

Université de Montréal

**Analyse comparative de systèmes de construction
industrialisés et leur applicabilité à une habitation
multifamiliale verticale pour la classe moyenne à Recife
(Brésil)**

Par

Matheus Campêlo Nogueira

Faculté des études supérieures et postdoctorales

Mémoire présenté à la Faculté des études supérieures et postdoctorales
en vue de l'obtention du grade de Maître en sciences appliquées en aménagement M. Sc. A.
option Aménagement.

Août 2016

© Matheus Campêlo Nogueira, 2016

Résumé

Depuis le début du XXe siècle, les architectes et ingénieurs anticipaient et idéalisait l'industrialisation des bâtiments afin que les pièces des édifices puissent être conçues dans une usine de montage pour procéder ensuite à leur assemblage sur les chantiers. À l'heure actuelle, grâce à des chercheurs dédiés, cette industrialisation s'est concrétisée et de nombreux systèmes de construction industrialisés existent dans le monde entier, adaptés à des environnements particuliers. Dans ce contexte, cette étude a pour but d'analyser comparativement plusieurs systèmes à l'aide de certains critères d'évaluation, et de sélectionner, deux systèmes préfabriqués les mieux adaptés aux habitations multifamiliales verticales destinées à une population de classe moyenne aisée de la ville de Recife, au Brésil. La méthodologie s'inspire de l'approche systémique, utilisée par White (1970) et Richard (2002), les deux se caractérisant par une démarche évaluative. Ainsi avons-nous choisi comme étant les plus appropriés, parce que répondant bien au cadre général de Recife, le système préusiné en panneaux DESCON ainsi que celui de poutres et colonnes, commercialisé par les entreprises T&A et PDI, les deux en béton.

Mots-clés : approche systémique, architecture, construction, Brésil, habitation multifamiliale, industrialisation, *Open Building*, Recife, système constructif industrialisé.

Abstract

Since the early twentieth century, architects and engineers anticipated and idealized the industrialization of buildings where its parts could be produced in the factory and proceeding to their assembly on site. At present, thanks to dedicated researchers, this industrialization is a reality and many context specific industrialized building systems exist worldwide. This study aims to analyse and compare a few systems, using specific assessment criteria in order to select two of the most appropriate prefabricated systems for vertical multifamily dwellings aiming Recife's high middle class in Brazil. This study is based on the systemic research from White (1970) and from Richard (2002) who both use an evaluation approach. As a result, both the DESCON panel system and the post and beam one marketed by T&A and PDI companies, both in concrete, were selected as the most appropriate since they responded well to the context of Recife.

Keywords : Architecture, construction, Brazil, industrialisation, industrialized building system, industrialisation, multifamily housing, Open Buildings, Recife, systemic approach.

Table des matières

INTRODUCTION.....	1
CHAPITRE I.....	3
1.1. Les objectifs et la question de recherche.....	3
1.2. La méthodologie.....	4
CHAPITRE II : LE CONTEXTE DE RECIFE.....	7
2.1. Le contexte socio-économique et géographique	7
2.2. L'architecture au Brésil et à Recife	9
2.3. Le marché immobilier et ses tendances à Recife	14
2.4. Les exigences de la construction pour les usagers	18
2.5. Classifications générales pour les habitations.....	26
2.6. Tableau des critères fonctionnels de l'habitation à Recife	28
CHAPITRE III : LA CONSTRUCTION	30
3.1. La construction conventionnelle au Brésil et à Recife.....	30
3.2. Les ressources disponibles à Recife.....	31
3.2.1. Les matériaux	31
3.2.2. La main-d'œuvre.....	37
3.2.3. Les outils	37
3.3. La construction industrialisée	38
3.3.1. Cadre général de l'industrialisation des bâtiments	38
3.3.2. L'industrialisation des bâtiments au Brésil et à Recife.....	40
3.3.3. Les avantages de l'industrialisation des bâtiments	45
3.3.4. Le concept <i>OPEN BUILDING</i>	46
3.3.5. Les systèmes de construction industrialisés	47
3.3.6. Les sous-systèmes de construction et leurs critères de rendement à Recife.....	50
3.3.7. Tableau de ressources applicables aux systèmes industrialisés à Recife	54
3.4. Plan d'un étage type (schéma générique)	55
CHAPITRE IV : LES OPTIONS DE SYSTÈMES DE CONSTRUCTION USINÉS.....	59

4.1. Le tableau d'options de systèmes constructifs.....	59
4.2. Sélection des systèmes industrialisés les plus pertinents	67
4.2.1. Systèmes non pertinents	68
4.2.2. Systèmes intéressants	70
4.2.3. Systèmes pertinents	71
4.3. Sélection et analyse des deux systèmes industrialisés les plus pertinents	72
CHAPITRE V : L'APPLICATION DE DEUX SYSTÈMES DE CONSTRUCTION	
RETENUS À UN PROJET PRÉCIS.....	74
5.1. Application de chaque option au plan d'étage.....	74
5.2. Sélection et description des options les plus pertinentes	80
CONCLUSION	93
BIBLIOGRAPHIE.....	97

Liste des Figures

Figure 1 : Carte de l'État de Pernambuco où est située la ville de Recife.....	7
Figure 2 : Carte géographique de Recife.	7
Figure 3 : Les municipalités de la RMR	8
Figure 4 : Maquette de la ville de la Coupe	9
Figure 5 : L'édifice du MES à Rio de Janeiro	
Figure 6 : L'édifice de l'ABI à Rio de Janeiro.....	12
Figure 7 : Édifice Barão de Rio Branco, à Recife. (1969). Architecte Delfim Amorim;	
Figure 8 : Édifice Villa Mariana, (1976). Architecte Wandenkolk Tinoco;	
Figure 9 : Édifice Principe de Vivar, décennie de 1970. Architecte Alexandre Castro e Silva.	13
Figure 10 : Le cadre bâti de la zone sud de Recife	16
Figure 11 : Distribution de la direction du vent en (%) à Recife durant l'année.....	22
Figure 12 : Le projet original du Marché de Grenelle, en France qui a inspiré celui de São José à Recife;	
Figure 13 : Le Marché de São José à Recife après l'adaptation de Vauthier aux conditions climatiques locales.	41
Figure 14 : Panneaux porteurs en béton de l'entreprise Pedreira de Freitas;	
Figure 15 : Faculté <i>Universo</i> à Recife en poutres et colonnes en béton par l'entreprise T&A.	44
Figure 16 : Module 3D de l'entreprise Siscobras.	44
Figure 17 : Détail du plancher surélevé du bâtiment NEXT 21;	
Figure 18 : Coupe dans le logement du NEXT 21	47
Figure 19 : Plans d'étage montrant les possibilités de changements d'un même logement dans le bâtiment NEXT 21	47
Figure 20 : Palette de systèmes constructifs	48
Figure 21 : Schéma générique pour le plan d'étage	57
Figure 22: Détail 01. Les services dans la zone servante	58
Figure 23 : Exemple de la clinique d'Eich, Luxembourg par l'Arcelor Mittal.....	61
Figure 24 : L'entreprise T&A.....	61
Figure 25 : Système Broad Group.	61
Figure 26: Exemple de l'entreprise Weckenmann.	62
Figure 27: Exemple de la Housing Authority, à Hong Kong.	62
Figure 28: Système Descon.	62
Figure 29 : Exemple de l'entreprise Gypsum.....	63
Figure 30 : Système TVP au Danemark.	63
Figure 31: Système Componoform, E.U.A.....	63

Figure 32 : Système Triedro, Italy.	64
Figure 33 : Prototype Shelley, É.-U.	64
Figure 34 : Entreprise Oldcastle, É.-U.	65
Figure 35 : Entreprise YORKON, UK.	65
Figure 36 : Entreprise Vision Modular	65
Figure 37 : Système Richardesing.	66
Figure 38 : Système MAH-LeMessurier.	66
Figure 39 : L'entreprise Verbus.	66
Figure 40 : Système Tilt-up.	67
Figure 41 : Système Outinord.	67
Figure 42 : Plan d'étage appliqué au système de poutres et colonnes.	75
Figure 43 : Coupes AA et BB appliquées au système de poutres et colonnes.	76
Figure 44 : Plan d'étage appliqué au système DESCON.	78
Figure 45 : Coupes AA et BB appliquées au système DESCON.	79
Figure 46 : Perspective sous le bâtiment en poutres et colonnes.	82
Figure 47 : Perspective plongeante sur le bâtiment en poutres et colonnes.	83
Figure 48 : Perspective de la zone servante du bâtiment en poutre et colonne.	85
Figure 49 : Perspective de la zone servie du bâtiment en poutre et colonne.	86
Figure 50 : Perspective plongeante sur le bâtiment en panneaux DESCON.	88
Figure 51 : Perspective au-dessous du bâtiment en panneaux DESCON.	89
Figure 52 : Perspective de la zone servante du bâtiment en panneaux DESCON.	91
Figure 53 : Perspective de la zone servie du bâtiment en panneaux DESCON.	92

Liste des tableaux

Tableau 1 : La classification des classes sociales au Brésil en 2012 avec le salaire minimum de 2016	15
Tableau 2 : Tableau de sous-division de la norme ABNT NBR 15575-1(2013).	18
Tableau 3 : Tableau des exigences constructives.	19
Tableau 4 : Les meubles et les équipements selon les activités du logement.	24
Tableau 5 : La durée de vie du projet.	25
Tableau 6 : Tableau des critères fonctionnels de l'habitation à Recife.	29
Tableau 7 : Tableau de ressources applicables aux systèmes industrialisés à Recife... ..	55
Tableau 8 : Le tableau d'options de systèmes constructifs	61

Liste des sigles

ABI : *Associação Brasileira de Imprensa* (Association brésilienne de la Presse).

ABCP : *Associação Brasileira de Cimento Portland* (Association brésilienne de ciment Portland)

ABCIC : *Associação Brasileira de Construção industrializada de Concreto* (Association brésilienne de la construction industrialisée en béton)

ABNT NBR : *Associação Brasileira de Normas Técnicas Normas Brasileiras* (Association brésilienne des normes techniques brésiennes)

BNH : *Banco Nacional da Habitação* (Banque nationale de l'habitation)

BIM : *Building Information Modeling*

CBCA : *Centro Brasileiro da Construção em Aço* (Centre brésilien de la construction en acier)

CIB : *Council International du Bâtiment* (International Council for Research and Innovation in Building and Construction)

CCEB : *Critério de Classificação Econômica do Brasil* (Critère de classification économique du Brésil)

CTRS : *Centro de Tecnologia da Rede Sarah* (Centre de technologie du réseau Sarah)

FGV : *Fundação Getúlio Vargas* (Fondation Getúlio Vargas)

GFRC : *Glass Fiber Reinforced Concrete*

IBGE : *Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística* (Institut brésilien de géographie et de statistique)

MES : *Ministério da Educação e Saúde* (Ministère de l'Éducation et de la Santé)

PE : Abréviature de l'État de Pernambuco

PIB : *Produit Intérieur Brut*

RMR : *Région métropolitaine de Recife*

SAR : *Stichting Architecten Research* (*Foundation of Architectural Research*)

SCSD : *School Construction Systems Development*

SINDUSCON : *Sindicato da Industria da Construção Civil* (Syndicat de l'industrie de la construction civile de Pernambuco)

*À ma famille et mes amis,
dont les prières ont contribué
à enrichir l'avenir*

« Évidemment, il ne s'agit pas de traiter tous les bâtiments comme des produits préusinés et industrialisés, mais bien de faire profiter la construction des avantages de l'usine et de l'industrialisation. Il s'agit d'offrir en architecture l'équivalent de ce que le "prêt-à-porter" est à la "haute couture". L'un n'empêche pas l'autre : il y aura toujours plusieurs projets dont la nature ou les objectifs ne conviennent pas aux systèmes constructifs préusinés et industrialisés » (Richard, 2011, p. 8).

Remerciements

Tout d'abord, j'aimerais remercier mon directeur, Roger-Bruno Richard, pour sa patience, son enthousiasme et surtout, pour avoir été un ami toujours présent, prêt à partager ses compétences.

Ensuite, je voudrais remercier mon épouse, Rachel Cruz de Menezes, qui m'a encouragé, dès le début, à chercher de nouveaux enseignements pour enrichir ma carrière professionnelle et ma vie personnelle. Je tiens également à remercier mes fils Gael Menezes Nogueira et au deuxième garçon qui arrive bientôt. Les deux sont toujours mes sources d'inspiration.

Enfin, je voudrais également remercier ma mère Norma Campêlo Nogueira, mon père José Luz Nogueira Filho, mon frère Fernando Campêlo Nogueira, ma belle-sœur Edilana Sá Ribeiro Campêlo, ma belle-mère Maria do Rosario Cruz de Menezes, mon beau-père Savio Guerra de Menezes et mes belles-sœurs Ruth Cruz de Menezes et Sophia Cruz de Menezes pour leur soutien moral et affectif, de même que mes amis Carmen Lucia, Luciana Raposo, Roberto Salomão, Emanuelle Pontes, Patricia Hammes, João Vitor Iumatti, Caroline Crocci, Lara Teixeira, Mikola Mialuqq, Fábio Aquino, Mélanie Coccinelle, Lucas Urtiga, Manon Durand, Emeline Chaste, Odette Grille et à Juan Torres pour leur soutien moral et technique.

Introduction

Le Brésil, le plus grand état de l'Amérique latine, est un pays compétitif sur de nombreux aspects. En effet, il encourage notamment le développement de nouvelles technologies et influence un grand nombre d'autres pays de l'Amérique du Sud. À l'heure actuelle, plusieurs démarches politiques sont en cours afin d'améliorer les conditions économiques, sociales et culturelles de la population brésilienne. Un des résultats de cette volonté gouvernementale qui s'observe déjà est l'augmentation du pouvoir d'achat de la classe moyenne au cours des dernières années dans les grandes villes du Brésil.

Recife, l'une des principales villes du Brésil, a vu son économie évoluer positivement au cours des dernières décennies. Trois facteurs sont responsables de l'évolution économique : (I) l'extension du port de Suape et son complexe qui sert de point d'entrée et de sortie de plusieurs produits brésiliens vers le reste du monde, (II) l'installation de la raffinerie de pétrole à Abreu e Lima et (III) la Coupe du Monde de Soccer qui a eu lieu au Brésil en 2014 dont São Lourenço da Mata a été une des villes choisies pour accueillir quelques jeux. Ces événements ont amené beaucoup d'investissement, tant au niveau national que régional.

Dans la Région métropolitaine de Recife (RMR), une nouvelle ville appelée « ville de coupe » a émergé pour servir d'appui aux visiteurs et après les jeux offrira une nouvelle aire d'habitation à la population de Recife. Un nouveau plan d'urbanisme a été élaboré pour encourager les nouveaux investisseurs à habiter près du lieu de travail, de même que près d'autres services tels que les centres commerciaux, les hôpitaux ou les écoles.

Malgré le fait que le Brésil maîtrise quelques systèmes de construction industrialisée, possède plusieurs types de machinerie, une main-d'œuvre de plus en plus spécialisée et toute sorte de matériaux pour concevoir un bâtiment à grande hauteur, il est essentiel d'identifier

deux systèmes de construction industrialisés les plus pertinents pour les nouvelles habitations multifamiliales verticales visant la classe moyenne aisée à Recife.

La démarche adoptée pour sélectionner les deux systèmes usinés pertinents est présentée dans ce mémoire en cinq chapitres :

- Le premier chapitre aborde les objectifs généraux et décrit l'approche méthodologique utilisée ;
- Le deuxième chapitre explore le contexte de Recife, dont ses aspects socio-économiques, son héritage architectural, l'information sur son marché immobilier et ses tendances constructives et architectoniques ainsi que les besoins des usagers ;
- Le troisième chapitre porte sur la construction conventionnelle, les ressources disponibles pour la construction, la construction industrialisée dans le monde ainsi que son acceptation au Brésil ;
- Le quatrième chapitre propose un tableau d'exemples de systèmes de construction disponibles dans le monde en incluant leurs aspects techniques. Le but est de les analyser et les grouper en tant que non-pertinents, intéressants ou pertinents en suivant sept critères ;
- Finalement, dans le cinquième chapitre, les deux systèmes usinés les plus pertinents sont retenus pour l'application à un plan d'étage schématique proposé pour savoir si les deux sont applicables aux habitations multifamiliales verticales de 20 étages destinés à la classe moyenne de Recife.

La mise en œuvre des deux systèmes de construction usinés pourrait encourager la construction civile de Recife à percevoir les avantages de l'industrialisation des bâtiments.

Chapitre I

1.1. Les objectifs et la question de recherche

L'objectif général de cette recherche est de déterminer, à partir de l'analyse comparative de plusieurs systèmes de construction industrialisés, quels sont ceux qui s'appliquent le mieux à l'habitation multifamiliale verticale destinée à la classe moyenne aisée à Recife en prenant en compte les critères fonctionnels et les ressources disponibles tels que la main-d'œuvre, les matériaux et les machineries dans cette ville. Les objectifs spécifiques sont :

1. connaître le contexte socio-économique et architectural de Recife ;
2. explorer le marché immobilier de Recife et ses tendances pour mieux comprendre les besoins des usagers locaux ;
3. appliquer l'approche systémique de White (1970) et celle de Richard (2002)
4. montrer les avantages pour les entrepreneurs et les usagers d'une construction industrialisée ;
5. proposer un plan schématique d'habitation pour un public ciblé ;
6. intégrer des caractéristiques spécifiques des systèmes de construction préfabriqués à l'architecture de Recife ;
7. stimuler la recherche de nouvelles technologies de matériaux et de procédés pour la construction industrialisée d'habitation.

La démarche adoptée dans le présent travail vise à répondre à la question suivante : quels sont les systèmes de construction industrialisés les plus pertinents pouvant s'appliquer aux habitations multifamiliales verticales à Recife, Brésil ?

1.2. La méthodologie

La méthodologie adoptée s'appuie sur deux approches : la première, citée par White (1970), est une approche systémique basée sur un processus de rétroaction. D'après White, il est nécessaire de connaître le type de construction qui sera développé, les sous-systèmes de construction de même que leurs devis de rendement et finalement, les usagers et leurs besoins.

La deuxième approche, développée par Richard (2002), vise à identifier, parmi les ressources disponibles (matériaux, outils et main-d'œuvre), les systèmes de construction pertinent dans un cadre donné.

Les deux approches impliquent six étapes :

- développer un premier tableau résumé appelé « tableau de critères fonctionnels pour l'habitation à Recife » ;
- développer un deuxième tableau résumé appelé « tableau des ressources disponibles aux systèmes industrialisés à Recife » ;
- analyser l'information compilée à l'aide des deux tableaux précédents pour faire ressortir des éléments pertinents afin de proposer un plan d'étage ;
- élaborer un plan d'étage type (schéma générique) ;
- générer un troisième tableau contenant l'information technique sur plusieurs systèmes industrialisés dans le monde par rapport aux deux tableaux cités ci-dessus. Appliquer sept critères d'évaluation pour classer les systèmes en tant que non-pertinents, intéressants ou pertinents, en tenant compte de la disponibilité de ressources, de l'adaptabilité selon le concept *Open Building*, de la maximisation de la production en usine, de l'intégration de l'ignifugation, de la portée, de la quantité d'étages et de l'intégration de sous-systèmes (autres que la charpente) aux systèmes de construction tels que l'enveloppe, le cloisonnement, les services et autres ;
- appliquer les deux systèmes de construction les plus pertinents au plan d'étage proposé pour déterminer si les deux sont applicables à Recife.

La collecte des données est basée sur des ouvrages disponibles tels que livres, articles, revues, périodiques, lois et normes techniques, journaux, ainsi que sur des sites Internet. En effet, l'Internet a fortement enrichi cette recherche, car il contient des renseignements actuels.

Nous avons commencé par constituer un premier tableau de synthèse appelé « tableau de critères fonctionnels pour l'habitation à Recife » (chapitre II). Le tableau a été nourri par les renseignements classés selon :

1. une revue de documentation sur le contexte de Recife afin d'identifier les facteurs socio-économiques et géographiques par rapport au Brésil et au reste du monde ;
2. l'histoire de l'architecture brésilienne afin d'identifier des caractéristiques pertinentes sur la conception des logements et des bâtiments passés et présents ;
3. les exigences et les besoins des usagers ainsi que les devis de rendement (ABNT NBR 15.575, 2013) ;
4. des informations sur le marché immobilier et ses tendances à venir.

Par la suite, nous effectuons un survol de la construction au Brésil et à Recife (chapitre III) en deux temps. Premièrement, nous avons produit un tableau de synthèse appelé « tableau des ressources disponibles aux systèmes industrialisés à Recife ». Cette étape est divisée en 4 points principaux :

1. une revue de documentation sur la construction conventionnelle est abordée en expliquant les techniques de construction utilisées à présent ;
2. les ressources disponibles tels que : les matériaux, les outils et les types de main-d'œuvre car d'après Richard (2002), à partir de ces résultats, il est plus facile d'identifier les ressources qui peuvent servir de base pour concevoir un bâtiment industrialisé ;
3. une revue de documentation sur la construction industrialisée en général de même que sur l'histoire et l'évolution de la préfabrication des édifices au Brésil et à Recife ;
4. une application concernant les sous-systèmes et les systèmes de construction tout comme le concept *Open Building* préconisé par Habraken (1999) en ajoutant les avantages de concevoir un édifice préusiné (Richard, 2010).

Par la suite, nous avons proposé un plan d'étage type. Celui-ci constitue un schéma générique en vue de vérifier la pertinence du/des systèmes à évaluer au Chapitre V. Ce plan d'étage a été conçu sur la base des renseignements obtenus et présentés dans les chapitres précédents.

Le chapitre IV présente un troisième tableau appelé « tableau d'options de systèmes de construction industrialisés disponibles de par le monde ». Les deux premiers tableaux ont servi de guide afin de choisir des systèmes constructifs à partir d'une revue de documentation. Ensuite, une évaluation basée sur sept critères a été effectuée pour mieux distinguer les systèmes constructifs retenus. Les sept critères d'évaluation ont été adoptés en tenant compte de la disponibilité de ressources, l'adaptabilité d'avenir selon le concept *Open Building*, la maximisation de la production en usine, l'intégration de l'ignifugation, la portée, la hauteur et l'intégration de sous-systèmes tels que l'enveloppe, le cloisonnement, les services. Après cette étape, une analyse a été élaborée afin de distinguer les systèmes constructifs non-pertinents, intéressants ou pertinents, de façon à retenir les deux meilleurs systèmes pour Recife (i.e., les plus pertinents). Il est d'une importance majeure que tous les systèmes considérés permettent d'intégrer des caractéristiques spécifiques à l'architecture brésilienne, plus particulièrement à celle de Recife.

Enfin, le chapitre V présente la recommandation des systèmes de construction les plus appropriés. Tout d'abord, le plan d'étage proposé à la fin du chapitre III a été appliqué à chacune des deux options les plus pertinentes retenues, et ce afin de vérifier leur adéquation en termes de critères fonctionnels et de ressources disponibles à Recife.

Chapitre II : Le contexte de Recife

2.1. Le contexte socio-économique et géographique

Recife, la capitale de l'état du Pernambuco, possède une superficie d'environ 218 km². Son climat, à la fois chaud et humide, est de type équatorial. Les températures moyennes fluctuent entre 20 °C et 30 °C, en janvier et février. Deux saisons sont bien définies : une longue saison de pluie entre les mois de mars et d'août et une saison de soleil bien marquée entre les mois de septembre et février (*Observatório das Metrópoles*, 2006).

Recife est située à l'est de la région de Pernambouco au nord-est du Brésil (figure 1). Cette région est bordée au sud par l'état de la Bahia et de l'Alagoas, au nord par l'état de la Paraíba et Ceará, à l'ouest par l'état du Piauí et à l'est par l'océan Atlantique (figure 2).

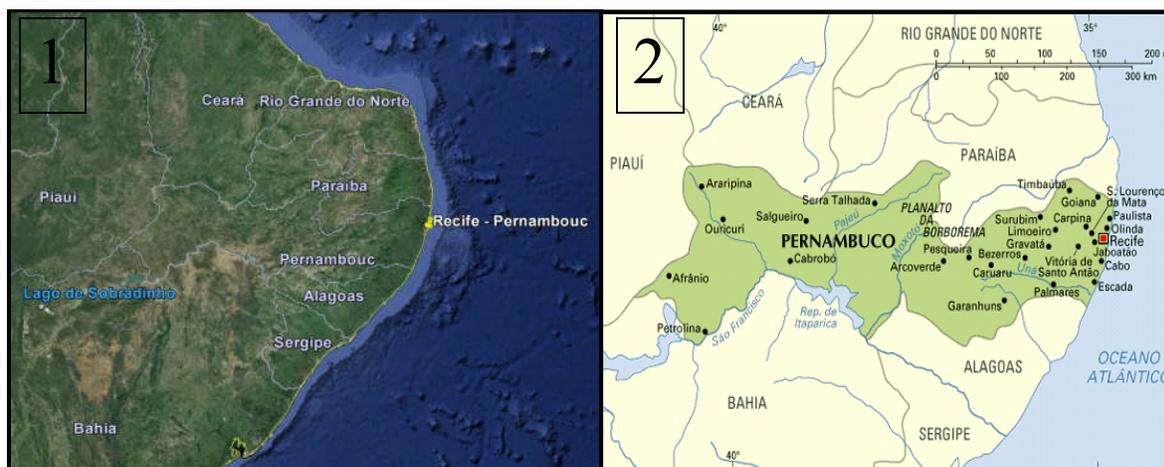


Figure 1 : Carte de l'État de Pernambuco où est située la ville de Recife. (Source : <http://goo.gl/f4TVm1>)

Figure 2 : Carte géographique de Recife. (Source : Google Earth)

Selon les dernières données de L'Institut brésilien de géographie et de statistiques (IBGE) de 2010, sur le site Web brésilien (<http://cidades.ibge.gov.br/xtras/perfil.php?codmun=261160>), qui contient, entre autres, des données sur les aspects économiques et sociaux, Recife est la neuvième agglomération urbaine du Brésil avec plus d'un million et demi d'habitants et une densité de population d'environ sept milles hab/km². Elle occupe également la vingtième position des villes du Brésil ayant le plus grand PIB.

En 1951, l'urbaniste Antônio Baltar a défini la ville de Recife comme une municipalité centrale de la région en raison de son intégration socio-économique et culturelle avec les autres municipalités voisines. Cependant, le 8 juin 1973, la Région métropolitaine du Recife (RMR) a été réellement constituée. Selon le site Web de l'IBGE (2010), la RMR est la cinquième région métropolitaine la plus peuplée du pays avec plus de 3,6 millions d'habitants. Cette région est divisée en 14 municipalités telles qu'énumérées sur la figure 3 (*Observatório das Metrôpoles*, 2006).

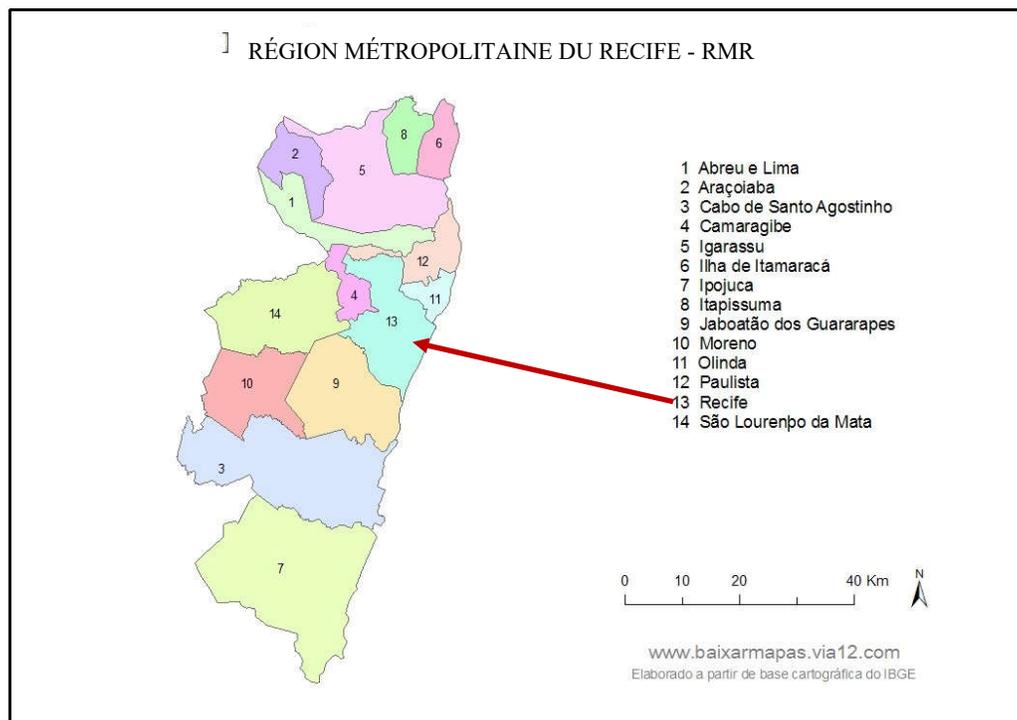


Figure 3 : Les municipalités de la RMR. (Source : www.baixamapas.com)

L'intense activité commerciale a favorisé l'émergence de plusieurs types d'industries dans la RMR tels que : des cimenteries, des métallurgies, des sidérurgies. Ces industries sont situées dans les municipalités de Recife, Paulista, Cabo de Santo Agostinho et Jaboatão dos Guararapes. Parmi ces industries, il existe plusieurs projets de grande envergure : (I) le complexe portuaire de Recife et de Suape où plusieurs entreprises mondiales ont déjà commencé à s'installer, (II) le chantier naval à Suape (Oliveira, 2013) et (III) la raffinerie de pétrole à Abreu e Lima (Siham, 2013).

D'après Souza et al. (2012), le dernier facteur qui participe à l'économie de l'État de Pernambuco est la « ville de la Coupe », située à São Lourenço da Mata, à 29 km à l'est de Recife. Ce projet émerge lors de la construction d'un stade afin d'accueillir les touristes pour la Coupe du monde de football en 2014. Des terminus de métro, des échangeurs ainsi que des aménagements urbains ont été réalisés pour ce projet. Par la suite, le projet a évolué autour du concept « *Smart City* » dont le slogan est le suivant : « un lieu de vie, de travail, d'apprentissage et pour s'amuser » Le but était d'inviter la population provenant de différentes classes sociales de la RMR à y habiter. Plusieurs projets d'ensembles d'édifices sont en cours. En raison de cet événement, le prix des terrains entre Recife et São Lourenço da Mata ont beaucoup augmenté (figure 4).



Figure 4 : Maquette de la ville de la Coupe. (Source : <http://www.leituracritica.com/?cat=4>)

2.2. L'architecture au Brésil et à Recife

Deux types de constructions coloniales se retrouvent dans le paysage brésilien et particulièrement à Recife, et ce à cause de l'héritage de la colonisation portugaise, entre 1500 et 1822. En premier lieu, les bâtiments urbains, appelés « *sobrados* », ont plus d'un étage avec des murs mitoyens, sans reculs latéraux. Ils ont été construits sur des terrains contigus et souvent rectangulaires. Ceux de Recife sont hauts et minces, jusqu'à cinq étages. En deuxième lieu, les maisons de campagne, appelées « *casa grande* », se caractérisent par un bâtiment implanté de manière isolée sur le terrain. Ces maisons ont la particularité d'être bordées d'une

terrasse sur trois des quatre façades. Tant pour les « *sobrados* » que pour la « *casa grande* », le système de construction adopté était des poutres en bois massif parallèles entre elles avec un plancher au-dessus également en bois de 40 cm de largeur par 4 cm de hauteur en contresens, appuyé sur des murs porteurs en brique ou en pierre de ± 30 cm d'épaisseur (Montezuma, 2002).

Trois facteurs ont participé à la mise en place d'une nouvelle approche de l'architecture au Brésil au cours du XIXe siècle : (I) l'arrivée de toute la cour portugaise au Brésil en 1808, (II) l'ouverture des ports et (III) le débarquement au Brésil en 1816 de la « Mission Française ». Cette dernière était constituée de groupes de philosophes, d'enseignants, d'architectes, d'ingénieurs ainsi que d'artistes afin d'aider à la formation intellectuelle de la population coloniale, de même que pour l'aménagement urbain et l'architectonique de l'époque dont le style néo-classique était la base de l'architecture en France (Montezuma, 2002).

L'empreinte européenne dans le paysage architectural brésilien du début du XXe siècle a inquiété les intellectuels de l'époque qui ont mis de l'avant un manque d'identité brésilienne dans l'architecture nationale. Ils suggéraient le retour de l'architecture coloniale car, d'après eux, celle-ci représentait l'esprit de la race brésilienne (Mascaro, 2008). D'après Junior (2011), la célébration du centenaire de l'Indépendance du Brésil en 1922 a entraîné la mise en place d'un nouveau style architectural appelé le néocolonial, car il faisait référence à des éléments de la période coloniale tels que : les tuiles en céramique, les longs avant-toits, la séparation de la salle à manger et du salon, le plancher revêtu de parquets, les terrasses autour des façades et les grandes fenêtres et portes en bois et verre.

Le style néocolonial, d'après Mascaro (2008), du début jusqu'à la moitié du XXe siècle, confrontait deux styles au Brésil : l'éclectisme, encore vivant, et le modernisme. Ce dernier a été un style innovateur et révolutionnaire dirigé par l'architecte et urbaniste Charles-Édouard Jeanneret-Gris, plus connu sur le pseudonyme de « Le Corbusier ».

Le modernisme défendait la rationalité et la fonctionnalité en architecture. Il a profité des nouvelles technologies de l'époque telles que l'imperméabilisation du béton. Ce nouveau

style désapprouvait la décoration sur les façades. Chez Le Corbusier, le modernisme se basait sur les cinq points suivants : les pilotis, le plan libre, la façade libre, le toit-terrasse et la fenêtre en bandeau. La maison doit être traitée comme une « **machine à habiter** » pour répondre aux besoins réels de la famille traditionnelle de cette époque. La conception doit être simple, afin de satisfaire aux nécessités familiales de base, tout en offrant un confort thermique, acoustique et lumineux. Ce nouveau concept a beaucoup influencé la nouvelle façon de faire l'architecture dans le monde (Alberton, 2006).

En 1927, l'architecte Warchavchik a développé le premier projet moderniste au Brésil en concevant une maison avec ce type d'architecture à São Paulo. Par la suite, en 1930, l'architecte Lucio Costa a dessiné la maison « *Casa Fontes* », qui correspond au premier projet moderniste brésilien à Rio de Janeiro, mais ce projet n'a pas abouti (Costa, 1995, p. 84-85). Des études de Marques et Naslavsky (2011, avril) ont démontré qu'en 1934, l'architecte Luís Nunes a dessiné et exécuté le premier projet moderniste à Recife : une usine de pasteurisation de lait.

En 1936 apparaît l'édifice du ministère de l'Éducation et de la Santé (MES) à Rio de Janeiro (figure 5). Les architectes en étaient : Lucio Costa, Oscar Niemayer, Carlos Leão, Jorge Moreira, Afonso Reidy, Ernani Vasconcelos et Le Corbusier en tant que consultant (Montezuma, 2002). En 1943, ce projet a été considéré « *L'œuvre d'architecture moderne la plus importante des Amériques* » par le magazine américain *Progressive Architecture* (Cavalcante et Lago, 2005, novembre). Ensuite, en 1937, l'édifice de l'ABI, l'Association Brésilienne de la Presse (figure 6) fut conçu à Rio de Janeiro par les architectes Frères Roberto (Montezuma, 2002).



Figure 5 : L'édifice du MES à Rio de Janeiro (Source : <http://goo.gl/161ewC>)
 Figure 6 : L'édifice de l'ABI à Rio de Janeiro (Source : Montezuma, 2002)

Ces deux projets présentent des particularités modernistes adaptées à l'architecture moderniste brésilienne (Montezuma, 2002) :

- des éléments adaptés au climat brésilien ;
- du béton armé pour les appuis et les dalles en porte-à-faux ;
- une double hauteur sur pilotis ;
- des pilotis modulaires et robustes semblables aux troncs des arbres des forêts brésiennes ;
- une façade en retrait comme les maisons coloniales ;
- des façades symétriques ;
- des fenêtres continues ;
- les façades ouest où le soleil se couche sont toujours protégées par des pare-soleil ;
- les étages sans obstacles permettent de les individualiser aux besoins.

Les architectes de Recife cherchaient également une architecture plus régionale dont l'identité serait liée aux enjeux de l'adaptation au climat, ce qui s'inscrit dans la tendance de

l'École de Pernambuco, considérée comme singulière par rapport aux autres écoles au Brésil. Cette tendance a émergé entre la fin des années 1950 et le début des années 1960 (Naslavsky, 2005).

D'après Siqueira (2007), l'un des représentants de cette école est Delfim Amorim (figure 7), suivi de nombreux disciples architectes tels que Wandenkolk Tinoco (figure 8) et Alexandre Castro e Silva (figure 9) qui, au cours des années 1970 et 2000 ont utilisé des éléments qui ont fortement influencé l'architecture régionale de l'époque (Moreira et Freire, 2011; Siqueira, 2007).



Figure 7 : Édifice Barão de Rio Branco, à Recife. (1969). Architecte Delfim Amorim. (Source : [http:// goo.gl/0blnx9](http://goo.gl/0blnx9));
Figure 8 : Édifice Villa Mariana, (1976). Architecte Wandenkolk Tinoco.(Source : <http://goo.gl/LPJRIA>); Figure 9 : Édifice Príncipe de Vivar, décennie de 1970. Architecte Alexandre Castro e Silva. (Source : <http://goo.gl/VFnni7>)

Les sept éléments suivants sont présentés sur les trois figures ci-dessus :

- utilisation restreinte de la couleur et de matériaux de différentes textures (figure 7) ;
- utilisation d'éléments pour une meilleure ventilation (figures 7, 8 et 9) ;
- alternance entre le clair et le sombre provoquant le dynamisme des volumes par les loggias et les armoires sur les façades (figures 7, 8 et 9) ;

- utilisation de la végétation sur les balcons pour remplacer les jardins des maisons du rez-de-chaussée (Figures 8 et 9) ;
- mise en place de l'aire de services vers l'ouest, ne comportant pas de grandes ouvertures à cause du soleil de la fin d'après-midi (figures 7, 8 et 9) ;
- Grandes ouvertures vers les vents et le soleil de l'est (figures 7, 8 et 9) ;
- Combinaison entre le béton, la céramique apparente et la mosaïque en céramique sur les façades (Figures 7, 8 et 9).

D'après Simões et Moreira (2011), il n'existe pas d'ouvrages pertinents de documentation à mettre en lumière entre les années 1990 et 2010. Une des raisons a été le manque d'une architecture à valeur nationale et internationale telle que celle entre les années 1960 et 1980. De plus, un problème de plus en plus récurrent est l'adaptation des architectes contemporains au marché immobilier. En effet, les entreprises de construction dictent les coûts de la construction d'un bâtiment pour qu'il soit un potentiel constructif. Il est beaucoup plus rentable de commercialiser quatre appartements par étage au lieu de seulement deux. Ces contraintes économiques ont rendu difficile l'utilisation en façade de matériaux nobles, alors qu'il s'agit d'une caractéristique typique de l'architecture régionale.

2.3. Le marché immobilier et ses tendances à Recife

D'après Guimarães (2011), deux facteurs principaux ont amené la classe moyenne brésilienne à participer à la croissance de l'économie. Le premier est le grand pouvoir d'achat de celle-ci grâce à la politique d'appréciation réelle du salaire minimum et de la réduction du chômage. Cette propension a fortement amélioré le revenu familial et a augmenté la demande pour des logements. Le deuxième facteur a été l'augmentation du marché immobilier adressé à la classe « C » (la classe moyenne). Ces facteurs ont entraîné une augmentation des ventes dans toutes les villes du Brésil.

Afin de comprendre l'impact de ces facteurs sur l'économie brésilienne, il est nécessaire de prendre connaissance de la classification des différentes classes sociales au

Brésil (Tableau 1). Selon les résultats de la *Fundação Getúlio Vargas* (FGV) et des critères de classification économique du Brésil (CCEB), le salaire minimum pour 2016 était de 880 BRL (monnaie brésilienne) selon la Loi n^o 154 - A(2015), ce qui équivaut à 304,66 CAD/ mois.

Selon le tableau ci-dessous basé sur les données du IBGE¹, les classes sociales au Brésil selon l'année de 2011 sont les suivantes :

- Classe A : l'élite économique.
- Classe B : la classe supérieure.

Les Classes A et B représentaient 12 % de la population.

- Classe C : la classe moyenne. Cette classe représentait 55 % de la population. Elle est divisée en trois sous-classes : la classe moyenne à faibles revenus, entre quatre et six salaires minimums, la classe moyenne entre six et huit salaires minimums, la classe moyenne aisée entre huit et dix salaires minimums.
- Classe D : la classe populaire ; cette classe représentait 20 % de la population.
- Classe E : la classe des démunis ; cette classe représentait 13 % de la population.

Classe sociale	Salaire minimum (SM)	Revenu familial BRL (CAD)
A	Plus de 20 SM	Plus de 17,600.00 R\$ (6,093.20 \$CAN)
B	10 à 20 SM	8 800 BRL (3 046,60 CAD) à 17 600 BRL (6 093,20 CAD)
C	4 à 10 SM	3 520 BRL (1 218,64 CAD) à 8 800 BRL (3 046,60 CAD)
D	2 à 4 SM	1 760 BRL (609,32 CAD) à 3 520 BRL (1 218,64 CAD)
E	0 à 2 SM	0 à 1 760 BRL (609,32 CAD)

Tableau 1 : La classification des classes sociales au Brésil en 2012 avec le salaire minimum de 2016. (Source : FGV. Pour le convertisseur du real (monnaie brésilienne) en dollar canadien. Le 27 janvier 2016. Taux de change de 0,3462). (Source : [http : //www.banqueducanada.ca/taux/taux-de-change/convertisseur-de-devises-taux-du-jour/](http://www.banqueducanada.ca/taux/taux-de-change/convertisseur-de-devises-taux-du-jour/))

En 2009, le gouvernement fédéral du Brésil a créé un programme appelé « Ma maison, ma vie ». Ce dernier avait pour but de réduire le déficit des logements en ciblant les familles des classes C, D et E. Plusieurs emplois ont découlé de ce programme ainsi qu'une augmentation des investissements dans la construction civile nationale selon le site Web Libération (Seingier et Barros, 2012).

¹ L'information est disponible sur le portail web « Les Brasiéiros », à l'adresse suivante : <http://www.lesbrasileiros.com/points-de-reperes/classes-economiques/> (consulté le 15 juillet 2016)

D'après M. José Antônio de Lucas Simon, vice-président du *Sindicato da Construção Civil de Pernambuco* (Sinduscon/PE), la problématique de l'habitation est généralisée pour toutes les métropoles brésiliennes. Dans le cas de Recife, la troisième plus petite capitale du Brésil 80 % de son territoire est occupé par des collines, des rivières, des cultures de mangues et des irrégularités géographiques. C'est une des raisons pour lesquelles on constate une augmentation du prix final de l'habitation sur les terrains. Par conséquent, il est préférable que les entrepreneurs construisent des bâtiments verticaux, dans le sens où ils leur offrent une meilleure utilisation du terrain (Vieira, 2013).



Figure 10 : Le cadre bâti de la zone sud de Recife. (Source: <https://goo.gl/iufWx7>)

Selon l'entreprise allemande *Emporis*, Recife était la 21ème ville la plus verticale dans le monde et la 3ème du Brésil selon un classement publié en 2011². Ce dernier contient, entre autres, des nouvelles sur la verticalisation des bâtiments en Pernambuco : la ville de Recife détient 1103 bâtiments depuis 1996. Les deux types de grands bâtiments sont d'une part les immeubles de grande hauteur de 35 à 100 mètres (d'environ 11 à 31 étages), et d'autre part les gratte-ciel de plus de 100 mètres de hauteur (plus de 31 étages). Sur les 20 bâtiments les plus hauts de la ville, 19 ont été construits entre 2001 et 2010. Les bâtiments de la zone sud de Recife démontrent cette tendance (figure 10).

² Les résultats du classement sont disponibles sur la page web de Vermelho, http://www.vermelho.org.br/pe/noticia.php?id_noticia=147146&id_secao=91, consulté le 15 juillet 2016.

D'après Amorim et Loureiro (2005), un appartement de trois chambres à coucher commercialisé dans les années 1970 s'étendrait sur environ 160 m² avec : une aire commune et une aire de service, tandis que les produits récents qui sont offerts sur le marché immobilier s'étendent environ sur 80 m² en gardant les mêmes aires fonctionnelles.

D'après Lucena (2012), quelques facteurs influencent le choix final des usagers pour l'achat des logements, autant à Recife que dans ses banlieues. Par exemple :

- les appartements avec une chambre sont plus chers au m² que ceux avec trois chambres ;
- la présence d'une suite (chambre avec salle de bain) augmente le prix final au m² du logement ;
- il n'existe aucune différence entre la valeur finale de l'immeuble et le nombre d'appartements par étage, sauf dans le cas où il y a un seul appartement par étage, ce qui entraîne une forte valeur ajoutée. Les nouveaux édifices sont plus valorisés que les anciens.
- Les logements situés entre le 1er et le 3ème étage ont un prix au m² moins cher que ceux situés entre le 10ème et le 19ème étage en raison du service d'ascenseur qui augmente la valeur par m² de l'unité d'habitation de manière significative.

Une autre étude réalisée en 2012, publiée sur la page web de l'organisme brésilien Leiaja³ qui contient, entre autres, des nouvelles sur le marché immobilier à Recife et indique qu'un tiers de la population de Recife a tendance à acquérir un bien dans un immeuble neuf; plus particulièrement, la classe moyenne penche vers des appartements avec trois chambres à coucher (46,6 %), ensuite pour deux salles de bains (62,3 %) et 1 garage (70 %). Cependant, ce type d'offre, qui correspond de façon imagée à un « immeuble de rêve », existe peu sur le marché immobilier.

³ Le site web est accessible à l'adresse suivante : <http://www.leiaja.com/noticias/2012/01/28/demanda-do-mercado-imobiliario-no-recife/> , consulté le 15 juillet 2016.

Les revenus de la classe « C » de Recife sont trop faibles pour ce genre de bien. En effet, il est fréquent de rencontrer sur le marché immobilier des logements avec deux chambres à coucher, une salle de bain et un garage.

L'autre tendance, citée par Mello (2011), quant à l'avenir du marché immobilier, est le « quartier planifié » qui est d'ores et déjà d'actualité. Dans les municipalités de Recife, de Cabo de Santo Agostinho, d'Ipojuca, de Goiana et de Camaragibe et à venir la municipalité de São Lourenço da Mata, l'objectif est de construire des habitations à proximité des usages.

L'ingénieure civile Millena Souto met en lumière qu'en raison de la culture régionale et de la hausse de la violence urbaine, les usagers tendent à chercher des bâtiments verticaux multifamiliaux de ce genre. En effet, ils se sentent plus sécurisés que dans une maison. Cependant, les deux fonctionnent de la même façon à la seule différence que : quiconque habite dans une maison paye plus par m² que dans un édifice. Il est plus favorable économiquement de partager le prix final d'un bâtiment vertical multifamilial plus son terrain entre 40 familles au lieu de payer le prix d'une seule maison plus son terrain (Vieira, 2013).

2.4. Les exigences de la construction pour les usagers

La Norme de l'ABNT NBR 15575 de 2013 divise les exigences constructives pour l'habitation au Brésil et à Recife en six parties :

Sous-division de la norme ABNT NBR 15.575	Type d'exigences constructives dont il est question
l'ABNT NBR 15575-1	Généraux pour les usagers
l'ABNT NBR 15575-2	Les systèmes de structure
l'ABNT NBR 15575-3	Les systèmes de plancher
l'ABNT NBR 15575-4	Les systèmes de cloisonnement et de l'enveloppe
l'ABNT NBR 15575-5	Le système de toiture
l'ABNT NBR 15575-6	Les systèmes d'installation sanitaire

Tableau 2 : Tableau de sous-division de la norme ABNT NBR 15575-1 (2013).

Selon l'ABNT NBR 15.575-1, les exigences constructives pour les usagers sont les suivantes :

A	la stabilité structurelle	H	la salubrité
B	l'ignifugation	I	l'habitabilité
C	la sécurité d'utilisation du bâtiment	J	l'accessibilité universelle
D	l'étanchéité	K	la durabilité
E	l'isolation thermique	L	l'entretien
F	l'insonorisation	M	la convivialité environnementale
G	l'éclairage	N	l'adaptabilité

Tableau 3 : Tableau des exigences constructives (Source : ABNT NBR 15575-1 , 2013).

Les exigences constructives ci-dessous sont un résumé de l'ABNT NBR 15575 de 2013. Les points les plus pertinents seulement ont été sélectionnés.

A. La stabilité structurelle Les structures doivent être conçues, construites et assemblées de façon à répondre aux exigences de l'ABNT NBR 15575-2 (2013) :

- Ne peut pas s'effondrer ou perdre la stabilité de l'une de ses parties.
- Assurer la sécurité des utilisateurs sous l'action d'impacts, chocs, vibrations et autres comportements normaux du bâtiment, prévisibles au moment où le projet est conçu.
- Ne pas provoquer des sentiments d'insécurité aux usagers par des déformations d'éléments du bâtiment.
- Ne pas passer au-delà d'états inacceptables de rupture, d'étanchéité et de finition.
- Ne pas affecter la manœuvre normale des portes et fenêtres en mouvement.
- Suivre les dispositions de l'ABNT NBR 5629, de l'ABNT NBR 11682 et l'ABNT NBR 6122, relativement à des interactions avec le sol et avec l'environnement du bâtiment.

Selon la norme de l'ABNT NBR 8681, citée dans la norme de l'ABNT NBR 15.575-1 (2013), les calculs permettent de dimensionner correctement une structure de manière à offrir une probabilité acceptable de ne pas diminuer la stabilité structurelle.

B. L'ignifugation

Selon l'ABNT NBR 15575/2013-1 (2013), les exigences en matière de lutte contre le feu sont de protéger la vie des occupants des bâtiments et les zones à risques en cas d'incendie. Tout d'abord, il faut empêcher la propagation du feu pour réduire les dommages à l'environnement et au patrimoine. Enfin, les bâtiments doivent fournir des moyens pour maîtriser et éteindre l'incendie. Troisièmement, il est nécessaire d'offrir des conditions d'accès pour les opérations des services d'incendie.

Selon la norme de l'ABNT NBR 14432 (2001), le temps de résistance au feu pour les bâtiments multifamiliaux de hauteur supérieur à 30 m est de 120 minutes.

C. La sécurité d'utilisation du bâtiment Ne pas mettre en danger l'intégrité physique des occupants ou des piétons à proximité de la propriété.

- Minimiser le risque de chute des gens des toits, des greniers, des dalles de toit et des parties hautes du bâtiment.
- Les composants du système constructif ne doivent pas présenter des perturbations, déstabilisations, renversements ou chutes de ses parties, exposées coupées ou perforées.
- Les déformations et défauts doivent atteindre les limites spécifiées dans l'ABNT NBR 15575-2 (2013) à l'ABNT NBR 15575-6 (2013).
- Minimiser les chutes humaines en raison de perturbations avec des protections qui doivent être testées selon l'ABNT NBR 14718.
- Nécessité d'être calculé par un professionnel responsable qui prouve sa performance.
- Minimiser le risque de chute des gens en raison d'irrégularités des planchers, des escaliers et des rampes, selon l'ABNT NBR 15575-3 (2013).
- Éviter des blessures causées par la rupture de sous-systèmes ou de composants pouvant présenter des parties pointues ou causer des perforations.
- Éviter des blessures en raison du mauvais fonctionnement des composants des pièces telles que les fenêtres, les portes mobiles, les trappes et autres éléments.

- Éviter des blessures en raison de chutes de matériaux et composants de la toiture et de la façade, des bacs de lavage, des éviers et des lavabos, avec ou sans piédestal, et des composants ou murs périphériques amovibles.
- Éviter des blessures en raison d'une fuite de gaz.

D. L'étanchéité

- L'exposition à la pluie doit être prise en compte lors de la conception du bâtiment, car l'humidité accélère les mécanismes de détérioration et entraîne une perte des conditions minimales d'hygiène nécessaires pour y habiter.
- Assurer l'étanchéité de la construction face aux sources externes d'humidité.
- La tuyauterie des lavabos, des toilettes et de la douche passe entre la dalle et le plafond suspendu du voisin du dessous vers un passage vertical.
- Assurer que tout est correctement attaché pour éviter les fuites d'eau et, par conséquent, des perturbations pour les usagers.

E. L'isolation thermique

- Selon la norme de l'ABNT NBR 15575-1 (2013), Recife est classée dans la zone climatique 8 où la moyenne de températures minimales en hiver est de 18,8 °C, et la moyenne de température minimale en été est de 31,4 °C.
- Le critère de rendement pour l'isolation thermique pour l'été dans la zone 8 doit respecter le fait que la valeur maximale de la température à l'intérieur du logement doit être égale ou inférieure à la valeur maximale de la température à l'extérieur du logement.
- La ventilation et l'ombrage sont aussi responsables du rendement thermique dans le logement.
- Dans l'ABNT NBR 15575-4 (2013), le tableau 15 (p. 28) montre que les ouvertures pour la ventilation dans la zone 8 sont de 8 % de la superficie carrée de la pièce de séjour prolongé.

Selon les statistiques, 20,6 % des vents qui touchent l'aéroport de Recife au cours de l'année viennent du sud-est (figure 11).

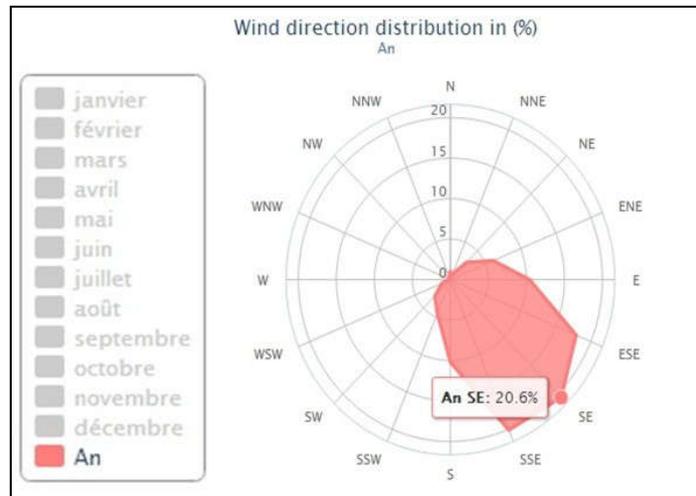


Figure 11 : Distribution de la direction du vent en (%) à Recife durant l'année.
(Source : <http://fr.windfinder.com/windstatistics/recife>)

F. L'insonorisation

Dans la norme de l'ABNT NBR 15575-4 (2013), le tableau F. 8, (p. 56), montre que la limite minimale en décibels de l'isolation sonore pour une pièce est de 35 décibels; pour comprendre aisément ce qui se passe dans une pièce adjacente, la limite est de 40 décibels; pour comprendre avec difficulté, la limite est de 45 décibels; pour ne rien entendre, la limite est de ≥ 50 décibels.

G. L'éclairage (naturel et artificiel)

- Pendant la journée, chaque pièces d'un logement devrait recevoir un éclairage naturel adéquat provenant directement de l'extérieur ou indirectement à travers des pièces adjacentes.
- Pour la nuit, le système d'éclairage artificiel doit assurer des conditions satisfaisantes pour les usagers en termes de confort et de sécurité.

Selon l'article 89 et le tableau 1 de l'annexe II de la Loi des bâtiments 16292 (1997) à Recife :

- Les pièces d'un logement, telles que les chambres à coucher, les salons et les salles à manger doivent détenir une ouverture vers l'extérieur d'au moins 0.96 m^2 référant à $1/6$ de $5,76 \text{ m}^2 =$ superficie minimale d'une pièce.

- L'éclairage et la ventilation directe de la cuisine sont représentés par $1/8 = 0,32 \text{ m}^2$ de sa superficie minimale = $2,56 \text{ m}^2$, et dans la salle de lavage l'éclairage et la ventilation directe sont représentés par $1/8 = 0,10 \text{ m}^2$ de sa superficie minimale = $0,81 \text{ m}^2$.
- Pour les salles de bain munies d'un, de deux, de trois, de quatre ou de cinq pièces sanitaires, l'éclairage et la ventilation directe doivent respecter $1/10$ de sa superficie minimale de 1 m^2 , $1,80 \text{ m}^2$, $2,55 \text{ m}^2$, $3,20 \text{ m}^2$ ou $0,80 \text{ m}^2$.

H. La salubrité

Tout d'abord, l'édifice doit présenter des conditions minimales de salubrité, de taux d'humidité et de température à l'intérieur de l'unité d'habitation. Ensuite, les matériaux, les équipements et les systèmes utilisés dans le bâtiment ne peuvent pas dégager des produits polluants l'air en milieu confiné ou provoquer des niveaux de pollution supérieurs à ceux observés à proximité, tels que les aérosols ou le dioxyde de carbone. Cependant, la vérification doit être faite selon la norme de l'ABNT NBR 15575-1 (2013).

Selon la Loi 16292 (1997), les pièces destinées à la préparation d'aliments ainsi que les pièces pour l'hygiène doivent présenter des murs intérieurs et des planchers en matériaux imperméables.

I. L'habitabilité

Selon la norme de l'ABNT NBR 15.575 (2013), la hauteur minimale de dalle à dalle d'une habitation ne peut pas être $> 2,50 \text{ m}$, sauf dans le cas de vestibules, de halls, de corridors, d'installations sanitaires (salles de bains et lavabos) et de garde-manger où la hauteur minimale du plan libre doit alors être $\geq 2,30 \text{ m}$. Les habitations doivent présenter aussi des espaces minimaux compatibles avec les besoins des usagers (comme par exemple, étudier, cuisiner ou se reposer). Il est recommandé que ces espaces puissent avoir, au minimum, des meubles et des équipements selon le tableau ci-dessous :

Activités principales/ pièces	Meubles/équipements standards
Dormir/Chambre de maître	1 lit double + 1 garde-robe + 1 table de nuit
Dormir/Chambre pour 2 personnes	2 lits simples + 1 garde-robe + 1 table de nuit + 1 bureau
Dormir/Chambre pour 1 personne	1 lit simple + 1 garde-robe + 1 table de nuit
Séjour	1 canapé à 2 ou 3 places + 1 fauteuil + 1 étagère/armoire
Cuisine	1 poêle + 1 frigo + 1 évier de cuisine + armoires supérieures et inférieures + cabinet
Salle à manger	1 table à 4 chaises
Salles de toilette	1 lavabo + 1 douche + 1 toilette NOTE : dans la salle d'eau, pas besoin d'une douche
Lavage/Séchage/Repassage	1 laveuse + 1 bac à lessive
Bureau ou salle de loisir	1 bureau + 1 chaise

Tableau 4 : Les meubles et les équipements selon les activités du logement. (Source : Adaptation et traduction du tableau F.1, page 67 de la NBR 15575-1 (2013).

J. L'accessibilité universelle

- Selon la norme de l'ABNT NBR 15575-1 (2013), les bâtiments multifamiliaux doivent offrir des dispositifs de manœuvre, de supports, de sangles et autres équipements.
- Le bâtiment doit répondre aux exigences de la norme ABNT NBR 9050 (2015) destinées aux usagers handicapés ou à mobilité réduite ainsi qu'aux personnes âgées.
- La mise en place de rampes ou d'ascenseurs sont recommandées plutôt que des escaliers.
- Les bâtiments munis de plus de sept étages doivent présenter obligatoirement deux ascenseurs (Loi 16292, 1997).
- L'escalier doit offrir une largeur minimale de 1,20 m (Loi 16292, 1997).
- Les activités journalières telles que marcher ou jouer doivent pouvoir s'effectuer sans difficultés.
- Lorsqu'il y a deux niveaux de plancher, la différence de hauteur entre ceux-ci doit être inférieure ou égale à trois mm afin d'éviter des chutes humaines.

K. La durabilité

Plus le produit est durable dans le temps, moins il y a d'exploitation des ressources naturelles et humaines. Plus faible est la consommation d'eau et d'énergie, plus faible est la quantité de polluants générés dans les usines et le transport des matières premières et des

produits. Le bâtiment et ses sous- systèmes doivent offrir une durée minimale de vie en années telle qu'indiquée dans le tableau suivant :

Sous-systèmes	Durée de vie minimale années
Structure	≥ 50 ans
Plancher	≥ 13 ans
Enveloppe	≥ 40 ans
Cloisonnement	≥ 20 ans
Toiture	≥ 20 ans
Services hydro-sanitaires	≥ 20 ans

Tableau 5 : La durée de vie du projet. (Source : Adaptation et traduction du tableau C.5, page 46 de la norme ABNT NBR 15575-1 (2013).

L. L'entretien

- Selon la norme de l'ABNT NBR 15575-1 (2013), il faut maintenir la capacité du bâtiment et de ses systèmes.
- Les interventions de maintenance prévues dans le manuel d'exploitation, d'utilisation et de la maintenance doivent être respectées.
- Il est recommandé que les projets soient créés en favorisant les conditions d'accès pour les inspections.
- La mise en place d'appuis de fixation pour des échafaudages ou d'autres véhicules est nécessaire afin de faciliter l'entretien.
- Le fournisseur est obligé de fournir les rendements de ses systèmes en conformité avec la norme ci-dessus.
- Les concepteurs doivent établir la durée de vie utile de chaque système constructif.
- Il faut préciser les matériaux, les produits et les procédés qui répondent au rendement minimal établi dans la présente norme.
- Il faut fournir les études techniques nécessaires et renseigner les différents concepteurs quant aux besoins.
- La responsabilité est celle des entrepreneurs, de leurs agents et/ou des concepteurs. Selon leurs compétences respectives, ce n'est pas seulement à l'entreprise de construction d'identifier les risques prévisibles lors de la conception du projet.
- Les usagers sont obligés de réaliser des maintenances appropriées sur les sous-systèmes selon les documents établis.

M. La convivialité environnementale

Selon la norme de l'ABNT NBR 15575-1 (2013), les entrepreneurs doivent exploiter les ressources naturelles de façon rationnelle. Il est préférable de limiter les détériorations de l'environnement et la consommation d'eau, d'énergie et de matières premières ainsi que d'utiliser des matériaux à faible impact environnemental de la phase d'extraction des ressources naturelles jusqu'à son utilisation finale.

N. L'adaptabilité

Chaque habitant évolue dans le temps et est différent de son voisin. Par exemple, les jeunes enfants, lorsqu'ils sont petits peuvent rester tous ensemble dans une même chambre à coucher, mais lorsqu'ils deviennent adolescents, chacun cherche à avoir sa propre chambre. Ainsi, l'architecture résidentielle devrait pouvoir s'adapter aux changements inévitables pour les familles sans qu'elles aient besoin de déménager (Richard, 2012).

2.5. Classifications générales pour les habitations

Les habitations peuvent être destinées à un individu ou à un groupe d'individus. En effet, pour atteindre les meilleurs objectifs dans n'importe quelle situation, il est indispensable de déterminer à quel public s'adresse l'habitation. Les critères fonctionnels ont pour but de traduire les besoins des usagers en « Indications génératrices de design ». Cette liste de critères est variable selon le contexte dans lequel ils seront implantés (Richard, 2012).

Dans un environnement résidentiel, bien qu'au Brésil, il existe quatre échelons hiérarchiques de domaines ou de territorialité de la rue au logement :

- Le **domaine public** : accessible à tous.
- Le **domaine semi-public** : l'accès est conditionné.
- Le **domaine semi-privé** : accessible sur autorisation.
- Le **domaine privé** : le logement lui-même.

À l'intérieur du logement il existe trois aires fondamentales (Richard, 2012). Ainsi, le Brésil suit la configuration suivante :

- **Aire commune ou socio-familiale** : dans laquelle se trouvent le salon, la salle à manger et le balcon ou la loggia.
- **Aire privée** : où se situent les chambres à coucher. Remarquons qu'il y a souvent une salle de bain dans la suite parentale.
- **Aire de services** : où se trouvent la cuisine, la salle de bain, le cabinet de toilette et la salle de lavage.

Au Brésil, il est possible de partager des espaces au milieu d'un groupe d'édifices ou dans une zone agréable pour la collectivité. Dans le logement, il est important d'avoir un espace où s'effectue une transition avec la nature, comme par exemple un espace séjour privé à l'extérieur du logement, par exemple un balcon face à un beau paysage. Il est conseillé d'utiliser des éléments sur le balcon ou les fenêtres, tels que des boîtes à fleurs ou des écrans, pour augmenter l'intimité visuelle.

D'après Holanda (1976), il est nécessaire de :

- fixer des pare-soleil sur les façades contre la pluie et le soleil des tropiques à Recife ;
- mettre en place des grandes ouvertures pour profiter de la double orientation de la ventilation naturelle plutôt que de recourir à des climatiseurs mécaniques ;
- installer des ouvertures flexibles en verre ou en bois au-dessus des portes internes.

L'autre critère fonctionnel, cité par Richard (2012), est la variété de typologies. Celles-ci sont divisées en sept types pour les logements (ces sortes de typologies font également partie du contexte du Brésil) :

1. **La forme libre** : l'habitation est localisée sur un terrain non-limitatif.
2. **Le plain-pied** : l'habitation se trouve sur un même niveau.
3. **La maisonnette** : l'habitation est sur deux niveaux.
4. **Le mi-niveau** : l'interaction visuelle entre deux niveaux dans l'habitation est possible.
5. **Le ciseau** : l'habitation possède une aire centrale qui est partagée entre deux habitations complémentaires sur deux niveaux.

6. **La terrasse horizontale** : l'habitation offre un endroit extérieur privé pour le séjour au même niveau que l'habitation.
7. **La terrasse verticale** : dispositif en gradin offrant une terrasse à même le toit de l'unité inférieure.

Dans plusieurs cas, la question de l'identité se confond avec la propriété privée. C'est le cas de la copropriété en forme de condominium pour les habitations multifamiliales où il faut respecter les normes légales. Une des règles à respecter est l'insonorisation. Il est nécessaire d'utiliser des matériaux d'insonorisation efficaces dans les habitations pour limiter les bruits pouvant provenir des voisins du même étage, au-dessus, au-dessous et à l'extérieur du logement.

D'après Pinho et Penna (2008), les bâtiments résidentiels au Brésil présentent : des multi-étages répétitifs, des stationnements sur les étages inférieurs, des installations et des façades plus élaborées avec, par exemple, des balcons. Certains bâtiments résidentiels ont des cloisonnements plus légers, facilitant la modulation.

2.6. Tableau des critères fonctionnels de l'habitation à Recife

Cette étape de la recherche vise à résumer le tableau des besoins des usagers à Recife. Il s'agit en premier lieu d'un ensemble de renseignements sur le marché immobilier et ses tendances, en deuxième lieu, du type d'architecture et en dernier lieu, des normes de construction selon : la ABNT NBR 15575-1 à 15575-6 (2013) et la Loi 16292 (1997).

1. Disposer d'une typologie ponctuel d'édifice multifamilial vertical de 20 étages (\pm 63 m) (Pilotis plus 19 étages types), ainsi que d'une typologie de cellule de type plain-pied.
2. Avoir la lumière naturelle dans toutes les pièces au moins 2 heures par jour.
3. Posséder une double orientation pour la ventilation des logements.
4. Offrir une zone privée munie de deux à trois chambres à coucher, d'une zone commune

avec un salon, d'une salle à manger et une loggia et d'une zone de service composée d'une salle de bain, d'une salle d'eau, d'une cuisine et d'une buanderie.
5. Avoir une zone servie (les logements) et une zone servante où se situent les services collectifs verticaux tels que l'ascenseur, la plomberie et l'escalier de secours.
6. Offrir deux ascenseurs pour les bâtiments de plus de sept étages et un escalier de secours de largeur minimale de 1,20 m selon la Loi 16292 de 1997.
7. Présenter les planchers surélevés pour le passage de la plomberie et pour éviter les fuites d'eau chez le voisin du dessous.
8. Présenter des pare-soleil ou des boîtes à fleurs sur les façades.
9. Avoir une hauteur libre minimale sous plafond de 2,50 m dans le logement.
10. Offrir une excellente insonorisation entre la zone commune et la zone privée de même qu'entre les logements.
11. Respecter les exigences constructives selon l'ABNT NBR 15575-1 (2013) telles que la stabilité structurelle, l'ignifugation, la sécurité d'utilisation du bâtiment, l'étanchéité, l'isolation thermique, l'insonorisation, l'éclairage, la salubrité, l'habitabilité, l'accessibilité universelle, la durabilité, l'entretien, la convivialité environnementale et l'adaptabilité.

Tableau 6 : Tableau des critères fonctionnels pour l'habitation à Recife (Source : Dessiné par l'auteur).

Chapitre III : LA CONSTRUCTION

3.1. La construction conventionnelle au Brésil et à Recife

D'après Medeiros (2011), la construction au Brésil demeure conventionnelle et artisanale. Or, dans un secteur de systèmes complexes, les entreprises ont besoin de suivre la capacité des concurrents à innover.

D'après Blayse et Manley (2004), les entreprises de construction demeurent conservatrices et artisanales pour quatre raisons :

1. la durabilité des structures de construction et ses composants ;
2. la préférence pour des techniques constructives testées et expérimentées ;
3. la quantité de professionnels engagés dans la prise de décisions ;
4. l'absence de programmes de qualité constructive (Campari, 2006).

Barros et Melhado (1998) ajoutent que la construction brésilienne est considérée conventionnelle en raison de la façon de lier ses composants principaux tels que les colonnes, les poutres, les dalles et les escaliers sur le chantier. Le tout est un monolithe. En voici les étapes :

1. production et préparation de moules, la plupart en bois. Les barres en acier sont commandées aux centres de distribution, puis sont transportées au chantier ;
2. préparation des armatures intérieures ;
3. les moules et les armatures sont transportées aux étages de la construction à l'aide d'une grue ;
4. coulée du béton dans des coffrages reliant tous les éléments. Il faut ensuite attendre trois jours pour le démoulage latéral des poutres et des colonnes, sept jours pour le démoulage inférieur des dalles en laissant les appuis, et vingt-et-un jours pour le démoulage total.

D'après Lino (2005), depuis 1995, la construction brésilienne a commencé une recherche de nouvelles technologies et techniques de construction. L'industrialisation était l'un de ses objectifs, en éliminant les aspects artisanaux de la production et en fonctionnant de façon industrielle. Par conséquent, certains changements de paradigmes ont été nécessaires. Le résultat a été, par exemple, l'introduction de quelques éléments tels que :

- les panneaux préfabriqués pour les façades autant en usine que sur le chantier ;
- les cloisons et enveloppes sèches cloison sèche (en *drywall*) utilisant l'acier léger galvanisé et la laine de verre entre deux plaques de plâtre remplaçant alors la brique et ciment ;
- les salles de bains préfabriquées en béton ;
- les structures en acier et béton préfabriquées telles que des dalles précontraintes, colonnes et poutres continues ;
- le béton de haute performance ;
- les puits verticaux en béton mince pour le passage de services électriques ;
- les systèmes hydrauliques flexibles et résistant autant à l'eau chaude qu'à l'eau froide.

3.2. Les ressources disponibles à Recife

L'étape suivante identifie les différents types de ressources : les matériaux et les entreprises concernées, la qualification de la main-d'œuvre et les outils pour la construction d'édifices résidentiels à Recife et dans la RMR. Le but est de savoir lesquels pourraient être adaptés à la construction industrielle de bâtiments à Recife.

3.2.1. Les matériaux

A. L'acier

D'après les études de Campari (2006), la fabrication de produits métallurgiques est directement liée à ses sidérurgies. Les matières premières pour la mise en œuvre de l'acier sont abondamment puisées à ciel ouvert, principalement dans l'État de Minas Gerais au Brésil où le

produit brut est transformé. Les produits finaux sont transportés dans tout le Brésil y compris dans la ville de Recife.

En 1963, l'*Instituto Aço Brasil* (Institut brésilien de l'acier) a été fondé. Il avait pour but de représenter les entreprises brésiliennes partout. Avoir une hauteur libre minimale sous plafond de 2,50 m dans le logement dans le monde, de défendre leurs intérêts et de promouvoir leur développement. Selon leurs renseignements, le pays possédait en 2011, 14 entreprises privées produisant de l'acier. Le groupe GERDAU en est un exemple. Il détient une succursale à Recife responsable de la transformation de la fonte brute en barres d'acier, variant entre 4,20 mm et 25 mm. Celles-ci sont utilisées dans la construction brésilienne à grande échelle. De plus, la GERDAU possède des machines spécialisées pour plier, couper et souder en usine aussi bien les barres que les armatures afin d'améliorer la vitesse des projets sur les chantiers.

B. L'aluminium

L'ALCOA est l'une des plus grandes usines de fabrication d'aluminium destiné à la construction. Les principaux éléments de sa production sont les tuiles pour les toitures des maisons et autres édifices, les plaques, les profils et le *Reynobond*. Ce dernier est un panneau composite caractérisé par deux tôles d'aluminium prélaquées et liées par fusion aux deux faces d'un noyau en polyéthylène, également disponible à Recife. L'ALCOA fournit toute sorte de profils en aluminium à plusieurs entreprises tels que la PORTICO et la VITA. Celles-ci détiennent des succursales de distribution à Recife et sont responsables de la fabrication de garde-corps et d'encadrements de portes et fenêtres.

D'après Campari (2006), jusqu'en 1955, les matériaux tels que l'aluminium et l'acier n'étaient ni connus, ni produits par le marché brésilien. Depuis, ils ont su trouver une place sur le marché. L'acier est beaucoup utilisé pour les cloisonnements, notamment avec le système de cloisons sèches (drywall). Il s'agit de cloisons à ossature métallique (acier) avec parement en plaques de plâtre

C. Le béton armé

Le Brésil maîtrise plusieurs modes de construction dont le béton armé est le plus utilisé.

D'après Campari (2006), le choix du béton dans la construction civile au détriment d'autres matériaux s'applique pour des raisons économiques. Premièrement, ses composants de base sont peu coûteux et très accessibles au Brésil (le béton étant un mélange de ciment, de granulats et d'eau). Deuxièmement, sa fabrication est facile. En effet, le béton peut être produit autant en usine que directement sur le chantier par les ouvriers et ne demande pas de qualification particulière.

Plusieurs entreprises comme la REDIMIX, la SUPERMIX, la POLIMIX et la VOTORANTIM, situés dans la RMR, fabriquent du béton. Cette dernière, particulièrement, est responsable de la fabrication autant du ciment pour la distribution aux autres entreprises que du béton de type résistant aux sulfates (RS), CP-I, CP-II, CP-III, CP-IV et à haute résistance initiale.

Le béton cellulaire est un autre matériau qui gagne de plus en plus de crédibilité sur le marché de la construction. Selon le site Web SINDUSCON/JP, une conférence du 4 avril 2015 a mis en évidence la légèreté, la capacité isolante sonore, thermique et ignifuge du matériau. Ce matériau est accessible au Brésil, plus précisément à São Paulo, Minas Gerais et à Bahia seulement sur forme de blocs de 60 x 30 x 10 cm. Il est produit par l'entreprise PUMEX, aujourd'hui sous le nom de SIPOREX. Malgré le fait qu'un bloc de béton cellulaire coûte plus cher qu'un bloc de brique traditionnel, il est tout de même 5 % moins coûteux car il exige moins de ciment pour la liaison, un délai d'exécution réduit en raison de la dimension des blocs, et diminue le coût final de la structure puisque les blocs sont plus légers. L'inconvénient est le manque de panneaux sur le marché.

D. L'argile

L'argile est trouvée dans les plus anciennes maisons de Recife depuis 1500, date de la découverte du Brésil. Une des premières techniques constructives utilisées pour les habitations

fut le mur en « *Pau-a-pique* » (torchis). Il s'agit d'une armature en bois, recouverte de part et d'autre d'un mélange d'eau, d'argile et de fibres telles que la paille : le tout formant un « béton » naturel. C'est la technique de construction qu'ont utilisée les Portugais pour les premiers édifices au début de la colonisation du Brésil. Plus tard, à partir de 1534, la pierre empilée et l'adobe ont été adoptés; ce dernier est une brique de terre crue à partir d'un mélange d'eau, d'argile et de paille hachée et séchée au soleil. Ces deux types de briques étaient assemblés à l'aide du torchis afin de construire les maisons, les édifices publics et les églises de cette époque (Montezuma, 2002).

Les avancées technologiques et la demande à grande échelle ont mené les producteurs de brique à développer différents types de produits pour la construction civile. En effet, la fabrication de ce produit demeurait toujours trop artisanale. À présent, différentes briques sont utilisées pour plusieurs types de constructions à Recife. Par exemple, à Paudalho (une des villes de la RMR), l'entreprise *CERAMICA PAUDALHO*, spécialisée dans la fabrication de la brique massive, préconise la brique à 4, 8 et 16 trous pour les parois extérieures et intérieures.

E. Le plastique

Les principaux avantages du plastique sont la résistance à la corrosion, la plasticité, la faible densité, un faible poids spécifique, la possibilité de coloration en tant que partie intégrante de la matière, la facilité d'adaptation à la production de masse et un coût relativement faible. Le plastique présente aussi quelques inconvénients : une faible résistance aux charges de traction et au choc. Il souffre d'une déformation sous les charges élevées (Lima, 2012).

Dans la construction civile à Recife trois types de plastiques sont utilisés :

- le PVC : destiné à la fabrication de conduits de plomberie et d'électricité. L'entreprise TIGRE propose une gamme de produits pour ces deux technologies. Le PVC est également utilisé pour les châssis de fenêtres et de portes vitrées. À Paulista, (une des villes de la RMR), l'entreprise TECNOFECHO est spécialisée dans ce produit (Lima, 2012).

- le POLYSTYRÈNE EXPANSÉ (EPS) : utilisé dans la construction comme isolant thermique et acoustique et également afin d'alléger le béton L'ISOPORTEC produit l'EPS à Recife (Lima, 2012).
- le POLYCARBONATE : utilisé pour les tuiles des toitures et les plaques en façade. La ZETAFLEX fait partie des entreprises à Recife qui se concentrent sur ce type de produit. Il sert aussi pour une nouvelle technologie conductrice d'électricité en forme de fils invisibles revêtus de polycarbonate, appelée PadLED, produite au Brésil par l'entreprise ELETROFITAS.

F. Le gypse

Un autre matériau très abondant dans l'État de Pernambuco est le gypse dont la matière primaire est la gypsite. Parmi les 93 % de la réserve de gypsite brésilienne, 18 % se trouvent dans la région du bassin de l'Araripe en Pernambuco où l'extraction est la plus favorable du pays. Ce matériau est beaucoup utilisé au Brésil dans la construction pour les cloisons et pour le revêtement de plafonds suspendus destinés à cacher les gaines techniques (Leitão, 2005).

Le gypse possède quelques avantages (Leitão, 2005) :

- faciliter les finitions ainsi que la décoration, grâce à sa fine texture qui accueille directement la peinture ;
- réduire la portée de certains éléments, car son poids spécifique est faible (environ 1050 kg/m³) ;
- très bonne performance du point de vue de l'isolation thermique ;
- très bon indice de résistance au feu (jusqu'à 4 heures pour les murs et les colonnes et 3 heures dans les plafonds).

Le gypse présente toutefois des inconvénients (Leitão, 2005) :

- il réagit mal à une trop forte présence d'humidité, notamment avec le ciment Portland ;
- la couche d'enduit ne peut être appliquée sur des surfaces de béton ou de mortier de ciment. C'est pourquoi il ne doit pas recevoir de peinture à base de ciment ;

- sa sensibilité à la croissance de champignons causée par le manque de ventilation et à un environnement humide. Il est donc recommandé d'utiliser une peinture perméable à l'air pour assurer l'étanchéité du revêtement de base.

L'utilisation de blocs de gypse de 50 x 70 x 7,5 cm est de plus en plus récurrente dans la construction. Ce type de bloc est destiné au cloisonnement et, de par son faible coût et sa mise en œuvre plus rapide, il remplace des blocs de brique et de ciment. Il en va de même concernant les panneaux de gypse de 60 x 60 x 3 cm, utilisés pour le revêtement de plafond.

Les panneaux de gypse destinés aux cloisons à ossature en acier, ainsi que la laine de verre destinée au cloisonnement et à l'enveloppe, prennent de plus en plus d'ampleur sur le marché de la construction civile au Brésil. Cette technologie est plus connue internationalement sous le nom de cloison sèche (*drywall*) (Leitão, 2005).

L'entreprise GYPSUM possède une succursale à Recife. Elle fait partie de l'Association Brésilienne du *Drywall*, fondée en 2000. Cette entreprise est en mesure de produire des panneaux et blocs de différentes dimensions.

G. Le bois

D'après Zenid (2009), entre 43 % et 80 % de la production de bois au Brésil vient de la région Amazônica au nord du pays. Selon les données, 75 % de cette extraction est illégale. Ce matériau est destiné au marché interne pour la construction ou la conception des meubles. Malgré cela, le bois de reboisement certifié est disponible sur le marché.

Au Brésil, le bois n'est pas utilisé de la même façon qu'en Amérique du Nord où il est la matière première des constructions de maisons et édifices (Meirelles, et al., 2007). Les raisons principales sont le coût plus élevé et la tradition de son utilisation.

Le bois brésilien a deux rôles dans la construction : en premier lieu il est utilisé pour les fenêtres, les portes, les charpentes et planchers ; en deuxième lieu, il est sollicité pour

l'élaboration des moules pour le coffrage des édifices ainsi que pour des appuis structurels et l'échafaudage (Zenid, 2009).

3.2.2. La main-d'œuvre

D'après Campari (2006, mai), le secteur de la construction au Brésil a toujours été responsable d'une grosse partie du Produit Intérieur Brut (PIB) annuel du pays. En revanche, c'est un des secteurs les moins développés du marché en termes de technologie et de main-d'œuvre spécialisée. Cela s'explique par la facilité d'engager des ouvriers semi-analphabètes sans expérience dans la construction, souvent originaires de milieux ruraux. Ce sont des gens humbles qui sont prêts à déménager vers les grandes villes à la recherche de meilleures conditions de vie. Il en résulte une baisse de rémunération.

Toutefois, selon le site Web "<http://fsindical.org.br/imprensa/recife-pe-construcao-civil-enfrenta-falta-de-mao-de-obra-em-pernambuco/>", un site Web brésilien qui contient, entre autres, des nouvelles de la construction, un article du 27 janvier 2012 évoque le manque de main-d'œuvre dans le secteur de la construction civile à Recife. L'article montre qu'en 2011, un total de 125 000 travailleurs étaient enregistrés en raison de l'émergence de plusieurs chantiers partout dans la RMR. Par ailleurs, la plupart de ces ouvriers n'avaient pas une qualification professionnelle. En effet, certaines entreprises ont déjà commencé, petit à petit, à mettre en place des formations afin de mieux adapter les ouvriers aux nouvelles conditions de travail ainsi qu'aux nouvelles techniques reliées aux matériaux issus de l'industrie. Ainsi, de plus en plus, les ouvriers sont classifiés comme semi-spécialisés et spécialisés.

3.2.3. Les outils

À Recife, des entreprises telles que *BAUSCHER BRASIL* et *SARAIVA* offrent la location de plusieurs types de machinerie lourde utiles aux transports (différents camions selon le besoin) et sur les chantiers (nombreuses grues, chariots élévateurs, etc.). Ce service de location existe notamment en raison des travaux sur le complexe de Suape.

Les entreprises comme T&A et PDI font partie des usines qui détiennent plusieurs types de machineries utiles à la fabrication d'éléments pré-usinés tels que des moules en acier réutilisables. Ceux-ci servent à la production de poutres de différentes dimensions, de colonnes, de dalles précontraintes et de panneaux. Il en va de même pour les machines à extruder le béton. Les produits finis sont ensuite transportés vers les dépôts de ces usines. En dernier lieu ces produits sont transportés vers les chantiers. La T&A produit également un autre élément fréquemment utilisé sur le chantier : le pieu en béton façonné à l'aide d'une centrifugeuse, ce qui donne un produit assez performant pour les fondations d'édifices.

La SOLOSSANTINI est une entreprise à Recife qui offre divers marteaux hydrauliques servant aux travaux de fondation. De plus, Recife dispose aussi de toute sorte d'équipements pour les fondations (profondes ou non) tels que des hélices continues

Différents types de camions sont utilisés pour le transport de charges lourdes telles que les pièces préfabriquées, mais quelques limites en termes de dimensions s'appliquent. Selon l'article 99 du Conseil national du Trafic routier, du ministère des Transports brésilien, les dimensions maximales sont les suivantes : une hauteur de 4,40 m, pour une largeur de 2,60 m avec une longueur variant entre 14 m et 19,80 m. (Loi n^o 210, 2006)

La diversité de matériaux, des outils et de la main-d'œuvre semi-spécialisée de la construction civile se montre de moins en moins artisanale et de plus en plus une réalité faisable et rentable pour l'industrialisation des bâtiments au Brésil. Il faut aborder la construction industrialisée au monde et au Brésil depuis ses débuts jusqu'au présent.

3.3. La construction industrialisée

3.3.1. Cadre général de l'industrialisation des bâtiments

L'histoire de l'industrialisation des bâtiments est liée à la révolution industrielle qui a transformé l'Europe du XIXe siècle. Plusieurs facteurs ont également contribué à ce que les

bâtiments puissent s'industrialiser comme les machineries. En 1851, le *Crystal Palace* de Londres a marqué l'ouverture des expositions universelles amenant les édifices à un niveau plus élevé. En effet, les expositions universelles ont été créées au milieu du XIXe siècle pour présenter les réalisations industrielles des différentes nations. Organisée plus ou moins tous les 4 ans, mais sans régularité imposée, elle représente la vitrine technologique et industrielle des participants. (Zirah, 2014). Les première et seconde guerres mondiales du XXe siècle ont été un autre facteur historique. Les deux ont eu les mêmes effets qui ont changé la façon dont les professionnels avaient l'habitude de voir l'architecture.

En 1918, après la fin de la première guerre mondiale, la pénurie des habitations en Europe était énorme. Alors, pour la première fois, les professionnels se sont interrogés sur la méthode à choisir afin de construire de nouveaux logements. La question de la « standardisation » des bâtiments a été mise en lumière (Habracken, 1999).

Après la fin de la seconde guerre mondiale, la question de la reconstruction des villes touchées par la guerre a été une nouvelle fois mise en lumière, plus précisément en Europe entre les années 1950 et 1970. Lors de cette période, construire plusieurs édifices (résidentiels, éducationnels, médicaux et industriels) à la fois devient nécessaire afin de remplacer ceux qui furent détruits par la guerre. Les gouvernements européens cherchaient alors des méthodes de construction plus rapides et efficaces. Les bâtiments préfabriqués furent adoptés dans le but de répondre à cette demande (Serra, Ferreira et Pigozzo, 2005).

Par conséquent, la flexibilité d'aménagement était restreinte, les volumes uniformes et monotones. De plus, à l'époque, aucune norme de rendement n'avait été mise en place concernant les matériaux ou le mandat des professionnels responsables de la conception de bâtiments. Ainsi, plusieurs pathologies ont émergé, causant l'effondrement de plusieurs édifices entre les années 1970 et 1980 et remettant en question la sécurité et la performance des préfabriqués. Ces accidents ont provoqué un rejet social de même que la nécessité d'une révision générale des préfabriqués. Les années 1980 ont été caractérisées par la démolition de plusieurs de ces édifices résidentiels (Serra, Ferreira et Pigozzo, 2005). Néanmoins, plusieurs

changements ont été mis en place afin d'assurer la qualité et la durabilité des produits fabriqués en usine.

L'industrialisation des bâtiments n'est pas synonyme de standardisation des bâtiments, mais plutôt synonyme de quantité dans le but de simplifier la production. En somme, c'est un système d'interaction structurée entre les participants et les activités reliées à un produit. Richard (2007) ajoute que dans le domaine de l'habitation, plusieurs industries se concentrent seulement sur le design, l'assemblage et la vente des bâtiments en sous-traitant avec des entreprises spécialisées dans la fabrication des composants de sous-assemblages, tout comme la distribution et l'entretien du produit. De cette façon, l'investissement initial en outillage de production est réduit de $\pm 80\%$.

3.3.2. L'industrialisation des bâtiments au Brésil et à Recife

D'après Serra, Ferreira et Pigozzo (2005), le Brésil n'a pas directement participé à la première ni à la seconde guerre mondiale. Les villes brésiliennes n'ont pas été dévastées et n'ont pas nécessité de reconstruction à grande échelle comme en Europe.

Les premiers contacts du Brésil, et plus particulièrement à Recife, avec l'industrialisation préfabriquée, sont des produits commandés à l'étranger par catalogue avant la moitié du XIX^e siècle. Ces catalogues ont ouvert les portes à ces nouveaux éléments. Le marché public de São José à Recife (figure 12), d'origine française, est un exemple d'une des premières architectures préfabriquées en fer au Brésil. Inspiré par le marché de Grenelle (figure 13), en France, il fut monté à Recife en 1875 (Montezuma, 2002).

L'ingénieur français Vauthier a adapté le projet original aux enjeux climatiques de Recife. Tout d'abord, il a diminué la quantité de fenêtres en fer et les a remplacées par des pare-soleil en verre pour la lumière naturelle, ensuite, il a changé la toiture en fer très bruyante à cause de la pluie par une toiture en céramique pour le confort thermique (Montezuma, 2002).

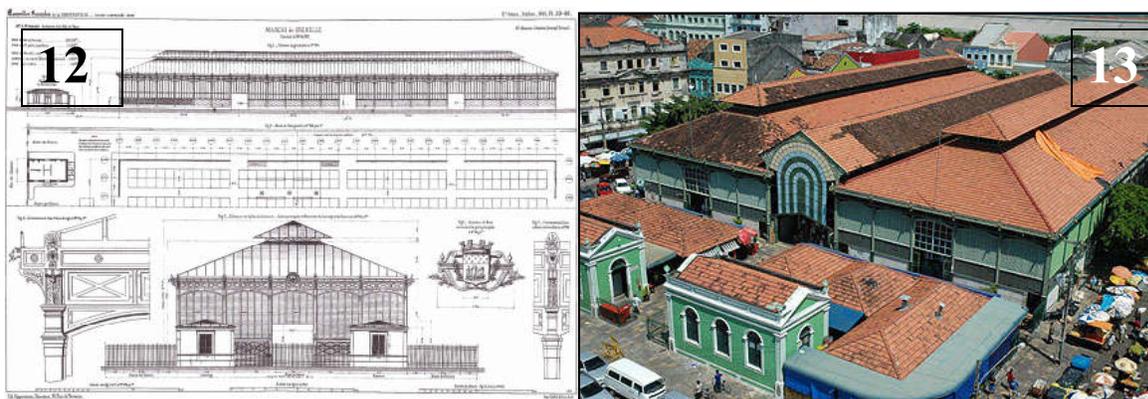


Figure 12 : Le projet original du Marché de Grenelle, en France qui a inspiré celui de São José à Recife. (Source : Montezuma, 2002); Figure 13 : Le Marché de São José à Recife après l'adaptation de Vauthier aux conditions climatiques locales. (Source : <http://goo.gl/WqA7cU>).

L'industrialisation de composants de construction a été introduite au Brésil dans les années 1920. En 1926, le premier projet préfabriqué à avoir été construit au Brésil est l'hippodrome de la Gávea à Rio de Janeiro. L'entreprise Christiani-Nielsen, du Danemark, a fourni plusieurs éléments préfabriqués en béton dont les pieux et le mur de limite du terrain. Cependant, la rationalisation et l'industrialisation de systèmes de construction a vraiment commencé à la fin des années 1950 à Rio de Janeiro. L'entreprise Mauá a été la première à construire plusieurs hangars industriels préfabriqués en béton armé *in situ*. Ils ont utilisé la technique de mettre les pièces en béton, couchées les unes sur les autres, séparées par des papiers. De cette façon, ils ont économisé du temps et de l'espace. Toutefois, la lutte contre le chômage, un facteur négatif, est arrivée dans les années 1950, ce qui a retardé le processus de l'industrialisation (Serra, Ferreira et Pigozzo, 2005).

La croissance de la population brésilienne dans les années 1950 a demandé au gouvernement une stratégie afin de contrôler la hausse du déficit de logements. En conséquence, en 1966, un projet fédéral appelé Banque Nationale de l'Habitation (BNH) a été créé pour encourager la construction et pour augmenter les offres d'emplois sur les chantiers. Le gouvernement pensait qu'il pourrait diminuer le chômage et réduire le déficit du logement. Pour cette raison, la banque a décidé de ne plus encourager la préfabrication d'éléments pour la construction, car elle demandait moins d'ouvriers et plus de main-d'œuvre qualifiée. Cette situation a duré jusqu'à la fin de années 1970 lorsque le gouvernement a commencé à voir

l'industrialisation de la construction comme une menace à l'économie. La pression des architectes, des ingénieurs et des hommes d'affaires a fini par faire changer d'opinion la BNH sur la recherche de produits préusinés (Serra, Ferreira et Pigozzo, 2005).

À partir de la fin des années 1970, la BNH a financé la recherche et la réalisation de chantiers expérimentaux à Bahia et São Paulo pour la mise en place d'édifices résidentiels abordables. Malheureusement, ce qui est arrivé en Europe, arriva au Brésil en 1980. Le manque de normes de rendement a mené à la démolition de plusieurs bâtiments à cause de pathologies telles que la corrosion de composants constructifs. Pour cette raison, l'industrialisation de la construction a été abolie entre 1980 et 1990 (Serra, Ferreira et Pigozzo, 2005).

D'après Lukiantchucki et al. (2011), la visite de l'Europe en 1963 par l'architecte João Filgueiras Lima, plus connu sous le nom de Lelé, a été un facteur qui a influencé le développement de l'industrialisation au Brésil. Il a reçu l'appui de l'Université de Brasília pour une mission qui avait pour but d'acquérir des connaissances sur les techniques constructives industrialisées contemporaines de cette époque. Lelé a adapté les technologies étrangères au Brésil. Il a inspiré plusieurs investisseurs à chercher et à amener des nouvelles technologies de construction industrialisées. Lelé, lui-même, a développé des recherches sur les matériaux, les dimensions appropriées et les modulations au-delà de la standardisation des éléments. Il a tenu compte du climat local pour adapter l'architecture à la ventilation et à la lumière naturelle. Il a également trouvé la solution pour concevoir des panneaux plus minces et légers en béton armé.

Selon les données de l'ABCP (*Associação Brasileira de Cimento Portland*) de 2005, citées dans les études de Serra, Ferreira et Pigozzo (2005), un des premiers systèmes de construction a été la mise en place par relèvement (*Tilt-up*). Il s'agit d'un système de panneaux préfabriqués en béton, conçu pour les façades et offrant la possibilité d'ajouter le revêtement et la finition sur la même pièce. C'était un système importé qui a été appliqué à partir de 1993 à São Paulo pour la construction d'édifices. À partir de 1997, d'après les études de Campari (2006, mai), le Brésil s'est envolé concernant les techniques de l'industrialisation des bâtiments.

L'*Associação Brasileira de Construção Industrializada de Concreto (ABCIC)*, a été fondé en 2001. Celle-ci avait pour but de promouvoir et d'homologuer les éléments industrialisés pour la construction. À la suite de ces études, l'utilisation des dalles précontraintes alvéolaires en béton, des poutres et des colonnes avec consoles, des boîtes monolithes telles que des salles de bains, des panneaux CCV (ciment à renfort fibre de verre), de structures mixtes utilisant l'acier pour les poutres et colonnes et du béton pour les dalles est de plus en plus fréquente sur les chantiers partout au Brésil (Serra, Ferreira et Pigozzo, 2005). Cependant, il y a des empêchements sur l'industrialisations des bâtiments au Brésil.

D'après Albuquerque et El Debs (2005), les raisons qui empêchent le développement et l'expansion des systèmes de construction industrialisés au Brésil sont :

- peu de connaissances des systèmes, de leurs possibilités et avantages chez les architectes et les ingénieurs ;
- les projets ne sont pas conçus en fonction des systèmes industrialisés tels que la modulation, le type de cloison et les services ;
- la réduction du délai pour remettre le projet qui est directement lié à l'industrialisation des bâtiments déplaît aux entrepreneurs, car la rentabilité de la construction vient de l'opération du financement de l'immeuble ;
- la main-d' œuvre non spécialisée toujours à faible coût ;
- l'utilisation encore limitée des passages verticaux pour les services d'eau et égout;
- le refus de reconnaître le fait que les composants industrialisés puissent être utilisés sur les façades, le cloisonnement et les services pour diminuer le temps d'exécution du projet ;
- le manque de coordination entre les professionnels, tout au long du projet.

À présent, les entreprises de construction manifestent de plus en plus d'intérêt pour l'industrialisation des bâtiments à Recife. L'entreprise T&A est productrice de poutres et colonnes avec consoles, de panneaux, de dalles précontraintes, de pieux, de blocs en ciment creux pour les parois et de blocs en béton massif. Un exemple est la Faculté *Universo* de 12 étages à Recife (figure 14). L'entreprise *PEDREIRA DE FREITAS* produit des panneaux

porteurs pour la façade et le cloisonnement; elle fabrique également des dalles en béton massif. Ces pièces peuvent être fabriquées sur le chantier ou à l'usine (figure 15).



Figure 14 : Panneaux porteurs en béton de l'entreprise Pedreira de Freitas. (Source : <http://goo.gl/7mravk>); Figure 15 : Faculté *Universo* à Recife en poutres et colonnes en béton par l'entreprise T&A. (Source : <http://www.tea.com.br/?cat=9etpaged=2>)

Un autre système qui gagne de plus en plus de terrain dans le domaine de la construction est celui des modules aux arrêtes en acier galvanisé de 3m x 6m avec des murs type sandwich en cloisons sèches qui peuvent aller jusqu'à quatre étages. Depuis 2009, l'entreprise Brésilienne *SISCOBRAS*, au sud du pays, fabrique ces modules (figure 16).



Figure 16 : Module 3D de l'entreprise Siscobras. (Source : <http://www.ufrgs.br/eso/content/?p=1296>)

3.3.3. Les avantages de l'industrialisation des bâtiments

Ci-dessous, quelques avantages des produits fabriqués en usine (Richard, 2010) :

- Meilleur contrôle de la qualité du produit fini.
- Protection climatique.
- Outillage précis et spécialisé (gabarits, ajustements mécaniques, etc.).
- Arrimage numérique à la modélisation des données du bâtiment BIM (*Building Information Modeling*).
- Rationalisation de la production.
- Recours à la main-d'œuvre semi-spécialisée pour un grand nombre d'opérations.
- Économie grâce à la concentration du travail en usine.
- Échéancier plus précis et diminution du temps requis pour l'ensemble du projet.
- Montage plus simple et plus rapide au chantier et diminution de l'impact sur le voisinage.
- Réduction des déchets de l'ordre de 52 % (Jaillon, Poon et Chiang, 2009).

Les avantages pour les usagers (Richard, 2010) :

- Les architectes et les ingénieurs peuvent mieux organiser leur temps en disposant d'un ensemble de détails normalisés.
- Les entrepreneurs s'appuient sur la quantité pour amortir un procédé capable de simplifier la production.
- Les constructeurs reçoivent un produit facile et rapide à assembler permettant une réduction du travail manuel, des déchets, et un contrôle de la qualité sur le chantier.
- La société reçoit une architecture plus contemporaine avec des technologies adaptables aux changements dans l'espace et le temps en recourant à des jointements mécaniques. On fait référence à cette architecture en utilisant l'expression *Open Building*. Grâce à une méthode modulaire est possible de distinguer la structure d'accueil (zone servante) des éléments détachables du logement (zone servie), ce qui permet l'adaptation du logement aux besoins des usagers.

3.3.4. Le concept *OPEN BUILDING*

Ce concept est apparu dans les années 1960. La stratégie a été développée grâce à un groupe hollandais appelé S.A.R., dirigé par le professeur Niklas John Habraken. Ils ont utilisé une méthode simple et logique pour construire en fonction des changements dans les habitations multifamiliales : distinguer la **structure d'accueil** générique appelée **SUPPORT** de l'appropriation des espaces par les occupants en recourant aux **éléments détachables** appelés **INFILL**. La structure d'accueil comprend la charpente, les services électromécaniques et les éléments collectifs permanents tels que les escaliers de secours et les ascenseurs. Les éléments détachables comprennent le cloisonnement, les équipements (cuisine, salle de bain, buanderie, etc.), la distribution de services à l'intérieur du logement et même les panneaux de façade. Habraken défendait une construction modulaire pour faciliter les changements futurs. Tramée selon un zonage fonctionnel comprenant les espaces « servis » (salon, salle à manger et chambres à coucher) en façade (zone Alpha), les espaces de service (cuisine, salle de bain, buanderie, etc.) plutôt au milieu (zone Beta) ainsi que les loggias (zone Delta) et les circulations collectives (zone Gama). Les habitations pourraient être adaptées à l'individualisation à travers l'échange de module (Habraken, 1999).

Le concept « *Open Building* » n'a pas le même nom partout dans le monde. Au Japon, on a adopté les termes « *Kikou Support* et *Infill* » ou *KSI*. Aux États-Unis il s'appelle « *Base Buildings* » et « *Fit-out* » par analogie avec les édifices à bureau. Avec ce concept, l'interaction entre l'usager et l'habitation est devenue primordiale (Habraken, 1999). L'exemple le plus pertinent pour démontrer la mise en place du concept *Open building* est le bâtiment dessiné sous la direction de l'architecte Yositika Utida, à Osaka, Japon en 1994 (Figures 17, 18 et 19). L'édifice NEXT 21, a été conçu pour offrir aux utilisateurs la possibilité d'adapter l'intérieur comme l'extérieur de leurs logements. Ce bâtiment est considéré comme le plus adaptable aux besoins individuels des usagers au monde grâce aux éléments détachables à l'intérieur pour la zone servie (figures 17 et 19). De plus, les planchers de l'aire privée et de l'aire commune sont surélevés (figure 18), permettant de distribuer les câbles électromécaniques et la plomberie dans tout l'édifice.

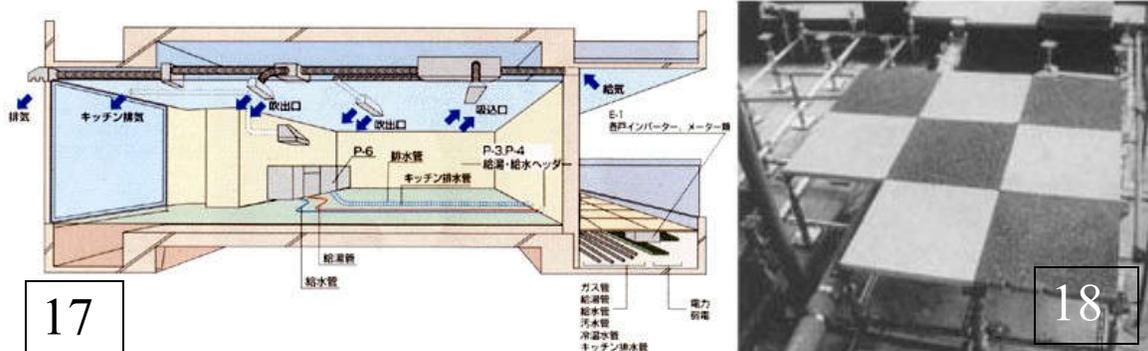


Figure 17 : Détail du plancher surélevé du bâtiment NEXT 21. (Source : http://www.mech.hku.hk/sbe/case_study/case/jap/next21/next21-as.html); Figure 18 : Coupe dans le logement du NEXT 21. (Source : <http://www.open-building.org/ob/next21.html>)



Figure 19 : Plans d'étage montrant les possibilités de changements d'un même logement dans le bâtiment NEXT 21. (Source : http://www.mech.hku.hk/sbe/case_study/case/jap/next21/next21-as.html)

L'approche *Open Building* est appliquée dans de nombreux pays par des architectes tels que Hackney, à Macclesfield au Royaume-Uni, Frans van der Welf en Hollande et Nick Wilkinson et Nabeel Hamdi à Londres. Sa promotion est notamment menée par la Commission W104 du *International Council for Research and Innovation in Building and Construction* (CIB).

3.3.5. Les systèmes de construction industrialisés

D'après Richard (2007), un système constructif est un ensemble de pièces et de règles où les détails sont réglés d'avance de façon à générer des édifices différents répondant à des programmes différents sur des sites distincts.

Richard ajoute qu'il y a neuf types de systèmes de construction industrialisés sous trois grandes catégories : le MECCANO, le VOLUME USINÉ et l'HYBRIDE. Un deuxième type est ajouté : les SOUS-SYSTÈMES OUVERTS, pour compléter les systèmes incomplets. Ensemble, ils constituent une palette de systèmes de construction par analogie à la palette de couleurs dont l'artiste se sert afin de sélectionner les couleurs appropriées à son œuvre (figure 20) (Richard, 2007).

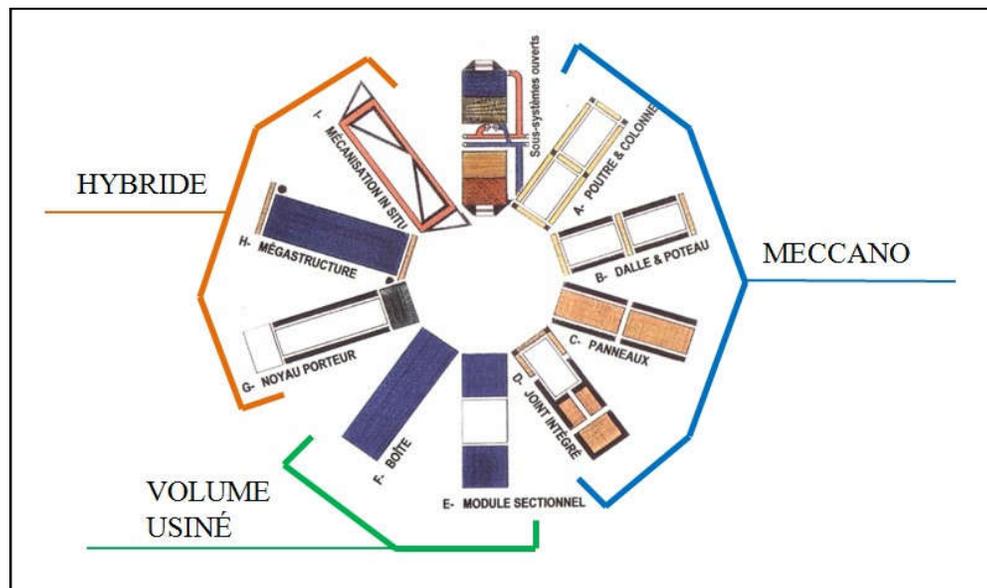


Figure 20 : Palette de systèmes constructifs (d'après Richard, 2007, adapté par nous).

- **Le MECCANO :** Les pièces sont fabriquées dans des usines spécialisées et assemblées au chantier. Il est divisé en quatre types : A : POUTRE et COLONNE, B : DALLE et POTEAU, C : PANNEAUX et D : JOINT INTÉGRÉ. Avoir une hauteur libre minimale sous plafond de 2,50 m dans le logement.
- **Le VOLUME USINÉ :** Il s'agit de modules tridimensionnels finis en usine et ne nécessitant qu'un simple raccordement sur le site. Il comprend 2 deux types : E : MODULE SECTIONNEL et F : BOÎTE.
- **L'HYBRIDE :** Les éléments sophistiqués du bâtiment sont fabriqués en usine alors que les opérations lourdes sont réalisées au chantier. Il est divisé en trois types : G : NOYAU PORTEUR, H : MÉGASTRUCTURE, et I : MÉCANISATION DU CHANTIER.

LES SOUS-SYSTÈMES OUVERTS : Ces éléments sont généralement disponibles sur le marché et servent à compléter un système constructif. Ils comprennent les sous-systèmes autres que la charpente :

J : L'ENVELOPPE :

- J.1 : Panneaux d'enveloppe légers, type mur rideau en aluminium et verre.
- J.2 : Avoir une hauteur libre minimale sous plafond de 2,50 m dans le logement :
Panneaux d'enveloppe type sandwich.

K : CLOISONNEMENT :

- K.1 : Cloisonnement fixe.
- K.2 : Cloisonnement démontable Avoir une hauteur libre minimale sous plafond de 2,50 m dans le logement.
- K.3 : Cloisonnement amovible.
- K.4 : Cloisonnement mobile.

L : ÉQUIPEMENT : (Exemple : ascenseur, escaliers, rampes etc.)

- L.1 : Équipement sectionnel.
- L.2 : Équipement déployable.
- L.3 : Avoir une hauteur libre minimale sous plafond de 2,50 m dans le logement :
Équipement intégré.

M : SERVICES :

- M.1 : Puits mécaniques verticaux capables de brancher les équipements.
- M.2 : Puits par sous-plancher surélevé qui sert à véhiculer la plomberie et le traitement d'air.

D'après Richard (2007), il n'existe pas de système constructif champion et universellement applicable. Certains systèmes sont plus pertinents et plus applicables que d'autres dans un cadre précis. La recherche d'un système de construction à Recife ne sera pas la même que pour construire un bâtiment vertical à New York.

3.3.6. Les sous-systèmes de construction et leurs critères de rendement à Recife

Dans le domaine de l'habitation, en général, cinq sous-systèmes sont nécessaires pour composer un bâtiment : la charpente (structure d'accueil), l'enveloppe (murs extérieurs et toiture), les cloisonnements (parois intérieures), les équipements (ascenseurs, escaliers, bloc de cuisine et salles des bains, etc.) et la distribution de services (électricité, plomberie, chauffage, etc.). Chaque sous-système possède une technologie particulière qui est maîtrisée par les manufacturiers spécialisés.

Selon l'ABNT NBR 15575-1 (2013), soit les normes de rendement du Brésil, les sous-systèmes sont divisés ainsi :

A : La charpente

A.1 : Le plancher

B : Les cloisonnements

C : L'enveloppe

C.1 : La toiture

D : Les services hydro-sanitaires

Chaque sous-système possède ses spécifications générales (devis de rendement⁴) dans l'ABNT NBR 15575-1, en plus de critères minimaux de performance (M) définis dans les normes de l'ABNT NBR 15575-2 à l'ABNT NBR 15575-6, tous selon la norme générale de l'ABNT NBR 15575 de 2013.

⁴ Selon le ministère des Travaux publics et des Services gouvernementaux Canada (2000), un devis correspond à une suite d'instructions qui, jointes aux plans, fournissent tous les renseignements nécessaires pour un appel d'offre, les travaux à exécuter et les matériaux à utiliser. Il existe deux grandes catégories de devis : le devis de rendement et le devis descriptif. Le devis de rendement peut se définir comme un ensemble de critères auxquels un élément de construction, un système ou une construction devront correspondre. Tandis que le devis descriptif précise tous les détails concernant les matériaux, les méthodes de mise en œuvre, la qualité de la main-d'œuvre, les éléments fonctionnels ou les systèmes à utiliser.

Les normes ont été établies en visant à atteindre les exigences constructives du Brésil concernant les habitations ainsi qu'à encourager les nouvelles technologies, indépendamment de leurs matériaux et des systèmes de construction existants.

A. La charpente

- Assurer la résistance au feu des éléments structurels de 30 minutes au minimum.
- Faciliter la sortie des occupants du bâtiment en toute sécurité.
- Permettre l'accès opérationnel de véhicules, d'équipements et des ressources humaines, mener des activités (personnes non réparties) et lutte contre l'incendie (extinction).
- Ne pas présenter des fissures supérieures à 0,6 mm sur le système constructif adopté.
- Résister à l'application d'un choc de corps dur d'une énergie de 20 J sur la face externe des éléments structurels ainsi que de 10 J sur la face interne.
- Le déplacement-limite de la structure doit être de $L/250$ (L = la portée d'élément structurel) ou $H/300$ (H =la hauteur de l'élément structurel) pour les éléments structurels tels que les poteaux, les parois, les poutres et les dalles.
- La flèche maximale pour les dalles et les poutres recevant des charges permanentes et accidentelles doit atteindre $L/400$ lorsqu'il y a ouverture et doit atteindre $L/340$ lorsqu'il n'y a pas d'ouverture.
- Résistance après l'impact de corps mou d'énergie de 720 J (joules) sur l'extérieur de la structure.

A.1. Le plancher

- Résistance à des charges verticales concentrées de $100 \text{ kg} = 1 \text{ kN}$, appliquées sur le point le plus faible.
- Le déplacement-limite pour les planchers est de $1/800$.
- La résistance après l'application d'une énergie de choc mou de 720 J sur le plancher.
- La résistance après l'application d'une énergie de choc dur de 30 J.
- Résistance au feu de 120 minutes pour les habitations.
- La flèche finale totale doit atteindre $L/320$ pour les planchers composés de revêtements rigides ainsi que de $L/280$ pour les composés de revêtement flexibles.

L'isolation acoustique des planches doit être entre :

- 66 dB et 80 logement dB : plancher général ;
- 51 dB et 55 dB : plancher de toiture accessible où il y a des espaces communs destinés aux loisirs et aux activités sportives ;
- 45dB et 49dB : planchers entre deux logements autonomes de même que pour les espaces destinés aux loisirs et les activités communes ;
- 40 dB et 44 dB : planchers séparant les logements autonomes au niveau des espaces communs à grande circulation.

B. Les cloisonnements

- Le déplacement-limite pour les charges permanentes et accidentelles des cloisons légères et des finitions flexibles, est de $L/600$; pour les parois et les finitions rigides, il est de $L/500$ ou $H/300$ et pour les parois flexibles, il est de $L/400$ ou $H/400$.

L'isolation acoustique des cloisons doit être :

- entre 40 dB et 44 dB entre les logements qui n'ont pas de chambre à coucher ;
- entre 45 dB et 49 dB entre les logements d'une chambre à coucher ;
- de 40 dB pour les cloisons des chambres à coucher, sans ouvertures sur l'extérieur entre des logements et des espaces de transit tels que des corridors et des escaliers ;
- entre 30 dB et 34 dB pour les cloisons sans ouvertures entre le salon et la cuisine ou entre un logement et les espaces communs de transit ;
- entre 45 dB et 49 dB pour les cloisons sans ouvertures entre l'habitation et les espaces communs, de loisirs et d'activités ;
- entre 40 dB et 44 dB concernant l'ensemble des cloisons et des portes de logements distincts séparés par le hall.

C. L'enveloppe

- Résistance après l'application d'un corps dur de 20 J d'énergie sur la face externe des éléments structurels de même que d'une énergie de 10 J sur la face intérieure.
- Le coefficient d'absorption des rayons du soleil (α) doit être : $\alpha \leq 0.6$.

- Résistance à l'impact d'un corps mou de 720 J d'énergie sur la face extérieure de la façade ainsi que d'une énergie de 360 J sur la face intérieure.
- L'isolation acoustique des façades et de la couverture dans un endroit de bruit intense est de $\text{dB} \leq 30$.
- Les façades des habitations de plusieurs étages restent sèches sans présence d'infiltration pour une période de 7 h.

C.1. La toiture

- Le coefficient d'absorption des rayons du soleil doit être : $\alpha \leq 0,4$ pour les toitures dans la zone 8.
- Résister à une charges verticale concentrées de $100 \text{ kg} = 1 \text{ kN}$ et appliquées sur le point le plus faible Avoir une hauteur libre minimale sous plafond de 2,50 m dans le logement.
- Résistance au feu minimale de 30 minutes.

D. Les services hydro-sanitaires

- Limite de fuite électrique vers les appareils 15 ampères.
- Les plomberies doivent résister suite à un choc de 2.5 J provoqué par un corps mou ainsi qu'un choc de 10 J provoqué par un corps dur.
- Empêcher que l'odeur provenant des égouts retournent aux pièces du logement.
- Le système de l'eau chaude et froide doit être capable de fournir une pression de l'eau adéquate à chaque point d'utilisation en tenant compte d'un usage simultané.
- Le système de l'eau des tuyaux du bâtiment ne doit pas présenter de fuite lorsqu'il est soumis, pendant 1 h., à une pression hydrostatique de 1,5 fois la valeur de la pression prévue dans le projet. Il doit être testé à des pressions inférieures à 100 kPa (kilo pascal). Le tuyau de l'eau chaude est testé avec de l'eau à 80 °Celsius de température pendant 1 heure.

3.3.7. Tableau de ressources applicables aux systèmes industrialisés à Recife

Cette dernière étape du troisième chapitre a pour but de générer un tableau dont les acquis peuvent être appliqués à des systèmes industrialisés. Ceci est un résumé des ressources disponibles à Recife.

1. Disponibilité de grues de tailles différentes pour amener les pièces aux étages correspondants.
2. Disponibilité sur le marché de Recife d'ingénieurs en structure spécialisés en béton plutôt qu'en acier.
3. Offre des usines de production de béton pour la fabrication des composants tels que les dalles, les colonnes, les poutres, les panneaux, etc.
4. Disponibilité d'usines pour couper, souder et plier les profils en acier devant recevoir un revêtement ignifuge. La fabrication des barres et des composants bruts en acier, tels que les poutres et les colonnes, viennent de l'état de Minas Gerais.
5. Les véhicules avec ou sans charge doivent avoir une hauteur de 4,40 m, une largeur de 2,60 m et une longueur variant entre 14 m et 19,80 m maximum pour le transport des pièces préfabriquées de l'usine au chantier.
6. Les dimensions maximales pour une charge sur un camion sont de 3,40 m de hauteur, 2,60 m de largeur et 19,80 m de longueur.
7. Main-d'œuvre de plus en plus semi-spécialisée plutôt que spécialisée pour la mise en place des composants industrialisés.
8. Disponibilité sur le marché de la construction de systèmes ouverts afin de s'adapter aux sous-systèmes constructifs.
9. Offre des usines capables de concevoir les composants préfabriqués en divers matériaux tels que l'acier, l'argile, le béton, le plastique, l'aluminium, le gypse et le bois.
10. Disponibilité de panneaux de béton préusinés munis de blocs en argile.

11. Disponibilité de gypse et d'acier léger comme produits économiques pour la confection des cloisons, de l'enveloppe et de la protection ignifuge.
12. Offrir un temps de conception le plus rapide possible pour le bâtiment (Richard, 2010).
13. Offrir une structure d'accueil modulaire avec la flexibilité d'adaptation des cloisons selon le concept <i>Open Building</i> .

Tableau 7 : Tableau de ressources applicables aux systèmes industrialisés à Recife. (Source : Dessiné par l'auteur)

Tant le tableau ci-dessus que celui de critères fonctionnels vont tous deux aider à concevoir un plan d'étage type pour une habitation multifamiliale verticale pour la classe moyenne aisée à Recife.

3.4. Plan d'un étage type (schéma générique)

Le plan d'étage proposé ci-dessous constitue un schéma générique en vue de vérifier la pertinence du/des systèmes à évaluer au chapitre V. Il a été conçu à partir des renseignements retenus dans le premier tableau sur les critères fonctionnels, dans le deuxième tableau sur les ressources disponibles à Recife et sur l'adaptation du concept *Open Building*, car il offre la possibilité de changements futurs aux besoins individuels des usagers grâce aux éléments détachables à l'intérieur de la zone servie.

Le schéma générique présente donc une zone servante et une zone servie :

- La **zone servante** est rectangulaire d'environ 30,22 m². Elle est munie des circulations collectives (zone Gama) un hall central conduisant à deux ascenseurs, un escalier de secours et deux passages verticaux indépendants le premier contenant la plomberie (eau, égout et sécurité incendie) et le deuxième, détenant les services de téléphone, d'antenne et d'électricité. Le but est que les services d'entretien puissent y accéder sans déranger les occupants des appartements. Cette zone peut fonctionner à la manière d'un noyau structurel central, monolithe ou pas, pour justement contreventer les efforts physiques du bâtiment (figure 21).

- La **zone servie** vise deux logements de format rectangulaire pour accueillir des variantes de 2 et 3 chambres à coucher. Chaque appartement est muni de salon, salle à manger et chambre à coucher (zone Alpha), des espaces de service tels que la cuisine, la salle de bain, la buanderie (zone Beta) ainsi que d'une loggia (zone Delta). La grandeur totale de chaque logement doit être proportionnelle au nombre de chambres à coucher. Ainsi, pour celui muni de 2 chambres (A), la zone Alpha offre une modulation de 4,50 m x 7,20 m, pour la zone Beta une modulation de 3 m x 7,20 m et pour la zone Delta la modulation est de 4,50 m x 3 m; le total est de 95,28 m². Pour l'appartement muni de 3 chambres (B), la zone Alpha offre une modulation de 5,40 m x 7,20 m; pour la zone Beta une modulation de 3 m x 7,20 m et pour la zone Delta la modulation est de 5,40 m x 3 m; le total est de 110,40 m². L'objectif principal est que chaque appartement soit capable d'être absolument distinct selon les besoins des usagers. Il est proposé également que toute la plomberie passe sous le plancher. De cette façon, ces services peuvent aller partout dans le logement sans déranger le voisin du dessous en cas de changement de plomberie (figure 21).

Chaque appartement est de typologie plain-pied pour servir tous les usagers, à mobilité réduite ou non; ils offrent la double orientation, permettant que la lumière et la ventilation naturelle rentrent dans les espaces grâce à l'abondance de fenêtres sur les deux façades. De plus, une loggia sur la façade principale ainsi qu'une jardinière autour des deux façades sont également proposées; cette dernière sert premièrement à protéger les façades des intempéries et deuxièmement à évoquer les jardins des maisons coloniales propres à l'héritage architectural de Recife. Les deux zones présentent une hauteur de 3 m de dalle à dalle, entre le plancher surélevé (0,30 m) et le plan libre (2,70 m) (figure 21).



Figure 21 : Schéma générique pour le plan d'étage. (Dessiné par l'auteur)

Les couleurs expliquent la distribution de la plomberie dans le détail qui suit, autant dans la zone servante que dans la zone servie (figure 22) :

- L'orange représente l'égout. Les tuyaux vont collecter les eaux usées de la cuisine ainsi que des salles de bain pour les envoyer sous le plancher surélevé vers le passage vertical situé dans la zone servante.
- Le bleu représente l'eau nette qui est dirigée dans les appartements sous le plancher surélevé à partir du même passage vertical dans la zone servante.
- Le violet représente le puits d'incendie.
- Les lignes jaune représentent les conduits d'électricité, antenne et téléphone qui sont dirigés dans les appartements sous le plancher surélevé.

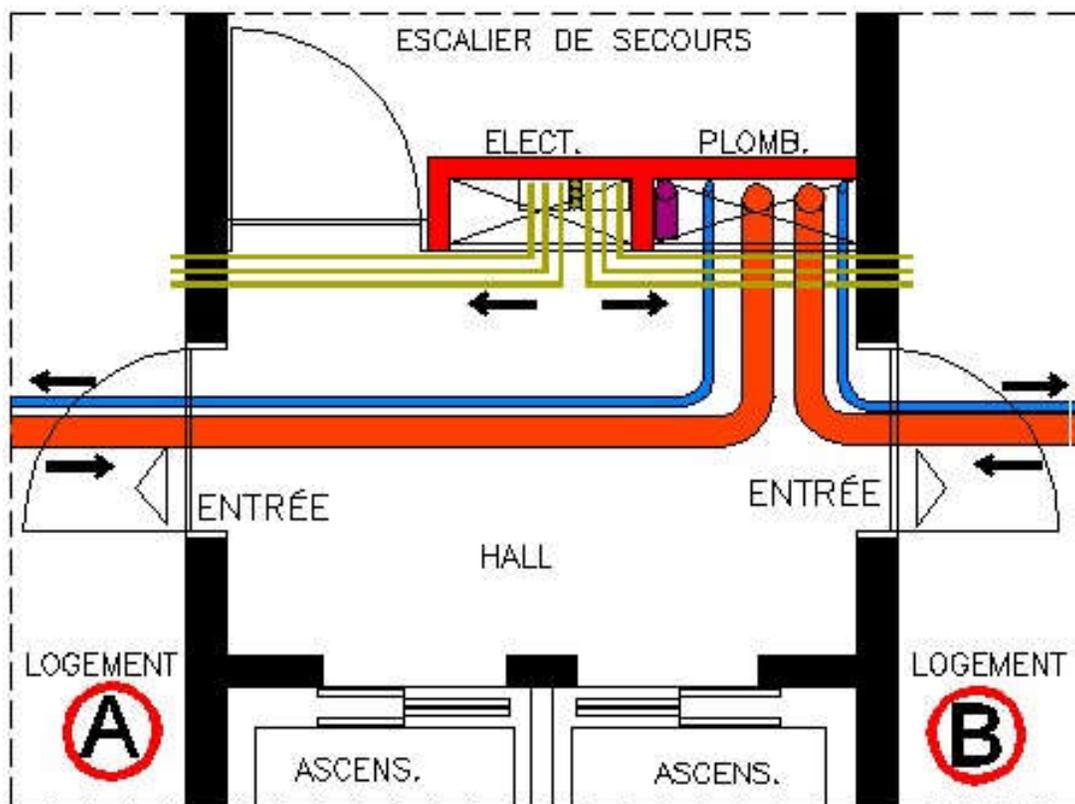


Figure 22: Détail 01. Les services dans la zone servante. (Dessiné par l'auteur)

Chapitre IV : LES OPTIONS DE SYSTÈMES DE CONSTRUCTION USINÉS

4.1. Le tableau d'options de systèmes constructifs

Le tableau 8 présente quelques technologies groupées selon les neuf types de systèmes de construction identifiés par Richard (2007) : A : poutre et colonne, B : dalle et poteau, C : panneau, D : joint intégré, E : module sectionnel, F : boîte, G : noyau porteur, H : mégastructure, I : mécanisation du chantier. Nous proposons une évaluation multicritères. Parmi plusieurs critères possibles, l'auteur en propose sept pour classifier les systèmes et déterminer ultérieurement lesquels sont non-pertinents, intéressants ou pertinents. Ils sont mesurés sur une échelle de 1 à 2 ou de 1 à 4, selon la classification suivante :

1. La disponibilité de ressources existantes à Recife pour la fabrication des composants															
<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
Non disponible				Quelques éléments disponibles				La majorité des éléments disponibles				Totalemment disponible			

2. L'adaptabilité aux changements dans les logements selon le concept <i>Open Building</i>															
<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
Non adaptable				Un peu adaptable				Très adaptable				Totalemment adaptable			

3. La maximisation de la production des composants en usine															
<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
Aucune maximisation				Faible maximisation				Maximisation presque totale				Maximisation totale			

4. L'intégration de l'ignifugation															
<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
Aucune intégration				Faible intégration				Intégration presque totale				Intégration totale			

5. La satisfaction quant à l'adaptabilité de la portée minimale (PMI) et de la portée maximale (PMA)			
PMI < 2,55 m et/ou PMI > 2,55 m PMA < 7,20 m et/ou PMA > 7,20 m PMI = 2,55 m et/ou PMA = 7,20 m Non satisfaisante		PMI ≤ 2,55 m et/ou PMI ≥ 2,55 m PMA ≤ 7,20 m et/ou PMA ≥ 7,20 m Totalement satisfaisante	

6. La satisfaction de la hauteur (quantité d'étages)			
(moins de 20 étages) Non-satisfaisante		(20 étages et plus) Totalement satisfaisante	

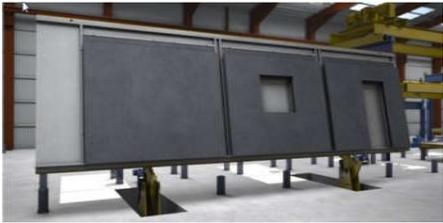
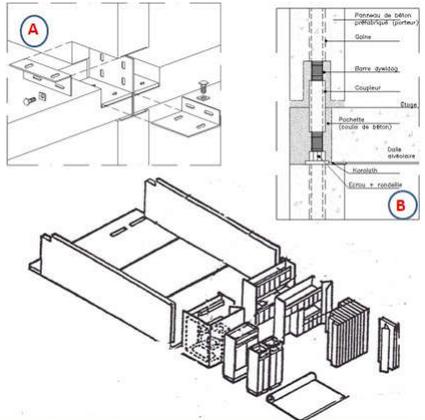
7. L'intégration de sous-systèmes autres que la charpente au système constructif							
E = Enveloppe		C = Cloisonnement		S = Services		A = Autre	
	Non intégré		Non intégré		Non intégrés		Non intégré
	Partiellement intégré		Partiellement intégré		Partiellement intégrés		Partiellement intégré
	Intégré		Intégré		Intégrés		Intégré

En dernier lieu, le but est d'analyser les systèmes de construction en appliquant ces critères, puis de les classer en tant que systèmes :

- **non pertinents** : les systèmes qui présentent moins de la moitié des critères proposés. (Deux sur sept critères classifient automatiquement le système constructif en tant que non pertinent si : la satisfaction de la portée est « non satisfaisante » et/ou la satisfaction de la hauteur est < 20 étages);
- **intéressants** : les systèmes de construction qui présentent plus de la moitié des critères;
- **pertinent** : les systèmes de construction qui satisfont la majorité ou la totalité des critères.

Tableau 8 : Le tableau d'options de systèmes constructifs. (Source : Dessiné par l'auteur)

A : POUTRE ET COLONNE		CRITÈRES				
 <p>Figure 23 : Exemple de la clinique d'Eich, Luxembourg par l'Arcelor Mittal. (Source : http://goo.gl/jEEiyU)</p>	<p>A.1 : ARCELOR MITTAL. Poutre et colonne continue en acier fabriquées en usine, ensuite boulonnées entre elles au chantier. Ce système peut recevoir plusieurs sortes de dalles en béton. Le système est limité à la charpente. Ses poutres possèdent une portée de 5 m à 8 m, pour des profondeurs entre 14 cm et 30 cm. Le système peut aller jusqu'à 30 étages ($\pm 94,50$ m).</p>	1				
		2				
		3				
		4				
		5				
		6				
		7	E	C		
	S	A				
 <p>Figure 24 : L'entreprise T&A. (Source : http://goo.gl/E02VSC)</p>	<p>A.2 : T&A et PDI. Colonne segmentée ou continue en béton. Les entreprises T&A et PDI peuvent fabriquer en usine des colonnes de plusieurs formes jusqu'à 25 m de hauteur chacune pour un bâtiment de 25 étages au maximum ($\pm 78,75$ m). Le système est muni de plusieurs consoles pour recevoir des poutres, précontraintes, jumelées ou perpendiculaires, en "L" ou en "T" inversé. Ses dalles précontraintes peuvent atteindre jusqu'à 30 m de portée. Système limité à la charpente. Cependant, l'entreprise PDI s'occupe de la fabrication des escaliers et de l'enveloppe. Source : http://www.tea.com.br/</p>	1				
		2				
		3				
		4				
		5				
		6				
		7	E	C		
	S	A				
B : DALLE ET POTEAU		CRITÈRES				
 <p>Figure 25 : Système Broad Group. (Source : http://goo.gl/Di8akr)</p>	<p>B.1 : BROAD GROUP. Dalle de type treillis et poteaux tubulaires en acier ayant une modulation de 3,90 m x 7,80 m. Tout est fabriqué en usine, puis transporté au chantier avec tous les composants pour aller jusqu'à 30 étages ($\pm 94,50$ m). À l'aide d'une grue, la dalle est transportée aux étages et ensuite boulonnée aux poteaux, le montage des services et le cloisonnement suivent. L'enveloppe est indépendante.</p>	1				
		2				
		3				
		4				
		5				
		6				
		7	E	C		
	S	A				

C : LES PANNEAUX		CRITÈRES		
<p>C.1 : PANNEAUX MONOLITHES PRÉUSINÉS EN BÉTON. Le système est conçu pour l'enveloppe et les murs entre les logements. Le tout est complété par l'extrusion du noyau central d'un bâtiment (ascenseur et escaliers). Les prédelles jusqu'à 8 m de longueur, l'enveloppe et le cloisonnement jusqu'à 14 m et le bloc d'ascenseur sont reliés ensemble avec du béton au chantier. Ce système permet qu'un bâtiment atteigne 45 étages ($\pm 141,75$ m). Intégration de l'enveloppe, la charpente, l'escalier et le cloisonnement. L'outillage est généralement produit par l'entreprise Weckenmann et peut être entièrement automatisé. Source : http://www.weckenmann.com/en.</p> <p>Exemple de <i>Hong Kong Housing Authority</i>, en Chine. Source : http://www.yaulewah.com/eng/quality_products/products.htm</p>	 <p>Figure 27: Exemple de l'entreprise Weckenmann. (Source: http://www.weckenmann.com/en)</p>  <p>Figure 26: Exemple de la Housing Authority, à Hong Kong. (Source: http://goo.gl/2WIYmh)</p>	1		
		2		
		3		
		4		
		5		
		6		
		7	E	C
	S	A		
<p>C.2 : DESCON et al. Panneaux monolithes en béton avec des dalles monolithes (A : Descon) où les joints sont par fers angles boulonnés ou avec des dalles précontraintes alvéolaires (B : Autres), assemblées par posttension à l'aide des barres <i>dywidag</i> et coupleurs. Tous les composants sont intégrés ainsi que fabriqués par différentes usines. L'édifice peut aller à 25 étages ($\pm 78,75$ m), avec 7,20 m à 10 m de portée selon le type de dalle. Exemple de l'entreprise Descon au Canada, actuellement produit par Oldcastle et Tindall aux É.-U. Source : HUD, <i>Feedback Operation Breakthrough</i>, Washington DC, 1973, p.66 à 75. et http://goo.gl/K7sm9P</p>	 <p>Figure 28: Système Descon. (Source: HUD, <i>Feedback Operation Breakthrough</i>, Washington DC, 1973, pp.66-75)</p>	1		
		2		
		3		
		4		
		5		
		6		
		7	E	C
	S	A		

C.3 : GYPSUM. Panneaux à ossature légère en acier galvanisé. Le système peut aller jusqu'à 11 m de portée maximale. Panneaux munis de revêtement sur les deux côtés en plaques de gypse et au centre en laine de fibre de verre. Ce système permet d'aller à dix étages ($\pm 31,50$ m). Les composants sont fabriqués en usine puis transportés au chantier pour le montage. Résistance au feu en fonction du revêtement extérieur. L'épaisseur du panneau peut varier entre 73 mm et 200 mm selon les besoins du projet. Intégration de la charpente, de l'enveloppe, du cloisonnement et des services. Exemple de l'entreprise GYPSUM. Source : <https://goo.gl/n8nBkY>

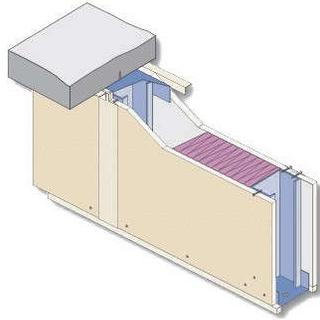


Figure 29 : Exemple de l'entreprise Gypsum. (Source: <http://goo.gl/SWHLvG>)

1				
2				
3				
4				
5				
6				
7	E	C		
	S	A		

D : LE JOINT INTÉGRÉ

CRITÈRES

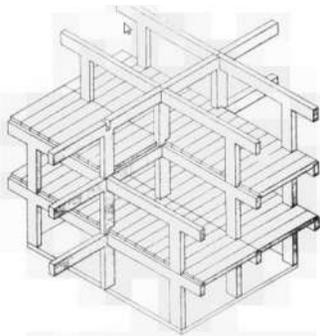


Figure 30 : Système TVP au Danemark. (Source : Eggers-

D.1 : TVP. Joint intégré à ossature de béton munie d'une modulation de 3 m. Il est composé d'un élément vertical avec deux poutres formant un « T » dont la dimension totale est de 6 m et d'un élément en forme de « V » de 3 m. La structure est entièrement fabriquée en usine et peut aller jusqu'à neuf étages (± 28 m) de hauteur. Les dalles peuvent être solides, précontraintes alvéolaires, etc. Exemple du système T.V.P., au Danemark.

1				
2				
3				
4				
5				
6				
7	E	C		
	S	A		

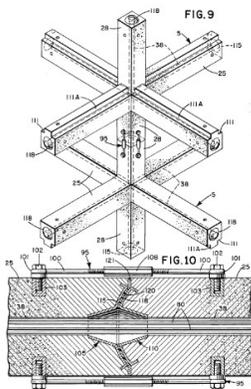


Figure 31: Système Componoform, E.U.A.

D.2 : COMONOFORM. Joint intégré à ossature de béton munie d'un connecteur en acier. Élément vertical relié à quatre poutres en forme de croix d'environ 4,87 m de longueur maximale ayant deux poutres en forme de « L » pour les coins. Les deux utilisent un élément intermédiaire au centre, soudé ou boulonné au chantier pour augmenter la portée jusqu'à 8 m. Le système peut atteindre jusqu'à 19 étages ($\pm 59,85$ m), mais est limité à la charpente. Système Componoform aux É.-U. Source : <http://www.google.com/patents/US4059931>

1				
2				
3				
4				
5				
6				
7	E	C		
	S	A		

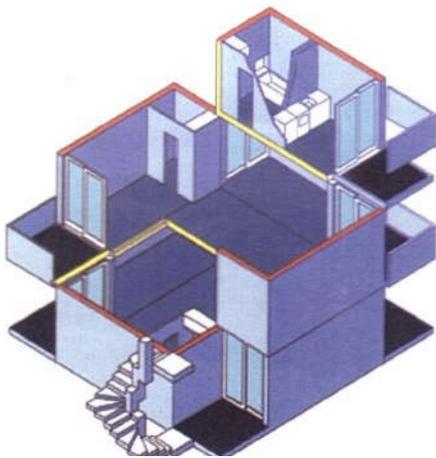


Figure 32 : Système Triedro, Italy.
(Source :<http://www.zecca.com/struttture/triedro/>)

D.3 : TRIEDRO. Joint intégré monolithe en béton armé muni de trois plans fabriqués en usine, équivalant à trois des six côtés d'une boîte : la charpente, l'enveloppe et les cloisonnements sont intégrés. Ses dimensions sont de 2,50 m de largeur x 7,75 m de longueur x 2,95 m de hauteur; possibilité d'atteindre 10 étages ($\pm 31,50$ m). Intégration de tous les sous-systèmes. Exemple du système Triedro, en Italie.

1				
2				
3				
4				
5				
6				
7	E		C	
	S		A	

E : LES MODULES SECTIONNELS

CRITÈRES

E.1 : SHELLEY. Module sectionnel en béton où les nervures porteuses sont en saillie et les jointements par empilage. Les modules peuvent atteindre de 7,62 m à 21,33 m de longueur par 3,35 m de largeur. Sont assemblés en damier, ce qui nécessite de terminer 50 % des intérieurs et de l'enveloppe de façon conventionnelle au chantier. Selon l'exemple du prototype Shelley à New Jersey, É.-U., il peut atteindre 18 étages ($\pm 56,70$ m). Source :<http://www.google.com/patents/US20140115976>

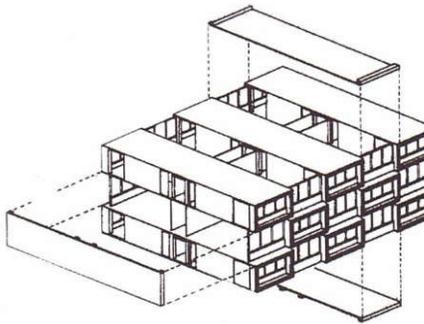
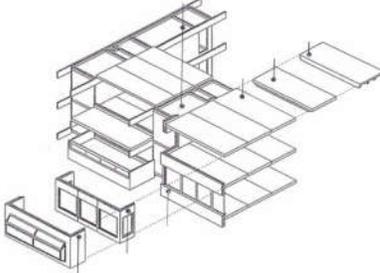
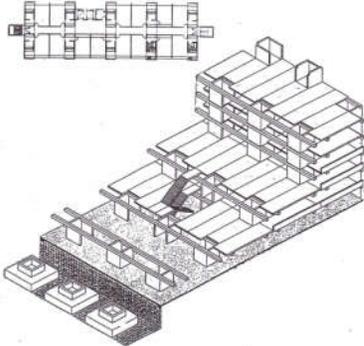


Figure 33 : Prototype Shelley, É.-U..
(Source : HUD, Feedback Operation Breakthrough, Washington DC, 1973, p. 186 à 193)

1				
2				
3				
4				
5				
6				
7	E		C	
	S		A	

F : LA BOÎTE		CRITÈRES			
 <p>Figure 34 : Entreprise Oldcastle, É.-U. (Source : http://www.oldcastleprecast.com)</p>	<p>F.1 : OLDCASTLE et TINDALL. Boîte de 4,26 x 4,26 m monolithe en béton. Les murs et le plafond sont monolithes alors que le plancher est coulé indépendamment. Ce système peut atteindre jusqu'à quatre étages ($\pm 12,60$ m). Exemple de l'entreprise Oldcastle et Tendall, aux É.-U. Source : http://www.oldcastleprecast.com/products/Documents/2008_CorrectionalFolder1.pdf</p>	1			
		2			
		3			
		4			
		5			
		6			
		7	E	C	
	S	A			
 <p>Figure 35 : Entreprise YORKON, UK. (Source : http://goo.gl/vRSkwx).</p>	<p>F.2 : YORKON. Boîte munie d'une charpente à ossature aux arrêtes en acier. Cette ossature est soudée en usine de même que le panneau du plancher et celui du plafond. Les jointements sont boulonnés entre eux au chantier. Les modules peuvent varier de 3 m à 3,75 m de largeur par 6 m à 18,75 m de longueur et par 2,5 m, 2,7 m ou 3 m de hauteur. L'empilage peut aller jusqu'à 25 étages ($\pm 78,75$ m) en fonction d'un support intermédiaire de la structure. Tous les sous-systèmes sont intégrés.</p>	1			
		2			
		3			
		4			
		5			
		6			
		7	E	C	
	S	A			
 <p>Figure 36 : Entreprise Vision Modular . (Source : http://modularengineer.blogspot.ca/)</p>	<p>F.3 : VISION MODULAR. Boîte aux arrêtes en acier avec base de 15 cm de béton. Les jointements sont boulonnés entre eux au chantier ainsi qu'à un noyau central en béton. Les modules standards peuvent varier de 3,30 m à 4,50 m de largeur par 8,70 m à 11,10 m de longueur et par 2,85 m à 3,60m de hauteur. Les murs sont composés de colonnes de 60 mm x 60 mm à chaque 600 mm. L'empilage peut aller à plus de 20 étages (± 63 m). Tous les sous-systèmes sont intégrés. Exemple de l'entreprise Vision Modular, UK. Source : http://goo.gl/zGKwDh</p>	1			
		2			
		3			
		4			
		5			
		6			
		7	E	C	
	S	A			

G : LE NOYAU PORTEUR		CRITÈRES			
<p>G.1 : RICHARDESIGN. Noyau porteur linéaire en béton. Système de boîtes concentrant tous les services et les équipements du logement et servant d'appui à des poutres et dalles jusqu'à 30 m offrant des grands espaces servis. Les noyaux sont d'habitude rectangulaires de 2,45 m par 6,05 m, mais ils peuvent varier au besoin. D'après Richard, le système permet qu'un bâtiment atteigne ± 60 étages (± 189 m) lorsque des noyaux sont perpendiculaires et en fonction du type de béton utilisé. Exemple du système constructif RICHARDESIGN, au Canada. Intégration de tous les sous-systèmes.</p>  <p>Figure 37 : Système Richardesing. (Richard, 2012).</p>	1				
	2				
	3				
	4				
	5				
	6				
	7	E	C		
	S	A			
<p>G.2 : MAH-LeMessurier. Noyau porteur ponctuel en béton mesurant 2,43 x 2,43 m. La hauteur jusqu'à 3,96 m par étage. Les poutres se rencontrent au-dessus du noyau perpendiculairement ou parallèlement à la façade pour recevoir plusieurs types de dalles jusqu'à 30 m de portée. Ce système intègre la charpente et le noyau contenant les services, les escaliers et les ascenseurs. Il permet d'aller jusqu'à dix étages (± 31,50 m) et 11,58 m de portée. Source : http://www.google.cf/patents/US3882649</p>  <p>Figure 38 : Système MAH-LeMessurier.</p>	1				
	2				
	3				
	4				
	5				
	6				
	7	E	C		
	S	A			

H : LA MÉGASTRUCTURE		CRITÈRES			
<p>H.1 : VERBUS. Mégastructure à ossature d'acier accueillant des boîtes de type conteneur de 2,43 m de largeur par 12,19 m de longueur par 3,66 m de hauteur. Les pièces structurales sont toutes fabriquées en usine, de même que les boîtes métalliques. Ensuite, celles-ci sont transportées au chantier à l'aide d'une grue qui les insère aux étages correspondants. Il s'agit d'une tablette recevant les boîtes qui peuvent aller jusqu'à 16 étages (± 50,40 m). Il faut revêtir toute la structure contre le feu. Tous les systèmes sont intégrés. Source : http://goo.gl/iQfBQD</p>  <p>Figure 39 : L'entreprise Verbus. (Source : http://goo.gl/hXEDGO)</p>	1				
	2				
	3				
	4				
	5				
	6				
	7	E	C		
	S	A			

I : LA MÉCANISATION DU CHANTIER		CRITÈRES			
<p>I.1 : TILT-UP. Usine <i>in situ</i> où le sol sert de coffrage pour les murs ou les dalles. Le système Tilt-up est limité à la charpente, au cloisonnement et à l'enveloppe. Un cloisonnement additionnel peut-être ajouté. Les panneaux sont boulonnés entre eux à l'aide de connecteurs en acier pouvant aller jusqu'à sept étages ($\pm 22,50$ m). La portée peut aller jusqu'à 30 m selon le type de dalle à utiliser. (Source : http://www.tiltup.com/)</p>  <p>Figure 40 : Système Tilt-up.</p>	1				
	2				
	3				
	4				
	5				
	6				
	7	E		C	
	S		A		
<p>I.2 : Usine <i>in situ</i> OUTNORD. Les tunnels mécanisés recourent à des moules en double « L » inversé en acier, servant de coffrage aux murs et au plancher de façon à obtenir un élément monolithe. Ensuite, les moules sont retirés par segments à l'aide de plateformes appuyées sous l'étage inférieur. Avec l'assemblage de deux moules standard, le système peut varier de 3,65 m à 6,70 m de largeur jusqu'à 12,20 m de longueur. À l'aide d'un élément intermédiaire, le système peut aller jusqu'à 7,92 m de largeur. Le bâtiment le plus haut à ce jour est de 30 étages ($\pm 94,50$ m).</p>  <p>Figure 41 : Système Outinord. (Source : http://www.outinord-americas.com/images/7.jpg)</p>	1				
	2				
	3				
	4				
	5				
	6				
	7	E		C	
	S		A		

4.2. Sélection des systèmes industrialisés les plus pertinents

Cette étape de la recherche est une évaluation basée sur le premier tableau de critères fonctionnels, le deuxième tableau de ressources disponibles à Recife et le questionnaire proposé pour les systèmes de construction industrialisés sur les tableaux d'options ci-haut. Ensuite, les systèmes constructifs sont classifiés comme étant non pertinents, avantageux ou pertinents. Une approche par élimination sera utilisée.

4.2.1. Systèmes non pertinents

À la suite de l'analyse, les systèmes de construction industrialisés non pertinents sont déterminés ci-après, en incluant la raison pour laquelle ils n'ont pas été retenus :

1. B.1 : Le système BROAD GROUP répond bien aux critères, sauf qu'il utilise l'acier pour la structure. C'est un matériau qui n'est pas facile à trouver à Recife. Il faut le commander ailleurs. De plus, il doit être revêtu pour l'ignifugation, de même qu'il comporte des membrures entre les extrémités des colonnes, ce qui empêche des rénovations futures.
2. C.3 : Le système de panneaux de l'entreprise GYPSUM. Ossature légère en acier galvanisé permettant d'aller jusqu'à dix étages, mais il faut faire attention quant aux rénovations à venir à cause de ses murs porteurs qui peuvent atteindre jusqu'à 11 m de portée. Cela dit, le système est vraiment un outil pour des cloisonnements autres que la charpente en vue de compléter un autre système.
3. D.1 : Le système TVP peut atteindre jusqu'à 28 m de hauteur, environ dix étages, mais demande des opérations de remplissage entre les logements. De plus, le système est limité à la charpente, nécessitant encore de beaucoup de travail au chantier pour le compléter.
4. D.2 : Le système COMONOFORM nécessite d'étayer et d'ajouter des opérations de remplissage entre les logements. De plus, le système est limité à la charpente. Il nécessite beaucoup de travail au chantier pour le compléter.
5. D.3 : Le système par joint intégré TRIEDRO peut aller jusqu'à dix étages. Cependant, ses composants sont très encombrants à transporter et limités pour les rénovations à venir.

6. E.1 : Le système par module sectionnel SHEELEY utilise des modules en damier lors du montage, nécessitant de compléter 50 % des intérieurs et de l'enveloppe de façon conventionnelle au chantier. De plus, la largeur des modules est bien limitée.
7. F.1 : Le système de boîte des entreprises OLDCASTLE et TINDALL utilise des boîtes monolithes fixes. Ces boîtes ne répondent pas au deuxième critère sur la possibilité de rénovations à venir dans les logements. De plus, le système ne peut aller que jusqu'à quatre étages.
8. F.2 : Le système YORKON comporte des boîtes aux arêtes en acier. Il permet d'aller au-delà de 20 étages. Par contre, il faut ajouter d'autres membrures entre les extrémités, ce qui empêchera les modifications à faire par les usagers. Il peut recevoir l'enveloppe et le cloisonnement en panneaux légers. Le système s'adapte au concept *Open Building*, car il offre la possibilité de futures adaptations dans les logements de même que les zones servies et les zones servantes. Les plomberies et les conduits d'électricité sont préfabriqués en usine y compris les modules 3D. L'installation sur le site est de six à huit modules par jour. Un inconvénient est l'absence d'entreprises qui travaillent directement avec ce système dans la RMR. L'acier vient de l'état de Minas Gerais. Aussi le coût du transport est-il un inconvénient, de même le fait que l'héritage du béton est plus fort que l'acier. L'autre inconvénient est le coût initial pour démarrer la production comme telle : la machinerie, la main-d'œuvre spécialisée, l'espace pour l'entreprise et une demande constante du marché de la construction pour amortir ces coûts (Richard, 2002).
9. F.3 : La Boîte aux arêtes en acier avec base de 15 cm de béton de l'entreprise VISION MODULAR. Malgré qu'elle permette d'aller au-delà de 20 étages, les colonnes au milieu empêchent les modifications futures.
10. G.2 : MAH-LEMESSURIER nécessitent des coffrages mécanisés en ligne de montage, des équipements et services en usines. L'adaptabilité est bien limitée à la « zone

servie » (séjour, salle à manger, salle familiale et chambres à coucher) notamment en raison du noyau, bien que la limite d'étages que le permette d'aller jusqu'à dix étages.

11. H.1 : Le système VERBUS ne répond pas à la deuxième question portant sur l'adaptabilité aux besoins des usagers à cause des conteneurs. De même, il faut revêtir toute la structure en acier pour l'ignifugation.

12. I.1 : Le système TILT-UP est classifié dans la catégorie de la mécanisation du chantier, car la charpente et l'enveloppe peuvent être réalisées *in situ*, puis transportées aux étages correspondants à l'aide d'une grue. Le désavantage est la nécessité d'un gros espace sur le chantier pour la fabrication des composants et la limite jusqu'à sept étages.

13. I.2 : Le système OUTINORD utilise un coffrage mécanisé de type tunnel *in situ* où le cloisonnement et le plancher supérieur deviennent monolithes. Le système peut accepter plusieurs types de cloisonnement. Les moules peuvent atteindre jusqu'à 12 m de longueur et 3,65 m à 6,70 m de largeur, mais à l'aide d'un complément au milieu on peut aller jusqu'à 7,92 m de largeur pour aller jusqu'à 30 étages. Selon le site Web brésilien PINI⁵, qui contient, entre autres, des nouvelles sur la construction civile, selon un article du 15 avril 2008, ce système est déjà connu par la construction civile brésilienne depuis 30 ans. Cependant, à cause d'une hausse du coût initial et du manque de souplesse du système, il a été oublié.

4.2.2. Systèmes intéressants

1. A.1 : Le système de poutre et de colonne en acier tel que produit par l'entreprise ARCELOR MITTAL utilise une structure mixte en béton pour les dalles et en acier pour les poutres et colonnes. Malgré sa bonne réponse au besoin de rénovations, le

⁵ <http://piniweb.pini.com.br/construcao/tecnologia-materiais/formas-tipo-tunel -retornam-ao-pais-87087-1.aspx>, consulté le 15 juillet 2016.

système est limité à la charpente et toute la structure en acier doit être revêtue de matériaux ignifuges.

2. G.1 : Les systèmes RICHARDDDESIGN nécessitent aussi des coffrages mécanisés en ligne de montage, des équipements et services en usines. L'adaptabilité est bien limitée à la « zone servie » (séjour, salle à manger, salle familiale et chambres à coucher) pour les changements à venir. De plus, le système a besoin d'au moins deux noyaux parallèles ou perpendiculaires entre eux pour appuyer les dalles au milieu.

4.2.3. Systèmes pertinents

Finalement, voici les systèmes de construction industrialisés **pertinents** :

1. A.2 : Le premier système constructif préfabriqué classifié comme pertinent est celui de poutres et colonnes segmentées en béton tel que produit par les entreprises T&A et PDI, lesquelles sont situées dans la RMR où le coût et le temps du transport sont réduits. L'entreprise est aussi responsable de la fabrication en usine de plusieurs autres composants en béton pour la construction de différents types d'édifices tels que :
 - des dalles précontraintes pouvant atteindre une portée supérieure à 20 m ;
 - des colonnes continues de dimensions variées pouvant accueillir jusqu'à quatre consoles ;
 - des poutres jumelées, en forme de « T » inversé, en forme de « L », en double « TT » ou précontraintes. Il est possible de faire faire des ouvertures pour les passages de conduits à travers les poutres en usine ;
 - des pieux pour la fondation en béton ;
 - des escaliers de secours compris dans le système ;
 - un système constructif qui offre aux usagers l'adaptation à leurs besoins.

Les panneaux pour l'enveloppe et les cloisonnements peuvent s'adapter aux besoins du projet. Les inconvénients sont : le joint entre les colonnes, les dimensions des colonnes et des poutres occupant des espaces à l'intérieur des logements.

2. C.1 : Le deuxième système retenu est celui des PANNEAUX EN BÉTON ARMÉ fabriqués par Weckenmann. L'entreprise recourt aux outils d'automatisation permettant de simplifier le travail en usine, dans ce cas au chantier ; en outre, le béton coulé *in situ* sur les prédalles permet que les panneaux atteignent jusqu'à 14 m, un résultat équivalent à une structure monolithique. De plus, le système peut aller à 45 étages en utilisant sa propre dalle alvéolaire de 8 m maximum.
3. C.2 : DESCON est le troisième système retenu.
 - Il utilise des panneaux monolithes en béton préfabriqués.
 - Ce type de composant est fabriqué depuis longtemps à cause de l'héritage du béton à RMR.
 - Il fait appel aux dalles monolithes, précontraintes où les jointements sont faits avec des fers angles boulonnés.
 - L'adaptation du concept *open building* est offerte à l'intérieur du logement aux usagers, en utilisant des matériaux de déplacement facile.
 - Tous les sous-systèmes sont intégrés : la charpente, les équipements, le cloisonnement, l'enveloppe et les services.

Une particularité de ce système est que tous ses composants sont fabriqués par différentes usines locales. Ensuite, ils sont tous transportés au chantier pour l'assemblage.

4.3. Sélection et analyse des deux systèmes industrialisés les plus pertinents

Parmi les trois systèmes industrialisés pertinents qui sont sortis du tableau d'options comme pertinents, seulement deux seront retenus pour les appliquer à un projet précis. Malgré

que les trois répondent bien aux critères de choix préétablis, le système de panneaux fabriqué par l'entreprise Weckenmann ressemble à celui de panneaux DESCON. En effet, pour ne pas tomber en redondance, les deux systèmes pertinents qui seront appliqués au plan d'étage proposé seront : le C2 : le système de panneaux en béton DESCON et le A2 : le système de poutres et colonnes commercialisé par les entreprises T&A et PDI.

Premièrement, les deux recourent à des ressources existantes à Recife pour la fabrication des composants : les outils, les matériaux et la main-d'œuvre. Tant le système de panneaux DESCON que celui de poutres et colonnes continues (T&A et PDI) recourent au béton, le matériau le mieux maîtrisé par tous les professionnels à Recife (les architectes, les ingénieurs, les ouvriers et les entreprises de construction). De plus, la structure tout en béton intègre l'ignifugation en protégeant l'acier qui se retrouve à l'intérieur de la charpente.

Deuxièmement, les deux technologies maximisent la production en usine pour transporter leurs composants au chantier. Troisièmement, les deux systèmes industrialisés s'adaptent complètement aux modifications futures dans les logements selon le concept *Open Building*. Autant le système constructif DESCON que celui de poutres et colonnes de T&A permettent d'atteindre de grandes portées. Également, les deux systèmes peuvent aller à une hauteur de 20 étages.

Chapitre V : L'APPLICATION DE DEUX SYSTÈMES DE CONSTRUCTION RETENUS À UN PROJET PRÉCIS

5.1. Application de chaque option au plan d'étage

L'étape présente consiste à appliquer et évaluer le plan d'étage proposé à la fin du chapitre 3 à deux des options retenues pour savoir si les deux systèmes s'adaptent bien. Toutes les figures de ce chapitre ont été dessinées par l'auteur.

Le système constructif A2 : poutres et colonnes en béton, commercialisé par les entreprises T&A et PDI, s'adapte très bien au plan d'étage proposé. Il sépare bien la zone servie de la zone servante et accepte bien la modulation préétablie selon la figure 43. La charpente est représentée par des colonnes carrées, en gris foncé. Selon la coupe « BB » de la figure 44, le plan peut recevoir des dalles de 1,20 m de largeur variant entre 2,60 m, 2,90, 4,10 m et 5 m de longueur, s'appuyant autant sur les poutres en « T » inversé qu'en « L ».

Toutes les façades et cloisonnements permettent la mise en place de panneaux industrialisés tels que murs rideaux, panneaux de béton léger ou bien panneaux en ossature légère en acier comme sous-systèmes symbolisés par la couleur rouge. L'idée est de mettre toujours les dalles à l'intérieur de l'enveloppe pour des raisons climatiques et d'étanchéité (figure 44).

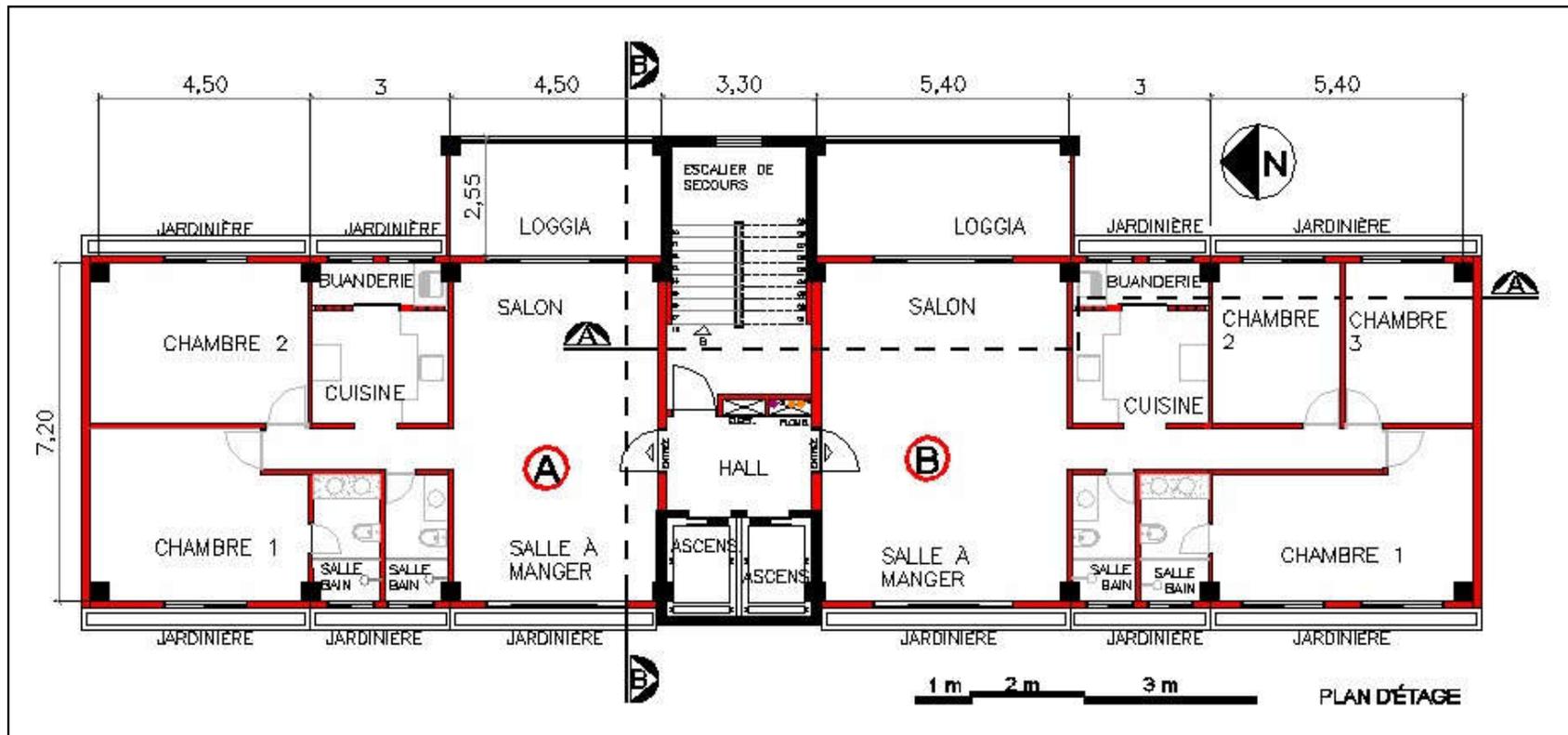


Figure 42 : Plan d'étage appliqué au système de poutres et colonnes.

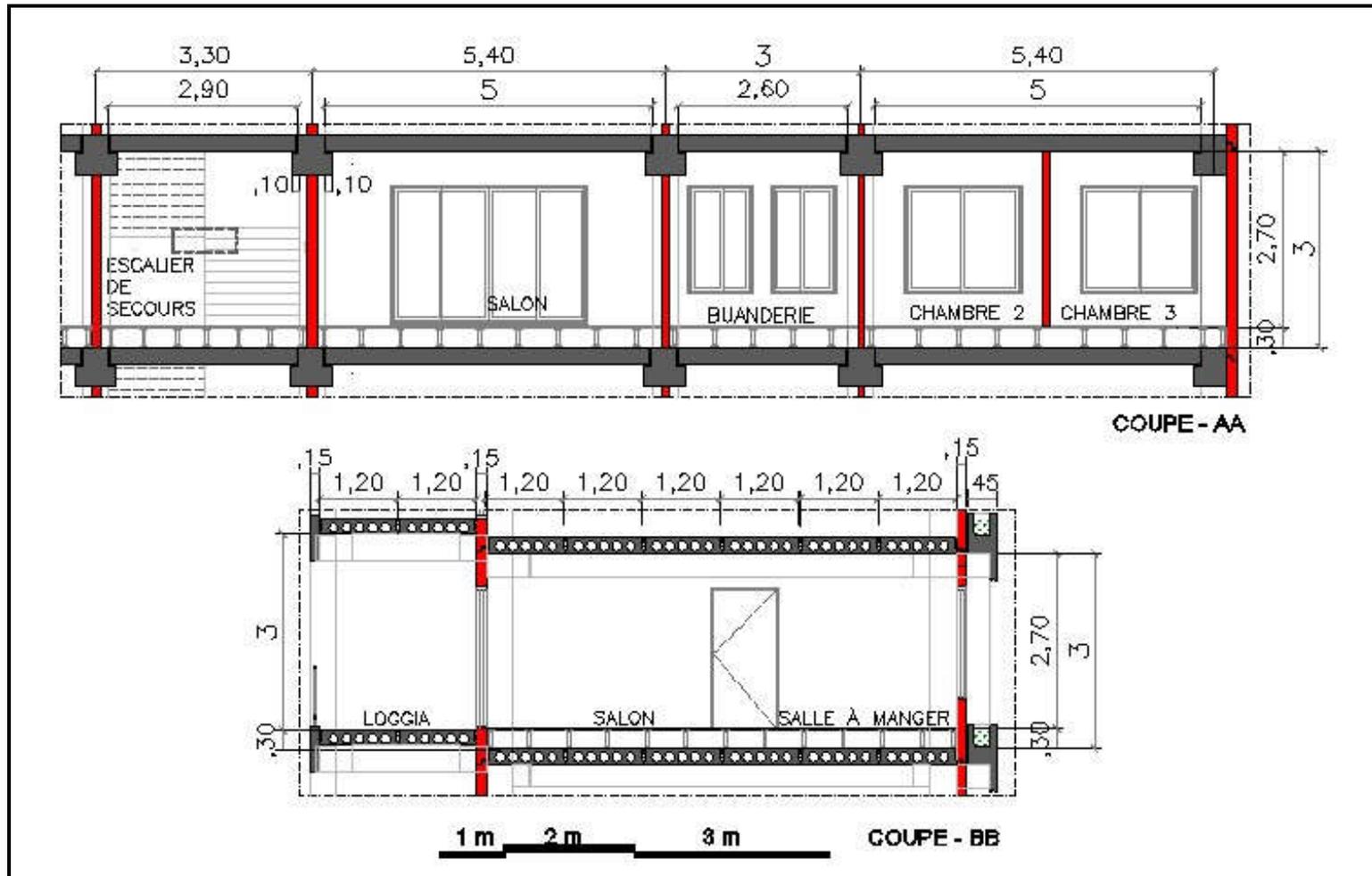


Figure 43 : Coupes AA et BB appliquées au système de poutres et colonnes

La hauteur de 3 m de dalle à dalle est respectée permettant la limite de 2,70 m de plan libre du plancher au plafond à l'intérieur des logements, où environ 0,30 m sert de passage autant pour les puits que pour le passage des câbles d'électricité au-dessous d'un plancher surélevé autant pour la zone servante que la zone servie. Quant à l'éclairage du plafond, le système accepte très bien des rubans électriques adhésifs. Les boîtes à fleurs (jardinières) sur les façades est et ouest forment en quelque sorte des poutres en « U » s'appuyant sur les consoles des colonnes (figure 44).

Le système C3 : les panneaux en béton DESCON, s'adapte également très bien au plan d'étage proposé (figure 45).

Ses portées varient de 2,55 à 7,20 m. Ces panneaux sont assemblés entre eux par fer angles boulonnés. Les façades est et ouest permettent la mise en place de panneaux industrialisés tels que murs rideaux, panneaux de béton léger ou bien panneaux en ossature légère en acier comme sous-systèmes symbolisés par la couleur rouge (Figures 45 et 46). En effet, les dalles peuvent être au milieu des panneaux des enveloppes pour des raisons climatiques et d'étanchéité (figure 46). Quant aux boîtes à fleurs (jardinières) sur les façades, il faut prolonger tout le haut du panneau mural et lui faire traverser l'enveloppe d'une hauteur plus ou moins égale aux boîtes à fleurs qui constituent quelque sorte des poutres en « U » qui peuvent s'appuyer sur le mur porteur (figure 46).

La hauteur de 3 m de dalle à dalle est également respectée permettant la limite de 2,70 m pour le plan libre, autant pour la zone servie que pour la zone servante. Le système accepte aussi les 0,30 m, autant pour le passage des puits que pour le passage des conduits d'électricité sous un plancher surélevé. Le système accepte très bien des rubans électriques adhésifs pour l'éclairage du plafond. Les dalles monolithes ont 2,40 m de largeur par 3,30 m, 3 m, 4,50 m et 5,40 m de portée; le tout représenté par la couleur gris foncé (figure 46).

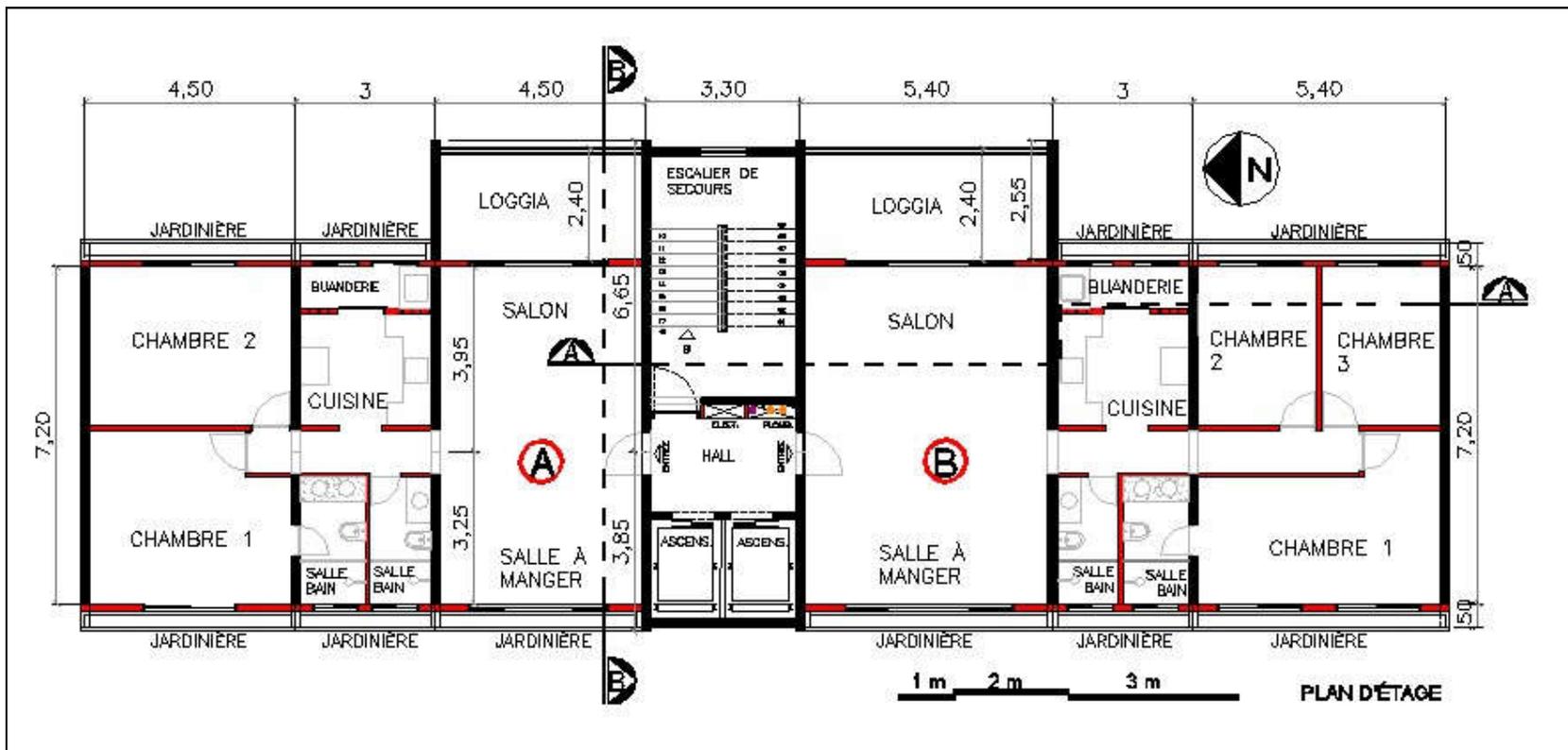


Figure 44 : Plan d'étage appliqué au système DESCON.

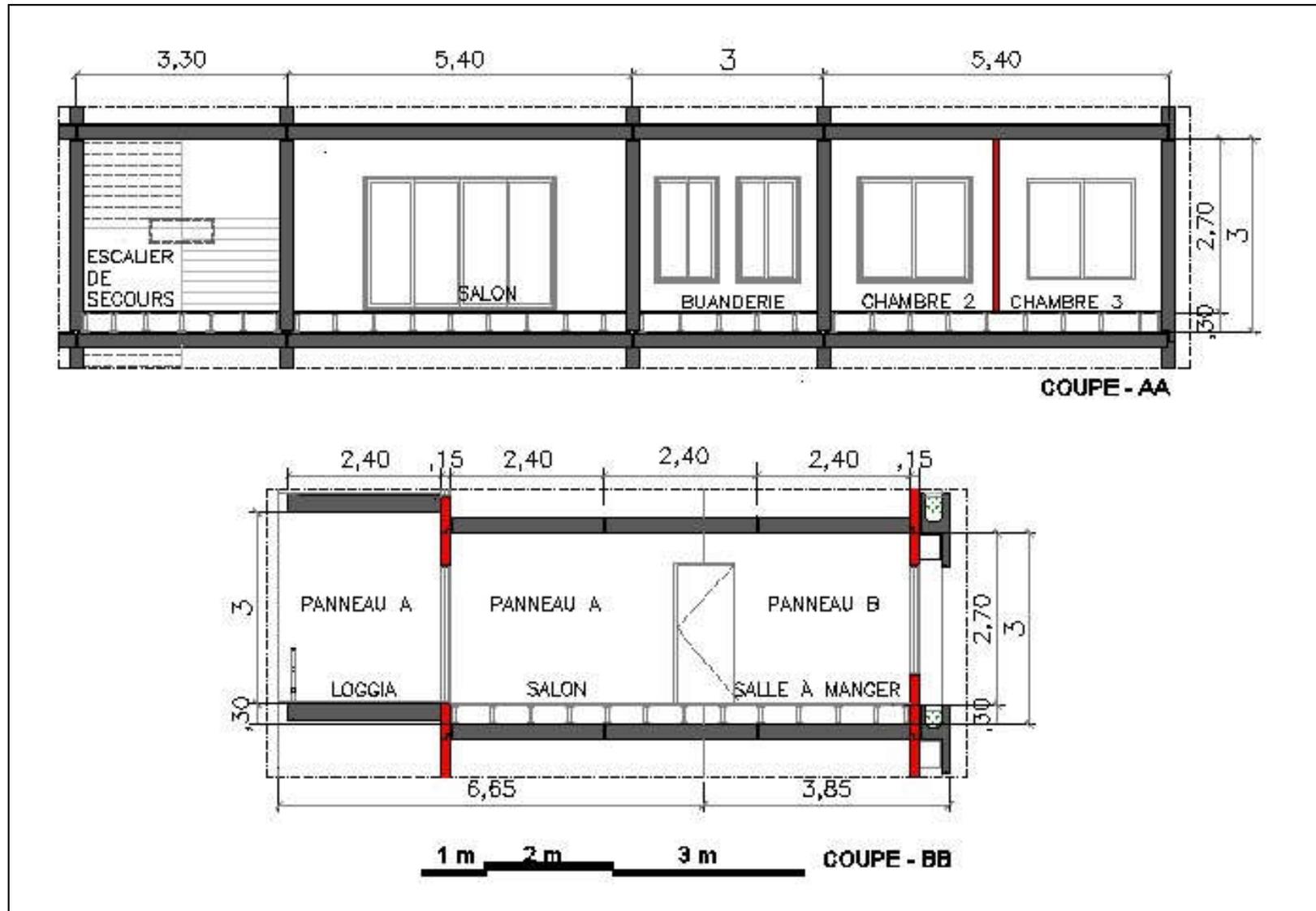


Figure 45 : Coupes AA et BB appliquées au système DESCON.

5.2. Sélection et description des options les plus pertinentes

Cette dernière étape de la présente recherche est la sélection du système de construction industrialisé optimal parmi les deux sélectionnés et analysés auparavant.

D'après Pinho et Penna (2008), la rétention du système constructif industrialisé ne doit pas être une compétition entre différents systèmes, mais le résultat d'une décision basée sur celui qui est le plus adaptable aux besoins de tel programme pour tel bâtiment et en tenant compte des caractéristiques de chacun des systèmes.

Les deux systèmes de construction industrialisés détiennent des caractéristiques particulières, autant le premier constitué de poutres et colonnes en béton commercialisé par les entreprises T&A et PDI que le deuxième, de DESCON, qui travaille avec des panneaux porteurs monolithes en béton. Le système DESCON répond à tous les critères. Le système de poutres et colonnes a bien répondu à la majorité des critères, mais il est limité par l'absence des sous-systèmes de services et le cloisonnement. Donc, les deux ont été capables de bien s'adapter au plan d'étage proposé. De plus, les deux systèmes correspondent aux ressources d'entreprises dans la RMR pouvant servir en tout temps le marché de la construction civile. Pour cette raison, les deux systèmes de construction usinés peuvent être considérés optimaux car ils sont fonctionnels et applicables au cadre de Recife.

Dans le cas du premier système constructif industrialisé A2 : poutres et colonnes en béton, des entreprises T&A et PDI, la charpente doit avoir au total 20 colonnes carrées de 0,40 m x 0,40 m en quatre segments d'environ 15,75 m de hauteur (gabarit confortable pour transporter sur camion), ayant trois connexions entre eux pour arriver aux 20 étages désirés. Les colonnes offrent entre deux consoles (n° 1), trois consoles (n° 2) et quatre consoles (n° 3) d'une profondeur de 0,10 m à 0,25 m, à une distance de 3,25 m entre elles (figure 47). Les colonnes doivent recevoir des revêtements pour leur protection (par exemple, de la céramique ou de la peinture à l'usine ou après l'installation *in situ*).

Le bâtiment comporte 14 poutres Gerber : six sont en forme de « L » aux dimensions de 0,50 m de largeur où 0,10 m sont pour l'aile qui sort d'une part pour appuyer les dalles; deux poutres situées aux deux extrémités des façades nord et sud (n° 4) ont une portée de 6,40 m, tandis que les quatre autres, situées au-dessous des loggias et la zone servante (n° 5), ont une portée de 2,30m; six poutres ont également une portée de 6,40 m en forme de « T » inversé, parmi lesquelles quatre ont 0,60 m de largeur et sont situées dans la zone servante pour recevoir les dalles de part et d'autre; les deux autres poutres ont une partie de 0,60 m et l'autre de 0,50 m de largeur situées entre la zone servie et la zone servante. Les deux poutres dégagent des ailes de 0,10 m de part et d'autre pour recevoir les dalles. Dans la partie où il n'existe pas de dalle (cage des ascenseurs et escalier de secours), les poutres n'ont pas d'ailes, alors qu'elles ont 0,50 m de largeur; enfin, deux poutres Gerber simples sont situées en face des loggias pour contreventer la structure (n° 6). Toutes les poutres ont 0,65 m de hauteur (figure 47).

Toutes les dalles sont alvéolaires précontraintes (n° 7, n° 8, n° 9 et n° 10), s'appuyant sur les poutres (figure 48). Les dalles des loggias, qui font partie de la zone DELTA, sont indépendantes et se situent à 0,30 m au-dessus des dalles des zones ALPHA et BETA. Toutes les dalles sont situées au milieu des enveloppes pour assurer l'étanchéité. Les jardinières en forme de « U » sont en béton préfabriqué et s'appuient directement sur les consoles émergeant des colonnes traversant les enveloppes (n° 11, figure 48).

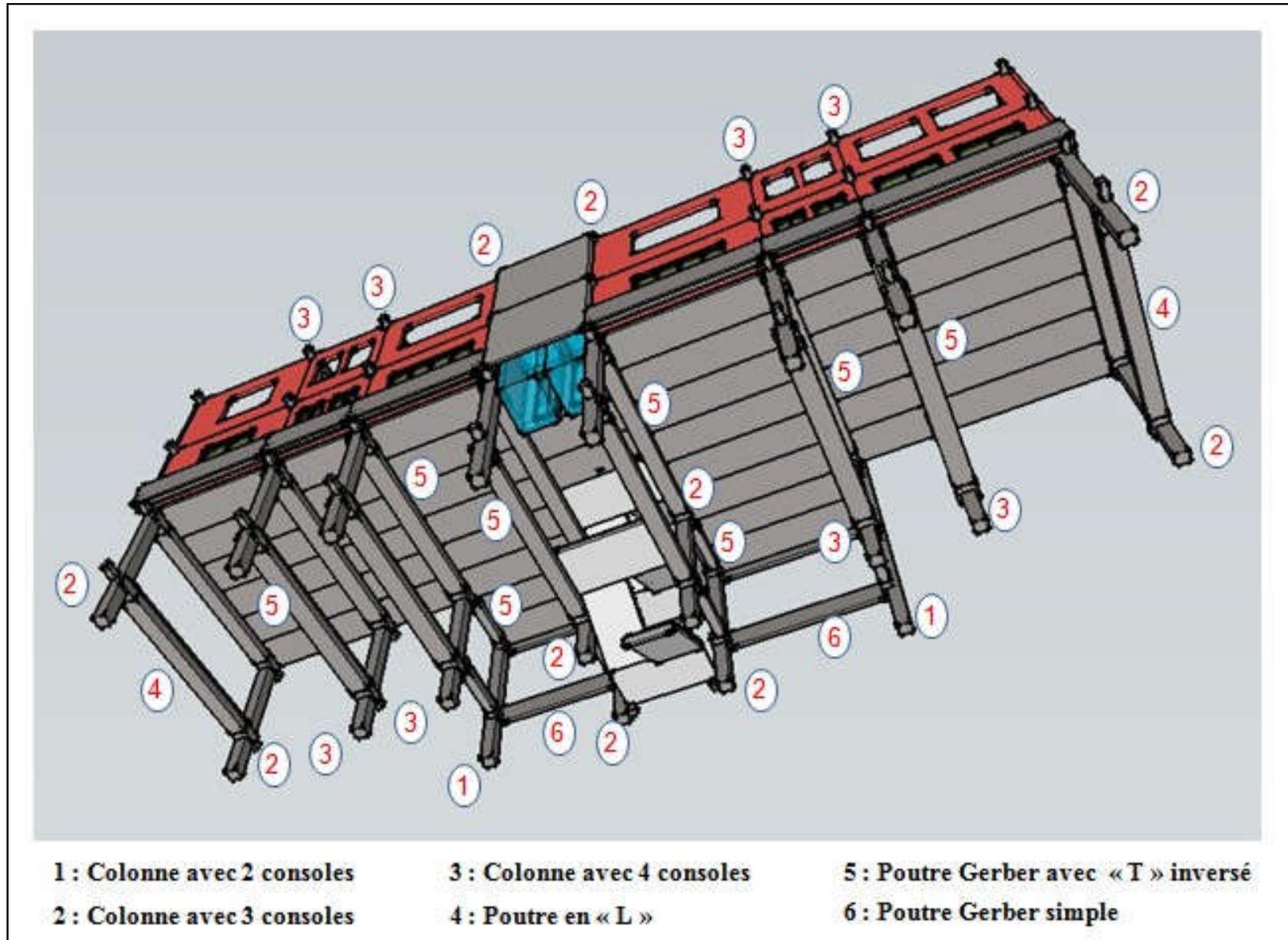


Figure 46 : Perspective sous le bâtiment en poutres et colonnes.

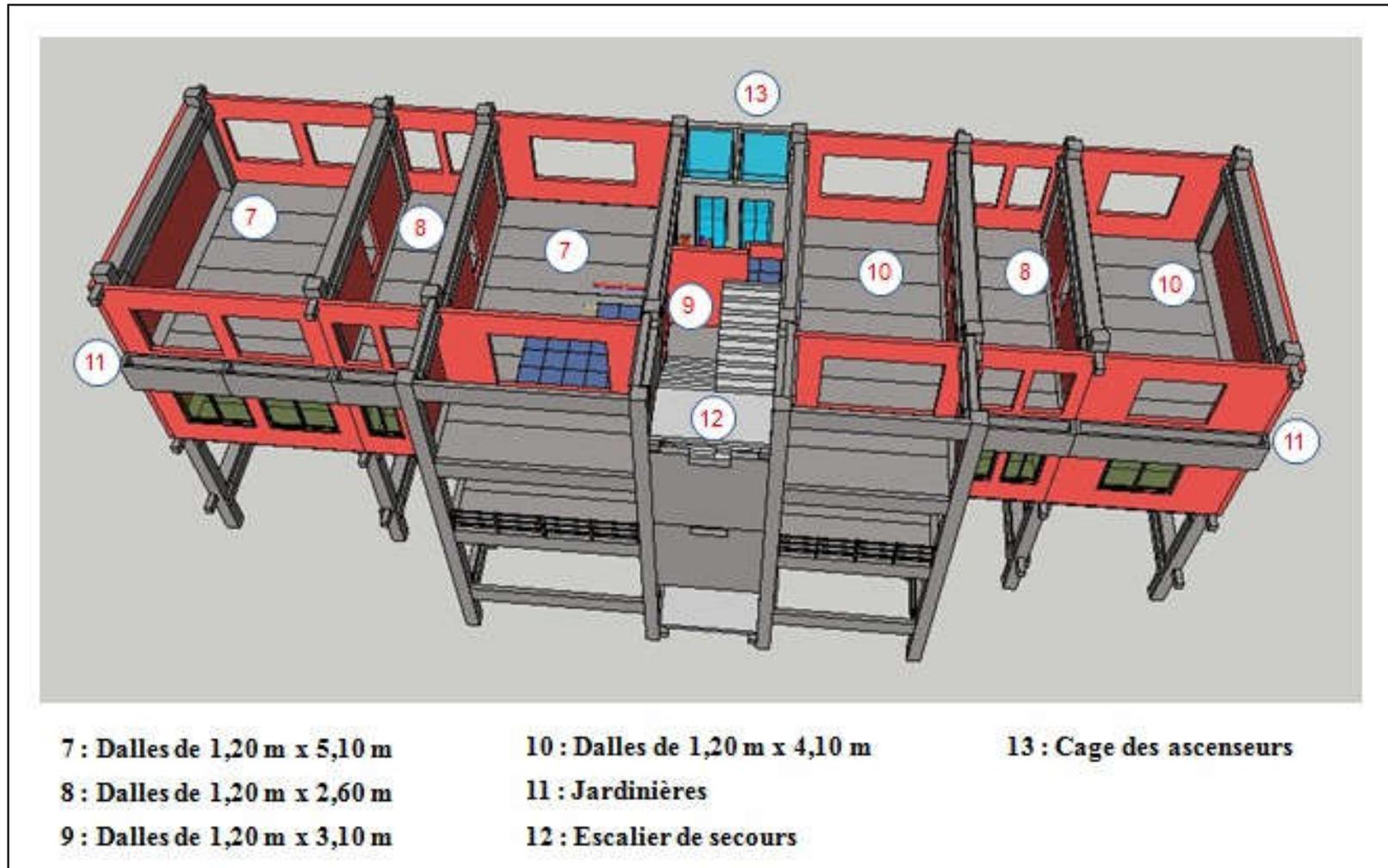


Figure 47 : Perspective plongeante sur le bâtiment en poutres et colonnes.

La zone servante accueille : l'escalier de secours, intégré au système, qui est monolithe en béton. Il est constitué d'une volée de marches et d'un palier intermédiaire. Le palier peut s'appuyer de 0,10 m sur les deux consoles des deux colonnes des façades de même que sur les ailes des poutres (n° 12) et le hall où se trouvent les passages verticaux pour les tuyaux d'eau, d'égout et d'incendie aussi bien que les conduits d'électricité, les deux indépendants, ainsi que les passages pour les deux ascenseurs (n° 13). Les panneaux de façade ainsi que la cage des ascenseurs sont en béton préfabriqué ayant au moins 0,20 m d'épaisseur (figure 48).

Les conduites d'eau représentées par la couleur bleue foncée (n° 14) montent par le passage vertical pour ensuite rentrer dans chaque logement indépendamment, au-dessous du plancher surélevé, et desservir les deux salles de bains, la cuisine et la buanderie, tandis que le tuyau d'égout (n° 15) sort de chaque logement vers le passage vertical représenté en couleur orange (figures 49 et 50).

Le plancher surélevé en bois est en carré modulaire de 0,60 x 0,60 x 0,28 m (exemple de l'entreprise INTER à Recife), représenté par la couleur bleu métal (n° 16) (Figures 49 et 50). Ce type de plancher se rencontre autant dans le hall que dans les logements. Le tuyau d'incendie sert chaque étage; il est représenté par la couleur violette (n° 17, figure 49). La division entre le hall et l'escalier de secours est en panneau d'acier léger de 0,10 m, couvert de double plaques de ciment sur les deux côtes avec la laine de verre au milieu, représentée sur le dessin par la couleur rouge (n° 18, figures 49 et 50).

Les conduits d'électricité, antenne et téléphone (n° 19, figures 49 et 50), rentrent indépendamment dans chaque appartement au-dessous du plancher surélevé. Ils vont premièrement vers le cadre d'énergie (n° 20, figure 50) situé sur les panneaux légers à l'intérieur de chaque logement, préétablis en usine. Ils sont représentés par la couleur jaune. Ensuite, les conduits descendent à travers les murs, passent au-dessous du plancher surélevé pour rencontrer les autres prises sur le cloisonnement et l'enveloppe partout dans le logement.

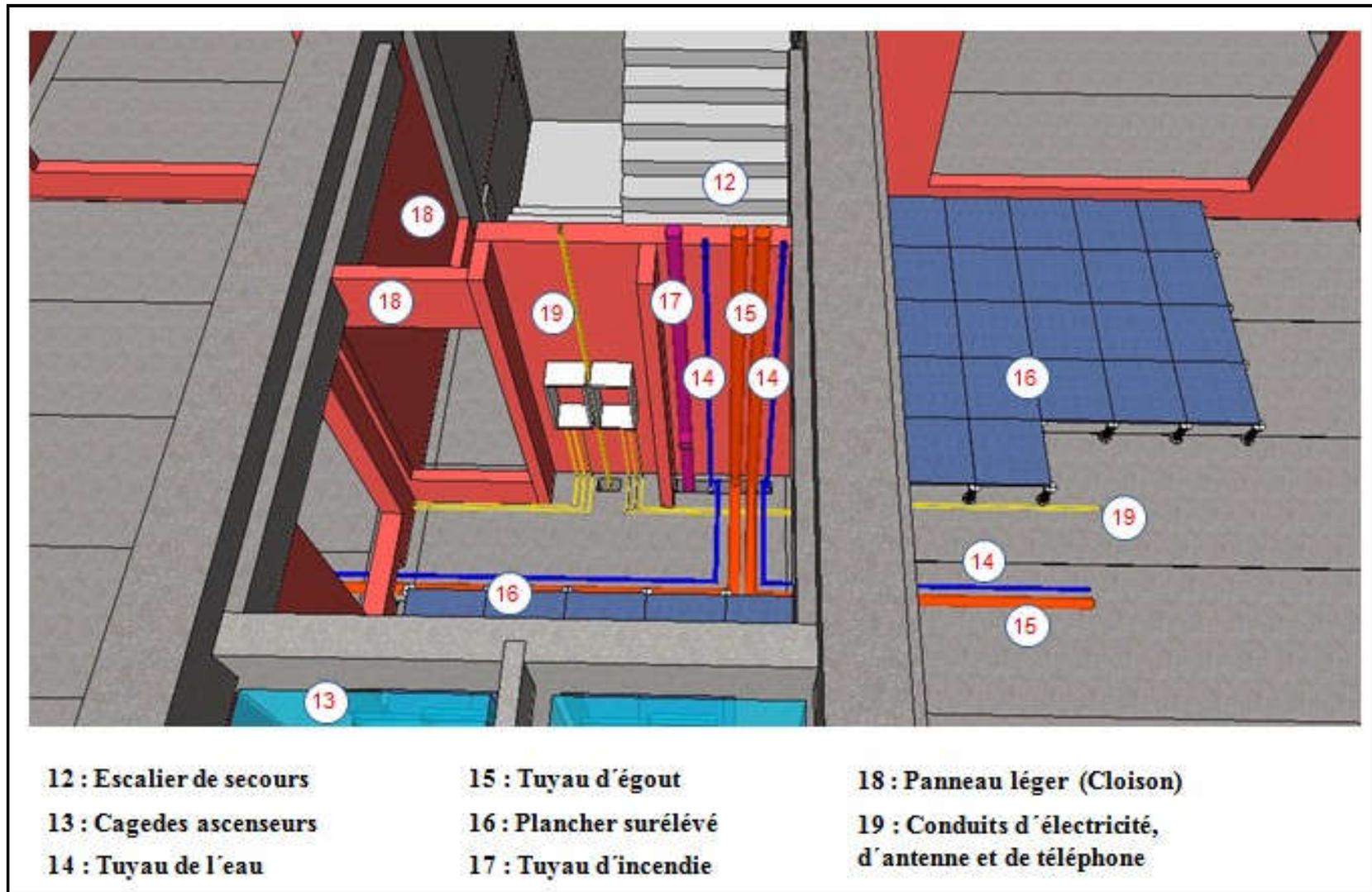


Figure 48 : Perspective de la zone servante du bâtiment en poutre et colonne.

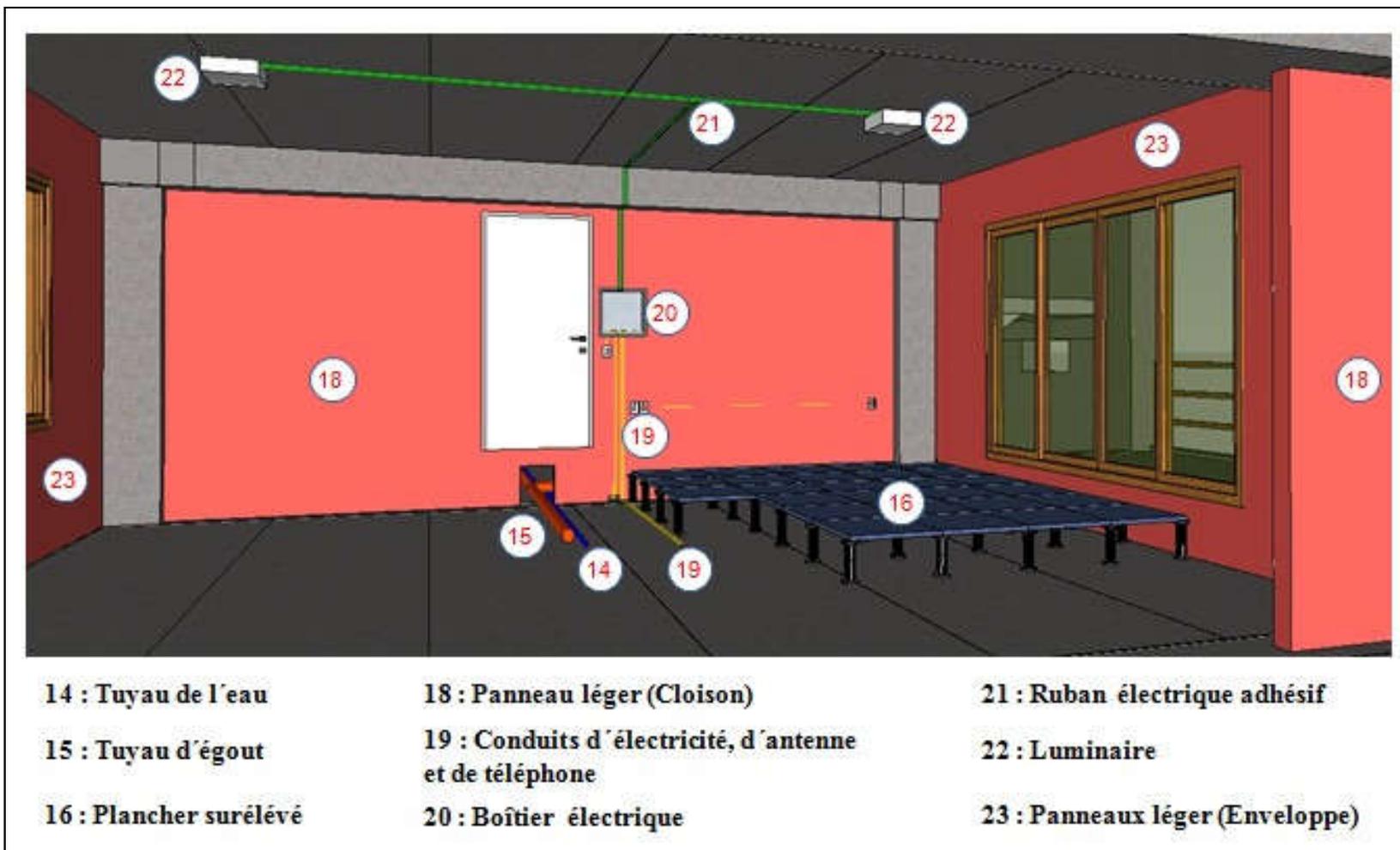


Figure 49 : Perspective de la zone servie du bâtiment en poutre et colonne.

Pour le système d'éclairage, il est proposé de recourir à des rubans électriques aux fils invisibles (exemple de l'entreprise ELETROFITAS) adhésifs, représentés par la couleur verte (n° 21, figure 50) sur le mur sortant du cadre d'énergie, afin de servir les divers points d'éclairage pour les luminaires (n° 22, figure 50), partout au plafond, selon les besoins des usagers.

Il est suggéré que l'enveloppe soit en béton léger avec enduit hydrofuge ou en ossature d'acier galvanisé légère de 0,15 m avec la laine de verre au milieu, une double plaque de ciment de 0,012 m sur les deux côtés ainsi que la céramique seulement sur les façades (n° 23, figure 50). Les panneaux doivent être situés à l'extérieur des dalles précontraintes entre l'intérieur du logement et la loggia pour des raisons climatiques et d'étanchéité.

Le cloisonnement proposé est le même que pour l'enveloppe : un panneau à ossature en acier galvanisé léger de 0,15 m d'épaisseur type *drywall* (n° 18, figures 49 et 50) pour les frontières entre les zones servies et la zone servante, tandis que pour le cloisonnement des logements, l'épaisseur est de 0,10 m. À l'intérieur, l'option est de mettre de la laine de verre comme matériau acoustique. La mise en place de doubles panneaux de plâtre de 0,012 m sur les deux côtes de la cloison permet une adaptation aux besoins des usagers. La hauteur de 2,70 m, à partir du plancher surélevé attaché à la dalle, donne plus de stabilité à la structure de cloisonnement.

La charpente pour chaque étage du deuxième système constructif C3 : DESCON est munie de 20 panneaux monolithes en béton porteur dans la zone servie (n° 24, n° 25, n° 26, n° 27 et n° 28, figure 51), les panneaux entre la zone servie et la zone servante (n° 29 et n° 30, figure 51). Les panneaux porteurs pour contreventer la structure (n° 31) où se situent la cage des ascenseurs et l'escalier de secours sont dans la zone servante (figure 52). Un ensemble de jardinières en forme de « U », préfabriquées en béton est disposé sur deux façades s'appuyant sur les prolongateurs ou sur les consoles des panneaux (n° 32, figures 51 et 52).

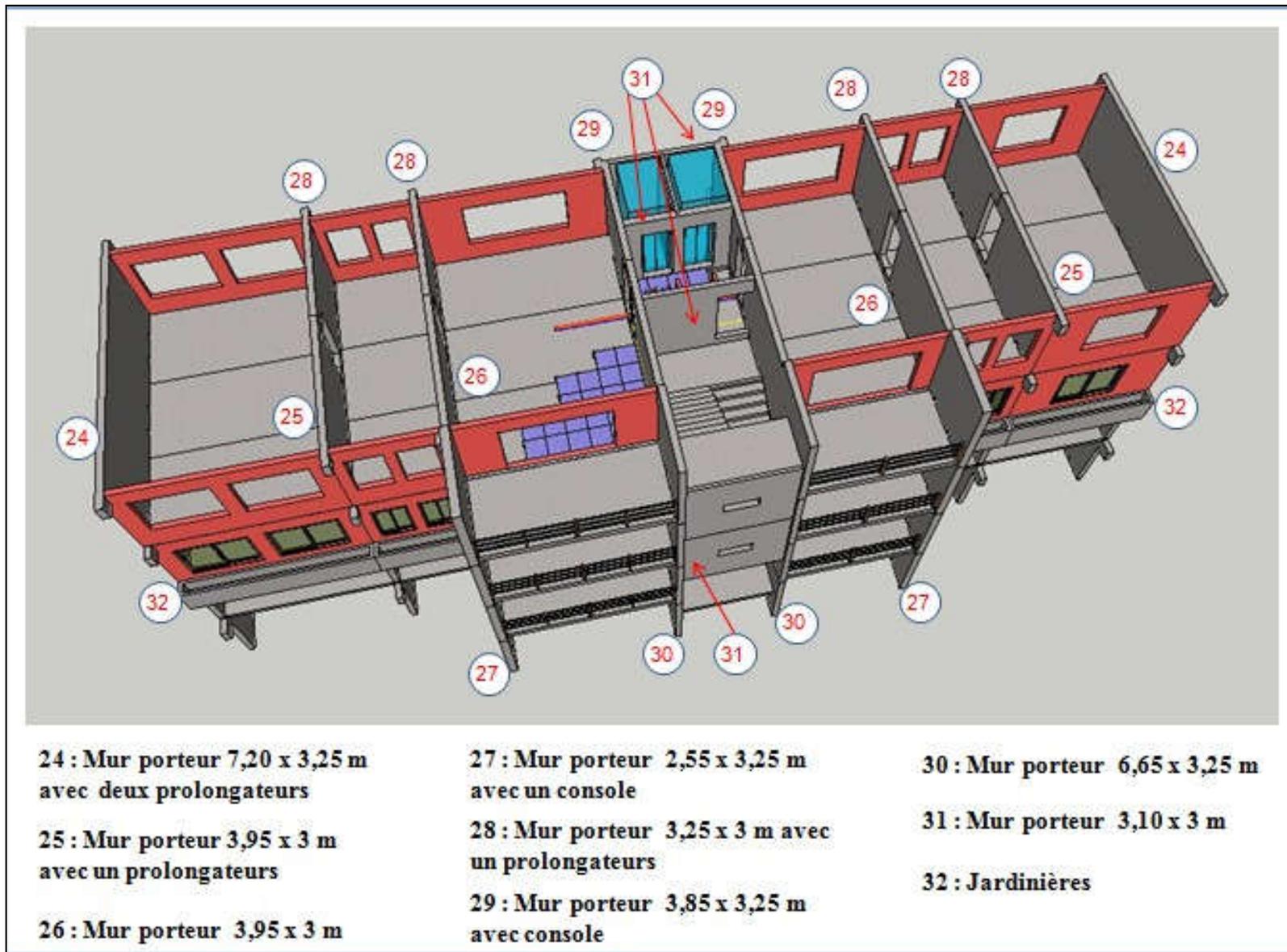
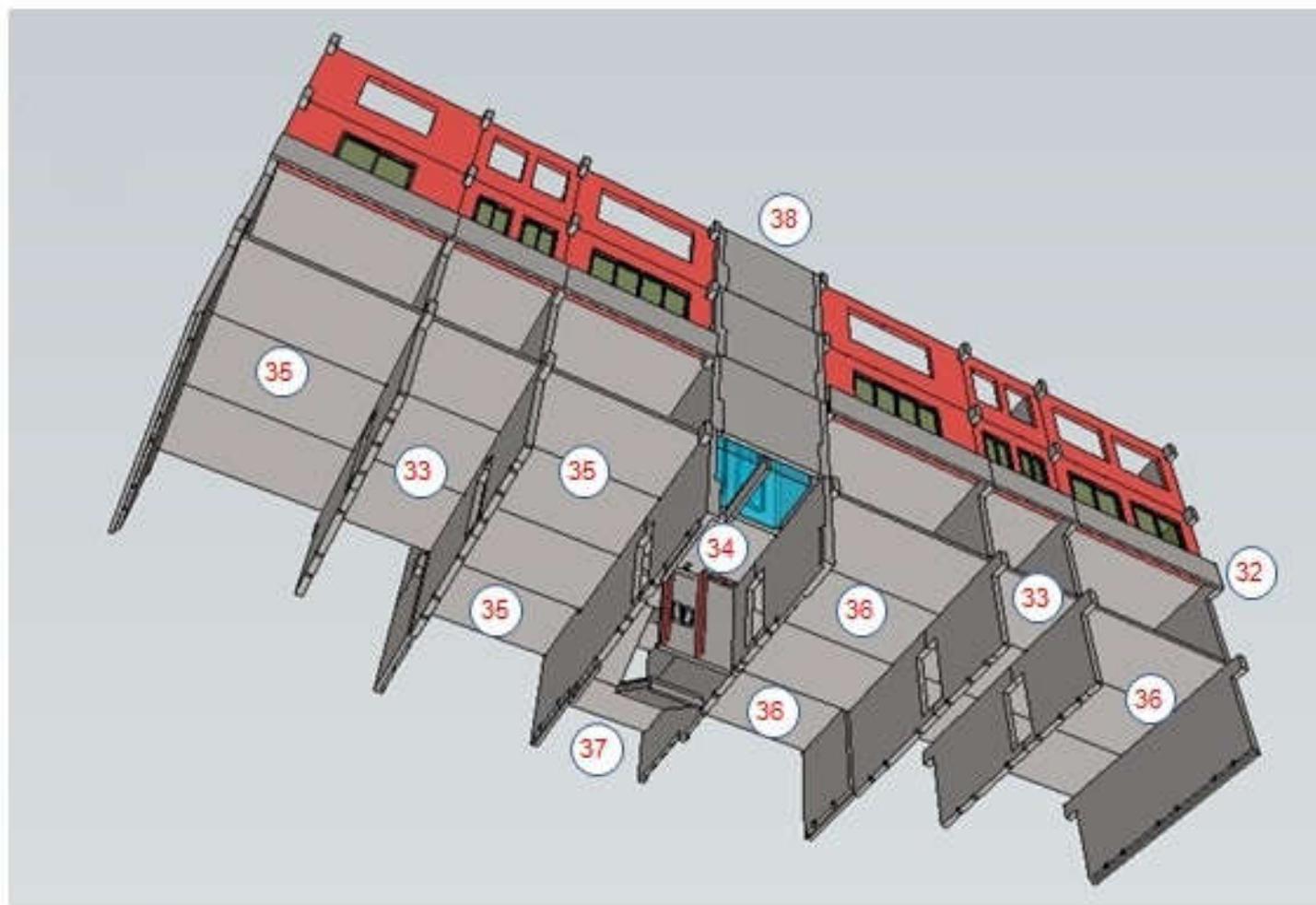


Figure 50 : Perspective plongeante sur le bâtiment en panneaux DESCON.



32 : Jardinières

33 : Dalles 3 x 2,40 m

34 : Dalle 3,30 x 3,95 m

35 : Dalles 4,50 x 2,40 m

36 : Dalles 5,40 x 2,40 m

37 : Escalier de secours

38 : Cage des ascenseurs

Figure 51 : Perspective au-dessous du bâtiment en panneaux DESCON.

L'escalier de secours (n° 37) et les deux ascenseurs (n° 38) sont situés au milieu du bâtiment (figures 52 et 53). La dalle monolithe (n° 34, figure 52) s'appuie sur les quatre murs porteurs qui font frontière avec les deux appartements ; elle vient de l'usine avec des ouvertures indépendantes pour le passage vertical de la plomberie de même que pour les conduits d'électricité, d'antenne et de téléphone. Ses dalles monolithes (n° 33, n° 34, n° 35 et n° 36) ont toutes une épaisseur de 0,25 m (figure 52).

Le tuyau d'incendie sert chaque étage représenté par la couleur violette (n° 39, figure 53). Les tuyaux de l'eau, représentés par la couleur bleue foncée, montent dans des passages verticaux indépendamment pour ensuite rentrer dans chaque logement (n° 41, figures 53 et 54). Le tuyau d'égout sort de chaque logement vers le passage vertical représenté par la couleur orange (n° 42, figures 53 et 54), tout au-dessous du plancher carré modulaire identique à ce système de poutre et colonne, représenté par la couleur bleu métal. Ceci se rencontre autant dans le hall que dans les logements (n° 43, figures 53 et 54).

Les conduits d'électricité, antenne et téléphone (n° 40, figures 53 et 54), rentrent indépendamment dans chaque appartement au-dessous du plancher surélevé ; premièrement, vers le boîtier électrique (n° 44, figure 54) situé sur les panneaux porteurs à l'intérieur de chaque logement, préétablis en usine. Ensuite, les conduits descendent à travers les murs, passent au-dessous du plancher surélevé pour rencontrer les autres prises sur les cloisonnement et l'enveloppe.

Des ruban électriques adhésifs sont proposés pour le système d'éclairage (exemple de l'entreprise ELETROFITAS) représenté par la couleur verte (n° 45, figure 54), ils sont appliqués sur le mur et sur les dalles sortant du boîtier électrique pour servir les divers points d'installation des luminaires (n° 46, figure 54), partout au plafond selon les besoins des usagers.

Le cloisonnement proposé est le même que pour l'enveloppe et il est identique à ce qui est proposé pour le système de poutres et colonnes (n° 47, figure 54).

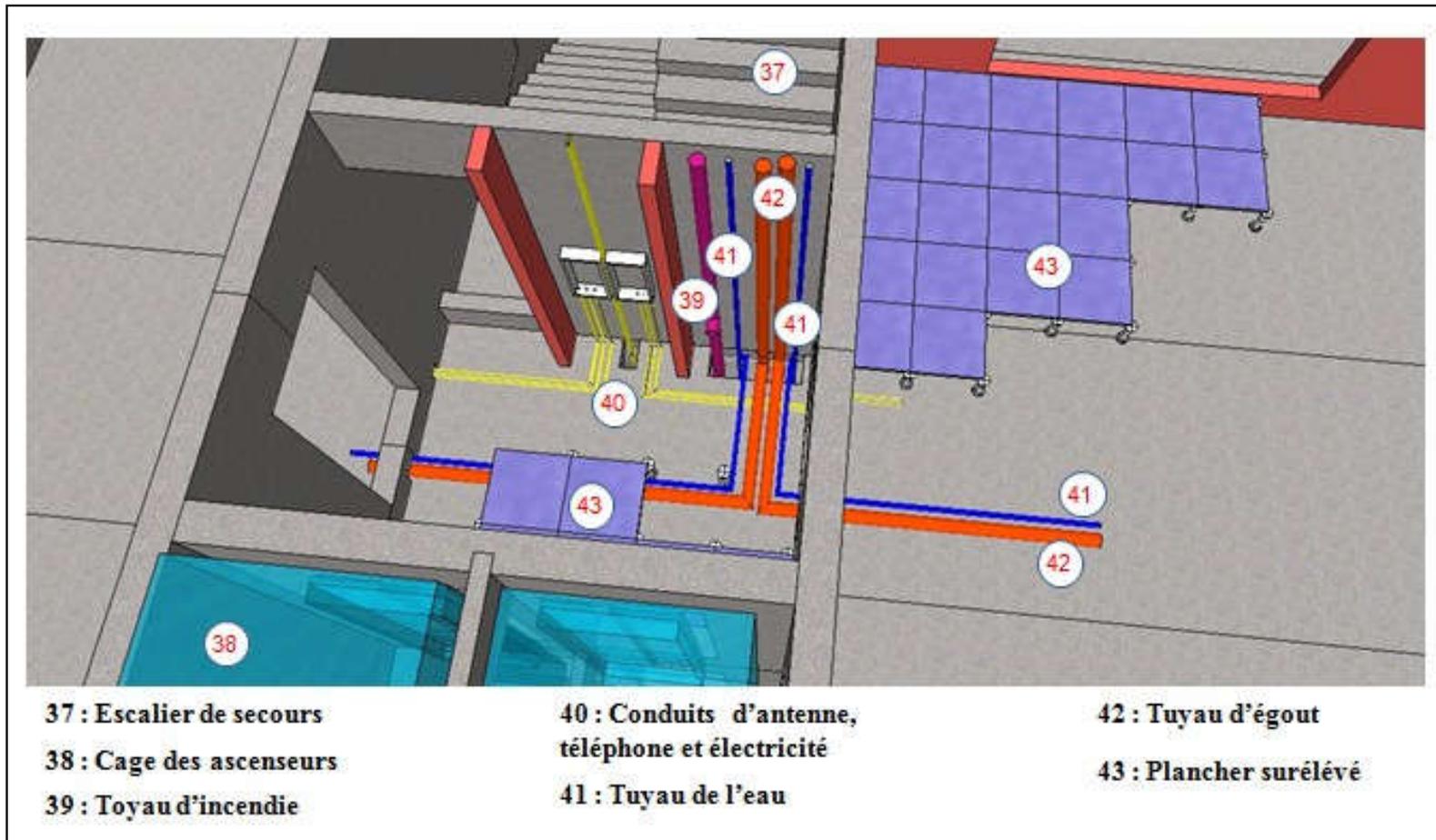


Figure 52 : Perspective de la zone servante du bâtiment en panneaux DESCON.

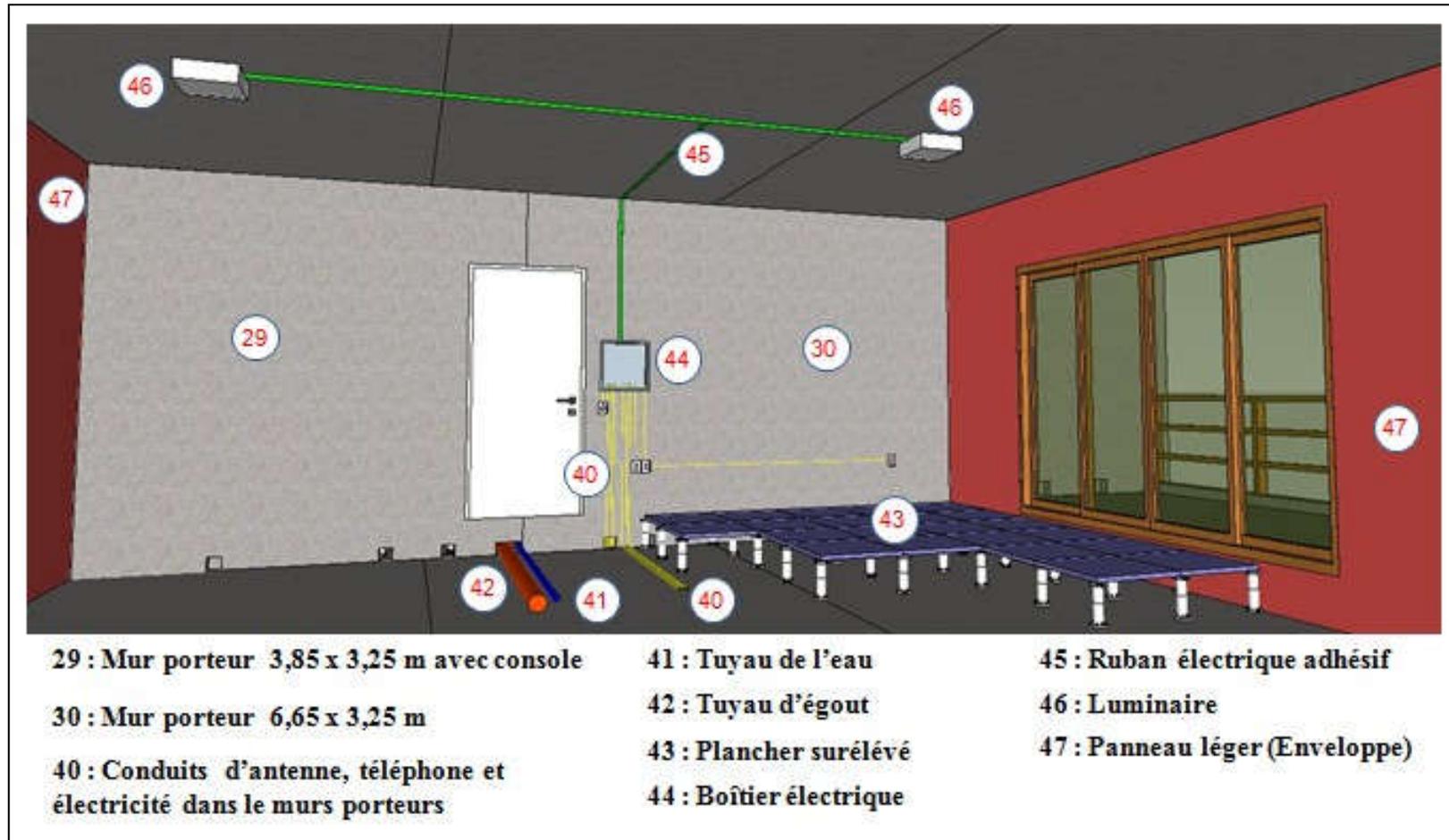


Figure 53 : Perspective de la zone servie du bâtiment en panneaux DESCON.

Conclusion

L'objectif de la présente recherche était d'analyser, comparer et sélectionner les systèmes de construction industrialisés qui s'adaptent bien aux habitations verticales multifamiliales de la classe moyenne à Recife, Brésil.

Tout d'abord, l'exploration du contexte historique de Recife a été assez importante pour faire comprendre la situation socio-économique et architecturale du moment dans la RMR : grandes constructions qui sont en train de contribuer à l'économie telles que le chantier naval, la raffinerie de pétrole et la contribution de la Coupe du monde de football en 2014, inspirant de nouveaux plans urbanistiques régionaux et l'émergence de nouvelles constructions.

La documentation a aussi montré que sa situation géographique a beaucoup contribué à l'histoire de l'architecture de Recife et du Brésil depuis sa découverte jusqu'à présent. L'architecture coloniale qui a servi de base pour enrichir l'architecture moderne brésilienne est devenue une icône mondiale. En plus, des pare-soleil, l'alternance entre le clair et le sombre sur les façades ainsi que l'utilisation de la végétation sur les balcons ont contribué à mettre en valeur l'architecture moderniste brésilienne entre les années 1950 à 1980. Par ailleurs, la collecte de données sur les ouvrages, les journaux et les articles actuels du marché immobilier ainsi que les tendances à Recife (sites Web) ont montré la perte des caractéristiques de l'architecture contemporaine qui risque de disparaître, surtout pour les bâtiments qui s'adressent à la classe moyenne. Cette classe a beaucoup augmenté son pouvoir d'achat en raison des programmes d'encouragement financiers du gouvernement.

Le Brésil, ayant commencé tardivement l'utilisation des technologies et des bénéfices de l'industrialisation pour les bâtiments en général, a beaucoup évolué dans le domaine. Recife, particulièrement, possède déjà beaucoup de connaissances sur la préfabrication. Plusieurs entreprises s'occupent de la fabrication des éléments préusinés dans la ville ou dans

la RMR en raison de la disponibilité de plusieurs types de machinerie ; la main-d'œuvre reste encore semi-spécialisée, mais de plus en plus spécialisée grâce à l'encouragement des entreprises. De plus, le béton s'est avéré le matériau le plus utilisé à Recife car ses composants sont toujours disponibles sur le marché de la construction plutôt que l'acier qu'il faut importer du sud du pays.

Les résultats ont démontré que l'application de l'approche évaluative a été appropriée pour répondre à la question de la recherche. Il a est possible d'analyser comparativement et d'identifier deux systèmes de construction pertinents pour les appliquer aux habitations multifamiliales verticales à Recife, Brésil. Le choix des sept critères d'analyse a été essentiel pour comparer et classifier, au départ, les systèmes de construction en tant que non pertinent, intéressant et pertinent. Ensuite, parmi eux, deux des critères ont été éliminatoires, la hauteur minimale de 20 étages et les portées minimale et maximale, en rejetant directement quelques systèmes comme non pertinents. Ensuite, l'évaluation à l'aide des autres cinq critères (l'adaptabilité aux changements dans les logements selon le concept *Open Building*, la disponibilité de ressources existantes à Recife pour la fabrication des composants; la maximisation de la production des composants en usine, l'intégration de l'ignifugation et l'intégration des sous-systèmes autres que la charpente au système constructif), a permis de mieux identifier les deux système les plus pertinents à l'application au plan d'étage proposé pour une habitation multifamiliale verticale à Recife, Brésil. Ainsi, tant le système de panneaux DESCON que le système de poutres et colonnes commercialisé par les entreprises T&A et PDI, les deux en béton, ont été retenus car les deux ont bien répondu à la majorité ou à la totalité des critères d'analyse en les classifiant tels que pertinents, de même que les deux s'adaptent bien au plan d'étage proposé.

À la lumière de ce travail, nous ne pouvons que souligner l'importance des cours (malheureusement rares) dans les universités et les facultés d'architecture et d'ingénierie pour encourager les étudiants à rechercher de nouvelles technologies constructives pour les adapter à la réalité du Brésil et de Recife. Il s'avère nécessaire de changer la perception sur le marché de la construction et encourager de plus en plus les entrepreneurs à changer la façon conventionnelle de construire et à l'orienter vers l'industrialisation des bâtiments.

En ce qui concerne les limites de la recherche, nous pouvons mentionner la disponibilité d'information et la fiabilité des données, en grande partie issues d'une littérature « grise », notamment les sources web au sujet du marché immobilier à Recife.

Une deuxième limite concerne la difficulté à trouver des renseignements pour certains systèmes de construction car les informations sur l'Internet et même dans les ouvrages n'étaient pas suffisantes pour compléter certaines parties de l'analyse. Pour cette raison, quelques systèmes n'ont pas été pris en compte. Un accès plus aisé à l'information permettrait de les intégrer dans l'analyse et de relativiser nos résultats.

Une troisième limite concerne les six volumes de la norme de l'ABNT NBR 15575 de 2013 sur les exigences constructives pour les bâtiments au Brésil. Seules les informations les plus pertinentes ont été retenues. Il est important de garder à l'esprit qu'une analyse plus exhaustive, en prenant en compte l'ensemble des normes, pourrait conduire à des résultats différents.

Finalement, le classement des systèmes constructifs (non-pertinents, intéressants ou pertinents) a été basé sur un ensemble limité de critères. Les coûts de construction ou l'intégration de système de HVAC (chauffage, ventilation et climatisation), par exemple, n'ont été pas pris en compte. La nature de ce travail (un mémoire de maîtrise) et les ressources disponibles expliquent ce choix.

L'industrialisation des bâtiments est un sujet toujours dynamique puisque la construction d'un édifice dépend de plusieurs facteurs : le contexte local, la disponibilité d'outils et de matériaux, le type de main-d'œuvre et les systèmes constructifs applicables en sont quelques exemples. Dans ce sens, des recherches futures pourraient contribuer à la production de connaissances dans le domaine, entre autres à travers :

1. Une simulation plus détaillée des systèmes de construction DESCONE et des entreprises T&A et PDI appliqués au plan d'étage proposé.

2. L'implantation du bâtiment proposé dans le plan d'urbanisme de Recife.
3. Une analyse comparative de systèmes de construction industrialisés pour les classes sociales défavorisées.
4. Une analyse comparative des coûts de la construction des systèmes de construction DESCON et de l'entreprises T&A et PDI appliqués au plan d'étage proposé.
5. L'applicabilité de systèmes de construction pertinents pour les villes après des sinistres.
6. L'utilisation des déchets des constructions conventionnelles pour les systèmes constructifs dans l'optique d'un développement durable.
7. La recherche des effets de l'industrialisation dans la production des bâtiments, notamment à l'égard d'une banalisation éventuelle de l'architecture.

Bibliographie

- Abdel-Kader, N. (1976). *Adaptabilité des techniques de production et de construction industrialisées aux besoins des usagers en habitation* (Thèse de doctorat, Aménagement, Université de Montréal), Montréal.
- ABNT NBR 14432 (2001). Exigências de resistência ao fogo de elementos construtivos de edificações - Procedimento [Exigences d'ignifugation d'éléments constructifs d'édifications : méthode]. Rio de Janeiro, Brésil : Associação Brasileira de Normas Técnicas.
- ABNT NBR 15575-1 (2013). Edificações habitacionais: Requisitos gerais [Édifices habitacionnels : critères généraux]. Rio de Janeiro, Brésil : Associação Brasileira de Normas Técnicas.
- ABNT NBR 15575-2 (2013). Edificações habitacionais: Requisitos para os sistemas estruturais [Édifices habitacionnels : critères pour les systèmes structurels]. Rio de Janeiro, Brésil : Associação Brasileira de Normas Técnicas.
- ABNT NBR 15575-3 (2013). Edificações habitacionais: Requisitos para os sistemas de piso s [Édifices habitacionnels : critères pour les systèmes de planchers]. Rio de Janeiro, Brésil : Associação Brasileira de Normas Técnicas.
- ABNT NBR 15575-4 (2013). Edificações habitacionais: Requisitos para os sistemas de vedações verticais internas e externas [Édifices habitacionnels : critères pour les systèmes d'étanchéité verticaux intérieurs et extérieurs]. Rio de Janeiro, Brésil : Associação Brasileira de Normas Técnicas.
- ABNT NBR 15575-5 (2013). Edificações habitacionais: Requisitos para os sistemas de coberturas [Édifices habitacionnels : critères pour les systèmes de toitures]. Rio de Janeiro, Brésil : Associação Brasileira de Normas Técnicas.
- ABNT NBR 15575-6 (2013). Edificações habitacionais: Requisitos para sistemas hidrossanitários [Édifices habitacionnels : critères pour les systèmes d'installations sanitaires]. Rio de Janeiro, Brésil : Associação Brasileira de Normas Técnicas.
- ABNT NBR 9050. (2015). *Accessibility to buildings, equipment and the urban environment* (3^e éd.). Rio de Janeiro, Brésil : Associação Brasileira de Normas Técnicas.

- Alberton, J. O. (2006). *Influência modernista na arquitetura residencial de Florianópolis* [L'influence moderniste dans l'architecture résidentielle de Florianópolis]. (Mémoire de maîtrise, Universidade Federal de Santa Catarina, Brésil). Repéré à <https://repositorio.ufsc.br/xmlui/handle/123456789/89210>
- Albuquerque, A., et El Debs, M. (2005). *Survey of structural systems in precast concrete for buildings in Brazil* (p. 13). Présenté à l'Encontro Nacional de Pesquisa-Projeto-Produção em Concreto pré-moldado, São Carlos, SP: EESC/USP-Departamento de Engenharia de Estruturas. Repéré à <http://www.repositorio.ufc.br/handle/riufc/5509>
- Amorim, L., et Loureiro, C. (2005). Dize-me teu nome, tua altura e onde moras e te direi quem es : estratégias de marketing e a criação da casa ideal 2 (1) [Dis-moi ton nom, ta taille et où tu habites et je te dirai qui tu es : stratégie de commercialisation et création de la maison idéale 2 (1)]. *Vitruvius*. Repéré à <http://www.vitruvius.com.br/revistas/read/arquitextos/05.058/490>
- Barros, M., et Melhado, S. (1998). *Recomendações para a produção de estruturas de concreto armado em edifícios* [Recommandations pour la production de structures en béton armé dans les édifices]. São Carlos, SP: EPUSP/SENAI. Repéré à http://www.pcc.usp.br/files/text/publications/TT_00004.pdf
- Bittencourt, L., et Cândido, C. (2010). *Ventilação natural em edificações* [La ventilation naturelle dans les édifices]. Rio de Janeiro, RJ: Procel Edifica. Repéré à <http://www.slideshare.net/luciarosa/ventilacao-natural>
- Blayse A. M., et Manley K. (2004). Key influences on construction innovation. *Construction Innovation*, 4(3), 143-154. <http://doi.org/10.1108/14714170410815060>
- Campari, G. (2006). A utopia dos arranha-céus sustentáveis [L'utopie des gratte-ciel durables]. *Vitruvius*. Repéré à <http://www.vitruvius.com.br/revistas/read/arquitextos/06.072/355>
- Cavalcante, L., et Lago, A. (2005). Ainda moderno? Arquitetura brasileira contemporânea (1) [Moderne encore? Architecture brésilienne contemporaine (1)]. *Vitruvius*. Repéré à <http://www.vitruvius.com.br/revistas/read/arquitextos/06.066/404>
- Claro, A., Concer, C., Silva, D., Uaila, K., Cavalcante, L., et Silva, T. (2008). *LAJES : definições, aplicações e técnicas construtivas* [DALLES : définitions, applications et techniques constructives]. Repéré à <http://docplayer.com.br/1991466-Lajes-definicoes-aplicacoes-e-tecnicas-construtivas.html>

- Costa, L. (1995). *Lucio Costa: Registro de uma vivencia* [Lucio Costa : l'enregistrement d'une expérience]. São Paulo, Brésil: Empresa das Artes.
- Dores, P., Lage, E. et Processi, L. (2012). A retomada da indústria naval brasileira [La reprise de l'industrie navale brésilienne]. Dans F. Sousa, *BNDES 60 anos: perspectivas setoriais* (1^{re} éd., vol. 1, p. 274-299). Rio de Janeiro, RJ: BNDES. Repéré à http://www.bndes.gov.br/SiteBNDES/export/sites/default/bndes_pt/Galerias/Arquivos/conhecimento/livro60anos_perspectivas_setoriais/Setorial60anos_VOL1ConstrucaoNaval.pdf
- Dubos, R. (1973). *L'homme et l'adaptation au milieu*, (traduit par L. Jospin), Paris, Payot.
- Eggers-Lura, A. (1980). *Feasibility study on a solar house heating system with a low quality thermal flow* (text No. 137-76-ESDK) (p. 232). COMMISSION OF THE EUROPEAN COMMUNITIES: A/S International Solar Power Co. Ltd. — DK-2820 Gentofte.
- Ehrenkrantz, E. D. (1989). *Architectural Systems: A Needs, Resources, and Design Approach*. New York: Mcgraw-Hill.
- Ferreira, J. (2012). *Produzir casas ou construir cidades? Desafios para um novo Brasil urbano*. [Produire des maisons ou construire des villes? Défis pour un nouveau Brésil urbain]. (1^{re} éd.). São Paulo, SP: LABHAB, FUPAM. Repéré à <http://cidadesparaquem.org/textos-acadmicos/2013/2/7/jhsvikabs>
- Habraken, J. N. (1976). *Variations: the systematic design of supports*. (édité par Sue Gibbons). Dwellling, Pays-Bas, Cambridge, Mass. : Laboratory of Architecture and Planning.
- Habraken, J. N. (1999). *Supports: an alternative to mass housing* (2e éd.). Royaume-Uni, Urban International Press.
- Holanda, A. (1976). *Roteiro para construir no nordeste*. [Script pour construire au nord-est] (Séries Estudos Urbanológicos, vol. 7). Recife, PE: Programa de Pós Graduação em Desenvolvimento Urbano da Faculdade de Arquitetura - UFPE. Repéré à <http://documents.tips/documents/roteiro-para-construir-no-nordestepdf.html>
- Jaillon, L., Poon, C. et Chiang, Y. (2009). Quantifying the waste reduction potential of using prefabrication in building construction in Hong Kong. *Waste Management*, 29(1), 309-320. <http://doi.org/10.1016/j.wasman.2008.02.015>

- Junior, R. A. (2011). Da arte como civilização e outras lições da renascença brasileira: Ricardo Severo e a arte tradicional no Brasil (1914). [De l'art comme civilisation et d'autres leçons de la renaissance brésilienne: Ricardo Severo et l'art traditionnel au Brésil, 1914] *Universidade Federal de Goiás: Faculdade de História*, 16(1), p. 211-229. <http://doi.org/http://doi.org/10.5216/hr.v16i1.14709>
- Leitão, M. (2005). Gesso : Conhecimento e uso na engenharia [Plâtre : connaissance et usage dans l'ingénierie] (p. 8). Présenté à XXXIII COBENGE - Congresso Brasileiro de Ensino de Engenharia, Campina Grande, PB, Brésil : ABENGE/UFPE. Repéré à <http://www.abenge.org.br/CobengeAnteriores/2005/artigos/PE-6-05252903468-1118682928924.pdf>
- Lima, A. C. (2012). A utilização de plásticos na construção civil. [L'utilisation de plastiques dans la construction civile]. Présenté à XL Congresso Brasileiro de Educação em Engenharia, Belém, PA, Brésil : COBENGE. Repéré à <http://www.abenge.org.br/CobengeAnteriores/2012/artigos/104468.pdf>
- Lino, F. A. (2005). Construção civil rumo à Industrialização [La construction civile en vue de l'industrialisation]. Dans *Inovação em construção civil - coletânea de artigos 2005* (p. 88). Brésil, Uniemp.
- Loi n^o 210 (2006). Conselho Nacional de Trânsito [Conseil National de Transport]. Repéré à <http://www.deinfra.sc.gov.br/download/aet/leis/resolucao-210.pdf>
- Loi n^o 16292 (1997). Edificações e instalações no município do Recife [Bâtiments et des installations à la municipalité de Recife]. Repéré à <http://www.legiscidade.recife.pe.gov.br/lei/16292/>
- Lucena, P. (2012). O que determina o preço de um apartamento em Recife? [Qu'est-ce que détermine le prix d'un appartement à Recife?] [Billet de blogue]. Repéré à <http://acertodecontas.blog.br/financiamento-imobiliario/o-que-determina-o-preo-de-um-imvel-em-recife/>
- Lukiantchuki, M., Caixeta, M., Fabricio, M., et Caram, R. (2011). Industrialização da construção no Centro de Tecnologia da Rede Sarah - CTRS [L'industrialisation de la construction dans le Centre de technologie du réseau Sarah - CTRS]. *Vitruvius*. Repéré à <http://www.vitruvius.com.br/revistas/read/arquitextos/12.134/3975>
- Marques, S., et Naslavsky, G. (2011). Eu vi o modernismo nascer... foi no Recife [J'ai vu le modernisme naître... il a été à Recife]. *Vitruvius*. Repéré à <http://www.vitruvius.com.br/revistas/read/arquitextos/11.131/3826>

- Mascaro, L. (2008). *Difusão da arquitetura neocolonial no interior paulista, 1920-1950* [La diffusion de l'architecture néocoloniale à l'intérieur de São Paulo]. (Thèse de doctorat, Universidade de São Paulo, Brésil). Repéré à <http://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/18/18142/tde-06082008-102451/>
- Medeiros, E. (2011). *Inovação na construção de edifícios residenciais : uma análise das empresas do segmento localizadas em Recife-PE* [L'innovation dans la construction d'édifices résidentiels : une analyse des entreprises du secteur situées à Recife-PE]. (Thèse de doctorat, Universidade Federal de Pernambuco, Brésil). Repéré à <http://www.ppgep.org.br/dissertacoes/MA-0227.pdf>
- Meirelles, C., Dinis, H., Segall, M., et Sant'Anna, S. (2007). Considerações sobre o uso da madeira no Brasil em construções habitacionais [Considérations sur l'usage du bois au Brésil dans les constructions habitationnelles] (p. 6). Présenté à III FÓRUM DE PESQUISA, São Carlos, SP, Brésil: FAU.MACKENZIE. Repéré à http://www.mackenzie.com.br/fileadmin/Graduacao/FAU/Publicacoes/PDF_IIIForum_a/MACK_III_FORUM_CELIA_REGINA.pdf
- Mello, G. (2011). Tendências do mercado imobiliário de Recife [Les tendances du marché immobilier à Recife]. [Billet de blogue]. Repéré à <http://www.institutomaucio denassau.com.br/blog/tendencias-do-mercado-imobiliario-de-recife/>
- Montezuma, R. (2002). *Architecture Brasil 500 anos: a reciprocal invention* (vol. 1), p. 328. Recife, PE, Brazil: Universidade Federal de Pernambuco.
- Morais, J. et Labaki, L. (2013). *Ventilação natural em edifícios multifamiliares do « Programa Minha Casa Minha Vida »* [La ventilation naturelle en édifices multifamiliaux du programme « Ma Maison, Ma Vie »]. (Thèse de doctorat, Universidade Estadual de Campinas, Brésil). Repéré à <http://www.bibliotecadigital.unicam.br/document/?code=000928599>
- Moreira, F., et Freire, A. C. (2011). O Edifício-quintal de Wandenkolk Tinoco [L'édifice-cours de Wandenkolk Tinoco]. *Vitruvius*. Repéré à <http://www.vitruvius.com.br/revistas/read/arquitextos/11.129/3749>
- Naslavsky, G. (2005). Escola Pernambucana ou Tradição Inventada? A construção da história da arquitetura moderna em Pernambuco, 1945-1970 [L'école de Pernambuco ou tradition inventée? La construction de l'histoire de l'architecture moderne en Pernambuco, 1945-1970] (p. 21). Présenté à Moderno e Nacional, 6^e Séminaire DOCOMOMO-Brasil, Niteroi, RJ, Brésil : DOCOMOMO-Brasil. Repéré à <http://www.docomomo.org.br/seminario%206%20pdfs/Ghilah%20Naslavsky.pdf>

- Obrvatório das Metrôpoles. (2006). *Como anda a Região Metropolitana do Recife* (Análise das Regiões Metropolitanas do Brasil) [Comment est la Région Métropolitaine du Recife (Analyse des Régions Métropolitaines du Brésil)] (p. 128). Recife, PE, Brésil. Repéré à http://www.observatoriodasmetropoles.ufrj.br/como_anda/como_anda_RM_recife.pdf
- Oliveira, A. B. (2013). *Inserção de sistemas construtivos industrializados de ciclo aberto extrudados em aço no mercado da construção civil residencial brasileira* [L'insertion de systèmes constructifs industrialisés ouverts extrudés en acier dans le marché de la construction résidentielle brésilienne]. (Mémoire de maîtrise, Universidade Federal de Ouro Preto, Brésil). Repéré à <http://www.propec.ufop.br/upload/tese200.pdf>
- Oliveira, C. (1997). As principais características da mão-de-obra da construção civil que interferem na filosofia da qualidade [Les principales caractéristiques de la main-d'œuvre qui interfèrent avec la philosophie de la qualité]. Présenté à 17^e Encontro Nacional de Engenharia de Produção/ ENEGEP, Porto alegre, RS, Brésil : UFRGS/PPGEP. Repéré à http://www.abepro.org.br/biblioteca/ENEGEP1997_T3302.PDF
- Oliveira, R. (2013). La construction de Suape, des ouvriers qui luttent : le nouveau développement et les conflits du travail. *Caderno CRH*, 26(68), p. 233-252. <http://doi.org/10.1590/S0103-49792013000200003>
- Pinho, F., et Penna, F. (2008). *Viabilidade Econômica* [La Viabilité Économique]. Rio de Janeiro, RJ, Brésil : Instituto Brasileiro de Siderurgia (IBS). Centro Brasileiro da Construção em Aço (CBCA). Repéré à http://lacoferro.com.br/downloads /13_cbca_viabilidade_economica.pdf
- Prior, R. C. (1993). *Identification and preliminary assessment of existing precast concrete floor framing systems* (Mémoire de maîtrise, Lehigh University, Bethlehem, U.S.A). Repéré à <http://preserve.lehigh.edu/etd/213>
- Rapoport, A. (1972). *Pour une Anthropologie de la Maison*. Paris, Dunond. Repéré à <http://www.babelio.com/livres/Rapoport-Pour-une-anthropologie-de-la-Maison/685683>
- Reynaldo, A., Alves, P., Fernandes, A., et Nova, R. (2013). *Origem da expansão do Recife: divisão do solo e configuração da trama urbana* [L'origine de l'expansion de Recife : la division du sol et la configuration de la trame urbaine]. Communication présentée au V^e Seminario Internacional de Investigación en urbanismo, Barcelona, Buenos Aires. Repéré à <http://upcommons.upc.edu/handle/2099/14495>

- Ribeiro, M. (2002). *A industrialização como requisito para a racionalização da construção* [L'industrialisation comme critère pour la rationalisation de la construction] (Mémoire de maîtrise, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Brésil). Repéré à http://www.poli.ufrj.br/leecamb/Arquivos_para_Download/Dissertacao_Marcellus_Sere_Ribeiro.pdf
- Richard, R.-B. (2002). Prospective Building Systems for Developing Countries. Communication présenté à *Conférence Internationale du CIB Creating a Sustainable Construction Industry in Developing Countries* (p. 247-255), Spier, Afrique du Sud.
- Richard, R.-B. (2007). A Generic Classification of Industrialised Building Systems. Dans A. S. Kazi, M. Hannus, S. Boudjabeur, et A. Malone (dir.), *Open Building Manufacturing. Core Concepts and Industrial Requirements* (p. 33-48). Finland: ManuBuild in collaboration with, VTT – Technical Research Centre of Finland. Repéré à <http://www.cinark.dk/archive/media/303.pdf>
- Richard, R.-B. (2010). Four Strategies to Generate Individualised Building within Mass Customization. Dans G. Girmsheid & F. Scheublim (dir.), *New Perspective in Industrialisation in Construction - A State-of-the-Art Report* (vol. 329, p. 79-89). Zurich : CIB and ETH. Repéré à http://site.cibworld.nl/dl/publications/tg57_pub329.pdf
- Richard, R.-B. (2012). *Loger le plus grand nombre : critères et typologies de l'habitation*. École d'architecture, Université de Montréal. Révisé (p. 17). Document inédit.
- Richard, R.-B. et Tadafi, T. (2011). Numéro spécial dédié aux Systèmes constructifs industrialisés. *Magazine FORMES*, 7(3), p. 8-54. Repéré à <http://www.formes.ca/pdf/pictures/formesV7N3.pdf>
- Seingier, H., et Barros, A. (2012). Brésil, « Avoir ma maison, c'était mon rêve » [texte]. Repéré à http://www.liberation.fr/planete/2012/12/23/bresil-avoir-ma-maison-c-etait-mon-reve_869686
- Serra, S., Ferreira, M., et Pigozzo, B. (2005). Evolution of Precast Concrete Systems (p. 10). Présenté à 1^e Encontro Nacional de Pesquisa-Projeto-Produção em Concreto Pré-moldado, São Carlos, SP, Brésil: Núcleo de Estudos e Tecnologia em Pré-moldados (NET-PRÉ), Departamento de Engenharia Civil da Universidade Federal de São Carlos. Repéré à http://www.set.eesc.usp.br/1enppcpm/cd/conteudo/trab_pdf/164.pdf
- Siahkolah, H. (1977). *Industrialized housing systems: background and evaluation* (Mémoire de maîtrise, Concordia University, Montréal). Repéré à <http://spectrum.library.concordia.ca/3474/>

- Siham, S. (2013). Raffinerie Abreu e Lima: Le Brésil toujours en négociations avec le Venezuela. *Sarl Maghreb Presse*. Kouba, Alger. Repéré à http://www.lemaghreb.dz.com/?page=detail_actualite&rubrique=international&id=55222
- Simões, R., et Moreira, F. (2011). Valores da arquitetura contemporânea em Pernambuco: os escritórios Marco Antonio Borsoi, MI&N Arquitetos, oNorte Oficina de Criação, Rangel Moreira Arquitetura e Bruno Ferraz [Les valeurs de l'architecture contemporaine en Pernambuco : les bureaux Marco Antônio Borsoi, MI&N Architectes, oNorte atelier de création, Rangel Moreira et Bruno Ferraz] (p. 4). Présenté à XIX CONIC, III CONITI, VII JOIC, Recife, PE, Brésil : CTG - UFPE. Repéré à <http://www.contabeis.ufpe.br/propeq/images/conic/2011/conic/pibic/60/11061083PO.pdf>
- Siqueira, R. (2007). A arquitetura contemporânea em Pernambuco : as contribuições de Wandenkolk Tinoco e Alexandre de Castro e Silva [L'architecture contemporaine en Pernambuco : les contributions de Wandenkolk Tinoco et d'Alexandre Castro e Silva] (p. 4). Présenté à XV CONIC - Congresso de Iniciação Científica da UFPE, Recife, PE, Brazil.
- Smith, R., et Freitas, M. (2008). Estudo para a preservação da arquitetura moderna na cidade do Recife (1930 a 1960) [Étude pour la préservation de l'architecture moderne à Recife (1930 à 1960)]. (p. 20). Présenté au 2^e Séminaire DOCOMOMO-Brasil N-NE, Salvador, BA, Brésil : DOCOMOMO-Brasil. Repéré à http://www.docomomobahia.org/AF_Marcelo%20Freitas%20e%20Roberta%20Smith_1.pdf
- Souza, M., Ramalho, A. M., Santiago, G., Allgayer, M., et Menezes, L. (2012). *Os impactos da Copa do Mundo 2014 e das Olimpíadas 2016. Relatório parcial Recife abril de 2012* [L'impact de la Coupe du Monde 2014 et des Jeux Olympiques 2016. Rapport partiel Recife avril 2012] (p. 14). Recife, PE, Brésil : UFPE - Universidade Federal de Pernambuco, MDU. Repéré à <http://docplayer.com.br/4184063-Projeto-metropolizacao-e-megaeventos-os-impactos-da-copa-do-mundo-2014-e-das-olimpiadas-2016-relatorio-parcial-recife-abril-de-2012.html>
- Travaux publics et Services gouvernementaux Canada. (2000). *Devis directeur national - Guide d'utilisation* (p. 55). Canada. Repéré à <http://www.innovative.ca/downloads/Support/ug2000-f.pdf>
- Vieira, T. (2013). Condomínio fechado de casas é minoria [Condo de maisons privé est minorité]. Repéré à <http://www3.folhape.com.br/cms/opencms/folhape/pt/economia/imoveis/arqs/2013/07/0006.html>
- White, J. (1970). L'approche Systémique : Les étapes de l'élaboration d'un système, 1(3).

Zenid, G., et al. (2009). *Madeira : uso sustentável na construção civil* [Bois : l'usage durable dans la construction civile] (2^e éd.). São Paulo, SP, Brésil : Instituto de Pesquisas Tecnológicas (IPT) ; 3010. Repéré à <http://a3p.jbrj.gov.br/pdf/madeira.pdf>

Zirah, A. (2014). L'Exposition universelle, c'est quoi?. Repéré à <http://www.francesoir.fr/culture-art-expo/lexposition-universelle-cest-quoi>