisation et l'anticipation d'un maximum de points bloquants.

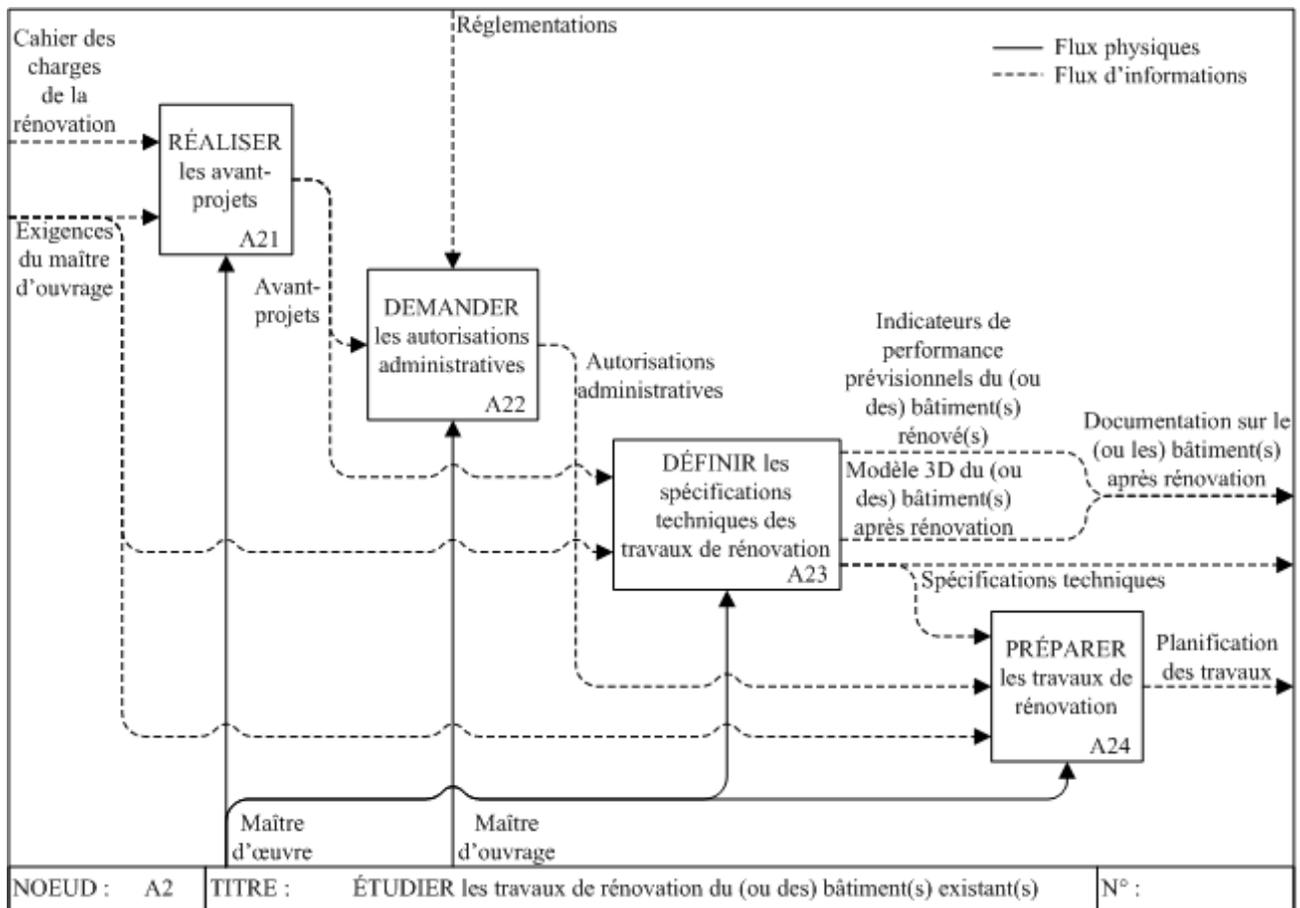


Figure 15 : diagramme A2 de la modélisation IDEF0 du processus de rénovation industrialisée des immeubles de logements collectifs

e) Diagramme A3 : Réaliser les travaux de rénovation du (ou des) bâtiment(s) existant(s)

L'activité A3 du diagramme A0 se décompose en 4 activités. Celles-ci sont représentées dans le diagramme A3 de la modélisation IDEF0 à la figure 16.

En suivant les spécifications techniques (nomenclature) et la planification des travaux, les composants de rénovation sont préfabriqués en atelier, transportés sur chantier et implantés sur le (ou les) bâtiment(s) existant(s) par des entreprises de réalisation.

Le maître d'ouvrage et le maître d'œuvre réceptionnent les travaux de rénovation et le flux sortant est le (ou les) bâtiment(s) rénové(s).

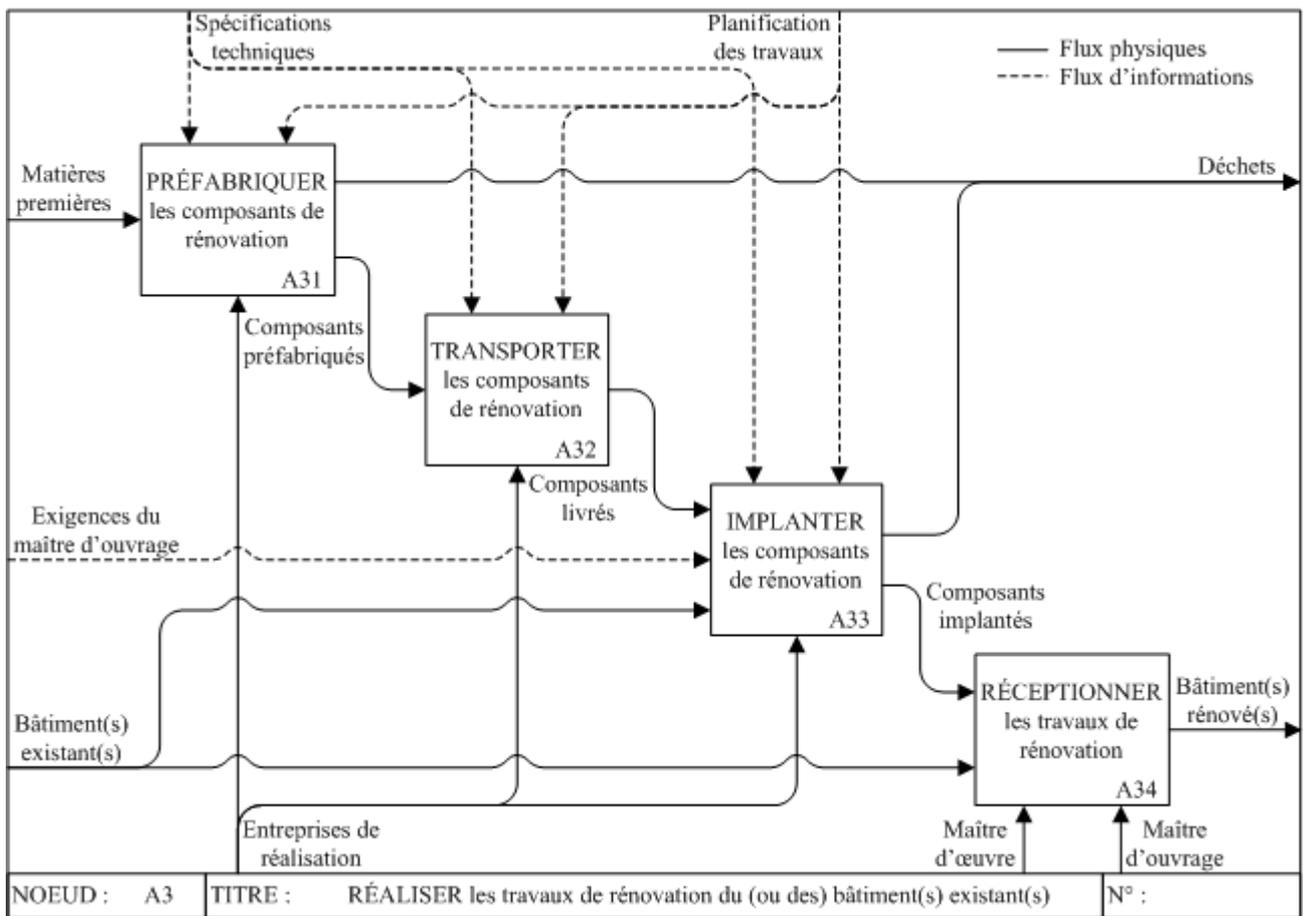


Figure 16 : diagramme A3 de la modélisation IDEF0 du processus de rénovation industrialisée des immeubles de logements collectifs

En résumé, le processus de rénovation industrialisée **accorde plus d'importance** aux études et aux méthodes, car il faut anticiper au maximum les problèmes qui se présentent sur le chantier. Il nécessite une très bonne coordination entre les acteurs, dont certains sont nouveaux comme les équipes de relevé 3D. La principale différence par rapport au processus de rénovation artisanale, c'est la **préfabrication des composants** qui implique une gestion de production et une planification du chantier précises.

2) Verrous de la rénovation industrialisée

a) Système constructif et procédé de fabrication

Les principales contraintes sur le système constructif proviennent du fait que l'on ne construit pas un nouveau bâtiment, mais que l'on rénove un bâtiment existant. Ainsi, la plupart du temps, le bâtiment à rénover est habité et la rénovation a lieu en site occupé, c'est-à-dire sans déplacer les habitants. L'Isolation Thermique par l'Extérieur (ITE) est alors particulièrement adaptée, car les travaux ont lieu sur les façades extérieures du bâtiment donc n'altèrent pas l'intérieur des logements. De plus, c'est une technique thermiquement très performante, car l'isolant est posé en couche continue sur les façades (il passe devant les planchers et les murs de refends). Le bâtiment existant est ainsi habillé d'un « manteau isolant » constitué d'un isolant (plaques de polystyrène expansé, laine de roche...) et d'une finition extérieure (enduit, bardage...). Il faut également remplacer les menuiseries existantes par de nouvelles plus isolantes. Dans une rénovation artisanale, cette intervention a lieu par l'intérieur du logement. Mais pour atteindre une performance thermique élevée, il faut traiter précautionneusement la jonction entre l'isolant extérieur et la menuiserie (généralement posée côté intérieur du mur). Actuellement, cette jonction demande une mise en œuvre soignée, est longue à réaliser et dégrade fortement la performance globale du bâtiment rénové si elle est

mal réalisée. De plus, d'autres éléments arrêtent la continuité de l'isolant et constituent des « ponts thermiques » : appuis de fenêtres, balcons, fixations des volets, garde-corps, antennes...

Pour améliorer la performance des rénovations, l'idéal est de réduire les jonctions à traiter sur site, donc d'utiliser des panneaux isolants de grandes dimensions. De plus, pour réduire le **déla**i de mise en œuvre, il faut des produits nécessitant peu de travail sur chantier et faciles à poser. La préfabrication des panneaux en usine permet de livrer des produits finis « prêts à poser » (sans ajustement). Elle permet également une automatisation du travail qui serait difficile à mettre en œuvre sur chantier. Le travail à l'abri des conditions climatiques, associé à un suivi de la fabrication facilité, permet de mieux maîtriser la qualité. L'intérêt est aussi d'augmenter la valeur ajoutée des produits en intégrant plusieurs fonctionnalités dans les panneaux : isolant, finition extérieure, mais surtout les menuiseries (dont la jonction avec le panneau est bien plus facile à réaliser en atelier que sur site). Par contre, il faut prévoir des **systèmes d'adaptation des panneaux au bâtiment existant, dont les façades ne sont pas** parfaitement planes et verticales.

Des solutions pour lever ces verrous du système constructif et du procédé de fabrication sont présentées au chapitre 4-1).

b) Relevé 3D et maquette numérique

Dans une rénovation industrialisée, **tout doit être prévu dès la phase d'étude, car c'est à ce moment-là que sont planifiées les étapes de fabrication, de transport et d'installation des composants.** Afin d'éliminer les retouches sur le chantier, il faut concevoir et fabriquer des composants dont les formes et les dimensions correspondent exactement au bâtiment existant. Pour cela, il faut connaître avec précision la géométrie du bâtiment existant et de ses façades en particulier : dimensions et position des **ouvertures (fenêtres, portes...)** et des **balcons, décrochés de façades, déviations angulaires...** La **localisation du bâtiment dans son** environnement proche est importante pour tenir compte de la présence de masques (autres **bâtiments, arbres...**) pour les apports solaires. Il faut également connaître sa position géographique et son orientation par rapport aux points cardinaux.

Actuellement, le recueil de données nécessaires peut s'avérer long et coûteux. D'une part, les informations sont souvent dispersées ou introuvables, notamment les plans complets des **bâtiments.** D'autre part, la prise de mesures d'un bâtiment est très manuelle. Les dimensions sont mesurées directement sur le bâtiment, ce qui mobilise au moins deux personnes et, le cas échéant, du matériel pour **atteindre les endroits inaccessibles (échelle, nacelle...).**

La précision et le niveau de détail des relevés dépendent des techniques utilisées pour la **fabrication et l'assemblage des composants.** Une **précision minimale de l'ordre du centimètre** peut être prise comme hypothèse de travail. Cette précision vaut pour toutes les dimensions (des façades et des éléments singuliers) et sera réduite au millimètre pour le positionnement des éléments singuliers (menuiseries) sur les façades.

Pour **réduire le temps d'intervention** sur site, le relevé devra être réalisé avec des **techniques de télédétection, c'est-à-dire sans contact** avec le bâtiment. De plus, il faut garantir le relevé de toutes les informations nécessaires pour éviter de revenir sur site une deuxième fois. Pour cela, un relevé automatisé sans sélection des informations au moment du relevé est intéressant. Ce type de relevé est également plus rapide et peut être réalisé par une personne seule.

Le relevé sert à constituer la maquette numérique du bâtiment existant. Cette étape de modélisation est actuellement assez longue, car très peu automatisée. La maquette numérique est à la base de la rénovation industrialisée, car elle constitue un support numérique partagé entre les différents intervenants qui permet de réaliser des simulations architecturales, **énergétiques, mécaniques...**

Parmi les nombreuses techniques de relevé tridimensionnel sans contact, les trois principales utilisées pour la mesure et la modélisation 3D de bâtiments sont le relevé

topographique, la lasergrammétrie et la photogrammétrie (voir chapitre 4-II)). Ces trois techniques diffèrent par le matériel utilisé et les résultats obtenus, mais elles comportent **toutes une phase d'acquisition et une phase de traitement des données. Elles permettent de** mesurer des points inatteignables depuis le sol. Mais elles ne permettent pas de relever des points masqués (fenêtre derrière un balcon par exemple), car ce sont des techniques optiques.

Actuellement, ces techniques de relevé tridimensionnel sont utilisées pour des applications spécifiques : relevé de façades de monuments historiques, archéologie ou visualisation 3D **sommaire au niveau d'une ville ou d'un quartier. Mais elles ne sont pas exploitables en l'état** pour une application de rénovation à grande échelle des bâtiments. En effet, elles nécessitent une formation importante à la fois pour la prise de mesures précises (généralement assurée par un géomètre-expert) et pour le traitement des données et la modélisation 3D du bâtiment. Celui-ci est beaucoup plus long que la prise de mesures et nécessite des traitements informatiques complexes.

Des solutions pour lever ces verrous du relevé de l'existant et de l'élaboration de la maquette numérique sont présentées au chapitre 4-II).

c) Configuration de la rénovation

Actuellement, les acteurs de la rénovation travaillent de façon très linéaire : le maître d'ouvrage réalise une première analyse de son parc de logements et décide des bâtiments à rénover en priorité. Il évalue sommairement les travaux à effectuer et détermine le budget maximal de l'opération. Ensuite, il fait appel à une équipe de maîtrise d'œuvre **pour concevoir** le projet et étudier la faisabilité technico-économique. Une étude énergétique valide les choix effectués. Les entreprises sont alors consultées, puis le chantier peut démarrer.

Or, il y a souvent des écarts importants entre ce qui était prévu au départ (objectifs de performance énergétique, de coût, de délai) et ce qui est réalisé. L'objectif de l'industrialisation est justement de maîtriser l'ensemble de ces paramètres et de réduire au maximum les imprévus. Pour cela, il faut une relation forte entre la conception et la fabrication pour anticiper tous les problèmes qui vont se poser en usine et sur chantier. Le plus simple est de restreindre les choix du maître d'ouvrage à une unique solution parfaitement connue et maîtrisée. Mais cela n'est pas possible en rénovation, car la solution technique doit s'adapter au bâtiment existant et chaque bâtiment a ses problématiques spécifiques. De plus, le maître d'ouvrage doit **conserver une certaine marge de manœuvre, notamment sur le choix des** revêtements extérieurs et de certaines fonctionnalités. Il est aujourd'hui possible de fabriquer industriellement des produits personnalisés : c'est ce que l'on appelle la mass customisation ou personnalisation de masse (Da Silveira et al., 2001), très utilisée dans l'automobile par exemple. Des outils informatiques permettent de configurer le produit personnalisable en fonction des demandes du client tout en tenant compte des contraintes de production, de **transport...**

Toute la difficulté est de connaître à l'avance le positionnement des supports ponctuels en tenant compte de la géométrie du bâtiment (nécessité d'un relevé précis) et de l'état de la façade (évaluation sur site, tests de résistance...). De plus, **l'emplacement des supports sur les** façades est en relation avec le calepinage des **panneaux, c'est-à-dire** la façon de couvrir les façades avec les panneaux (nombre, dimensions et position des panneaux). Le calepinage des panneaux dépend également de la géométrie du bâtiment et notamment de **l'emplacement des** menuiseries. Comme les menuiseries sont intégrées aux panneaux, les jonctions entre panneaux doivent être à une distance minimum des menuiseries. Actuellement, le calepinage **des panneaux est effectué rapidement grâce aux connaissances d'un expert.** Par contre, le dessin de chaque panneau **pour préparer la fabrication est très long. Il s'agit d'appliquer un** certain nombre de règles de conception (par exemple : 2 montants en bois encadrent chaque menuiserie). Au final, **on n'est pas sûr que** le calepinage choisi soit **le meilleur, car on n'a pas** effectué de comparaison. Il y a également un manque de données sur les temps et les coûts de fabrication, de transport et de pose de chaque panneau en particulier.

Des solutions pour lever ces verrous de la configuration des produits sont présentées au chapitre 4-III).

d) Coordination des acteurs : gestion de projet et gestion de production

Le dernier point critique est d'ordre organisationnel. Il concerne la coordination des différents acteurs, en particulier les acteurs qui travaillent sur le chantier selon un mode de gestion de projet et les usines qui travaillent sur un mode de planification de production.

Aujourd'hui, les corps de métier nécessaires à la rénovation d'un bâtiment sont nombreux et interviennent directement sur le chantier. Ils approvisionnent sur le chantier des matériaux standardisés directement depuis les entrepôts de fournisseurs et les adaptent sur chantier au bâtiment à rénover. De ce fait, une part importante de la valeur ajoutée est directement créée sur le chantier par les différents corps de métiers, mais de manière peu industrialisée, avec des difficultés très importantes de coordination du projet et une absence totale de coordination des approvisionnements même si, de fait, ils utilisent les mêmes fournisseurs. De même, le retour des déchets est peu pris en compte.

Depuis une vingtaine d'années, l'organisation de chaînes logistiques est apparue dans les domaines de la production manufacturière et de la grande distribution. Suite au recentrage des **entreprises sur leur cœur de métier, source de leur valeur ajoutée, ce concept exprime le** besoin de coordination entre les différentes entreprises qui participent à la production d'un produit ou d'un service pour des consommateurs finaux. Il s'est traduit par le développement important du métier de logisticien qui assure cette coordination. Dans ce domaine, la prise en compte du retour et de la valorisation des déchets, appelée logistique inverse (Bennekrouf et al., 2010), apparaît comme thème de recherche important. De même, la recherche de leviers de performance sur les trois dimensions économique, environnementale et sociétale fait actuellement **l'objet de nombreux travaux** de recherche, en particulier sur le management des chaînes logistiques vertes ou Green Supply Chain Management (GSCM) (Sundarakani et al., 2010 ; Ahi, Searcy, 2013).

Des solutions pour lever ces verrous de la gestion de projet et gestion de production sont présentées au chapitre 4-IV) et au chapitre 6.

3) **État de l'art**

a) Projets de recherche internationaux sur l'industrialisation de la rénovation

i) **L'Annexe 50 de l'Agence Internationale de l'Énergie, un programme de recherche international**

L'Agence Internationale de l'Énergie (AIE), ou International Energy Agency (IEA) en anglais, mène depuis de nombreuses années un programme de recherche international intitulé « Energy Conservation in Buildings research, pilot and demonstration programme ». Ce programme regroupe une soixantaine de projets de recherche appelés « annexes ».

L'Annexe 50, intitulée « Prefabricated Systems for Low Energy Renovation of Residential Buildings » **s'est déroulée de 2005 à 2011** (Zimmermann, 2012). Elle était déclinée dans huit pays européens (Suisse, Pays-Bas, Autriche, République tchèque, Portugal, Suède, Belgique et France) par l'intermédiaire de projets de recherche nationaux.

Pour la France et la Belgique, c'était le projet **RECOLCI** (Réhabilitation Énergétique des immeubles de logements COLlectifs par Composants Intégrés) (Ruot, 2009, 2010a). Ce projet **a été financé par l'ADEME lors de l'appel à projets du PREBAT en 2007 (volet technologie)** et coordonné par Arcelor Mittal Research. Les autres partenaires étaient le CSTB (Centre Scientifique et Technique du Bâtiment), Saint-Gobain Isover, Aldes, Vinci Construction France, EDF R&D et le cabinet d'architecture AETIC.

L'Annexe 50 visait à développer un concept de rénovation globale d'immeubles d'habitation basé sur :

- des toitures préfabriquées **intégrant des systèmes de ventilation, d'ECS et des** panneaux solaires ;
- des enveloppes très isolantes intégrant des systèmes de distribution du chauffage, du rafraîchissement et de la ventilation.

Ce projet a permis d'étudier :

- la typologie des bâtiments en Suisse et en France (Schwehr et al., 2010 ; Ruot, 2010c, 2010b) ;
- les techniques de relevé et modélisation tridimensionnels sans contact (IEA ECBCS Annex 50, [sans date]) ;
- un nouveau système constructif de rénovation (IEA ECBCS Annex 50, [sans date]) ;
- six bâtiments démonstrateurs (Miloni et al., 2011 ; IEA ECBCS Annex 50, 2011b, 2011a, 2011g, 2011c, 2011d, 2011e, [sans date]) ;
- des simulations de rénovation (Zweifel, 2011) ;
- **les décisions d'investissement pour la rénovation énergétique** (Banfi et al., 2012).

Il a également permis de concevoir :

- un guide de conception des modules de rénovation (Kobler et al., 2011) ;
- un guide de conception des stratégies de rénovation (Schwehr et al., 2011) ;
- **un outil d'aide à la décision pour la rénovation** (IEA ECBCS Annex 50, 2011f).

Des exemples de réalisations de Viridén + Partner AG, un architecte partenaire de l'Annexe 50 de l'IEA, sont présentés à la figure 17 (Viridén + Partner AG, 2001, 2005).



Figure 17 : exemples de réalisations de Viridén + Partner AG avec pose de toitures préfabriquées

Les modules développés pour la rénovation des bâtiments sont des panneaux posés sur les façades extérieures des bâtiments, comme présenté en figure 18 (Zimmermann, 2010, p. 14). Ils incluent des gaines techniques pour le passage des fluides.

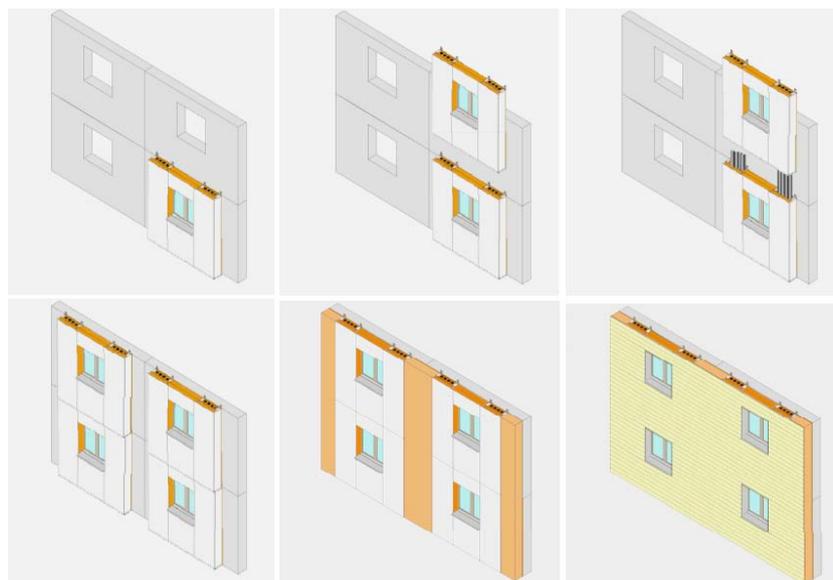


Figure 18 : processus de pose des modules développés dans le cadre de l'Annexe 50 de l'IEA

Les techniques de relevé et modélisation tridimensionnels sans contact qui ont été étudiées sont la photogrammétrie (mesure des dimensions à partir de photographies) et la

lasergrammétrie (mesure des dimensions avec un scanner laser). Une expérimentation a été effectuée avec un drone (IEA ECBCS Annex 50, [sans date]).

L'outil logiciel d'aide à la décision pour la rénovation des bâtiments est nommé « Retrofit Advisor » (IEA ECBCS Annex 50, 2011f). Il se présente sous la forme d'un tableur Excel. Suivant la localisation du bâtiment existant et son potentiel d'utilisation, il permet d'orienter le maître d'ouvrage vers une réparation avec les travaux minimum, une rénovation ou une démolition suivie d'une reconstruction.

ii) TES EnergyFacade, un projet de recherche pour industrialiser la rénovation

Le programme international de recherche WoodWisdom-Net a financé deux projets de recherche consécutifs : TES EnergyFacade (Heikkinen et al., 2011) de 2008 à 2009 et SmartTES (Aalto University, 2011), de 2010 à 2013. 3 pays sont impliqués : Allemagne, Finlande et Norvège.

TES EnergyFacade est un concept de façades à ossature bois pour la rénovation industrialisée (Lattke, 2010 ; Ott, Winter, 2010a, 2010b). Il insiste sur le processus de rénovation à mettre en place avec les outils associés, en particulier pour le relevé du bâtiment existant.

Son objectif est de développer une méthode pour la rénovation énergétique de l'enveloppe des bâtiments, basée sur des éléments préfabriqués de façade à ossature bois. TES EnergyFacade cible les bâtiments existants construits entre 1950 et 1980. C'est un processus **systématique de mesurage, d'étude de la rénovation, de construction** et de maintenance des bâtiments existants, comme représenté en figure 19 (Heikkinen et al., 2011, p. 16).

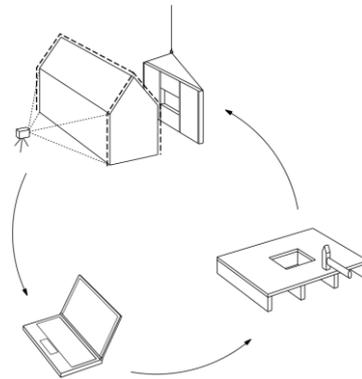


Figure 19 : schéma du processus TES EnergyFacade

Les 3 principales techniques de mesure sans contact ont été testées : relevé topographique, photogrammétrie et lasergrammétrie (voir chapitre 4-II)). Les résultats montrent que la lasergrammétrie est à préconiser dans la plupart des cas, car c'est la seule technique qui permet de mesurer la planéité des façades. Sinon le relevé topographique ou la photogrammétrie multi-images peuvent être utilisées. Il est également possible de combiner plusieurs techniques. Des exemples de modélisation par photogrammétrie et lasergrammétrie sont présentés en figure 20 (Heikkinen et al., 2011, p. 66; 68).

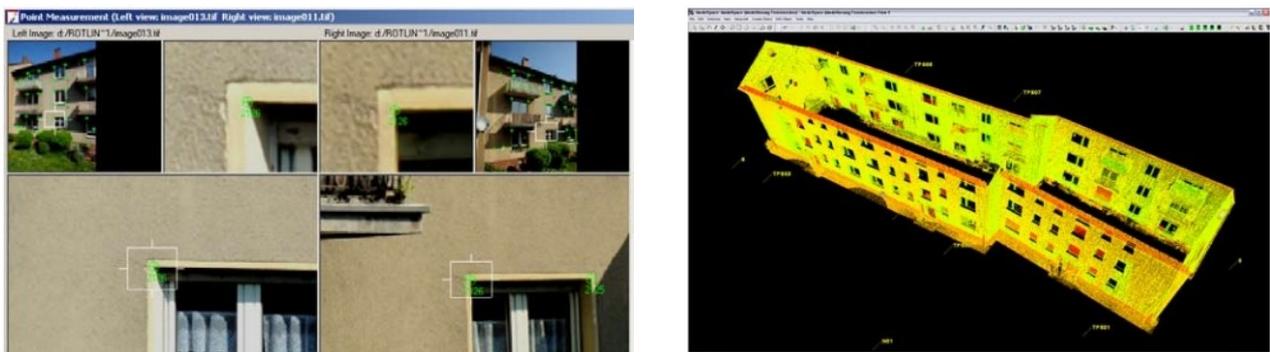


Figure 20 : aperçus d'un logiciel de photogrammétrie multi-images (à gauche) et d'un logiciel de traitement d'un nuage de points obtenu par lasergrammétrie (à droite)

Plusieurs types de mise en œuvre des panneaux à ossature bois sont proposés, comme le montre la figure 21 (Winter et al., 2010, p. 16) :

- accrochage des panneaux par la toiture avec descente de charges ;
- fixation des panneaux sur la façade étage par étage ;
- pose des panneaux sur un socle ou des fondations en bas de la façade ;
- insertion des panneaux entre les planchers de la structure porteuse.

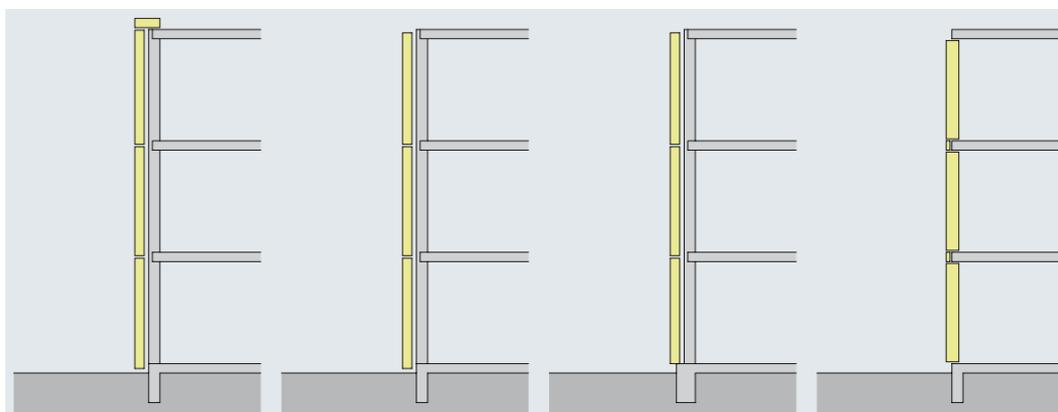


Figure 21 : 4 possibilités de mise en œuvre des panneaux à ossature bois du projet TES EnergyFacade

Plusieurs projets de démonstration ont été réalisés : en Allemagne, avec les entreprises Josef AMBROS GmbH et Huber & Sohn et avec les architectes Hermann KAUFMANN et Florian LICHTBLAU, mais aussi en Norvège.

La figure 22 (Heikkinen et al., 2011, p. 171) montre un collège technique à Risør en Norvège avant et après rénovation par Trebyggeriet AS.



Figure 22 : collège technique à Risør en Norvège avant et après rénovation par Trebyggeriet AS

La figure 23 (Helsinki University of technology, 2009, p. 29 ; Heikkinen et al., 2011, p. 165) montre la rénovation du collège Buchloe en Allemagne par l'entreprise Josef AMBROS GmbH



Figure 23 : rénovation du collège Buchloe en Allemagne par l'entreprise Josef AMBROS GmbH

iii) **E2ReBuild, un projet européen qui poursuit les projets de recherche sur l'industrialisation de la rénovation**

E2ReBuild est un projet de recherche européen qui a pour objectif de transformer le secteur de la rénovation basé sur la construction artisanale en un secteur industrialisé innovant, high-tech et énergétiquement performant. Il s'appuie sur les projets de recherche précédents :

- EBOB : Energy Efficient Behaviour in Office Buildings
- Inpro : Open Information Environment for Collaborative Processes throughout the Lifecycle of a Building
- ManuBuild : Open Building Manufacturing
- PV-NORD : Widespread Exploitation of Building Integrated Photovoltaics in the Northern Dimension of the European Union
- SQUARE : A Quality Assurance System for Improvement of Indoor Environment and Energy Performance when Retrofitting Multifamily Houses
- TES EnergyFacade et smartTES

Il comporte également des démonstrateurs. Il a commencé en janvier 2011 et se terminera en juin 2014. Deux rapports ont déjà été publiés : un sur les techniques de relevé 3D (Ott et al., 2011) et l'autre sur l'évaluation des modèles collaboratifs (Geier et al., 2012).

En résumé, ces projets de recherche **mettent en évidence l'apport d'une structure légère** rapportée sur les façades, mais aussi la nécessité de repenser la rénovation comme un processus global. Ils insistent sur les outils qui permettent une meilleure connaissance du **bâtiment existant et facilitent les phases de conception, d'étude et de préparation des travaux en vue d'une industrialisation complète** de la rénovation énergétique.

b) Projets de recherche français sur l'industrialisation de la rénovation

i) **EFFINOV'Bois, un projet de recherche français avec un industriel de la construction bois**

EFFINOV'Bois est un projet de recherche lauréat de l'appel à projets Habisol (Habitat intelligent et solaire photovoltaïque) de l'ANR (Agence Nationale de la Recherche) en 2009. Il s'intitule : « Systèmes constructifs bois pour la réhabilitation des enveloppes - Efficacité énergétique, comportement hygrothermique et industrialisation » (FCBA, 2012).

Les partenaires du projet EFFINOV bois sont :

- le FCBA (Forêt Cellulose Bois-construction Ameublement) : coordinateur du projet
- le CSTB (Centre Scientifique et Technique du Bâtiment)
- **l'INES (Institut National de l'Énergie Solaire) et le CEA (Commissariat à l'Énergie Atomique)**
- le laboratoire de recherche Transferts Écoulements Fluides Énergétique (TREFLE) de **l'université Bordeaux 1**
- **le Laboratoire d'Informatique Appliquée à l'Architecture (Li2a) de l'École Nationale Supérieure d'Architecture de Toulouse**
- un industriel de la construction bois : Ossabois
- **un maître d'ouvrage : ADYAL - URBANIA**
- la FIBC (Fédération de l'Industrie Bois-Construction)

Le projet porte sur des complexes génériques industrialisés multifonctionnels à base de bois, destinés à la réhabilitation des **façades par l'extérieur**.

Une étude a été menée pour évaluer l'impact de l'augmentation d'épaisseur de la façade sur le confort visuel (Béjat et al., 2012). La perte de lumière naturelle dans l'espace intérieur a été évaluée avec des simulations numériques et des mesures expérimentales.

ii) Synthèse des projets lauréats du PUCA-Réha

Un appel à propositions a été lancé par le PUCA (Plan Urbanisme Construction Architecture) fin 2008 pour sélectionner des projets concernant un ou plusieurs bâtiments-supports identifiés. 17 projets ont été retenus sur les 69 proposés après une sélection sur les critères suivants : **qualité architecturale et qualité d'usage, qualité technique et excellence énergétique, efficacité économique**. L'analyse et la comparaison des projets lauréats du PUCA-Réha fournissent un bon aperçu des différentes techniques innovantes pour la rénovation thermique et architecturale des bâtiments de logements collectifs (PUCA, Comité « Bâtiments existants » du PREBAT, 2010).

« **La plupart des projets partent de l'isolation par l'extérieur pour améliorer ou renouveler complètement l'image des bâtiments, sans pourtant se limiter à coller cette nouvelle peau à l'ancienne. De nouveaux éléments, comme des *plugs* préfabriqués industriellement, apportent des modulations de façade et de volumétrie.** » (PUCA, Comité « Bâtiments existants » du PREBAT, 2010, p. 10).

« La forme architecturale dépend aussi du rapport intérieur-extérieur décliné à travers de nouveaux éléments de programme comme :

- **l'agrandissement des pièces ;**
- **l'addition d'espaces extérieurs privatifs ou de pièces aux finitions brutes ou de locaux techniques ;**
- le passage de réseaux entre la structure et la peau.

La mise en place, par l'extérieur, d'éléments préfabriqués est la solution la plus couramment utilisée pour répondre aux contraintes d'intervention en milieu occupé :

- **un tiers des projets met en œuvre des systèmes préfabriqués 2D (panneaux de façade essentiellement) ;**
- une dizaine de projets utilise des modules préfabriqués 3D.

Des modes constructifs par assemblage sont donc le plus souvent proposés : structure métallique pour une dizaine de projets, mais surtout structure bois pour un tiers des projets. » (PUCA, Comité « Bâtiments existants » du PREBAT, 2010, p. 11)

« Le maintien des habitants dans leur logement est souvent une condition incontournable dans une opération de réhabilitation. Deux stratégies, souvent combinées, sont proposées :

- **intervenir par l'extérieur afin de limiter les interventions dans les appartements ;**
- **mettre en œuvre des éléments préfabriqués afin de réduire les nuisances de chantier.** » (PUCA, Comité « Bâtiments existants » du PREBAT, 2010, p. 12).

Pour la rénovation thermique et architecturale des façades en parties courantes, la plupart **des projets proposent d'intervenir par l'extérieur avec, soit une Isolation Thermique par l'Extérieur classique (mur manteau) ou avec panneaux de façade préfabriqués, soit l'ajout**

d'une façade ventilée, soit la création d'un espace tampon, soit le démontage de la façade existante et son remplacement par une nouvelle façade.

Des extensions ou surélévations sont souvent proposées, car l'augmentation de loyer induite peut compenser une partie du coût de la rénovation : pour les balcons et loggias (fermeture et transformation en espace tampon), pour les façades (plugs) ou pour les toitures (surélévations).

À titre d'illustration de ces projets, la figure 24 présente un aperçu avant et après rénovation du projet 41 (Machet) : création d'un espace tampon de 1,8 m avec une façade autoportée en modules béton préfabriqués (PUCA, Comité « Bâtiments existants » du PREBAT, 2010, p. 66-67).



Figure 24 : aperçu avant et après rénovation du projet 41 (Machet), lauréat du programme PUCA-Réha en 2009

Ces projets sont intéressants pour les technologies présentées qui utilisent la préfabrication, mais restent à l'état de concepts théoriques à développer à grande échelle avec industrialisation.

c) Exemples de réalisations en France

Au-delà des projets de recherche internationaux et français, plusieurs réalisations ont été effectuées ces dernières années. Voici deux exemples de rénovation des façades en site occupé : la cité universitaire La Bourgeonnaire à Nantes et le lycée Auguste Pavie à Guingamp.

i) **Rénovation de la cité universitaire La Bourgeonnaire à Nantes**

Les façades de cette cité universitaire ont été rénovées avec des panneaux préfabriqués à ossature bois fabriqués par l'entreprise Cruard charpente. Les panneaux livrés sur le chantier sont isolés et comprennent le frein-vapeur. Le délai de réalisation sur site est de 2 jours par façade. La figure 25 (Ouest-France, 2010 ; Cruard charpente, [sans date], p. 2) montre la pose des panneaux à ossature bois en façades avec un camion-grue.



Figure 25 : rénovation de la cité universitaire La Bourgeonnaire à Nantes avec des panneaux à ossature bois par Cruard charpente

ii) Rénovation du lycée Auguste Pavie à Guingamp

Ce lycée a été construit dans les années 1960 avec une structure béton en poteaux-poutres, des panneaux sandwich de 6 cm en façades et une vêtiture extérieure en amiante-ciment. Les menuiseries étaient en aluminium simple vitrage. L'intérieur des bâtiments avait déjà fait l'objet d'une rénovation totale : cloisons, plafonds, menuiseries intérieures, sanitaires, fluides, électricité et revêtements de sol.

La rénovation extérieure a eu lieu pendant que le bâtiment était occupé (salles de classe, internat et logements de fonction). La nouvelle façade a été entièrement préfabriquée en atelier. Comme la trame poteaux-poutres n'était pas régulière, chaque panneau à ossature bois devait être spécifique. Pour cela, le bureau d'études Quemper Structures Bois a effectué le relevé des façades avec un télémètre Hilti en une semaine. Suivant ces mesures, il a dessiné les plans des panneaux à ossature bois en avec le logiciel Cadwork et les a envoyés directement au fabricant Turmel.

2 034 panneaux de 3,60 par 3,30 m ont été réalisés sur mesure et acheminés par camion sur le site. Chaque panneau a demandé environ 1 h de pose : pose par grutage au laser avec une tolérance maximum de 5 mm.

La figure 26 (Boivin, Baudrand, 2010, p. 37) montre la pose des panneaux à ossature bois avec une grue télescopique et les différentes phases du chantier :

- façade existante ;
- éléments de façade existants démontés ;
- panneaux à ossature bois posés sans le bardage ;
- façade rénovée.



Figure 26 : rénovation du lycée Pavie à Guingamp par Turmel : pose des panneaux à ossature bois en cours

Les travaux ont été fractionnés par zones d'intervention et selon le phasage suivant :

- pose des linders en bois sur les nez de dalles et de refends ;
- démontage et évacuation des façades existantes ;
- obstruction provisoire des façades par bâchage ;
- pose et fixation des panneaux préfabriqués à ossature bois ;
- pose des menuiseries en aluminium ;
- pose de la vêtiture extérieure et habillage des tableaux ;
- finitions intérieures, peinture.

La figure 27 (Boivin, Baudrand, 2010, p. 39) montre le chantier en cours une partie où les façades existantes ont été démontées et bâchées, une partie où les panneaux à ossature bois ont été posés sans le bardage et une partie où le bardage est posé sur les panneaux à ossature bois. La pose du bardage est effectuée avec une nacelle élévatrice.

Au total, le chantier a duré 15 mois et a coûté 1,95 million d'euros.



Figure 27 : rénovation du lycée Pavie à Guingamp par Turmel : de gauche à droite, façade existante, façade protégée par des bâches, panneaux à ossature bois posés, vêtue extérieure en cours de pose et posée

En résumé, ces exemples illustrent l'intérêt des panneaux à ossature bois dans la rénovation thermique de façades. Ils mettent en évidence la problématique du relevé de façade pour la pose des fixations des panneaux. De plus, les panneaux ne comprennent pas d'autres fonctionnalités (dans le premier exemple, les menuiseries n'étaient pas intégrées dans les panneaux) et le bardage a été réalisé sur site, ce qui réduit l'intérêt de la préfabrication.

Chapitre 4 : Solutions proposées pour la rénovation industrialisée

Pour parvenir à des rénovations industrialisées, il faut proposer :

- **de nouvelles solutions techniques :**
 - pour le système constructif et le procédé de fabrication,
 - pour le relevé 3D et la maquette numérique ;
- **de nouvelles solutions support :**
 - pour la configuration de la rénovation,
 - pour la gestion de production.

l) Solutions pour le système constructif et le procédé de fabrication

1) Objectifs

L'industrialisation de la rénovation énergétique vise à réduire son coût et son délai et à améliorer sa qualité et son bilan environnemental. Ces objectifs peuvent être déclinés au niveau du système constructif.

La conception d'un système constructif pour la rénovation énergétique industrialisée des bâtiments est guidée par quatre principes :

- l'adaptation aux spécificités de la rénovation des bâtiments ;
- la préfabrication des produits en usine ;
- la personnalisation de masse (mass customisation) des produits ;
- les performances élevées des produits.

La principale spécificité de la rénovation, c'est qu'on ne part pas d'une feuille blanche. On traite des bâtiments existants qui ont été construits selon les réglementations précédentes et dont l'état a évolué depuis. Par rapport à une opération de construction neuve, il faut ajouter une étape de diagnostics pour connaître l'état actuel des bâtiments.

La plupart du temps, ces bâtiments existants sont occupés par des locataires ou des propriétaires dans les logements ou par des employés dans les bureaux. À moins de réaliser les travaux lors d'un changement de propriétaire ou d'affectation des bâtiments, il est difficile de réaliser les travaux dans les bâtiments vides. La plupart du temps, les bâtiments restent donc occupés pendant la durée des travaux.

L'Isolation Thermique par l'Extérieur (ITE) est une technique qui convient particulièrement à la rénovation en site occupé, car elle consiste à appliquer un isolant sur les façades extérieures des bâtiments. De plus, ses performances thermiques sont plus élevées qu'une isolation par l'intérieur, car l'isolant recouvre toute la surface des façades : il n'est pas interrompu par les planchers, les murs de refends et les cloisons intérieures.

Plutôt que d'utiliser un système constructif prévu pour la construction neuve, il s'agit de concevoir un système constructif adapté aux spécificités de la rénovation. Par exemple, la fonction principale en rénovation n'est pas structurelle, mais isolante. Il n'est donc pas nécessaire d'avoir un système constructif mécaniquement porteur puisqu'on l'accroche au bâtiment existant. Cela permet de réduire le coût des matières premières en conservant juste celles strictement nécessaires. De plus, réduire les éléments structurels au profit des éléments isolants améliore la performance énergétique des produits.

Il faut par contre tenir compte des bâtiments existants pour prévoir les systèmes de fixation des produits sur les façades existantes et le traitement des points singuliers (tous les éléments particuliers d'une façade, tels que les rebords de fenêtre, les balcons, les entrées d'air pour la ventilation...).

La préfabrication des produits consiste à transférer une partie du travail effectué sur chantier vers une usine de production. D'où une réduction du temps de pose sur chantier et de

la gêne occasionnée pour les occupants et la possibilité de mettre en place un processus qualité non affecté par les aléas du terrain (aléas climatiques, impacts de la sous-traitance...).

La préfabrication permet aussi d'automatiser la fabrication des produits avec des équipements en usine qui ne pourraient pas être utilisés sur chantier. **D'où une** réduction du coût de main-d'œuvre au profit du coût du matériel de fabrication (lignes de montage automatisées) et de pose (moyens de levage).

La préfabrication peut également augmenter le coût du transport.

La personnalisation de masse consiste à fabriquer des produits personnalisés, donc sur mesure, à la manière de produits standards (Da Silveira et al., 2001). La préfabrication des produits impose de connaître précisément la géométrie des bâtiments existants (voir partie II)). Mais elle permet de fabriquer des produits sur mesure adaptés au bâtiment existant à rénover.

Pour personnaliser les produits, on doit connaître l'ensemble de leurs variantes et options. On peut alors les configurer (voir partie III)), c'est-à-dire paramétrer les produits en fonction des contraintes des bâtiments existants, des exigences de performance énergétique et des exigences architecturales.

On passe alors de volumes de matériaux à poser sur chantier à une nomenclature des produits associée à une gamme de montage. On travaille en flux tendu avec un stock minimum. La gestion de production et la planification du chantier doivent être adaptées pour fabriquer des produits sur mesure en fonction des besoins de pose du chantier (voir partie IV) et chapitre 6).

Il ne s'agit pas d'industrialiser la rénovation pour réduire seulement le coût au détriment de la qualité des produits. La préfabrication améliore la maîtrise de la qualité des produits par le **travail à l'abri des conditions climatiques, l'utilisation de matériel et d'outils adaptés et des contrôles facilités.**

Une qualité élevée est indispensable, car les ajustements sur chantier sont à éviter au maximum. En effet, **ils font perdre tout l'intérêt de la préfabrication** qui est la réduction du délai sur site.

Les produits sont sur mesure, donc adaptés aux spécificités des bâtiments existants. La configuration permet de valider, dès la conception, la faisabilité technique de fabrication et de pose.

La préfabrication permet également de réduire la production de déchets sur chantier. En **fabrication, la production de déchets est minimisée par l'anticipation** de la production (par exemple, **l'optimisation des découpes à faire dans une plaque d'isolant**) et la réutilisation des chutes.

L'utilisation de matériaux naturels et renouvelables, comme le bois, améliore le bilan environnemental qui pourrait être réduit par le transport des produits.

2) Principe général

Le système constructif proposé ne concerne que l'isolation des façades (parties opaques et vitrées). **C'est un des travaux les plus importants, avec l'isolation de la toiture, pour réduire les** déperditions thermiques des bâtiments. Mais pour atteindre une performance énergétique élevée, **il faut réaliser l'ensemble des travaux prévus dans une rénovation énergétique** globale : isolation du plancher (si possible), amélioration de la ventilation et des équipements

de chauffage et de production d'eau chaude sanitaire... L'isolation des façades est un des points difficiles à traiter en rénovation.

L'idée de départ est d'« habiller » les façades existantes par une nouvelle enveloppe isolante. Pour cela, plusieurs options sont possibles :

- utiliser le bâtiment existant comme support de la nouvelle enveloppe (accrochée aux façades ou suspendue à la toiture) ou construire une nouvelle enveloppe autoporteuse (désolidarisée des façades existantes) ? ;
- utiliser des composants de grandes dimensions (pour réduire les jonctions) ou de taille réduite (pour augmenter le niveau de standardisation) ? ;
- préfabriquer entièrement la nouvelle enveloppe en usine (pour diminuer le temps de travail sur site) ou livrer des kits prêts à poser sur le chantier ? ;
- intégrer d'autres fonctionnalités que l'isolation dans la nouvelle enveloppe (menuiseries, **ventilation, électricité, panneaux solaires...**) ? ;
- fabriquer une nouvelle enveloppe parfaitement adaptée au bâtiment existant ou prévoir des systèmes d'ajustement ? ;
- privilégier la performance thermique, la maîtrise de la qualité, la facilité de pose, le **temps de mise en œuvre, le coût...** ? ;
- etc.

Suite à l'analyse de l'état de l'art (voir chapitre 3-III)3), nous proposons un système constructif basé sur une **ossature métallique avec des panneaux de remplissage à ossature bois**. Ce système constructif est dédié à la rénovation des immeubles de logements collectifs.

Il présente plusieurs ruptures technologiques pour atteindre un haut niveau d'industrialisation :

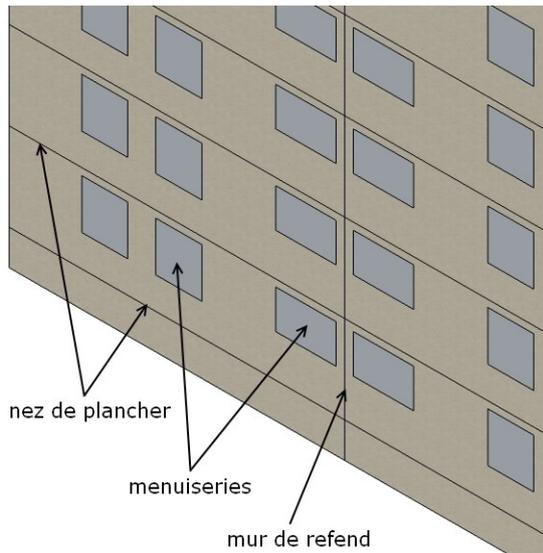
- la préfabrication (en usine) de panneaux de grandes dimensions intégrant plusieurs fonctionnalités techniques, dont l'isolation, la finition esthétique, l'étanchéité à l'air, mais aussi la production et la gestion des énergies et des fluides ;
- leur installation sur site précise et rapide grâce à la pose préalable d'une ossature métallique porteuse permettant de s'affranchir des irrégularités du bâtiment et de créer un support à la géométrie parfaitement contrôlée.

Les panneaux de remplissage sont :

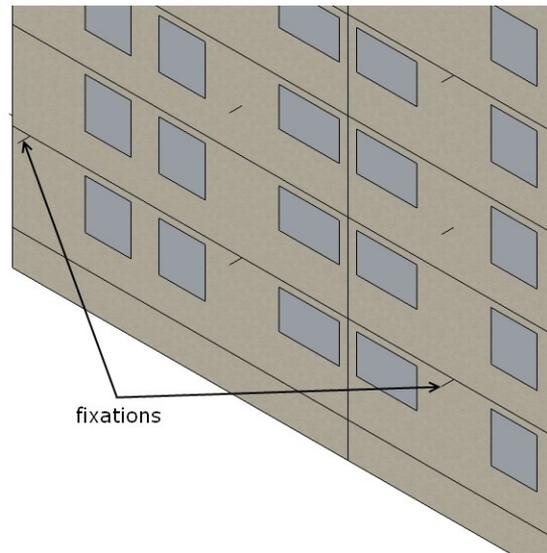
- de grandes dimensions (réduction des interfaces) ;
- complets (niveau élevé de finitions réalisées en atelier) ;
- multifonctionnels (intégration d'équipements, augmentation de la valeur ajoutée) ;
- préfabriqués à partir de kits prédéfinis (avec les outils logiciels), avec automatisation de la production.

La nouvelle enveloppe (ossature métallique et panneaux de remplissage) est séparée du bâtiment existant par une lame d'air non ventilée. Certains points singuliers se retrouvent dans la lame d'air, notamment les appuis de fenêtre, ce qui évite de les traiter spécifiquement. La lame d'air peut aussi être utilisée pour le passage des gaines de ventilation, des câbles électriques... Mais elle peut poser des problèmes de propagation du feu qu'il faut résoudre.

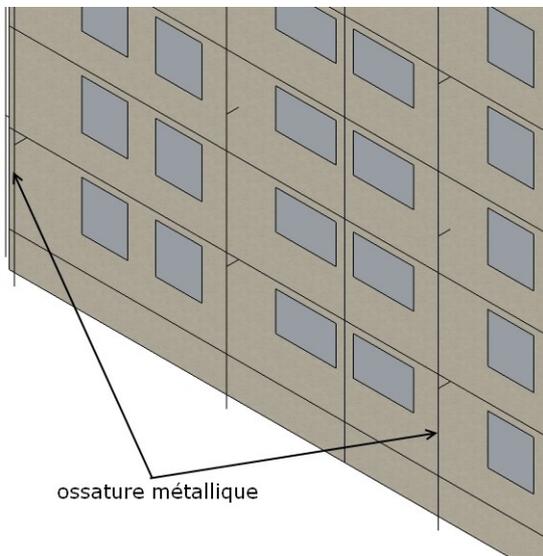
La figure 28 montre les étapes de pose des fixations, de l'ossature métallique et des panneaux sur un bâtiment existant.



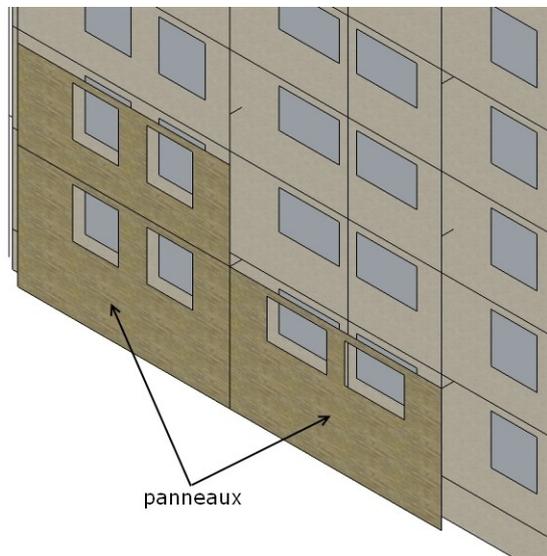
Étape 1 : bâtiment existant



Étape 2 : pose des fixations



Étape 3 : pose de l'ossature métallique



Étape 4 : pose des panneaux

Figure 28 : étapes de pose des fixations, de l'ossature métallique et des panneaux sur un bâtiment existant

3) Panneaux de remplissage

a) Composition

Les panneaux de remplissage sont des panneaux isolants qui n'ont pas de fonction porteuse. Au niveau mécanique, ils doivent supporter leur propre poids et résister aux conditions climatiques (pluie, neige et vent).

Les dimensions maximales des panneaux sont en général limitées par les contraintes du transport routier, soit 3,5 m x 13 m.

b) Plusieurs structures de panneaux possibles

Les panneaux de remplissage peuvent être des panneaux à ossature bois ou des panneaux sandwichs.

i) Panneaux à ossature bois

Un panneau à ossature bois comporte toujours 3 composants essentiels : l'ossature en bois, la plaque de contreventement et l'isolant.

L'ossature en bois est constituée d'éléments de section rectangulaire (montants et traverses) fixés entre eux. Un isolant est disposé entre les montants. Pour améliorer la performance thermique, une couche d'isolation complémentaire peut être ajoutée côté intérieur et/ou extérieur du panneau. Pour assurer la non-déformabilité de la structure dans son plan, une plaque de contreventement, généralement à base de fibres de bois, est fixée sur les montants d'ossature.

En fonction de la perméabilité à la vapeur d'eau des matériaux, un pare-vapeur ou frein-vapeur (film ou fonction assurée par la plaque de contreventement) est posé côté intérieur du panneau. Côté extérieur, le panneau est muni d'un pare-pluie (film étanche ou fonction assurée par l'isolant extérieur) pour le protéger des intempéries. Ainsi constitué, le panneau reçoit un revêtement extérieur (bardage bois, enduit, brique, pierre...). Un revêtement intérieur (lambris, plaque de plâtre...) est nécessaire en construction neuve, mais pas en rénovation.

La figure 29 montre un exemple de panneau à ossature bois pour la construction neuve (Étre bois, [sans date]).

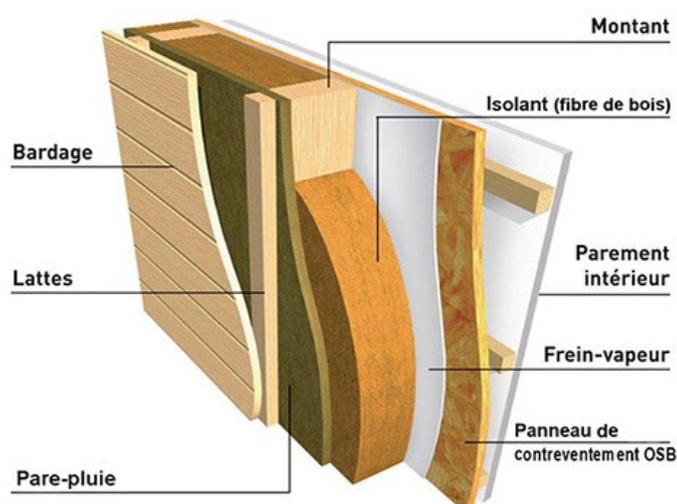


Figure 29 : plan de coupe d'un mur à ossature bois

ii) Panneaux sandwichs

Les panneaux sandwichs sont constitués d'un isolant inséré (en « sandwich ») entre deux revêtements.

Les revêtements peuvent être :

- deux tôles métalliques : en acier (galvanisé ou inoxydable) ou en aluminium
- deux panneaux de particules de bois

Un des panneaux peut avoir une fonction esthétique : aluminium laqué, lambris, plâtre...

Différents types d'isolants peuvent être utilisés :

- mousse polyuréthane : injectée ou collée
- polystyrène : expansé ou extrudé
- laine minérale
- isolants naturels : fibres ou laine de bois, chanvre...

Les panneaux sandwichs acier/mousse polyuréthane, comme ceux présentés à la figure 30 (Maison à part, 2012), sont les plus courants. Ils sont notamment utilisés pour le bardage et la couverture de bâtiments industriels et tertiaires.



Figure 30 : exemple de panneau sandwich acier/mousse polyuréthane

Contrairement aux panneaux à ossature bois, les panneaux sandwichs ont les mêmes propriétés thermiques et mécaniques sur toute leur surface. Par contre, ils sont actuellement fabriqués à partir de matériaux au bilan environnemental controversé.

c) Intégration des menuiseries

Les panneaux intègrent les menuiseries avec leurs systèmes d'occultation (volets roulants, brise-soleil, etc.), des équipements tels que les réseaux de ventilation, d'électricité, des panneaux solaires... Pour faciliter la pose des panneaux, les nouvelles menuiseries sont légèrement plus petites que les menuiseries existantes. Un système d'adaptation permet de réaliser la jonction entre le panneau et l'ouverture existante. L'avantage du système réside également dans la possibilité de positionner le système d'occultation comme le coffre de volet roulant dans le mur, ce qui permet de conserver le clair de jour voire de l'augmenter si initialement la menuiserie de l'ancienne façade disposait déjà d'un volet roulant.

La jonction entre les menuiseries et les façades est un point délicat à traiter. Il est prévu de démonter les anciennes menuiseries par l'intérieur des logements. Les nouvelles menuiseries seront posées en usine sur un caisson tunnel fixé sur les panneaux de remplissage. L'étanchéité à l'air à ce niveau est donc gérée en usine. Lors de l'installation des panneaux de remplissage, les caissons s'insèrent dans les ouvertures. Il est prévu un élément complémentaire en laine de roche pour combler l'interstice entre le caisson et la baie et ainsi assurer la sécurité incendie et le confort acoustique. Il faut enfin prévoir un dispositif spécifique pour la réalisation de l'étanchéité à l'air sur le gros œuvre existant ainsi que la finition depuis l'intérieur du logement.

La figure 31 montre l'intégration d'une menuiserie dans un panneau de remplissage.

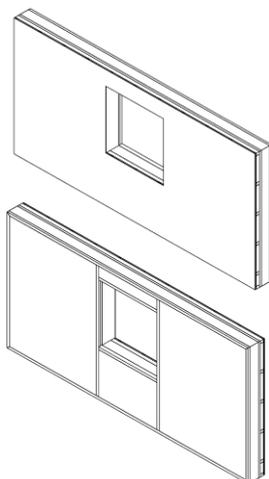


Figure 31 : vue en perspective d'un panneau de remplissage intégrant une menuiserie

d) Finitions extérieures des panneaux

Toutes les finitions possibles en Isolation Thermique par l'Extérieur (ITE) sont envisagées : bardage, enduit...

Si la finition est un bardage, elle peut être entièrement posée en usine. Les panneaux seront livrés finis. Cela nécessite d'étudier architecturalement le calepinage des panneaux, car les jonctions entre panneaux sont visibles. C'est la raison pour laquelle le bardage est souvent posé sur site (voir chapitre 3-III)3c)), même si cela réduit fortement l'intérêt de la préfabrication.

Si la finition est un enduit, elle ne peut pas être entièrement réalisée en usine. En effet, l'enduit risque de se fissurer pendant le transport. Mais de nouvelles solutions techniques permettent de réaliser les premières couches d'enduit sur les panneaux à ossature bois en usine. Il reste alors à réaliser sur site la jonction entre panneaux et éventuellement une couche de finition.

Pour que la préfabrication soit vraiment intéressante, il faut éviter l'installation d'un échafaudage, surtout s'il ne sert que pour la pose des finitions extérieures des panneaux. L'objectif est de finir les panneaux au maximum en usine et de réaliser les jonctions entre panneaux avec des nacelles élévatrices.

e) Possibilités architecturales

Les possibilités architecturales sont nombreuses avec ce concept, car la nouvelle façade est indépendante de la façade existante. Sont envisagés :

- des balcons désolidarisés de la façade existante ;
- des jardins d'hiver ou un ajout de surface aux logements ;
- des extensions ponctuelles qui permettent de casser la planéité d'une façade ;
- etc.

Ces extensions seront fixées sur l'ossature métallique et réalisées avec des panneaux de remplissage (à ossature bois ou en bois massif contrecollé).

f) Options pour la fabrication des panneaux : sur commande ou avec différenciation retardée

Il y a deux options :

- fabriquer des panneaux sur mesure avec une ligne de production robotisée grâce à une prise de cotes précise et une maquette numérique qui permet de générer facilement les commandes machines ;
- fabriquer des panneaux standards sur stocks et les personnaliser à la commande.

i) Fabrication sur mesure

La fabrication sur mesure est bien développée dans la construction neuve à ossature bois, mais pose des problèmes en rénovation, car les outils de relevé dimensionnel et de gestion de la maquette numérique sont encore difficiles à mettre en œuvre (coût, incompatibilité des logiciels...).

De plus, la fabrication sur mesure a lieu après la commande, ce qui complique la gestion de la production. En effet, les délais de production (entre la commande et l'implantation sur site) doivent être réduits dans une rénovation industrialisée. Mais les imprévus sont parfois difficiles à gérer. Par exemple, en cas d'erreur sur un panneau ou d'endommagement pendant le transport, il faudra fabriquer un nouveau panneau en urgence. De même, il sera difficile d'intégrer rapidement dans le planning de production un ordre de fabrication pour une commande importante.

ii) Fabrication avec différenciation retardée

Les objectifs sont :

- **de standardiser les panneaux, c'est-à-dire** de fabriquer à la chaîne des panneaux identiques ;
- de minimiser les « chutes » **des matériaux, c'est-à-dire d'éviter de découper les matériaux de telle sorte qu'il reste des morceaux difficilement utilisables pour la fabrication. Par exemple, avec des montants d'ossature en bois livrés en longueurs de 5 m**, le fait de débiter des montants de 3,5 m génère des chutes de 1,5 m (qui peuvent être réutilisées pour les allèges des menuiseries) tandis que débiter des montants de 2,5 m ne génère pas de chutes ;
- **d'industrialiser la fabrication, c'est-à-dire** de robotiser les opérations ;
- **de fabriquer sur stocks, c'est-à-dire** de fabriquer des panneaux standards sur la base des prévisions de ventes et non sur les commandes.

Les panneaux ont une composition fixée, avec éventuellement quelques variantes : 2 ou 3 **épaisseurs d'isolant** par exemple. Les dimensions maximales des panneaux sont limitées par la chaîne de production : par exemple, 3 m de largeur et 9 m de longueur. Pour faciliter le **calepinage, 2 ou 3 tailles de panneaux sont définies à l'avance. Les panneaux produits sont** tous identiques et sont définis par une référence produit.

Les panneaux sont fabriqués à la chaîne sur une ligne de production automatisée. Ils sont **stockés en attente d'être vendus (vente sur stocks). Après la commande, on découpe les** ouvertures pour les menuiseries en fonction du relevé du bâtiment existant.

Cette solution n'est actuellement pas possible en construction à ossature bois, mais pourrait être envisagée à l'avenir. Le principal problème est que les panneaux à ossature bois ont des renforts **autour des menuiseries (deux montants verticaux de chaque côté). Si l'on fabrique** des panneaux standards, il faut les renforcer autour des menuiseries. On propose des renforts **métalliques qui porteraient les menuiseries, de la même façon que l'ossature métallique porte** les panneaux sur une façade.

4) Fixations et ossature métallique éventuelle

a) Composition

L'ossature métallique comprend :

- une ossature primaire : des **profilés verticaux qui s'élèvent le long de la façade** existante ;
- une ossature secondaire : des profilés horizontaux qui se fixent sur chaque panneau pour permettre leur grutage.

b) Options pour la fixation des panneaux sur le bâtiment existant

Suivant la solidité des éléments structurels des façades existantes, la complexité géométrique et la **hauteur du bâtiment à réhabiliter, l'ossature** métallique peut être :

- accrochée directement aux façades existantes si les calculs et les essais de performance in situ prouvent que le bâtiment peut recevoir le surpoids du nouveau complexe de façade ;
- suspendue à la toiture existante avec la création d'un portique passant par-dessus la toiture si celle-ci peut supporter la charge supplémentaire ;
- posée sur de nouvelles fondations dimensionnées en conséquence et fixée ponctuellement sur les façades existantes ;
- remplacée par des fixations ponctuelles sur les façades existantes, réglables dans les 3 dimensions, sur lesquelles les panneaux sont posés directement.

Elle est « indépendante » du bâtiment existant :

- au niveau géométrique, les profilés ne sont pas forcément positionnés selon la trame des façades existantes (planchers et refends) ;
- **au niveau mécanique, l'ossature métallique peut être désolidarisée du bâtiment existant** si elle est posée sur des fondations indépendantes.

Dans tous les cas, l'ossature métallique permet :

- de créer un plan parfaitement vertical pour accueillir les panneaux de remplissage ;
- **d'assurer un réglage très précis du support plan vertical pour accueillir les panneaux de remplissage** ;
- **d'alléger la structure bois du panneau de remplissage**, car elle servira de support mécanique d'étage à étage ;
- **d'augmenter sensiblement la performance des panneaux de remplissage à épaisseur équivalente.**

i) Ossature accrochée aux façades

Des fixations ponctuelles sont posées sur les façades existantes à des points précis (où la résistance mécanique est vérifiée) : **par exemple, nez de planchers, refends, façade porteuse...** L'ossature métallique est ensuite posée sur ces fixations et réglée de façon à obtenir un plan parfaitement vertical. Les panneaux sont fixés sur l'ossature métallique indépendamment des fixations ponctuelles, comme représenté en figure 32 : par exemple, on peut avoir des fixations ponctuelles tous les 3 m et des panneaux de 2,5 m de hauteur.

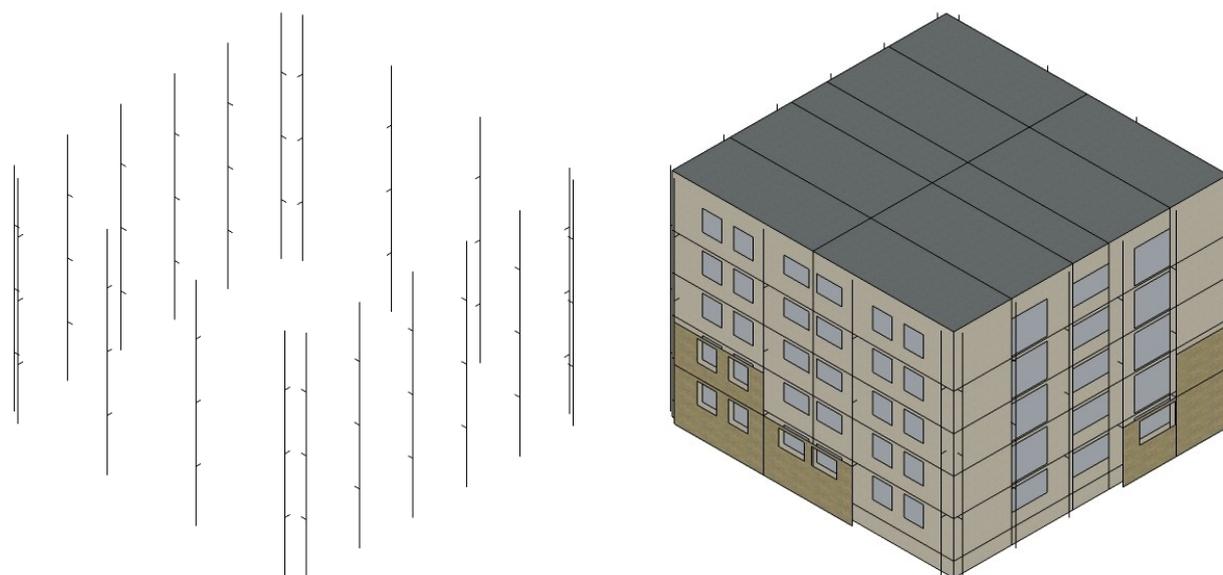


Figure 32 : ossature avec fixations (à gauche), panneaux fixés au bâtiment au moyen d'une ossature accrochée aux façades du bâtiment (à droite)

ii) Ossature suspendue à la toiture

Des fixations ponctuelles sont posées sur la toiture et sont reliées par des profilés passant par-dessus la toiture pour réaliser un portique, comme représenté en figure 33. L'ossature métallique est suspendue à ces fixations et réglée. Des fixations ponctuelles en façade assurent le contreventement (résistance aux efforts du vent) de la nouvelle façade. Les **panneaux sont ensuite fixés sur l'ossature métallique.**

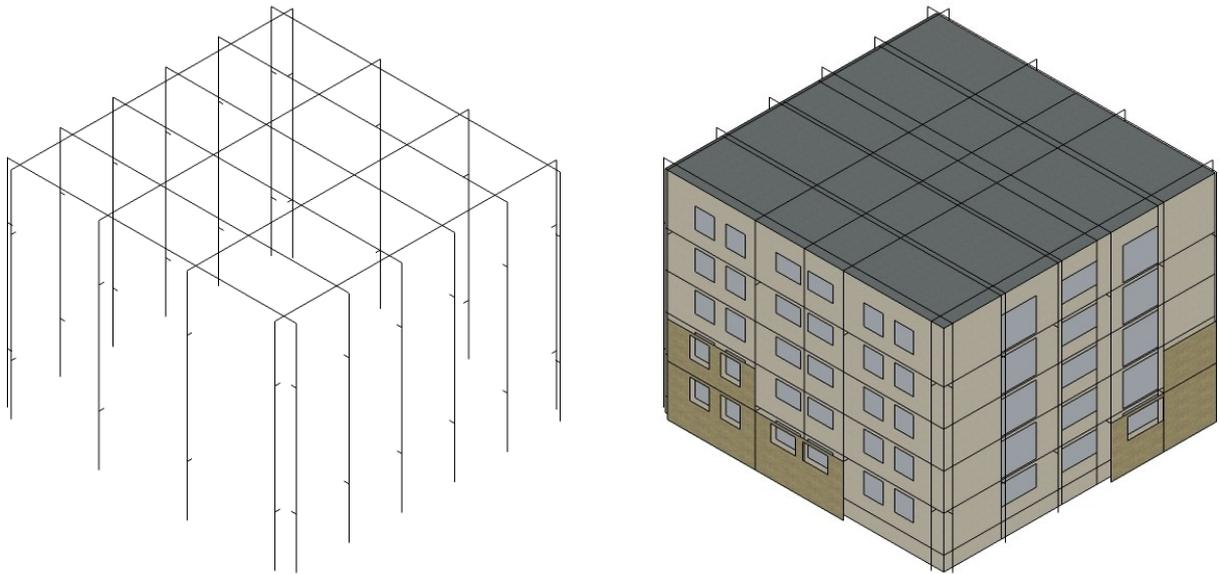


Figure 33 : ossature avec fixations (à gauche), panneaux fixés au bâtiment au moyen d'une ossature suspendue à la toiture du bâtiment (à droite)

iii) Ossature sur fondations

Des fondations, ponctuelles ou filantes, sont réalisées. Elles peuvent être indépendantes du bâtiment existant ou reposer sur les fondations existantes. L'ossature métallique repose sur ces fondations. Des fixations ponctuelles en façade assurent le contreventement de la nouvelle façade. Les panneaux sont ensuite fixés sur l'ossature métallique.

Ossature sur fondations ponctuelles

Les fondations ponctuelles peuvent être constituées de micro-pieux, comme représenté en figure 34.

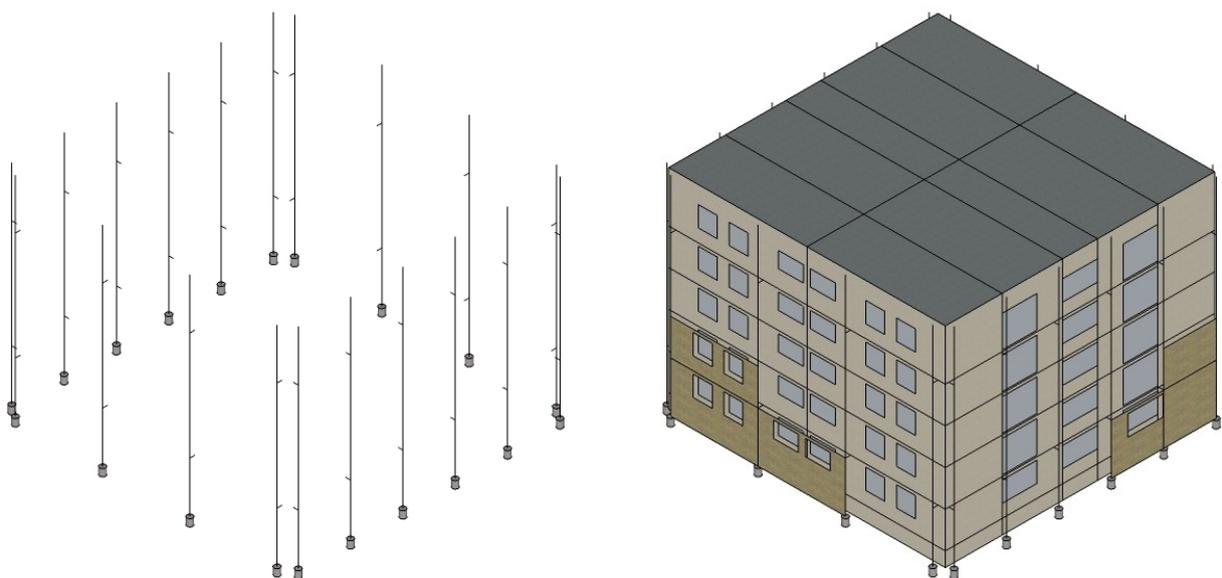


Figure 34 : ossature avec fixations et fondations ponctuelles (à gauche), panneaux fixés au bâtiment au moyen d'une ossature sur fondations ponctuelles (à droite)

Ossature sur fondations filantes

Les fondations filantes permettent de créer une surface horizontale d'aplomb pour recevoir les panneaux de remplissage en soubassement. Elles peuvent être constituées de longrines ou coulées sur site, comme représenté en figure 35.

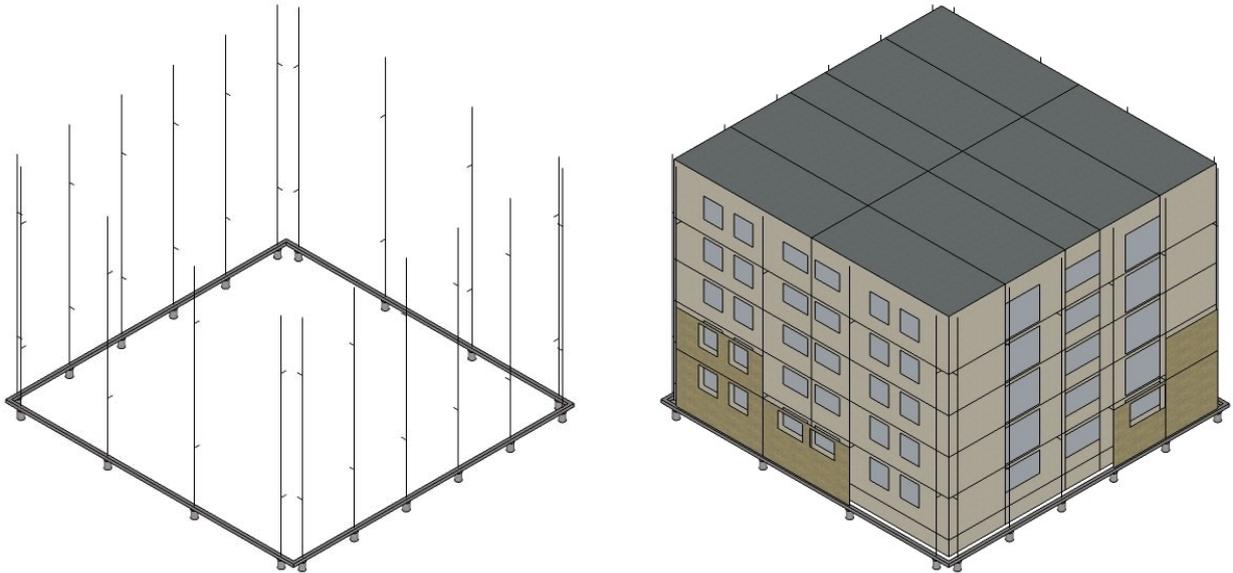


Figure 35 : ossature avec fixations et fondations filantes (à gauche), panneaux fixés au bâtiment au moyen d'une ossature sur fondations filantes (à droite)

iv) Sans ossature (fixations ponctuelles)

Des fixations ponctuelles sont posées sur les façades existantes à des points précis (où la résistance mécanique est vérifiée) : par exemple, nez de planchers, refends, façade porteuse... Les panneaux sont posés directement sur ces fixations, comme représenté en figure 36. Par rapport à l'ossature accrochée, les fixations ponctuelles sont plus nombreuses (4 par panneau). De plus, leur positionnement est une contrainte pour le calepinage des panneaux : les dimensions des panneaux sont liées à la position des fixations ponctuelles.

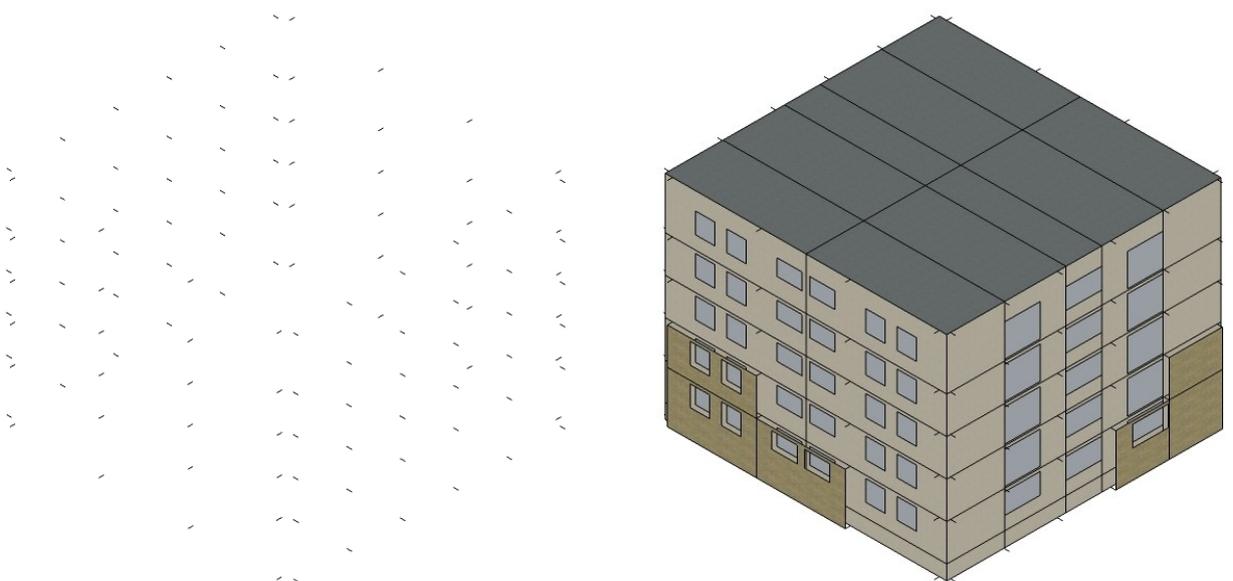


Figure 36 : fixations ponctuelles (à gauche), panneaux fixés au bâtiment sans ossature avec des fixations ponctuelles (à droite)

5) Processus d'implantation de la nouvelle enveloppe

Le processus d'implantation de la nouvelle enveloppe est présenté en figure 37.

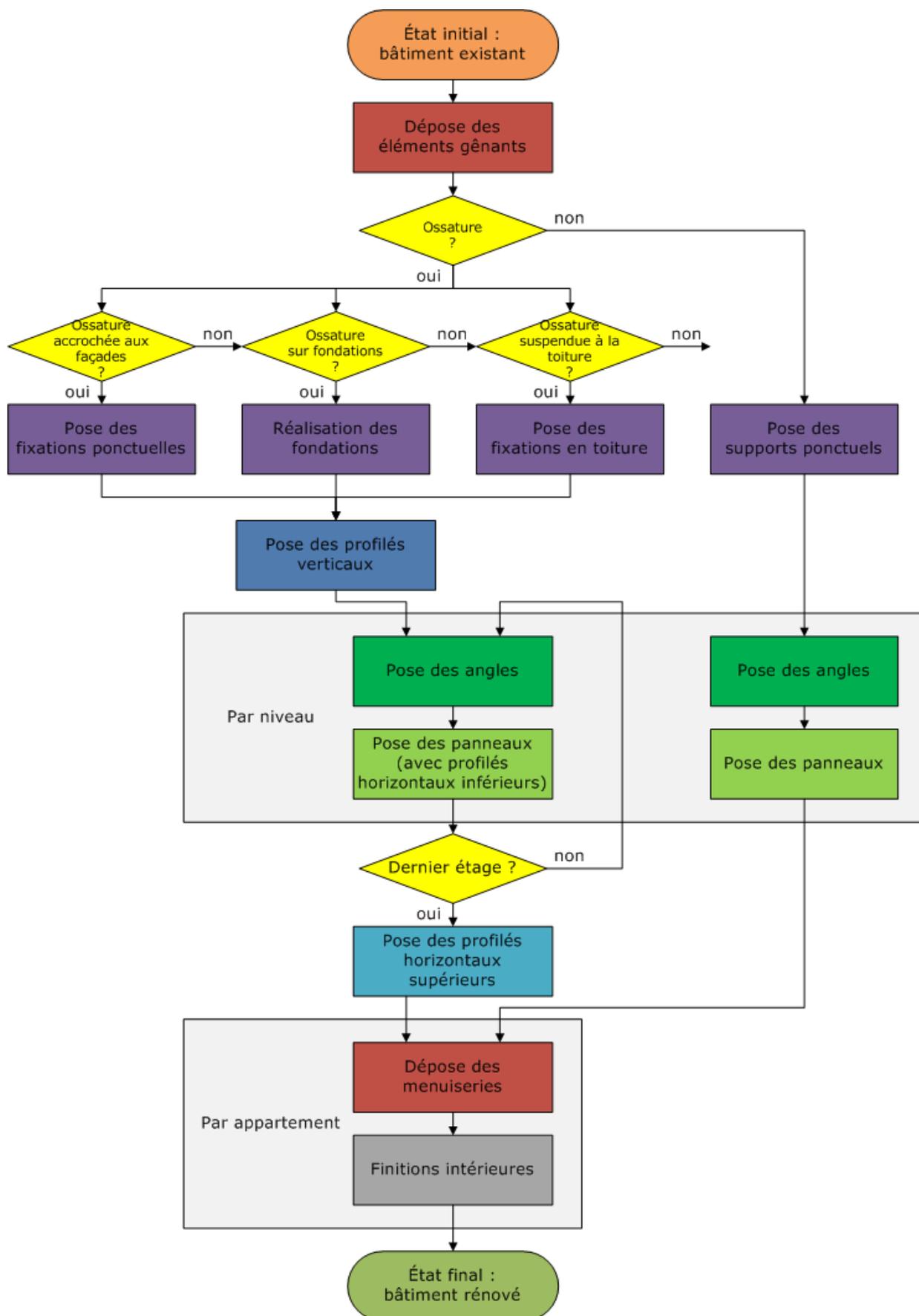


Figure 37 : processus d'implantation de la nouvelle enveloppe

On commence par enlever les « éléments gênants » : balcons, garde-corps, gouttières, antennes...

Puis on pose les fixations de l'ossature métallique. S'il est possible d'accrocher l'ossature métallique aux façades, on pose des fixations ponctuelles à des endroits précis des façades où la résistance mécanique est vérifiée. Sinon, si l'ossature peut être suspendue à la toiture, on pose des fixations en toiture et l'on réalise un portique au-dessus de la toiture. Sinon, s'il est possible de réaliser des fondations, on fixe l'ossature sur de nouvelles fondations. Sinon, on pose des fixations ponctuelles sur les façades qui supporteront les panneaux sans ossature métallique.

Les profilés verticaux sont posés sur le bâtiment à rénover à l'aide d'une grue ou d'une nacelle. Un système laser permet de les positionner dans un plan tout à fait vertical. Un système de réglage à chaque fixation des profilés sur la façade existante permet de rattraper les écarts dimensionnels entre ce plan et la façade existante.

On fixe les profilés horizontaux inférieurs sur les profilés verticaux. Puis on procède par niveau (rez-de-chaussée, premier étage, deuxième étage...) : on pose les angles puis les panneaux de remplissage de gauche à droite. Puis on pose les profilés horizontaux intermédiaires (qui pourraient également être fixés sur les panneaux en usine) et l'on pose les angles et les panneaux de l'étage suivant.

Au dernier étage, on pose des profilés horizontaux supérieurs sur la dernière rangée de panneaux.

Enfin, on procède par appartement pour déposer les menuiseries et réaliser les finitions intérieures (jonction entre la nouvelle façade et le mur intérieur au niveau des menuiseries).

Les panneaux, de grandes dimensions et préfabriqués, sont livrés sur chantier prêts à être posés. Il n'y a pas d'ajustement sur chantier de leurs dimensions au bâtiment existant, hormis le traitement des jonctions entre panneaux. Cela impose une prise des cotes du bâtiment existant très précise : de l'ordre du centimètre, voire du millimètre, ce qui est peu courant dans le domaine du bâtiment.

Comme chaque bâtiment à rénover est unique, il faudrait que tous les panneaux soient conçus spécialement. Mais l'objectif est de rationaliser la conception et la fabrication des panneaux tout en proposant une diversité de panneaux. Nous proposons d'utiliser des produits paramétrables, notamment sur leurs dimensions, qui sont définis au moyen d'un configurateur.

La gestion de la production doit également être réalisée finement, chaque panneau est unique et a un emplacement défini sur la façade. L'objectif est de ne pas stocker les panneaux.

II) Solutions pour le relevé 3D et la maquette numérique

Le système constructif décrit à la partie I) n'a d'intérêt que si l'ensemble des outils permet d'industrialiser le processus de rénovation. La première étape essentielle est la connaissance du bâtiment existant. En effet, la numérisation des informations est indispensable pour alimenter tous les outils suivants (Gestion de la Production Assistée par Ordinateur (GPAO), étude énergétique...). Le relevé des informations doit se faire en une fois et de manière automatisée. Les phases d'études sont en général très longues et coûteuses. Posséder une maquette numérique 3D permet un gain d'informations, de temps et de coût indispensable au bon déroulement du processus.

1) Objectifs

Dans l'optique d'une rénovation industrialisée, le diagnostic du bâtiment à rénover doit aussi être industrialisé. L'objectif est d'effectuer une seule visite sur site pour relever toutes les informations nécessaires sur les bâtiments à rénover : relevé géométrique, constitution des parois, identification des équipements de chauffage, ventilation et production d'eau chaude sanitaire... Ces informations sont ensuite transmises à toutes les personnes impliquées dans la rénovation : maître d'œuvre, architectes, bureaux d'études thermiques et structure... mais aussi au maître d'ouvrage pour l'exploitation et la maintenance du bâtiment.

Le relevé permet de constituer la maquette numérique du bâtiment existant qui est un modèle tridimensionnel unique du bâtiment utilisable par toutes les personnes impliquées dans la rénovation. La maquette numérique doit donc être dans un format compatible avec la plupart des logiciels utilisés, tels que le format IFC (Industry Foundation Classes). Cette maquette numérique sera enrichie par les différents diagnostics, notamment par l'étude de structure qui vise à déterminer les zones d'accroches possibles pour les panneaux, et par les différentes études, notamment architecturales. À partir de la géométrie du bâtiment existant et de sa localisation, on peut évaluer ses performances énergétiques. Quelques logiciels de calcul réglementaire, comme ArchiWIZARD, utilisent le modèle 3D du bâtiment pour effectuer l'étude énergétique. Les autres logiciels demandent une saisie manuelle des métrés de parties opaques et vitrées qui peut être fastidieuse.

Afin d'industrialiser l'étape de diagnostic du bâtiment, on peut faire appel à des techniques de relevé tridimensionnel sans contact des bâtiments. Leur intérêt est de réaliser le relevé sans contact avec le bâtiment, en moins d'une journée par une personne avec du matériel simple et peu coûteux. Dans un premier temps, une précision minimale de l'ordre du centimètre peut être prise pour les façades et de l'ordre du millimètre pour les menuiseries.

a) Entrées

Pour réaliser la maquette numérique du bâtiment existant, il faut bien sûr des informations géométriques, mais aussi des informations textuelles issues des différents diagnostics.

Le relevé 3D permet d'obtenir rapidement un certain nombre d'informations géométriques sur l'enveloppe extérieure du bâtiment. On peut également s'aider des plans du bâtiment, s'ils sont disponibles : il faut alors faire attention au fait que les plans d'exécution ne correspondent pas toujours exactement à ce qui a été construit et que le bâtiment peut avoir évolué depuis (modifications du maître d'ouvrage, mouvements du terrain...). Certaines mesures doivent être effectuées depuis l'intérieur des logements. Par exemple, si l'on veut remplacer les fenêtres, il faut mesurer la distance entre l'appui de fenêtre et le dormant (partie fixe) de la fenêtre. Comme le dormant cache cette jonction, on doit prendre cette cote manuellement.

Il faut également des informations sur la structure du bâtiment (murs en parpaings, murs en béton banché, structure poteaux-poutres...). Ces informations peuvent être fournies par le maître d'ouvrage ou grâce à une inspection sur site. Les zones d'accroche possibles pour les panneaux sont caractérisées par un bureau d'études structures. Elles sont représentées sous la forme d'une cartographie des façades avec des couleurs différentes suivant la charge admissible par zone de façade, comme le montre la figure 38.

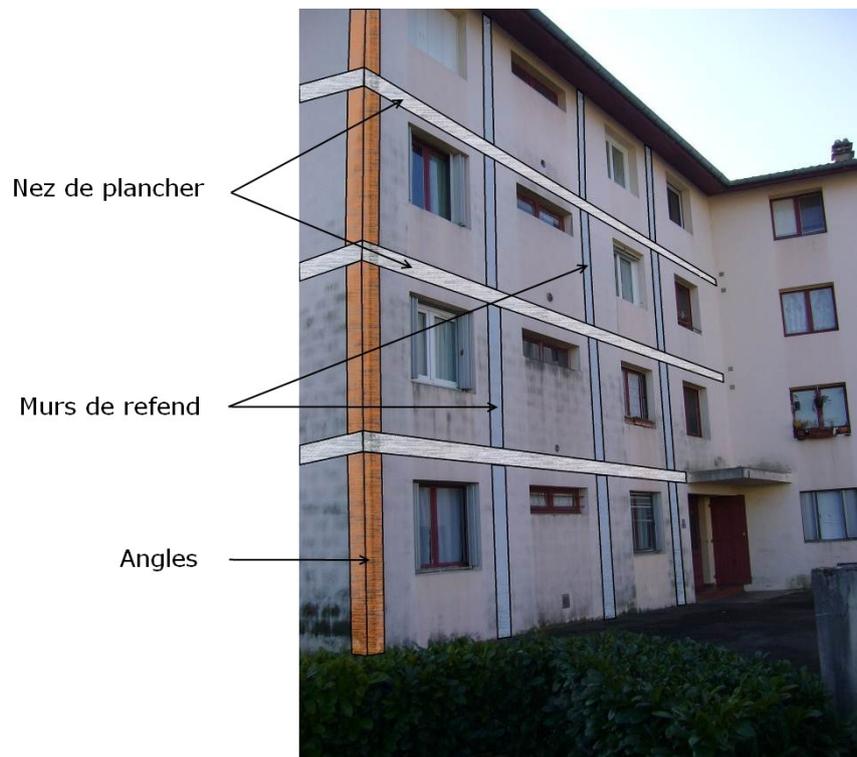


Figure 38 : cartographie des façades avec les zones d'accroche possibles pour les panneaux

Pour effectuer le calcul thermique, il faut lister tous les matériaux utilisés avec leurs **propriétés thermiques**, ainsi que tous les équipements de chauffage, production d'eau chaude sanitaire, ventilation et éclairage. Le relevé des consommations à l'échelle du bâtiment ou de quelques logements est utile pour comparer la consommation facturée à celle calculée par simulation.

b) Sorties

L'objectif est de rassembler dans le même fichier numérique l'ensemble des informations que l'on a sur le bâtiment existant.

La maquette numérique dont nous avons besoin est un modèle géométrique du bâtiment avec des éléments caractérisés par leurs propriétés mécaniques, thermiques ou d'autres types d'informations.

C'est une représentation du bâtiment comprenant :

- des entités géométriques : positions/dimensions ;
- des types d'entité ou étiquetages : mur, angle, fenêtre, balcon, terrasse, toit... ;
- des informations complémentaires pour l'utilisateur : orientation, position, environnement...

2) État de l'art

a) Étude des techniques de relevé tridimensionnel sans contact

Parmi les nombreuses techniques de relevé tridimensionnel sans contact, trois sont principalement utilisées pour la mesure et la modélisation 3D de bâtiments : le relevé topographique, la lasergrammétrie et la photogrammétrie.

Ces trois techniques diffèrent par le matériel utilisé et les résultats obtenus, mais elles comportent toutes une phase d'acquisition et une phase de traitement des données. Ce sont des techniques de télédétection, c'est-à-dire de mesure sans contact avec l'objet mesuré. Elles permettent donc de mesurer des points inaccessibles. Cependant, ce sont toutes des

techniques optiques : elles ne permettent pas de relever les points de l'objet cachés par l'objet lui-même ou par un masque (Fuchs, 2006).

i) Relevé topographique

Le relevé topographique est le relevé de points tridimensionnels caractéristiques de l'objet à mesurer avec des appareils de topographie. Cette technique est principalement utilisée par les géomètres experts pour le relevé de bâtiments, notamment pour de monuments historiques.

Pour effectuer un relevé de points tridimensionnels par topographie, il faut utiliser un tachéomètre qui se compose d'un théodolite pour la mesure des angles et d'un distancemètre pour la mesure des distances. Aujourd'hui, le tachéomètre est généralement électronique et intégré à une station totale qui enregistre les points relevés.

Le distancemètre est un appareil de mesure actif qui émet des ondes lumineuses en direction de l'objet à mesurer. **Suivant le type d'ondes générées, on distingue la télémétrie infrarouge et la télémétrie laser.**

La télémétrie infrarouge consiste à émettre des ondes infrarouges de fréquences différentes. Ces ondes sont renvoyées par un réflecteur (prisme, catadioptré ou miroir) placé sur l'objet à mesurer. **Le télémètre analyse le retard de phase des ondes réfléchies et en déduit la distance à l'objet. Le positionnement du réflecteur à chaque point de mesure ne permet pas d'automatiser cette méthode.**

La télémétrie laser comprend deux méthodes : la comparaison de phase (principe identique à la télémétrie infrarouge avec **émission d'un faisceau laser**) et le **calcul du temps de vol** (LIDAR : Light Detection And Ranging). Cette dernière consiste à émettre une impulsion laser qui est réfléchiée directement par l'objet à mesurer. **Le temps de retour du signal laser permet de déterminer la distance à l'objet** (De Luca, 2006). Sans réflecteur, il devient possible de **mesurer des points inaccessibles et d'automatiser l'acquisition des données. Cependant, il est** parfois nécessaire de placer des cibles rétro-réfléchissantes sur le bâtiment pour améliorer la précision du relevé laser.

L'ensemble des points tridimensionnels mesurés à la surface de l'objet constitue un nuage de points qu'il faut traiter sur ordinateur pour reconstruire le modèle 3D de l'objet. C'est une méthode très précise, mais l'acquisition des données est longue, car il faut relever les points un par un. De plus, le matériel coûte cher.

ii) Lasergrammétrie

La lasergrammétrie est le relevé de points tridimensionnels par balayage avec un scanner laser qui émet un faisceau laser en direction de l'objet à mesurer. C'est la technique la plus récente.

La vitesse d'acquisition importante permet de relever en peu de temps un très grand nombre de points (**jusqu'à 100 millions de points**). On peut définir le pas de nuage de points, c'est-à-dire la distance entre deux points, afin de relever plus de points dans les zones complexes.

Mais le traitement des données peut être assez long et le matériel coûte très cher.

Le traitement des données est composé de 3 étapes qui font actuellement l'objet de recherches pour les automatiser.

La première étape est la consolidation des données. Pour relever des points tout autour de l'objet, **le scanner laser est placé à des positions et orientations différentes. Il faut alors recalibrer** tous les nuages de points sur le même référentiel. Il faut au moins 3 points communs par nuage de points (Alby, 2006 ; Fuchs, 2006).

La deuxième étape est la segmentation du nuage de points. Comme tous les points mesurés **n'appartiennent pas à l'objet (masques mobiles, immobiles, éléments lointains...), il faut d'abord filtrer le nuage de points. Le nuage des points peut ensuite être séparé en sous-ensembles qui correspondent à des parties identifiées de l'objet mesuré** (Alby, 2006 ; Fuchs, 2006).

La troisième étape est la **construction du modèle 3D de l'objet mesuré à partir du nuage de points**. Il existe pour cela deux méthodes : la modélisation et le maillage. La modélisation consiste à identifier des primitives géométriques (plan, cylindre, cône, tore, sphère, pyramide...) dans le nuage de points. Cette méthode fonctionne bien lorsque l'objet à mesurer est composé de formes simples et fait l'objet de recherches pour son automatisation. Le maillage, également appelé facettisation ou polygonisation, consiste à transformer le nuage de points en surfaces ou facettes. Il met en œuvre des algorithmes de triangulation et des calculs d'approximation des moindres carrés. Cette méthode réduit le volume de données, ce qui induit une perte d'information et de précision. Elle est adaptée aux objets aux formes complexes qui ne peuvent pas être modélisées par des primitives géométriques (Alby, 2006).

(Boulaassal, 2010) propose un processus menant à un modèle 3D de façades à partir de données laser terrestres. L'algorithme de modélisation géométrique utilise la triangulation de Delaunay. Il permet de détecter aussi bien les contours extérieurs des plans (arêtes de la façade) que les contours intérieurs (ouvertures telles que fenêtres ou portes). La modélisation a été évaluée et les résultats sont globalement satisfaisants.

iii) Photogrammétrie

La photogrammétrie consiste à déterminer les dimensions, les positions et la forme d'objets, à partir de clichés photographiques. C'est la technique la plus ancienne, mais elle bénéficie des avancées des logiciels de modélisation tridimensionnelle. Pour l'acquisition des données, un appareil photographique numérique suffit et il n'y a pas de contact avec le bâtiment.

La photogrammétrie multi-images consiste à prendre plusieurs photographies de l'objet à mesurer, en positionnant l'appareil photographique tout autour de l'objet. Le traitement des données consiste à orienter les images entre elles. Il faut pour cela identifier des correspondances (points homologues) entre les photographies.

Le coût du matériel est peu élevé, mais la durée totale du relevé dépend de l'automatisation du traitement des données.

On distingue souvent la photogrammétrie terrestre de la photogrammétrie aérienne.

La photogrammétrie aérienne consiste à réaliser des prises de vue avec un appareil photographique embarqué dans un avion. Elle est souvent utilisée pour réaliser des Modèles Numériques de Terrain (MNT : représentation topographique du terrain) et des Modèles Numériques d'Élévation (MNÉ : relevé de la hauteur et de la forme des toitures des bâtiments) (Grussenmeyer, 2003). On peut également construire le modèle 3D d'un territoire ou d'une ville. Mais cette technique n'a pas une résolution suffisante pour réaliser des relevés précis de façades de bâtiments (Pénard et al., 2005).

La photogrammétrie terrestre consiste à photographier des objets depuis le sol. La photogrammétrie rapprochée correspond à une distance à l'objet comprise entre 1 m et 100 m (Kraus, Waldhäusl, 1997). En particulier, la photogrammétrie architecturale a pour échelle le cadre bâti : elle permet de réaliser des mesures sur des bâtiments.

La photogrammétrie terrestre regroupe trois principales méthodes d'acquisition : la stéréophotogrammétrie, la photogrammétrie mono-image et la photogrammétrie multi-images. Leur principe est illustré par la figure 39 (De Luca, 2006, p. 26).

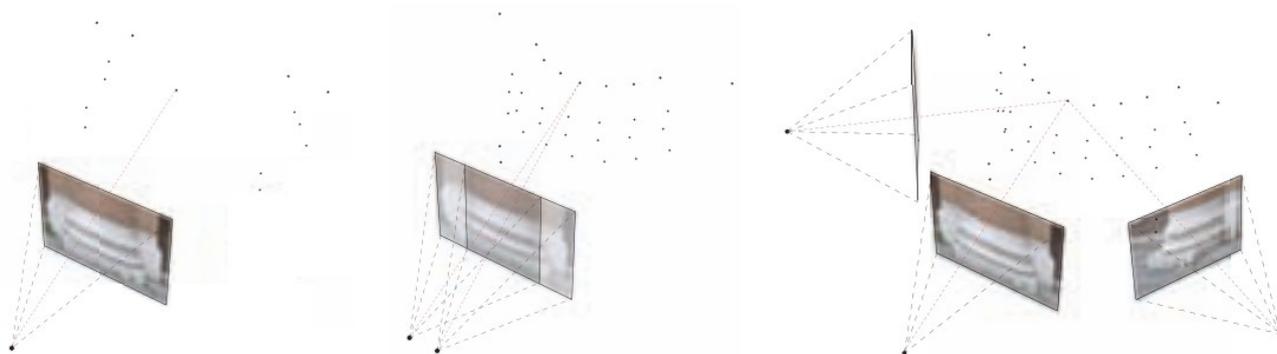


Figure 39 : principes de la stéréophotogrammétrie (à gauche), de la photogrammétrie mono-image (au milieu) et de la photogrammétrie multi-images (à droite)

La stéréophotogrammétrie est la méthode la plus ancienne. Elle consiste à prendre deux **photographies de l'objet** avec des axes de prise de vue parallèles. La distance entre les deux **positions de l'appareil photographique** doit correspondre à $1/8$ de la distance à l'objet (Alby, 2006 ; Fuchs, 2006).

La photogrammétrie mono-image consiste à prendre une seule photographie de l'objet à mesurer et à réaliser quelques mesures de distances. On peut alors redresser l'image à partir des parties planes de l'objet. Si l'on possède des informations supplémentaires sur sa géométrie, on peut aussi construire le modèle 3D de l'objet (Grussenmeyer, 2003).

La photogrammétrie multi-images consiste à prendre plusieurs photographies de l'objet à mesurer, en positionnant l'appareil photographique tout autour de l'objet. Pour un résultat acceptable, le recouvrement des prises de vues doit être de 60 % au minimum (Alby, 2006).

Le traitement des images en stéréophotogrammétrie ou en photogrammétrie mono-image permet d'obtenir des images redressées de l'objet qui sont des représentations en deux dimensions. La photogrammétrie mono-image permet aussi de dessiner le modèle 3D de l'objet si l'on a des informations sur sa géométrie. On obtient le résultat le plus complet avec la photogrammétrie multi-images : l'objet est représenté par un modèle 3D qui peut être texturé.

Au contraire de la stéréophotogrammétrie, la prise de vues en photogrammétrie multi-images n'est pas contrôlée et les points de vue autour de l'objet sont aléatoires. Le traitement des données consiste donc à orienter les images entre elles. Il faut pour cela identifier des correspondances (points homologues) entre les photographies. Le nuage de points obtenu peut être représenté en trois dimensions afin de dessiner le modèle 3D de l'objet. Pour cela, l'opérateur place des éléments géométriques (bi ou tridimensionnels) en superposition des photographies. Il est ensuite possible d'appliquer des textures pour rendre le modèle plus réaliste : les couleurs des photographies sont projetées sur le modèle 3D.

La photogrammétrie multi-images fait actuellement l'objet de nombreuses recherches pour automatiser l'orientation des images et la création du modèle 3D (Pollefeys et al., 2000 ; Mayer, Reznik, 2007 ; Vu et al., 2009). Pour l'acquisition des données, les pistes de recherche concernent l'utilisation d'un appareil photographique numérique grand public sans étalonnage préalable. L'objectif est de traiter tous types d'images numériques, prises avec des appareils différents, sans précautions particulières au moment de la prise de vues. Pour le traitement des données, les pistes de recherches concernent l'automatisation de l'orientation externe des photographies et de la modélisation. L'objectif est d'obtenir le modèle 3D de l'objet photographié avec intervention minimale de l'opérateur, grâce à des algorithmes de reconnaissance de formes par exemple, avec une précision élevée et un niveau de détails adapté à la géométrie de l'objet.

iv) Comparaison des techniques de relevé tridimensionnel sans contact

Les comparaisons expérimentales de la lasergrammétrie et de la photogrammétrie montrent que la lasergrammétrie est adaptée lorsque le niveau de détails exigé est important, notamment pour le relevé de monuments historiques ou pour relever la planéité des façades. Cette technique est également plus précise si des cibles rétro-réfléchissantes sont placées sur le bâtiment à relever, ce qui implique le contact avec le bâtiment. Dans le cas contraire, la photogrammétrie atteint une meilleure précision, de l'ordre de 1 à 5 cm (Guarnieri et al., 2004). Certains auteurs proposent de combiner les deux techniques, mais cela n'a pas d'intérêt pour notre application, car le coût du matériel augmente de même que la durée du relevé.

Le tableau 15 présente une traduction de la comparaison des techniques de relevé effectué par (Heikkinen et al., 2011, p. 69) dans le cadre du projet TES EnergyFacade.

| | Photogrammétrie | Relevé topographique | Lasergrammétrie |
|------------------------|------------------------|-----------------------------|------------------------|
| Fidélité géométrique | + | ++ | ++ |
| Niveau de détail | ++ | o | + |
| Complétude du modèle | + | o | ++ |
| Interférences | + | o* | o* |
| Intégration intérieure | o | ++ | ++ |
| Analyse | o | + | ++ |

* : dévaluation à cause de la sensibilité aux vibrations et aux problèmes avec les points invisibles et cachés

Tableau 15 : comparaison des techniques de relevé tridimensionnel sans contact

v) Recherches en cours

Les recherches en cours portent **d'une part** sur le relevé pour obtenir une précision satisfaisante et **d'autre part sur** le traitement des données pour automatiser la modélisation. En effet, il reste un travail important à effectuer pour obtenir un modèle du bâtiment utilisable **en CAO, c'est-à-dire** avec des arêtes et des surfaces, tout en conservant des informations sur les défauts du bâtiment (planéité des façades par exemple).

Des travaux sont en cours au CRAN (Centre de Recherche en Automatique de Nancy) avec la collaboration du CRITT Bois sur le relevé 3D pour la rénovation énergétique avec des solutions à base de bois. La thèse d'Abdelhamid BENNIS porte sur la reconstruction 3D de bâtiments à partir de données de télémètre laser terrestre (Bennis et al., 2011). Son objectif est d'automatiser le traitement du nuage de points généré par un scanner laser 3D pour fournir un modèle du bâtiment exploitable par un outil de CAO. L'enjeu est de permettre la préfabrication de panneaux à base de bois pour la rénovation énergétique. (Bennis et al., 2011) propose une méthode de recalage du nuage de point avec une image photographique du bâtiment scanné. Une des applications est la localisation précise des pertes thermiques d'un bâtiment en recalant le nuage de points avec une image infrarouge de ce bâtiment.

(Lafarge et al., 2011) propose une méthode pour la modélisation en trois dimensions de zones urbaines denses à partir de données lidar aéroporté multi-échos. Cette méthode ne peut pas être directement appliquée à la reconstruction de façades. Mais une des pistes est la reconstruction de façades de bâtiments à partir de nuages de points.

L'utilisation de drones est étudiée pour relever les zones masquées depuis le sol (IEA ECBCS Annex 50, [sans date]).

b) Tests des logiciels de photogrammétrie

Au début de la thèse, la technique de relevé tridimensionnel qui semblait la plus adaptée était la **photogrammétrie multi-images**. En effet, le coût du matériel est faible puisque le **système d'acquisition est un appareil photographique numérique**. **Par contre, la précision est légèrement inférieure à celle attendue et la durée du relevé dépend du degré d'automatisation du traitement des données.**

Cinq logiciels commerciaux de photogrammétrie ont donc été comparés et testés : SketchUp (Trimble, [sans date]), PixDim (Qualup, [sans date]), ImageModeler (Autodesk, [sans date]), PhotoModeler (Eos Systems, [sans date]) et On-Site Photo (Nemetschek, [sans date]).

Les logiciels de photogrammétrie et de photomodélisation permettent de prendre les **mesures d'un objet et de le dessiner en trois dimensions (3D) à partir de photographies numériques**. L'application qui nous intéresse est la **reconnaissance de façades, c'est-à-dire** la

prise de cotes des façades d'un bâtiment et sa modélisation 3D à partir de photographies numériques.

i) Conseils pour la prise de photographies du bâtiment

Pour que le modèle 3D corresponde bien au bâtiment réel (dimensions précises, à l'échelle, angles respectés...), il faut, autant que possible, suivre ces conseils lors de la prise de vues :

- utiliser un appareil photo numérique avec la meilleure résolution et qualité ;
- prendre les photos de jour et ne pas utiliser le flash ;
- éviter de changer de zoom entre les photos ;
- prendre des photos avec des angles de vue différents (par exemple, en se déplaçant autour du bâtiment), si possible, prendre de la hauteur par rapport au bâtiment (par exemple prendre quelques photos d'un bâtiment voisin)
- prendre des photos avec des recouvrements importants (par exemple : plus de 80 % de la photo est visible sur une autre photo) ;
- prendre beaucoup de photos : pour respecter les deux conseils précédents et pour être sûr de ne pas oublier de détails ;
- favoriser les angles de vue où l'on voit plusieurs façades (pas seulement des vues de face)
- prendre des mesures de la maison pour définir l'échelle du modèle 3D : au moins 1 dimension horizontale et 1 dimension verticale par façade (assez grandes si possible)
- s'il est difficile de prendre une mesure sur une façade, ajouter sur la façade un élément facile à mesurer (par exemple : manche à balai, table de jardin...) avant de prendre la photo

ii) Conclusion sur les 5 logiciels testés

Les 5 logiciels testés ont un fonctionnement en 4 étapes : prise de photos, correction des photos, calibration des photos et dessin du modèle 3D.

SketchUp permet de dessiner facilement le modèle 3D grâce à de nombreux outils d'aide au dessin. Mais le positionnement des axes est assez délicat, d'autant plus que SketchUp ne dispose pas d'outils de correction de la distorsion des photos. Par contre, il ne nécessite aucun autre logiciel pour réaliser le métré et le modèle 3D du bâtiment.

PixDim bénéficie des outils d'aide au dessin de SketchUp. En outre, il permet de corriger la distorsion des photos. L'origine et les axes du modèle sont définis précisément grâce au positionnement de points de référence. Des outils de cotation avancés sont proposés. Le modèle 3D généré est directement exploitable avec SketchUp.

ImageModeler permet d'obtenir un modèle 3D d'un bâtiment de bonne qualité avec une seule photo. Lorsque l'on veut modéliser un bâtiment avec plusieurs photos, la calibration des photos est assez délicate. Les outils de dessin permettent de dessiner facilement le modèle 3D. Mais il faut ensuite exporter ce modèle vers un logiciel de conception 3D (SketchUp, AutoCAD...)

PhotoModeler permet de positionner très précisément les points de référence. Mais il dispose de peu d'outils d'aide au dessin. Le modèle 3D n'est pas facile à exploiter par la suite (points non coplanaires, façades non perpendiculaires...). **PhotoModeler est à réserver à des applications où une grande précision est importante.**

On-Site Photo ne permet pas de dessiner directement le modèle en 3D à partir de photographies. Les photographies permettent seulement de dessiner les vues 2D des façades. Lorsque le modèle 3D n'est pas nécessaire, On-Site Photo permet ainsi d'obtenir facilement le métré des façades avec Excel. Si l'on dispose des plans du bâtiment, on peut alors dessiner son modèle 3D avec On-Site Photo. Dans les deux cas, on peut exporter les vues 2D ou le modèle 3D vers SketchUp et dessiner le modèle 3D avec SketchUp.

Ces cinq logiciels utilisent des méthodes de photogrammétrie différentes et n'ont pas les mêmes applications. Pour obtenir un résultat satisfaisant, il faut respecter certaines règles lors de la prise de vue et disposer d'un outil de correction des photographies. En photogrammétrie multi-images, l'orientation des photographies est l'étape la plus délicate et n'est pas encore assez automatisée. La création du modèle 3D est souvent facilitée par des outils de dessin. L'export des données vers d'autres logiciels est important pour l'utilisation ultérieure du modèle 3D.

Pour notre application, à savoir la prise de cotes des façades d'un bâtiment et sa modélisation 3D à partir de photographies numériques, le plug-in **PixDim associé au logiciel SketchUp** semblait le plus approprié. Il associe la correction de la distorsion des photos à la précision du calibrage des photos (grâce au positionnement de points de référence) et aux outils d'aide au dessin de SketchUp.

c) Maquette numérique ou BIM (Building Information Modelling)

Pour effectuer le diagnostic du bâtiment à rénover, il faut récupérer un ensemble de données concernant le bâtiment :

- la localisation précise : adresse, cadastre, orientation... ;
- les plans, les dimensions et les matériaux constitutifs du bâtiment ;
- les relevés de consommation d'énergie ;
- les mesures effectuées : perméabilité à l'air, thermographie infrarouge... ;
- les expertises effectuées : termites, plomb... ;
- l'environnement du bâtiment : la présence à proximité d'autres bâtiments, d'arbres, de routes, de câbles électriques... .

Ces données peuvent être regroupées dans le Building Information Modelling (BIM) (van Nederveen, Tolman, 1992 ; Howard, Björk, 2008). C'est une représentation numérique des caractéristiques physiques et fonctionnelles d'un bâtiment, définie à chaque étape du cycle de vie du bâtiment. Le BIM est une source d'informations partagée par différents intervenants qui comprend notamment :

- la géométrie du bâtiment (en deux ou trois dimensions) ;
- la localisation du bâtiment dans son environnement ;
- les éléments constitutifs du bâtiment (caractéristiques, quantités et relations entre eux).

Dans le secteur de la construction bois, il existe des logiciels de Conception et Fabrication Assistées par Ordinateur (CFAO) qui permettent de concevoir et fabriquer des panneaux à ossature bois à partir d'un modèle 3D d'un bâtiment. La plupart du temps, il faut dessiner le modèle 3D du bâtiment avec le logiciel de CFAO : ce modèle représente juste les volumes et l'emplacement des parois opaques et vitrées.

À l'aide d'une base de données de modes constructifs, les logiciels définissent le nombre et la position des panneaux à ossature bois et leur composition. Par exemple, pour un mur de façade, il faudra 1 panneau à ossature bois de 3 m par 10 m et un autre de 3 m par 5 m avec une fenêtre (les montants en bois sont automatiquement doublés autour d'une fenêtre), tous deux comprenant une plaque de BA 13, des tasseaux en bois horizontaux, un panneau de contreventement en OSB, des montants en bois espacés de 60 mm avec 145 mm de ouate de cellulose insufflée, 35 cm de fibres de bois en panneaux, des tasseaux bois verticaux, un **bardage bois horizontal**... La figure 40 montre la décomposition des parois d'une maison en produits élémentaires (Maisons Laprise, [sans date]).



Figure 40 : décomposition en produits élémentaires des parois d'une maison Laprise

Ces informations peuvent être converties par le logiciel en commandes pour les machines automatisées et être transmises directement aux fabricants. Le logiciel de CFAO gère donc le processus de construction de la conception du bâtiment à la fabrication des composants.

Ce processus peut être adapté pour la rénovation en important le modèle 3D du bâtiment existant, ou au moins ses mesures en 3D. Plusieurs éditeurs de logiciels travaillent sur ce sujet, souvent en partenariat avec des fabricants de matériel pour le relevé tridimensionnel sans contact (**scanner laser, station totale...**). Par exemple, l'interface **THEO online** assure la liaison entre le tachéomètre Leica et le logiciel de CAO installé (AutoCAD, Cadwork, Microstation, SEMA...) sur ordinateur, comme le montre la figure 41 (Cadwork, [sans date]).

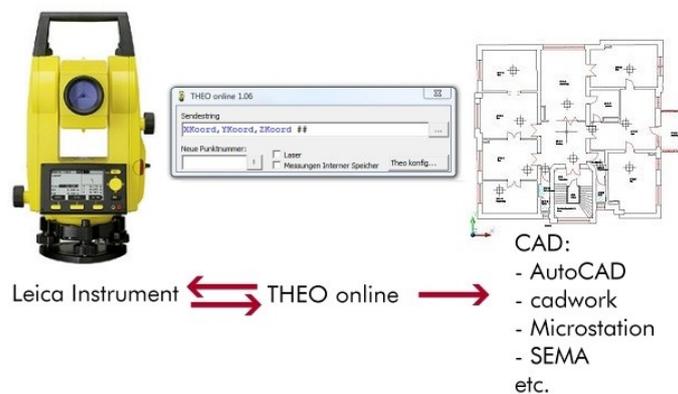


Figure 41 : interface THEO online pour assurer la liaison entre le tachéomètre Leica et le logiciel de CAO installé sur ordinateur

Les techniques de relevé tridimensionnel permettent de constituer une maquette numérique du bâtiment existant avec une bonne précision. L'acquisition des données est assez rapide, mais le traitement des données reste à automatiser. De nombreux travaux de recherche portent sur ce sujet, dont certains avec une application pour la rénovation industrialisée. Néanmoins, il reste une part importante d'expertise sur les systèmes constructifs du bâtiment pour caractériser la maquette numérique.

III) Solutions pour la configuration de la rénovation

La mise en place d'un tel système constructif, de par l'unicité de chaque façade et le caractère générique des éléments entrants dans la rénovation, peut être supportée par un outil de configuration ou configurateur. Les fonctionnalités supportées par le configurateur sont décrites au paragraphe 1). **Les données d'entrée et de sortie du configurateur sont présentées** au paragraphe 2). Le processus de configuration est décrit au paragraphe 3). Enfin, les approches par contraintes utilisées sont présentées au paragraphe 4).

1) Objectifs

Le configurateur, sous réserve de la formalisation des connaissances relatives à la rénovation, sera à même de :

- déterminer le calepinage de la façade : dimensions et emplacement des panneaux (paragraphe a)) ;
- définir la nomenclature physique de la rénovation ainsi que les caractéristiques (type de **revêtement extérieur, présence de fenêtres, de balcons...**) des éléments (paragraphe b)) ;
- générer la gamme de montage des éléments sur site (paragraphe c)) ;
- d'estimer le coût complet de la rénovation (paragraphe d)).

a) Calepinage des nouvelles façades

Le calepinage désigne le calcul du nombre d'éléments à utiliser pour couvrir une surface et leur positionnement les uns par rapport aux autres. Il est utilisé en construction pour le **carrelage, les tuiles, le bardage...**

Le calepinage et le dimensionnement, des panneaux de remplissage **d'une part** et de **l'ossature métallique d'autre part**, sont étroitement liés. La définition du calepinage peut se dérouler de plusieurs façons selon que l'on considère en premier lieu la géométrie de la façade ou sa résistance mécanique :

- géométrie : calepinage des panneaux de remplissage (en fonction de la géométrie des façades et du positionnement des ouvertures), puis dimensionnement de l'ossature métallique ;
- résistance mécanique : calepinage de l'ossature métallique (en fonction de la résistance mécanique des profilés choisis), puis dimensionnement des panneaux de remplissage.

Afin de s'affranchir des contraintes de résistance mécanique et d'obtenir plusieurs solutions **de calepinage, nous privilégions la première approche. L'ossature métallique, si besoin est,** sera prédimensionnée et les contraintes sur les panneaux de remplissage (dimensions et masse maximales) seront ainsi identifiées.

La figure 42 présente plusieurs solutions de calepinage des panneaux sur un bâtiment simple. À gauche, le calepinage réalisé privilégie l'utilisation de grands panneaux horizontaux (20 panneaux pour les 2 façades considérées) tandis qu'à droite, il privilégie un nombre minimal de panneaux sans contrainte d'orientation (soit 14 panneaux horizontaux ou verticaux).



Figure 42 : exemples de calepinage des panneaux sur un bâtiment : grands panneaux horizontaux (à gauche), nombre minimum de panneaux (à droite)

Le configurateur de la rénovation permet d'obtenir différentes solutions de calepinage déterminées, par exemple, par :

- des critères prenant en compte les dimensions des panneaux : par exemple, les plus grands possibles ;
- des critères prenant en compte leur orientation : par exemple, panneaux horizontaux ;
- une combinaison des deux, tout en minimisant le nombre de panneaux utilisés dans la rénovation (pour réduire les jonctions entre panneaux et améliorer la performance énergétique des façades rénovées).

b) Édition de la nomenclature des produits de rénovation des façades

La nomenclature est une liste des composants, sous-composants, sous-ensembles et des quantités nécessaires de chacun pour fabriquer un produit final. Elle peut avoir de nombreuses options et variantes.

Dans notre cas, nous considérons :

- la nouvelle enveloppe thermique comme le produit final ;
- les nouvelles enveloppes des façades comme des sous-ensembles ;
- les panneaux complets comme des sous-composants ;
- les composants configurables comme des feuilles de la nomenclature :
 - les panneaux, qui **sont placés sur les façades, incluent la structure en bois, l'isolant et le revêtement extérieur** (trois ou quatre types).
 - les angles qui font la jonction entre deux façades. Un angle est un type spécifique de panneaux possédant un angle (entre 0 et 360°).
 - les fenêtres, portes, capteurs solaires et balcons.
 - les fixations métalliques qui sont utilisées, soit pour fixer les profilés métalliques, soit pour accrocher directement les panneaux sur les façades. Il y a plusieurs fixations métalliques qui dépendent de leur type (fixations pour les rails métalliques, pour accrocher les panneaux ou pour assurer le contreventement des panneaux), de la charge admissible, de la distance entre les éléments structurels des façades existantes et les panneaux.
 - les profilés métalliques qui sont utilisés lorsque la structure de la façade actuelle ne supporte pas la charge de la nouvelle enveloppe. Ils sont fixés sur les fixations métalliques et les panneaux sont accrochés sur eux. Il y a un seul type de profilé métallique, dont la longueur est à adapter à chaque façade.

Le configurateur de la rénovation permet de définir la nomenclature de chaque façade, puis de la nouvelle enveloppe. Chaque composant configurable est modélisé sous forme d'un composant générique reprenant l'ensemble de la diversité offerte par ce dernier. Cette diversité est formalisée par un ensemble de variables descriptives du composant, chacune

associée à un domaine de définition, et un ensemble de relations limitant les combinaisons de valeurs possibles des variables. Ces relations limitent la diversité proposée et garantissent la **réalisation/fabrication du composant générique paramétré**. Prenons par exemple l'offre en revêtement extérieur. La diversité de quatre types de revêtements différents est formalisée non pas par quatre références de panneaux différentes (chacune possédant une seule référence liée au revêtement), mais par un seul panneau générique sur lequel l'un des quatre types de revêtement peut être appliqué. Le composant générique correspondant au panneau possède alors une variable pouvant prendre les quatre valeurs de référence du revêtement. La référence du panneau se construit donc en fonction des choix réalisés, par exemple, le type de revêtement et l'épaisseur d'isolant. Pour illustrer les relations entre composants, prenons par exemple, le cas des panneaux complets comprenant isolant, menuiserie et revêtement. Les panneaux complets ont un impact sur les fixations qui doivent supporter le poids de ces derniers. Nous voyons donc qu'il y a là une relation directe entre la référence (ou la description des panneaux) et la référence (ou les caractéristiques) des fixations.

c) Édition de la gamme de montage des produits de rénovation des façades

La gamme de montage consiste en une liste de tâches à réaliser pour assembler la nouvelle **ossature et l'enveloppe tout autour du bâtiment**. Elle comprend des tâches qui sont toujours réalisées, comme le positionnement et la pose des fixations métalliques, **et d'autres qui sont optionnelles** comme la fixation des profilés métalliques sur les fixations métalliques.

Le configurateur de la rénovation permet de générer la gamme de montage à partir de la nomenclature physique de la rénovation. Les tâches de montage sont modélisées comme une tâche de montage générique qu'il faudra instancier autant de fois qu'il y a de produits présents dans la nomenclature. Chaque tâche générique est formalisée par un ensemble de variables (durée de montage, ressources, outils). Ces variables sont liées entre elles par des relations permettant de limiter les valeurs prises par ces variables. Des tâches additionnelles de montage ainsi que de travaux pourront être considérées. Par exemple, si des profilés métalliques sont nécessaires pour supporter le poids de la nouvelle enveloppe thermique, les tâches relatives à leur montage seront insérées dans la gamme de montage. Les relations de précedence entre les tâches génériques doivent aussi être modélisées afin de fournir une gamme de montage réaliste. Par exemple, il faut toujours commencer par monter les fixations métalliques d'un composant avant le composant. Plusieurs solutions de gamme de montage peuvent être fournies pour une même nomenclature : par exemple, montage de l'ensemble des fixations dans un premier temps, puis montage des composants (profilés métalliques les cas échant et panneaux) dans un deuxième temps, ou ce sont les ensembles composants et fixations qui sont montés au fur et à mesure.

d) Estimation du coût global de la rénovation

Le configurateur peut aussi estimer le coût global de la rénovation qui inclut le coût des matières premières, le coût du transport, le coût de la main-**d'œuvre** et le coût du matériel de pose pour la rénovation.

Cette estimation se présentera sous la forme d'un tableau de bord avec des fourchettes de coûts minimum et maximum, en fonction de la diversité encore offerte au niveau de la nomenclature physique et de la gamme de montage. Elle permettra de comparer différentes solutions de rénovation (calepinages différents, bardages différents, etc.) les unes aux autres.

2) Entrées et sorties du configurateur

Le configurateur fonctionne à partir des informations fournies par la maquette numérique (**géométrie du bâtiment et localisation des zones d'accroche**). **Ses principales sorties sont la nomenclature et la gamme de montage des produits.**

a) Entrées

Pour chaque projet de rénovation, les données de base du bâtiment :

- sont fournies à la CAO pour être éventuellement retouchées, nettoyées et étiquetées,
- sont mises ensuite à disposition (consultation éventuelle du logiciel CAO) de la personne chargée de la configuration de la rénovation.

En entrée du configurateur, afin de réaliser le calepinage des façades, il faut déterminer le plan de pose des panneaux qui correspond au dos des panneaux (côté intérieur du bâtiment). Pour cela, un plan vertical contenant la façade avec des zones en retrait/en avant par rapport au plan principal est déterminé. Ce plan est ensuite translaté de 2 cm par rapport au point le plus éloigné et conservé de la façade (par exemple, les appuis de fenêtre) **vers l'avant de la façade**.

Chaque plan de pose est découpé en plusieurs zones réparties sur trois calques et caractérisées par :

Calque 1 : partition de la façade en zones rectangulaires caractérisées par :

- une position :
 - en X,
 - en Y.
- un type :
 - les nez de dalle (horizontaux) : plusieurs nez de dalle (pas 1 seul rectangle horizontal par nez de dalle) ;
 - les murs de refend (verticaux) : plusieurs murs de refend (pas 1 seul rectangle vertical par refend) ;
 - les croisements nez de dalle/murs de refend ;
 - les panneaux préfabriqués/coques en béton ;
 - les voiles extérieurs en béton ;
 - les zones pour fixations secondaires (contreventement, écarteurs) : murs en **parpaings...** ;
 - les zones interdites ;
 - les menuiseries : il faut que les nouvelles cotes tableau soient légèrement plus petites que les cotes tableau mesurées. On prend 2 cm de chaque côté comme tolérance, soit 4 cm sur la hauteur et 4 cm sur la largeur (exemple : pour un trou de 1000 x 1000 mm : 960 x 960 mm). Il faut vérifier la bonne cote de l'existant, la géométrie de la fenêtre (rectangle ou parallélogramme ou trapèze) et le positionnement (x,y) de la menuiserie sur la façade au centimètre. Il y a 3 cas donc au maximum 3 rectangles par menuiserie :
 - ⇒ on garde le dormant : cote plus petite,
 - ⇒ on supprime le dormant : cote plus grande,
 - ⇒ on déligne le dormant : cote intermédiaire ;
 - Pour chaque fenêtre, il faut positionner 2 rectangles :
 - ⇒ rectangle inscrit dans dormant conservé et rectifié,
 - ⇒ rectangle inscrit dans le trou sans le dormant et rectifié ;
 - les balcons : il faut identifier ce qu'il advient des balcons dans le processus de configuration. Cette zone peut donc être typée différemment au fil de la configuration (balcon → loggia, balcon → balcon, balcon → fenêtre) :
 - ⇒ dépose totale et transformation en fenêtre => zone fenêtre avec travaux supplémentaires pour transformer le balcon en fenêtre + zone nez de dalle identifiée à la place du balcon,
 - ⇒ dépose et loggia ou balcon rapporté => configuration éventuellement supportée par le configurateur (zone loggia ou balcon),
 - ⇒ conservation et transformation en loggia => configuration éventuellement supportée par le configurateur. (zone loggia),
 - ⇒ conservation intacte sans loggia => zone balcon (1 seule zone englobant le balcon entre les nez de dalle inférieur et supérieur) ;
 - la porte d'entrée ;

Calque 2 : zones circulaires des éléments traversants les panneaux caractérisés par :

- une position :
 - en X ;
 - en Y ;
 - diamètre.
- un type :
 - gouttières (emplacement, trou sur le panneau du haut) : il faut identifier la sortie de la gouttière en toiture-terrasse => singularité sur les panneaux ;
 - boîtiers électriques, gaz, téléphoniques ;
 - éclairage, lampadaires ;
 - antennes ;
 - sorties de chaudière ;
 - évacuations de hotte ;
 - entrées/sorties d'air, ventilation.

Calque 3 : zones rectangulaires des éléments rapportés posés devant les panneaux caractérisés par :

- une position :
 - en X ;
 - en Y.
- un type :
 - gouttières : présence Oui/Non. Si oui, prévoir des tâches de démontage et montage de la gouttière, position des gouttières. Il faut identifier le cheminement de la gouttière sur la façade et l'arrivée au sol. Les gouttières sont fixées sur le panneau (non traversantes) ;
 - paratonnerres : prévoir des tâches de démontage et montage du paratonnerre, position des paratonnerres ;
 - câbles électriques, prises de terre... ;

Pour chaque partition rectangulaire du calque 1 (10 types de rectangles), les informations suivantes sont nécessaires afin de déterminer les calepinages possibles :

- **des informations :**
 - profondeur d'accroche (min-max) ;
 - charge admissible (max) ;
 - distance min et max entre le rectangle et la façade existante ;
 - ligne de fixation sur le rectangle (lorsqu'on a une zone solide englobée dans une zone moins solide, on rectifie en réduisant la zone) ;
- **les angles entre les plans des façades.**

Une façade est définie comme le recouvrement des zones des trois calques, comme illustré à la figure 43.

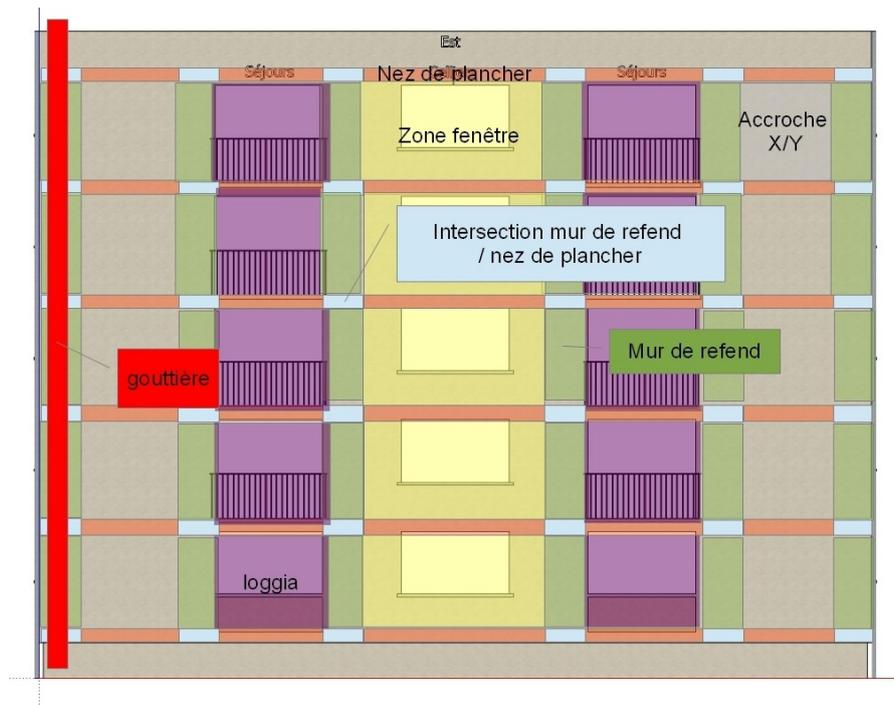


Figure 43 : exemple de partition d'une façade avec des rectangles pour définir les zones d'accroche

Les appuis de fenêtre ne sont pas représentés dans le configurateur. Ils servent par contre à positionner le point le plus éloigné de la façade et à déterminer les rectangles des menuiseries.

Afin de préfabriquer les panneaux en usine et de pouvoir les monter sans retouche sur le chantier, la précision des panneaux souhaitée est de l'ordre du centimètre alors que celle pour les mesures doit être le millimètre. La précision des mesures est indispensable au dimensionnement des panneaux, mais plus spécifiquement des menuiseries qui doivent être positionnées en vis-à-vis des menuiseries existantes.

b) Sorties

i) **Nomenclature**

À la fin de la configuration, toutes les variables des composants configurables sont évaluées, c'est-à-dire qu'elles ne possèdent qu'une seule valeur, soit fournie par l'utilisateur, soit déduite par le configurateur.

Les panneaux :

Les panneaux sont des rectangles 2D dont les côtés sont parallèles à l'axe de référence des façades. Tous les panneaux couvrant la façade appartiennent au même plan vertical. Ils sont adjacents (ils ont au moins un côté en commun) et ne se recouvrent pas. Ils possèdent aussi tous la même orientation. Ils couvrent toute la façade (mis à part les angles) et forment une partition de la celle-ci.

Les principales variables d'un panneau sont :

- sa largeur,
- sa longueur,
- ses coordonnées (abscisses et ordonnées),
- son épaisseur d'isolant,
- son type d'isolant (laine de roche, ouate de cellulose...),
- sa masse qui dépend de ses dimensions, du type d'isolant et des composants qui sont inclus dans le panneau.

Les dimensions maximales des panneaux sont : 3,5 x 13 m.

Si le panneau intègre d'autres composants (fenêtres, portes ou capteurs solaires...), nous devons savoir avec précision pour chacun d'entre eux :

- sa largeur,
- sa longueur,
- sa position relative dans le panneau (abscisses et ordonnées),
- son type,
- son code de référence.

Une distance minimale est nécessaire entre les côtés d'un panneau et la position des autres éléments : 90 mm pour préserver la rigidité du panneau.

Les angles :

Les angles sont des composants 3D préfabriqués qui sont placés aux angles des bâtiments. Pour le configurateur, ils sont considérés comme droits et placés à l'intersection de deux plans consécutifs. Si tel n'est pas le cas, une tâche de conception spécifique est nécessaire pour concevoir les angles adéquats. Tous les angles couvrent une colonne verticale. Ils sont adjacents (ils ont au moins un côté en commun) et ne se recouvrent pas. Ils possèdent tous la même orientation.

Les principales variables d'un angle sont :

- sa largeur,
- sa longueur à gauche,
- sa longueur à droite,
- ses coordonnées (abscisses et ordonnées),
- son épaisseur d'isolant,
- son type d'isolant (laine de roche, ouate de cellulose...),
- sa masse qui dépend de ses dimensions, du type d'isolant et des composants qui sont inclus dans le panneau.

Les angles ne peuvent pas inclure de composant, ils sont donc pleins. Leurs dimensions dépendent directement des dimensions des panneaux adjacents, avec une longueur minimale (à gauche et à droite) de 90 mm pour préserver leur rigidité.

La nomenclature des produits pourra être exportée sous la forme d'une liste de composants (avec type, paramètres, dimensions et positions) dans un logiciel de CAO ou sous la forme de commandes machines.

ii) Gamme de montage

La gamme de montage sera constituée du processus de montage avec les précédences des tâches. Elle pourra alimenter un logiciel de gestion de projet pour éditer un planning. Celle-ci est générée une fois la nomenclature physique de la rénovation instanciée.

3) Processus de configuration de la rénovation des bâtiments

La configuration de la rénovation est un processus itératif *top-down* qui converge progressivement du chantier vers les composants configurables. L'utilisateur doit entrer des informations et des données pour configurer petit à petit la rénovation. Après chaque entrée d'information, le configurateur retire les valeurs des variables qui sont inconsistantes avec les informations saisies et guide progressivement l'utilisateur vers une solution. L'utilisateur doit suivre ce processus et donner des informations sur le chantier, les blocs, les bâtiments, les façades, les panneaux et les angles.

À n'importe quelle étape du processus de configuration, l'utilisateur peut changer ses entrées et voir l'impact de ces modifications sur les solutions de configuration.

Plusieurs relations, ayant un impact principalement sur la dimension des panneaux, ont d'ores et déjà été identifiées. Ces relations se situent à tous les niveaux du processus de configuration (du chantier aux façades).

a) Chantier

La description du chantier a un impact sur la dimension des panneaux. Si l'on peut accéder au chantier avec des convois exceptionnels, les panneaux peuvent être aussi grands que nécessaire. Sinon les dimensions des panneaux sont contraintes par la taille des camions qui livrent sur le site. Si le site est très venté, avec des pointes supérieures à 80 km/h, les panneaux doivent être plus petits pour les fixer sur les façades. La rénovation dure alors plus longtemps à cause des jours non travaillés.

b) Blocs

La description du bloc a un impact direct sur le matériel de levage et indirectement sur les **dimensions des panneaux. Si le bloc n'est pas accessible avec une grue à tour, les panneaux doivent être plus petits pour les fixer aux façades avec des moyens de levage spécifiques, tels qu'une grue télescopique.**

c) Bâtiments

La description des bâtiments a un impact sur les dimensions des panneaux. Si la hauteur du bâtiment est inférieure à 12 m (quatre niveaux), la hauteur des panneaux peut être la hauteur du bâtiment afin de les fixer verticalement sur les façades.

d) Façades

L'utilisateur doit décrire précisément la structure et la géométrie des façades. En fonction de la structure des façades, il doit sélectionner le type de fixations métalliques et leur emplacement sur les façades. Une étude de structure est réalisée pour caractériser la charge admissible de chaque zone de la façade. La position des menuiseries, des balcons... **doit être connue précisément.** Seul un relevé tridimensionnel permet de fournir ces résultats.

Au regard de ces zones et de leurs caractéristiques, la décision peut être prise de fixer des panneaux directement sur les façades ou avec des profilés métalliques. Cette décision a un impact sur la nomenclature des produits (type de fixations métalliques et profilés métalliques optionnels) et sur la gamme de montage (tâches dédiées aux profilés métalliques tels que la livraison, l'assemblage et l'ajustement).

Lorsque l'on a les informations sur le chantier, le bloc, le bâtiment et la façade, le projet architectural des façades peut commencer. L'utilisateur doit indiquer les effets esthétiques désirés sur les façades. Par exemple, **s'il** veut des joints verticaux, ce qui tend vers une solution avec des panneaux verticaux ou **s'il** veut un damier avec plusieurs panneaux similaires. C'est à ce niveau là que le calepinage est déterminé. La façade est alors couverte par un ensemble de panneaux qu'il va falloir configurer.

i) Panneaux

En connaissant le calepinage résultat, chaque panneau peut être configuré. Si le panneau inclut des fenêtres, des portes ou des balcons, la référence correspondante doit être sélectionnée pour chaque composant.

ii) Angles

La configuration de la rénovation se termine par la configuration des angles. À cette étape, seulement la hauteur des angles doit être déterminée, les autres dimensions étant contraintes par les panneaux adjacents.

4) Approche par contraintes

Dans la communauté configuration, de nombreux auteurs, parmi lesquels (Sabin, Weigel, 1998) et (Soininen et al., 1998), **ont montré que la configuration d'un produit peut être efficacement modélisée et assistée lorsque l'on considère un problème de satisfaction de contrainte (CSP : Constraints Satisfaction Problem) (Montanari, 1974).**

D'autre part, dans la communauté génie civil et dans la communauté configuration, de nombreux auteurs ((Honda, Mizoguchi, 1995), (Junker, 2006), (Medjdoub, Yannou, 2001), (Zawidzki et al., 2011) ou (Regateiro et al., 2012)) ont montré que la disposition spatiale peut être résolue avec des CSP.

Par conséquent, nous abordons la configuration de la rénovation des bâtiments par des approches par contraintes et des algorithmes de filtrage qui permettent un dialogue avec l'utilisateur.

La configuration interactive de la rénovation est assurée par la propagation de contraintes qui élague les mauvaises solutions et guide progressivement vers les bonnes. Dans la rénovation de bâtiments, **l'étendue** des connaissances à exploiter et à modéliser nous conduit à intégrer dans un seul configurateur différents types de contraintes (formalisant les relations précédemment décrites) ainsi que leurs méthodes de filtrage.

a) Approches classiques de CSP

Dans la configuration de la rénovation, nous devons formaliser différents types de connaissances qui relèvent :

- des réglementations en génie civil qui doivent être respectées à la lettre. Par exemple, des barrières coupe-feu doivent être installées tous les deux étages pour éviter la propagation du feu.
- du **savoir-faire en génie civil qui est le cœur de métier des industriels** et entreprises de pose.
- du **processus d'assemblage sur chantier qui permet de définir la façon d'assembler la nouvelle ossature et l'enveloppe** autour du bâtiment.

Par exemple, comme vu précédemment, les conditions climatiques du chantier ont un impact sur les dimensions des panneaux : si le chantier est dans un endroit très venté, avec une vitesse de vent supérieure à 80 km/h plusieurs fois par an, les panneaux devront être plus petits pour les fixer sur les façades sans interrompre le chantier avec des jours non travaillés.

Comme l'étendue des connaissances est large, nous avons besoin d'utiliser plusieurs approches de CSP et leurs algorithmes de filtrage, tels que les CSP discrets (Montanari, 1974 ; Mackworth, 1977 ; Bessière, Cordier, 1993 ; Faltings, 1994), les CSP continus (Lhomme, 1993 ; Benhamou et al., 1994) et les CSP mixtes (Gelle, 1998) qui dépendent du type de variables (discrètes, continues, symboliques ou numériques) et du type de contraintes (contraintes de compatibilité ou formules mathématiques).

b) Groupes de contraintes et multi-instances de contraintes

Dans la configuration de la rénovation, nous devons traiter plusieurs instances des mêmes composants configurables. Par exemple, pour couvrir une façade avec sa nouvelle enveloppe, nous devons **configurer x fois un panneau. Nous ne savons pas à l'avance combien de panneaux seront nécessaires, car ce nombre dépend des nombreuses données d'entrée (description du chantier, du bloc...).** Nous devons donc grouper les variables et contraintes sous forme de classes objets qui pourront être instanciés autant de fois que nécessaire.

c) Contraintes dynamiques

Nous pouvons décider de fixer les panneaux sur une ossature métallique ou de créer de nouvelles ouvertures sur les façades. Ces décisions impliquent de considérer de nouveaux

composants dans la nomenclature puis d'insérer leurs tâches d'assemblage dans le processus d'assemblage (la gamme de montage). C'est pourquoi nous devons prendre en compte l'activation des composants configurables tels que définis par (Mittal, Falkenhainer, 1990 ; Sabin, Freuder, 1996 ; Faltings et al., 1992).

d) Contraintes géométriques

Pour préfabriquer les panneaux, nous devons déterminer précisément les dimensions et la position de chaque composant dans les panneaux. La précision du relevé géométrique et la précision des dimensions et de la position des composants sont des facteurs cruciaux pour **l'industrialisation de la rénovation**. Pour cela, nous devons intégrer dans le configurateur des contraintes géométriques (pour une revue de littérature, voir (Dohmen, 1995) ou (Fudos, Hoffmann, 1997) et pour des travaux plus récents voir (Jermann et al., 2000 ; Zawidzki et al., 2011 ; Regateiro et al., 2012)).

e) Contraintes globales

Comme nous ne savons pas à l'avance combien de panneaux seront nécessaires pour couvrir une façade, nous devons traiter des contraintes qui dépendent du nombre d'instances de la même classe. Par exemple, si la hauteur d'une façade est couverte avec plus d'un panneau, la somme des hauteurs des panneaux doit être égale à la hauteur de la façade. C'est pourquoi nous devons intégrer et filtrer différents types de contraintes globales (van Hoeve, Katriel, 2006)

En résumé, la configuration de la rénovation permet de déterminer le calepinage des panneaux, la nomenclature et la gamme de montage des produits de rénovation de façades et **d'estimer le coût de la rénovation**.

La configuration de la rénovation repose sur un modèle générique des entités manipulées : les composants entrants dans la nomenclature et les tâches définissant la gamme de montage. Ces modèles génériques sont formalisés sous forme de problèmes de satisfaction de contraintes et contiennent un ensemble de variables et de contraintes. Plusieurs types de contraintes doivent être intégrés afin de représenter la diversité offerte par la solution de rénovation industrialisée et garantir la faisabilité de l'enveloppe thermique.

La configuration alimente la gestion de production.

Le travail effectué sur le configurateur a fait l'objet d'un article (Vareilles, Langhoff Thuesen, et al., 2013) présenté au workshop configuration les 29 et 30 août 2013 à Vienne en Autriche. Il a également été valorisé **sous la forme d'un article** (Vareilles, Barco Santa, et al., 2013) et **d'une présentation à la conférence scientifique IEEM 2013** (IEEE International Conference on Industrial Engineering and Engineering Management) qui s'est tenue du 10 au 13 décembre 2013 à Bangkok en Thaïlande.

IV) Solutions pour la gestion de production

1) **Objectifs**

L'**industrialisation de la rénovation énergétique** repose sur la préfabrication de panneaux en usine, leur transport jusqu'au chantier et leur pose sur les façades existantes. Elle vise également à passer du mode de fonctionnement projet au mode de fonctionnement processus. Nous considérons que la plupart des activités de rénovation peuvent être décrites (au moins à un niveau macroscopique) de façon générique. Par contre, le passage au mode projet est indispensable pour planifier la réalisation des travaux de rénovation et gérer les moyens

affectés (humains et matériels). Des outils de gestion de production et de planification sont nécessaires.

Pour cela, nous proposons un ensemble d'**outils** logiciels complémentaires au configurateur permettant de gérer la planification tactique d'une rénovation depuis l'appel d'offres jusqu'à la réalisation de chantier. Trois outils clés sont identifiés.

Le premier outil est destiné à aider la réponse à un appel d'offres. Il a pour but de fournir, à partir du descriptif d'un bâtiment à rénover et d'un macro processus de rénovation, un ou **plusieurs devis conditionnés aux études complémentaires (de terrain, des murs...) ou à des options de réalisation** (ex : balcons conservés ou transformés en loggias). Voir chapitre 5-IV).

Après acceptation du client et suite aux résultats des études préliminaires, la phase de configuration d'un bâtiment permet de définir le projet à planifier. Le second outil constitue l'interface permettant de passer de la configuration à la gestion de projet proprement dite (définition des tâches du projet, des ressources nécessaires, diagramme de précedence des tâches).

Le troisième outil permet l'interface entre la gestion de projet (le chantier) et les usines (les fournisseurs). Il constitue le processus de collaboration avec les fournisseurs. Partant d'un portefeuille de projets planifiés, il permet d'éclater les besoins d'approvisionnement sur les différents fournisseurs et alimente ainsi leur propre processus de planification. Ce processus devra intégrer le traitement des alertes des fournisseurs quant à leur difficulté à répondre aux besoins. Cet outil devra prendre en compte le portefeuille de projets existant (en cours, **validés, en attente d'acceptation** de devis) afin de permettre un engagement non seulement en coût, mais aussi en délai. Voir chapitre 6.

2) Entrées et sorties

a) Entrées

Les entrées de la gestion de production sont :

- les données issues du configurateur :
 - la nomenclature des panneaux à fabriquer et des produits à acheter,
 - la gamme de montage des panneaux sur chantier ;
- le processus générique de rénovation :
 - les inducteurs de charge, de coût et de délai,
 - les capacités des ressources ;
- la charge des usines de production de panneaux.

b) Sorties

Les sorties de la gestion de production sont :

- la description des tâches :
 - les activités avec durée,
 - les ressources,
 - les dates de début au plus tôt,
 - les dates de fin au plus tard,
 - les contraintes ;
- l'ordonnancement des tâches et planification :
 - le projet sous contraintes de ressources avec délais.

Chapitre 5 : Proposition d'un outil **d'estimation**
pour les études préliminaires

L'industrialisation de la rénovation énergétique ne se limite pas à la préfabrication et à l'automatisation de la production de nouveaux produits. Elle bouleverse les méthodes de travail et l'organisation des acteurs.

Ainsi, la préfabrication sur mesure de panneaux de grandes dimensions nécessite un relevé géométrique précis des bâtiments existants. En rénovation artisanale, cette activité n'est pas nécessaire, car un métré sommaire suffit à établir le devis. Comme la plupart du travail est réalisé sur chantier, les mesures sont prises et les produits sont découpés en conséquence au fur et à mesure de l'avancement du chantier.

Un des objectifs principaux de la rénovation industrialisée est d'anticiper au maximum les problèmes qui pourraient survenir sur le chantier (voir chapitre 2-1)4)).

Pour cela, il faut accorder plus d'importance aux études. L'industrialisation est une réduction de la charge de travail en réalisation, au profit de la charge de travail en conception et en fabrication. Tout doit être prévu dans les moindres détails avant la réalisation du chantier. La maquette numérique (voir chapitre 4-11)) qui regroupe toute la documentation sur les bâtiments existants est alors d'une grande aide.

Cela implique également une très bonne coordination entre la phase de conception et la phase de réalisation. L'idéal étant sans doute que ce soit les mêmes acteurs qui interviennent dans les deux phases.

Alors que la rénovation artisanale fonctionne par projets, la rénovation industrialisée est vue comme un processus continu qui dépasse les projets de rénovation. Pour chaque projet, est exécuté le même processus de rénovation (au moins au niveau agrégé). Le retour d'expérience des projets précédents permet de faire évoluer le processus de rénovation pour les projets suivants.

Les solutions proposées pour la rénovation industrialisée apportent :

- un système constructif spécifique qui nécessite le relevé 3D et l'étude de structure : qui réalise ces études et à quel moment ?
- la configuration des produits qui est une nouvelle activité : qui la réalise ?
- la préfabrication qui nécessite la planification de la production en fonction de l'ordre de pose sur chantier.

1) La rénovation industrialisée entraîne une nouvelle organisation des acteurs

L'industrialisation de la rénovation énergétique n'a de sens que si elle est globale. D'un point de vue énergétique, il est important que la rénovation soit la plus complète possible et **soit effectuée en une seule fois ou avec un phasage des travaux réfléchi. C'est en effet indispensable pour atteindre des performances élevées et ne pas « tuer le gisement d'économies d'énergie »**. D'un point de vue industriel et économique, il est aussi important qu'un certain nombre de fonctions soient regroupées. De même qu'il est intéressant d'intégrer **plusieurs fonctions dans un même produit (pour faciliter la mise en œuvre, réduire le coût total...), il est intéressant de regrouper certaines études de conception. Par exemple, le relevé de l'existant pour les études détaillées servira pour la conception et le calepinage des panneaux, mais aussi pour la conception des équipements et pour l'exploitation du bâtiment après rénovation.**

Cela tend à créer un nouveau rôle, celui de **fournisseur de systèmes** qui propose à la fois les produits et les services au maître d'ouvrage.

En théorie, le fournisseur de systèmes pourrait être l'interlocuteur unique du maître d'ouvrage et intégrer toutes les fonctions :

- réalisation des diagnostics : **relevé 3D, étude de structure...** ;
- réalisation des études détaillées : **simulations énergétiques, configuration...** ;
- réalisation des études d'architecture ;

- industriel fabricant de panneaux ;
- entreprise de pose.

Cette organisation permettrait au fournisseur de systèmes de maîtriser l'ensemble du processus de rénovation. Il pourrait alors garantir sans risque des coûts et des délais au maître d'ouvrage. Mais cette organisation impose de regrouper au sein d'un même acteur une multitude de compétences et de métiers très différents, avec des modes de fonctionnement assez variés.

Le fournisseur de systèmes pourrait être à la fois :

- industriel : celui qui fabrique des produits ;
- concepteur : celui qui conçoit la rénovation des bâtiments ;
- entreprise : celui qui pose les produits.

Ce cas serait **aujourd'hui** un véritable bouleversement des habitudes. En effet, si l'on cite le seul problème du mode de financement ou d'assurance, il est totalement dépendant des acteurs et de leurs activités, définis par la réglementation. Les acteurs en place ont souvent **peur de cette nouvelle répartition des rôles et l'industrialisation est souvent vue comme le « rouleau compresseur » qui va tuer l'artisanat. Mais vu l'ampleur du marché de la rénovation, nous pensons plutôt que l'industrialisation permettra de rénover plus de bâtiments tout en conservant les emplois en place dans les structures actuelles. D'autant plus que la rénovation industrialisée ne s'adresse pas aux maisons individuelles qui représentent la plus grande part du marché.**

En raison des contraintes administratives et suivant les différents cas de figure, le rôle du fournisseur de systèmes se résume au moins à prescrire et livrer les produits et à apporter des services (configuration, outils d'estimation **et de planification...**).

II) Limites de la réglementation sur l'industrialisation

La rénovation industrialisée doit s'intégrer à la réglementation existante, notamment sur l'attribution des marchés.

1) **Marchés privés et marchés publics**

On peut considérer que la réglementation laisse une certaine liberté aux maîtres d'ouvrage privés pour leurs procédures d'attribution des marchés. Bien que cela soit vivement conseillé, le maître d'ouvrage n'est pas obligé de réaliser plusieurs devis. Il peut définir le cahier des charges et l'**organisation** des acteurs comme il le souhaite. Il peut choisir ses prestataires selon ses propres critères.

Par contre, la réglementation est très contraignante pour les marchés publics. Les objectifs sont de garantir l'accès aux marchés à tous les acteurs (publicité des appels d'offres) et d'apporter une certaine transparence dans l'attribution des marchés (critères de choix définis et publics). Ainsi, la loi MOP (Maîtrise d'Ouvrage Publique) (Légifrance, 1985) définit un certain nombre de règles à respecter.

Dans le cas d'une procédure classique, le maître d'ouvrage rédige un cahier des charges et lance un appel d'offres pour sélectionner une équipe de maîtrise d'**œuvre**. **Cette équipe peut** être constituée d'architectes, de bureaux d'**études...** Elle est chargée de la conception du projet. Au préalable ou au cours de la conception, le maître d'ouvrage fait réaliser les diagnostics nécessaires à l'évaluation des besoins pour affiner son cahier des charges. En fonction du cahier des charges du maître d'ouvrage, l'équipe de maîtrise d'**œuvre** étudie plusieurs solutions et évalue leur faisabilité et leur coût. Lorsque le maître d'ouvrage a choisi une solution, il lance un appel d'offres pour la réalisation de cette solution, sur la base du programme de travaux défini par l'équipe de maîtrise d'**œuvre**. Celle-ci est également chargée du suivi de chantier.

Par exemple, un bailleur social (maître d'ouvrage public) souhaite rénover plusieurs bâtiments. Il commence par réaliser un certain nombre de diagnostics rapides, tels que le DPE (Diagnostic de Performance Énergétique) pour évaluer des besoins d'amélioration des bâtiments. Puis il lance un appel d'offres pour sélectionner une équipe de maîtrise d'œuvre qui va concevoir la rénovation en fonction des objectifs et des contraintes du maître d'ouvrage. Par exemple : obtention du label BBC (Bâtiment Basse Consommation) correspondant à 80 kWh/(m².an), rénovation en site occupé (les habitants restent dans leur logement pendant **la durée des travaux**)... L'équipe de maîtrise d'œuvre **peut proposer une isolation des combles** (par soufflage de 30 cm de ouate de cellulose), une isolation thermique par l'extérieur (avec 15 cm de polystyrène expansé et un enduit sur isolant) et le remplacement des menuiseries (par des menuiseries double vitrage en PVC). Le maître d'ouvrage rédige le CCTP (Cahier des Clauses Techniques Particulières) et lance un appel d'offres pour sélectionner des entreprises de pose par lots (isolation des combles, isolation thermique par l'extérieur, remplacement des menuiseries). Les critères de sélection peuvent être le coût (avec une pondération de 60 %), la qualité (avec une pondération de 30 %) et le délai (avec une pondération de 10 %). Les entreprises répondent à l'appel d'offres pour un ou plusieurs lots.

Ce mode de fonctionnement n'est pas adapté à une rénovation industrialisée globale. Le système constructif que nous proposons est basé sur des panneaux multifonctionnels qui intègrent l'isolant, le revêtement extérieur et les menuiseries. Dans l'exemple précédent, il est alors impossible de répondre à l'appel d'offres seulement pour un lot. Il faudrait que l'appel d'offres soit rédigé avec des « macro-lots » (ce qui va sans doute devenir de plus en plus courant) : par exemple un lot façade intégrant l'isolant, le revêtement extérieur et les menuiseries.

De plus, si l'équipe de maîtrise d'œuvre **a préconisé une solution** artisanale telle qu'une isolation thermique par l'extérieur avec enduit sur isolant, il sera difficile de proposer une solution industrialisée préfabriquée. En effet, les solutions industrialisées présentent des contraintes qui doivent être prises en compte dès la phase de conception. Par exemple, le revêtement extérieur privilégié pour les panneaux est le bardage posé en usine. Cette solution permet de livrer sur site des panneaux tout à fait finis. Il ne reste plus qu'à traiter les jonctions entre panneaux sur chantier. L'inconvénient est que ces jonctions seront visibles, ce qui peut être une contrainte forte sur l'aspect architectural des bâtiments rénovés. Certaines fois, le maître d'ouvrage ou l'architecte exige que les jonctions entre panneaux ne soient pas visibles. Cela impose de poser au moins une partie du bardage sur chantier pour recouvrir les jonctions entre panneaux. De même, un revêtement extérieur à base d'enduit est possible. Mais il ne peut pas être totalement préfabriqué, notamment à cause des contraintes de cisaillement des panneaux pendant le transport et le levage (qui peuvent faire se fissurer la couche de finition). Une ou deux couches sont appliquées en usine. Une dernière couche de finition est appliquée sur chantier et permet de recouvrir les jonctions entre panneaux.

Il y a donc un travail important de prescription auprès des maîtres d'œuvre **pour leur** expliquer les avantages des solutions industrialisées (réduction des coûts et des délais, maîtrise de la qualité) tout en leur présentant les contraintes et les limites. L'industrialisation ne peut pas être universelle. Elle impose forcément un certain nombre de contraintes et limite le champ d'application. Par exemple, une solution industrialisée de rénovation énergétique ne conviendra sans doute pas à un bâtiment haussmannien avec une façade à sauvegarder. Mais certains architectes ont bien compris l'intérêt des solutions industrialisées et savent en tirer parti pour concevoir des bâtiments uniques. **D'autant plus** qu'avec l'évolution des outils informatiques pour la conception et la gestion de production, on peut maintenant proposer des produits industriels qui sont personnalisables.

2) Procédures d'attribution des marchés : classique ou conception-réalisation

Pour favoriser l'innovation, le législateur a mis en place des procédures différentes des procédures classiques, notamment la procédure de conception-réalisation. Celle-ci consiste à regrouper dans une même prestation la phase de conception et la phase de réalisation.

L'équipe comprend un maître d'œuvre (obligation d'un architecte + bureaux d'études éventuels) et une entreprise de pose. Ces deux acteurs vont travailler conjointement sur le projet. Cela permet de concevoir la solution en fonction des contraintes des produits (contraintes de production, de transport, de mise en œuvre), mais également d'adapter les produits au projet. Cette procédure est adaptée aux projets complexes pour lesquels les produits existants ne satisfont pas le cahier des charges.

La loi n° 2009-323 du 25 mars 2009 (Légifrance, 2009b) a autorisé, par dérogation à la loi MOP, les maîtres d'ouvrage du logement social à conclure des marchés de conception-réalisation sans justification particulière. Cette expérimentation devait se terminer le 31 décembre 2013, mais elle a été prolongée jusqu'au 31 décembre 2018 suite à une évaluation (Debiesse, Leblanc-Laugier, 2013).

Ce rapport dresse un bilan plutôt positif de l'expérimentation de la conception-réalisation : « Il apparaît, au terme de cet examen, que la conception-réalisation :

- ne suffit pas à faire émerger de nouveaux procédés constructifs, mais reste une condition nécessaire à leur développement au-delà des premières expérimentations, et contribue par ailleurs à l'amélioration des techniques de construction et à l'optimisation de leurs interfaces, facilitant par exemple l'atteinte de **performances élevées dans le domaine thermique** ;
- ne nuit pas à la qualité architecturale des ouvrages, ni à leur durabilité ;
- contribue à mieux maîtriser les délais et les coûts, et constitue de ce fait un facteur d'efficacité et d'efficience de la maîtrise d'ouvrage, requérant toutefois de sa part compétence et discipline ;
- est susceptible de contribuer à une réduction des délais et des coûts ;
- ne saurait être généralisée, et donc devenir l'unique procédure de construction de logements sociaux, sans faire courir à certains acteurs, jeunes architectes et petites entreprises de second œuvre notamment, des risques sérieux. » (Debiesse, Leblanc-Laugier, 2013, p. 12)

Cette évaluation montre que l'atteinte de performances thermiques élevées nécessite le développement de systèmes constructifs innovants et une remise en cause de l'organisation entre les acteurs. Les enjeux de la conception-réalisation rejoignent ceux de l'industrialisation (amélioration de la performance et réduction des coûts et des délais). L'approche intégrée à la fois pour les produits, mais aussi pour l'organisation des acteurs va sûrement se généraliser.

3) Évaluation et certification des techniques non traditionnelles

Dans le domaine du bâtiment, la plupart des réglementations visent à éviter les désordres. Pour cela, les produits doivent respecter un certain nombre d'exigences sur la performance thermique, l'étanchéité à l'air, la résistance mécanique, la **sécurité incendie**... Ils sont évalués, soit par calcul, soit par des tests.

Les assureurs distinguent les techniques courantes qui sont normalement garanties et les techniques non courantes qui nécessitent une déclaration préalable.

« Les techniques courantes concernent les travaux décrits par les DTU, les normes homologuées ou les Règles de l'Art, les Règles Professionnelles acceptées par la C2P, les ATec et les DTA qui ne font pas l'objet d'une mise en observation par la C2P ainsi que les Pass'Innovation Verts. Par opposition, les techniques non courantes regroupent les travaux non décrits par des textes officiels, ou relevant de Règles Professionnelles non acceptées par la C2P, ou bénéficiant d'ATec ou de DTA faisant l'objet d'une mise en observation par la C2P, ou titulaires d'une ATex ou d'une ETN ou d'un Pass'Innovation orange ou rouge, ou encore d'un ATE non validé par un DTA. » (Patin, 2011)

Le concepteur et l'entreprise doivent s'assurer pour leurs missions respectives. Ainsi, le maître d'ouvrage a l'obligation de souscrire une assurance « dommage ouvrage ». Or seuls les produits du domaine traditionnel ou évalués par des experts indépendants peuvent être assurés. L'assurance peut donc être un frein à l'innovation, car les procédures d'évaluation

sont longues et coûteuses. De plus, elles nécessitent un certain nombre de références, avant d'être généralisées.

En résumé, il faut veiller à ce que les solutions industrialisées proposées s'intègrent au cadre réglementaire actuel, sans quoi elles ne seraient pas utilisées par les acteurs en place. Les limites au recours à ces solutions industrialisées sont le choix d'une technique traditionnelle qui exclut de fait les solutions industrialisées, les appels d'offres en lots séparés et les procédures d'attribution des marchés en deux phases (conception et réalisation) qui ne permettent pas une bonne coordination entre ces deux phases.

III) Contractualisation et études préliminaires

1) **Processus de décision et les sources d'informations**

On ne fait pas l'étude complète dès le premier contact avec le client. Il y a des phases de contractualisation et plusieurs étapes dans les études, ainsi que des échanges réguliers avec le client qui remettent parfois en cause le projet.

De plus, les travaux dépendent du budget prévisionnel qui peut aussi varier en fonction de la performance obtenue.

La figure 44 présente le processus de décision et sources d'informations pour un projet de rénovation.

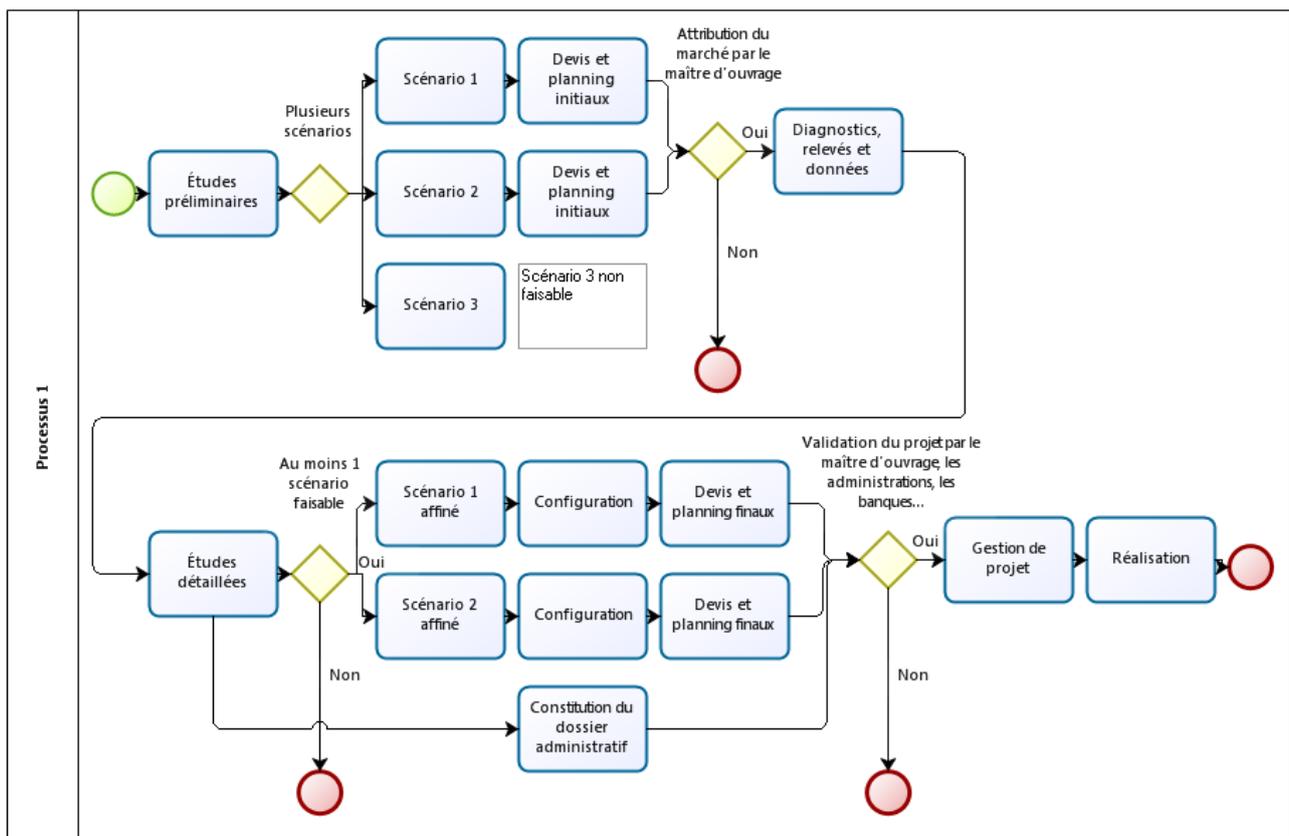


Figure 44 : processus de décision et sources d'informations pour un projet de rénovation selon la notation BPMN

Le projet de rénovation commence lorsque le maître d'ouvrage lance une procédure d'attribution du marché. Pour proposer une offre au maître d'ouvrage, le fournisseur de systèmes doit réaliser des études préliminaires qui conduisent à définir plusieurs scénarios.

Pour chaque scénario a priori faisable, il établit les devis et planning initiaux et les transmet **au maître d'ouvrage**.

Si **l'offre est retenue**, des diagnostics, relevés et études détaillés sont réalisés pour affiner les scénarios et évaluer leur faisabilité technique. Pour chaque scénario faisable affiné, le fournisseur de systèmes configure les produits de rénovation pour évaluer le coût et le délai du **projet**. **En parallèle, il établit le dossier administratif avec le maître d'ouvrage**.

Si le projet est validé, le fournisseur de systèmes assure la gestion de projet et la réalisation de la rénovation.

2) Études préliminaires et études détaillées

Les études à réaliser en phase de conception peuvent être divisées en deux catégories : les études préliminaires et les études détaillées. Cette classification ne dépend pas du type d'études (relevé géométrique, simulation énergétique, **configuration...**), **mais de sa date de réalisation** dans le projet.

Les **études préliminaires** sont réalisées avant l'attribution du marché, c'est-à-dire avant la signature du contrat avec le maître d'ouvrage. Leur objectif est de vérifier la faisabilité de l'opération et d'établir un devis et un planning aussi précis que possible. En effet, c'est ce devis et ce planning qui engagent le fournisseur de systèmes vis-à-vis du maître d'ouvrage : les devis et planning finaux devront être inférieurs à ceux-ci.

Les **études détaillées** sont réalisées après l'attribution du marché, c'est-à-dire après la signature du contrat avec le maître d'ouvrage. Leur objectif est de concevoir précisément l'opération de rénovation et d'établir des devis et planning finaux par solution envisagée. Si le coût réel de l'opération est inférieur au coût indiqué dans le contrat, le fournisseur de systèmes fera des bénéfices supplémentaires. Par contre, si le coût réel de l'opération est supérieur au coût indiqué dans le contrat, le fournisseur de systèmes perdra une partie de sa marge, voire perdra de l'argent sur cette opération.

Les principales études pour la rénovation énergétique des bâtiments sont :

- l'estimation à partir de ratios : elle consiste à évaluer la complexité d'un projet avec des ratios (par exemple : nombre de façades, surface de façades, proportion de parties vitrées...) et des coûts et charges de travail unitaires ;
- le relevé géométrique des bâtiments existants : il consiste à mesurer précisément la géométrie et à réaliser une maquette numérique des bâtiments existants ;
- le diagnostic de structure des bâtiments existants : il permet de déterminer les zones d'accroche possibles des panneaux sur les façades ;
- les autres diagnostics (amiante, réseaux **d'assainissement...**) : ils apportent des informations supplémentaires sur les bâtiments et des contraintes particulières le cas échéant ;
- l'étude énergétique de la rénovation : elle détermine le niveau de performance thermique de chaque produit de rénovation ;
- l'étude architecturale de la rénovation : elle apporte des préconisations pour le **traitement des balcons, le type de revêtement extérieur...** ;
- la configuration de la rénovation : elle intègre les choix des études énergétiques et architecturales, effectue le calepinage des panneaux et édite la nomenclature et la gamme de montage des produits de rénovation ;
- la planification du chantier : elle détermine le planning du chantier en fonction du plan de charge des fournisseurs et des contraintes du chantier (disponibilité des ressources humaines et des moyens de levage).

On peut distinguer 6 cas de répartition entre études préliminaires et études détaillées :

- Cas 1 : les études préliminaires sont réduites au minimum : le devis et le planning initiaux sont estimés par des ratios.
- Cas 2 : le devis et le planning initiaux sont établis à partir du relevé géométrique des bâtiments existants avec des coûts et charges de travail unitaires.
- Cas 3 : le diagnostic de structure permet de vérifier la faisabilité de l'opération et de choisir une solution technique (panneaux accrochés aux façades ou fixés sur une ossature métallique sur fondations...), ce qui réduit la marge d'erreur sur le coût.

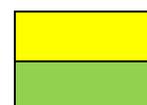
- Cas 4 : les études énergétiques et architecturales ainsi que les autres diagnostics (amiante, réseaux d'assainissement...) permettent d'établir le cahier des charges de la rénovation (choix de l'épaisseur d'isolant, du traitement des balcons...), ce qui précise le devis.
- Cas 5 : le devis et le planning initiaux sont établis à partir des résultats de la configuration, ce qui garantit la fiabilité des coûts (le coût de chaque panneau est connu).
- Cas 6 : toutes les études sont réalisées avant signature du contrat avec le maître d'ouvrage : le devis et le planning initiaux sont très fiables.

Le tableau 16 présente 6 cas de répartition entre études préliminaires et études détaillées.

| Études pour la rénovation énergétique des bâtiments | Cas 1 | Cas 2 | Cas 3 | Cas 4 | Cas 5 | Cas 6 |
|--|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|
| Estimation à partir de ratios | | | | | - | - |
| Relevé géométrique des bâtiments existants | | | | | | |
| Diagnostic de structure des bâtiments existants | | | | | | |
| Autres diagnostics (amiante, réseaux d'assainissement...) | | | | | | |
| Étude énergétique de la rénovation | | | | | | |
| Étude architecturale de la rénovation | | | | | | |
| Configuration de la rénovation | | | | | | |
| Planification du chantier | | | | | | |

Légende :

Études préliminaires (avant l'attribution du marché)



Études détaillées (après l'attribution du marché)

Tableau 16 : 6 cas de répartition entre études préliminaires et études détaillées

3) Compromis entre risque de mauvaise estimation et investissement dans les études préliminaires

Plus les études préliminaires sont complètes, plus le devis et le planning annoncés au maître d'ouvrage seront précis. Donc, plus le risque de mauvaise estimation est faible. Par contre, tant que le contrat n'est pas signé, ces études sont payées par le fournisseur de systèmes et ne seront pas remboursées s'il n'obtient pas le marché. Donc, l'investissement est élevé.

À l'inverse, plus les études préliminaires sont réduites, plus l'investissement est faible, mais plus le risque de mauvaise estimation est élevé.

Le retour d'expérience des projets précédents devrait permettre d'affiner les prévisions de coût et de délai sur la base des études préliminaires. Mais comme chaque bâtiment est différent, un certain nombre de spécificités sont à prendre en compte pour obtenir des prévisions fiables.

Le compromis entre le risque de mauvaise estimation et l'investissement dans les études préliminaires peut être difficile à trouver. Il dépend de plusieurs facteurs :

- le coût des différentes études : si les études sont rapides et peu coûteuses (par exemple si chaque étude peut être réalisée en une journée), il peut être intéressant de les mener avant la signature du contrat, ce qui permet d'affiner au plus juste les devis et planning initiaux et est un gage de sérieux vis-à-vis du maître d'ouvrage.
- l'importance du projet (montant, notoriété) : plus le projet est important, plus le fournisseur de systèmes prend un risque élevé s'il sous-estime le coût de l'opération.
- le volume de chantiers et la rentabilité : plus le fournisseur de systèmes a de chantiers en cours et plus il est rentable, plus il peut accepter perdre son investissement dans les études préliminaires.
- le coût des solutions industrialisées par rapport aux solutions artisanales : si le coût de réalisation des solutions industrialisées est bien plus faible que celui des solutions artisanales, le fournisseur de systèmes peut accorder plus d'argent aux études.
- **La capacité d'autofinancement** du fournisseur de systèmes : plus le fournisseur de systèmes réalise des études préliminaires non rémunérées, plus son besoin en fonds de roulement augmente, car ces études préliminaires ne sont payées qu'à la signature du marché.

En conclusion, la rénovation industrialisée nécessite un certain nombre **d'études qui sont réalisées avant (études préliminaires) ou après (études détaillées) l'attribution du marché. Plus les études préliminaires sont complètes, plus l'estimation des coûts et des délais est fiable. Mais c'est un investissement risqué pour le fournisseur de systèmes qui n'est pas sûr d'obtenir le marché. C'est pourquoi il faut réduire le coût de ces études, notamment l'élaboration de la maquette numérique. D'autre part, il faut proposer un outil d'estimation permettant d'établir les devis et planning initiaux dans le cas où les études préliminaires sont réduites au minimum.**

IV) Outil d'estimation pour établir les devis et planning initiaux d'après les études préliminaires

1) **Processus générique**

Le secteur d'activités du bâtiment est encore très artisanal et géré projet après projet. Par exemple, on conçoit un bâtiment en partant d'une feuille blanche puis on étudie les techniques et moyens nécessaires pour réaliser le bâtiment dessiné. En rénovation, on part d'une base qui est le bâtiment existant. Bien entendu, chaque bâtiment est unique (et n'est pas forcément conforme aux plans, s'ils existent encore) et a ses spécificités (proportion de menuiseries, présence de balcons, **complexité des façades...**).

La problématique **est d'établir un devis** et un planning avec les informations dont on dispose **avant l'attribution du marché**, qui peuvent être très limitées.

Nous proposons donc la démarche suivante :

- définition des activités sur tout le processus de rénovation (avec inducteurs de charge, de coût et de délai ; capacités des ressources) ;
- formalisation du processus de rénovation (activités avec précédences et liens logiques) : processus générique adapté à chaque bâtiment à rénover ;
- description des tâches (activités avec durée, ressources, dates de début au plus tôt, date de fin au plus tard, contraintes...) ;
- ordonnancement des tâches et planification (projet sous contraintes de ressources avec délais).

Pour chaque îlot de bâtiments à rénover, on identifie les activités à réaliser (exemple : **isolation des façades, transformation des balcons en loggias...**). On relie ces activités de manière logique pour créer le processus de rénovation (exemple : pour l'isolation des façades, on procède façade par façade, **bâtiment par bâtiment...**). On transforme ces activités en tâches en leur affectant des ressources et en leur ajoutant des contraintes de début au plus tôt, fin au

plus tard... Enfin, on ordonnance ces tâches pour créer le projet sous contraintes de ressources pour la réalisation des travaux.

La figure 45 présente les activités du processus de rénovation générique.

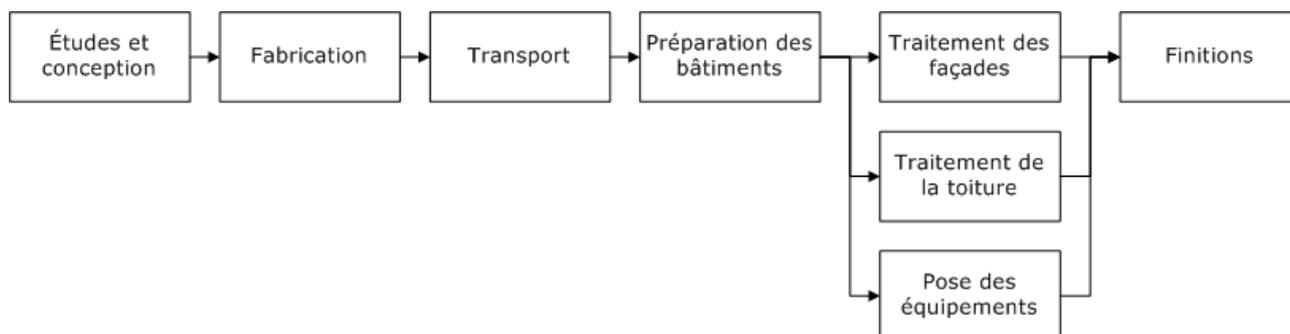


Figure 45 : activités du processus de rénovation générique

Ce processus de rénovation générique peut être implémenté dans un outil de gestion de projet comme un projet paramétrable. Les activités sont **transformées en tâches lorsque l'on** indique leurs paramètres : par exemple, surface de façades, **linéaire de balcons...** On obtient un projet établi avec les dates au plus tôt selon le diagramme de précédence des tâches. Pour **tenir compte des contraintes de ressources, il faut utiliser l'outil de planification décrit au** chapitre 6.

2) Activités avec inducteurs de coût et de délai

Il y a deux types d'activités :

- les activités d'études et de conception ;
- les activités de réalisation.

Les **activités d'études et de conception** sont les suivantes :

| | |
|-----|--|
| 001 | Estimation à partir de ratios |
| 002 | Devis et planning initiaux |
| 003 | Relevé géométrique des bâtiments existants |
| 004 | Diagnostic de structure des bâtiments existants |
| 005 | Autres diagnostics (amiante, réseaux d'assainissement...) |
| 006 | Étude énergétique de la rénovation |
| 007 | Étude architecturale de la rénovation |
| 008 | Configuration de la rénovation |
| 009 | Devis et planning finaux |
| 010 | Constitution du dossier administratif |
| 011 | Planification du chantier |

Elles comprennent les études préliminaires ou détaillées présentées au paragraphe III)2) ainsi que l'établissement des devis et planning initiaux et finaux et la constitution du dossier administratif.

Dans l'exemple suivant, on se place dans le cas 1, où les études préliminaires sont réduites au minimum : le devis et le planning initiaux sont estimés par des ratios.

Les **activités de réalisation** sont les suivantes :

- activités de fabrication (10x) :

| | |
|-----|--|
| 101 | Approvisionnements |
| 102 | Fabrication des panneaux (pour façades et balcons) |

- activités de transport (20x)

| | |
|-----|------------------------|
| 201 | Transport des produits |
|-----|------------------------|

- activités de préparation des bâtiments (30x)

| | |
|-----|--|
| 301 | Apport du matériel |
| 302 | Traitement des raccordements du bâtiment |
| 303 | Préparation des abords (découpe du sol béton...) |
| 304 | Préparation des façades (démontage des antennes, gouttières...) |
| 305 | Préparation des balcons (si conservés tels quels) |
| 306 | Préparation des balcons (si transformés en loggias) |
| 307 | Préparation des balcons (si supprimés et rapportés) |
| 308 | Préparation de la toiture (si toiture-terrasse) |

- activités de traitement des façades (40x)

| | |
|-----|--|
| 401 | Réalisation des fondations |
| 402 | Pose de l'ossature sur les fondations |
| 403 | Pose des fixations sur les façades |
| 404 | Pose de l'ossature sur les façades |
| 405 | Isolation des façades |
| 406 | Traitement des balcons (si conservés tels quels) |
| 407 | Traitement des balcons (si transformés en loggias) |
| 408 | Traitement des balcons (si supprimés et rapportés) |

- activités de traitement des toitures (50x)

| | |
|-----|--|
| 501 | Pose de l'ossature sur la toiture (si toiture-terrasse) |
| 502 | Isolation de la toiture (si toiture-terrasse) |
| 503 | Isolation de la toiture en sarking (si combles aménagés) |
| 504 | Isolation de la toiture en soufflage (si combles perdus) |

- activités de pose des équipements (60x)

| | |
|-----|----------------------|
| 601 | Pose des équipements |
|-----|----------------------|

- activités de finition (70x)

| | |
|-----|---|
| 701 | Réalisation des finitions intérieures (menuiseries...) |
| 702 | Réalisation des finitions extérieures (gouttières...) |
| 703 | Remise en état des abords |
| 704 | Enlèvement du matériel |
| 705 | Évacuation des déchets banals |
| 706 | Évacuation des déchets spéciaux |
| 707 | Visite de chantier (point d'arrêt) |

Pour chaque activité sont définis des inducteurs de délai et de coût qui permettent d'évaluer le délai et le coût d'un projet en fonction de sa taille et de sa complexité.

Les inducteurs ont pour unité des mètres, des mètres carrés, des mètres cubes, des unités, des logements ou des kilomètres.

Par exemple, l'activité 405 « Isolation des façades » correspond à la pose des panneaux à ossature bois avec menuiseries intégrées. Elle a pour unité des mètres carrés et pour inducteurs :

- la surface de façades
- le nombre de façades (donc le nombre d'angles)
- **la complexité des façades (angles rentrants, sortants...)**
- le type de revêtement extérieur (le moins cher, très cher...)

- le taux de menuiseries (faible 30 %, moyen 50 %, élevé 70 %)

La surface de façades en mètres carrés est corrigée par des facteurs correctifs, par exemple :

- 0,9 si le taux de menuiseries est faible (30 %),
- 1 si le taux de menuiseries est moyen (50 %),
- 1,1 si le taux de menuiseries est élevé (70 %),

Pour chaque activité, sont définis la charge de travail unitaire et les coûts unitaires (main-d'œuvre, matière et matériel).

Par exemple, l'activité 405 « Isolation des façades » a une charge de travail de 100 m²/jour et un coût unitaire total de 30 €/m².

Si l'inducteur du projet est 1 000 m², alors le délai est de 10 jours et le coût de 30 000 €.

Pour certaines activités comme l'activité 201 « Transport des produits », le coût unitaire doit être calculé séparément. En effet, il dépend de nombreux paramètres : volume et masse des produits transportés, distance et durée du trajet ainsi que de coûts fixes tel que le coût de **détention du véhicule... Par exemple**, le Comité National Routier (CNR) a développé un simulateur de coût de revient (CNR, [sans date]) qui comporte trois termes :

- un terme kilométrique variable (somme des coûts directs de carburant, de pneumatiques, de péages et d'entretien-réparations),
- un terme horaire de conducteurs (coûts du personnel de conduite affectés au véhicule : rémunération + cotisations employeurs + frais de déplacement),
- un terme journalier fixe de véhicule (regroupant les coûts fixes de véhicule comme les coûts de détention et d'assurances, ainsi que les coûts de structure). »

Les inducteurs de certaines activités, notamment les activités de préparation des bâtiments et de finition, restent à compléter.

L'outil d'estimation est détaillé en Annexe 1.

3) Exemple de projet : rénovation d'un bâtiment de 15 logements

Un exemple de projet a été réalisé avec l'outil d'estimation. Cet exemple correspond à la rénovation d'un bâtiment de 15 logements, dont les données sont indiquées au tableau 17.

| | | |
|-----------|---------------------------------------|----------------------|
| Bâtiment | Nombre de logements | 15 |
| | Nombre d'étages | 4 |
| | Hauteur d'un étage | 2,5 m |
| | Hauteur du bâtiment | 10 m |
| | Longueur du bâtiment | 25 m |
| | Largeur du bâtiment | 25 m |
| Façades | Nombre de façades | 4 |
| | Surface de façades | 1 000 m ² |
| | Nombre de colonnes de balcons | 2 |
| | Nombre de balcons | 8 |
| | Largeur des balcons | 5 m |
| | Linéaire de balcons | 40 m |
| | Surface de balcons | 100 m ² |
| | Longueur des fondations | 100 m |
| Toiture | Surface de toitures | 625 m ² |
| Transport | Distance entre l'usine et le chantier | 400 km |

Tableau 17 : données sur l'exemple de projet

On se place dans le cas 1 défini au paragraphe III)2), c'est-à-dire que les études préliminaires sont réduites au minimum : le devis et le planning initiaux sont estimés par des ratios.

On étudie le scénario suivant :

- les balcons sont transformés en loggias ;
- **les panneaux de façades sont fixés au bâtiment au moyen d'une ossature sur fondations filantes ;**
- la toiture est isolée en soufflage dans les combles perdus ;
- une ventilation double flux est installée ;
- le système de chauffage et **de production d'eau chaude sanitaire est remplacé par un système thermodynamique.**

Voici quelques exemples de calcul de la charge de travail et des coûts à partir des inducteurs de coût et de délai.

Avec 100 m²/jour et 150 €/m², la préfabrication des panneaux (pour les façades et les loggias) représente une charge de travail de 11 jours et coûte 165 000 €.

Avec 150 m²/jour et 20 €/m², **l'isolation de la toiture en soufflage dans les combles perdus** représente une charge de travail de 4 jours et coûte 12 500 €.

Avec 100 m²/jour et 30 €/m², la pose des panneaux de façade représente une charge de travail de 10 jours et coûte 30 000 €. Avec 10 m²/jour et 30 €/m², la pose des panneaux pour les loggias représente une charge de travail de 10 jours et coûte 3 000 €.

Avec 3 jours/logement et 11 300 €/logement, **la pose des équipements** pour la ventilation, **le chauffage et la production d'eau chaude sanitaire** représente une charge de travail de 45 jours et coûte 169 500 €.

L'évaluation de la charge de travail et des coûts du projet à l'aide de l'outil d'estimation est présentée en Annexe 1.

4) Retour d'expérience du configurateur pour affiner les inducteurs

Le configurateur permet de réaliser le calepinage des panneaux sur les façades. Les dimensions de chaque panneau sont alors connues ainsi que leur composition. Cela permet de calculer le coût de fabrication, de transport et de pose. Grâce à des mesures de temps et des évaluations de coût a posteriori, on peut calculer le coût d'un panneau en fonction de ses **caractéristiques (dimensions, composition...)**.

Ces valeurs alimentent l'outil d'estimation pour affiner les inducteurs au fur et à mesure des chantiers. L'objectif est de s'assurer que le coût et le délai estimés par les ratios sont toujours inférieurs au coût et au délai final. Mais il ne faut pas qu'ils soient trop surestimés, car le marché ne serait pas attribué.

Chapitre 6 : Outil de planification du chantier
sous contraintes de ressources en lien avec la
gestion de production des usines

1) Présentation de l'outil de planification

En sortie du configurateur, on dispose de l'ensemble des informations concernant le projet de rénovation :

- la liste des tâches à réaliser pour mener à bien le chantier ;
- les contraintes d'enchaînement entre les tâches (le diagramme de précédence des tâches) ;
- pour chacune des tâches, on connaît de plus, les ressources nécessaires pour réaliser la tâche.

Ces ressources sont de deux ordres :

- les ressources produites en usine par des sous-traitants et livrées directement sur le chantier (panneaux d'isolation, fixations, rails, béton). Ces ressources doivent être livrées avant le début de la tâche ou pendant son exécution. Par la suite, on parlera de « livraisons ».
- les ressources propres au chantier : personnel, engins de chantier. Ces ressources doivent être présentes en permanence pendant l'exécution de la tâche. La tâche finie, elles redeviennent disponibles pour d'autres tâches.

L'outil de planification du chantier a pour but de fournir un ordonnancement du chantier compatible avec les livraisons et la disponibilité des ressources propres.

Pour cela, on doit disposer en entrée de deux fichiers de données supplémentaires :

- Fichier des sous-traitants : chacun des sous-traitants, compte tenu de son propre carnet de commandes et de ses capacités de production, a des capacités de production résiduelles qu'il peut affecter à ce projet. On dispose de ces capacités sur la plage d'intervention prévisionnelle. De plus, pour certaines ressources (par exemple, les fixations), le sous-traitant peut lancer des fabrications en avance et les stocker en attendant de les livrer au moment où la tâche commence. Mais dans ce cas, la capacité de stockage est limitée. Pour d'autres ressources (par exemple, le béton), le stockage n'est pas possible et le sous-traitant travaille en flux synchrone.
- Fichier des ressources propres : le personnel peut être embauché directement par la société chargée de la rénovation ou appartenir à des sous-traitants extérieurs. De même, les moyens matériels appartiennent en propre à la société ou sont loués. On connaît les disponibilités de ces ressources sur la plage d'intervention prévisionnelle (par exemple : trois ouvriers en semaine S28-29 et quatre ouvriers en S30). On peut pour certaines ressources faire appel à des moyens supplémentaires.

L'ordonnancement fourni doit être l'ordonnancement optimal selon un ou plusieurs critères à choisir par les utilisateurs. Le premier critère habituel en gestion de projet est de minimiser la durée totale du chantier. Un second critère fréquent est de minimiser l'utilisation des ressources propres. Ici, on peut s'intéresser à l'aspect sous-traitant et minimiser les coûts de stockage. Plus généralement, on peut chercher à minimiser le coût global.

Ces objectifs peuvent être combinés. Par exemple, on peut chercher à minimiser la durée totale du chantier tout en minimisant les stocks. Pour cela, on peut utiliser une loi de Pareto du type : α [min durée totale du chantier] + (1 - α) [min stocks] où α est un coefficient variant de 0 à 1.

Dans ce type de chantier, il peut exister une ressource critique. Pour des bâtiments élevés, on doit disposer d'une grue à tour. Cette grue est louée avec son conducteur. Le temps de montage et démontage de la grue est important. Le coût de location est particulièrement élevé et le chef de chantier se retrouve, de fait, à organiser le chantier afin de minimiser le temps de location.

II) Transition entre le configurateur et l'outil de planification

Un des points à prendre en compte lors de la transition entre le **configurateur et l'outil** de planification est le niveau d'agrégation d'une tâche. Le diagramme de précedence des tâches du processus de rénovation est issu du configurateur. Entre autres, le configurateur édite la nomenclature et la gamme de montage des panneaux. La gamme de montage des panneaux regroupe les tâches avec leurs relations de dépendance.

Les tâches peuvent être agrégées à différentes échelles :

- chantier : une tâche correspond à la pose de l'ensemble des panneaux d'un chantier (un chantier comporte un ou plusieurs blocs séparés les uns des autres) ;
- bloc : une tâche correspond à la pose de l'ensemble des panneaux d'un bloc (un bloc comporte un ou plusieurs bâtiments séparés par des joints de dilatation) ;
- bâtiment : une tâche correspond à la pose de l'ensemble des panneaux d'un bâtiment (un bâtiment comporte une ou plusieurs façades séparées par des angles) ;
- façade : une tâche correspond à la pose de l'ensemble des panneaux d'une façade (une façade comporte, suivant comme on la découpe, soit une ou plusieurs lignes, soit une ou plusieurs colonnes) ;
- ligne : une tâche correspond à la pose d'une ligne horizontale de panneaux (par exemple, les panneaux d'un étage) ;
- colonne : une tâche correspond à la pose d'une colonne verticale de panneaux (par exemple, une colonne de panneaux avec une menuiserie par panneau) ;
- panneau : une tâche correspond à la pose d'un panneau.

Dans un premier temps, les tâches sont agrégées à l'échelle d'une façade. Par exemple, cela signifie que les fixations sont posées façade par façade, puis les rails sont posés façade par façade, enfin les panneaux sont posés façade par façade.

Il est ainsi possible de regrouper les tâches à l'échelle supérieure (bâtiment, bloc ou chantier). Par exemple, poser toutes les fixations d'un bâtiment, puis poser tous les rails d'un bâtiment, enfin poser tous les panneaux d'un bâtiment.

Il est aussi possible de paralléliser les tâches. Par exemple, poser les fixations de la façade 1, puis poser les fixations de la façade 2 en même temps que les rails de la façade 1, enfin poser les fixations de la façade 3 en même temps que les rails de la façade 2 et les panneaux de la façade 1, etc.

Mais il est impossible de paralléliser les tâches à l'échelle inférieure (ligne, colonne, panneau). Par exemple, il est impossible de commencer à poser un panneau tant que toutes les fixations et tous les rails d'une façade n'ont pas été posés.

Au niveau de **l'outil** de planification, on doit tenir compte des livraisons. Prenons le cas où le sous-traitant fabrique et/ou livre en synchrone les panneaux correspondant à une journée de montage. La tâche « montage des panneaux de la façade nord du bâtiment A » de durée 3 jours devra être subdivisée en trois tâches d'une journée se suivant sans interruption.

III) Exemple d'application

Pour illustrer notre démarche, nous considérons un exemple simple.

L'ensemble à rénover est constitué de trois bâtiments. Les bâtiments B1 et B2 forment deux barres sur trois niveaux (un rez-de-chaussée et deux étages). Le bâtiment B3 ne comporte que deux niveaux. La rénovation d'un niveau (étage ou rez-de-chaussée) demande une journée de travail. B1 comporte une annexe. Enfin, B1 et B3 donnent sur une partie jardin dont le terrain est meuble. Des travaux préliminaires sont à réaliser avant l'intervention et une remise en état est à réaliser après. Pour éviter des montages/démontages, minimiser la gêne occasionnée **par les travaux...**, les travaux sur un bâtiment donné se font sur des jours consécutifs. Pour les bâtiments B1 et B2, on doit louer et faire venir une grue. Cette grue doit

être montée sur place avant les travaux et démontée à la fin de travaux. Le coût de location étant très élevé, on veut garder la grue le moins de temps possible sur le chantier.

Le tableau 18 décrit l'ensemble des tâches du chantier. Dans la colonne « Précédence », le symbole * indique que les tâches se suivent en continu. Le diagramme de précedence des tâches est à la figure 46.

| | Code | Durée | Précédence |
|------------------------------|--------|-------|--------------|
| Préparation des accès | Acces | 2 | |
| Bâtiment 1, RC | B1RC | 1 | Acces, MtGru |
| Bâtiment 1, étage 1 | B1E1 | 1 | B1RC * |
| Bâtiment 1, étage 2 | B1E2 | 1 | B1E1 * |
| Bâtiment 1, annexe | B1Ax | 2 | B1E2 |
| Bâtiment 2, RC | B2RC | 1 | MtGru |
| Bâtiment 2, étage 1 | B2E1 | 1 | B2RC * |
| Bâtiment 2, étage 2 | B2E2 | 1 | B2E1 * |
| Finition des abords B2 | B2Fin | 2 | B2E2 |
| Bâtiment 3, RC | B3RC | 1 | Acces |
| Bâtiment 3, étage 1 | B3R1 | 1 | B3RC * |
| Montage de la grue | MtGru | 1 | |
| Démontage de la grue | DmGru | 1 | B1E2, B2E2 |
| Finition des abords B1 et B3 | B13Fin | 2 | B1Ax, B3R1 |

Tableau 18 : liste des tâches de l'exemple d'application avec leur code, leur durée et les tâches précédentes

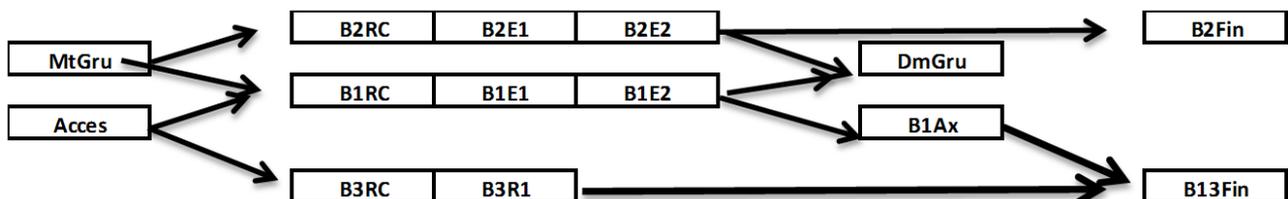


Figure 46 : diagramme de précedence des tâches de l'exemple d'application

Pour pouvoir démarrer une tâche, on doit disposer de ressources.

- les livraisons : nous considérons trois ressources usines (RU1, RU2, RU3) fournies par trois sous-traitants (S1, S2, S3). La ressource Rx est fournie seulement par le sous-traitant Sx. S1 et S2 peuvent travailler sur stocks. S3 produit en synchrone.
- les ressources propres au chantier : nous considérons trois ressources chantier (RC1, RC2, RC3) qui sont respectivement de la main-d'œuvre, un engin de manutention et une grue louée. Il est possible d'embaucher des intérimaires en plus ou de louer un engin de plus.

On se donne un délai maximum de 26 jours pour réaliser le chantier.

IV) Étude bibliographique

Scientifiquement, les problématiques abordées dans cet outil relèvent du domaine de la gestion de projet sous contraintes de ressources (Resource constrained project scheduling problem ou RCPSP).

Le RCPSP est un problème classique de la recherche opérationnelle qui a fait l'objet de travaux depuis une trentaine d'années. Un problème d'ordonnancement consiste à organiser dans le temps la réalisation de tâches, compte tenu de contraintes temporelles (délais, contraintes d'enchaînement) et de contraintes portant sur la disponibilité des ressources requises. Un ordonnancement constitue une solution au problème d'ordonnancement. Il est défini par le planning d'exécution des tâches et d'allocation des ressources et vise à satisfaire un ou plusieurs objectifs. Un ordonnancement est très souvent représenté par un diagramme de Gantt.

En théorie de l'ordonnancement de projet, on distingue plusieurs types de ressources. Une ressource est dite renouvelable (**renewable**) si après avoir été allouée à une ou plusieurs tâches, elle est à nouveau disponible en même quantité : les hommes, les machines, l'équipement en général. La quantité de ressources utilisables à chaque instant est limitée. Dans le cas contraire, elle est dite consommable (**consumable**) ou non renouvelable : matières premières, budget. La consommation globale (ou le cumul) au cours du temps est limitée. Une ressource est doublement contrainte lorsque son utilisation instantanée et sa consommation globale sont toutes deux limitées (l'argent en est un bon exemple).

Par ailleurs, dans le cas de ressources renouvelables, on distingue principalement les ressources disjonctives qui ne peuvent exécuter qu'une tâche à la fois (grue ou engin de chantier unique) et les ressources cumulatives qui existent en plusieurs exemplaires et peuvent être utilisées par plusieurs tâches en parallèle, dans la limite de leur nombre (ouvriers, camions...).

Le RCPSP appartient à la classe des problèmes combinatoires NP-complets. (Garey, Johnson, 1979) ont montré par une réduction au problème de 3-partition que le problème d'ordonnancement à contraintes de ressources, et sans contraintes de précédence, avec une unique ressource, est NP-difficile au sens fort.

La plupart des articles considèrent uniquement des ressources renouvelables (les ressources chantier dans notre cas). C'est le cas du problème de base qui a été formalisé pour la première fois par (Pritsker et al., 1969) et amélioré par (Christofides et al., 1987).

Dans sa forme classique, une instance du RCPSP comporte la donnée :

- de l'ensemble T des n tâches d'un projet. La tâche i a une durée $p(i)$. Par convention, les tâches 1 et n sont deux tâches fictives de durées nulles, représentant respectivement, le début et la fin du projet. Les tâches du projet sont non interruptibles (ou non préemptives). Ainsi, une tâche i débutant à l'instant $S(i)$ termine son exécution à l'instant $S(i) + p(i)$.
- de l'ensemble P défini sur $T * T$ des arcs indiquant les relations de précédence entre les tâches. Les relations sont de type fin/début. L'arc (i, j) indique que la tâche i doit être achevée avant le début de la tâche j . Autrement dit : $S(j) \geq S(i) + p(i)$.
- de l'ensemble R des m ressources renouvelables et cumulatives (elles peuvent exécuter plusieurs activités simultanément). La ressource k est disponible, à tout instant, en quantité limitée $d(k)$.

On appelle consommation, et l'on note $c(i, k)$, la quantité de la ressource k allouée à l'activité i durant tout le temps de son exécution et disponibilité $d(k)$ la quantité disponible de k . Les ressources étant renouvelables, la quantité $r(i, k)$ utilisée par une activité i est à nouveau disponible au terme de l'exécution de i .

1) Modèle de base du RCPSP

Les modèles utilisés pour le RCPSP font appel à la programmation linéaire. On distingue deux grands types de modèle : en temps discrétisé et en temps continu.

a) Modèle discrétisé

Dans la majorité des cas, les données (durées, consommations et capacités) sont des entiers positifs. On connaît a priori une date maximale de fin de projet T et l'on discrétise le temps t sur l'horizon de temps $H = \{1 \dots T\}$. Ainsi, les dates de début des activités peuvent aussi être supposées entières.

Pour chaque tâche i , on se donne aussi l'intervalle de temps $[e(i), l(i)]$ dans lequel $S(i)$ est compris. Ceci permet de limiter le nombre de variables booléennes $X(i, t)$. Une première estimation de ces valeurs peut être obtenue facilement en calculant les dates au plus tôt et plus tard du projet sans ressources.

L'objectif du RCPSP est de réaliser l'ensemble du projet en un temps minimal.

Ce problème se modélise sous la forme d'un programme linéaire à variables mixtes avec comme seules variables de décision les variables booléennes $X(i, t)$, avec $X(i, t) = 1$ si la tâche i commence à l'instant t , $X(i, t) = 0$ sinon. Pour la tâche i , la date de début t varie de $e(i)$ à $l(i)$.

Pour faciliter la lecture du modèle, on peut ajouter les variables $S(i)$, date de début de la tâche i ($S(i) = t$ si et seulement si $X(i, t) = 1$).

Modèle (1) : modèle discrétisé du RCPSP

$$(1.1) \quad \min S(n)$$

$$(1.2) \quad \sum_{t=e(i)}^{l(i)} X(i, t) = 1 \quad \forall i \in T$$

$$(1.3) \quad S(1) = 1$$

$$(1.4) \quad S(i) = \sum_{t=e(i)}^{l(i)} t X(i, t) \quad \forall i \in T, i \geq 2$$

$$(1.5) \quad S(j) \geq S(i) + p(i) \quad \forall (i, j) \in P$$

$$(1.6) \quad \sum_{i \in T} c(i, k) \sum_{u=\max\{e(i), t-p(i)+1\}}^{\min\{l(i), t\}} X(i, u) \leq d(k) \quad \forall t \in H, \forall k \in R$$

$$(1.7) \quad X(i, t) \in \{0, 1\} \quad \forall i \in T, \forall t \in H$$

La fonction (1.1) correspond à la minimisation de la date de fin de projet.

L'équation (1.2) impose une et une seule date de démarrage pour chaque tâche i .

L'équation (1.3) donne la date de démarrage du projet.

L'équation (1.4) permet de calculer la date de démarrage de la tâche i à partir des valeurs $X(i, t)$.

L'équation (1.5) correspond aux contraintes de précédence.

L'équation (1.6) vérifie qu'à tout moment, la consommation de la ressource k par les différentes tâches en cours d'exécution est inférieure ou égale à la disponibilité de cette ressource.

Cette approche, prévue pour des ressources consommables, permet aussi de prendre en compte les ressources usines disponibles jour après jour. C'est celle que nous retiendrons par la suite.

b) Modèle temps continu

Dans ces modèles, les dates de début $S(i)$ sont modélisées par des variables réelles. Ils utilisent de plus des variables booléennes $X(i, j)$ où $X(i, j) = 1$ si la tâche i se termine avant la tâche j : $S(i) + p(i) \leq S(j)$. Les variables $S(i)$ sont ici impératives. La seconde formulation est appelée « *sequence-based formulation* » ou « *disjunctive formulation* ». Cette formulation a été proposée initialement pour les problèmes avec ressources disjonctives (si les tâches i et j utilisent la ressource k , on doit décider laquelle des deux l'utilise en premier). Le modèle le

plus abouti de ce type est proposé par (Artigues et al., 2003). Il est basé sur la notion de flots de ressources entre les activités. Un flot $c(i,k)$ de ressources k arrive à la tâche i lorsque celle-ci commence et en repart lorsqu'elle s'arrête. Les variables $F(i,j,k)$ modélisent le flot de la ressource k partant de la tâche i au moment où elle se termine pour arriver à la tâche j qui débute. Les activités fictives début (1) et fin (n) sont la source et le puits de ce flot.

Modèle (2) : modèle temps continu du RCPSP

$$(2.1) \quad \min S(n)$$

$$(2.2) \quad X(i, j) = 1 \quad \forall (i, j) \in P$$

$$(2.3) \quad X(i, j) + X(j, i) \leq 1 \quad \forall i \in T, \forall j \in T$$

$$(2.4) \quad S(j) \geq S(i) + p(i) * X(i, j) - M(1 - X(i, j)) \quad \forall i \in T, \forall j \in T$$

$$(2.5) \quad F(i, j, k) \leq N * X(i, j) \quad \forall i \in T, \forall j \in T, \forall k \in R$$

$$(2.6) \quad \sum_j F(i, j, k) = c(i, k) \quad \forall i \in T, \forall k \in R$$

$$(2.7) \quad \sum_i F(i, j, k) = c(j, k) \quad \forall j \in T, \forall k \in R$$

$$(2.8) \quad X(i, j) \in \{0,1\} \quad \forall i \in T, \forall j \in T$$

La fonction (2.1) correspond à la minimisation de la date de fin de projet.

L'équation (2.2) fixe les relations de précédence.

L'équation (2.3) impose que, s'il existe un flux de i à j , ce flux soit dans un seul sens.

L'équation (2.4) lie les dates de début. M est un nombre supérieur à toute date de fin de projet. On vérifie aisément que si $X(i,j) = 1$, la tâche j commencera après la fin de i et que si $X(i,j) = 0$, la contrainte revient simplement à $S(j) \geq 0$.

L'équation (2.5) implique que $X(i,j) = 1$ s'il existe un flot de ressources entre i et j . Ici, N est un grand nombre.

L'équation (2.6) vérifie que le flot $c(i,k)$ de ressource k entré en i repart de i .

L'équation (2.7) vérifie que les flux entrants en j de la ressource k sont égaux au besoin $c(j,k)$.

Cette formulation a un nombre fixe $n.n$ de variables booléennes. Mais elle demande d'utiliser deux fois la technique classique dite du big-M (équations (2.4) et (2.5)). Cette technique ne permet pas de bonnes techniques de relaxation.

Dans notre problème, la disponibilité des ressources usines varie de jour en jour. Par nature, notre problème est discrétisé. Une approche temps continu est cependant possible. Nous la présentons par la suite.

2) Extension du problème de base

Un certain nombre de variantes et d'extension du modèle de base ont été publiées. On se reportera à l'article de (Hartmann, Briskorn, 2010) pour une revue de littérature récente.

Une variante intéressante pour notre problème est présentée dans (Neumann, Schwindt, 2003). Les auteurs introduisent le concept de RCPSP avec production et consommation de ressources (RCPSP/CPR). Une tâche i consomme $d(i,j)$ unités de la ressource j à son démarrage et produit $f(i,j)$ unités en se finissant. Ce concept généralise ressource renouvelable et ressource consommable.

- Si $d(i,j) = f(i,j)$, nous sommes dans le cas d'une ressource renouvelable.
- Si $d(i,j) = 0$ et $f(i,j) > 0$, la tâche i produit $f(i,j)$ ressources j pendant son exécution.
- Si $0 < d(i,j) < f(i,j)$, la tâche i commence par consommer de la ressource j avant d'en produire en plus grande quantité (en utilisant d'autres ressources).
- Si $d(i,j) > f(i,j)$, alors la ressource est une ressource consommable.

Il existe des travaux consacrés à la gestion des approvisionnements des projets de construction (Kini, 1999). Dans ces travaux, les capacités d'approvisionnement sont supposées

connues. On cherche à planifier les livraisons, mais sans chercher à planifier les productions comme dans notre cas. Le but est d'**ajuster** au mieux la courbe des besoins de la construction à la courbe des capacités d'approvisionnement en tenant compte de la productivité des ouvriers, du coût de stocks de matériaux sur le chantier ou de l'espace d'entreposage. Les approches développées se partagent entre l'approvisionnement en juste à temps et la création de stocks tampons. La gestion en juste-à-temps procure un gain de productivité (Pheng, Chuan, 2001) et permet, en diminuant les stocks, de réduire l'espace de stockage et de lisser l'utilisation des ressources chantier. A contrario, il engendre des coûts du fait des incertitudes sur l'avancement du chantier et des prix élevés des achats à court terme (Polat et al., 2007). L'alternative est de faire des stocks tampons sur le chantier. Ces stocks permettent de mieux lisser l'utilisation des ressources et limitent les arrêts de chantier dus aux ruptures d'approvisionnements (Ng et al., 2009 ; Caron et al., 1998).

Par contre, nous n'avons pas trouvé mention dans la littérature de problèmes dans lesquels les ressources sont produites par des acteurs extérieurs au projet avec un calendrier spécifique et des capacités de stockage. Dans notre problème, le calendrier de production d'un fournisseur impose des intervalles de temps dans lesquels les tâches du projet peuvent s'exécuter. Si une tâche nécessitant la ressource de ce fournisseur ne peut pas se placer dans ces intervalles, le problème devient impossible. Dans le cas du RCPSP/CPR, si une tâche produit une ressource, elle produira cette ressource quelle que soit la date à laquelle elle se termine. Les tâches suivantes nécessitant cette ressource seront simplement décalées dans le temps.

Par la suite, nous nous intéressons plus particulièrement à des modélisations sous forme d'un modèle linéaire à variables mixtes. Les problèmes de RCPSP sont des problèmes NP-complet donc difficiles à résoudre sur des problèmes de grande taille. Beaucoup d'articles présentent des méthodes de résolution spécifique exactes (branch and bound, relaxation lagrangienne) exploitant la structure particulière des problèmes ou bien des méthodes heuristiques basées sur des algorithmes de liste. L'avantage premier de ce type de formulation est de pouvoir utiliser les solveurs du marché (type Lingo ou Cplex). Ces solveurs utilisent eux aussi des méthodes de type **branch and bound**, plus génériques. Ils sont donc moins performants sur les problèmes de grande taille que les méthodes spécifiques. Mais ces solveurs ont fait de gigantesques progrès ces dernières années et surtout, ils sont souvent les seuls logiciels disponibles pour les applications industrielles.

V) Modèle discrétisé en programmation linéaire mixte du problème

Dans notre problème, les dates sont discrétisées (jour par jour) et les données peuvent se ramener à des valeurs entières. Pour modéliser notre problème, nous avons retenu l'approche standard où une des variables fondamentales est la variable binaire $X(i,t) = 1$ si la tâche i commence à la date t . Nous avons ajouté des variables $Y(i,t)$. $Y(i,t) = 1$ si la tâche i est en cours d'exécution à la date t et vaut 0 sinon. Ces variables $Y(i,t)$ ne sont pas booléennes, ce qui augmenterait le temps de résolution, mais réelles.

Indices

| | |
|--------|--|
| i, j | tâche |
| r | ressource renouvelable (chantier) |
| s | sous-traitant ou ressource livrée par le sous-traitant |
| t | temps |

Ensembles

| | |
|-----|---|
| P | tâche du projet |
| H | horizon de temps |
| R | ressources chantier |
| S | ressources livrées par les sous-traitants |

Données

| | |
|-----------|---|
| $p(i)$ | durée de la tâche i |
| $c(i,r)$ | consommation par la tâche i de ressources chantier r |
| $b(i,s)$ | besoin en livraison de ressource s pour exécuter la tâche i |
| $sm(s)$ | stock maximum du sous-traitant s |
| $si(s)$ | stock initial du sous-traitant s |
| $e(i)$ | début au mieux de la tâche i |
| $l(i)$ | début au pire de la tâche i |
| $dr(r,t)$ | disponibilité de la ressource r à la date t |
| $pm(s,t)$ | capacité de production maximale de la ressource s à la date t |
| $s(i,j)$ | 0 si j suit immédiatement i , 1 sinon |
| $am(r)$ | ajout maximal de ressource r |
| $vr(r)$ | valeur d'acquisition journalière d'une ressource r supplémentaire |
| vp | coût d'une journée de chantier |
| $vs(s)$ | coût du stockage d'une ressource s par jour |
| vg | valeur journalière de location de la grue. |

Variables

| | |
|-----------|--|
| $A(r,t)$ | ajout de ressource r le jour t |
| $X(i,t)$ | 1 si la tâche i commence à la date t , 0 sinon |
| $PR(s,t)$ | production chez le sous-traitant s à la date t |
| $ST(s,t)$ | stock du sous-traitant s en fin de date t |
| $S(i)$ | date de début de la tâche i |
| CP | coût dû à la durée du projet |
| CA | coût dû à l'ajout de ressources chantier |
| CG | coût de la location de la grue |
| CS | coût des stocks usine |

Modèle (3) : modèle discrétisé en programmation linéaire mixte du problème

$$(3.1) \quad \min CP+CA+CS+CG$$

$$(3.2) \quad \sum_{t=d(i)}^{l(i)} X(i,t) = 1 \quad \forall i$$

$$(3.2) \quad S(1) = 1$$

$$(3.4) \quad S(i) \sum_{t=d(i)}^{l(i)} X(i,t) \quad \forall i \geq 2$$

$$(3.5.1) \quad S(j) \geq S(i) + p(i) \quad \forall (i,j) \in P / s(i,j) = 1$$

$$(3.5.2) \quad S(j) = S(i) + p(i) \quad \forall (i,j) \in P / s(i,j) = 0$$

$$(3.6) \quad Y(i,t) \leq 1 \quad \forall i \in P, \forall t \in H$$

$$(3.7) \quad \sum_t Y(i,t) = p(i) \quad \forall i \in P$$

$$(3.8) \quad \sum_{u=t}^{t+p(i)-1} Y(i,u) \geq p(i) X(i,t) \quad \forall i \in P, \forall t \in \{e(i), l(i)\}$$

$$(3.9) \quad \sum_i c(i,r) Y(i,t) \leq dr(r,t) + A(r,t) \quad \forall t \in H, \forall r \in R$$

$$(3.10) \quad A(r,t) \leq am(r) \quad \forall r \in R$$

$$(3.11) \quad ST(s,1) = si(s) \quad \forall s \in S$$

$$(3.12) \quad ST(s,t-1) + PR(s,t) = ST(s,t) + \sum_i b(i,s) Y(i,t) \quad \forall s \in S, \forall t \in H$$

$$(3.13) \quad ST(s,t) \leq sm(s) \quad \forall s \in S$$

$$(3.14) \quad PR(s,t) \leq pm(s,t) \quad \forall s \in S, \forall t \in H$$

$$(3.15) \quad CP = vp.S(n)$$

$$(3.16) \quad CA = \sum_r \sum_t vr(r).A(r,t)$$

$$(3.17) \quad CS = \sum_s \sum_t vs(s).ST(s,t)$$

$$(3.18) \quad CG = vg.(S(dmgru) + p(dmgru) - S(mtgru))$$

$$(3.19) \quad X(i,t) \in \{0,1\} \quad \forall i \in T, \forall t \in H$$

La fonction (3.1) correspond à la minimisation du coût total du projet.

L'équation (3.2) impose une et une seule date de démarrage pour chaque tâche i.

L'équation (3.3) donne la date de démarrage du projet.

L'équation (3.4) permet de calculer la date de démarrage de la tâche i à partir des valeurs X(i,t).

Les équations (3.5.1) et (3.5.2) correspondent aux contraintes de précédence :

- si s(i,j) = 1 alors la tâche j commence après la fin de i ;
- si s(i,j) = 0 alors la tâche j commence dès la fin de i.

Les équations (3.6), (3.7) et (3.8) déterminent les Y(i,t). Dans (3.8) si X(i,t) = 0, l'équation est toujours vérifiée. Si X(i,t) = 1 (la tâche i commence à t), compte tenu de (3.6), les valeurs Y(i,t), ..., Y(i,t+p(i)-1) sont à 1. L'équation (3.7) force les autres valeurs à 0.

L'équation (3.9) vérifie qu'à tout moment, la consommation de la ressource chantier r par les différentes tâches en cours d'exécution est inférieure ou égale à la disponibilité totale (initiale plus ajout) de cette ressource.

L'équation (3.10) limite les ajouts de la ressource r.

Les équations (3.11), (3.12) et (3.13) calculent les stocks chez les sous-traitants et vérifient qu'ils ne dépassent pas la capacité limite.

L'équation (3.14) vérifie que la production est inférieure ou égale à la capacité de production.

L'équation (3.15) donne la somme des coûts journaliers du chantier.

L'équation (3.16) donne le coût des ressources chantiers supplémentaires.

L'équation (3.17) donne le coût des stocks.

L'équation (3.18) donne le coût de location de la grue.

VI) Modèle temps continu en programmation linéaire mixte du problème

Nous présentons maintenant un modèle étendant le modèle temps continu à notre problème. Fondamentalement, cette approche modélise un flot de ressources passant d'une activité à l'autre. Dans notre cas, il faut considérer trois types d'activités :

- les activités $A(i)$ chantier ;
- les activités $P(u,t)$ correspondant à la production de l'usine u à la date t ;
- les activités $S(u,t)$ correspondant au stock présent dans l'usine u en fin de date t .

Les différents flots possibles sont alors :

- les flots entre $A(i)$ et $A(j)$ modélisent le flot des ressources consommables ;
- les flots entre $S(u,t-1)$ et $S(u,t)$ correspondent aux ressources produites restant en stock ;
- les flots entre $S(u,t)$ et $A(i)$ correspondent aux livraisons faites par l'usine u à la date t pour approvisionner la tâche t .

Rappelons que pour cette modélisation, les variables fondamentales sont les variables binaires $X(i,j) = 1$ si la tâche i précède la tâche j . Ici, nous avons une variable booléenne $Y(i,t) = 1$ si la tâche i commence à la date t .

Indices

| | |
|-------|--|
| i,j | tâche |
| r | ressource renouvelable (chantier) |
| s | sous-traitant ou ressource livrée par le sous-traitant |
| t | temps |

Ensembles

| | |
|-----|--|
| P | tâche du projet |
| H | horizon de temps |
| R | ressources chantier (renouvelable) |
| S | ressources livrées par les sous-traitants (non renouvelable) |

Données

| | |
|-----------|---|
| $p(i)$ | durée de la tâche i |
| $c(i,r)$ | consommation par la tâche i de ressources chantier r |
| $b(i,s)$ | besoin en livraison de ressource s pour exécuter la tâche i |
| $sm(s)$ | stock maximum du sous-traitant s |
| $si(s)$ | stock initial du sous-traitant s |
| $e(i)$ | début au mieux de la tâche i |
| $l(i)$ | début au pire de la tâche i |
| $dr(r,t)$ | disponibilité de la ressource r à la date t |
| $pm(s,t)$ | capacité de production maximale de la ressource s à la date t |
| $s(i,j)$ | 0 si j suit immédiatement i , 1 sinon |
| $am(r)$ | ajout maximal de ressource r |
| $vr(r)$ | valeur d'acquisition journalière d'une ressource r supplémentaire |
| vp | coût d'une journée de chantier |
| $vs(s)$ | coût du stockage d'une ressource s par jour |
| vg | valeur journalière de location de la grue. |

Variables

| | |
|------------|---|
| $A(r,t)$ | ajout de ressource r le jour t |
| $F(i,j,r)$ | flot de ressources renouvelables r allant de i à j |
| $G(s,i,t)$ | flot de ressources allant du sous-traitant s à la tâche i à la date t |
| $X(i,j)$ | 1 si la tâche i se termine avant le début de j |
| $Y(i,t)$ | 1 si la tâche i commence à la date t , 0 sinon |
| $PR(s,t)$ | production chez le sous-traitant s à la date t |
| $ST(s,t)$ | stock du sous-traitant s en fin de date t |

| | |
|------|--|
| S(i) | date de début de la tâche i |
| CP | coût dû à la durée du projet |
| CA | coût dû à l'ajout de ressources chantier |
| CG | coût de la location de la grue |
| CS | coût des stocks usine |

Modèle (4) : modèle temps continu en programmation linéaire mixte du problème

- (4.1) $\min CP + CA + CS + CG$
- (4.2) $X(i, j) = 1 \quad \forall (i, j) \in P$
- (4.3) $X(i, j) + X(j, i) \leq 1 \quad \forall i \in T, \forall j \in T$
- (4.4.1) $S(j) \geq S(i) + p(i) * X(i, j) - M(1 - X(i, j)) \quad \forall i \in T, \forall j \in T$
- (4.4.2) $S(j) = S(i) + p(i) \quad \forall (i, j) \in P / s(i, j) = 0$
- (4.5) $F(i, j, r) \leq N * X(i, j) \quad \forall i \in T, \forall j \in T, \forall r \in R$
- (4.6) $\sum_j F(i, j, r) = c(i, r) \quad \forall i \in T, \forall r \in R$
- (4.7) $\sum_i F(i, j, r) = c(j, r) \quad \forall j \in T, \forall r \in R$
- (4.8) $ST(s, 1) = si(s) \quad \forall s \in S$
- (4.9) $ST(s, t - 1) + PR(s, t) = ST(s, t) + \sum_i G(s, i, t) \quad \forall s \in S, \forall t \in H$
- (4.10) $ST(s, t) \leq sm(s) \quad \forall s \in S$
- (4.11) $PR(s, t) \leq pm(s, t) \quad \forall s \in S, \forall t \in H$
- (4.12) $\sum_{t \in \epsilon(i)} Y(i, t) = 1 \quad \forall i$
- (4.13) $\sum_s G(s, i, t) \leq NY(i, t) \quad \forall i \in T, \forall t \in H$
- (4.14) $CP = vp.S(n)$
- (4.15) $CA = \sum_r \sum_t yr(r).A(r, t)$
- (4.16) $CS = \sum_s \sum_t vs(s).ST(s, t)$
- (4.17) $CG = vg.(S(dmgru) + p(dmgru) - S(mtgru))$
- (4.18) $X(i, j) \in \{0, 1\} \quad \forall i \in T, \forall j \in T$
- (4.19) $Y(i, t) \in \{0, 1\} \quad \forall i \in T, \forall t \in H$

La fonction (4.1) correspond à la minimisation du coût total du projet.

L'équation (4.2) impose $X(i, j) = 1$ pour les tâches liées par une relation de précedence.

L'équation (4.3) permet d'exprimer les 3 possibilités :

- i précède j : $X(i, j) = 1$
- j précède i : $X(j, i) = 1$
- i et j ont un intervalle commun : $X(i, j) = X(j, i) = 0$

Les équations (4.4.1) et (4.4.2) donnent les relations entre les dates de début pour les tâches liées par une précedence : $X(i, j) = 1$.

L'équation (4.5) lie l'existence d'un flot et la relation de précedence.

Les équations (4.6) et (4.7) assurent que les flots de ressources entrant et sortant correspondent aux besoins.

L'équation (4.9) fixe les stocks initiaux chez les sous-traitants.

L'équation (4.10) calcule les stocks journaliers.

L'équation (4.11) vérifie que les stocks sont limités.

L'équation (4.12) vérifie que la date de début de i est unique.

L'équation (4.13) lie la date de début et le flot de ressources arrivant du sous-traitant.

L'équation (4.14) donne la somme des coûts journaliers du chantier.

L'équation (4.15) donne le coût des ressources chantiers supplémentaires.

L'équation (4.16) donne le coût des stocks.

L'équation (4.17) donne le coût de location de la grue.

L'approche temps continu multiplie le nombre de variables booléennes de l'approche temps discrétisé. Elle fait appel de plus à trois groupes d'équations utilisant la méthode du big-M. Pour notre problème, cette alternative ne présente pas d'avantage et n'a pas été poussée plus avant.

VII) Phase de prétraitement

Dans cette partie, nous repartons du modèle temps discrétisé, le modèle (3). Comme dans tout problème MILP (Mixed-Integer Linear Programming), le temps de résolution est particulièrement sensible au nombre de variables booléennes. Ici, ce nombre est donné par :

$$\sum_i (l(i) - e(i))$$

Pour réduire la complexité et le temps de résolution, il est impératif de réduire le nombre de variables. La phase de prétraitement consiste à trouver des bornes sur les valeurs de début au mieux $e(i)$ et début au pire $l(i)$. Pour les problèmes à ressources consommables, on utilise les contraintes disjonctives. Pour les ressources non consommables, l'idée est de comparer les courbes cumulées de ressources et de besoins.

1) Contraintes disjonctives

Il existe une contrainte disjonctive entre deux tâches A et B si les deux tâches ne peuvent pas s'exécuter en parallèle parce qu'elles utilisent plus que le disponible d'une ressource consommable. On doit donc arbitrer entre : « A avant B » et « B avant A ». Considérons le petit projet dont le diagramme de précédence des tâches est en figure 47.

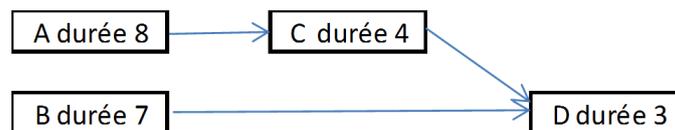


Figure 47 : diagramme de précédence des tâches d'un petit projet

On dispose de 3 ouvriers. A et B demandent la présence de 2 ouvriers, C et D en demandent un seul. Il existe donc une contrainte disjonctive entre A et B. Sans cette contrainte, D peut commencer au plus tôt à la date 12.

Si l'arbitrage est « A avant B », D peut commencer au plus tôt à la date 15. Le diagramme de précédence des tâches est modifié, comme indiqué à la figure 48.

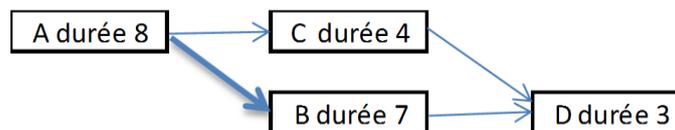


Figure 48 : diagramme de précédence des tâches d'un petit projet avec l'arbitrage « A avant B »

Si l'arbitrage est « B avant A », D peut commencer au plus tôt à la date 19. Le diagramme de précédence des tâches est modifié, comme indiqué à la figure 49.

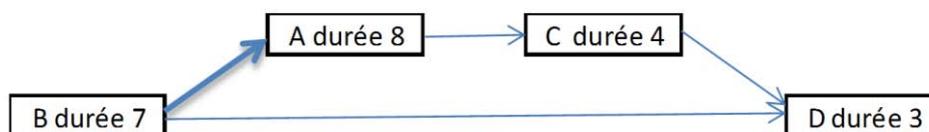


Figure 49 : diagramme de précédence des tâches d'un petit projet avec l'arbitrage « B avant A »

En tout état de cause, la contrainte disjonctive implique que D peut commencer au plus tôt à 15.

Ici par exemple, à cause de la grue louée, on doit arbitrer entre rénover B1 ou B2 en premier. Le démontage de la grue DmGru commencera au mieux à la date 7.

Une limite de cette approche pour notre problème vient de la difficulté à déterminer les contraintes disjonctives lorsque la disponibilité des ressources peut varier dans le temps. Par exemple, si l'on dispose de 4 ouvriers du jour 5 à 8, A et B peuvent s'exécuter en parallèle sur ces 4 jours.

2) Courbes cumulées de ressources et de besoins

(Carlier, Chrétienne, 1988) propose un algorithme exact dit « algorithme de décalage » pour trouver le retard minimal induit par une seule ressource consommable (par exemple, des fonds versés par une banque). Initialement, on calcule l'ordonnancement sans tenir compte de la ressource. Puisque la ressource est nécessaire pour démarrer une tâche, l'idée assez naturelle est de commencer les tâches au plus tard en espérant que la ressource sera arrivée. On compare donc le besoin cumulé en se basant sur les dates de début au plus tard et la disponibilité cumulée.

Reprenons l'exemple **d'application** présenté précédemment. Chaque tâche demande 10 k€ pour débiter. La banque verse 3 k€ chaque jour jusqu'à versement des 40 k€. Le tableau 19 donne le diagramme des tâches calées au plus tard, les besoins induits et les versements.

| Date | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 | 13 | 14 | 15 |
|--------------------|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|
| Gantt au plus tard | | | | A | | | | C | | | D | | | | |
| | | | | | | B | | | | | | | | | |
| Besoin cumulé | 10 | 10 | 10 | 10 | 10 | 20 | 20 | 20 | 30 | 30 | 30 | 30 | 40 | 40 | 40 |
| Disponibilité | 3 | 6 | 9 | 12 | 15 | 18 | 21 | 24 | 27 | 30 | 33 | 36 | 39 | 40 | 40 |

Tableau 19 : diagramme des tâches calées au plus tard de l'exemple d'application

On constate que A ne pourra pas débiter avant le jour 4 (retard 4), B avant 7 (retard 2), C avant 10 (retard 1) et D avant 14 (retard 1). Au mieux, la fin de projet sera en 19 au lieu de 15. On obtient une solution réalisable en fixant comme date de début minimale de chaque tâche la date de début au plus tard plus le décalage et en recalculant le PERT (Program ou Project Evaluation and Review Technique) sans ressources correspondantes.

3) Méthode proposée

Dans notre problème, les deux types de ressource se rencontrent. Les bornes que l'on peut obtenir par les méthodes précédentes ne sont pas suffisantes. Dans notre petit projet, si nous avons à la fois la contrainte due aux ouvriers et la contrainte due aux versements, la solution optimale minimisant la durée du chantier est de 21 jours (tableau 20).

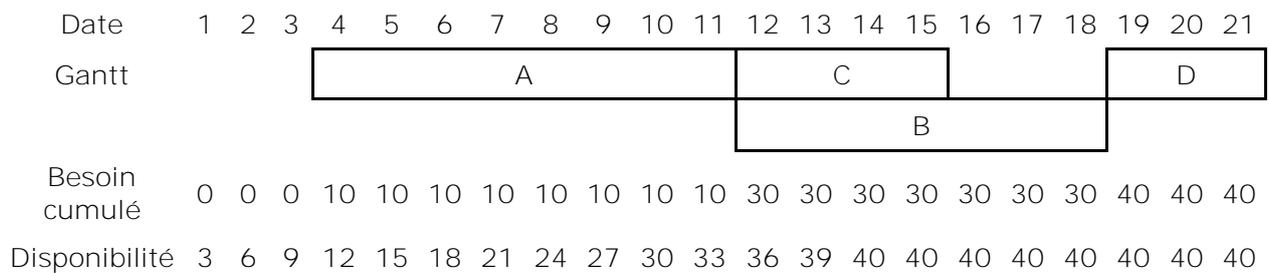


Tableau 20 : diagramme des tâches optimal **de l'exemple d'application**

Pour prendre en compte l'ensemble des ressources, nous avons utilisé le modèle (3) :

- en relaxant la contrainte sur le caractère booléen des $X(i,t)$ (suppression des équations (3.19) ;
- en prenant comme fonction objectif (3.1) : minimiser la date de début de la tâche i : $\text{Min} = S(i)$.

Initialement : $e(i) = 0, l(i) = T \forall i$. Ce modèle est donc linéaire. Il donne comme résultats des valeurs $X(i,t)$ réelles et inférieures à 1 du fait de l'équation (3.2). En l'appliquant à l'ensemble des tâches, on obtient ainsi une borne inférieure (réelle) de leurs débuts. Sur l'exemple **d'application**, on obtient les résultats présentés au tableau 21.

| | |
|---------|------|
| Tâche A | 2,2 |
| Tâche B | 2,2 |
| Tâche C | 11,1 |
| Tâche D | 16,0 |

Tableau 21 : valeurs initiales des débuts au mieux $e(i)$ **de l'exemple d'application**

Ces premières valeurs permettent de fixer des $X(i,t)$ à 0 :

$$\begin{aligned}
 X(1,A) &= X(2,A) = 0 \\
 X(1,B) &= X(2,B) = 0 \\
 X(1,C) &= X(2,C) = \dots = X(11,C) = 0 \\
 X(1,D) &= X(2,D) = \dots = X(15,C) = 0
 \end{aligned}$$

Compte tenu de ces connaissances acquises, nous allons réitérer les calculs pour affiner les bornes jusqu'à stabilisation (pas de nouvelles valeurs $X(i,t)$ mises à 0). Cet algorithme est fini puisque le nombre de $X(i,t)$ l'est. Dans l'exemple **d'application**, ceci se fait en 4 itérations. Les résultats sont présentés au tableau 22.

| e(i) | Itération 1 | Itération 2 | Itération 3 | Itération 4 |
|-------------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|
| Tâche A | 2,2 | 3,1 | 4,0 | 4,0 |
| Tâche B | 2,2 | 3,1 | 4,0 | 4,0 |
| Tâche C | 11,1 | 12,0 | 12,0 | 12,0 |
| Tâche D | 16,0 | 16,0 | 16,0 | 16,0 |

Tableau 22 : calcul itératif des débuts au mieux $e(i)$ **de l'exemple d'application**

Pour obtenir les dates de début au pire $l(i)$, nous utilisons la même méthode en prenant cette fois comme fonction objectif la maximisation de la date de début : $\text{Max } S(i)$.

Soit f_p une date de fin réaliste du projet (obtenue en utilisant une heuristique par exemple).

Les valeurs $e(i)$ sont celles précédemment trouvées. Initialement : $l(i) = f_p \forall i$.

Sur l'exemple d'application, en prenant $fp = 23$, on trouve la solution en deux itérations. Les résultats sont présentés au tableau 23.

| I(i) | Itération 1 | Itération 2 |
|-------------|--------------------|--------------------|
| Tâche A | 8,0 | 8,0 |
| Tâche B | 13,0 | 13,0 |
| Tâche C | 16,0 | 16,0 |
| Tâche D | 20,0 | 20,0 |

Tableau 23 : calcul itératif des débuts au pire I(i) de l'exemple d'application

VIII) Autres approches : heuristiques et métaheuristiques

Les méthodes exactes demeurent difficilement applicables à des projets de grande taille (plus de 60 tâches (Artigues et al., 2008)) ou sur un horizon de temps élevé. Les chercheurs ont développé des méthodes heuristiques basées sur des règles de priorité pour générer des ordonnancements réalisables avec un temps de calcul acceptable. Ces heuristiques sont classiquement utilisées dans les progiciels commerciaux de gestion de projet. On rencontre deux grands types de schémas : les méthodes sérielles et les méthodes de générations parallèles.

Dans les méthodes sérielles, les tâches constituent l'incrément. Les tâches sont classées selon un ordre de priorité (la liste de priorité).

A l'instant $t = 0$, on parcourt la liste et l'on ordonnance les tâches exécutables, c'est à dire :

- non encore débutées ;
- dont tous les prédécesseurs sont achevés ;
- qui disposent des ressources nécessaires.

Quand on ne peut plus ajouter de tâches, on passe à l'instant t le plus proche où des ressources se libèrent (fin d'une tâche) et l'on réitère jusqu'à ce que toutes les tâches soient ordonnancées.

Ce schéma n'est intéressant que pour des ressources renouvelables.

Dans la méthode de générations parallèles, on incrémente le temps, ce qui permet de prendre en compte l'arrivée de nouvelles ressources.

La liste de priorité peut :

- être fixée une fois pour toutes (ex : on calcule le PERT sans tenir compte des ressources et l'on trie les tâches par début au plus tôt croissant) ;
- recalculée à chaque étape en fonction des allocations passées (ex : on prend en priorité les tâches qui demandent le moins de ressources supplémentaires).

Au cours de ces dernières années, de nombreuses métaheuristiques ont été proposées pour résoudre le RCPSP. Certaines de ces approches métaheuristiques comme la recherche tabou (Thomas, Salhi, 1998) et le recuit simulé (Boctor, 1996) gardent une seule solution à chaque cycle de l'algorithme. Ces méthodes tentent de trouver une solution de meilleure qualité que la solution en cours de manière itérative.

D'autres métaheuristiques gardent un ensemble de solutions à chaque cycle de l'algorithme (la population). Ensuite, on fait évoluer cette population en appliquant successivement un ensemble d'opérateurs sur les solutions présentes pour les transformer en nouvelles solutions. On trouve dans cette catégorie : les algorithmes génétiques (Hartmann, 1998 ; Mendes et al.,

2009), les colonies de fourmis (Merkle et al., 2002), l'optimisation par essaims particulaires (Jarboui et al., 2008 ; Zhang et al., 2008), les algorithmes neuro-génétiques (Agarwal et al., 2011) et plus récemment les métaheuristiques inspirées du comportement des abeilles (Akbari et al., 2011).

D'autres approches pour résoudre le problème du RCPSP sont des hybrides entre les différentes approches. Ces méthodes tentent d'exploiter les avantages de deux ou plusieurs méthodes afin de concevoir un algorithme plus performant. (Tseng, Chen, 2006), (Chen et al., 2010) ou (Valls et al., 2008) sont parmi les méthodes hybrides les plus représentatives présentées dans la littérature.

IX) Application

Nous reprenons l'exemple **d'application** présenté précédemment.

1) Hypothèses

Le délai maximum prévu est de 26 jours. Le tableau 24 donne les ressources demandées par chacune des tâches. Le tableau 25 donne jour par jour les capacités résiduelles des fournisseurs et la disponibilité des ressources chantier. On supposera que les stocks initiaux sont nuls dans chaque usine.

| Code | Durée | Besoin en ressources usine | | | Besoin en ressources chantier | | |
|--------|-------|----------------------------|-----|-----|-------------------------------|-----|-----|
| | | RU1 | RU2 | RU3 | RC1 | RC2 | RC3 |
| Acces | 2 | 4 | 0 | 0 | 2 | 1 | 0 |
| B1RC | 1 | 2 | 2 | 2 | 2 | 0 | 1 |
| B1E1 | 1 | 1 | 2 | 2 | 3 | 1 | 1 |
| B1E2 | 1 | 1 | 2 | 1 | 3 | 0 | 1 |
| B1Ax | 2 | 2 | 3 | 1 | 2 | 0 | 0 |
| B2RC | 1 | 2 | 2 | 1 | 2 | 1 | 1 |
| B2E1 | 1 | 1 | 2 | 1 | 2 | 0 | 1 |
| B2E2 | 1 | 1 | 2 | 1 | 2 | 0 | 1 |
| B2Fin | 2 | 0 | 0 | 1 | 2 | 1 | 0 |
| B3RC | 1 | 2 | 3 | 1 | 2 | 1 | 0 |
| B3R1 | 1 | 2 | 2 | 1 | 3 | 1 | 0 |
| MtGru | 1 | 0 | 0 | 0 | 1 | 1 | 1 |
| DmGru | 1 | 0 | 0 | 1 | 1 | 1 | 1 |
| B13Fin | 2 | 0 | 0 | 0 | 3 | 1 | 0 |

Tableau 24 : ressources demandées par chacune des tâches **de l'exemple d'application**

| Date | Capacité de production résiduelle des usines | | | Disponibilité des ressources chantier | | |
|-----------------------|--|-----|-----|---------------------------------------|-----|-----|
| | RU1 | RU2 | RU3 | RC1 | RC2 | RC3 |
| 1 | 2 | 1 | 1 | 2 | 1 | 1 |
| 2 | 2 | 1 | 1 | 2 | 1 | 1 |
| 3 | 1 | 1 | 3 | 2 | 1 | 1 |
| 4 | 1 | 1 | 2 | 2 | 1 | 1 |
| 5 | 0 | 2 | 2 | 2 | 0 | 1 |
| 6 | 2 | 0 | 0 | 2 | 0 | 1 |
| 7 | 2 | 2 | 2 | 2 | 1 | 1 |
| 8 | 3 | 0 | 0 | 2 | 1 | 1 |
| 9 | 2 | 1 | 1 | 2 | 1 | 1 |
| 10 | 2 | 1 | 2 | 2 | 0 | 1 |
| 11 | 2 | 2 | 2 | 2 | 0 | 1 |
| 12 | 2 | 1 | 2 | 2 | 0 | 1 |
| 13 | 2 | 1 | 2 | 2 | 1 | 1 |
| 14 | 2 | 0 | 3 | 2 | 1 | 1 |
| 15 | 3 | 2 | 1 | 2 | 1 | 1 |
| 16 | 1 | 2 | 4 | 2 | 1 | 1 |
| 17 | 2 | 1 | 3 | 2 | 1 | 1 |
| 18 | 2 | 1 | 2 | 2 | 1 | 1 |
| 19 | 1 | 2 | 1 | 2 | 1 | 1 |
| 20 | 2 | 2 | 3 | 2 | 1 | 1 |
| 21 | 3 | 1 | 3 | 2 | 1 | 1 |
| 22 | 2 | 2 | 4 | 2 | 1 | 1 |
| 23 | 1 | 1 | 2 | 2 | 1 | 1 |
| 24 | 3 | 1 | 1 | 2 | 1 | 1 |
| 25 | 1 | 2 | 4 | 2 | 1 | 1 |
| Stock / Ajout maximum | 5 | 3 | 0 | 2 | 1 | 0 |

Tableau 25 : capacités résiduelles des fournisseurs et disponibilité des ressources chantier de l'exemple d'application

2) Phase de prétraitement

L'objet de ce prétraitement est de limiter le nombre de variables booléennes $X(i,t)$ en réduisant le plus possible l'intervalle de temps $[e(i), l(i)]$ sur lequel la tâche i peut commencer. Le tableau 26 donne les valeurs de début au mieux $e(i)$ et les valeurs de début au pire $l(i)$ pour une date de fin de projet prévue f_p allant de 21 à 26. Les valeurs $l(i)$ croissent quand f_p s'accroît. Mais, en considérant par exemple les dates des tâches « Acces » ou « B1RC », on peut noter que ces dates ne varient pas linéairement avec f_p (au contraire de « B2RC » ou « B3RC »).

| Début | e(i) | l(i)/21 | l(i)/22 | l(i)/23 | l(i)/24 | l(i)/25 | l(i)/26 |
|--------------|-------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|
| Acces | 2 | 10 | 11 | 13 | 14 | 14 | 15 |
| B1RC | 10 | 13 | 13 | 16 | 17 | 17 | 17 |
| B1E1 | 11 | 14 | 14 | 17 | 18 | 18 | 18 |
| B1E2 | 12 | 15 | 15 | 18 | 19 | 19 | 19 |
| B1Ax | 14 | 17 | 18 | 19 | 20 | 21 | 22 |
| B2RC | 3 | 16 | 17 | 18 | 19 | 20 | 21 |
| B2E1 | 4 | 17 | 18 | 19 | 20 | 21 | 22 |
| B2E2 | 5 | 18 | 19 | 20 | 21 | 22 | 23 |
| B2Fin | 7 | 19 | 20 | 21 | 22 | 23 | 24 |
| B3RC | 9 | 17 | 18 | 19 | 20 | 21 | 22 |
| B3R1 | 10 | 18 | 19 | 20 | 21 | 22 | 23 |
| MtGru | 1 | 11 | 12 | 14 | 15 | 15 | 16 |
| DmGru | 13 | 20 | 21 | 22 | 23 | 24 | 25 |
| B13Fin | 17 | 19 | 20 | 21 | 22 | 23 | 24 |

Tableau 26 : valeurs des débuts au mieux e(i) et au pire l(i) de l'exemple d'application

3) Résultats

Sur ce petit exemple **d'application**, les ordonnancements obtenus sont très sensibles au critère objectif. Nous avons retenu quatre indicateurs :

- la date de fin du projet ;
- le nombre de ressources stockées ;
- le nombre de ressources chantier ajoutées ;
- le nombre de jours de location de la grue.

Nous avons retenu successivement chacun de ces indicateurs comme unique critère à minimiser. Le tableau 27 donne la valeur minimale de chacun des critères.

| Critère | Date de fin du projet | Nombre de ressources stockées | Nombre de ressources chantier ajoutées | Nombre de jours de location de la grue |
|-----------------|------------------------------|--------------------------------------|---|---|
| Valeur minimale | 21 | 13 | 5 | 9 |

Tableau 27 : valeur minimale des critères à minimiser de l'exemple d'application

La durée du projet étant comprise entre 21 et 26 jours, une indication intéressante pour un chef de projet est de connaître le coût à payer pour finir en un nombre de jours fixé. Pour cette étude, nous avons fixé à 5 € (respectivement 2 €) le coût de stockage journalier d'un élément RU1 (respectivement RU2). Le coût chargé d'embauche d'un ouvrier est de 150 € par jour, la location d'un engin revient à 300 €/jour et le coût de location de la grue est de 1000 €/jour.

Le tableau 28 donne le coût résultant pour une date de fin fixée, le nombre d'éléments stockés, de ressources ajoutées et la durée de location de la grue.

| Date de fin du projet | Coût | Nombre de ressources usines stockées | | Nombre de ressources chantier ajoutées | | Durée de location de la grue |
|-----------------------|----------|--------------------------------------|-----|--|-----------------------|------------------------------|
| | | RU1 | RU2 | Main d'œuvre | Engins de manutention | |
| 21 | 13 425 € | 5 | 25 | 7 | 1 | 12 |
| 22 | 13 120 € | 8 | 15 | 5 | 1 | 12 |
| 23 | 13 106 € | 6 | 13 | 5 | 1 | 12 |
| 24 | 13 105 € | 5 | 15 | 5 | 1 | 12 |
| 25 | 10 399 € | 3 | 17 | 7 | 1 | 9 |
| 26 | 10 102 € | 2 | 21 | 5 | 1 | 9 |

Tableau 28 : coût, nombre de ressources usines stockées, nombre de ressources chantier ajoutées et durée de location de la grue selon la date de fin du projet pour l'exemple d'application (en vert : les valeurs minimales)

X) Conclusion

Dans ce chapitre, nous nous sommes intéressés à l'outil de planification du chantier sous contraintes de ressources. Ces ressources sont dues soit aux ressources propres au chantier (main-d'œuvre, engins), soit aux ressources produites et livrées par les sous-traitants.

Nous avons montré que cette problématique de gestion est scientifiquement une généralisation de problèmes d'ordonnancement sous contraintes de ressources (RCPSP) avec des contraintes spécifiques, en particulier :

- la prise en compte simultanée de ressources renouvelables et consommables ;
- des ressources renouvelables dont la disponibilité varie au cours du temps ;
- des ressources consommables dépendant des capacités de production, de stockage et de livraison des sous-traitants ;
- des ressources particulières à certains chantiers telles qu'une grue de manutention.

Nous avons présenté un modèle linéaire à variables mixtes pour le résoudre ainsi qu'un algorithme permettant de minimiser le nombre de variables booléennes de ce modèle. Ce modèle constitue un prototype d'un module de gestion nécessaire dans un « ERP dédié à la rénovation » (Enterprise Resource Planning, en français : Progiciel de Gestion Intégré (PGI)). Des développements de ce prototype sont bien entendu à envisager. En particulier, trouver des heuristiques de priorité adaptées à ces problèmes dans le cas de grands chantiers avec plus de 50 tâches.

Conclusion générale et perspectives

1) Conclusion générale

Les travaux du GIEC (Groupe d'experts Intergouvernemental sur l'Évolution du Climat) ont démontré un réchauffement du système climatique. Celui-ci est très probablement attribuable à la hausse des concentrations de gaz à effet de serre (GES) dues aux activités humaines. Pour limiter la hausse de la température moyenne à la surface du globe à 2 °C, il faut diviser **par deux les émissions de GES en 2050 par rapport à 1990. C'est l'objectif de plusieurs engagements internationaux. Néanmoins, les pays en voie de développement n'ont pas d'autre choix que d'augmenter leurs émissions de GES pour se développer. Les pays industrialisés doivent donc diviser les leurs par quatre : c'est ce que l'on appelle le facteur 4.**

En France, le bâtiment est **le secteur d'activités qui consomme le plus d'énergie primaire et le second pour la production de gaz à effet de serre (après les transports).** Or le taux de renouvellement des bâtiments est très faible. Il est donc indispensable de rénover énergétiquement les bâtiments existants. Une rénovation énergétique globale est une remise **en état d'un bâtiment existant aux performances thermiques dégradées au niveau d'un bâtiment récent avec des performances thermiques élevées. C'est donc une solution efficace** pour atteindre les objectifs internationaux de réduction des émissions de gaz à effet de serre, mais aussi pour réduire la facture énergétique des habitants.

En 2009, l'État français s'est fixé comme objectif de réduire la consommation d'énergie du parc de bâtiments existants d'au moins 38 % d'ici à 2020. La loi « Grenelle 1 » prévoyait la rénovation complète de 400 000 logements par an à compter de 2013. Or, en 2012, il y a eu 125 000 logements rénovés dans le logement privé et 25 000 logements rénovés dans le logement social. Pour rattraper ce retard, le Gouvernement français a présenté le 21 mars 2013 un « **Plan d'investissement pour le logement** ». **L'objectif est d'atteindre 500 000 logements rénovés par an, dont 120 000 logements sociaux, d'ici à 2017.** On peut se poser la question **de la faisabilité d'un tel plan alors que l'on n'a pas atteint** les objectifs précédents qui étaient moins ambitieux.

Comment rénover autant de logements en si peu de temps ? Comment réduire le délai des rénovations ? Comment améliorer la qualité des rénovations ? Comment réduire le coût des rénovations ? **Comment réduire l'impact (sur les habitants, sur l'environnement...) des rénovations ?**

Cette thèse explore l'intérêt de l'industrialisation de la rénovation des bâtiments, notamment des immeubles de logements collectifs. Les rénovations énergétiques artisanales **sont actuellement longues, coûteuses et la performance thermique après travaux n'est pas toujours satisfaisante. L'industrialisation a justement pour objectifs de réduire le coût et le délai et d'améliorer la qualité grâce à des méthodes industrielles. C'est donc une solution intéressante pour répondre aux objectifs ambitieux de rénovation énergétique.**

La rénovation énergétique industrialisée concerne le produit, le processus et les acteurs. Elle consiste à utiliser des produits de rénovation adaptés à un grand nombre de bâtiments, mais personnalisés, qui sont préfabriqués en usine de manière automatisée. Elle vise aussi à gérer un processus de rénovation avec une logistique intégrée, des **technologies de l'information et de la communication** et une coopération entre les acteurs.

La première contribution scientifique de la thèse est la modélisation du processus de **rénovation industrialisée avec l'identification des verrous à lever. Les premières « briques » d'un outil intégré pour la rénovation énergétique sont présentées :** élaboration de la maquette numérique, configuration des produits, estimation des coûts et du délai. Enfin, un outil de planification du chantier sous contraintes de ressources en lien avec la gestion de production des usines a été plus particulièrement développé.

Le système constructif proposé est basé sur une ossature métallique avec des panneaux de remplissage à ossature bois. Les panneaux, de grandes dimensions et multifonctionnels, sont livrés sur chantier prêts à être posés. Ils sont fixés directement sur les façades ou au moyen **d'une ossature métallique. Il n'y a pas d'ajustement sur chantier de leurs dimensions au bâtiment existant, hormis le traitement des jonctions entre panneaux.** Cela impose une prise des cotes du bâtiment existant très précise : **de l'ordre du centimètre pour les façades et du millimètre pour les menuiseries.**

Les techniques de relevé tridimensionnel permettent de constituer une maquette numérique **du bâtiment existant avec une bonne précision**. L'acquisition des données est assez rapide, mais le traitement des données reste à automatiser. De nombreux travaux de recherche portent sur ce sujet, dont certains avec une application à la rénovation industrialisée. Néanmoins, il reste une part **importante d'expertise sur les systèmes constructifs du bâtiment** pour caractériser la maquette numérique.

La configuration de la rénovation permet de déterminer le calepinage des panneaux, la nomenclature et la **gamme de montage des produits de rénovation de façades et d'estimer le coût** de la rénovation. Elle repose sur un modèle générique des entités manipulées : les composants entrants dans la nomenclature et les tâches définissant la gamme de montage. Ces modèles génériques sont formalisés sous forme de problèmes de satisfaction de contraintes et contiennent un ensemble de variables et de contraintes. Plusieurs types de contraintes doivent être intégrés afin de représenter la diversité offerte par la solution de rénovation industrialisée et garantir la faisabilité de l'enveloppe thermique.

Alors que la rénovation artisanale fonctionne par projets, la rénovation industrialisée est vue comme un processus continu qui dépasse les projets de rénovation. Pour chaque projet, est **exécuté le même processus de rénovation (au moins au niveau agrégé)**. Le retour d'expérience des projets précédents permet de faire évoluer le processus de rénovation pour les projets suivants. Des outils de gestion de production et de planification sont nécessaires.

Le processus de rénovation industrialisée **accorde plus d'importance** aux études, car il faut anticiper au maximum les problèmes qui se présentent sur le chantier. La maquette numérique qui regroupe toute la documentation sur les bâtiments existants **est alors d'une grande aide**. Cela implique également une très bonne coordination entre la phase de conception et la phase **de réalisation**. L'idéal étant sans doute que ce soit les mêmes acteurs qui interviennent dans les deux phases.

Il faut veiller à ce que les solutions industrialisées proposées s'intègrent au cadre réglementaire actuel, sans quoi elles ne seraient pas utilisées par les acteurs en place. Les limites au recours à ces solutions industrialisées sont **le choix d'une technique traditionnelle qui exclut de fait les solutions industrialisées, les appels d'offres en lots séparés et les procédures d'attribution des marchés en deux phases (conception et réalisation) qui ne permettent pas** une bonne coordination entre ces deux phases.

La rénovation industrialisée nécessite un certain nombre **d'études qui sont réalisées avant (études préliminaires) ou après (études détaillées) l'attribution du marché**. Plus les études préliminaires sont complètes, plus l'estimation des coûts et des délais est fiable. Mais c'est un investissement risqué pour le fournisseur de systèmes qui n'est pas sûr d'obtenir le marché. C'est pourquoi il faut réduire le coût de ces études, grâce à l'élaboration de la maquette numérique.

D'autre part, il faut évaluer les devis et planning initiaux d'après les études préliminaires. **Un outil d'estimation est proposé**. Il est basé sur des inducteurs de coût et de délai qui décrivent la complexité du bâtiment existant et des produits de rénovation.

La planification du chantier dépend des ressources disponibles. Certaines sont « renouvelables » telles que **les ressources humaines, les engins de levage... tandis que d'autres sont « consommables »** telles que les livraisons de panneaux. Elle dépend également de la gestion de production des usines, **car l'on travaille en flux synchrone**. C'est un problème **d'ordonnancement sous contraintes de ressources (RCPS)** avec des contraintes spécifiques. Pour le résoudre, un modèle linéaire à variables mixtes a été développé et testé sur un **exemple d'application**. Il constitue une première « brique » d'un « ERP dédié à la rénovation » (Enterprise Resource Planning, en français : Progiciel de Gestion Intégré (PGI)).

II) Perspectives

Les perspectives de cette thèse concernent les produits, le processus de rénovation, les « briques logicielles » et leur intégration dans des plateformes logicielles.

Concernant les produits de rénovation, la recherche s'orientera vers l'automatisation de la fabrication des panneaux. Il faudra étudier **l'intérêt d'autres systèmes constructifs**, tels que les panneaux **sandwichs (actuels ou à base de bois) et d'autres façons de les fabriquer** telle que la personnalisation à la commande. La simulation de flux pourra être utilisée pour améliorer la gestion de production. Une piste intéressante est également la robotisation de la pose des panneaux sur chantier. Enfin, une évaluation environnementale des produits de rénovation devra être menée, puis une Analyse de Cycle de Vie (ACV) de la rénovation complète qui tienne compte de la fabrication, **du transport, de la pose...**

Le processus de rénovation pourra être amélioré en réfléchissant au rôle de chaque acteur et aux procédures de contractualisation. **Il s'appuiera sur des outils et méthodes** pour favoriser la coopération et éviter les ressaisies.

Le développement des briques logicielles est à poursuivre.

Celle du relevé 3D et de la maquette numérique est indispensable et prioritaire. Le travail **de recherche s'orientera vers l'automatisation du traitement des données, avec la reconnaissance des zones et l'aide à la caractérisation des éléments constructifs.**

La configuration prendra tout son intérêt lorsque l'on pourra faire de l'optimisation, par exemple trouver le meilleur calepinage pour un coût ou un temps de pose minimum. Plusieurs scénarios de calepinage seront envisagés : panneaux les plus grands possibles, panneaux aux **dimensions similaires...** Ils dépendent également du système constructif.

L'outil de planification du chantier sous contraintes de ressources devra être étendu à des applications avec plus de 50 tâches. Pour cela, il faudra trouver des heuristiques adaptées. De manière plus générale, les chaînes logistiques vertes constituent un thème de recherche à approfondir pour la rénovation industrialisée.

Enfin, il y a un travail important à **réaliser sur l'intégration et l'interopérabilité de ces « briques logicielles ».**

Pour la conception de la rénovation, les « briques logicielles » sur la maquette numérique et la configuration pourraient être intégrées à une plateforme de gestion du cycle de vie de produit, en anglais Product Lifecycle Management (PLM). Celle-ci permet de gérer la création, **la modification et l'échange des informations sur le produit tout au long de son cycle de vie.** **L'objectif est de rendre accessible toute l'information produite pendant tout le cycle de vie du produit à tous les membres d'une organisation, y compris les fournisseurs clés et les clients.**

Pour le pilotage de la fabrication, les « briques logicielles » **sur l'estimation des coûts et sur la planification du chantier** pourraient être intégrées à un ERP. Celui-ci intègre dans un seul **système d'information de nombreuses fonctions (appelées modules) telles que la gestion de production, la gestion commerciale, la logistique, les ressources humaines...** L'objectif pour la rénovation industrialisée est de gérer à la fois la gestion de production des usines et la planification du chantier, en flux synchrone. Cela pourra améliorer la gestion de la chaîne logistique.

Une piste de recherche se situe à un niveau plus stratégique **dans l'optique de développer la rénovation industrialisée à grande échelle.** Elle vise à optimiser la localisation des futures unités de production et le type de chaînes logistiques en fonction de la localisation des bâtiments à rénover et des fournisseurs. **Les objectifs de l'optimisation peuvent être le coût global, le délai ou le bilan environnemental.**

III) Retombées immédiates de la thèse

Le projet de recherche SIRENE (Systèmes Industriels pour la Rénovation Énergétique, voir l'avant-propos) et cette thèse ont permis de définir un concept de rénovation énergétique industrialisée, de vérifier sa faisabilité et de proposer des solutions techniques et organisationnelles.

Le travail engagé dans cette thèse va se prolonger de deux manières :

- par la poursuite de la recherche académique, notamment dans le cadre du projet de recherche CRIBA (Construction et Rénovation Industrialisées Bois Acier) grâce à deux nouvelles thèses à l'École des Mines d'Albi-Carmaux ;
- grâce au **retour d'expérience des premiers chantiers de rénovation** qui seront réalisés par la société Syrthea (filiale de TBC et Groupe Millet International).

1) Lancement du projet de recherche CRIBA

Le projet CRIBA (Construction et Rénovation Industrialisées Bois Acier) est un projet **d'industrialisation de la rénovation** des logements collectifs à très haute performance énergétique (25 kWhEP/m²/an) (ADEME, 2013).

Ce projet de recherche est accompagné **par l'ADEME dans le cadre de l'appel à manifestations d'intérêt** « Bâtiments et îlots à énergie positive et bilan carbone minimum » du programme Énergies Renouvelables et Décarbonées **des Investissements d'Avenir**.

Il a débuté en janvier 2013 et se poursuivra **jusqu'en décembre 2015**. Il est coordonné par la société Syrthea.

Il comprend une partie recherche et une partie démonstration.

La recherche porte sur la conception d'un système constructif bois/acier, préfabriqué en usine, pour l'isolation thermique des façades. Elle comprend également le développement de **méthodes et d'outils logiciels pour réaliser la maquette numérique des bâtiments, configurer les produits de rénovation et planifier le chantier.**

La démonstration a pour objectif d'expérimenter le concept à l'échelle d'un îlot de bâtiments à rénover.

a) Partie recherche du projet CRIBA

La partie recherche du projet CRIBA comprend 3 tâches :

- tâche 1-1 : développement du système constructif bois/acier multifonctionnel ;
- tâche 1-2 : conception des outils logiciels pour la rénovation/construction industrialisées ;
- tâche 1-3 : **définition d'une filière professionnelle de rénovation/construction industrialisées.**

La tâche 1-1 consiste à concevoir la façade à ossature porteuse en acier et les panneaux de remplissage à ossature bois. Elle comprend **aussi l'étude de l'intégration des équipements de production d'énergie dans les panneaux de façade et la conception des fixations de la nouvelle façade sur les bâtiments existants.**

La tâche 1-2 comprend **d'une part, la conception des outils d'évaluation du bâtiment existant et d'autre part, la conception des outils de configuration de la rénovation et de préparation des travaux.**

Pour le relevé 3D, la solution étudiée est basée sur l'utilisation d'un drone pour la prise de photographies et le traitement par photogrammétrie pour créer une maquette numérique du bâtiment existant. Le relevé topographique ou la lasergrammétrie sera utilisé pour comparer la précision des modèles obtenus.

Pour la partie configuration, un outil informatique ou configurateur sera développé pour assister le concepteur de la rénovation en l'aidant à définir et dessiner le calepinage des façades. Pour chaque solution de rénovation, l'outil évaluera la performance thermique de

celle-ci et le coût associé. Il permettra l'édition de la nomenclature physique (liste des composants et des sous-ensembles nécessaires à la rénovation) et de la gamme de montage associée (ordre de pose des articles de la nomenclature).

Le configurateur repose sur un modèle de connaissances métiers (processus de rénovation et connaissances expertes) et techniques (système constructif bois/acier), formalisé sous forme de Constraints Satisfaction Problem ou CSP. Des algorithmes de filtrage garantiront, d'une part, la propagation des choix et informations fournis sur la rénovation en cours de définition et, d'autres part, l'interactivité avec le concepteur. Ce modèle sera validé sur des exemples simples de bâtiments à rénover, puis testé en grandeur réelle sur le chantier démonstrateur.

Une nouvelle thèse a débuté en septembre 2013 à l'École des Mines d'Albi-Carmaux sur l'élaboration des algorithmes de calepinages des panneaux de remplissage sur les façades.

La tâche 1-3 consiste notamment à modéliser les chaînes logistiques de préfabrication des composants, d'intégration des produits industriels et d'approvisionnement du système constructif sur site.

Une nouvelle thèse a débuté en janvier 2014 à l'École des Mines d'Albi-Carmaux sur la planification du chantier sous contraintes de ressources.

b) Partie démonstration du projet CRIBA

La démonstration complète de l'approche CRIBA sera réalisée par un chantier de réhabilitation urbaine d'un îlot de 5 bâtiments (110 logements collectifs) à Saint-Paul-lès-Dax, comme illustré à la figure 50.



Figure 50 : exemple de façade à rénover

Actuellement, les 5 bâtiments consomment en moyenne 367 kWh/(m².an) d'énergie primaire. Le projet vise une rénovation énergétique à très haute performance, avec une consommation après rénovation inférieure à 25 kWh/(m².an) d'énergie primaire. Cela correspond à la moitié de la consommation maximale pour les logements neufs, fixée à 50 kWh/(m².an) d'énergie primaire par la réglementation thermique RT 2012.

La rénovation sera éventuellement couplée à une opération d'extension des bâtiments existants ou de construction de logements neufs dans une logique de réappropriation de l'espace par une nouvelle densité maîtrisée. Le projet architectural veillera de plus à tirer au mieux parti des espaces verts entourant les résidences dans une logique de valorisation du cadre de vie.

L'approche îlot du projet CRIBA se décline sur deux volets :

- la mutualisation des solutions de production et de gestion des énergies avec, par exemple, l'installation d'une chaufferie bois alimentant tous les bâtiments de l'îlot ;

- les économies d'échelle dues à la rénovation d'un îlot de bâtiments par rapport au traitement séparé de chaque bâtiment et à l'industrialisation du processus de rénovation (optimisation de la productivité de la chaîne de fabrication et optimisation de la logistique globale, des approvisionnements de l'usine et du chantier).

La rénovation énergétique du démonstrateur s'effectuera dans le cadre d'une opération de conception-réalisation portée par la société Syrthea.

Le démarrage des travaux est prévu à l'été 2014.

L'objectif est que ce chantier démonstrateur soit une opération exemplaire et surtout reproductible qui constitue un véritable lancement de l'activité économique de Syrthea et plus largement d'une filière de rénovation industrialisée des immeubles de logements collectifs.

2) Création de la société Syrthea

La société Syrthea a été créée septembre 2012. Ses actionnaires sont TBC (actionnaire à 85 %) et Groupe Millet International.

Syrthea est un fournisseur de systèmes qui commercialise à la fois des produits et services pour la rénovation énergétique des immeubles de logements collectifs.

Syrthea intervient à la fois comme une société d'ingénierie, mais aussi comme le distributeur d'une offre technique globale qui gère l'intégralité de la solution de rénovation ainsi que l'approvisionnement des produits (des études préliminaires à la réalisation comme illustré à la figure 44).

Syrthea met à disposition des architectes une interface logicielle qui leur permet de réaliser la conception d'ensemble de la rénovation thermique. Syrthea gère une plateforme numérique d'échange sur laquelle les architectes intègrent les prescriptions et qui permet par la suite de faire l'ensemble des calculs de conception des panneaux et les données pour la GPAO des unités de fabrication. Syrthea commercialise et distribue auprès des entreprises de mise en œuvre (façadiers, entreprises générales) les panneaux préfabriqués. La société Syrthea assure le suivi de l'installation des panneaux.

Bibliographie

AALTO UNIVERSITY, 2011. *SmartTES - Innovation in timber construction for the modernisation of the building envelope - Project report* [en ligne]. Espoo, Finland : s.n. [Consulté le 21 juillet 2013]. ISBN 978-952-60-4589-4. **Disponible à l'adresse :** http://www.tesenergyfacade.com/downloads/smartTES_2011_aalto%20report%20ISBN.pdf.

ADEME, 2010. *Feuille de route sur les bâtiments et îlots à énergie positive et à bilan carbone minimum* [en ligne]. août 2010. S.l. : s.n. [Consulté le 19 juillet 2013]. **Disponible à l'adresse :** <http://www2.ademe.fr/servlet/getBin?name=E07F9E411F4690AFCD0E250CB66FA6B31295944832348.pdf>.

ADEME, 2013. CRIBA. In : [en ligne]. Fiche de présentation. S.l. 14 juin 2013. [Consulté le 19 juillet 2013]. **Disponible à l'adresse :** www2.ademe.fr/servlet/getBin?name=F19C1C12622097A8F450B6996EB0EA3C_tomcatlocal1371139056918.pdf.

AFIS, 2009. *Découvrir et comprendre l'ingénierie système - Version 3*. 12 février 2009. S.l. : s.n.

AGARWAL, Anurag, COLAK, Selcuk et ERENGUC, Selcuk, 2011. A neurogenetic approach for the resource-constrained project scheduling problem. In : *Computers & Operations Research* [en ligne]. janvier 2011. Vol. 38, n° 1, p. 44-50. [Consulté le 22 juillet 2013]. DOI [10.1016/j.cor.2010.01.007](https://doi.org/10.1016/j.cor.2010.01.007). **Disponible à l'adresse :** <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0305054810000183>.

AHI, Payman et SEARCY, Cory, 2013. A comparative literature analysis of definitions for green and sustainable supply chain management. In : *Journal of Cleaner Production* [en ligne]. 1 août 2013. Vol. 52, p. 329-341. [Consulté le 20 juillet 2013]. DOI [10.1016/j.jclepro.2013.02.018](https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2013.02.018). **Disponible à l'adresse :** <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S095965261300067X>.

AKASAH, Zainal Abidin et ALIAS, Maizam, 2009. Application of the generic process modelling in the preservation of heritage school buildings. In : *Structural Studies, Repairs and Maintenance of Heritage Architecture XI* [en ligne]. Tallinn, Estonia : C.A. Brebbia. juillet 2009. p. 323-333. [Consulté le 20 juillet 2013]. **Disponible à l'adresse :** <http://library.witpress.com/pages/PaperInfo.asp?PaperID=20478>.

AKBARI, Reza, ZEIGHAMI, Vahid et ZIARATI, Koorush, 2011. Artificial bee colony for resource constrained project scheduling problem. In : *International Journal of Industrial Engineering Computations* [en ligne]. 2011. Vol. 2, n° 1, p. 45-60. [Consulté le 22 juillet 2013]. DOI [10.5267/j.ijiec.2010.04.004](https://doi.org/10.5267/j.ijiec.2010.04.004). **Disponible à l'adresse :** http://www.growingscience.com/ijiec/Vol2/IJIEC_2010_27.pdf.

ALBY, Emmanuel, 2006. *Élaboration d'une méthodologie de relevé d'objets architecturaux : contribution basée sur la combinaison de techniques d'acquisition* [en ligne]. Thèse de doctorat en sciences de l'architecture. Nancy, France : Université Henri Poincaré - Nancy 1. [Consulté le 21 juillet 2013]. **Disponible à l'adresse :** <http://www.sudoc.fr/112693474>.

ALINAITWE, Alinaitwe, MWAKALI, Jackson et HANSSON, Bengt, 2006. Assessing the degree of industrialisation in construction - a case of Uganda. In : *Journal of Civil Engineering and Management International research and Achievements* [en ligne]. 2006. Vol. 12, n° 3, p. 221-229. [Consulté le 20 juillet 2013]. **Disponible à l'adresse :** www.tandfonline.com/doi/pdf/10.1080/13923730.2006.9636396.

ANAH, [sans date]. *Les coûts et les performances de la rénovation énergétique* [en ligne]. S.I. Agence Nationale de l'Habitat (ANAH). [Consulté le 28 juillet 2013]. Disponible à l'adresse : http://urbamet.documentation.equipement.gouv.fr/documents/Urbamet/0308/Urbamet-0308039/PCAOUV00124971_s3.pdf.

ARTIGUES, Christian, DEMASSEY, Sophie et NÉRON, Emmanuel, 2008. *Resource-constrained project scheduling: models, algorithms, extensions and applications* [en ligne]. London; Hoboken, NJ : ISTE ; Wiley. [Consulté le 22 juillet 2013]. ISBN 9780470393840 047039384X 9780470611227 0470611227 1848210345 9781848210349. Disponible à l'adresse : <http://public.eblib.com/EBLPublic/PublicView.do?ptiID=477626>.

ARTIGUES, Christian, MICHELON, Philippe et REUSSER, Stéphane, 2003. Insertion techniques for static and dynamic resource-constrained project scheduling. In : *European Journal of Operational Research* [en ligne]. 1 septembre 2003. Vol. 149, n° 2, p. 249-267. [Consulté le 22 juillet 2013]. DOI 10.1016/S0377-2217(02)00758-0. Disponible à l'adresse : <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0377221702007580>.

AUROY, Michel, 2000. *Élaboration des schémas de procédés industriels* [en ligne]. Éditions T.I. S.I. : s.n. J6018. [Consulté le 20 juillet 2013]. Disponible à l'adresse : <http://www.techniques-ingenieur.fr/book/j6018/elaboration-des-schemas-de-procedes-industriels.html>.

AUSTIN, Simon, BALDWIN, Andrew, LI, Baizhan et WASKETT, Paul, 1999. Analytical design planning technique: a model of the detailed building design process. In : *Design Studies* [en ligne]. mai 1999. Vol. 20, n° 3, p. 279-296. [Consulté le 20 juillet 2013]. DOI 10.1016/S0142-694X(98)00038-6. Disponible à l'adresse : <http://www.sciencedirect.com/science/article/B6V2K-3W5SV0K-3/2/Od424fe44357378da153424e7b630429>.

AUTODESK, [sans date]. ImageModeler. In : *Autodesk* [en ligne]. [Consulté le 21 juillet 2013]. Disponible à l'adresse : <http://fr.autodesk.ca/adsk/servlet/index?id=11996863&siteID=9719701>.

BANFI, Silvia, FARSI, Mehdi et JAKOB, Martin, 2012. *An analysis of investment decisions for energy-efficient renovation of multi-family buildings* [en ligne]. Final report. S.I. [Consulté le 20 juillet 2013]. Disponible à l'adresse : [www.empa-ren.ch/CCEM_Retrofit/PDF/Final_Report_Submitted_to_CCEM_BFE_CEPE_ETH_TEP_Energy_2012_04_13_sent%20\(2\).pdf](http://www.empa-ren.ch/CCEM_Retrofit/PDF/Final_Report_Submitted_to_CCEM_BFE_CEPE_ETH_TEP_Energy_2012_04_13_sent%20(2).pdf).

BCG, 2009. *Réflexions sur le portefeuille de mesures Grenelle Environnement* [en ligne]. S.I. Boston Consulting Group (BCG). [Consulté le 28 juillet 2013]. Disponible à l'adresse : Réflexions sur le portefeuille de mesures Grenelle Environnement.

BEDOY, Gabriel et RADANNE, Pierre, 2013. *Note de décryptage - Bilan de la 18^{ième} session de négociations climatiques - Convention-cadre des Nations Unies sur les changements climatiques* [en ligne]. S.I. Institut de la Francophonie pour le Développement Durable (IFDD). [Consulté le 19 juillet 2013]. Disponible à l'adresse : www.ifdd.francophonie.org/media/docs/publications/551_NDDpost-Doha.pdf.

BÉJAT, Tímea, BARTHELME, Anne-France et PEROTTI, Jasmin, 2012. Évaluation de l'impact de la rénovation d'une façade sur la disponibilité de la lumière naturelle intérieure. In : *XXe Rencontres Universitaires de Génie Civil* [en ligne]. Chambéry, France : s.n. 6 juin 2012. p. 9. [Consulté le 20 juillet 2013]. Disponible à l'adresse : www.polytech.univ-savoie.fr/fileadmin/polytech_autres_sites/sites/augc2012/actes/Contribution1325.pdf.

BENHAMOU, Frédéric, MCALLESTER, David Allen et VAN HENTENRYCK, Pascal, 1994. CLP (intervals) revisited. In : *Proceedings of the 1994 International Symposium on Logic programming (ILPS '94)* [en ligne]. Cambridge, MA, USA : MIT Press. 1994. p. 124-138. [Consulté le 21 juillet 2013]. Disponible à l'adresse : <http://dl.acm.org/citation.cfm?id=200616.200634>.

BENNEKROUF, M., BENYOUCEF, L. et SARI, Z., 2010. Problèmes de conception et pilotage des chaînes logistiques inverses et globales - **État de l'art**. In : *Évaluation et optimisation des systèmes innovants de production de biens et de services* [en ligne]. Hammamet, Tunisia : s.n. mai 2010. [Consulté le 20 juillet 2013]. Disponible à l'adresse : www.enim.fr/mosim2010/articles/338.pdf.

BENNIS, Abdelhamid, BOMBARDIER, Vincent, THIRIET, Philippe et BRIE, David, 2011. **Recalage d'un nuage de points de scanner laser terrestre avec une image de bâtiment**. In : *XXIIIe Colloque GRETSI Traitement du Signal & des Images, GRETSI 2011* [en ligne]. Bordeaux, France : s.n. 5 septembre 2011. [Consulté le 21 juillet 2013]. Disponible à l'adresse : <http://hal.archives-ouvertes.fr/hal-00605130>.

BERDOULAY, Vincent et SOUBEYRAN, Olivier, 2002. *L'écologie urbaine et l'urbanisme: aux fondements des enjeux actuels*. Paris, France : La Découverte. Recherches. ISBN 270713886X 9782707138866.

BERLINER BPM-OFFENSIVE, [sans date]. *BPMN 2.0 - Business Process Model and Notation* [en ligne]. S.l. : s.n. [Consulté le 20 juillet 2013]. Disponible à l'adresse : www.bpmb.de/images/BPMN2_0_Poster_FR.pdf.

BESSIÈRE, Christian et CORDIER, Marie-Odile, 1993. Arc-consistency and arc-consistency again. In : *Proceedings of the eleventh national conference on artificial intelligence (AAAI'93)* [en ligne]. Washington, DC, USA : AAAI Press. 1993. p. 108-113. [Consulté le 21 juillet 2013]. Disponible à l'adresse : <http://dl.acm.org/citation.cfm?id=1867270.1867287>.

BOCTOR, Fayez Fouad, 1996. Resource-constrained project scheduling by simulated annealing. In : *International Journal of Production Research* [en ligne]. 1996. Vol. 34, n° 8, p. 2335-2351. [Consulté le 22 juillet 2013]. DOI 10.1080/00207549608905028. Disponible à l'adresse : <http://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/00207549608905028>.

BOIVIN, Hervé et BAUDRAND, Maxime, 2010. Construction bois et rénovation thermique. In : *Carrefour international du bois 2010* [en ligne]. Diaporama. Nantes, France. 3 juin 2010. [Consulté le 20 juillet 2013]. Disponible à l'adresse : <http://services.poissonbouge.net/clients/59332f89-95fb-f3f7-562d21d2dd2348ef/docs/bd7e5e70-abd0-dd35-b31a2f7a974dd6ed.pdf>.

BOULAASSAL, Hakim, 2010. *Segmentation et modélisation géométriques de façades de bâtiments à partir de relevés laser terrestres* [en ligne]. Thèse de doctorat en sciences de l'ingénieur (topographie-géomatique). S.l. : Université de Strasbourg. [Consulté le 21 juillet 2013]. Disponible à l'adresse : <http://scd-theses.u-strasbg.fr/1785/>.

BRUNETIÈRE, Jean-René, D' AUBREBY, Marc, DEBIESSE, Georges, GUÉRIN, André-Jean, PERRET, Bernard et SCHWARTZ, Dominique, 2013. 008378-01 : *Le facteur 4 en France : la division par 4 des émissions de gaz à effet de serre à l'horizon 2050 - Rapport final* [en ligne]. S.l. Conseil Général de l'Environnement et du Développement Durable (CGEDD) - Ministère de l'Écologie, du Développement Durable et de l'Énergie (MEDDE). [Consulté le 25 juillet 2013]. Disponible à l'adresse : www.cgedd.developpement-durable.gouv.fr/IMG/pdf/008378-01_rapport-final_cle0aca84.pdf.

CADWORK, [sans date]. *Interface THEO online* [en ligne]. S.l. : s.n. [Consulté le 21 juillet 2013]. Disponible à l'adresse : http://www.cadwork.com/images/cadwork/ecms/Ci_Blonay/Interfaces/TheoOnlineInfo.jpg.

CAH, 2012. *Le point sur Le marché de l'amélioration énergétique des logements 2010/2012* [en ligne]. S.l. Club de l'Amélioration de l'Habitat (CAH). [Consulté le 19 juillet 2013]. Disponible à l'adresse : www.cah.fr/userdoc/pointsur18_12_07_pdf_version_def.pdf.

CANONNE, R., DEMAZET, B., JOHNSON, P. M., KIEFFER, J. P. et NELSON, P., [sans date]. *Anglais technique / technical English : Production management / gestion de production*. Paris, France : Communications actives. Collection ENSAM.

CARLIER, Jacques et CHRÉTIENNE, Philippe, 1988. *Problèmes d'ordonnement : modélisation, complexité, algorithmes*. Paris, France : Masson. Études et recherches en informatique. ISBN 9782225812750.

CARON, F., MARCHET, G. et PEREGO, A., 1998. Project logistics: integrating the procurement and construction processes. In : *International Journal of Project Management* [en ligne]. octobre 1998. Vol. 16, n° 5, p. 311-319. [Consulté le 22 juillet 2013]. DOI 10.1016/S0263-7863(97)00029-X. **Disponible à l'adresse :**
<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S026378639700029X>.

CCNUCC, 2010. *Rapport de la quinzième session de la Conférence des Parties tenue à Copenhague du 7 au 19 décembre 2009 - Additif - Deuxième partie: Mesures prises par la Conférence des Parties à sa quinzième session* [en ligne]. Copenhagen, Denmark. United Nations Framework Convention on Climate Change (UNFCCC). [Consulté le 19 juillet 2013]. **Disponible à l'adresse :**
unfccc.int/resource/docs/2009/cop15/fre/11a01f.pdf.

CGDD - SOES, 2012. *Chiffres clés de l'énergie - Édition 2012* [en ligne]. S.I. Ministère de l'Écologie, du Développement Durable et de l'Énergie (MEDDE). [Consulté le 19 juillet 2013]. **Repères. Disponible à l'adresse :**
www.developpement-durable.gouv.fr/IMG/pdf/Rep_-_Chiffres_cles_energie.pdf.

CGDD - SOES, 2013a. *L'état du logement en 2011 - Parc et statut d'occupation* [en ligne]. juin 2013. S.I. : s.n. [Consulté le 19 juillet 2013]. **Disponible à l'adresse :**
www.statistiques.developpement-durable.gouv.fr/fileadmin/documents/Produits_editoriaux/Publications/References/2013/etat_du_logement_en_2011/parc.xls.

CGDD - SOES, 2013b. *L'état du logement en 2011* [en ligne]. S.I. Ministère de l'Égalité des Territoires et du Logement - Ministère de l'Écologie, du Développement Durable et de l'Énergie (MEDDE). [Consulté le 19 juillet 2013]. **Références. Disponible à l'adresse :**
www.statistiques.developpement-durable.gouv.fr/fileadmin/documents/Produits_editoriaux/Publications/References/2013/etat_du_logement_en_2011/ref-etat-du-logement-en-2011.pdf.

CHEN, Wang, SHI, Yan-jun, TENG, Hong-fei, LAN, Xiao-ping et HU, Li-chen, 2010. An efficient hybrid algorithm for resource-constrained project scheduling. In : *Information Sciences* [en ligne]. 15 mars 2010. Vol. 180, n° 6, p. 1031-1039. [Consulté le 22 juillet 2013]. DOI 10.1016/j.ins.2009.11.044. **Disponible à l'adresse :**
<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0020025509005222>.

CHRISTOFIDES, Nicos, ALVAREZ-VALDES, R. et TAMARIT, J.M., 1987. Project scheduling with resource constraints: a branch and bound approach. In : *European Journal of Operational Research* [en ligne]. juin 1987. Vol. 29, n° 3, p. 262-273. [Consulté le 22 juillet 2013]. DOI 10.1016/0377-2217(87)90240-2. **Disponible à l'adresse :**
<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/0377221787902402>.

CIB TASK GROUP 57 « INDUSTRIALISATION IN CONSTRUCTION », 2010. 329 : *New perspective in industrialisation in construction : a State-of-the Art-Report* [en ligne]. CIB Publication. Zurich, Switzerland. ETH Institut für Bauplanung und Baubetrieb. [Consulté le 20 juillet 2013]. **Disponible à l'adresse :**
http://cibworld.xs4all.nl/dl/publications/tg57_pub329.pdf.

CLERC, Marie-Émilie, MAUROUX, Amélie et MARCUS, Vincent, 2010. 1316 : *Le recours au crédit d'impôt en faveur du développement durable - Une résidence principale sur sept rénovée entre 2005 et 2008* [en ligne]. S.I. Institut National de la Statistique et des Études

Économiques (INSEE). [Consulté le 27 juillet 2013]. INSEE Première. Disponible à l'adresse : www.insee.fr/fr/ffc/ipweb/ip1316/ip1316.pdf.

CNR, [sans date]. *Simulateur de coût de revient* [en ligne]. S.l. : s.n. [Consulté le 27 juillet 2013]. Disponible à l'adresse : www.cnr.fr/content/download/11479/63584/version/7/file/simulateur%20de%20cout%20de%20revient.xls.

COMITÉ D'ÉVALUATION ET DE SUIVI DE L'ANRU, 2008. *Rénovation urbaine 2004-2008 : quels moyens pour quels résultats ?* [en ligne]. Paris, France : La documentation Française. [Consulté le 19 juillet 2013]. ISBN 978-2-11-007484-3. Disponible à l'adresse : <http://www.ladocumentationfrancaise.fr/rapports-publics/094000139/index.shtml>.

COMMISSION EUROPÉENNE, 2009. *La Commission salue l'adoption du paquet « climat et énergie »* [en ligne]. 23 avril 2009. S.l. : s.n. [Consulté le 19 juillet 2013]. Disponible à l'adresse : http://europa.eu/rapid/press-release_IP-09-628_fr.pdf.

COOPER, Rachel, KAGIOGLOU, Michail Mike, AOUAD, Ghassan, HINKS, John, SEXTON, Martin et SHEATH, Darryl, 1998. The development of a generic design and construction process. In : *Proceedings of the European Conference, Product Data Technology (PDT) Days* [en ligne]. Watford, United Kingdom : Building Research Establishment (BRE). mars 1998. p. 205-214. [Consulté le 20 juillet 2013]. Disponible à l'adresse : <http://www.processprotocol.com/pdf/pdt98.pdf>.

COURT, Andrew W., CULLEY, Stephen J. et MCMAHON, Christopher A., 1996. Information access diagrams: a technique for analyzing the usage of design information. In : *Journal of Engineering Design* [en ligne]. mars 1996. Vol. 7, n° 1, p. 55-75. [Consulté le 20 juillet 2013]. DOI 10.1080/09544829608907927. Disponible à l'adresse : <http://www.informaworld.com/10.1080/09544829608907927>.

CRUARD CHARPENTE, [sans date]. *Réhabilitation de la cité universitaire CROUS La Bourgeoisière - Nantes 44* [en ligne]. S.l. : s.n. [Consulté le 20 juillet 2013]. Disponible à l'adresse : www.cruard.com/media/nantes_crous__052035200_1702_05072010.pdf.

DA SILVEIRA, Giovanni, BORENSTEIN, Denis et FOGLIATTO, Flávio S, 2001. Mass customization: literature review and research directions. In : *International Journal of Production Economics* [en ligne]. 30 juin 2001. Vol. 72, n° 1, p. 1-13. [Consulté le 20 juillet 2013]. DOI 10.1016/S0925-5273(00)00079-7. Disponible à l'adresse : <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0925527300000797>.

DAC, Pierre, 1972. Celui qui dans la vie est parti de zéro pour n'arriver à rien dans l'existence n'a de merci à dire à personne. In : *Pierre DAC - Les pensées* [en ligne]. Paris, France : Éditions Saint-Germain-des-Prés. Les pensées. [Consulté le 19 juillet 2013]. ISBN 2862740020. Disponible à l'adresse : <http://www.dico-citations.com/celui-qui-dans-la-vie-est-parti-de-z-ro-pour-n-arriver-rien-dans-l-existence-n-a-de-merci-dire-dac-pierre/>.

DAL PONT, Jean-Pierre, 2007. *L'entreprise industrielle* [en ligne]. Éditions T.I. S.l. : s.n. AG10. [Consulté le 20 juillet 2013]. Disponible à l'adresse : <http://www.techniques-ingenieur.fr/book/ag10/l-entreprise-industrielle.html>.

DARES, 2013. 46 : *Demandeurs d'emploi inscrits et offres collectées par Pôle Emploi en juin 2013* [en ligne]. S.l. Direction de l'Animation de la Recherche, des Études et des Statistiques (DARES). [Consulté le 28 juillet 2013]. DARES Indicateurs. Disponible à l'adresse : travail-emploi.gouv.fr/IMG/pdf/PI-Mensuelle-CCD118.pdf.

DE LUCA, Livio, 2006. *Relevé et multi-représentations du patrimoine architectural - Définition d'une approche hybride pour la reconstruction 3D d'édifices* [en ligne]. Thèse de doctorat en conception. Aix-en-Provence, France : Arts et Métiers ParisTech. [Consulté le 28 juillet 2013]. Disponible à l'adresse : <http://tel.archives-ouvertes.fr/tel-00263717>.

DE PERTHUIS, Christian, BUBA, Johanne, MILLION, Aurélien, SCAPECCHI, Pascale, TEISSIER, Olivier, MARTINEZ, Elise et AUVERLOT, Dominique, 2011. *Trajectoires 2020 - 2050 - vers une économie sobre en carbone - Rapport du comité présidé par Christian de Perthuis* [en ligne]. S.I. [Consulté le 25 juillet 2013]. Disponible à l'adresse : http://www.developpement-durable.gouv.fr/IMG/pdf/2011-12-12-trajectoires_2020-2050_-_developpementdurable.pdf.

DEBIESSE, Georges et LEBLANC-LAUGIER, Marianne, 2013. *Évaluation de l'emploi des contrats de conception-réalisation pour la construction de logements locatifs aidés par l'État* [en ligne]. S.I. CGEDD (Conseil Général de l'Environnement et du Développement Durable) - Ministère de l'Écologie, du Développement Durable et de l'Énergie (MEDDE). [Consulté le 21 juillet 2013]. Disponible à l'adresse : <http://www.ladocumentationfrancaise.fr/rapports-publics/134000388/index.shtml>.

DICTIONNAIRE DE FRANÇAIS LAROUSSE, [sans date]. *Anthropique* [en ligne]. S.I. : s.n. [Consulté le 19 juillet 2013 a]. Disponible à l'adresse : <http://www.larousse.fr/dictionnaires/francais/anthropique/3881>.

DICTIONNAIRE DE FRANÇAIS LAROUSSE, [sans date]. *Industrialisation* [en ligne]. S.I. : s.n. [Consulté le 20 juillet 2013 b]. Disponible à l'adresse : <http://www.larousse.fr/dictionnaires/francais/industrialisation/42736?q=industrialisation#42639>.

DICTIONNAIRE DE FRANÇAIS LAROUSSE, [sans date]. *Réhabilitation* [en ligne]. S.I. : s.n. [Consulté le 19 juillet 2013 c]. Disponible à l'adresse : <http://www.larousse.fr/dictionnaires/francais/r%C3%A9habilitation/67723?q=r%C3%A9habilitation#66967>.

DICTIONNAIRE DE FRANÇAIS LAROUSSE, [sans date]. *Rénovation* [en ligne]. S.I. : s.n. [Consulté le 19 juillet 2013 d]. Disponible à l'adresse : <http://www.larousse.fr/dictionnaires/francais/r%C3%A9novation/68239>.

DICTIONNAIRE DE L'ACADÉMIE FRANÇAISE (9ÈME ÉDITION), [sans date]. *Industrialisation* [en ligne]. S.I. : s.n. [Consulté le 20 juillet 2013]. Disponible à l'adresse : <http://www.cnrtl.fr/definition/academie9/industrialisation>.

DOHMEN, Maurice, 1995. A survey of constraint satisfaction techniques for geometric modeling. In : *Computers & Graphics* [en ligne]. novembre 1995. Vol. 19, n° 6, p. 831-845. [Consulté le 21 juillet 2013]. DOI 10.1016/0097-8493(95)00055-0. Disponible à l'adresse : <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/0097849395000550>.

ENCYCLOPÉDIE LAROUSSE EN LIGNE, [sans date]. *Rénovation urbaine* [en ligne]. S.I. : s.n. [Consulté le 19 juillet 2013]. Disponible à l'adresse : http://www.larousse.fr/encyclopedie/divers/r%C3%A9novation_urbaine/87389.

EOS SYSTEMS, [sans date]. PhotoModeler. In : *PhotoModeler* [en ligne]. [Consulté le 21 juillet 2013]. Disponible à l'adresse : <http://www.photomodeler.com/>.

ÊTRE BOIS, [sans date]. *Plan de coupe d'un mur ossature bois* [en ligne]. S.I. : s.n. [Consulté le 21 juillet 2013]. Disponible à l'adresse : <http://www.maisons-bois-gironde.com/images/coupe-ossature.jpg>.

EUR-LEX, 2009a. *Décision no 406/2009/CE du Parlement européen et du Conseil du 23 avril 2009 relative à l'effort à fournir par les États membres pour réduire leurs émissions de gaz à effet de serre afin de respecter les engagements de la Communauté en matière de réduction de ces émissions jusqu'en 2020* [en ligne]. 23 avril 2009. S.I. : s.n. [Consulté le 19 juillet 2013]. Disponible à l'adresse : eur-lex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do?uri=OJ:L:2009:140:0136:0148:FR:PDF.

EUR-LEX, 2009b. *Directive 2009/28/CE du Parlement européen et du Conseil du 23 avril 2009 relative à la promotion de l'utilisation de l'énergie produite à partir de sources renouvelables et*

modifiant puis abrogeant les directives 2001/77/CE et 2003/30/CE (Texte présentant de l'intérêt pour l'EEE) [en ligne]. 23 avril 2009. S.I. : s.n. [Consulté le 19 juillet 2013].
Disponible à l'adresse : eur-lex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do?uri=OJ:L:2009:140:0016:0062:FR:PDF.

EUR-LEX, 2009c. *Directive 2009/29/CE du Parlement européen et du Conseil du 23 avril 2009 modifiant la directive 2003/87/CE afin d'améliorer et d'étendre le système communautaire d'échange de quotas d'émission de gaz à effet de serre (Texte présentant de l'intérêt pour l'EEE)* [en ligne]. 23 avril 2009. S.I. : s.n. [Consulté le 19 juillet 2013]. Disponible à l'adresse : <http://eur-lex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do?uri=OJ:L:2009:140:0063:0087:FR:PDF>.

EUR-LEX, 2009d. *Directive 2009/31/CE du Parlement européen et du Conseil du 23 avril 2009 relative au stockage géologique du dioxyde de carbone et modifiant la directive 85/337/CEE du Conseil, les directives 2000/60/CE, 2001/80/CE, 2004/35/CE, 2006/12/CE et 2008/1/CE et le règlement (CE) n° 1013/2006 du Parlement européen et du Conseil (Texte présentant de l'intérêt pour l'EEE)* [en ligne]. 23 avril 2009. S.I. : s.n. [Consulté le 19 juillet 2013].
Disponible à l'adresse : <http://eur-lex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do?uri=OJ:L:2009:140:0114:0135:FR:PDF>.

EUR-LEX, 2011. *Feuille de route vers une économie compétitive à faible intensité de carbone à l'horizon 2050* [en ligne]. 8 mars 2011. S.I. : s.n. [Consulté le 25 juillet 2013]. Disponible à l'adresse : <http://eur-lex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do?uri=COM:2011:0112:FIN:FR:PDF>.

FALCON, Marie, 2011. Proposition de modélisation d'un processus de rénovation industrialisée des immeubles de logements collectifs. In : *12ème congrès des doctorants* [en ligne]. Toulouse, France : s.n. mai 2011. p. 150-155. Disponible à l'adresse : http://educ.laas.fr/EDSYS_CONGRES/contents/congres/2011/communications.php.

FALCON, Marie et FONTANILI, Franck, 2010. Process modelling of industrialized thermal renovation of apartment buildings. In : *eWork and eBusiness in Architecture, Engineering and Construction* [en ligne]. Cork, Republic of Ireland : CRC Press. septembre 2010. p. 363-368. [Consulté le 20 juillet 2013]. Disponible à l'adresse : <http://dx.doi.org/10.1201/b10527-60>.

FALTINGS, Boi, 1994. Arc-consistency for continuous variables. In : *Artificial Intelligence* [en ligne]. février 1994. Vol. 65, n° 2, p. 363-376. [Consulté le 21 juillet 2013]. DOI 10.1016/0004-3702(94)90022-1. Disponible à l'adresse : <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/0004370294900221>.

FALTINGS, Boi, HAROUD, Djamilia et SMITH, Ian, 1992. Dynamic constraint propagation with continuous variables. In : *Proceedings of the 10th European conference on Artificial intelligence (ECAI '92)* [en ligne]. New York, NY, USA : John Wiley & Sons, Inc. 1992. p. 754-758. [Consulté le 21 juillet 2013]. Disponible à l'adresse : <http://dl.acm.org/citation.cfm?id=145448.147522>.

FCBA, 2012. EFFINOV'BOIS - Systèmes constructifs bois pour la réhabilitation des enveloppes – Efficacité énergétique, comportement hygrothermique et industrialisation. In : *2ème colloque bilan énergie de l'ANR* [en ligne]. Poster. Lyon, France. 12 janvier 2012. [Consulté le 20 juillet 2013]. Disponible à l'adresse : www.agence-nationale-recherche.fr/Colloques/Energies2012/Posters_Batiment.pdf.

FFB, 2013. *Le bâtiment en chiffres 2012* [en ligne]. juin 2013. S.I. : s.n. [Consulté le 27 juillet 2013]. Disponible à l'adresse : www.ffbatiment.fr/Files/pub/Fede_N00/NAT_LES_CHIFFRES_EN_FRANCE_3345/95a39ea5ef4e4b61b9c7b2a4ae9d7bef/EDIT/Chiffres2013.pdf.

FUCHS, Alain, 2006. *Outils numériques pour le relevé architectural et la restitution archéologique* [en ligne]. Thèse de doctorat en sciences de l'architecture. Nancy, France :

Université Henri Poincaré - Nancy I. [Consulté le 28 juillet 2013]. Disponible à l'adresse : <http://tel.archives-ouvertes.fr/tel-00145277>.

FUDOS, Ioannis et HOFFMANN, Christoph Martin, 1997. A graph-constructive approach to solving systems of geometric constraints. In : *ACM Transactions on Graphics* [en ligne]. avril 1997. Vol. 16, n° 2, p. 179-216. [Consulté le 21 juillet 2013]. DOI 10.1145/248210.248223. Disponible à l'adresse : <http://doi.acm.org/10.1145/248210.248223>.

GAREY, Michael R. et JOHNSON, David S., 1979. *Computers and intractability: a guide to the theory of NP-completeness*. Victor Klee. New York, NY, USA : W. H. Freeman. A series of books in the mathematical sciences. ISBN 0-7167-1044-7.

GEIER, Sonja, EHRBAR, Doris et SCHWEHR, Peter, 2012. *D3.1 Evaluation of collaboration models* [en ligne]. S.I. E2ReBuild. [Consulté le 21 juillet 2013]. Disponible à l'adresse : www.e2rebuild.eu/en/events/projectresults/Documents/E2ReBuild_D3%201_CollaborationModels_Final.pdf.

GELLE, Esther, 1998. *On the generation of locally consistent solution spaces in mixed dynamic constraint problems* [en ligne]. Thèse de doctorat. Lausanne, Switzerland : École Polytechnique Fédérale de Lausanne. [Consulté le 21 juillet 2013]. Disponible à l'adresse : <http://infoscience.epfl.ch/record/32303>.

GIEC, 2001. *Bilan 2001 des changements climatiques - Rapport de synthèse - Résumés des groupes de travail* [en ligne]. IPCC Third Assessment Report. S.I. Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). [Consulté le 19 juillet 2013]. Disponible à l'adresse : www.grida.no/climate/ipcc_tar/vol4/french/pdf/wg1sum.pdf.

GIEC, 2007. *Changements climatiques 2007 - Rapport de synthèse* [en ligne]. IPCC Fourth Assessment Report. S.I. Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). [Consulté le 19 juillet 2013]. Disponible à l'adresse : www.ipcc.ch/pdf/assessment-report/ar4/syr/ar4_syr_fr.pdf.

GRIMFELD, Alain, JOUZEL, Jean, GAZEAU, Bruno, LIÉBARD, Alain, PELLETIER, Philippe, GRAND, Jean-François Le et NOTAT, Nicole, 2010. *Rapport d'évaluation du Grenelle de l'Environnement* [en ligne]. S.I. Ernst & Young. [Consulté le 27 juillet 2013]. Disponible à l'adresse : http://www.developpement-durable.gouv.fr/IMG/pdf/EY_Evaluation_Grenelle_Rapport_Final_101026_entier.pdf.

GRUPE DE TRAVAIL DU PLAN BÂTIMENT DURABLE : « EXPLORER L'OBLIGATION DE RÉNOVATION ÉNERGÉTIQUE DANS LE SECTEUR RÉSIDENTIEL », 2013. *Contribution au Groupe de travail du Plan Bâtiment Durable : « Explorer l'obligation de rénovation énergétique dans le secteur résidentiel »* [en ligne]. S.I. Groupe de travail du Plan Bâtiment Durable : « Explorer l'obligation de rénovation énergétique dans le secteur résidentiel ». Disponible à l'adresse : obligationderenovation.files.wordpress.com/2013/05/compilation.pdf.

GRUSSENMEYER, Pierre, 2003. Photogrammétrie architecturale et modélisation 3D du patrimoine. In : *XYZ* [en ligne]. 2003. n° 95, p. 30-36. [Consulté le 28 juillet 2013]. Disponible à l'adresse : <http://www.aftopo.org/images/article/39511.pdf>.

GUARNIERI, Alberto, VETTORE, Antonio et REMONDINO, Fabio, 2004. Photogrammetry and ground-based laser scanning: assessment of metric accuracy of the 3D model of Pozzoveggiani church. In : *FIG Working Week 2004* [en ligne]. Athens, Greece : s.n. mai 2004. p. 15. [Consulté le 24 juillet 2013]. Disponible à l'adresse : www.fig.net/pub/athens/papers/ts26/ts26_4_guarnieri_et_al.pdf.

GUSTAFSSON, Stig-Inge, 1998. Sensitivity analysis of building energy retrofits. In : *Applied Energy* [en ligne]. 1 septembre 1998. Vol. 61, n° 1, p. 13-23. [Consulté le 19 juillet 2013]. DOI 10.1016/S0306-2619(98)00032-4. Disponible à l'adresse : <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0306261998000324>.

HAMMER, Michael et CHAMPY, James, 1993. *Le reengineering*. Paris, France : Dunod. Dunod manager. ISBN 2-10-002027-7.

HARTMANN, Sönke, 1998. A competitive genetic algorithm for resource-constrained project scheduling. In : *Naval Research Logistics (NRL)* [en ligne]. octobre 1998. Vol. 45, n° 7, p. 733–750. [Consulté le 22 juillet 2013]. DOI 10.1002/(SICI)1520-6750(199810)45:7<733::AID-NAV5>3.0.CO;2-C. Disponible à l'adresse : [http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/\(SICI\)1520-6750\(199810\)45:7<733::AID-NAV5>3.0.CO;2-C/abstract](http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/(SICI)1520-6750(199810)45:7<733::AID-NAV5>3.0.CO;2-C/abstract).

HARTMANN, Sönke et BRISKORN, Dirk, 2010. A survey of variants and extensions of the resource-constrained project scheduling problem. In : *European Journal of Operational Research* [en ligne]. 16 novembre 2010. Vol. 207, n° 1, p. 1-14. [Consulté le 22 juillet 2013]. DOI 10.1016/j.ejor.2009.11.005. Disponible à l'adresse : <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0377221709008558>.

HASAN, Afif, 1999. Optimizing insulation thickness for buildings using life cycle cost. In : *Applied Energy* [en ligne]. juin 1999. Vol. 63, n° 2, p. 115-124. [Consulté le 19 juillet 2013]. DOI 10.1016/S0306-2619(99)00023-9. Disponible à l'adresse : <http://www.sciencedirect.com/science/article/B6V1T-3X05FJH-4/2/d77fa8443908fbd7e91844ba20b46ae8>.

HEIKKINEN, Pekka, KAUFMANN, Hermann, WINTER, Stefan et LARSEN, Knut Einar, 2011. *TES Energy Façade - Prefabricated timber based building system for improving the energy efficiency of the building envelope* [en ligne]. S.l. [Consulté le 21 juillet 2013]. Disponible à l'adresse : http://tesenergyfacade.com/downloads/TES_Manual-ebookFINAL.pdf.

HELSINKI UNIVERSITY OF TECHNOLOGY, 2009. *TES Energy Façade - Energiatohokkuuden parantaminen puurunkoisilla ja esivalmisteisilla julkisivuelementeillä - Tutkimushankkeen loppuraportti* [en ligne]. S.l. Helsinki university of technology. Disponible à l'adresse : http://www.tesenergyfacade.com/downloads/tkk_tes_loppuraportti_2009.pdf.

HOLWEG, Matthias, 2007. The genealogy of lean production. In : *Journal of Operations Management* [en ligne]. mars 2007. Vol. 25, n° 2, p. 420-437. [Consulté le 20 juillet 2013]. DOI 10.1016/j.jom.2006.04.001. Disponible à l'adresse : <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0272696306000313>.

HONDA, Kazuyoshi et MIZOGUCHI, Fumio, 1995. Constraint-based approach for automatic spatial layout planning. In : *Proceedings of the 11th Conference on Artificial Intelligence for Applications* [en ligne]. Washington, DC, USA : IEEE Computer Society. 1995. p. 38-45. [Consulté le 21 juillet 2013]. Disponible à l'adresse : <http://ieeexplore.ieee.org/xpl/articleDetails.jsp?arnumber=378771>.

HOWARD, Rob et BJÖRK, Bo-Christer, 2008. Building information modelling - Experts' views on standardisation and industry deployment. In : *Advanced Engineering Informatics* [en ligne]. avril 2008. Vol. 22, n° 2, p. 271-280. [Consulté le 21 juillet 2013]. DOI 10.1016/j.aei.2007.03.001. Disponible à l'adresse : <http://www.sciencedirect.com/science/article/B6X1X-4R8M4CW-3/2/527cf952c5d4979d15900245e1c7c7b6>.

HUANG, Yu, NIU, Jian-lei et CHUNG, Tse-ming, 2012. Energy and carbon emission payback analysis for energy-efficient retrofitting in buildings—Overhang shading option. In : *Energy and Buildings* [en ligne]. janvier 2012. Vol. 44, n° 0, p. 94-103. [Consulté le 19 juillet 2013]. DOI 10.1016/j.enbuild.2011.10.027. Disponible à l'adresse : <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0378778811004725>.

IEA ECBCS ANNEX 50, 2011a. *From the 50's to the future - Net zero energy renovation of a Swiss apartment building in Zurich* [en ligne]. S.l. [Consulté le 20 juillet 2013]. Disponible à l'adresse : www.empa.ch

ren.ch/A50/Annex%2050%20Final%20Publications%20for%20Internet/ZurichDemonstration_ECBCS_A50.pdf.

IEA ECBCS ANNEX 50, 2011b. *Passive house rehabilitation of post war residential building in Zug, Switzerland* [en ligne]. S.I. [Consulté le 20 juillet 2013]. Disponible à l'adresse : www.empa-ren.ch/A50/Annex%2050%20Final%20Publications%20for%20Internet/Zug_CaseStudy_ECBCS_A50.pdf.

IEA ECBCS ANNEX 50, 2011c. *Passive renovation De Kroeven 505 Roosendaal, NL* [en ligne]. S.I. [Consulté le 20 juillet 2013]. Disponible à l'adresse : www.empa-ren.ch/A50/Annex%2050%20Final%20Publications%20for%20Internet/Roosendaal_CaseStudy_ECBCS_A50.pdf.

IEA ECBCS ANNEX 50, 2011d. *Renovation of residential area Dieselweg 3-19 / Graz* [en ligne]. S.I. [Consulté le 20 juillet 2013]. Disponible à l'adresse : www.empa-ren.ch/A50/Annex%2050%20Final%20Publications%20for%20Internet/Graz_Dieselweg_3-19_CaseStudy_ECBCS_A50.pdf.

IEA ECBCS ANNEX 50, 2011e. *Renovation of residential area Dieselweg 4 / Graz* [en ligne]. S.I. [Consulté le 20 juillet 2013]. Disponible à l'adresse : www.empa-ren.ch/A50/Annex%2050%20Final%20Publications%20for%20Internet/Graz_Dieselweg_4_CaseStudy_ECBCS_A50.pdf.

IEA ECBCS ANNEX 50, 2011f. *Retrofit advisor* [en ligne]. 16 mars 2011. S.I. : s.n. [Consulté le 20 juillet 2013]. Disponible à l'adresse : www.empa-ren.ch/CCEM_Retrofit/Retrofit_Advisor_Beta-Version_2011_03_16.xls.

IEA ECBCS ANNEX 50, 2011g. *School building renovation for sustainable second life* [en ligne]. S.I. [Consulté le 20 juillet 2013]. Disponible à l'adresse : www.empa-ren.ch/A50/Annex%2050%20Final%20Publications%20for%20Internet/Krummbach_CaseStudy_ECBCS_A50.pdf.

IEA ECBCS ANNEX 50, [sans date]. *3D-Geomatics* [en ligne]. Disponible à l'adresse : www.empa-ren.ch/A50/Geomatics-e_red.wmv.

IEA ECBCS ANNEX 50, [sans date]. *Innovative building renewal* [en ligne]. Disponible à l'adresse : www.empa-ren.ch/A50/Innovative_Building_Renovation_red.wmv.

IEA ECBCS ANNEX 50, [sans date]. *Pilot renovation, Zug Switzerland* [en ligne]. Disponible à l'adresse : www.empa-ren.ch/A50/Zug_e_red.wmv.

IEEE, 1998. IEEE standard for functional modeling language - Syntax and semantics for IDEF0. In : *IEEE Std 1320.1-1998* [en ligne]. 1998. [Consulté le 20 juillet 2013]. DOI [10.1109/IEEESTD.1998.89198](https://doi.org/10.1109/IEEESTD.1998.89198). Disponible à l'adresse : <http://ieeexplore.ieee.org/xpl/articleDetails.jsp?arnumber=749110>.

IPCC, 1990. *IPCC overview* [en ligne]. IPCC First Assessment Report. S.I. Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). [Consulté le 19 juillet 2013]. Disponible à l'adresse : www.ipcc.ch/ipccreports/1992%20IPCC%20Supplement/IPCC_1990_and_1992_Assessments/English/ipcc_90_92_assessments_far_overview.pdf.

IPCC, 1995. *IPCC second assessment climate change 1995* [en ligne]. IPCC Second Assessment Report. S.I. Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). [Consulté le 19 juillet 2013]. Disponible à l'adresse : www.ipcc.ch/pdf/climate-changes-1995/ipcc-2nd-assessment/2nd-assessment-en.pdf.

IPCC, 2001. *Climate change 2001 - Synthesis report - Technical summary of the working group I report* [en ligne]. IPCC Third Assessment Report. S.I. Intergovernmental Panel on

Climate Change (IPCC). [Consulté le 19 juillet 2013]. Disponible à l'adresse : www.grida.no/climate/ipcc_tar/vol4/english/pdf/wg1ts.pdf.

IPCC, 2007. *Climate change 2007 - Synthesis report* [en ligne]. IPCC Fourth Assessment Report. S.I. Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). [Consulté le 19 juillet 2013]. Disponible à l'adresse : http://www.ipcc.ch/publications_and_data/publications_ipcc_fourth_assessment_report_synthesis_report.htm.

ISO, 2000. *NF EN ISO 9000 : Systèmes de management de la qualité - Principes essentiels et vocabulaire*. 2000. S.I. : Association Française de Normalisation (AFNOR).

ISO, 2005. *NF EN ISO 9000 : Systèmes de management de la qualité - Principes essentiels et vocabulaire* [en ligne]. octobre 2005. S.I. : Association Française de Normalisation (AFNOR). Disponible à l'adresse : http://www.boutique.afnor.org/NEL5DetailNormeEnLigne.aspx?&nivCtx=NELZNELZ1A10A101A107&ts=713922&CLE_ART=FA135485.

JAKOB, Martin, 2006. Marginal costs and co-benefits of energy efficiency investments: The case of the Swiss residential sector. In : *Energy Policy* [en ligne]. janvier 2006. Vol. 34, n° 2, p. 172-187. [Consulté le 19 juillet 2013]. DOI 10.1016/j.enpol.2004.08.039. Disponible à l'adresse : <http://www.sciencedirect.com/science/article/B6V2W-4DPC69Y-2/2/afa147ede2af0eef53b6e86367341db7>.

JARBOUI, B., DAMAK, N., SIARRY, P. et REBAI, A., 2008. A combinatorial particle swarm optimization for solving multi-mode resource-constrained project scheduling problems. In : *Applied Mathematics and Computation* [en ligne]. 15 janvier 2008. Vol. 195, n° 1, p. 299-308. [Consulté le 22 juillet 2013]. DOI 10.1016/j.amc.2007.04.096. Disponible à l'adresse : <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S009630030700553X>.

JERMANN, Christophe, TROMBETTONI, Gilles, NEVEU, Bertrand et RUEHER, Michel, 2000. A constraint programming approach for solving rigid geometric systems. In : DECHTER, Rina (éd.), *Principles and Practice of Constraint Programming - CP 2000* [en ligne]. S.I. : Springer Berlin Heidelberg. Lecture Notes in Computer Science. p. 233-248. [Consulté le 21 juillet 2013]. ISBN 978-3-540-41053-9, 978-3-540-45349-9. Disponible à l'adresse : http://link.springer.com/chapter/10.1007/3-540-45349-0_18.

JUNKER, Ulrich, 2006. Chapter 24 - Configuration. In : ROSSI, Francesca, VAN BEEK, Peter et WALSH, Toby (éd.), *Handbook of constraint programming* [en ligne]. S.I. : Elsevier. Foundations of Artificial Intelligence. p. 837-873. [Consulté le 21 juillet 2013]. ISBN 1574-6526. Disponible à l'adresse : <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1574652606800283>.

KARA, S. et IBBOTSON, S., 2011. Embodied energy of manufacturing supply chains. In : *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology* [en ligne]. 2011. Vol. 4, n° 3, p. 317-323. [Consulté le 19 juillet 2013]. DOI 10.1016/j.cirpj.2011.03.006. Disponible à l'adresse : <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S175558171100037X>.

KINI, Damodara U., 1999. Materials management: the key to successful project management. In : *Journal of Management in Engineering* [en ligne]. 1999. Vol. 15, n° 1, p. 30-34. [Consulté le 22 juillet 2013]. DOI 10.1061/(ASCE)0742-597X(1999)15:1(30). Disponible à l'adresse : <http://ascelibrary.org/doi/abs/10.1061/%28ASCE%290742-597X%281999%2915%3A1%2830%29>.

KOBLER, René L., BINZ, Armin et STEINKE, Gregor, 2011. *Retrofit module design guide* [en ligne]. S.I. : s.n. [Consulté le 20 juillet 2013]. ISBN 978-3-905594-60-7. Disponible à l'adresse : www.empa-ren.ch/A50/Annex%2050%20Final%20Publications%20for%20Internet/ModuleDesign_ECBCS_A50.pdf.

KRAUS, Karl et WALDHÄUSL, Peter, 1997.
fondamentaux . ISBN 9782866016562.

LAFARGE, Florent, MALLET, Clément et VALLET, Bruno, 2011. *Reconstruction en 3D de scènes urbaines denses à partir de données lidar aériennes multi-échelles* [en ligne]. S.l.
[Consulté le 21 juillet 2013]. Disponible à l'adresse : <http://gdr-isis.fr/uploads/documents/Projets-JeunesChercheurs-2011/RapportFinal-Lafarge.pdf>.

LASCOURMES, Pierre, 2011. Des acteurs aux prises avec le « Grenelle Environnement » - Ni innovation politique, ni simulation démocratique, une approche pragmatique des travaux du Groupe V. In : *Participations* [en ligne]. 2011. Vol. 1, n° 1, p. 277-310.
[Consulté le 19 juillet 2013]. DOI [10.3917/parti.001.0277](https://doi.org/10.3917/parti.001.0277). Disponible à l'adresse : <http://www.cairn.info/revue-participations-2011-1-page-277.htm>.

LATTKE, Frank, 2010. TES EnergyFacade - 2nd chance for architecture. In : *World Conference on Timber Engineering (WTCE 2010)* [en ligne]. S.l. : s.n. 2010. p. 6.
[Consulté le 21 juillet 2013]. Disponible à l'adresse : www.ewpa.com/Archive/2010/june/Paper_347.pdf.

LÉGIFRANCE, 1985. *Loi n°85-704 du 12 juillet 1985 relative à la maîtrise d'ouvrage publique et à ses rapports avec la maîtrise d'œuvre privée* [en ligne]. 12 juillet 1985. S.l. : s.n.
[Consulté le 21 juillet 2013]. Disponible à l'adresse : http://www.legifrance.gouv.fr/affichTexte.do;jsessionid=D2520CBA8DB029132FC02FD039AFAE7F.tpdjo13v_3?cidTexte=JORFTEXT000000693683&categorieLien=id.

LÉGIFRANCE, 2003. *Loi n° 2003-710 du 1er août 2003 d'orientation et de programmation pour la ville et la rénovation urbaine* [en ligne]. 1 août 2003. S.l. : s.n. [Consulté le 19 juillet 2013].
Disponible à l'adresse : http://www.legifrance.gouv.fr/affichTexte.do;jsessionid=56E0569DC6805CD9389D288C6D7D8D33.tpdjo02v_2?cidTexte=JORFTEXT000000428979&categorieLien=id.

LÉGIFRANCE, 2005. *Loi n° 2005-781 du 13 juillet 2005 de programme fixant les orientations de la politique énergétique* [en ligne]. 13 juillet 2005. S.l. : s.n. [Consulté le 19 juillet 2013].
Disponible à l'adresse : http://www.legifrance.gouv.fr/affichTexte.do;jsessionid=31095FB425590C95A4B4F95D7A3CC8D9.tpdjo04v_3?cidTexte=JORFTEXT000000813253&categorieLien=id.

LÉGIFRANCE, 2006. *Code des marchés publics (édition 2006) - Version consolidée au 25 mai 2013* [en ligne]. 2006. S.l. : s.n. [Consulté le 20 juillet 2013]. Disponible à l'adresse : http://www.legifrance.gouv.fr/affichCode.do;jsessionid=A66C82BEDFD70C7D0405F83D40B9C1FD.tpdjo06v_2?cidTexte=LEGITEXT000005627819&dateTexte=20130717.

LÉGIFRANCE, 2007. *Arrêté du 3 mai 2007 relatif aux caractéristiques thermiques et à la performance énergétique des bâtiments existants* [en ligne]. 3 mai 2007. S.l. : s.n.
[Consulté le 19 juillet 2013]. Disponible à l'adresse : http://www.legifrance.gouv.fr/affichTexte.do;jsessionid=B35842BF4F516EDBE169F127E42108A4.tpdjo13v_2?cidTexte=JORFTEXT000000822199&categorieLien=id.

LÉGIFRANCE, 2008. *Arrêté du 13 juin 2008 relatif à la performance énergétique des bâtiments existants de surface supérieure à 1 000 mètres carrés, lorsqu'ils font l'objet de travaux de rénovation importants* [en ligne]. 13 juin 2008. S.l. : s.n. [Consulté le 19 juillet 2013].
Disponible à l'adresse : http://www.legifrance.gouv.fr/affichTexte.do;jsessionid=1B138A52784B42450F32E786E1860A1F.tpdjo07v_3?cidTexte=JORFTEXT000019308241&categorieLien=id.

LÉGIFRANCE, 2009a. *Arrêté du 29 septembre 2009 relatif au contenu et aux conditions d'attribution du label « haute performance énergétique rénovation »* [en ligne]. 29 septembre 2009. S.l. : s.n. [Consulté le 19 juillet 2013]. Disponible à l'adresse : <http://www.legifrance.gouv.fr/affichTexte.do?cidTexte=JORFTEXT000021089668&dateTexte=&categorieLien=id>.

LÉGIFRANCE, 2009b. *Loi n° 2009-323 du 25 mars 2009 de mobilisation pour le logement et la lutte contre l'exclusion* [en ligne]. 25 mars 2009. S.l. : s.n. [Consulté le 21 juillet 2013].

Disponible à l'adresse :

http://www.legifrance.gouv.fr/affichTexte.do;jsessionid=D2520CBA8DB029132FC02FD039AFAE7F.tpdjo13v_3?cidTexte=JORFTEXT000020438861&categorieLien=id.

LÉGIFRANCE, 2009c. *Loi n° 2009-967 du 3 août 2009 de programmation relative à la mise en œuvre du Grenelle de l'environnement (1)* [en ligne]. 3 août 2009. S.l. : s.n.

[Consulté le 19 juillet 2013]. Disponible à l'adresse :

http://www.legifrance.gouv.fr/affichTexte.do;jsessionid=31095FB425590C95A4B4F95D7A3CC8D9.tpdjo04v_3?cidTexte=JORFTEXT000020949548&categorieLien=id.

LÉGIFRANCE, 2010. *Arrêté du 26 octobre 2010 relatif aux caractéristiques thermiques et aux exigences de performance énergétique des bâtiments nouveaux et des parties nouvelles de bâtiments* [en ligne]. 26 octobre 2010. S.l. : s.n. [Consulté le 19 juillet 2013]. Disponible à l'adresse :

<http://www.legifrance.gouv.fr/affichTexte.do?cidTexte=JORFTEXT000022959397&dateTexte=&categorieLien=id>.

LÉGIFRANCE, 2012. *Arrêté du 28 décembre 2012 relatif aux caractéristiques thermiques et aux exigences de performance énergétique des bâtiments nouveaux et des parties nouvelles de bâtiments autres que ceux concernés par l'article 2 du décret du 26 octobre 2010 relatif aux caractéristiques thermiques et à la performance énergétique des constructions* [en ligne]. 28 décembre 2012. S.l. : s.n. [Consulté le 19 juillet 2013]. Disponible à l'adresse :

http://www.legifrance.gouv.fr/affichTexte.do;jsessionid=96BEE7B561462AABBFD77DAA76B1A4AC.tpdjo13v_2?cidTexte=JORFTEXT000026871753&categorieLien=id.

LESSING, Jerker, 2006. *Industrialised house-building : concept and processes* [en ligne].

Licentiate thesis. Lund, Sweden : Department of Construction Sciences Lund University.

[Consulté le 20 juillet 2013]. Disponible à l'adresse :

http://www.caad.lth.se/fileadmin/projekteringsmetodik/publications/Lessing_lic-webb.pdf.

LHOMME, Olivier, 1993. Consistency techniques for numeric CSPs. In : *Proceedings of the 13th international joint conference on Artificial intelligence (IJCAI'93)* [en ligne]. Chambéry, France : s.n. 1993. p. 232-238. [Consulté le 21 juillet 2013]. Disponible à l'adresse :

<http://dl.acm.org/citation.cfm?id=1624025.1624058>.

MACKWORTH, Alan K., 1977. Consistency in networks of relations. In : *Artificial Intelligence* [en ligne]. février 1977. Vol. 8, n° 1, p. 99-118. [Consulté le 21 juillet 2013].

DOI 10.1016/0004-3702(77)90007-8. Disponible à l'adresse :

<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/0004370277900078>.

MAISON À PART, 2012. *Pose des panneaux sandwich* [en ligne]. 4 avril 2012. S.l. : s.n.

[Consulté le 21 juillet 2013]. Disponible à l'adresse :

http://www.maisonapart.com/images/diaporama/cadre/20120404_155223_20120402_121953_chantier5.jpg.

MAISONS LAPRISE, [sans date]. *Maison Laprise Inc profil complet* [en ligne]. S.l. : s.n.

[Consulté le 21 juillet 2013]. Disponible à l'adresse : <http://1-paijo.com/wp-content/uploads/2012/08/maison-laprise-inc-profil-complet1-336x252.jpg>.

MARCHAL, Julien et LAGANDRÉ, Éric, 2008. *Modélisation des performances énergétiques du parc de logements - État énergétique du parc en 2008 - Rapport détaillé* [en ligne]. S.l. ANAH (Agence Nationale de l'Habitat). [Consulté le 19 juillet 2013]. Disponible à l'adresse :

<http://www.anah.fr/les-publications/les-etudes/vue-detaillee/article/modelisation-des-performances-energetiques-du-parc-de-logements-etat-energetique-du-parc-en.html>.

MAUGARD, Alain et PÉLEGRIN, François, 2011. *Amélioration thermique des bâtiments collectifs construits de 1850 à 1974 le guide ABC*. Paris, France : EDIPA. ISBN 9782862430980 2862430986.

MAYER, Helmut et REZNIK, Sergiy, 2007. Building facade interpretation from uncalibrated wide-baseline image sequences. In : *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing* [en ligne]. février 2007. Vol. 61, n° 6, p. 371-380. [Consulté le 28 juillet 2013]. DOI 10.1016/j.isprsjprs.2006.10.007. Disponible à l'adresse : <http://www.sciencedirect.com/science/article/B6VF4-4MK60Y6-1/2/575d3ca91e06651784f78f3cd38da686>.

MEDDE, 2013. *Plan de rénovation énergétique de l'habitat : le Gouvernement annonce l'éco-conditionnalité des aides publiques* [en ligne]. 20 juin 2013. S.I. : s.n. [Consulté le 19 juillet 2013]. Disponible à l'adresse : <http://www.developpement-durable.gouv.fr/Plan-de-renovation-energetique-de,33124.html>.

MEDDTL, 2010. *Le Grenelle Environnement - Plan climat en France* [en ligne]. S.I. Ministère de l'Écologie, du Développement Durable, des Transports et du Logement (MEDDTL). [Consulté le 19 juillet 2013]. Disponible à l'adresse : www.developpement-durable.gouv.fr/IMG/pdf/Grenelle_Plan_climat.pdf.

MEDJDOUB, Benachir et YANNOU, Bernard, 2001. Dynamic space ordering at a topological level in space planning. In : *Artificial Intelligence in Engineering* [en ligne]. janvier 2001. Vol. 15, n° 1, p. 47-60. [Consulté le 21 juillet 2013]. DOI 10.1016/S0954-1810(00)00027-3. Disponible à l'adresse : <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0954181000000273>.

MEEDDM, 2010. *Plan climat de la France - Mise en œuvre du Grenelle Environnement* [en ligne]. S.I. Ministère de l'Écologie, de l'Énergie, du Développement Durable et de la Mer (MEEDDM). [Consulté le 19 juillet 2013]. Disponible à l'adresse : www.developpement-durable.gouv.fr/IMG/pdf/09003_PLAN_CLIMAT.pdf.

MELTON, T., 2005. The benefits of lean manufacturing: What lean thinking has to offer the process industries. In : *Chemical Engineering Research and Design* [en ligne]. juin 2005. Vol. 83, n° 6, p. 662-673. [Consulté le 20 juillet 2013]. DOI 10.1205/cherd.04351. Disponible à l'adresse : <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0263876205727465>.

MENDES, J.J.M., GONÇALVES, J.F. et RESENDE, M.G.C., 2009. A random key based genetic algorithm for the resource constrained project scheduling problem. In : *Computers & Operations Research* [en ligne]. janvier 2009. Vol. 36, n° 1, p. 92-109. [Consulté le 22 juillet 2013]. DOI 10.1016/j.cor.2007.07.001. Disponible à l'adresse : <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0305054807001359>.

MERKLE, D., MIDDENDORF, M. et SCHMECK, H., 2002. Ant colony optimization for resource-constrained project scheduling. In : *IEEE Transactions on Evolutionary Computation* [en ligne]. août 2002. Vol. 6, n° 4, p. 333-346. [Consulté le 22 juillet 2013]. DOI 10.1109/TEVC.2002.802450. Disponible à l'adresse : <http://ieeexplore.ieee.org/xpl/articleDetails.jsp?arnumber=1027745>.

MIES, 2006. 3021 : *Rapport fait au nom de la mission d'information sur l'effet de serre - Tome I - Rapport* [en ligne]. Rapport d'information. S.I. Assemblée nationale. [Consulté le 19 juillet 2013]. Disponible à l'adresse : <http://www.assemblee-nationale.fr/12/rap-info/i3021-ti.asp>.

MILONI, Reto, GRISCHOTT, Nadja, ZIMMERMANN, Mark, GEIER, Sonja, HÖFLER, Karl, VENUS, David et BOONSTRA, Chiel, 2011. *Building renovation case studies* [en ligne]. S.I. : s.n. [Consulté le 20 juillet 2013]. ISBN 978-3-905594-61-4. Disponible à l'adresse : www.empa-ren.ch/A50/Annex%2050%20Final%20Publications%20for%20Internet/CaseStudies_ECBCS_A50.pdf.

MITTAL, Sanjay et FALKENHAINER, Brian, 1990. Dynamic constraint satisfaction problems. In : *Proceedings of the Eighth National Conference on Artificial Intelligence* [en ligne]. Boston, MA,

USA : AAAI Press. 1990. p. 25-32. [Consulté le 21 juillet 2013]. Disponible à l'adresse : <http://www.aaai.org/Library/AAAI/1990/aaai90-004.php>.

MONTANARI, Ugo, 1974. Networks of constraints: fundamental properties and applications to picture processing. In : *Information Sciences* [en ligne]. 1974. Vol. 7, p. 95-132. [Consulté le 21 juillet 2013]. DOI 10.1016/0020-0255(74)90008-5. Disponible à l'adresse : <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/0020025574900085>.

MTALAA, Wassila et AGGOUNE, Riad, 2010. Un modèle bi-objectif pour la conception de chaînes logistiques vertes. In : *Évaluation et optimisation des systèmes innovants de production de biens et de services* [en ligne]. Hammamet, Tunisia : s.n. mai 2010. [Consulté le 19 juillet 2013]. Disponible à l'adresse : www.enim.fr/mosim2010/articles/78.pdf.

NAARANOJA, Marja et UDEN, Lorna, 2007. Major problems in renovation projects in Finland. In : *Building and Environment* [en ligne]. février 2007. Vol. 42, n° 2, p. 852-859. [Consulté le 20 juillet 2013]. DOI 10.1016/j.buildenv.2005.10.001. Disponible à l'adresse : <http://www.sciencedirect.com/science/article/B6V23-4HN3PM3-1/2/cd45e08e96e1dba957c9241dc731a3de>.

NATIONS UNIES, 1992. *Convention-cadre des Nations Unies sur les changements climatiques* [en ligne]. 1992. S.I. : s.n. [Consulté le 19 juillet 2013]. Disponible à l'adresse : unfccc.int/resource/docs/convkp/convfr.pdf.

NATIONS UNIES, 1998. *Protocole de Kyoto à la convention-cadre des Nations Unies sur les changements climatiques* [en ligne]. 1998. S.I. : s.n. [Consulté le 19 juillet 2013]. Disponible à l'adresse : unfccc.int/resource/docs/convkp/kpfrench.pdf.

NATIONS UNIES, 2012. *Amendement de Doha au Protocole de Kyoto* [en ligne]. 8 décembre 2012. S.I. : s.n. [Consulté le 19 juillet 2013]. Disponible à l'adresse : unfccc.int/files/kyoto_protocol/application/pdf/kp_doha_amendment_french.pdf.

NEMETSCHKEK, [sans date]. On-Site Photo. In : *On-Site Photo* [en ligne]. [Consulté le 21 juillet 2013]. Disponible à l'adresse : <http://www.nemetschek-allplan.fr/software/plus/on-site-photo.html>.

NEUMANN, Klaus et SCHWINDT, Christoph, 2003. Project scheduling with inventory constraints. In : *Mathematical Methods of Operations Research* [en ligne]. janvier 2003. Vol. 56, n° 3, p. 513-533. [Consulté le 22 juillet 2013]. DOI 10.1007/s001860200251. Disponible à l'adresse : <http://link.springer.com/article/10.1007/s001860200251>.

NG, S. Thomas, SHI, Jonathan et FANG, Yuan, 2009. Enhancing the logistics of construction materials through activity-based simulation approach. In : *Engineering, Construction and Architectural Management* [en ligne]. 2009. Vol. 16, n° 3, p. 224-237. [Consulté le 22 juillet 2013]. DOI 10.1108/09699980910951645. Disponible à l'adresse : <http://dx.doi.org/10.1108/09699980910951645>.

NIST, 1993. *Draft federal information processing standards publication 183 announcing the standard for Integration definition for function modeling (IDEF0)* [en ligne]. 21 décembre 1993. S.I. : s.n. [Consulté le 20 juillet 2013]. Disponible à l'adresse : <http://www.itl.nist.gov/fipspubs/idef02.doc>.

NIST, 2012. *Withdrawn FIPS listed by number* [en ligne]. 22 octobre 2012. S.I. : s.n. [Consulté le 20 juillet 2013]. Disponible à l'adresse : www.nist.gov/itl/upload/Withdrawn-FIPS-by-Numerical-Order-Index.pdf.

ONZUS, 2013. *Dix ans de programme national de rénovation urbaine : Bilan et perspectives - Volume 1 : Rapport d'évaluation* [en ligne]. Rapport de la mission d'évaluation confiée au Conseil d'Orientation de l'Onzus. S.I. ONZUS (Observatoire National des Zones Urbaines

Sensibles). [Consulté le 19 juillet 2013]. Les Éditions du CIV (Comité Interministériel des Villes). **Disponible à l'adresse** : <http://www.territoires.gouv.fr/IMG/pdf/Volume1.pdf>.

OPEN, 2012. *OPEN - Campagne 2011 - Résultats 2010* [en ligne]. S.l. : s.n. [Consulté le 19 juillet 2013]. ISBN 978-2-35838-298-4. **Disponible à l'adresse** : ademe.typepad.fr/files/2012-syntheseopen2011-2.pdf.

OTT, Stephan, HERNANDEZ-MAETSCHER, Sebastian et LATTKE, Frank, 2011. *D4.1 Guidelines to preliminaries/survey* [en ligne]. S.l. E2ReBuild. [Consulté le 21 juillet 2013]. **Disponible à l'adresse** : www.e2rebuild.eu/en/links/deliverables/Documents/E2ReBuild_D4.1_GuidelinesPreliminariesSurvey.pdf.

OTT, Stephan et WINTER, Stefan, 2010a. TES EnergyFaçade - Construction principles. In : *World Conference on Timber Engineering (WTCE 2010)* [en ligne]. S.l. : s.n. 2010. p. 6. [Consulté le 21 juillet 2013]. **Disponible à l'adresse** : www.ewpa.com/Archive/2010/june/Paper_348.pdf.

OTT, Stephan et WINTER, Stefan, 2010b. TES EnergyFaçade - Sustainability and environmental impact. In : *World Conference on Timber Engineering (WTCE 2010)* [en ligne]. S.l. : s.n. 2010. p. 9. [Consulté le 21 juillet 2013]. **Disponible à l'adresse** : www.ewpa.com/Archive/2010/june/Paper_162.pdf.

OUEST-FRANCE, 2010. *Le Crous étoffe son offre de logements étudiants* [en ligne]. 3 juin 2010. S.l. : s.n. [Consulté le 20 juillet 2013]. **Disponible à l'adresse** : http://www.ouest-france.fr/of-photos/2010/06/03/na15_2735440_1_apx_470_.jpg.

OUYANG, Jinlong, GE, Jian et HOKAO, Kazunori, 2009. Economic analysis of energy-saving renovation measures for urban existing residential buildings in China based on thermal simulation and site investigation. In : *Energy Policy* [en ligne]. janvier 2009. Vol. 37, n° 1, p. 140-149. [Consulté le 19 juillet 2013]. DOI 10.1016/j.enpol.2008.07.041. **Disponible à l'adresse** : <http://www.sciencedirect.com/science/article/B6V2W-4THB4JG-2/2/be597ff54180b4379ea121267e3a9a74>.

PARK, Jae Hyuk, VAN NEDERVEEN, Sander, BEHESHTI, Reza, ADRIAANSE, Arjen et DE JONGE, Menno, 2010. Application of process modelling for industrialised bottom-up production system in the BIM-integrated BC industry: Prototype of parking garage projects in The Netherlands. In : *eWork and eBusiness in Architecture, Engineering and Construction*. Cork, Republic of Ireland : CRC Press. septembre 2010. p. 157-166.

PATIN, Yvan, 2011. Domaine traditionnel ? Technique courante? In : *L'auxiliaire* [en ligne]. avril 2011. [Consulté le 21 juillet 2013]. **Disponible à l'adresse** : <http://www.auxiliaire.fr/infosbtp/59/domaine-traditionel-technique-courante.html>.

PÉNARD, Lionel, PAPANODITIS, Nicolas et PIERROT-DESEILLIGNY, Marc, 2005. 3D building facade reconstruction under mesh form from multiple wide angle views. In : *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences (IAPRS)* [en ligne]. Venice, Italy : s.n. 2005. [Consulté le 28 juillet 2013]. **Disponible à l'adresse** : <http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download;jsessionid=8627B2C2D6B2F07E932C508E557080C6?doi=10.1.1.136.5795&rep=rep1&type=pdf>.

PHENG, Low Sui et CHUAN, Choong Joo, 2001. A study of the readiness of precasters for just-in-time construction. In : *Work Study* [en ligne]. 1 juillet 2001. Vol. 50, n° 4, p. 131-140. [Consulté le 22 juillet 2013]. DOI 10.1108/00438020110391855. **Disponible à l'adresse** : <http://www.emeraldinsight.com/journals.htm?articleid=851358>.

POEL, Bart, VAN CRUCHTEN, Gerelle et BALARAS, Constantinos A., 2007. Energy performance assessment of existing dwellings. In : *Energy and Buildings* [en ligne]. avril 2007. Vol. 39,

n° 4, p. 393-403. [Consulté le 19 juillet 2013]. DOI 10.1016/j.enbuild.2006.08.008. Disponible à l'adresse : <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S037877880600212X>.

POLAT, Gul, ARDITI, David et MUNGEN, Ugur, 2007. Simulation-based decision support system for economical supply chain management of rebar. In : *Journal of Construction Engineering and Management* [en ligne]. janvier 2007. Vol. 133, n° 1, p. 29-39. [Consulté le 22 juillet 2013]. DOI 10.1061/(ASCE)0733-9364(2007)133:1(29). Disponible à l'adresse : <http://ascelibrary.org/doi/abs/10.1061/%28ASCE%290733-9364%282007%29133%3A1%2829%29>.

POLLEFEYS, Marc, KOCH, Reinhard, VERGAUWEN, Maarten et VAN GOOL, Luc, 2000. Automated reconstruction of 3D scenes from sequences of images. In : *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing* [en ligne]. 2000. Vol. 55, n° 4, p. 251-267. [Consulté le 28 juillet 2013]. Disponible à l'adresse : <http://130.203.133.150/viewdoc/summary;jsessionid=436779278D8BEF43790116A0410C2441?doi=10.1.1.21.4714>.

PORTAIL DU GOUVERNEMENT, 2013. *Dossier de presse - Plan d'investissement pour le logement - Les 20 mesures* [en ligne]. 21 mars 2013. S.l. : s.n. [Consulté le 19 juillet 2013]. Disponible à l'adresse : http://www.gouvernement.fr/sites/default/files/fichiers_joints/dossier_de_presse_du_ministere_de_legalite_des_territoires_et_du_logement.pdf.

PORTER, Michael E., 1998. *Competitive advantage: creating and sustaining superior performance : with a new introduction*. S.l. : Simon and Schuster. ISBN 9780684841465.

PRITSKER, A. Alan B., WAITERS, Lawrence J. et WOLFE, Philip M., 1969. Multiproject scheduling with limited resources: a zero-one programming approach. In : *Management Science* [en ligne]. 1 septembre 1969. Vol. 16, n° 1, p. 93-108. [Consulté le 22 juillet 2013]. DOI 10.1287/mnsc.16.1.93. Disponible à l'adresse : <http://mansci.journal.informs.org/content/16/1/93>.

PUCA et COMITÉ « BÂTIMENTS EXISTANTS » DU PREBAT, 2010. *Les 17 projets lauréats - Programme REHA* [en ligne]. juin 2010. S.l. : s.n. [Consulté le 20 juillet 2013]. Disponible à l'adresse : [http://pro.union-habitat.org/hlm/pomv2.nsf/d4c13c817a58520bc12571e60056ffb4/9fcf42b24c629240c1257753003063b6/\\$FILE/Les%20projets%20laur%C3%A9ats%20du%20programme%20REHA.pdf](http://pro.union-habitat.org/hlm/pomv2.nsf/d4c13c817a58520bc12571e60056ffb4/9fcf42b24c629240c1257753003063b6/$FILE/Les%20projets%20laur%C3%A9ats%20du%20programme%20REHA.pdf).

QUALUP, [sans date]. Pixdim. In : *Pixdim* [en ligne]. [Consulté le 21 juillet 2013]. Disponible à l'adresse : <http://pixdim.com/>.

RADANNE, Pierre, 2004. *La division par 4 des émissions de dioxyde de carbone en France d'ici 2050 - Introduction au débat*. S.l. Mission Interministérielle de l'Effet de Serre (MIES).

REGATEIRO, Francisco, BENTO, João et DIAS, Joaquim, 2012. Floor plan design using block algebra and constraint satisfaction. In : *Advanced Engineering Informatics* [en ligne]. avril 2012. Vol. 26, n° 2, p. 361-382. [Consulté le 21 juillet 2013]. DOI 10.1016/j.aei.2012.01.002. Disponible à l'adresse : <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1474034612000031>.

RICHARD, Roger-Bruno, 2005. Industrialised building systems: reproduction before automation and robotics. In : *Automation in Construction* [en ligne]. août 2005. Vol. 14, n° 4, p. 442-451. [Consulté le 20 juillet 2013]. DOI 10.1016/j.autcon.2004.09.009. Disponible à l'adresse : <http://www.sciencedirect.com/science/article/B6V20-4DV1RC2-1/2/a6870deeeda8d0a7fa3b8c0f0c31cf1c>.

RITZMAN, Larry, KRAJEWSKI, Lee, MITCHELL, Jim et TOWNLEY, Christopher, 2004. *: principes et applications*. Paris, France : Pearson Education France. ISBN 9782744070280.

ROSS, Douglas Taylor, 1977. Structured Analysis (SA): a language for communicating ideas. In : *IEEE Transactions on Software Engineering* [en ligne]. janvier 1977. Vol. 3, n° 1, p. 16-34. [Consulté le 20 juillet 2013]. DOI 10.1109/TSE.1977.229900. Disponible à l'adresse : <http://cs.txstate.edu/~rp31/papersSP/structuredAnalysisRoss.pdf>.

RUOT, Bertrand, 2009. *RECOLCI - Tâche 1.2 - Techniques constructives dans les immeubles de logements collectifs entre 1949 et 1974 - Livrable 2* [en ligne]. S.I. CSTB (Centre Scientifique et Technique du Bâtiment). [Consulté le 24 juillet 2013]. Disponible à l'adresse : http://w3.toulouse.archi.fr/li2a/L_F/recencement.pdf.

RUOT, Bertrand, 2010a. *RECOLCI - Tâche 1.2 - Éléments de morphologie des immeubles de logements collectifs construits entre 1949 et 1974 - Livrable 2B* [en ligne]. S.I. CSTB (Centre Scientifique et Technique du Bâtiment). [Consulté le 24 juillet 2013]. Disponible à l'adresse : http://w3.toulouse.archi.fr/li2a/L_F/morphologie.pdf.

RUOT, Bertrand, 2010b. *RECOLCI - Task 1.1 - Elements of morphology of French collective housing buildings constructed between 1949 and 1974* [en ligne]. S.I. CSTB (Centre Scientifique et Technique du Bâtiment). [Consulté le 20 juillet 2013]. Disponible à l'adresse : www.empa-ren.ch/A50/Annex%2050%20Final%20Publications%20for%20Internet/RECOLCI_T1%20%20final%20%20version%20.pdf.

RUOT, Bertrand, 2010c. *RECOLCI - Task 1.1 - French housing stock built between 1949 and 1974* [en ligne]. S.I. CSTB (Centre Scientifique et Technique du Bâtiment). [Consulté le 20 juillet 2013]. Disponible à l'adresse : www.empa-ren.ch/A50/Annex%2050%20Final%20Publications%20for%20Internet/RECOLCI_T1%201_fin al%20version.pdf.

SABIN, Daniel et FREUDER, Eugene C., 1996. Configuration as composite constraint satisfaction. In : *Proceedings of the AI and Manufacturing Research Planning Workshop* [en ligne]. Albuquerque, NM, USA : AAAI Press. 1996. p. 153-161. [Consulté le 21 juillet 2013]. Disponible à l'adresse : <http://www.aaai.org/Library/SIGMAN/1996/sigman96-020.php>.

SABIN, Daniel et WEIGEL, Rainer, 1998. Product configuration frameworks - a survey. In : *IEEE Intelligent Systems and their Applications* [en ligne]. 1998. Vol. 13, n° 4, p. 42-49. [Consulté le 21 juillet 2013]. DOI 10.1109/5254.708432. Disponible à l'adresse : <http://ieeexplore.ieee.org/lpdocs/epic03/wrapper.htm?arnumber=708432>.

SACKS, Rafael, RADOSAVLJEVIC, Milan et BARAK, Ronen, 2010. Requirements for building information modeling based lean production management systems for construction. In : *Automation in Construction* [en ligne]. août 2010. Vol. 19, n° 5, p. 641-655. [Consulté le 20 juillet 2013]. DOI 10.1016/j.autcon.2010.02.010. Disponible à l'adresse : <http://www.sciencedirect.com/science/article/B6V20-4YRPMVH-1/2/02bc7331fc39ec2219cb600b49ac7889>.

SARTORI, I. et HESTNES, A.G., 2007. Energy use in the life cycle of conventional and low-energy buildings: A review article. In : *Energy and Buildings* [en ligne]. mars 2007. Vol. 39, n° 3, p. 249-257. [Consulté le 19 juillet 2013]. DOI 10.1016/j.enbuild.2006.07.001. Disponible à l'adresse : <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0378778806001873>.

SAWADOGO, Marie et ANCIAUX, Didier, 2010. Modèle de plus court chemin multiobjectif pour le transport intermodal au sein de la chaîne logistique verte. In : *Évaluation et optimisation des systèmes innovants de production de biens et de services* [en ligne]. Hammamet, Tunisia : s.n. mai 2010. [Consulté le 19 juillet 2013]. Disponible à l'adresse : www.enim.fr/mosim2010/articles/127.pdf.

SCHWEHR, Peter, FISCHER, Robert et GEIER, Sonja, 2011. *Retrofit strategies design guide - Advanced retrofit strategies & 10 steps to a prefab module* [en ligne]. S.I. : s.n.

[Consulté le 20 juillet 2013]. ISBN 978-3-905594-59-1. **Disponible à l'adresse** : www.empa-ren.ch/A50/Annex%2050%20Final%20Publications%20for%20Internet/DesignGuide_ECBCS_A50.pdf.

SCHWEHR, Peter, FISCHER, Robert, ZIMMERMANN, Mark et KAAN, Henk, 2010. *Building typology and morphology of Swiss multi-family homes 1919 - 1990* [en ligne]. S.I. [Consulté le 20 juillet 2013]. **Disponible à l'adresse** : www.empa-ren.ch/A50/Annex%2050%20Final%20Publications%20for%20Internet/Building_Typology_and_Morphology_01-10.pdf.

SGFGAS, [sans date]. *Éco-prêts à taux zéro - Bilan de production 2012* [en ligne]. S.I. Société de Gestion du Fonds de Garantie de l'Accession Sociale à la propriété (SGFGAS). [Consulté le 27 juillet 2013]. **Disponible à l'adresse** : https://www2.sgfgas.fr/presentation/Stats/EPZ/EPZ_Bilan_de_production.pdf.

SHAH, Rachna et WARD, Peter T., 2003. Lean manufacturing: context, practice bundles, and performance. In : *Journal of Operations Management* [en ligne]. mars 2003. Vol. 21, n° 2, p. 129-149. [Consulté le 20 juillet 2013]. DOI 10.1016/S0272-6963(02)00108-0. **Disponible à l'adresse** : <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0272696302001080>.

SIDLER, Olivier, 2009. 090502 : *Énergie primaire ou énergie finale ?* [en ligne]. Note technique. S.I. Enertech. [Consulté le 19 juillet 2013]. **Disponible à l'adresse** : www.enertech.fr/modules/catalogue/pdf/39/energie%20primaire-energie%20finale.pdf.

SIENOU, Amadou, 2009. *Proposition d'un cadre méthodologique pour le management intégré des risques et des processus d'entreprise* [en ligne]. Systèmes industriels. Albi, France : Institut National Polytechnique de Toulouse (INPT). [Consulté le 20 juillet 2013]. **Disponible à l'adresse** : <http://ethesis.inp-toulouse.fr/archive/00000878/01/sienou.pdf>.

SOFTECH, INC., 1981. *Integrated Computer-Aided Manufacturing (ICAM) - Architecture part II - Volume IV - Function modeling manual (IDEF0)* [en ligne]. juin 1981. S.I. : s.n. [Consulté le 20 juillet 2013]. **Disponible à l'adresse** : <http://www.dtic.mil/dtic/tr/fulltext/u2/b062457.pdf>.

SOININEN, Timo, TIIHONEN, Juha, MÄNNISTÖ, Tomi et SULONEN, Reijo, 1998. Towards a general ontology of configuration. In : *Artificial Intelligence for Engineering Design, Analysis and Manufacturing* [en ligne]. septembre 1998. Vol. 12, n° 4, p. 357-372. [Consulté le 21 juillet 2013]. **Disponible à l'adresse** : <http://journals.cambridge.org/action/displayAbstract?fromPage=online&aid=38651>.

SUNDARAKANI, Balan, DE SOUZA, Robert, GOH, Mark, WAGNER, Stephan M. et MANIKANDAN, Sushmera, 2010. Modeling carbon footprints across the supply chain. In : *International Journal of Production Economics* [en ligne]. novembre 2010. Vol. 128, n° 1, p. 43-50. [Consulté le 20 juillet 2013]. DOI 10.1016/j.ijpe.2010.01.018. **Disponible à l'adresse** : <http://www.sciencedirect.com/science/article/B6VF8-4Y70C4X-2/2/fdc221a38afb38a5aeceded10acd69b7>.

THOMAS, Paul R. et SALHI, Said, 1998. A tabu search approach for the resource constrained project scheduling problem. In : *Journal of Heuristics* [en ligne]. juillet 1998. Vol. 4, n° 2, p. 123-139. [Consulté le 22 juillet 2013]. DOI 10.1023/A:1009673512884. **Disponible à l'adresse** : <http://link.springer.com/article/10.1023/A%3A1009673512884>.

TRÉSOR DE LA LANGUE FRANÇAISE INFORMATISÉ (TFLI), [sans date]. *Industrialisation* [en ligne]. S.I. : s.n. [Consulté le 20 juillet 2013 a]. **Disponible à l'adresse** : <http://www.cnrtl.fr/definition/industrialisation>.

TRÉSOR DE LA LANGUE FRANÇAISE INFORMATISÉ (TFLI), [sans date]. *Industrie* [en ligne]. S.I. : s.n. [Consulté le 20 juillet 2013 b]. **Disponible à l'adresse** : <http://www.cnrtl.fr/definition/industrie>.

TRÉSOR DE LA LANGUE FRANÇAISE INFORMATISÉ (TFLI), [sans date]. **Industriel** [en ligne]. S.I. : s.n. [Consulté le 20 juillet 2013 c]. **Disponible à l'adresse** : <http://www.cnrtl.fr/definition/industriel>.

TRÉSOR DE LA LANGUE FRANÇAISE INFORMATISÉ (TFLI), [sans date]. **Réhabilitation** [en ligne]. S.I. : s.n. [Consulté le 19 juillet 2013 d]. **Disponible à l'adresse** : <http://www.cnrtl.fr/definition/r%C3%A9habilitation>.

TRÉSOR DE LA LANGUE FRANÇAISE INFORMATISÉ (TFLI), [sans date]. **Rénovation** [en ligne]. S.I. : s.n. [Consulté le 19 juillet 2013 e]. **Disponible à l'adresse** : <http://www.cnrtl.fr/definition/r%C3%A9novation>.

TRIMBLE, [sans date]. SketchUp. In : **SketchUp** [en ligne]. [Consulté le 21 juillet 2013]. **Disponible à l'adresse** : <http://www.sketchup.com/>.

TSENG, Lin-Yu et CHEN, Shih-Chieh, 2006. A hybrid metaheuristic for the resource-constrained project scheduling problem. In : **European Journal of Operational Research** [en ligne]. 1 décembre 2006. Vol. 175, n° 2, p. 707-721. [Consulté le 22 juillet 2013]. DOI 10.1016/j.ejor.2005.06.014. **Disponible à l'adresse** : <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0377221705005023>.

VALLS, Vicente, BALLESTÍN, Francisco et QUINTANILLA, Sacramento, 2008. A hybrid genetic algorithm for the resource-constrained project scheduling problem. In : **European Journal of Operational Research** [en ligne]. 1 mars 2008. Vol. 185, n° 2, p. 495-508. [Consulté le 22 juillet 2013]. DOI 10.1016/j.ejor.2006.12.033. **Disponible à l'adresse** : <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0377221707000616>.

VAN EGMOND, Emilia, 2012. Innovation, technology and knowledge transfer for sustainable construction. In : AKINTOYE, Akintola, GOULDING, Jack S. et ZAWDIE, Girma (éd.), **Construction innovation and process improvement** [en ligne]. S.I. : Wiley-Blackwell. p. 95-123. [Consulté le 20 juillet 2013]. ISBN 9781118280294. **Disponible à l'adresse** : <http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/9781118280294.ch5/summary>.

VAN HOEVE, Willem-Jan et KATRIEL, Irit, 2006. Chapter 6 - Global constraints. In : ROSSI, Francesca, VAN BEEK, Peter et WALSH, Toby (éd.), **Handbook of constraint programming** [en ligne]. S.I. : Elsevier. Foundations of Artificial Intelligence. p. 169-208. [Consulté le 21 juillet 2013]. ISBN 1574-6526. **Disponible à l'adresse** : <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1574652606800106>.

VAN NEDERVEEN, G.A. et TOLMAN, F.P., 1992. Modelling multiple views on buildings. In : **Automation in Construction** [en ligne]. décembre 1992. Vol. 1, n° 3, p. 215-224. [Consulté le 21 juillet 2013]. DOI 10.1016/0926-5805(92)90014-B. **Disponible à l'adresse** : <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/092658059290014B>.

VAN NEDERVEEN, Sander et GIELINGH, Wim, 2009. Modelling the life-cycle of sustainable, living buildings. In : **Journal of Information Technology in Construction** [en ligne]. octobre 2009. Vol. 14, p. 674-691. [Consulté le 20 juillet 2013]. **Disponible à l'adresse** : www.itcon.org/data/works/att/2009_44.content.01749.pdf.

VAN NEDERVEEN, Sander, GIELINGH, Wim et DE RIDDER, Hennes, 2009. Value-oriented industrial building for a sustainable future. In : **Open Building Manufacturing: Key Technologies, Applications, and Industrial Cases** [en ligne]. S.I. : ManuBuild. p. 19-30. [Consulté le 20 juillet 2013]. ISBN 978-951-38-7144-4 (print), 978-951-38-7146-8 (electronic). **Disponible à l'adresse** : adaptablefutures.com/wp-content/uploads/2011/10/Fuster-et-al.-20091.pdf.

VAREILLES, Élise, BARCO SANTA, Andrés Felipe, FALCON, Marie, ALDANONDO, Michel et GABORIT, Paul, 2013. Configuration of high performance apartment buildings renovation: a constraint based approach. In : **Proceedings of the 2013 IEEE International Conference on**

Industrial Engineering and Engineering Management [en ligne]. Bangkok, Thailand : IEEE. décembre 2013. [Consulté le 20 décembre 2014]. Disponible à l'adresse : <http://www.meetmatt.net/ieem2013/m/abstract.asp?absID=232>.

VAREILLES, Élise, LANGHOFF THUESEN, Christian, FALCON, Marie et ALDANONDO, Michel, 2013. **Interactive configuration of high performance renovation of apartment buildings by the use of CSP**. In : *Proceedings of the 15th International Configuration Workshop* [en ligne]. Vienne, Austria : s.n. 29 août 2013. p. 29-33. [Consulté le 28 novembre 2013]. Disponible à l'adresse : <http://ws-config-2013.mines-albi.fr/CWS-2013-Proceedings-Color.pdf>.

VERBEECK, G. et HENS, H., 2005. Energy savings in retrofitted dwellings: economically viable? In : *Energy and Buildings* [en ligne]. juillet 2005. Vol. 37, n° 7, p. 747-754. [Consulté le 19 juillet 2013]. DOI **10.1016/j.enbuild.2004.10.003**. Disponible à l'adresse : <http://www.sciencedirect.com/science/article/B6V2V-4F4NYHW-1/2/2607ccc0ac8a9288ea54138bca1b32bf>.

VERNADAT, François, 1999. **Techniques de modélisation en entreprise : applications aux processus opérationnels**. Paris, France : Economica. Production et techniques quantitatives appliquées à la gestion. ISBN 2-7178-3853-8.

VIRIDÉN + PARTNER AG, 2001. **Magnusstrasse 23, Zürich - Passivhausstandard im Umbau** [en ligne]. 2001. S.l. : s.n. [Consulté le 20 juillet 2013]. Disponible à l'adresse : http://www.viriden-partner.ch/cgi-bin/uploads/page01/images/magnus_3sich.jpg.

VIRIDÉN + PARTNER AG, 2005. **Wengistrasse 6, Zürich - Mehrwert durch Dachausbau** [en ligne]. 2005. S.l. : s.n. [Consulté le 20 juillet 2013]. Disponible à l'adresse : http://www.viriden-partner.ch/cgi-bin/uploads/page01/images/wengi_1sich.jpg.

VU, Hoang Hiep, KERIVEN, Renaud, LABATUT, Patrick et MARTIN, Jean-Philippe, 2009. Towards high-resolution large-scale multi-view stereo. In : *IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR 2009)* [en ligne]. Miami, FL, USA : s.n. juin 2009. p. 1430-1437. [Consulté le 28 juillet 2013]. Disponible à l'adresse : <http://imagine.enpc.fr/publications/papers/CVPR09a.pdf>.

WALTMAN, William D. et PRESLEY, Adrien, 1993. **Reading & critiquing an IDEF0 model** [en ligne]. juillet 1993. S.l. : Enterprise Integration Frameworks Group, Automation & Robotics Research Institute. [Consulté le 20 juillet 2013]. Disponible à l'adresse : webs.twsu.edu/enteng/papers/howidef0.pdf.

WARSAWSKI, Abraham, 1999. **Industrialized and automated building systems: A managerial approach**. 2nd Edition. S.l. : Taylor & Francis. ISBN 978-0-419-20620-0.

WHITE, Stephen A., 2004. **Introduction to BPMN** [en ligne]. mai 2004. S.l. : s.n. [Consulté le 20 juillet 2013]. Disponible à l'adresse : http://www.omg.org/bpmn/Documents/Introduction_to_BPMN.pdf.

WHITMAN, Larry, [sans date]. Strongly suggested bibliography on EntEng. In : [en ligne]. [Consulté le 20 juillet 2013]. Disponible à l'adresse : <http://webs.twsu.edu/enteng/EEPAPRS.html>.

WINTER, Stefan, OTT, Stephan, KAUFMANN, Hermann et LATTKE, Frank, 2010. TES EnergyFacade - Modernisieren mit Holzbaulösungen. In : *Mikadoplus* [en ligne]. mars 2010. p. 20. [Consulté le 21 juillet 2013]. Disponible à l'adresse : www.mikado-online.de/data/plus/2010/03/pdf/mikPLUS_201003.pdf.

ZAWIDZKI, Machi, TATEYAMA, Kazuyoshi et NISHIKAWA, Ikuko, 2011. The constraints satisfaction problem approach in the design of an architectural functional layout. In : *Engineering Optimization* [en ligne]. 2011. Vol. 43, n° 9, p. 943-966.

[Consulté le 21 juillet 2013]. DOI **10.1080/0305215X.2010.527005**. Disponible à l'adresse : <http://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/0305215X.2010.527005>.

ZHANG, Changsheng, SUN, Jigui, ZHU, Xingjun et YANG, Qingyun, 2008. An improved particle swarm optimization algorithm for flowshop scheduling problem. In : ***Information Processing Letters*** [en ligne]. 31 octobre 2008. Vol. 108, n° 4, p. 204-209. [Consulté le 22 juillet 2013]. DOI 10.1016/j.ipl.2008.05.010. Disponible à l'adresse : <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0020019008001567>.

ZIMMERMANN, Mark, 2010. ECBCS Annex 50 - Prefabricated Systems for Low Energy Renovation of Residential Buildings. In : ***ECBCS Technical Day*** [en ligne]. Diaporama. Copenhagen, Denmark. 16 juin 2010. [Consulté le 20 juillet 2013]. Disponible à l'adresse : http://www.ens.dk/sites/ens.dk/files/ny-teknologi/internationalt-samarbejde/internationale-energi-agentur/Prefabricated_Systems_for_Low_Energy_Renovation_of_Residential_Buildings.pdf.

ZIMMERMANN, Mark, 2012. ***ECBCS Annex 50 - Prefabricated systems for low energy renovation of residential buildings - Project summary report*** [en ligne]. S.l. : s.n. [Consulté le 20 juillet 2013]. ISBN 978-0-9562808-6-2. Disponible à l'adresse : www.ecbcs.org/docs/ECBCS_Annex_50_PSR.pdf.

ZWEIFEL, Gerhard, 2011. ***Retrofit simulation report*** [en ligne]. S.l. [Consulté le 20 juillet 2013]. Disponible à l'adresse : www.empa-ren.ch/A50/Annex%2050%20Final%20Publications%20for%20Internet/SimulationReport_ECB_CS_A50.pdf.

Table des matières

| | |
|---|-----------|
| Avant-propos | 3 |
| Remerciements | 4 |
| Résumé | 5 |
| Sommaire | 6 |
| Introduction | 8 |
| Chapitre 1 : Contexte et problématique | 9 |
| I) Des engagements internationaux pour lutter contre le changement climatique | 10 |
| 1) Les émissions de gaz à effet de serre dues aux activités humaines contribuent au changement climatique | 10 |
| a) Définitions du changement climatique | 10 |
| b) Mesures et impacts du changement climatique | 10 |
| c) Attribution du changement climatique à la hausse des émissions de gaz à effet de serre anthropiques | 11 |
| 2) Des engagements internationaux pour réduire les émissions de gaz à effet de serre | 12 |
| a) Des engagements peu contraignants au niveau mondial | 12 |
| b) Des engagements au niveau européen : les 3x20 | 14 |
| c) Des engagements au niveau français : le facteur 4 | 14 |
| II) Le secteur du bâtiment, premier consommateur d'énergie en France | 15 |
| III) Rénovation énergétique globale | 17 |
| 1) Définitions | 17 |
| a) Définitions de la rénovation | 17 |
| b) Définitions de la rénovation énergétique globale | 19 |
| 2) Alternatives à la rénovation énergétique | 19 |
| 3) Des objectifs ambitieux de rénovation énergétique des logements existants | 21 |
| a) Rapport de la mission d'information sur l'effet de serre pour l'Assemblée Nationale de 2006 | 21 |
| b) Réglementation thermique pour les bâtiments existants de 2007 | 22 |
| c) Loi « Grenelle 1 » de 2009 | 22 |
| 4) Pourquoi rénover les bâtiments ? | 22 |
| 5) Les rénovations de logements sont actuellement insuffisantes | 23 |
| IV) Problématique | 26 |
| 1) Comment atteindre les objectifs et résoudre les problèmes de la situation actuelle ? | 26 |
| 2) Améliorer la rénovation énergétique selon 4 critères : coût, délai, qualité et bilan environnemental | 27 |
| 3) Contribution scientifique et plan de la thèse | 27 |
| Chapitre 2 : Concepts et outils | 29 |
| I) Industrialisation et rénovation industrialisée | 30 |
| 1) Définitions | 30 |
| 2) Industrialisation d'un produit | 31 |
| 3) Industrialisation de la construction | 32 |
| 4) Définition d'une rénovation industrialisée | 34 |
| II) Modélisation des processus | 35 |
| 1) Définitions | 35 |
| a) Processus | 35 |
| b) Typologies de processus | 35 |

| | | |
|-----|--|----|
| c) | Approche processus | 35 |
| d) | Modélisation en entreprise | 36 |
| e) | Reengineering | 36 |
| 2) | Modélisation fonctionnelle : SADT ou IDEF0 | 36 |
| a) | Présentation de la modélisation fonctionnelle : SADT ou IDEF0 | 36 |
| b) | État de l'art | 38 |
| i) | Modélisation des processus de construction neuve des bâtiments | 38 |
| ii) | Modélisation des processus de rénovation des bâtiments | 39 |
| 3) | Modélisation événementielle : BPMN | 39 |

Chapitre 3 : De la rénovation artisanale à la rénovation industrialisée **41**

| | | |
|------|---|----|
| I) | Moyens financiers et humains pour atteindre les objectifs | 42 |
| 1) | Calcul du coût de la rénovation des logements | 42 |
| 2) | Calcul de la charge de travail générée par la rénovation des logements | 44 |
| II) | Rénovation artisanale | 47 |
| 1) | Le secteur de la construction est resté très artisanal | 47 |
| 2) | Problèmes de non-satisfaction du client dans le secteur du bâtiment | 48 |
| 3) | Étude du processus de rénovation artisanale auprès des bailleurs sociaux | 49 |
| 4) | Problèmes de la rénovation artisanale | 52 |
| III) | Rénovation industrialisée | 54 |
| 1) | Modélisation fonctionnelle IDEF0 du processus de rénovation industrialisée | 54 |
| a) | Diagramme A-0 : Rénover un (ou plusieurs) bâtiment(s) | 55 |
| b) | Diagramme A0 : Rénover un (ou plusieurs) bâtiment(s) | 56 |
| c) | Diagramme A1 : Évaluer les besoins d'amélioration du (ou des) bâtiment(s) existant(s) | 57 |
| d) | Diagramme A2 : Évaluer les travaux de rénovation du (ou des) bâtiment(s) existant(s) | 58 |
| e) | Diagramme A3 : Réaliser les travaux de rénovation du (ou des) bâtiment(s) existant(s) | 59 |
| 2) | Verrous de la rénovation industrialisée | 60 |
| a) | Système constructif et procédé de fabrication | 60 |
| b) | Relevé 3D et maquette numérique | 61 |
| c) | Configuration de la rénovation | 62 |
| d) | Coordination des acteurs : gestion de projet et gestion de production | 63 |
| 3) | État de l'art | 63 |
| a) | Projets de recherche internationaux sur l'industrialisation de la rénovation | 63 |
| i) | L'Annexe 50 de l'Agence Internationale de l'Énergie, un programme de recherche international | 63 |
| ii) | TES EnergyFacade, un projet de recherche pour industrialiser la rénovation | 65 |
| iii) | E2ReBuild, un projet européen qui poursuit les projets de recherche sur l'industrialisation de la rénovation | 67 |
| b) | Projets de recherche français sur l'industrialisation de la rénovation | 67 |
| i) | EFFINOV'Bois, un projet de recherche français avec un industriel de la construction bois | 67 |
| ii) | Synthèse des projets lauréats du PUCA-Réha | 68 |
| c) | Exemples de réalisations en France | 69 |
| i) | Rénovation de la cité universitaire La Bourgeonnaire à Nantes | 69 |
| ii) | Rénovation du lycée Auguste Pavie à Guingamp | 70 |

Chapitre 4 : Solutions proposées pour la rénovation industrialisée **72**

| | | |
|----|--|----|
| I) | Solutions pour le système constructif et le procédé de fabrication | 73 |
| 1) | Objectifs | 73 |
| 2) | Principe général | 74 |
| 3) | Panneaux de remplissage | 76 |

| | | |
|------|--|-----|
| a) | Composition | 76 |
| b) | Plusieurs structures de panneaux possibles | 76 |
| i) | Panneaux à ossature bois | 77 |
| ii) | Panneaux sandwichs | 77 |
| c) | Intégration des menuiseries | 78 |
| d) | Finitions extérieures des panneaux | 79 |
| e) | Possibilités architecturales | 79 |
| f) | Options pour la fabrication des panneaux : sur commande ou avec différenciation retardée | 79 |
| i) | Fabrication sur mesure | 79 |
| ii) | Fabrication avec différenciation retardée | 80 |
| 4) | Fixations et ossature métallique éventuelle | 80 |
| a) | Composition | 80 |
| b) | Options pour la fixation des panneaux sur le bâtiment existant | 80 |
| i) | Ossature accrochée aux façades | 81 |
| ii) | Ossature suspendue à la toiture | 81 |
| iii) | Ossature sur fondations | 82 |
| iv) | Sans ossature (fixations ponctuelles) | 83 |
| 5) | Processus d'implantation de la nouvelle enveloppe | 84 |
| II) | Solutions pour le relevé 3D et la maquette numérique | 85 |
| 1) | Objectifs | 86 |
| a) | Entrées | 86 |
| b) | Sorties | 87 |
| 2) | État de l'art | 87 |
| a) | Étude des techniques de relevé tridimensionnel sans contact | 87 |
| i) | Relevé topographique | 88 |
| ii) | Lasergrammétrie | 88 |
| iii) | Photogrammétrie | 89 |
| iv) | Comparaison des techniques de relevé tridimensionnel sans contact | 90 |
| v) | Recherches en cours | 91 |
| b) | Tests des logiciels de photogrammétrie | 91 |
| i) | Conseils pour la prise de photographies du bâtiment | 92 |
| ii) | Conclusion sur les 5 logiciels testés | 92 |
| c) | Maquette numérique ou BIM (Building Information Modelling) | 93 |
| III) | Solutions pour la configuration de la rénovation | 95 |
| 1) | Objectifs | 95 |
| a) | Calepinage des nouvelles façades | 95 |
| b) | Édition de la nomenclature des produits de rénovation des façades | 96 |
| c) | Édition de la gamme de montage des produits de rénovation des façades | 97 |
| d) | Estimation du coût global de la rénovation | 97 |
| 2) | Entrées et sorties du configurateur | 97 |
| a) | Entrées | 98 |
| b) | Sorties | 100 |
| i) | Nomenclature | 100 |
| ii) | Gamme de montage | 101 |
| 3) | Processus de configuration de la rénovation des bâtiments | 101 |
| a) | Chantier | 102 |
| b) | Blocs | 102 |
| c) | Bâtiments | 102 |
| d) | Façades | 102 |
| i) | Panneaux | 102 |
| ii) | Angles | 102 |
| 4) | Approche par contraintes | 103 |
| a) | Approches classiques de CSP | 103 |
| b) | Groupes de contraintes et multi-instances de contraintes | 103 |
| c) | Contraintes dynamiques | 103 |

| | | |
|--|--|------------|
| d) | Contraintes géométriques | 104 |
| e) | Contraintes globales | 104 |
| IV) | Solutions pour la gestion de production | 104 |
| 1) | Objectifs | 104 |
| 2) | Entrées et sorties | 105 |
| a) | Entrées | 105 |
| b) | Sorties | 105 |
| Chapitre 5 : Proposition d'un outil d'estimation pour les études préliminaires | | 106 |
| I) | La rénovation industrialisée entraîne une nouvelle organisation des acteurs | 107 |
| II) | Limites de la réglementation sur l'industrialisation | 108 |
| 1) | Marchés privés et marchés publics | 108 |
| 2) | Procédures d'attribution des marchés : classique ou conception-réalisation | 109 |
| 3) | Évaluation et certification des techniques non traditionnelles | 110 |
| III) | Contractualisation et études préliminaires | 111 |
| 1) | Processus de décision et les sources d'informations | 111 |
| 2) | Études préliminaires et études détaillées | 112 |
| 3) | Compromis entre risque de mauvaise estimation et investissement dans les études préliminaires | 113 |
| IV) | Outil d'estimation pour établir les devis et planning initiaux d'après les études préliminaires | 114 |
| 1) | Processus générique | 114 |
| 2) | Activités avec inducteurs de coût et de délai | 115 |
| 3) | Exemple de projet : rénovation d'un bâtiment de 15 logements | 117 |
| 4) | Retour d'expérience du configurateur pour affiner les inducteurs | 118 |
| Chapitre 6 : Outil de planification du chantier sous contraintes de ressources en lien avec la gestion de production des usines | | 119 |
| I) | Présentation de l'outil de planification | 120 |
| II) | Transition entre le configurateur et l'outil de planification | 121 |
| III) | Exemple d'application | 121 |
| IV) | Étude bibliographique | 123 |
| 1) | Modèle de base du RCPSP | 124 |
| a) | Modèle discrétisé | 124 |
| b) | Modèle temps continu | 124 |
| 2) | Extension du problème de base | 125 |
| V) | Modèle discrétisé en programmation linéaire mixte du problème | 126 |
| VI) | Modèle temps continu en programmation linéaire mixte du problème | 129 |
| VII) | Phase de prétraitement | 131 |
| 1) | Contraintes disjonctives | 131 |
| 2) | Courbes cumulées de ressources et de besoins | 132 |
| 3) | Méthode proposée | 132 |
| VIII) | Autres approches : heuristiques et métaheuristiques | 134 |
| IX) | Application | 135 |
| 1) | Hypothèses | 135 |
| 2) | Phase de prétraitement | 136 |
| 3) | Résultats | 137 |
| X) | Conclusion | 138 |
| Conclusion générale et perspectives | | 139 |
| I) | Conclusion générale | 140 |
| II) | Perspectives | 142 |

| | |
|---|------------|
| III) Retombées immédiates de la thèse | 143 |
| 1) Lancement du projet de recherche CRIBA | 143 |
| a) Partie recherche du projet CRIBA | 143 |
| b) Partie démonstration du projet CRIBA | 144 |
| 2) Création de la société Syrthea | 145 |
| Bibliographie | 146 |
| Table des matières | 168 |
| Liste des figures | 173 |
| Liste des tableaux | 175 |
| Liste des abréviations | 176 |
| Annexe 1 : outil d'estimation avec exemple de projet | 179 |

Liste des figures

| | |
|---|----|
| Figure 1 : variations observées a) de la température moyenne à la surface du globe, b) du niveau moyen de la mer à l'échelle du globe et c) de la couverture neigeuse dans l'hémisphère Nord en mars-avril | 11 |
| Figure 2 : variation des émissions mondiales de CO ₂ en 2050 (par rapport aux émissions en 2000) et élévation résultante, à l'équilibre et à long terme, de la température moyenne à la surface du globe et du niveau de la mer due à la seule dilatation thermique | 12 |
| Figure 3 : frise chronologique des négociations au sein de la CCNUCC | 13 |
| Figure 4 : consommation d'énergie finale par secteur en France de 1970 à 2011 | 15 |
| Figure 5 : cycle de vie traditionnel d'un projet industriel | 31 |
| Figure 6 : notation graphique des méthodes SADT ou IDEF0 | 37 |
| Figure 7 : décomposition des diagrammes de niveau supérieur en niveau inférieur dans les méthodes SADT ou IDEF0 | 38 |
| Figure 8 : représentation d'un événement de début (à gauche), d'un événement intermédiaire (au milieu) et d'un événement de fin (à droite) dans la notation BPMN | 40 |
| Figure 9 : représentation d'une activité dans la notation BPMN | 40 |
| Figure 10 : représentation d'un branchement dans la notation BPMN | 40 |
| Figure 11 : chantier d'isolation par l'extérieur d'une maison individuelle en banlieue de Toulouse en 2010 | 48 |
| Figure 12 : diagramme A-0 de la modélisation IDEF0 du processus de rénovation industrialisée des immeubles de logements collectifs | 55 |
| Figure 13 : diagramme A0 de la modélisation IDEF0 du processus de rénovation industrialisée des immeubles de logements collectifs | 56 |
| Figure 14 : diagramme A1 de la modélisation IDEF0 du processus de rénovation industrialisée des immeubles de logements collectifs | 58 |
| Figure 15 : diagramme A2 de la modélisation IDEF0 du processus de rénovation industrialisée des immeubles de logements collectifs | 59 |
| Figure 16 : diagramme A3 de la modélisation IDEF0 du processus de rénovation industrialisée des immeubles de logements collectifs | 60 |
| Figure 17 : exemples de réalisations de Viridén + Partner AG avec pose de toitures préfabriquées | 64 |
| Figure 18 : processus de pose des modules développés dans le cadre de l'Annexe 50 de l'IEA | 64 |
| Figure 19 : schéma du processus TES EnergyFacade | 65 |
| Figure 20 : aperçus d'un logiciel de photogrammétrie multi-images (à gauche) et d'un logiciel de traitement d'un nuage de points obtenu par lasergrammétrie (à droite) | 65 |
| Figure 21 : 4 possibilités de mise en œuvre des panneaux à ossature bois du projet TES EnergyFacade | 66 |
| Figure 22 : collège technique à Risør en Norvège avant et après rénovation par Trebyggeriet AS | 66 |
| Figure 23 : rénovation du collège Buchloe en Allemagne par l'entreprise Josef AMBROS GmbH | 67 |
| Figure 24 : aperçu avant et après rénovation du projet 41 (Machet), lauréat du programme PUCA-Réha en 2009 | 69 |
| Figure 25 : rénovation de la cité universitaire La Bourgeonnière à Nantes avec des panneaux à ossature bois par Cruard charpente | 69 |
| Figure 26 : rénovation du lycée Pavie à Guingamp par Turmel : pose des panneaux à ossature bois en cours | 70 |

| | |
|--|-----|
| Figure 27 : rénovation du lycée Pavie à Guingamp par Turmel : de gauche à droite, façade existante, façade protégée par des bâches, panneaux à ossature bois posés, vêtue extérieure en cours de pose et posée | 71 |
| Figure 28 : étapes de pose des fixations, de l'ossature métallique et des panneaux sur un bâtiment existant | 76 |
| Figure 29 : plan de coupe d'un mur à ossature bois | 77 |
| Figure 30 : exemple de panneau sandwich acier/mousse polyuréthane | 78 |
| Figure 31 : vue en perspective d'un panneau de remplissage intégrant une menuiserie | 78 |
| Figure 32 : ossature avec fixations (à gauche), panneaux fixés au bâtiment au moyen d'une ossature accrochée aux façades du bâtiment (à droite) | 81 |
| Figure 33 : ossature avec fixations (à gauche), panneaux fixés au bâtiment au moyen d'une ossature suspendue à la toiture du bâtiment (à droite) | 82 |
| Figure 34 : ossature avec fixations et fondations ponctuelles (à gauche), panneaux fixés au bâtiment au moyen d'une ossature sur fondations ponctuelles (à droite) | 82 |
| Figure 35 : ossature avec fixations et fondations filantes (à gauche), panneaux fixés au bâtiment au moyen d'une ossature sur fondations filantes (à droite) | 83 |
| Figure 36 : fixations ponctuelles (à gauche), panneaux fixés au bâtiment sans ossature avec des fixations ponctuelles (à droite) | 83 |
| Figure 37 : processus d'implantation de la nouvelle enveloppe | 84 |
| Figure 38 : cartographie des façades avec les zones d'accroche possibles pour les panneaux | 87 |
| Figure 39 : principes de la stéréophotogrammétrie (à gauche), de la photogrammétrie mono-image (au milieu) et de la photogrammétrie multi-images (à droite) | 89 |
| Figure 40 : décomposition en produits élémentaires des parois d'une maison Laprise | 94 |
| Figure 41 : interface THEO online pour assurer la liaison entre le tachéomètre Leica et le logiciel de CAO installé sur ordinateur | 94 |
| Figure 42 : exemples de calepinage des panneaux sur un bâtiment : grands panneaux horizontaux (à gauche), nombre minimum de panneaux (à droite) | 96 |
| Figure 43 : exemple de partition d'une façade avec des rectangles pour définir les zones d'accroche | 100 |
| Figure 44 : processus de décision et sources d'informations pour un projet de rénovation selon la notation BPMN | 111 |
| Figure 45 : activités du processus de rénovation générique | 115 |
| Figure 46 : diagramme de précedence des tâches de l'exemple d'application | 122 |
| Figure 47 : diagramme de précedence des tâches d'un petit projet | 131 |
| Figure 48 : diagramme de précedence des tâches d'un petit projet avec l'arbitrage « A avant B » | 131 |
| Figure 49 : diagramme de précedence des tâches d'un petit projet avec l'arbitrage « B avant A » | 131 |
| Figure 50 : exemple de façade à rénover | 144 |

Liste des tableaux

| | |
|---|-----|
| Tableau 1 : consommation d'énergie primaire moyenne par type de logements | 16 |
| Tableau 2 : définitions du terme « rénovation » | 18 |
| Tableau 3 : définitions du terme « réhabilitation » | 18 |
| Tableau 4 : comparaison des alternatives à la rénovation énergétique | 20 |
| Tableau 5 : nombre de logements selon la date de construction (en 2008) | 24 |
| Tableau 6 : classement des rénovations énergétiques selon l'OPEN | 24 |
| Tableau 7 : définitions du terme « industrialisation » | 31 |
| Tableau 8 : coût de la rénovation des logements selon plusieurs scénarios | 43 |
| Tableau 9 : durée moyenne de la rénovation artisanale d'une maison individuelle | 45 |
| Tableau 10 : durée moyenne de la rénovation artisanale d'un logement en immeuble collectif | 45 |
| Tableau 11 : charge de travail générée par la rénovation des logements selon plusieurs scénarios | 46 |
| Tableau 12 : processus de rénovation artisanale de six bailleurs sociaux (activités d'évaluation des besoins d'amélioration) | 50 |
| Tableau 13 : processus de rénovation artisanale de six bailleurs sociaux (activités d'étude des travaux de rénovation) | 51 |
| Tableau 14 : processus de rénovation artisanale de six bailleurs sociaux (activités de réalisation des travaux de rénovation) | 52 |
| Tableau 15 : comparaison des techniques de relevé tridimensionnel sans contact | 91 |
| Tableau 16 : 6 cas de répartition entre études préliminaires et études détaillées | 113 |
| Tableau 17 : données sur l'exemple de projet | 117 |
| Tableau 18 : liste des tâches de l'exemple d'application avec leur code, leur durée et les tâches précédentes | 122 |
| Tableau 19 : diagramme des tâches calées au plus tard de l'exemple d'application | 132 |
| Tableau 20 : diagramme des tâches optimal de l'exemple d'application | 133 |
| Tableau 21 : valeurs initiales des débuts au mieux e(i) de l'exemple d'application | 133 |
| Tableau 22 : calcul itératif des débuts au mieux e(i) de l'exemple d'application | 133 |
| Tableau 23 : calcul itératif des débuts au pire l(i) de l'exemple d'application | 134 |
| Tableau 24 : ressources demandées par chacune des tâches de l'exemple d'application | 135 |
| Tableau 25 : capacités résiduelles des fournisseurs et disponibilité des ressources chantier de l'exemple d'application | 136 |
| Tableau 26 : valeurs des débuts au mieux e(i) et au pire l(i) de l'exemple d'application | 137 |
| Tableau 27 : valeur minimale des critères à minimiser de l'exemple d'application | 137 |
| Tableau 28 : coût, nombre de ressources usines stockées, nombre de ressources chantier ajoutées et durée de location de la grue selon la date de fin du projet pour l'exemple d'application (en vert : les valeurs minimales) | 138 |

Liste des abréviations

Abréviations en français :

| | |
|------------------|---|
| 2D | 2 dimensions ou bidimensionnel |
| 3D | 3 dimensions ou tridimensionnel |
| ABC | Amélioration thermique des Bâtiments Collectifs |
| ACV | Analyse de Cycle de Vie |
| ADEME | Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Énergie |
| AIE | Agence Internationale de l'Énergie |
| ANAH | Agence Nationale de l'Habitat |
| ANR | Agence Nationale de la Recherche |
| ANRU | Agence Nationale pour la Rénovation Urbaine |
| APD | Avant-Projet Détaillé |
| APS | Avant-Projet Sommaire |
| ATE | Agrément Technique Européen |
| ATec | Avis Technique |
| ATex | Appréciation Technique d'Expérimentation |
| BBC | Bâtiment Basse Consommation |
| C2P | Commission Prévention Produits |
| CAH | Club de l'Amélioration de l'Habitat |
| CAO | Conception Assistée par Ordinateur |
| CCNUCC | Convention-Cadre des Nations Unies sur les Changements Climatiques |
| CCTP | Cahier des Clauses Techniques Particulières |
| CEA | Commissariat à l'Énergie Atomique |
| CFAO | Conception et Fabrication Assistées par Ordinateur |
| CGDD | Commissariat Général au Développement Durable |
| CGI | Centre de Génie Industriel |
| CH ₄ | Méthane |
| CIB | Conseil International du Bâtiment (actuellement International Council for Research and Innovation in Building and Construction) |
| CIDD | Crédit d'Impôt Développement Durable |
| CIFRE | Conventions Industrielles de Formation par la REcherche |
| CIREN | Centre International de Recherche sur l'Environnement et le Développement |
| CNR | Comité National Routier |
| CNRS | Centre National de la Recherche Scientifique |
| CO ₂ | Dioxyde de carbone ou gaz carbonique |
| CRIBA | Construction et Rénovation Industrialisées Bois Acier |
| CSTB | Centre Scientifique et Technique du Bâtiment |
| DCE | Dossier de Consultation des Entreprises |
| DPE | Diagnostic de Performance Énergétique |
| DTA | Document Technique d'Application |
| DTU | Document Technique Unifié |
| Éco-PTZ | Éco-Prêt à Taux Zéro |
| EDSYS | École Doctorale Systèmes |
| ÉMAC | École des Mines d'Albi-Carmaux ou Mines Albi-Carmaux |
| ENSTIB | École Nationale Supérieure des Technologies et Industries du Bois |
| ETN | Enquête de Technique Nouvelle |
| FCBA | Forêt Cellulose Bois-construction Ameublement |
| FEEBat | Formation aux Économies d'Énergie dans le Bâtiment |
| FFB | Fédération Française du Bâtiment |
| FIBC | Fédération de l'Industrie Bois-Construction |
| GES | Gaz à Effet de Serre |
| GIEC | Groupe d'experts Intergouvernemental sur l'Évolution du Climat |
| GPAO | Gestion de la Production Assistée par Ordinateur |
| H ₂ O | Vapeur d'eau |
| Habisol | Habitat intelligent et solaire photovoltaïque |
| HFC | hydrofluorocarbures ou hydrofluorocarbones |
| ICF | Immobilière des Chemins de Fer |

| | |
|--------------------|---|
| INES | Institut National de l'Énergie Solaire |
| INPG | Institut National Polytechnique de Grenoble |
| INPT | Institut National Polytechnique de Toulouse |
| INSEE | Institut National de la Statistique et des Études Économiques |
| ITE | Isolation Thermique par l'Extérieur |
| Li2a | Laboratoire d'Informatique Appliquée à l'Architecture |
| MEDDE | Ministère de l'Écologie, du Développement Durable et de l'Énergie |
| MEDDTL | Ministère de l'Écologie, du Développement Durable, des Transports et du Logement |
| MEEDDM | Ministère de l'Écologie, de l'Énergie, du Développement Durable et de la Mer |
| MIES | Mission Interministérielle de l'Effet de Serre |
| MNB | Maquette Numérique du Bâtiment |
| MNÉ | Modèles Numériques d'Élévation |
| MNT | modèle Numérique de Terrain |
| MOP | Maîtrise d'Ouvrage Publique |
| N ₂ O | Protoxyde d'azote ou oxyde nitreux |
| O ₃ | Ozone |
| OMM | Organisation Météorologique Mondiale |
| ONZUS | Observatoire National des Zones Urbaines Sensibles |
| OPC | Ordonnancement, Pilotage et Coordination |
| OPEN | Observatoire Permanent de l'amélioration Énergétique du logement |
| ORDRE | Traduction française des 5S (Ordonner, Ranger, Dépoussiérer, Découvrir des anomalies, Rendre évident, Être rigoureux) |
| PC | Permis de Construire |
| PFC | Perfluorocarbures ou hydrocarbures perfluorés |
| PGI | Progiciel de Gestion Intégré (en anglais : Enterprise Resource Planning (ERP)) |
| PNRU | Programme National de Rénovation Urbaine |
| PNUE | Programme des Nations Unies pour l'Environnement |
| PSP | Plan Stratégique de Patrimoine |
| PUCA | Plan Urbanisme Construction Architecture |
| RAPSODEE | Centre de Recherche d'Albi en génie des Procédés des Solides Divisés, de l'Énergie et de l'Environnement |
| RECOLCI | Réhabilitation Énergétique des immeubles de logements COLlectifs par Composants Intégrés |
| RGE | Reconnu Grenelle de l'Environnement |
| RPA | Réingénierie des Processus d'Affaires |
| SF ₆ | Hexafluorure de soufre |
| SGFGAS | Société de Gestion du Fonds de Garantie de l'Accession Sociale à la propriété |
| SHOB | Surface Hors d'Œuvre Brute |
| SHON | Surface Hors d'Œuvre Nette |
| SHON _{RT} | Surface de plancher Hors Œuvre Nette au sens de la RT |
| SIRENE | Systèmes Industriels pour la Rénovation Énergétique |
| SoeS | Service de l'Observation et des Statistiques |
| SPS | Sécurité et Protection de la Santé |
| STD | Simulation Thermique Dynamique |
| UE | Union Européenne |
| TFLi | Trésor de la Langue Française informatisé |
| TIC | Technologies de l'Information et de la Communication |
| TRÈFLE | Laboratoire de recherche Transferts Écoulements Fluides Énergétique |
| VMC | Ventilation Mécanique Contrôlée |

Abréviations en anglais :

| | |
|------|--|
| APT | Automatic Programming Tool |
| BCG | Boston Consulting Group |
| BIM | Building Information Modelling (en français : maquette numérique du bâtiment (MNB) ou modèle d'information unique du bâtiment) |
| BPD | Business Process Diagram (en français : diagramme de processus) |
| BPMI | Business Process Management Initiative |

| | |
|-----------|---|
| BPMN | Business Process Model and Notation |
| BPR | Business Process Reengineering (en français Réingénierie des Processus d'Affaires (RPA) ou reconfiguration des processus) |
| CAD | Computer-Aided Design |
| CIB | International Council for Research and Innovation in Building and Construction (précédemment Conseil International du Bâtiment (CIB)) |
| CSP | Constraints Satisfaction Problem (en français : problème de satisfaction de contraintes) |
| DPM | Design Process Model (en français : modèle du processus de conception) |
| ECBCS | Energy Conservation in Buildings and Community Systems |
| ECPPM | European Conference on Product & Process Modelling |
| ERP | Enterprise Resource Planning (en français : Progiciel de Gestion Intégré (PGI)) |
| GPS | Ground Positioning System |
| GSCM | Green Supply Chain Management |
| ICAM | Integrated Computer-Aided Manufacturing |
| ICT | Information and Communication Technologies (en français : Technologies de l'Information et de la Communication (TIC)) |
| IDEF | ICAM Definition |
| IDEFO | Integration DEFinition language 0 |
| IEA | International Energy Agency (en français : Agence Internationale de l'Énergie (AIE)) |
| IEEE | Institute of Electrical and Electronics Engineers |
| IFC | Industry Foundation Classes |
| IPCC | Intergovernmental Panel on Climate Change (en français : Groupe d'experts Intergouvernemental sur l'Évolution du Climat (GIEC)) |
| ISO | International Organization for Standardization (en français : organisation internationale de normalisation) |
| LIDAR | Light Detection And Ranging |
| MILP | Mixed-Integer Linear Programming (en français : programmation linéaire mixte en nombres entiers) |
| MIT | Massachusetts Institute of Technology |
| NIST | National Institute of Standards and Technology |
| OMG | Object Management Group |
| PERT | Program (ou Project) Evaluation and Review Technique |
| PLM | Product Lifecycle Management (en français : gestion du cycle de vie de produit) |
| RCPSP | Resource-Constrained Project Scheduling Problem (en français : problème de gestion de projet sous contraintes de ressources) |
| RCPSP/CPR | Resource-Constrained Project Scheduling Problem with consumption and production of resources (en français : problème de gestion de projet sous contraintes de ressources avec production et consommation de ressources) |
| SADT | Structured Analysis and Design Technique |
| SCM | Supply Chain Management (en français : gestion de la chaîne logistique) |
| SMED | Single Minute Exchange of Die (en français : changement rapide d'outil ou de série) |
| VSM | Value Stream Mapping |

Abréviations en japonais :

| | |
|----|--|
| 5S | Méthodologie japonaise d'organisation du lieu de travail (Seiri : débarrasser, Seiton : ranger, Seiso : nettoyer, Seiketsu : ordonner, Shitsuke : être rigoureux) |
|----|--|

Annexe 1 : **outil d'estimation** avec exemple de projet

| Activités | | | | |
|--|--|--|---|---|
| Type | Code | Désignation | Ordre de pose | |
| Activités d'études et de conception 00x | 001 | Estimation à partir de ratios | | |
| | 002 | Devis et planning initiaux | | |
| | 003 | Relevé géométrique des bâtiments existants | | |
| | 004 | Diagnostic de structure des bâtiments existants | | |
| | 005 | Autres diagnostics (amiante, réseaux d'assainissement...) | | |
| | 006 | Étude énergétique de la rénovation | | |
| | 007 | Étude architecturale de la rénovation | | |
| | 008 | Configuration de la rénovation | | |
| | 009 | Devis et planning finaux | | |
| | 010 | Constitution du dossier administratif | | |
| | 011 | Planification du chantier | | |
| Activités de réalisation | Activités de fabrication 10x | 101 | Approvisionnements | Par bâtiment puis par façade |
| | | 102 | Fabrication des panneaux (pour façades et balcons) | Par bâtiment puis par façade |
| | Activités de transport 20x | 201 | Transport des produits | Par bâtiment puis par façade |
| | | Activités de préparation des bâtiments 30x | 301 | Transport et installation du gros matériel de pose (grues, nacelles, échafaudages, tractopelles...) |
| | 302 | | Traitement des raccordements du bâtiment | Par bâtiment puis par façade |
| | 303 | | Préparation des abords (découpe du sol béton...) | Par bâtiment puis par façade |
| | 304 | | Préparation des façades (démontage des antennes, eaux pluviales...) | Par bâtiment puis par façade |
| | 305 | | Préparation des balcons (si conservés tels quels : démontage des garde-corps) | Par bâtiment puis par façade |
| | 306 | | Préparation des balcons (si transformés en loggias : démontage des garde-corps) | Par bâtiment puis par façade |
| | 307 | | Préparation des balcons (si supprimés et rapportés) | Par bâtiment puis par façade |
| | 308 | | Préparation de la toiture (si toiture-terrasse) | Par bâtiment |
| | Activités de traitement des façades 40x | 401 | Réalisation des fondations | Par bâtiment puis par façade |
| | | 402 | Pose de l'ossature sur les fondations | Par bâtiment puis par façade |
| | | 403 | Pose des fixations sur les façades | Par bâtiment puis par façade |
| 404 | | Pose de l'ossature sur les façades | Par bâtiment puis par façade | |

| | | | | |
|-----|--|------------------------------------|--|------------------------------|
| | | 405 | Isolation des façades | Par bâtiment puis par façade |
| | | 406 | Traitement des balcons (si conservés tels quels : remontage des garde-corps) | Par bâtiment puis par façade |
| | | 407 | Traitement des balcons (si transformés en loggias) | Par bâtiment puis par façade |
| | | 408 | Traitement des balcons (si supprimés et rapportés) | Par bâtiment puis par façade |
| | Activités de traitement des toitures 50x | 501 | Pose de l'ossature sur la toiture (si toiture-terrasse) | Par bâtiment |
| | | 502 | Isolation de la toiture (si toiture-terrasse) | Par bâtiment |
| | | 503 | Isolation de la toiture en sarking (si combles aménagés) | Par bâtiment |
| | | 504 | Isolation de la toiture en soufflage (si combles perdus) | Par bâtiment |
| | Activités de pose des équipements 60x | 601 | Pose des équipements | Par logement |
| | Activités de finition 70x | 701 | Réalisation des finitions intérieures (menuiseries...) | Par logement |
| | | 702 | Réalisation des finitions extérieures (gouttières...) | Par bâtiment puis par façade |
| | | 703 | Remise en état des abords | Par bâtiment puis par façade |
| | | 704 | Désinstallation et transport du gros matériel de pose (grues, nacelles, échafaudages, tractopelles...) | Pour tous les bâtiments |
| | | 705 | Évacuation des déchets banals | Pour tous les bâtiments |
| 706 | | Évacuation des déchets spéciaux | Pour tous les bâtiments | |
| 707 | | Visite de chantier (point d'arrêt) | Par bâtiment | |

| Activités | | | | | | | | |
|---|--|-----------------------|--|----------------------------|--------|----------------------|--------|------------------|
| Type | Code | Inducteurs | | Charge de travail unitaire | | Coûts unitaires | | |
| | | Désignation | Unité | Valeur | Unité | Valeur | Unité | |
| Activités d'études et de conception 00x | 001 | Forfaitaire | unités | 1,5 | jours | 600 | €/jour | |
| | 002 | Forfaitaire | unités | 0,5 | jours | 600 | €/jour | |
| | 003 | Forfaitaire | unités | 5 | jours | 600 | €/jour | |
| | 004 | Forfaitaire | unités | 10 | jours | 600 | €/jour | |
| | 005 | Forfaitaire | unités | 20 | jours | 600 | €/jour | |
| | 006 | Forfaitaire | unités | 5 | jours | 600 | €/jour | |
| | 007 | Forfaitaire | unités | 5 | jours | 600 | €/jour | |
| | 008 | Forfaitaire | unités | 2 | jours | 600 | €/jour | |
| | 009 | Forfaitaire | unités | 10 | jours | 600 | €/jour | |
| | 010 | Forfaitaire | unités | 50 | jours | 600 | €/jour | |
| | 011 | Forfaitaire | unités | 1 | jours | 600 | €/jour | |
| Activités de réalisation | Activités de fabrication 10x | 101 | Forfaitaire | unités | 20 | jours | 600 | €/jour |
| | | 102 | - Surface de façades - Nombre de façades (donc nombre d'angles) - Complexité des façades (angles rentrants, sortants...) - Type de revêtement extérieur (le moins cher, très cher...) - Taux de menuiseries (faible 30 %, moyen 50 %, élevé 70 %) | m ² | 100 | m ² /jour | 150 | €/m ² |
| | Activités de transport 20x | 201 | - Volume/masse de produits à transporter - Distance entre l'usine et le chantier | km | 500 | km/jour | 3 | €/km |
| | Activités de préparation des bâtiments 30x | 301 | - Type de matériel de pose - Distance entre l'usine et le chantier | jours | | jours | | €/jour |
| | | 302 | - Présence d'arrivées de fluides (gaz), d'évacuations (eaux pluviales, usées), de câbles électriques... | unités | | unités/jour | | €/unité |
| | | 303 | - Volume de sol - Nature du sol | m ³ | | m ³ /jour | | €/m ³ |
| | | 304 | - Nombre d'éléments à enlever | unités | | unités/jour | | €/unité |
| | | 305 | - Linéaire de balcons | m | 20 | m/jour | 100 | €/m |
| 306 | | - Linéaire de balcons | m | 20 | m/jour | 100 | €/m | |
| 307 | - Linéaire de balcons | m | 20 | m/jour | 100 | €/m | | |
| 308 | - Surface de toiture - Type de toiture | m ² | | m ² /jour | | €/m ² | | |

| | | | | | | | | |
|--|--|-----|--|----------------|-----|----------------------|--------|------------------|
| | Activités de traitement des façades 40x | 401 | - Volume de fondations | m | 6 | m/jour | 65 | €/m |
| | | 402 | - Longueur d'ossature | m | 100 | m/jour | 8,5 | €/m |
| | | 403 | - Type de pose de l'ossature - Surface de façades - Complexité (angles rentrants, sortants...) | m ² | 200 | m ² /jour | 14 | €/m ² |
| | | 404 | - Longueur d'ossature - Surface de façades - Complexité (angles rentrants, sortants...) | m | 100 | m/jour | 8,5 | €/m |
| | | 405 | - Surface de façades - Nombre de façades (donc nombre d'angles) - Complexité des façades (angles rentrants, sortants...) - Type de revêtement extérieur (le moins cher, très cher...) - Taux de menuiseries (faible 30 %, moyen 50 %, élevé 70 %) | m ² | 100 | m ² /jour | 30 | €/m ² |
| | | 406 | - Linéaire de balcons | m | 10 | m/jour | 100 | €/m |
| | | 407 | - Linéaire de balcons | m ² | 10 | m ² /jour | 30 | €/m ² |
| | | 408 | - Linéaire de balcons | m | 10 | m/jour | 300 | €/m |
| | Activités de traitement des toitures 50x | 501 | - Longueur d'ossature | m | 100 | m/jour | 8,5 | €/m |
| | | 502 | - Surface de toiture | m ² | 150 | m ² /jour | 150 | €/m ² |
| | | 503 | - Surface de toiture | m ² | 150 | m ² /jour | 120 | €/m ² |
| | | 504 | - Surface de toiture | m ² | 150 | m ² /jour | 20 | €/m ² |
| | Activités de pose des équipements 60x | 601 | - Nombre de logements | logts | 5 | jour/logt | 11 300 | €/logt |
| | Activités de finition 70x | 701 | - Nombre de menuiseries | unités | 1 | unités/jour | 800 | €/unité |
| | | 702 | - Nombre d'éléments à remettre | unités | | unités/jour | | €/unité |
| | | 703 | - Surface de sol | m ² | | m ² /jour | | €/m ² |
| | | 704 | - Type de matériel de pose - Distance entre l'usine et le chantier | jours | | jours | | €/jour |
| | | 705 | - Type de déchets (gravats, légers) - Volume/masse | t | 100 | t/jour | 10 | €/t |
| | | 706 | - Type de déchets (amiante...) - Volume/masse | t | 50 | t/jour | 250 | €/t |
| | | 707 | Forfaitaire | unités | 1 | jours | 600 | €/jour |

| | |
|----------------|-------------|
| Légende | Données |
| | Calculs |
| | Hypothèses |
| | À compléter |

| Activités | | | Projet | | | | | | |
|---|---|--|---|---|-------------------|-------|--------|---------|--------|
| Type | Code | Désignation | Inducteurs | | Charge de travail | | Coûts | | |
| | | | | | | | Total | | |
| | | | Valeur | Unité | Valeur | Unité | Valeur | Unité | |
| Activités d'études et de conception 00x | 001 | Estimation à partir de ratios | 1,5 | jours | 1,5 | jours | 900 | € | |
| | 002 | Devis et planning initiaux | 0,5 | jours | 0,5 | jours | 300 | € | |
| | 003 | Relevé géométrique des bâtiments existants | 5 | jours | 5 | jours | 3 000 | € | |
| | 004 | Diagnostic de structure des bâtiments existants | 10 | jours | 10 | jours | 6 000 | € | |
| | 005 | Autres diagnostics (amiante, réseaux d'assainissement...) | 20 | jours | 20 | jours | 12 000 | € | |
| | 006 | Étude énergétique de la rénovation | 5 | jours | 5 | jours | 3 000 | € | |
| | 007 | Étude architecturale de la rénovation | 5 | jours | 5 | jours | 3 000 | € | |
| | 008 | Configuration de la rénovation | 2 | jours | 2 | jours | 1 200 | € | |
| | 009 | Devis et planning finaux | 10 | jours | 10 | jours | 6 000 | € | |
| | 010 | Constitution du dossier administratif | 5 | jours | 5 | jours | 3 000 | € | |
| | 011 | Planification du chantier | 1 | jours | 1 | jours | 600 | € | |
| Activités de réalisation | Activités de fabrication 10x | 101 | Approvisionnements | 20 | jours | 20 | jours | 12 000 | € |
| | | 102 | Fabrication des panneaux (pour façades et balcons) | 1 100 | m2 | 11 | jours | 165 000 | € |
| | Activités de transport 20x | 201 | Transport des produits | 400 | km | 1 | jours | 1 200 | € |
| | | Activités de préparation des bâtiments 30x | 301 | Transport et installation du gros matériel de pose (grues, nacelles, échafaudages, tractopelles...) | 5 | jours | 5 | jours | 10 000 |
| | 302 | | Traitement des raccordements du bâtiment | 5 | unités | 5 | jours | 5 000 | € |
| | 303 | | Préparation des abords (découpe du sol béton...) | 5 | m3 | 5 | jours | 5 000 | € |
| | 304 | | Préparation des façades (démontage des antennes, eaux pluviales...) | 10 | unités | 10 | jours | 10 000 | € |
| | 305 | | Préparation des balcons (si conservés tels quels : démontage des garde-corps) | 0 | m | 0 | jours | 0 | € |
| | 306 | | Préparation des balcons (si transformés en loggias : démontage des garde-corps) | 40 | m | 2 | jours | 4 000 | € |
| | 307 | | Préparation des balcons (si supprimés et rapportés) | 0 | m | 0 | jours | 0 | € |
| | 308 | | Préparation de la toiture (si toiture-terrasse) | 0 | m2 | 0 | jours | 0 | € |
| | Activités de traitement des façades 40x | 401 | Réalisation des fondations | 30 | m | 5 | jours | 28 800 | € |
| | | 402 | Pose de l'ossature sur les fondations | 0 | m | 0 | jours | 0 | € |
| | | 403 | Pose des fixations sur les façades | 1 000 | m2 | 5 | jours | 14 333 | € |
| 404 | | Pose de l'ossature sur les façades | 0 | m | 0 | jours | 0 | € | |

| | | | | | | | | | |
|--------------------|--|-----|--|-------|--------|----|-------|---------|---------|
| | | 405 | Isolation des façades | 1 000 | m2 | 10 | jours | 30 000 | € |
| | | 406 | Traitement des balcons (si conservés tels quels : remontage des garde-corps) | 0 | m | 0 | jours | 0 | € |
| | | 407 | Traitement des balcons (si transformés en loggias) | 100 | m2 | 10 | jours | 3 000 | € |
| | | 408 | Traitement des balcons (si supprimés et rapportés) | 0 | m | 0 | jours | 0 | € |
| | Activités de traitement des toitures 50x | 501 | Pose de l'ossature sur la toiture (si toiture-terrasse) | 0 | m | 0 | jours | 0 | € |
| | | 502 | Isolation de la toiture (si toiture-terrasse) | 0 | m2 | 0 | jours | 0 | € |
| | | 503 | Isolation de la toiture en sarking (si combles aménagés) | 0 | m2 | 0 | jours | 0 | € |
| | | 504 | Isolation de la toiture en soufflage (si combles perdus) | 625 | m2 | 4 | jours | 12 500 | € |
| | Activités de pose des équipements 60x | 601 | Pose des équipements | 15 | logts | 75 | jours | 169 500 | € |
| | Activités de finition 70x | 701 | Réalisation des finitions intérieures (menuiseries...) | 15 | unités | 15 | jours | 12 000 | € |
| | | 702 | Réalisation des finitions extérieures (gouttières...) | 15 | unités | 15 | jours | 15 000 | € |
| | | 703 | Remise en état des abords | 100 | m2 | 5 | jours | 5 000 | € |
| | | 704 | Désinstallation et transport du gros matériel de pose (grues, nacelles, échafaudages, tractopelles...) | 5 | jours | 5 | jours | 10 000 | € |
| | | 705 | Évacuation des déchets banals | 500 | t | 5 | jours | 5 000 | € |
| | | 706 | Évacuation des déchets spéciaux | 100 | t | 2 | jours | 25 000 | € |
| | | 707 | Visite de chantier (point d'arrêt) | 1 | unités | 1 | jours | 600 | € |
| | TOTAL | | | | | | 251 | jours | 581 933 |
| Total par logement | | | | | | 17 | jours | 38 796 | € |

| | |
|----------------|-------------|
| <i>Légende</i> | Données |
| | Calculs |
| | Hypothèses |
| | À compléter |

Proposition d'un processus et d'outils pour industrialiser la rénovation énergétique des bâtiments

La France s'est engagée à diviser par quatre ses émissions de gaz à effet de serre entre 1990 et 2050. Cela impose une réduction considérable de la consommation d'énergie des bâtiments. En particulier, il faut réaliser des travaux de rénovation énergétique dans 500 000 logements par an. Actuellement, les rénovations sont réalisées de manière artisanale. La plupart des travaux sont effectués manuellement sur chantier avec une qualité de la mise en œuvre souvent insuffisante. Les délais sont rarement respectés et les coûts dérivent au cours du projet. Pour résoudre ces problèmes, ce travail de recherche propose d'industrialiser la rénovation. D'un point de vue technique, l'industrialisation consiste à concevoir et mettre en œuvre des solutions constructives qui s'adaptent à chaque bâtiment et assurent la maîtrise de la qualité. D'un point de vue organisationnel, elle vise à définir un processus de rénovation complet ainsi que les acteurs, outils et méthodes associés.

Cette thèse présente à la fois le produit (système constructif) et le processus d'industrialisation. Le système constructif est basé sur des panneaux multifonctionnels de grandes dimensions qui sont préfabriqués en usine et fixés sur les façades extérieures des bâtiments. Il réduit fortement le temps de mise en œuvre sur chantier, mais il impose de connaître précisément la géométrie des façades existantes. Pour cela, une technique de relevé tridimensionnel sans contact peut être utilisée pour créer rapidement une maquette numérique des bâtiments existants. Celle-ci servira pour les études énergétiques, structurelles, et architecturales et pour la configuration. Ensuite, un configurateur est proposé pour aider l'utilisateur à choisir les options des panneaux et réaliser leur calepinage (choix de leurs dimensions et positionnement sur les façades). Il permet d'éditer la gamme de montage des panneaux et un devis précis. D'autre part, un outil d'estimation est proposé pour établir les devis et planning initiaux d'après les études préliminaires. Cet outil sera alimenté par le retour d'expérience du configurateur. Enfin, un outil d'optimisation est présenté pour planifier le chantier en fonction du plan de charge des fabricants de panneaux et des ressources nécessaires pour la mise en œuvre. La fonction objectif peut comporter plusieurs critères, dont la minimisation de la durée du chantier, des stocks et de la durée de location des engins de levage.

bâtiment, rénovation énergétique, industrialisation, processus, modélisation, planification

Proposal of a process and tools to industrialize the energetic renovation of buildings

Divide by four its greenhouse gas emissions between 1990 and 2050 is one of the France's commitments. A significant reduction in the energy consumption of buildings is therefore required. In particular, 500,000 dwellings per year must be energetically renovated. Currently, renovations are carried out with traditional methods. Most of the work is done manually on-site, often with a poor implementation quality. The deadlines are rarely met and the costs deviate during the project. To solve these problems, this research work puts forward to industrialize the renovation. From a technical point of view, industrialization consists in designing and implementing constructive solutions, which suit each building and ensure quality control. From an organizational point of view, it consists in defining a complete renovation process as well as the associated actors, tools and methods.

This thesis presents both the product (construction system) and the industrialisation process. The construction system is based on large multifunctional panels that are prefabricated and fixed outside the buildings' façades. It greatly reduces the on-site implementation time. However, a precise geometry of the existing façades is needed. To do so, a three-dimensional remote survey can be used to create quickly the building information modelling of the existing buildings. This one will be used for the energetic, structural and architectural studies and for the configuration. Then, a configurator is proposed to assist the user to choose the panel options and to make their layout plan (determination of their dimensions and position on the façades). It edits the panels' assembly plan and an accurate quotation. Besides, an estimation tool is proposed to provide the initial estimate and work schedule based on the preliminary studies. This tool will be supplied with the configurator's feedback. Finally, an optimization tool is presented to plan the renovation works according to the workload schedule of the panel's manufacturers and the implementation resources. The objective function can have several criteria, including the minimization of the works duration, the stock and the duration of the lifting equipments rental.

building, energetic renovation, industrialization, process, modelling, planning