

# Chapitre 1

## Revue de littérature

Ce chapitre présente les principales recherches antérieures effectuées sur les SRFS à faible dommage pour les structures en béton armé et en acier et leur évolution jusqu'aux structures en bois. Une description de la philosophie de conception à faible dommage est d'abord proposée.

### 1.1 Conception à faible dommage

La philosophie de conception parasismique à faible dommage a été mise en place pour minimiser les coûts associés à la démolition et à la reconstruction des bâtiments suite aux tremblements de terre. L'objectif principal de ce concept immergeant est de réduire les dommages causés à la structure primaire du bâtiment ainsi qu'à sa structure secondaire tout en assurant la préservation de la vie et la sécurité des occupants et du public. Suite aux événements majeurs, les bâtiments devront être réutilisables ou réparables à faibles coûts selon le niveau de performance choisi lors de la conception. La Figure 1.1 présente les différents niveaux de performance proposés par le rapport Buchanan (CERC, 2013).

Ces objectifs sont atteints par différentes techniques de conception : isolation de la base du reste du bâtiment, ajout d'amortissement dans la structure et conception soignée des éléments composant le SRFS. Une bonne conception à faible dommage fournira les propriétés suivantes au bâtiment :

- efficacité de réduction des dommages causés aux structures primaire et secondaire ;
- possibilité de réparation du bâtiment ;
- capacité d'auto-centrage de la structure ;
- réduction des dommages causés aux éléments non-structuraux ;
- durabilité de la structure ;
- faibles coûts de réparation.

Earthquake design levels	Earthquake performance levels			
	Fully operational	Operational	Life-safe	Near collapse
	REPAIRABLE		NON-REPAIRABLE	
Frequent (40 years)		Unacceptable	Unacceptable	Unacceptable
Occasional (100 years)		Marginal	Unacceptable	Unacceptable
Rare (550 years)			Unacceptable	Unacceptable
Very rare (2500 years)			Unacceptable	Unacceptable

FIGURE 1.1 – Matrice des niveaux de performance de conception parasismique (CERC, 2013)

Selon le Professeur Nigel Priestly, acteur primaire dans l'élaboration de la conception à faible dommage, l'utilisation d'une conception basée sur les déplacements (Displacement-based design, DBD) est plus appropriée pour cette philosophie de conception parasismique qu'une conception basée sur les forces (Force-based design, FBD) (Priestley *et al.*, 2007). La DBD consiste à représenter la structure étudiée par un système à un degré de liberté avec un amortissement visqueux équivalent. La structure est ensuite caractérisée par une période de vibration équivalente et une rigidité sécante ainsi qu'une hauteur équivalente. En utilisant le déplacement de conception et le spectre de déplacement prescrit par les codes, le cisaillement et le moment de conception à la base de la structure peuvent être déterminés. Pour sa part, la FBD, utilisée dans la majorité des codes, caractérise la structure par sa rigidité initiale et son amortissement élastique. Cette approche est basée sur l'application de forces latérales équivalentes des effets causés par les séismes et le vent en déterminant par la suite les efforts dans les éléments du SRFS ainsi que les déplacements causés par ces forces.

Les recherches dans le domaine de la conception à faible dommage ont mené à des concepts très efficaces et économiques. L'un des premiers systèmes mis en place pour répondre aux objectifs de cette philosophie de conception est le "PREcast Seismic Structural System" (PRESSSS) développé à l'Université de Californie pour les structures en béton (Priestley, 1991). Ce concept, basé sur le principe de basculement de certains éléments du SRFS est présenté en détail dans la prochaine section.

Le concept de PRESSSS a plus tard été repris pour les structures en bois avec des cadres résistant aux forces sismiques en poutre et poteau (Iqbal *et al.*, 2016). Lors d'application d'efforts sismiques, les connexions des cadres agiront de façon cyclique en formant des ouvertures aux extrémités des poutres (Figure 1.2). Les éléments préfabriqués sont connectés entre eux par des câbles de post-tension agissant dans le domaine élastique et par des dissipateurs d'énergie

se plastifiant lors du basculement des éléments. Ce type de connexion fournit une combinaison d'auto-centrage et de dissipation d'énergie à la structure réduisant ainsi les déplacements résiduels et les dommages.

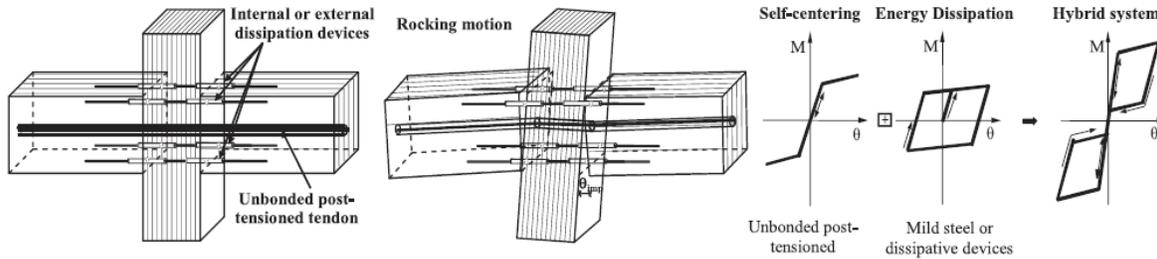


FIGURE 1.2 – Principe de basculement aux connexions d'un cadre résistant aux forces sismiques en bois (Iqbal *et al.*, 2016)

Une autre technique résultant des recherches sur cette philosophie de conception est le concept d'isolation de la base. Cette technique, développée en Nouvelle-Zélande (Skinner *et al.*, 2000) (Buchanan *et al.*, 2011), consiste à découpler la structure de la fondation pour en annuler les effets de déplacement horizontal. Pour fournir cette isolation de la structure, on assoit le bâtiment sur des isolateurs de base qui peuvent prendre la forme de blocs de caoutchouc flexible ou de rouleaux sans friction. Les isolateurs de base en élastomère (caoutchouc) (Figure 1.3(c)) atténuent les grands déplacements du sol pour transférer seulement de petits mouvements à la structure réduisant ainsi grandement les efforts par rapport à une structure reposant directement sur le sol (Figure 1.3(a)). Lorsque des rouleaux sans friction sont utilisés, aucun déplacement n'est ressenti par la structure, car sous le mouvement du sol, les rouleaux sont libres de rouler ne transférant aucun effort dans la structure au-dessus (Figure 1.3(b)). Certains isolateurs de base offrent de l'amortissement au bâtiment en entrant dans la zone de plastification de la relation contrainte-déformation. À noter que le concept d'isolation de la base est plus efficace pour des bâtiments de faible à moyenne hauteur reposant sur des sols durs et n'est pas suggéré pour des bâtiments de grandes hauteurs.

## 1.2 PRESSS

L'utilisation de câble d'acier précontraint dans les éléments en béton armé a été proposée en 1928 par Engene Freyssinet qui développa quelques années plus tard un système utilisé jusqu'à aujourd'hui internationalement pour les charges gravitaires. Dans les années 1990, avec le programme de collaboration de recherche PRESSS entre les États-Unis et le Japon (Priestley, 1991), ce concept de précontraint sera considéré comme système de résistance aux forces sismiques. Ce programme, échelonné sur une période de 10 ans, se divise en 3 phases principales :

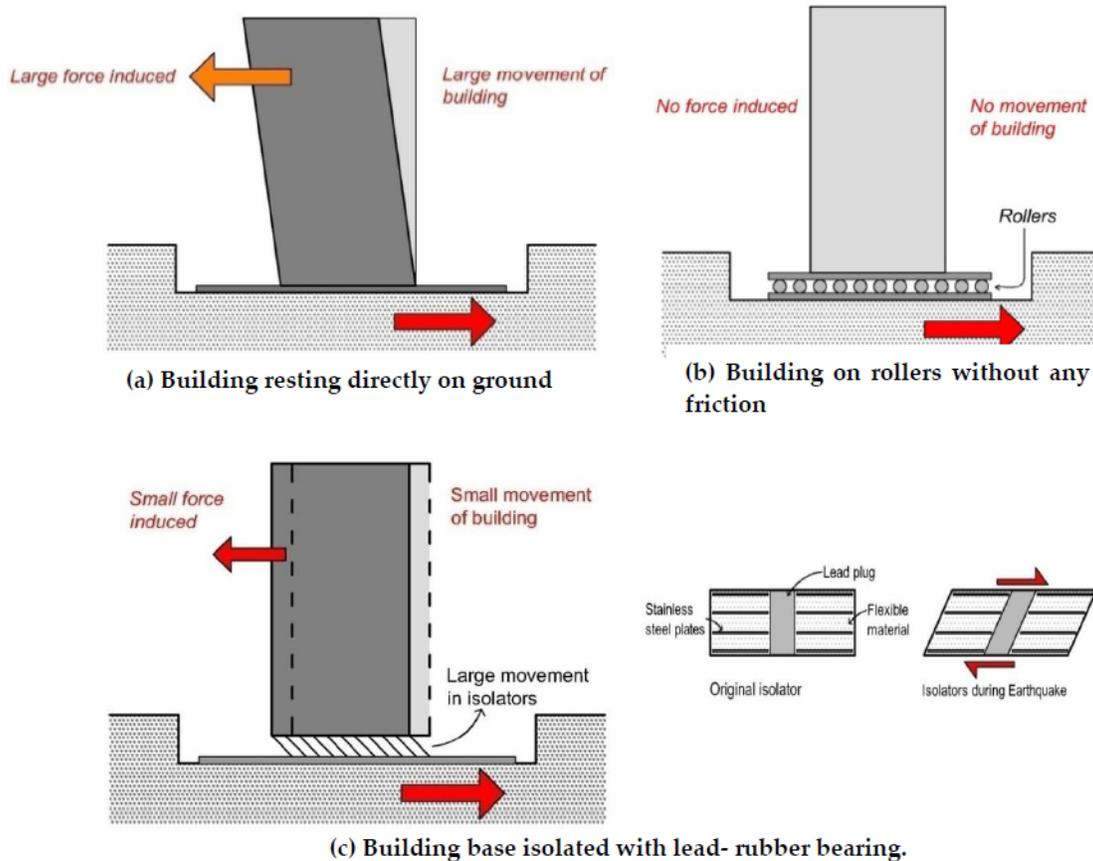


FIGURE 1.3 – Principe d’isolation de la base avec structure reposant (a) directement sur le sol (b) sur des rouleaux sans friction (c) sur des élastomères (Buchanan *et al.*, 2011)

- Phase 1 - Développement du concept, classification et modélisation des connexions, développement de la plateforme analytique PRESSS, recommandations de conception préliminaire
- Phase 2 - Recherche expérimentale et analytique exhaustive pour des recommandations de conception détaillée
- Phase 3 - Conception parasismique, tests expérimentaux et analyse d’un bâtiment de 5 étages utilisant le PRESSS

Les deux principaux objectifs à travers ces phases sont premièrement de développer des recommandations de conception complètes et rationnelles basées sur des données de recherches fondamentales qui soulignent la viabilité des constructions préfabriquées et précontraintes en béton pour résister aux efforts sismiques. Deuxièmement, de développer de nouveaux matériaux, concepts et technologies pour les constructions préfabriquées et précontraintes en béton étant situées dans une variété de zones sismiques.

Le concept du PRESSS passe par l’utilisation de câbles d’acier précontraints à l’intérieur

d'éléments structuraux préfabriqués tels que les murs, les poutres et les colonnes qui sont conçus pour rester dans leur comportement élastique lors d'événements sismiques, forçant ainsi la structure à retourner à sa position initiale. Lors d'événements majeurs, les éléments basculeront les uns sur les autres créant ainsi des ouvertures aux extrémités de ces éléments. Aux ouvertures, des éléments ductiles sont installés et conçus pour plastifier lors de l'atteinte d'une certaine déformation, fournissant ainsi la dissipation d'énergie nécessaire à la structure. Cette approche fournit à ce système une combinaison d'auto-centrage et de dissipation de l'énergie des séismes à travers de la motion de basculement des éléments, ce qui permet de limiter les dégâts imposés à la structure et d'ainsi rejoindre la philosophie de conception à faible dommage.

Les phases de basculement des éléments peuvent être caractérisées par le moment où les différents éléments du système entrent en action. La Figure 1.4 démontre les quatre principales phases d'un système poussé statiquement jusqu'à la rupture (Kurama *et al.*, 1999). La première phase située dans la portion élastique du comportement est nommée phase de décompression et est identifiée comme étant le moment où une ouverture est initiée aux joints des éléments. Cette ouverture produit des efforts dans les câbles de précontraints et possiblement le début d'un comportement non-linéaire, dépendamment de la position des éléments ductiles. La deuxième, celle d'adoucissement est le début d'une réduction significative de la rigidité du système en raison de l'ouverture créée et de la plastification des éléments ductiles. La troisième phase est le moment dans l'analyse jusqu'à rupture où les câbles précontraints atteignent la plastification. Généralement conçus pour demeurer élastiques, ces éléments ont plastifié lorsque de grandes déformations ont été atteintes et donc d'importants dommages ont été imposés à la structure. La dernière phase, celle de rupture, est généralement caractérisée par la rupture en compression des éléments basculants.

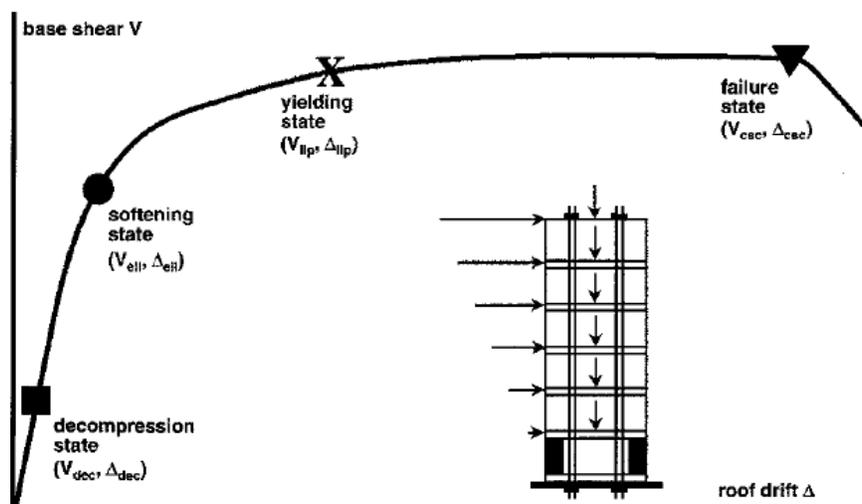


FIGURE 1.4 – Phases du comportement du PRESSS - Statique (Kurama *et al.*, 1999)

Lorsque sujet à des analyses cycliques sans rupture, les différentes phases de la motion d'un système à section basculante sont schématisées à la Figure 1.5. La phase de décompression (Figure 1.5(a)) n'est associée à aucune rotation de la connexion, donc seulement un comportement élastique des câbles précontraints est dénoté. Lorsqu'une ouverture se crée à l'une des extrémités (Figure 1.5(b)), les éléments ductiles se plastifient en tension et un comportement non-linéaire du système est observé. Si le système est poussé davantage (Figure 1.5(c)), on peut constater une augmentation de la rotation à la connexion associée avec un accroissement de la plastification des éléments ductiles et d'une élongation élastique des câbles précontraints. Lorsque la rotation continue d'augmenter, la portion du système en contact avec la fondation réduit graduellement, concentrant ainsi les contraintes aux extrémités des éléments. Lorsque le cycle inverse de l'analyse est amorcé, les éléments ductiles plastifieront en compression et le système se recentrera en raison du comportement élastique des câbles précontraints pour (Figure 1.5(d)) pour ensuite revenir à l'état initial (Figure 1.5(e)). L'analyse cyclique d'un système de structure à basculement avec éléments ductiles produit le comportement hystérésis en forme de drapeau recherché dans la philosophie de conception à faible dommage. Le concepteur peut choisir parmi différents niveaux de re-centrage de son système ( $\beta$ ). Le niveau  $\beta$  est décrit comme le ratio entre la contribution de moment des câbles précontraints et le moment total du système. La Figure 1.6 illustre ces différents concepts.

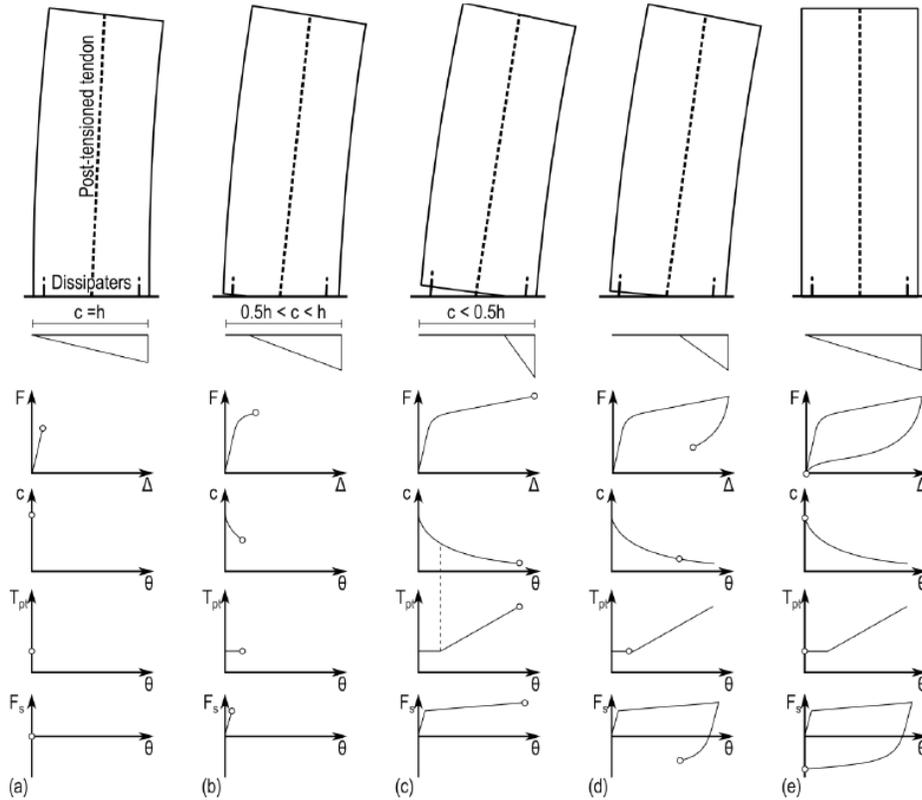


FIGURE 1.5 – Phases du comportement du PRESSS - Cyclique (Sarti, 2015)

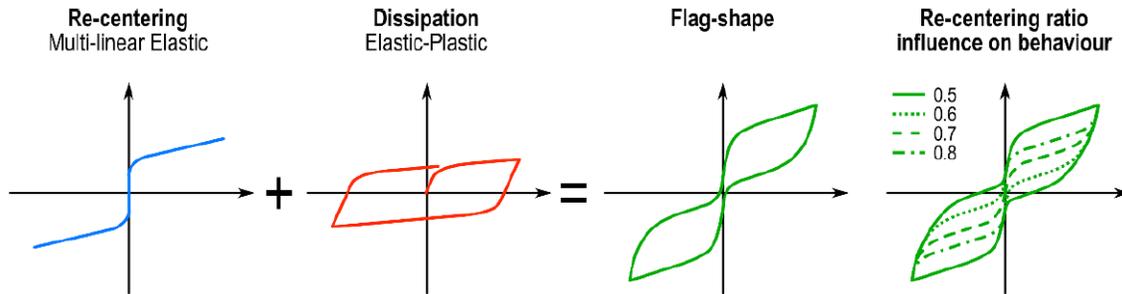


FIGURE 1.6 – Comportement hystérésis (Sarti, 2015)

La phase III du programme de recherche PRESSS consiste en la conception et l'essai en laboratoire à grande échelle d'un bâtiment de 5 étages utilisant les technologies développées aux phases I et II. Les objectifs principaux de cette phase sont les suivants :

- Valider une procédure de conception rationnelle pour les SRFS préfabriqués ;
- Générer l'acceptation de la conception des SRFS préfabriqués de précontrainte et de post-tension ;
- Fournir une preuve expérimentale de la performance globale du bâtiment sous excitation sismique ; et
- Établir un ensemble cohérent de recommandations de conception pour les SRFS préfabriqués

La conception du bâtiment test est fait en utilisant dans une direction 4 différents cadres résistants aux moments avec les joints ductiles développés dans le programme PRESSS, soit : "Tension-Compression Yielding (TCY) gap connection", "TCY connection", "Hybrid connection" et "Pretensioned connection". Dans l'autre direction, le bâtiment résiste aux efforts sismiques par le biais de murs de refends à section simple basculante. Des connecteurs "U-shaped flexure plate" (UFP) sont utilisés dans les joints verticaux entre les panneaux pour fournir l'amortissement hystérésis nécessaire au système. La figure 1.7 présente l'emplacement des différents SRFS sur deux plans du bâtiment test.

Le bâtiment est conçu en utilisant une conception basée sur les déplacements (DBD), permettant une analyse plus efficace qu'une conception basée sur les forces (FBD) du comportement des SRFS de ce projet. En effet, la FBD utilise la période élastique du système et applique ensuite un facteur "R" pour prendre en compte la ductilité du système. Le problème de cette méthode réside dans la difficulté de déterminer la période élastique ainsi que dans des facteurs "R" mal établis pour ce genre de système. Par ailleurs, la DBD permet de mieux représenter des systèmes précontraints et de post-tension en raison de l'utilisation d'un déplacement cible de conception inélastique et des propriétés sécantes de la structure.

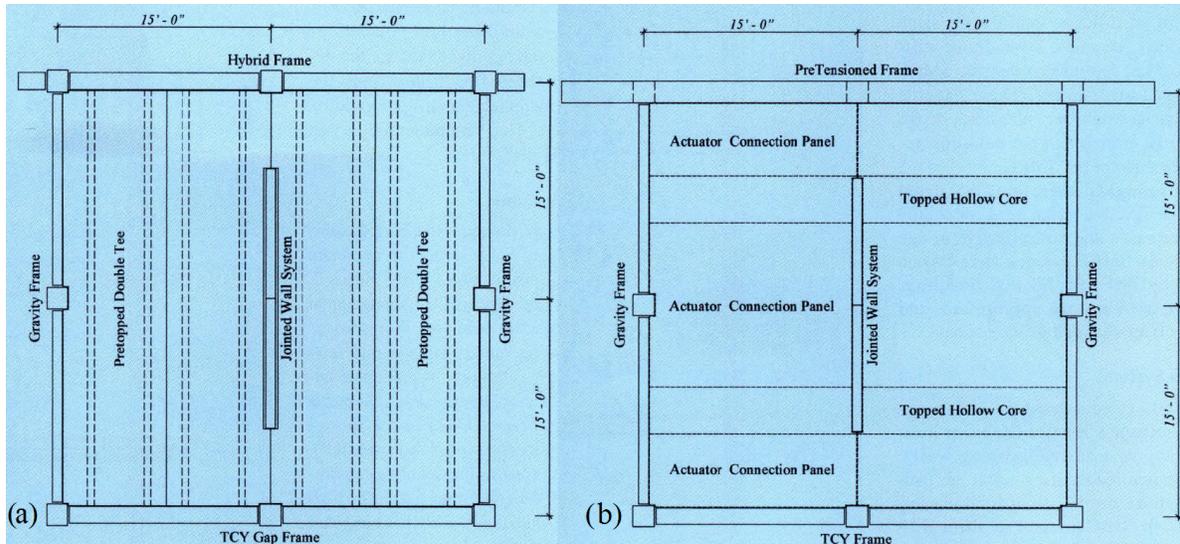


FIGURE 1.7 – Bâtiment test (a) Level 1 plan (b) Level 4 plan (Nakaki *et al.*, 1999)

Suite à une multitude d'essais pseudo-dynamiques en laboratoire dans les deux directions orthogonales majeures du bâtiment, un rapport décrivant les résultats et conclusions préliminaires est publié (Priestley *et al.*, 1999). Les résultats des essais ont démontré un comportement très satisfaisant de la structure. Dans la direction des murs de refends, seulement de faibles dommages sont notés, malgré des essais ayant une intensité de 50% au-dessus des valeurs de conception. Dans la direction des cadres résistant aux moments, les dommages occasionnés au bâtiment sont nettement inférieurs à ce qu'un bâtiment en béton armé normal aurait subi. Les joints ductiles des cadres possédant des "TCY gap connection" ont subi plus de dommages que les autres types de joints ductiles, démontrant tout de même un comportement acceptable. Comme des éléments de post-tensions auto-centreur sont utilisés, les déplacements résiduels suite aux essais à l'intensité du niveau de conception étaient de l'ordre de 0.06%, donc négligeable. Les résultats des essais au niveau du déplacement de conception ont aussi confirmé la précision de la DBD. En effet, des déplacements de 1.8% à 2.2% sont atteints, alors que le déplacement de conception était de 2%. Finalement, des modèles numériques simples sont développés pour prédire le comportement de ces types de structures, permettant aux ingénieurs de la pratique de concevoir de tels systèmes.

### 1.3 Pres-Lam

Dû au gain de popularité des bâtiments multi-étagés en bois, des recherches supplémentaires sont requises sur les SRFS en bois utilisant, par exemple, la philosophie de conception à faible dommage présentée à la section 1.1.

Dans cette optique, des recherches ont été entreprises à l'Université de Canterbury à Christchurch en Nouvelle-Zélande, sur l'adaptation du PRESSS pour des bâtiments utilisant des SRFS en bois massif : "Pre-stressed Laminated Timber" (Pres-Lam) (Palermo *et al.*, 2005). Ce concept a tout d'abord été appliqué à des cadres résistants aux moments en y introduisant des connexions ductiles et auto-centreurs. Par la suite, des murs en panneaux de bois massif à section basculante ont été développés utilisant la post-tension et des amortisseurs à la base. Les prochaines sections détaillent ces technologies en donnant par la suite quelques exemples de bâtiment utilisant le Pres-Lam.

### 1.3.1 Cadres résistants aux moments Pres-Lam

Les premiers essais sur les connexions des cadres résistants aux moments utilisant la technologie Pres-Lam ont été effectués dans le cadre du programme de recherche mené par le Professeur Alessandro Palermo à l'Université de Canterbury (Palermo *et al.*, 2005). Les connexions testées sont constituées d'éléments en LVL basculants les uns sur les autres créant des ouvertures où des dispositifs de dissipation d'énergie interne sont situés et conçus pour plastifier. Au centre des poutres, et traversant la colonne, un câble post-tendu libre de se déplacer est installé et, lors du basculement des sections, aura un comportement élastique annulant ainsi les déplacements résiduels (Figure 1.8).

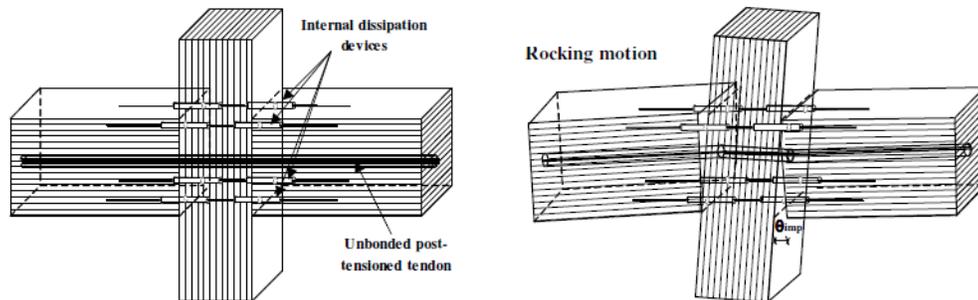


FIGURE 1.8 – Système à éléments basculants contrôlés (Palermo *et al.*, 2005)

Deux types de connexions ont d'abord été conçus et testés au sein du programme de recherche. La première utilise seulement les câbles de post-tension et la deuxième, de type hybride, incorpore les dispositifs de dissipation d'énergie interne au câble de post-tension. Comme la Figure 1.9(a) le démontre, le type de connexion de post-tension seulement possède un comportement élastique non-linéaire avec une plastification due à des non-linéarités géométriques plutôt qu'à des non-linéarités matérielles lorsque soumis à des essais cycliques. La Figure 1.9(b) présente les résultats d'une connexion hybride où l'on remarque un comportement d'hystérésis avec plus de dissipation d'énergie dû la non-linéarité matérielle des dissipateurs en acier.

Les non-linéarités géométriques des connexions sont en partie dues aux forces de compression

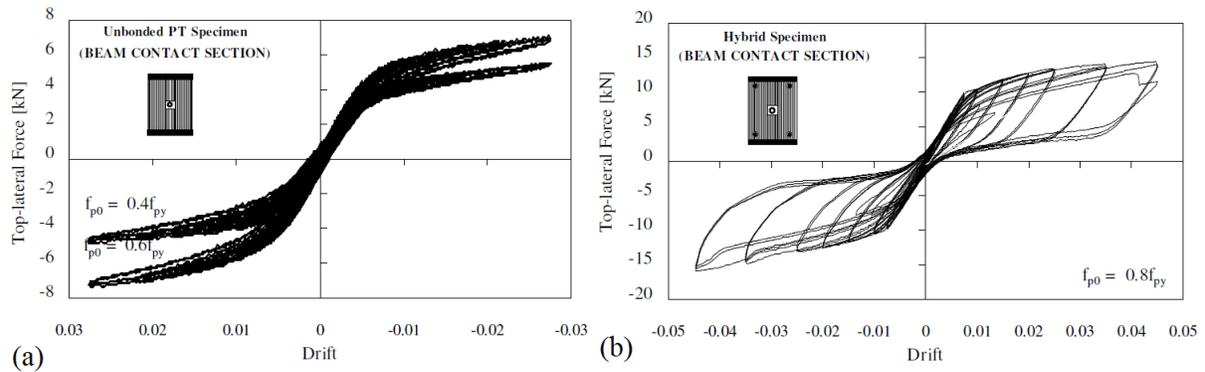


FIGURE 1.9 – Résultats des essais expérimentaux (a) Post-tension seulement (b) Hybride (Palermo *et al.*, 2005)

perpendiculaire au grain du bois sur la colonne créée par le basculement des poutres sur cette dernière. Pour protéger les colonnes de ces forces non désirées, des plaques d'acier sont installées aux extrémités des poutres augmentant ainsi la rigidité des connexions et répartissant les forces de compression perpendiculaire au grain sur une plus grande surface (Iqbal *et al.*, 2016) (Figure 1.10).

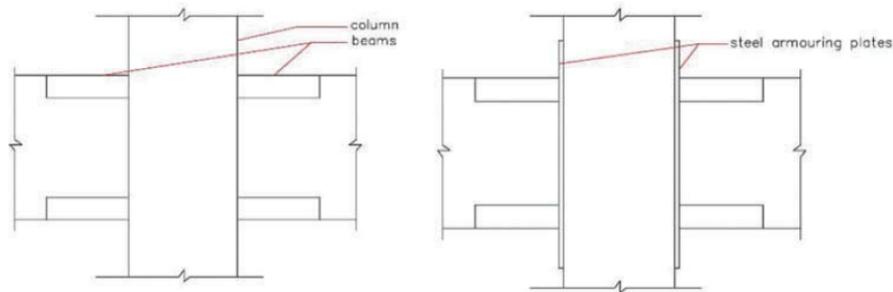


FIGURE 1.10 – Schématisation d'une connexion avec et sans protection en acier (Iqbal *et al.*, 2016)

Pour bien évaluer la performance des plaques protectrices en acier, des essais ont été effectués sur des connexions avec et sans plaques d'acier. Les résultats présentés à la Figure 1.11 démontrent en effet que les connexions avec plaques de protection sont significativement plus rigides que les connexions sans protection. Lorsque la colonne n'est pas protégée, chaque cycle de basculement augmente davantage l'écrasement du bois, amplifiant ainsi les distances d'ouvertures des basculements. Ce phénomène résulte en la réduction de la longueur libre du câble de post-tension se traduisant par une perte des forces de pré-tension dans ceux-ci. C'est pourquoi la plaque de protection d'acier est essentielle au bon fonctionnement de ce type de connexion.

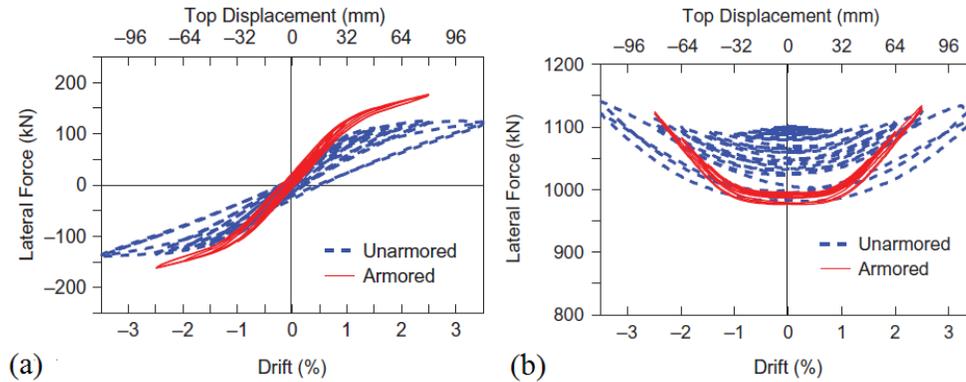


FIGURE 1.11 – Résultats d’essais sur des connexions avec et sans protection en acier (a) force-déplacement du système (b) force-déplacement des câbles de post-tension (Iqbal *et al.*, 2016)

Pour concevoir ces cadres résistants aux moments Pres-Lam, des études analytiques ont été effectuées en se basant sur le "Monolithic Beam Analogy" (MBA) (Pampanin *et al.*, 2001) développé pour les connexions ductiles dans les cadres en béton préfabriqué (PRESSS). Cette étude analytique est basée sur la compatibilité des déformations des éléments composant la connexion ductile. Donc, en imposant une rotation à la section basculante et en connaissant les comportements de contrainte-déformation des éléments composant le système, il est possible de déterminer les efforts et d’effectuer la conception appropriée. En apportant une calibration nécessaire à la rigidité axiale des poutres, la MBA est capable de prédire convenablement le comportement des cadres résistants aux moments Pres-Lam (Newcombe *et al.*, 2008).

Suite à ces études analytiques, des modèles numériques d’éléments finis ont été développés pour prédire avec plus de précision et de facilité le comportement de ces assemblages. Une vue d’ensemble du type de modèle utilisé est présentée à la Figure 1.12. La zone de contact entre la poutre et la colonne est modélisée par un élément à plusieurs ressorts en parallèle, tandis que les dissipateurs et les câbles de post-tension sont représentés par des ressorts possédant des rigidités équivalentes aux comportements de ces éléments. Les paramètres d’hystérésis des composants du système sont implémentés directement dans les types de matériel utilisés. Une fois les calibrations des rigidités effectuées en se basant sur les résultats expérimentaux et les modèles analytiques, les modèles numériques sont capables de représenter avec une grande précision le comportement des connexions ductiles des cadres Pres-Lam (Newcombe *et al.*, 2008).

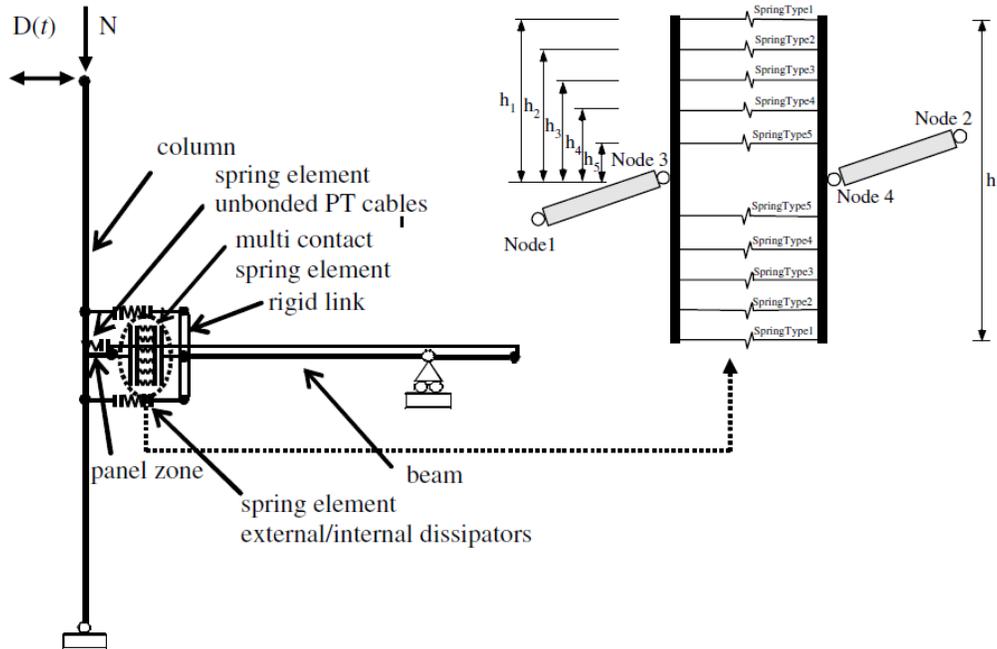


FIGURE 1.12 – Vue d’ensemble du modèle numérique (Newcombe *et al.*, 2008)

Dans l’objectif de valider les analyses précédentes et d’évaluer le montage d’une structure Pres-Lam, des essais sur table vibrante d’une structure multi-étagée sont effectués aux laboratoires des charpentes de l’Université de Basilicata en Italie en collaboration avec l’Université de Canterbury en Nouvelle-Zélande (Smith et Pampanin, 2014).

Le bâtiment de 3 étages, conçu comme étant une aire de bureaux avec un jardin au toit, est construit avec un ratio de 2/3. La structure possède une largeur de 3-m, une longueur de 4-m et une hauteur inter-étage de 2-m (Figure 1.13). Les poutres et colonnes ainsi que les planchers de la structure sont fabriqués de bois lamellé-collé (GL32h), offrant une grande légèreté au bâtiment. Dû à cette légèreté, des masses supplémentaires ont dû être installées sur les planchers pour simuler les charges d’un bâtiment réel. Le montage de la structure s’est effectué en seulement 2 jours par 4 travailleurs, démontrant ainsi la faisabilité et la rapidité de montage de ce type de système. Pour augmenter la résistance et réduire les déplacements de la structure, des dissipateurs supplémentaires sous forme d’angle d’acier sont installés aux joints poutre-colonne et colonne-fondation.

Les résultats des essais dans chaque direction sur la table vibrante ont démontré un excellent comportement de la structure. En effet, l’addition des angles d’acier a réduit grandement les déplacements inter-étages sans créer d’accélération supplémentaire au troisième étage.



FIGURE 1.13 – Bâtiment expérimental (Smith et Pampanin, 2014)

### 1.3.2 Mur à section basculante Pres-Lam

À l'intérieur du même programme de recherche, des essais sont effectués sur des murs en LVL en leur appliquant le principe de section basculante post-tendu Pres-Lam. Comme pour les cadres résistants aux moments, un câble post-tendu est positionné au centre du mur et est conçu pour demeurer dans sa zone élastique lors du basculement (Figure 1.14). Des dissipateurs d'énergie sont positionnés aux coins inférieurs du mur et plastifieront sous les efforts engendrés par l'ouverture entre le mur et la fondation. Lorsque soumis à des efforts cycliques, cette combinaison de post-tension et de dissipateurs produira le comportement hystérésis en forme de drapeau présenté à la Figure 1.6.

Pour fournir l'amortissement et la dissipation d'énergie nécessaires au système, différents types d'éléments ont été développés et analysés à l'Université de Canterbury (Figure 1.15). Le premier type d'amortisseur est une tige d'acier installée à l'extérieur du panneau. Ce dissipateur est fabriqué avec une portion où le diamètre est réduit pour servir de zone fusible. Cette section fusible de la tige est placée à l'intérieur d'un tube rempli d'Époxy pour qu'elle puisse plastifier en tension ainsi qu'en compression sans subir de rupture fragile de flambement. Parce qu'elle est située à l'extérieur du panneau, ce dissipateur est facilement remplaçable suite à un séisme majeur. Le deuxième type d'amortisseur est aussi une tige d'acier, mais positionnée et

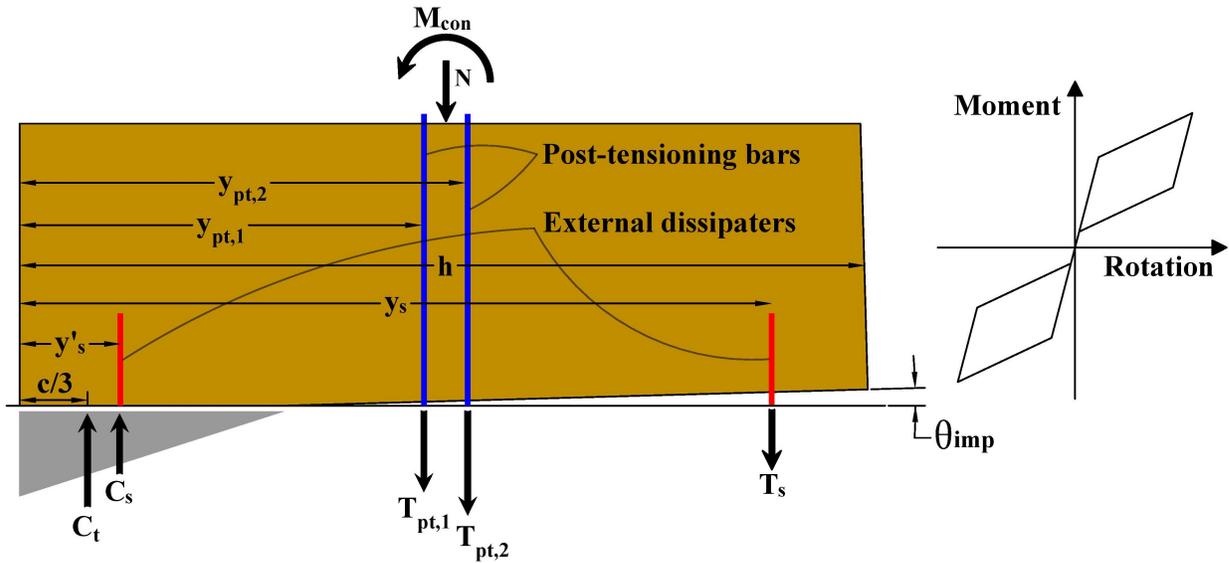


FIGURE 1.14 – Schématisation d'un mur Pres-Lam à section basculante (Pilon *et al.*, 2017)

collée à l'intérieur du panneau. Une certaine longueur de la tige possède un diamètre réduit et n'est pas liée au bois, ce qui sert de section fusible. Ce type de dissipateur est plus difficile à remplacer post-séisme en raison de son emplacement interne. Le dernier type fait l'utilisation des tiges collées, mais dans un bloc de panneau lié par des attaches au panneau principal, ce qui rend plus facile le remplacement des dissipateurs une fois usés. Il est possible de concevoir un système sans ajout d'éléments amortisseur, créant ainsi des systèmes de post-tension pure.

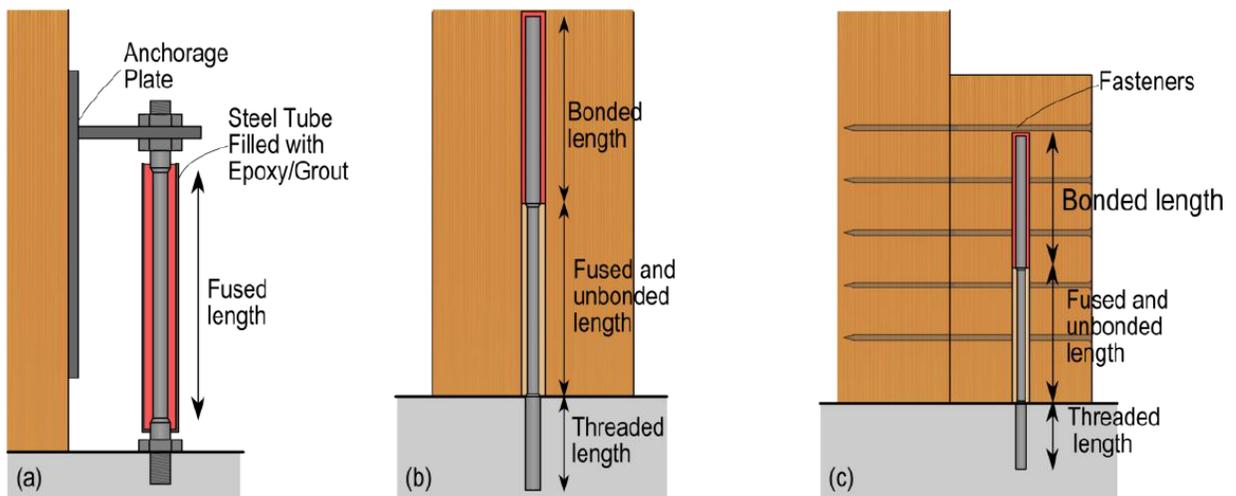


FIGURE 1.15 – Options de configuration des dissipateurs (a) externes (b) internes (c) bloc externe (Sarti, 2015)

Les premiers essais effectués dans le cadre du programme de recherche (Palermo *et al.*, 2006) ont été faits sur des murs de LVL avec différent niveau de recentrage et type de dissipateurs. Les résultats présentés à la figure 1.16 comparent le comportement d'un mur avec post-tension pure et d'un autre avec des dissipateurs externes sous l'effet de charges cycliques. On remarque un comportement bilinéaire élastique du premier mur tandis que le deuxième obtient une courbe hystérésis assez large démontrant la dissipation de l'énergie dans la plastification des amortisseurs.

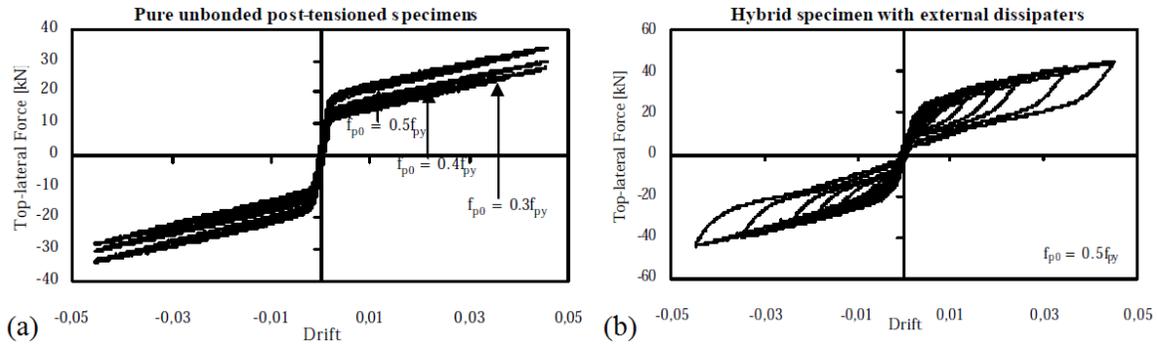


FIGURE 1.16 – Résultats expérimentaux (a) Post-tension seulement (b) Post-tension avec dissipateurs externes (Palermo *et al.*, 2006)

Suite à ces essais sur des murs à section simple, le couplage de ceux-ci est étudié pour produire des systèmes plus longs et plus rigides. Le premier système analysé est une solution dite hybride avec couplage des murs par un panneau de contre-plaqué cloué en surface du LVL (Smith *et al.*, 2007). Cette solution utilise la plastification des clous comme dissipation de l'énergie, ce qui la rend très économique par rapport à l'utilisation de dissipateurs externes et internes. La Figure 1.17 présente le comportement hystérésis ainsi qu'une représentation du système de murs couplés par un panneau de contre-plaqué.

L'utilisation de connecteurs "U-shaped Flexural Plates" (UFP) est un autre moyen des coupler les murs à section basculante. Des recherches approfondies ont été effectuées sur l'utilisation de ce type de connecteur dans les systèmes Pres-Lam à l'Université de Canterbury (Iqbal *et al.*, 2015). On peut voir sur la Figure 1.17, qu'une ouverture se crée à la base lorsque le système bascule sous l'application d'efforts latéraux. Cette déformation est aussi reportée dans le joint vertical entre les panneaux, appliquant des efforts de cisaillement sur les connecteurs UFP. Ces connecteurs se déforment de manière plastique en se "déroulant" le long de sa section en "U". Les résultats d'essais d'un système de murs couplés avec connecteurs UFP sont présentés à la Figure 1.18(c) et comparés aux résultats d'un système de post-tension pure. On observe encore une fois le comportement d'hystérésis et de dissipation d'énergie du système avec amortissement.

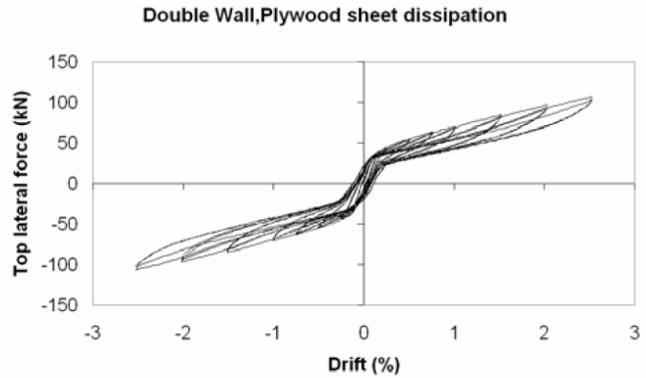


FIGURE 1.17 – Représentation et résultats d’un système de murs couplés avec panneau de contre-plaqué (Smith *et al.*, 2007)

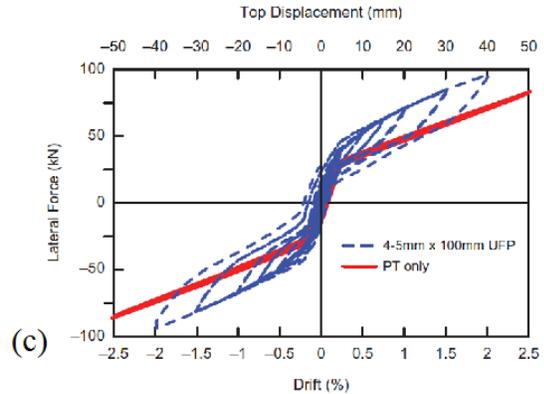


FIGURE 1.18 – (a) Murs à section basculante couplés avec connecteurs UFP (b) déformation plastique des connecteurs (c) résultats d’essais (adapté de (Iqbal *et al.*, 2015))

Pour effectuer la conception d’un tel système, des méthodes analytiques et numériques ont été mises en place (Sarti, 2015). Dans sa dissertation, Sarti (2015) présente les différentes étapes nécessaires à la conception de murs post-tendus Pres-Lam. Le modèle analytique est décrit et présenté sous forme d’étapes à suivre en proposant quelques améliorations au modèle de base. Suite aux calculs analytiques, et donc, au pré-dimensionnement des sections, une description et une validation des approches de modélisation numérique sont faites en se basant sur des résultats expérimentaux. Les modèles numériques utilisant des multi-ressorts sont priorisés

pour ce type de système et ils sont générés à l'aide du logiciel OpenSEES (MecKenna, 2011). De plus, pour pouvoir effectuer le pré-dimensionnement, une revue des méthodes de conception par force et par déplacement y est présentée. On y trouve aussi les différentes étapes nécessaires pour effectuer des analyses temporelles non-linéaires sur les modèles numériques, afin de valider le dimensionnement et d'observer les effets d'amplification dynamique aux étages supérieurs. Finalement, différentes considérations à prendre concernant la conception des connexions et des attaches y sont aussi présentées pour permettre aux ingénieurs d'effectuer une conception complète d'un système de murs post-tendus Pres-Lam.

### 1.3.3 Murs à sections basculantes multiples

Les bâtiments multi-étagés en bois sont susceptibles de développer de l'amplification dynamique des forces sismiques dans les étages supérieurs en raison de leur grande flexibilité. En effet, une structure en bois sera beaucoup plus flexible qu'une structure en béton armé ce qui rend les modes de déformation supérieures plus importants pour ce type de structure (Figure 1.19). Antérieurement, pour répondre à ce problème, on concevait les structures pour qu'une rotule plastique se développe à la base du système, ce qui empêcherait l'augmentation des forces dans le reste de la structure une fois la rotule créée. Par contre, des recherches approfondies sur le sujet ont démontré qu'il était possible que les forces augmentent de façon notable même suite à la formation de la rotule à la base (Priestley et Amaris, 2002). Pour répondre à cette amplification des forces, les murs post-tendus Pres-Lam sont conçus avec de larges sections de panneau et des connexions rigides dans les étages supérieurs. Cette solution, quoiqu'efficace, n'est pas économique, car les connexions rigides nécessitent l'utilisation de milliers d'attaches et sans l'amplification des efforts, des sections de panneau plus étroites pourraient être choisies.

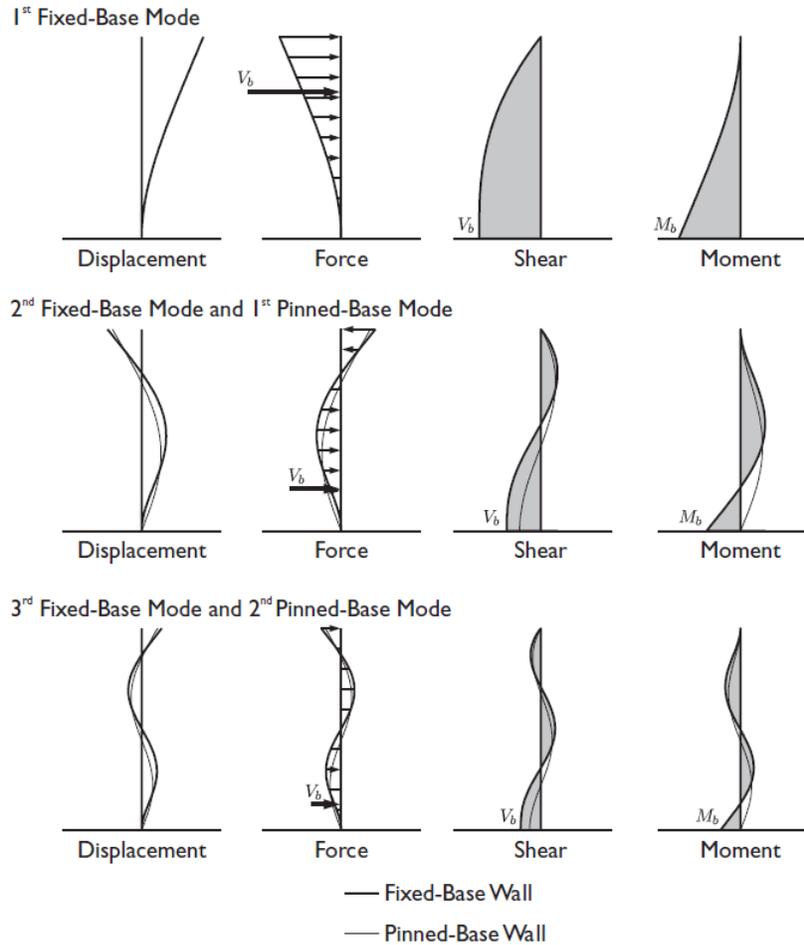


FIGURE 1.19 – Modes de déformation (Wiebe et Christopoulos, 2009))

En réaction à ce phénomène, des recherches sur les murs préfabriqués post-tendus en béton armé ont mené à l'élaboration d'un concept de murs à sections basculantes multiples (Wiebe et Christopoulos, 2009) (Qureshi et Warnitchai, 2016). Comme présenté à la figure 1.20, ce concept permet l'ouverture entre les panneaux à différents endroits dans la structure, en plus de l'ouverture créée à la base. Cette conception, qui n'est plus représentée par une poutre unique en porte-à-faux, est moins assujettie à l'amplification dynamique des modes supérieures en raison de la dissociation entre les panneaux, ce qui rend plus difficile de transférer les moments entre les segments. La Figure 1.21 présente la réduction des efforts dans les étages supérieurs d'une structure en béton à sections basculantes multiples, par rapport à une structure avec seulement une ouverture à la base. On peut remarquer que les efforts peuvent être grandement réduits avec l'utilisation de ce concept.

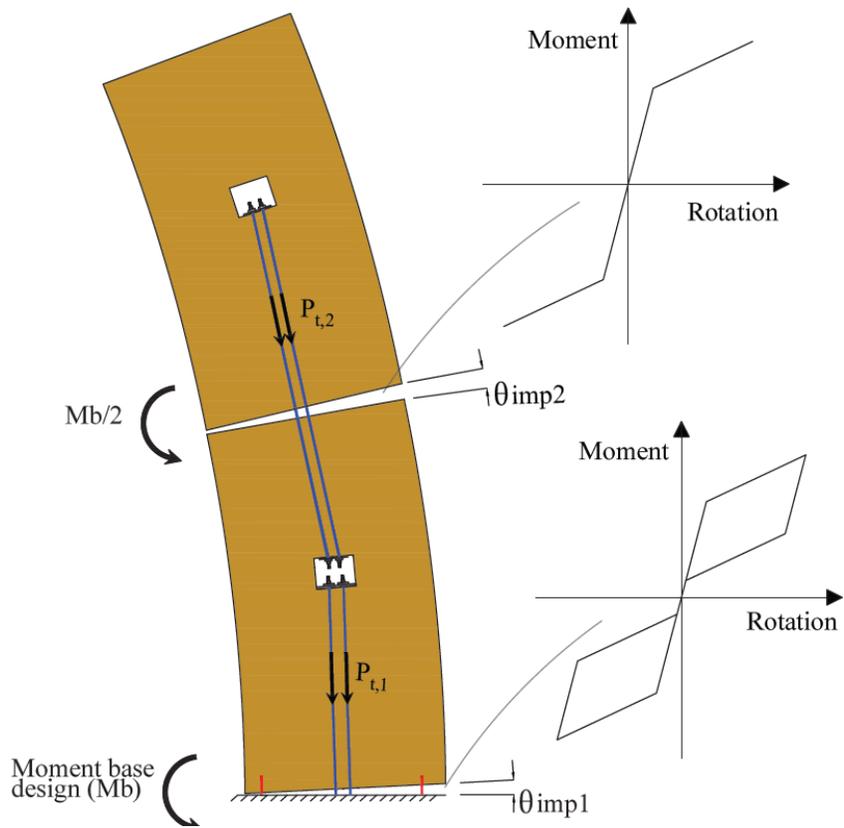


FIGURE 1.20 – Représentation d'un mur à sections basculantes multiples

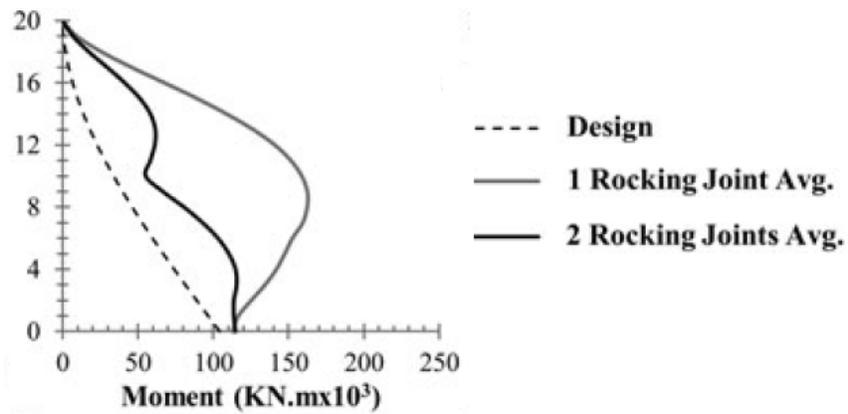


FIGURE 1.21 – Réduction des efforts dans un mur à plusieurs sections basculantes (adaptée de (Qureshi et Warnitchai, 2016))

## 1.4 Bois lamellé-croisé

Le bois lamellé-croisé (CLT) est un produit bois d'ingénierie développé en Autriche dans les années 1990 dans le cadre d'un projet de recherche industriel. Ces panneaux ont rapidement gagné en popularité due à leur versatilité, à leur bonne empreinte environnementale, à leur légèreté par rapport au béton, à leur bonne résistance, à leur préfabrication et à leur rapidité de montage. Ces caractéristiques en font un excellent matériel de construction et de plus en plus de bâtiments sont construits en CLT à travers le monde, témoignant de son bon comportement.

Les panneaux de CLT sont constitués de plusieurs couches orthogonales de bois de sciage collé les uns aux autres à l'aide d'adhésifs structuraux (Figure 1.22). Ils sont formés d'au moins 3 couches de bois de sciage, offrant une épaisseur de 78mm et peuvent aller jusqu'à 9 couches, atteignant des épaisseurs de 314mm. Selon le fabricant, on peut obtenir des largeurs de panneaux de 2.5m à 3m et des longueurs d'environ 20m.

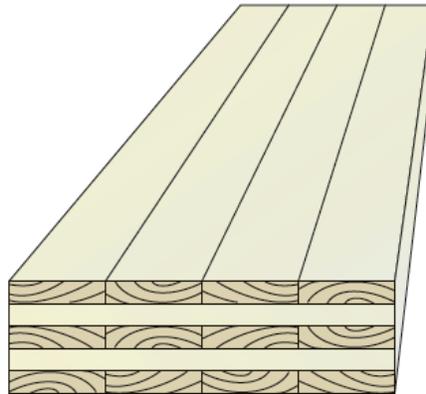


FIGURE 1.22 – Schématisation d'un panneau CLT (FPInnovations, 2011)

Les panneaux de CLT peuvent être utilisés pour différentes composantes structurales. Ils peuvent être utilisés comme murs pour résister aux charges gravitaires, comme murs de refend pour résister aux charges latérales et comme dalles de plancher. Lorsqu'utilisé comme mur (Figure 1.23), le panneau de CLT est généralement positionné dans la direction où la force verticale appliquée est parallèle aux couches externes du panneau, c.-à-d., dans le sens de l'axe fort du panneau. De plus, pour certaines configurations, il est possible de placer deux couches adjacentes dans la même direction pour augmenter davantage la résistance du panneau selon l'axe fort.

Le CLT est très efficace lorsqu'utilisé comme dalle de plancher en remplacement aux dalles en béton armé conventionnelles. Il est tout d'abord très léger comparativement au béton et, possédant des couches orthogonales, il offre naturellement une résistance bidirectionnelle pouvant annuler le besoin des poutres dans les bâtiments (Figure 1.24).

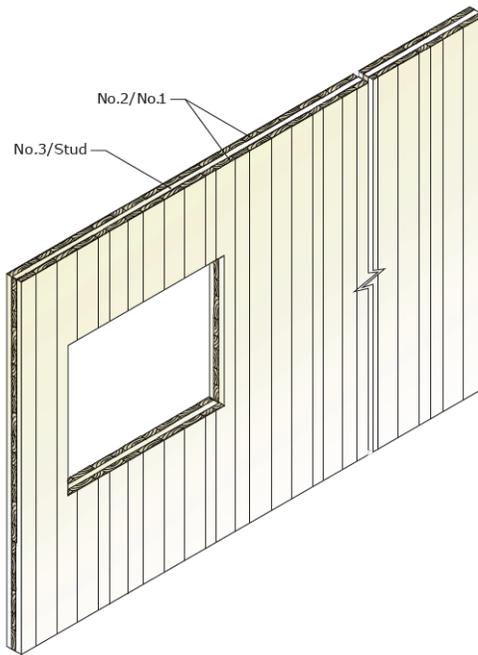


FIGURE 1.23 – Utilisation d'un panneau CLT comme mur (adaptée de (FPInnovations, 2011))

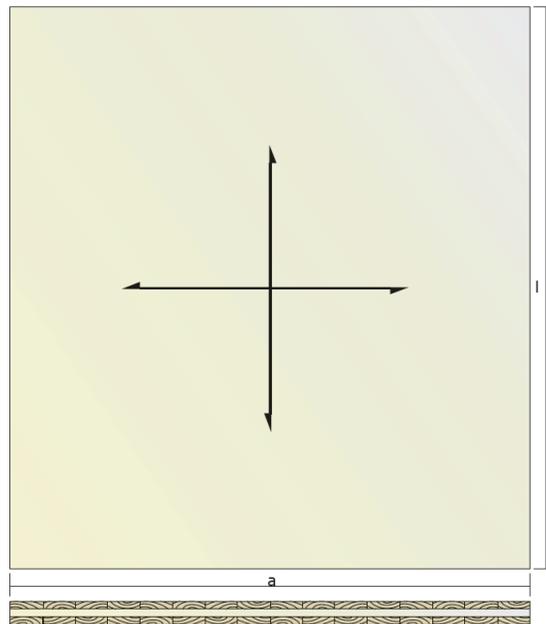


FIGURE 1.24 – Utilisation d'un panneau CLT comme dalle (FPInnovations, 2011)

### 1.4.1 Recherches sur le CLT

Les recherches effectuées jusqu'à maintenant sur les bâtiments en CLT ont été principalement dirigées sur les structures de type plateforme. Ce type de structure consiste en l'utilisation de panneau de CLT comme murs et planchers, formant ainsi une "boîte". Ces "boîtes" sont ensuite empilées les unes sur les autres pour créer les différents étages du bâtiment. Les murs reprennent les charges gravitaires ainsi que les charges latérales, tandis que les planchers servent de diaphragme.

Le "SOFIE project" dirigé par le professeur Ario Ceccotti de l'Institut des arbres et du bois en Italy (Ceccotti *et al.*, 2013) approfondie les recherches sur la résistance aux tremblements de terre des structures plateformes. L'un des objectifs principaux du projet est la phase de tests sur table vibrante à échelle réelle du bâtiment de 7 étages. Les essais ont été effectués en collaboration avec l'Université Shizuoka au Japon. En préparation à ces essais sur table vibrante, plusieurs analyses préliminaires telles que : essais sur les connecteurs, essais sur les panneaux avec différentes configurations, essais sur un bâtiment de 3 étages, etc., ont été effectuées pour évaluer le comportement des éléments. Les résultats positifs de ces analyses préliminaires ont justifié le besoin d'investigations sur table vibrante à échelle réelle.

Comme présenté à la Figure 1.25, le bâtiment de 7 étages possède des dimensions en plan de 7.5m x 13.5m avec une hauteur totale de 23.5m. Les panneaux de CLT sont de 150mm à 200mm d'épaisseur reliés entre eux par différentes méthodes de connexion.



FIGURE 1.25 – Bâtiment de 7 étages du projet SOFIE (Ceccotti *et al.*, 2013)

Les résultats des essais sur table vibrante, étant très positifs, démontrent une capacité de recentrage efficace sans dommage important à la structure. Les modes de ruptures sont concentrés dans les connecteurs métalliques et ont démontré un bon comportement ductile, dissipant ainsi l'énergie des séismes sans créer de dommage fragile dans les panneaux de CLT.

Les connecteurs métalliques utilisés pour lier les panneaux entre eux et fournir l'amortissement au système sont généralement des systèmes de retenue vertical pour reprendre les efforts de soulèvement (Figure 1.26(a)), des équerres métalliques pour résister aux efforts de cisaillement (Figure 1.26(b)) ainsi que des vis (Figure 1.26(c)) sous différentes dispositions pour connecter les panneaux entre eux.

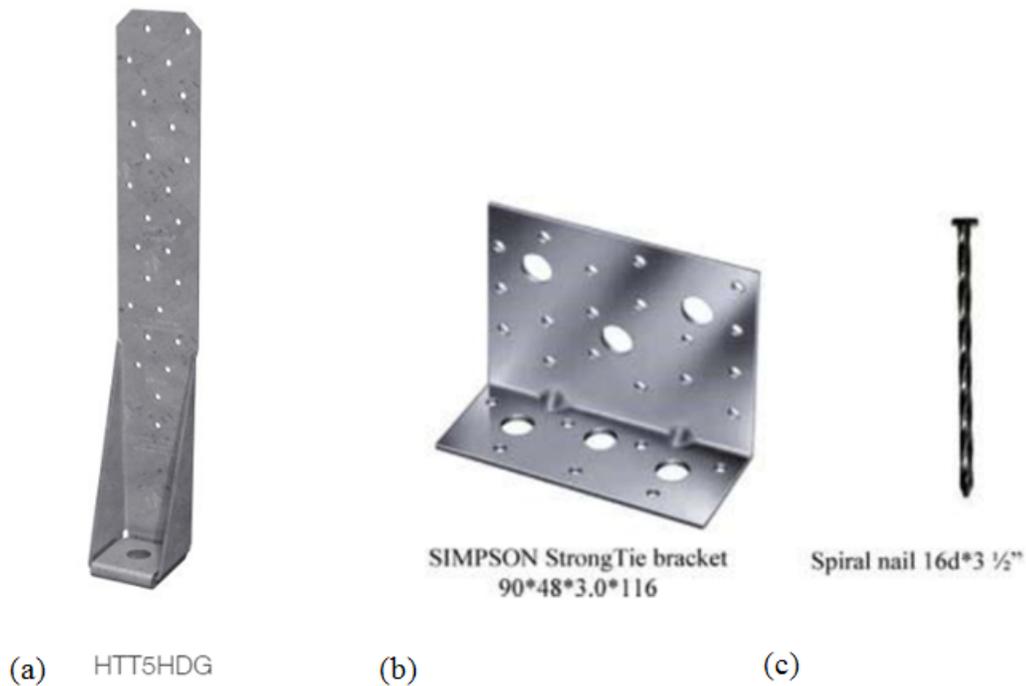


FIGURE 1.26 – Connecteurs des panneaux de CLT (Simpson-Strong-Tie, 2017)

Dans le cadre du projet de recherche SOFIE, des ancrages de retenue vertical et des équerres métalliques ont été testés cycliquement pour en déterminer leur résistance, leur rigidité, leur capacité à dissiper l'énergie et leur ductilité (Gavric *et al.*, 2015). Des analyses paramétriques sont effectuées en modifiant la géométrie des connecteurs, le nombre d'attaches, le type de connexion (CLT-CLT ou CLT-fondation), la direction de la charge, etc. Comme présenté à la figure 1.27, les résultats des essais ont démontré des comportements hystérésis très souhaitables pour fournir l'amortissement nécessaire à la structure. Les ancrages de retenue vertical ont démontré des résistances et rigidités relativement élevées dans leur direction primaire, soit en tension, n'offrant pratiquement aucune résistance en cisaillement. Donc, il est possible de négliger leur apport de résistance au système lors de la conception. Pour leur part, les équerres

métalliques ont démontré de bonnes résistances et rigidités dans les deux directions.

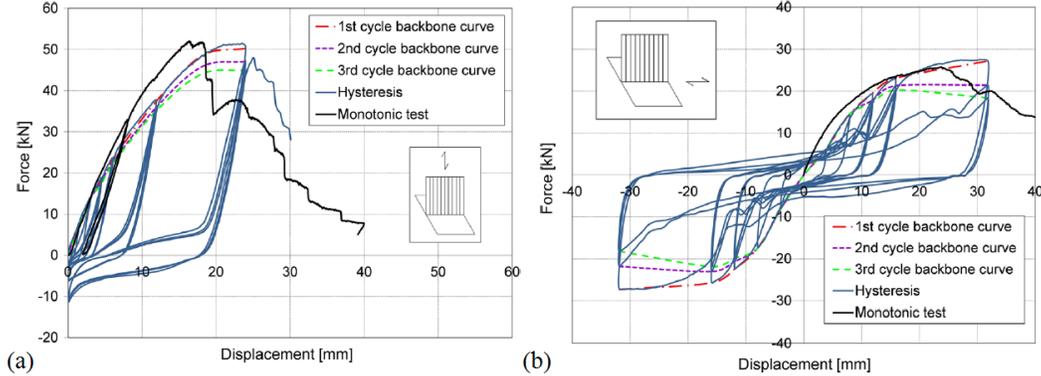


FIGURE 1.27 – Courbe hystérésis d’une (a) retenu vertical en tension (b) équerre métallique en cisaillement (Gavric *et al.*, 2015)

Des recherches ont été conduites à l’Université de Washington sur les murs à section basculante en CLT faisant l’utilisation de dissipateurs UFP (Ganey, 2015). L’objectif de cette thèse de maîtrise est de comprendre et de développer une procédure de conception pour les SRFS avec murs à section basculante en CLT. Pour y parvenir, des essais expérimentaux ont été effectués sur des séries de 5 spécimens simples et 1 spécimen couplé. Suite à ces essais, des modèles numériques de type multi ressort ont été développés à l’aide d’OpenSEES et soumis à des analyses temporelles non linéaires pour prédire le comportement de ce type de structure. En voici les principales conclusions :

- Les murs de refend à section basculante en CLT ont une réponse ductile à l’analyse cyclique ;
- Lorsque les câbles de post-tension sont de plus grand diamètre, le mur à section basculante possédera une meilleure résistance ;
- La perte de force dans les câbles de post-tension peut être significative lorsque le panneau de CLT est endommagé ;
- Le plancher de CLT soumis à des efforts perpendiculaires au grain est plus faible que le mur de refend, donc des plaques de renforcement seraient nécessaires ;
- Les dissipateurs UFP fournissent 50% de la dissipation d’énergie pour le mur couplé.

Bien que les recherches sur les structures en CLT de type plateforme sont de plus en plus présentes, des recherches supplémentaires sont requises sur l’utilisation des panneaux de CLT comme système de résistance aux forces sismiques à sections basculantes dans les bâtiments multi-étagés, ce qui motive cette recherche.