



HAL
open science

Vers une conception parasismique de l'espace architectural Analyse d'un édifice post-Kobe : la médiathèque de Sendai

Alexandre de La Foye

► To cite this version:

Alexandre de La Foye. Vers une conception parasismique de l'espace architectural Analyse d'un édifice post-Kobe : la médiathèque de Sendai. Architecture de la catastrophe - Lieux et rituels de l'utopie et de la dystopie, LeaV, Ecole nationale supérieure d'architecture de Versailles (France); LEAP, Faculté de l'aménagement, Ecole d'Architecture, Université de Montréal (Canada), Oct 2018, Versailles, France. hal-02327376

HAL Id: hal-02327376

<https://hal.science/hal-02327376v1>

Submitted on 25 Oct 2019

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.



Distributed under a Creative Commons Attribution - NonCommercial - NoDerivatives 4.0 International License

Vers une conception parasismique de l'espace architectural

Analyse d'un édifice post-Kobe : la médiathèque de Sendai

A. de la Foye, professeur à l'Ensa Nantes, chercheur à l'UMR AAU

Le séisme de Kobe du 17 janvier 1995, dont l'intensité au cœur de l'agglomération a atteint la valeur de 7 sur l'échelle macrosismique japonaise (plus haute valeur possible), a constitué un choc d'autant plus terrible pour la population japonaise que cette dernière se croyait mieux préparée à ce type d'évènement. L'ampleur des dommages (environ 6000 morts, 37000 blessés et 310 000 personnes évacuées¹) est due à de nombreux facteurs : méconnaissance des jeux de faille à proximité de Kobe, inadéquation de certaines normes de construction, incendies causés par la rupture de conduites de gaz, retard des secours...). Ce séisme a eu un impact majeur sur les politiques de mitigation du risque sismique à Kobe (urbanisme de la reconstruction intégrant très explicitement le risque incendie et la gestion de crise post-catastrophe) et dans tout le pays (renouvellement du code parasismique japonais et augmentation exponentielle du nombre de bâtiments équipés d'isolateurs parasismiques).

Nous formulons l'hypothèse selon laquelle cette catastrophe a également eu un impact significatif immédiat sur les pratiques du projet architectural au Japon. Nous nous appuyons pour cela sur l'analyse d'un projet emblématique dont les premières études ont démarré dans les semaines qui ont suivi le séisme de Kobe : la médiathèque de Sendai, conçue par l'architecte Toyo Ito. Si ce dernier n'a jamais revendiqué l'intégration du risque sismique dans sa pratique, ni théorisé sur la façon dont il pourrait contribuer à la renouveler, sa collaboration avec l'ingénieur Mutsuro Sasaki semble avoir produit un jalon majeur dans l'histoire de l'architecture parasismique.

L'analyse est structurée autour de cinq thèmes majeurs du génie parasismique : régularité en plan, régularité en élévation, diaphragmes horizontaux, masses et ductilité. Nous tenterons ainsi de montrer comment la dimension parasismique est indissociable d'un projet qui manifeste avant tout la volonté d'Ito de faire évoluer le plan libre à travers la production d'un continuum spatial, « milieu »² homogène mais non uniforme (aquatique ou forestier selon les métaphores utilisées par l'architecte³), offrant une multitude de lieux singuliers et mouvants.

Régularité en plan

À chaque étage, les coordonnées et diamètres des treize colonnes semblent être distribués de manière aléatoire. De même que les positions et dimensions des arbres d'une forêt obéissent à des lois de probabilité conditionnées par des règles physiques et biologiques, celles des colonnes sont partiellement conditionnées par deux grands impératifs structuraux obéissant à leurs propres logiques : la transmission des charges gravitaires et celle des charges sismiques latérales.

Au cours du processus de conception, a fortiori dans un contexte de forte sismicité, il est pratique de dissocier clairement les éléments de structure verticaux dédiés uniquement à la reprise de charges gravitaires de ceux également dédiés à la reprise des charges latérales. Cette « spécialisation » des éléments de structure verticaux facilite le travail de dimensionnement de l'ingénieur mais aussi celui de l'architecte qui peut alors manipuler plus librement et simplement ces éléments.

À Sendai, la reprise des charges latérales a été confiée aux quatre colonnes d'angle (fig.1) : de plus grands diamètres, composés de tubes de plus grandes sections et triangulées, elles représentent l'intégralité des rigidités et résistances latérales. De par leurs positions elles définissent autant les arêtes de la « coupe tridimensionnelle d'un continuum forestier » (en référence à la métaphore employée par l'architecte lui-même⁴), qu'elles appartiennent à ce dernier.

¹ http://www.planseisme.fr/IMG/pdf/12005_seismes_07-2012_light.pdf

² Lucan, 2016

³ Toyo Ito, 2006, cité dans J. Lucan, 2016

⁴ Ibidem

Les autres colonnes, déchargées de cette fonction très contraignante, ont donc pu être dimensionnées et positionnées plus librement, d'autant que leurs morphologies leur confèrent des capacités portantes naturellement élevées et modulables.



Figure 1 – Colonnes assurant la reprise des charges horizontales en orangé, colonnes n'assurant que la descente des charges gravitaires en bleu. Photomontage d'après photo de chantier tirée de [3].

D'un point de vue mécanique, la forme circulaire des sections transversales (plutôt qu'elliptique comme initialement envisagé par Ito⁵) permet à chaque colonne de fonctionner de façon isotrope. Ainsi, avec seulement quatre éléments de structure verticaux affectés aux charges latérales, l'édifice dispose, dans le plan horizontal, de huit blocages de degrés de liberté en translation et quatre en rotation, ce qui lui confère un fort degré d'hyperstaticité. Ainsi, d'éventuelles défaillances locales en cas de séisme majeur ne remettraient pas en cause la stabilité d'ensemble.

Surtout, la localisation des quatre colonnes d'angles est optimale à double titre : le barycentre de leurs rigidités, proche du centre de gravité du bâtiment, minimise les actions de torsion provoquées par les secousses sismiques (faible couple agissant) tandis que leur éloignement les unes des autres maximise leur capacité à s'y opposer (fort couple résistant). Conjuguée à l'action favorable des diaphragmes horizontaux, cette distribution « régulière en plan » des rigidités latérales permet non seulement de réduire les charges globales à reprendre mais aussi de les répartir de façon équitable sur les quatre colonnes.

Régularité en élévation

En élévation, les colonnes ondulent, se contractent ou se dilatent légèrement. Parallèlement, les étages de faible hauteur (de 3,50 à 4,20 m) alternent avec ceux de grande hauteur (de 5,00 à 6,90 m), à la manière d'une onde de compression se propageant à la verticale. Ces variations progressives et continues permettent de proposer à chaque niveau, sans ruptures, des espaces aux qualités bien spécifiques conformes à la volonté d'homogénéité non uniforme.

Synthèses de la colonne servante de Kahn et de la colonne évanescence du pavillon de Mies, ces structures, creuses et translucides, participent au continuum spatial dans la troisième dimension en accueillant ascenseurs et escaliers, contribuant aux flux d'air ou de lumière naturelle et reliant visuellement les étages.

⁵ D'après des échanges de fax entre Ito et Sasaki publiés dans F. Migayrou et al (2017)

Ces variations géométriques ne nuisent aucunement au fonctionnement mécanique des neuf colonnes dédiées aux charges gravitaire : le caractère rectiligne de chaque segment de tube, associé à des liaisons aux nervures des plateaux articulées et centrées, favorisent un fonctionnement en compression pure ; en outre, les diamètres des colonnes annulent tout risque de flambement et la transmission directes des charges gravitaires jusqu'aux fondations est assurée par la continuité des colonnes.

Mais l'enjeu structural majeur réside dans la transmission des charges sismiques, un comportement dynamique favorable de l'édifice étant fortement conditionné par :

- une transmission la plus directe possible des charges latérales jusqu'aux fondations,
- des masses et rigidités latérales de valeurs constantes ou progressivement décroissantes des niveaux inférieurs aux niveaux supérieurs.

À l'instar des transmissions des charges gravitaires, celles des charges latérales sont directes, sans aucune discontinuité jusqu'aux fondations.

Les masses des plateaux sont sensiblement identiques à chaque étage et les masses linéiques des colonnes sont presque constantes sur toute la hauteur du bâtiment (les variations de diamètres n'ont pas d'influence notable) ; les masses structurales sont donc réparties très régulièrement du premier au dernier niveau. Quant aux masses d'exploitation, elles obéissent globalement à une logique de décroissance progressive, les lieux de stockage étant plutôt situés au sous-sol, les rayonnages de livres dans les étages inférieurs et les activités plus « légères » dans les étages supérieurs.

Pour chaque colonne d'angle, le moment d'inertie d'une section transversale, caractéristique de la rigidité latérale, peut être considéré comme proportionnel au cube du diamètre. Si les évolutions des rigidités de chaque colonne peuvent, parfois, sembler défavorables, elles se compensent toutefois les unes les autres selon une logique d'adaptation quasi biologique, de telle sorte que l'évolution globale des rigidités est continument décroissante (fig. 2).

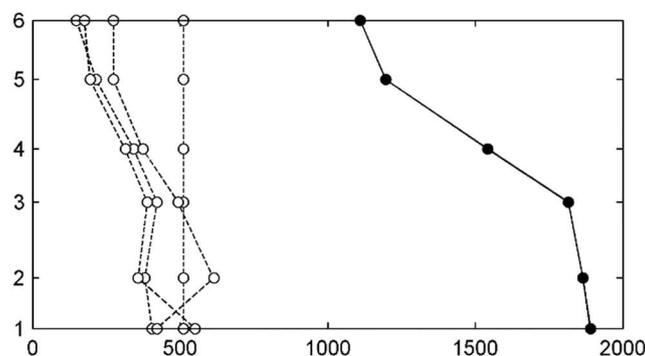


Figure 2 – Évolution des rigidités (diamètres au cube) des colonnes d'angles en fonction de la hauteur (numéro de niveau). Les courbes en traits pointillés représentent les rigidités de chaque colonne. La courbe en trait continu en représente la somme.

Enfin, les planchers, de par leur très faible rigidité en flexion vis-à-vis de celle des colonnes, ont une influence très faible sur les déformations de ces dernières, ce qui, associé à la très grande rigidité au cisaillement des colonnes, contribue à rendre inoffensives les variations, parfois très marquées, de hauteurs d'étages.

Diaphragmes horizontaux

En cas de séisme, chaque plancher a pour fonction de récolter l'ensemble des charges latérales et de les transmettre aux éléments verticaux capables de les transmettre aux fondations. Ce rôle de « diaphragme horizontal » est d'autant mieux assuré que la rigidité dans son plan est élevée vis-à-vis de celle des éléments verticaux recevant les charges latérales. Il est en particulier préjudiciable que des trémies, de par leurs dimensions ou localisations, affectent cette capacité de transmission. Le problème

est ici résolu naturellement par la localisation des circulations verticales dans les colonnes creuses : à l'exception d'une trémie d'escaliers mécaniques dans les planchers hauts des 1^{er} et 2^e étages, aucune autre ne vient donc perturber le cheminement des lignes de forces, des colonnes centrales aux colonnes d'angles. Enfin, le principe structural du caisson, réalisé avec des nervures très resserrées, confère naturellement aux diaphragmes une grande rigidité dans leur plan.

Masse des plateaux

Les forces d'inertie induites par les vibrations du sol étant proportionnelles à la masse de l'édifice sollicité, l'allègement des plateaux représentait un enjeu majeur. La double nécessité de donner à chaque colonne creuse un diamètre suffisant pour assurer ses fonctions servantes et trouver, entre le plein des colonnes et les vides qui les séparent, un équilibre compatible avec l'exigence de fluidité spatiale, limitait la possibilité de réduction des masses de planchers par le biais de la diminution des portées⁶.

La réponse à cet enjeu commence par une organisation des 13 colonnes selon trois bandes parallèles. Si, sur une même bande, les colonnes sont proches (et parfois même se frôlent), les portées à franchir entre bandes sont comprises entre 14 et 18 m. Ces distances pourraient être qualifiées de modestes si elles étaient franchies par des poutres primaires de grande inertie. Mais la volonté de continuum spatial imposait de préserver la planéité des sous-faces de plancher tout en minimisant leur épaisseur.

D'autres éléments de stratégie ont donc été conjointement mis en œuvre dans le but de répondre à cette problématique et conférer aux plateaux une masse surfacique de l'ordre de 300 kg/m² et une épaisseur uniforme de 47 cm.

La première est d'avoir opté pour l'acier, matériau de structure présentant le meilleur ratio masse/rigidité. Son potentiel de performance est encore accru par les nombreuses possibilités (grâce à une main d'œuvre très qualifiée issue de la construction navale) de façonnage et d'optimisation des épaisseurs de parois.

La seconde est d'avoir opté pour une structure de type caisson (fig. 3A), parfaitement adaptée aux appuis larges offerts par les colonnes creuses et dont le faible entraxe entre nervures (1 m) permet une collaboration optimale entre ces dernières et les tôles hautes et basses (membrures tendues ou comprimées) dans les directions principales de franchissement.

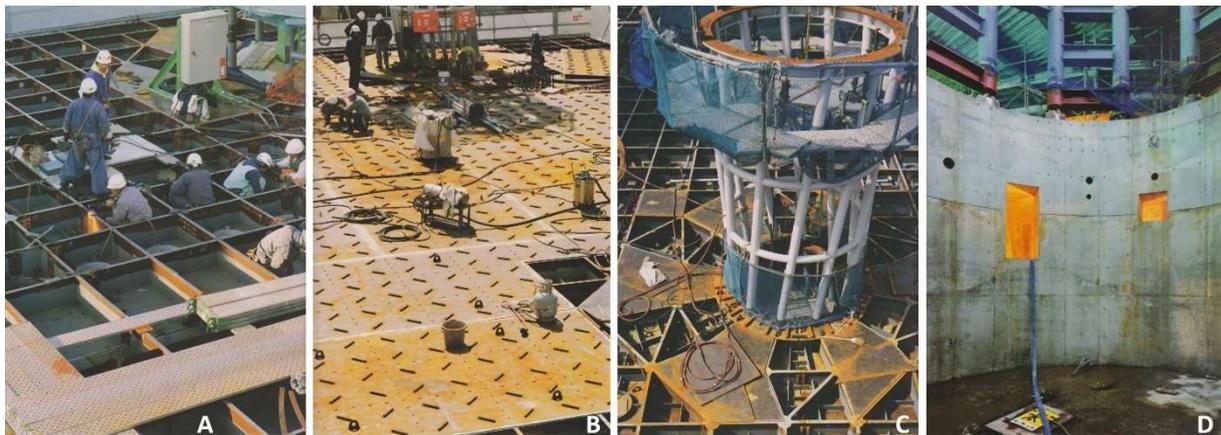


Figure 3 – Partie courante d'un plancher caisson avant pose de la membrure supérieure (A). Tronçons de fers à béton, faisant office de connecteurs « en cisaillement », soudés sur la membrure supérieure d'un plancher caisson (B). Nervures rayonnantes et concentriques à proximité d'une colonne creuse « centrale » (C). Soubassement en béton armé et portiques à traverses ductiles situés à l'aplomb d'une des quatre colonnes d'angle (D). Photos de N. Hatakeyama extraites de [3].

⁶ J. Ishigami, confronté 10 ans plus tard à des enjeux analogues avec le KAIT, profitera de la faible emprise spatiale de ses colonnes lamelliformes pour les rapprocher à l'extrême et alléger d'autant sa toiture

La troisième est d'avoir profité du caractère circulaire des appuis pour faire des nervures concentriques qu'ils génèrent des anneaux de compression capables de s'opposer à la rotation des nervures radiales (fig. 3C). La combinaison de l'articulation de chaque nervure à son appui (un anneau de section H formant intersection entre colonne et plancher) et le blocage en rotation déjà mentionné constitue donc un encastrement et augmente fortement la rigidité des éléments de franchissement (tout en évitant la transmission de moments de flexion aux appuis).

La quatrième est d'avoir joué de la proximité des colonnes d'une part et du principe de croisement des nervures du caisson d'autre part pour faire de chaque bande une surface d'appui continue dont la rigidité élevée et la largeur peuvent être assimilées, en première approche, à une réduction des portées effectives des nervures qui les relient (fig. 4).

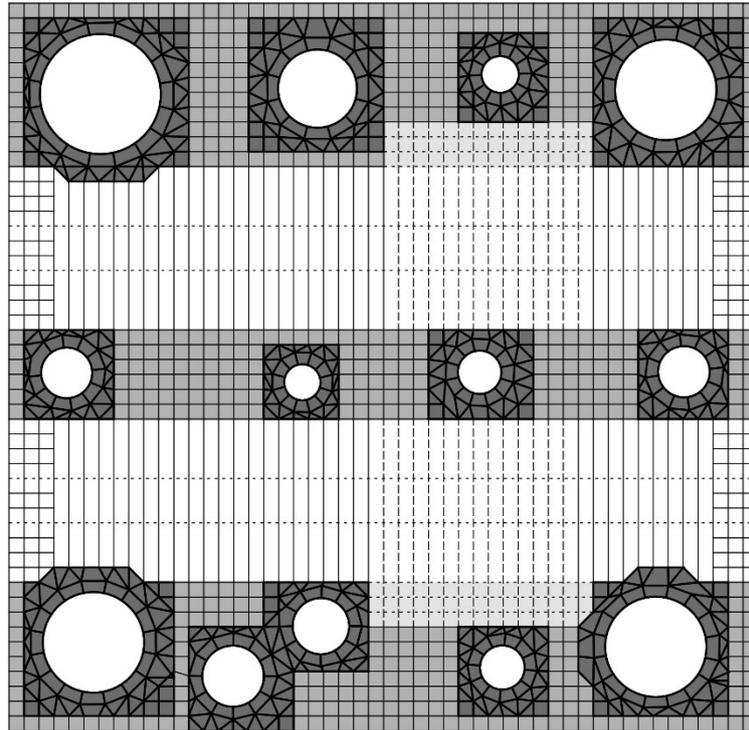


Figure 4 – Structure du plancher haut du 5e niveau. Les trois bandes d'appui sont représentées en gris. Les zones en gris foncé représentent les parties de planchers préfabriquées en atelier et situées à proximité directe des colonnes creuses. Les traits en pointillés longs représentent les nervures de plus grandes portées ; ces dernières sont « atténuées » par des nervures transversales (pointillés courts sur fond blanc) qui transfèrent une partie des charges sur les nervures de portées plus courtes et d'autres (pointillés courts sur fond gris clair) qui contribuent à la rigidification des zones d'appui éloignées des colonnes.

La dernière est d'avoir fait collaborer la dalle de béton allégé (couche supérieure de 7 cm d'épaisseur) grâce à la mise en place d'un réseau de connecteurs « en cisaillement »⁷ faits de simples tronçons de fers à béton soudés à plat sur la paroi supérieure du caisson (fig. 3B).

Ductilité

La plupart des assemblages de la superstructure ont été réalisés par soudage en atelier mais aussi, dans une large mesure, sur le chantier lui-même. Ce choix répond d'abord à la volonté de continuum spatial, aucun joint ou élément saillant ne devant perturber la continuité de la matière. Il reflète en même temps la volonté de maintenir l'intégralité de la superstructure dans le domaine élastique (c'est-à-dire intacte) en cas de séisme majeur. Au-delà, il témoigne d'une volonté de déplacer le curseur du côté du travail de

⁷ Traduction littérale du terme anglais « shear connector »

conception et du façonnage de la matière brute par une main d'œuvre locale plutôt que le recours à des solutions industrielles globalisées et « clé en main ».

Le paradigme dominant du génie parasismique contemporain, auquel la médiathèque ne déroge pas, réside cependant dans le « dimensionnement en capacité » : quelques éléments structuraux sont délibérément conçus pour être endommagés en cas de séisme violent mais continuer à assurer leur fonction grâce à une grande ductilité.

Ces éléments stratégiques sont disposés au 1^{er} sous-sol, à l'aplomb de chaque colonne d'angle et au-dessus de soubassements tubulaires en béton armé situés au 2nd sous-sol (fig. 3D). Chacune de ces structures est composée de 16 montants tubulaires : articulés en pieds, répartis régulièrement autour d'un cercle formant la base de la colonne portée, ils sont connectés entre eux par des traverses dont les sections en H ont des moments d'inertie très inférieurs à ceux des tubes. La grande souplesse de ces structures leur permet, lors de secousses sismiques horizontales, d'absorber une grande partie des déformations imposées et soulager d'autant la superstructure qu'elles supportent. En outre, la grande ductilité des traverses (capacité à se déformer jusqu'à plastification sans rupture), leur permet de dissiper une partie considérable de l'énergie mécanique (ce qui se traduit par une augmentation de température des traverses lors de fortes secousses). Après chaque séisme majeur, ces dernières peuvent être facilement déposées et remplacées.

Ce dispositif « sacrificiel », s'il protège considérablement des vibrations la superstructure en cas de séisme, induit de très grands déplacements relatifs entre la base du bâtiment et le sol environnant. Une bande fusible intégrée dans le calepinage du sol urbain (fig. 5) permet donc de les absorber, tout en marquant une subtile limite entre la médiathèque et l'espace public, dans le continuum du sol urbain. Ainsi, ce pur dispositif d'ingénierie, non visible et non accessible au public, n'est pas totalement exclu de l'architecture qu'il sert.



Figure 5 – Intégration du joint parasismique dans le calepinage du sol urbain. Photo issue du site internet <http://irwinmiller.com>.

Conclusion

Les colonnes creuses de la médiathèque de Sendai contribuent à une réinvention du système poteau-dalle en conjuguant les idéaux formels et fonctionnels du plan-libre à un système structural à la fois flexible (grâce à une dissociation des fonctions de reprises des charges latérales et de reprise des charges gravitaires) et rationnel (grâce à la linéarité des appuis offerts à la dalle et les performances mécaniques latérales isotropes naturelles des colonnes).

En tant que structures servantes elles contribuent simultanément, en plus de l'accueil des flux verticaux (usagers, air et lumière naturelle), à la continuité mécanique des diaphragmes formés par les plateaux et à la création « de plans et espaces continus et ininterrompus »⁸.

Leur nature même, faite d'épaisseur, de rondeur et de translucidité, associée à leur flexibilité spatiale, concoure enfin à la constitution d'un espace homogène (un « milieu » miesien⁹) mais non uniforme car libéré de sa grille cartésienne.

Les colonnes creuses, présentes dès les premières esquisses et objets d'une conception partagée entre Ito et Sasaki, comme en témoignent leurs échanges de fax¹⁰, semblent donc avoir joué un rôle central dans l'intégration des enjeux sismiques dans ce projet d'architecture. Il est même probable que les contraintes de régularité induites par la conception parasismique, en épurant le design des colonnes de tout formalisme superflu, ait permis à ces dernières de « se trouver ».

Si la médiathèque a rapidement acquis le statut d'icône de l'architecture contemporaine, sa première mise à l'épreuve d'un séisme violent a eu lieu dix ans après son inauguration : le séisme du Tohoku du 11 mars 2011, d'une intensité 6+ sur l'échelle macrosismique japonaise (deuxième plus forte possible) dans la préfecture de Miyagi, a fortement sollicité la médiathèque mais n'a causé aucun dommage humain ou matériel à l'exception de la chute d'un faux plafond.

Ouvrages cités :

[1] Lucan J. (2016). *Précision sur un état présent de l'architecture*, PPUR.

[2] Migayrou F. et al. (2017). *Japan-ness*, Centre Pompidou-Metz.

[3] Hatakeyama N. et Ito T (2001). *Under Construction*, Kenchiku Shirio Kenkyusha Co.

⁸ Ito, 2001, cité dans Lucan, 2016

⁹ Lucan, 2016

¹⁰ F. Migayrou et al., 2017