

CHAPITRE 1

INTRODUCTION

1.1. CONTEXTE DE LA THESE

Les ossatures métalliques sont largement utilisées dans les pays industrialisés et surtout ceux présentant un risque sismique important tels que les USA et le Japon. Ces structures ont généralement une grande capacité à dissiper l'énergie sismique par le mécanisme d'apparition progressive des rotules plastiques à comportement hystérétiques stables. Malheureusement, les tremblements de terre de Northridge et Kobe ont révélé que les ossatures métalliques conçues suivant les règles de l'art, n'étaient pas aussi performantes qu'on le croyait et même les dommages recensés reflètent leur vulnérabilité en zone sismique à champs proche. La rupture fragile à caractère peu ductile au niveau des assemblages soudés poteaux- poutres a été à l'origine de la plupart des dommages enregistrés. Ceci a mis en défaut le concept de dimensionnement sismique basé sur la dissipation de l'énergie sismique par déformation plastique. Plusieurs causes de cette rupture fragile ont été cataloguées. Les principales sont les dispositions constructives non adéquates des assemblages soudés et la réduction de la ductilité locale au niveau de la jonction poteau-poutre. Les composantes horizontales des vitesses sismiques enregistrées présentent un pic de 177cm/s (Rinaldi Station) et 176 cm/s (Takatori Station) lors des séismes respectifs de Northridge 1995 et de Kobe 1994, ce qui représente 5 fois celui de El Centro. L'examen des spectres de vitesse de ces séismes montre que les constructions à Northridge et à Kobe ont été la cible d'une énergie sismique très importante, ce qui se traduit par des vitesses de déformations élevées ($\dot{\epsilon} = 10^{-1}$ à 10 s^{-1}) au niveau de la structure et plus particulièrement dans les zones à forte concentration de contraintes au niveau des discontinuités géométriques et des cordons de soudures des joints. Des programmes de recherche expérimentale ont été réalisés à travers le monde sur des structures prototypes pour évaluer entre autre l'effet de la vitesse de déformations sur le comportement des assemblages soudés. Au Japon et aux Etats-Unis, cette démarche expérimentale a été mise en oeuvre afin d'identifier les causes des ruptures d'assemblages. Le premier travail a consisté à analyser la nature des dommages observés sur les structures réelles. Les paramètres d'essais ont été définis sur la base de cette analyse et plusieurs types d'essais réalisés :

- Des essais sur éprouvettes ont pour objectif de déterminer les caractéristiques mécaniques statiques des matériaux constitutifs et leur évolution en fonction de la vitesse de déformation.
- Des essais sur des structures en vraie grandeur ont pour objectif de simuler les dommages sismiques et d'étudier l'influence de la vitesse de déformation, de la température et du type d'assemblage sur le comportement dynamique.

L'objectif global est de trouver des informations utiles pour améliorer les performances des assemblages des structures métalliques en zone sismique.

Au Japon, l'étude des dommages subis par les constructions lors du séisme de Kobe (1995) a fait l'objet de nombreux rapports détaillés [A10, K21]. Pour comprendre l'origine des facteurs ayant causé ces dommages, des études statistiques ont été réalisées sur un grand échantillon de bâtiments dont le nombre d'étages varie entre 1 à 15. Pour définir de manière quantitative le niveau des dommages, on s'est basé sur la dénivellation angulaire résiduelle de l'étage i par rapport à l'étage $i-1$. Cette définition a permis de classer les dommages en trois catégories :

- **Dommage intermédiaire** : la dénivellation angulaire résiduelle est inférieure à 0.01 rad. Le voilement par flexion et une légère déformation plastique des éléments de contreventement sont observés. Les dommages peuvent être réparés et la structure peut être réutilisée après réparation.

- Dommage majeur: La dénivellation angulaire résiduelle est supérieure à 0.01 rad. Les dommages sont estimés difficiles à réparer à cause des fractures sévères subies par les éléments structuraux et leurs assemblages.
- Ruine : il s'agit d'une ruine totale des éléments structuraux et des assemblages.

Les investigations ont permis de constater que l'insuffisance de la résistance des assemblages était la cause essentielle de la ruine d'un grand nombre de constructions, alors que la majeure partie de ces constructions a été réalisée après 1982 et que le code parasismique était déjà en vigueur à cette époque.

Les éléments endommagés sont les suivants :

- Profilés tubulaires formés à froid de section rectangulaire utilisés pour les colonnes
- Profilés en H à semelles larges utilisés pour les poutres.
- Les assemblages; il s'agit de deux types d'assemblages qui ne diffèrent que par deux détails (voir figures 1.1, 1.2, 1.3). Le premier est réalisé en atelier, les semelles de la poutre sont soudées aux diaphragmes, l'âme de la poutre est soudée à la semelle du poteau. Le deuxième est réalisé sur chantier, les semelles de la poutre sont soudées aux diaphragmes, l'âme de la poutre est assemblée à la semelle du poteau par friction à l'aide d'un gousset plat, ce gousset est assemblé à l'âme de la poutre à l'aide de boulons à haute résistance.

Les modes de rupture des deux types d'assemblages sont analysés en détail, la rupture affecte plus particulièrement la partie inférieure de l'assemblage (semelle de la poutre - diaphragme). En ce qui concerne l'assemblage réalisé en atelier, sur un échantillon de 3013 assemblages une proportion de 6.5% est endommagée et les modes de rupture principaux observés sont les suivants :

- La rupture fragile du métal de base de la semelle inférieure de la poutre; cette rupture a pris naissance au pied du trou d'accès à la soudure, ce mode de rupture représente une proportion importante 49.7% , soit la moitié.
- La rupture fragile du métal de base du diaphragme ; cette rupture a pris naissance au bord du cordon de soudure (poteau–diaphragme), ce mode de rupture représente une proportion de 17.9%.
- La rupture fragile du cordon de soudure (semelle de la poutre – diaphragme), ce mode de rupture représente une proportion de 17.9%.
- Autres ruptures : 18%

En ce qui concerne l'assemblage réalisé sur chantier, sur un échantillon de 5056 assemblages une proportion de 16.9% est endommagée, soit 2.6 fois plus que la proportion des assemblages soudés en atelier et les modes de rupture principaux observés sont les suivants :

- La rupture fragile du métal d'apport de la zone thermiquement affectée de la semelle inférieure de la poutre et du diaphragme; ce mode de rupture représente une proportion de 16%.
- La rupture fragile à l'extrémité du cordon de soudure initiée à la pièce support; ce mode de rupture représente une proportion de 16.1%.
- La rupture fragile du métal déposé initiée aux cratères des soudures en pleine pénétration entre la semelle inférieure de la poutre et le diaphragme, ce mode de rupture représente une proportion de 42.3%
- Autres ruptures 25.6%

Nous constatons que les modes de rupture dépendent du type d'assemblages. Par exemple, le mode de rupture fragile du métal de base de la semelle de la poutre représente une proportion assez élevée pour l'assemblage réalisé en atelier, par contre cette proportion n'est que de 16.1% pour l'assemblage réalisé sur chantier.

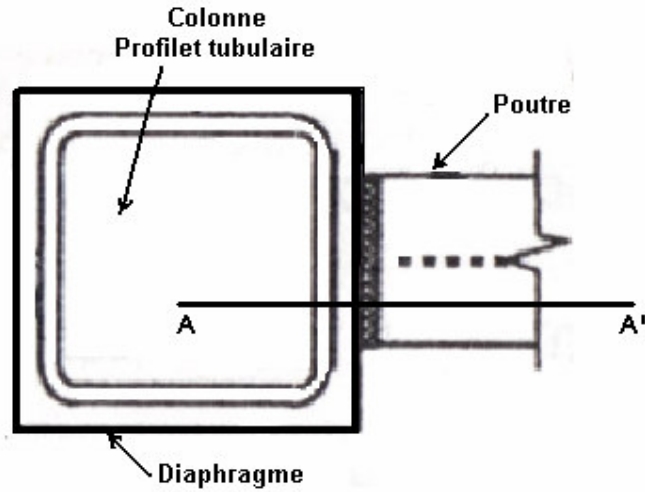


Figure 1.1. Assemblage poutre-poteau

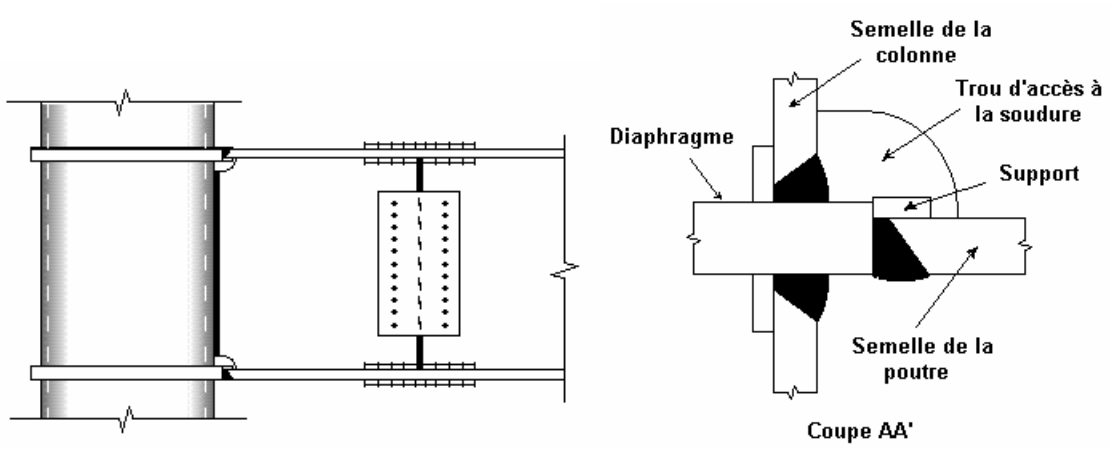


Figure 1.2. Assemblage poutre-poteau réalisé en atelier

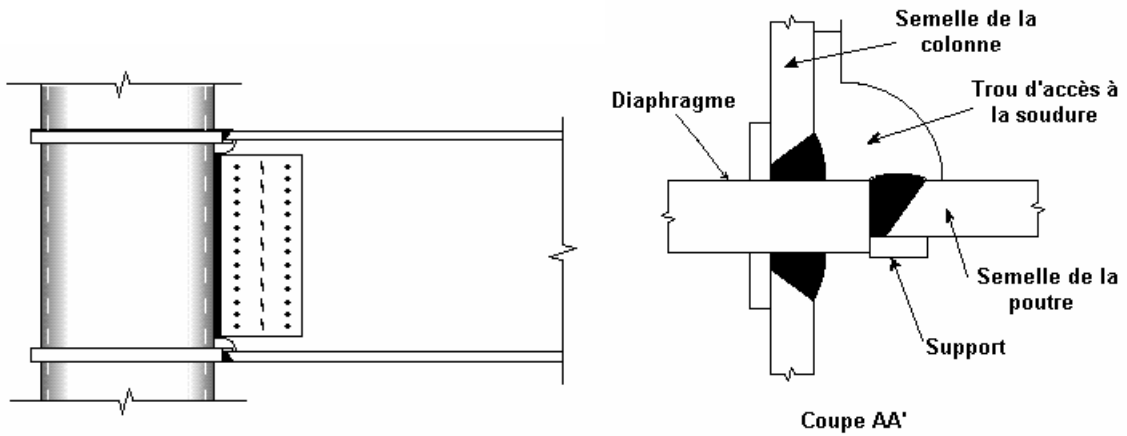


Figure 1.3. Assemblage poutre-poteau réalisé sur chantier

Un programme d'essai complet a alors été exécuté. Les structures testées sont des poutres connectées aux colonnes. L'extrémité de la poutre est soumise à un déplacement contrôlé sinusoïdal réversible d'amplitude constante jusqu'à la ruine, les paramètres d'essai sont les suivants :

- Deux types d'assemblages, le premier est semblable à celui des structures endommagées. Le deuxième est un assemblage nouveau, il a été confectionné dont le but de comparer son comportement dynamique au premier.
- Les fréquences d'excitation varient dans la gamme des fréquences propres déduites des constructions multi-étagées de Hygoken-Nanbu (1 à 15 étages). Les essais de chargement dynamiques sont effectués sous les fréquences 0.01, 0.02, 1.0, 3.0 Hz. Les faibles fréquences sont celles des constructions à plusieurs étages, château d'eau etc. Les fréquences supérieures 1 à 3 Hz sont celles des constructions basses.
- La température varie dans l'intervalle des températures des quatre saisons -50 , -20 , 13°C
- Le choix de l'amplitude des déplacements de l'extrémité de la poutre est lié au seuil de la dénivellation résiduelle relative 0.01 rad qui sépare les dommages intermédiaires des dommages majeurs. Cette amplitude est choisie de manière à avoir une déformation angulaire résiduelle à chaque demi-cycle après décharge de l'ordre de 0.01 rad.

Sur la base de ces paramètres, 12 essais dynamiques ont été accomplis, en faisant varier le type d'assemblage, la fréquence d'excitation et la température, en maintenant constante l'amplitude des déplacements de l'extrémité de la poutre.

L'analyse des résultats de ces essais a permis de faire les constatations suivantes :

- La résistance des structures testées sous la température ordinaire est atteinte au deuxième ou au troisième cycle de chargement. Après plusieurs cycles de chargement caractérisés par un comportement stable, la fissuration s'est propagée d'une manière ductile dans la semelle inférieure de la poutre au voisinage du cordon de soudure. La propagation de la fissuration dans le deuxième type d'assemblage était plus lente, avec un nombre de cycles à la ruine plus important. A cette température, toutes les ruptures étaient ductiles. Les structures testées sous la température de -50°C n'ont montré que des ruptures fragiles, la semelle de la poutre a subi une fracture qui s'est propagée d'une face à l'autre et la résistance a chuté d'une manière instantanée, il s'agit d'un mode de rupture fragile. On a observé des ruptures ductiles et des ruptures fragiles à -20°C . On constate que les modes de rupture sont très influencés par la température d'essai.
- L'évolution temporelle des vitesses de déformation $\dot{\epsilon}$ enregistrées au point de la plus forte concentration de contrainte (pied du cordon de soudure) montre que la vitesse de déformation maximum pour chaque fréquence d'excitation est atteinte au premier demi-cycle de chargement dynamique qui produit le premier écoulement plastique. Au cours des demi-cycles suivants l'amplitude des vitesses de déformation se stabilise entre un quart et un tiers de la vitesse maximum enregistrée au premier demi-cycle de chargement. La vitesse de déformation maximum se produit à la première plastification, après la vitesse de déformation décroît même sous sollicitations croissantes, car la vitesse de déformation est entravée par les déformations d'écrouissage, ceci justifie le fait que la vitesse de déformation maximum est atteinte avant que la force appliquée ait atteint son maximum.
- Le rapport entre la charge plastique et la charge ultime croit avec la fréquence d'excitation. Ce rapport croit de 0.58 sous la fréquence de 0.01Hz pour atteindre 0.98 sous la fréquence de 3 Hz. La charge plastique expérimentale et la résistance maximum augmentent avec les grandes fréquences et les basses températures. Les variations de la fréquence et de la température de l'essai influencent la charge plastique plus que la résistance maximum. Quand la fréquence augmente ou quand la température baisse, le rapport entre la charge plastique et la résistance maximum tend vers 1.

- Le rapport entre la résistance maximale enregistrée expérimentalement et la résistance plastique des semelles de la poutre calculée tenant compte de l'effet de la vitesse de déformation varie entre 1.01 jusqu'à 1.15 pour l'assemblage type 1 et de 1.10 jusqu'à 1.29 pour l'assemblage type 2. La résistance de l'assemblage type 2 est supérieure à celle de l'assemblage type 1.
- Dans les assemblages qui ont subi des ruptures ductiles, le nombre de cycles à la ruine n'est pas clairement identifié à cause de la croissance graduelle de la fissuration. Quand seule la fréquence varie et lorsque la température et le type d'assemblage sont maintenus constants, les résultats obtenus sont très dispersés: le nombre de cycles à la rupture peut diminuer ou rester sensiblement constant, seul le premier type d'assemblage sollicité à une température de -50°C montre une influence nette de la fréquence d'excitation sur le nombre de cycles à la ruine. Le nombre de cycles à la rupture décroît de 37 sous la fréquence de 0.01 Hz à 10 sous la fréquence de 3 Hz. Tous les essais montrent que le nombre de cycles à la ruine croît lorsque la température décroît. Sous une même température, les nombres de cycles à la ruine obtenus pour les structures constituées d'assemblages type 2 sont supérieurs à ceux des structures constituées d'assemblages type 1. Les valeurs du nombre de cycles obtenus pour les assemblages type deux sous la température de -50°C sont proches de celles obtenues pour l'assemblage type un sous la température ordinaire.
- La ductilité qui est calculé comme le cumul des déformations plastique diminue lorsque la fréquence augmente.

D'autres études expérimentales [N12, S9, S16] ont été réalisées au Japon. Leur objectif était d'étudier l'influence des détails de fabrication des assemblages, de la nuance d'acier, des procédés de soudage et de la vitesse de déformation sur la ductilité des structures, leur résistance, l'énergie dissipée, la rotation plastique accumulée, les modes de rupture et le nombre de cycles à la ruine. Ces études ont permis les deux conclusions suivantes :

- Une augmentation de résistance de 5 à 10 % est observée dans les structures sollicitées dynamiquement.
- L'influence de la vitesse de déformation sur les paramètres de ductilité reste inconclusive, les auteurs estiment qu'une élévation excessive de la température dans les zones dissipatives de la poutre est la cause dans le changement du comportement.

Aux Etats-Unis, après le séisme de Northridge (1994), plusieurs cas de dommages structurels, essentiellement dans les bâtiments en portiques métalliques auto-stables dimensionnés comme des portiques ductiles, ont été reporté [B17]. Bien que l'effondrement n'ait pas été atteint, ce type de structures avait subi des dommages structurels significatifs, l'effondrement des éléments structuraux et des assemblages par rupture fragile était dominant, alors que les codes parasismiques prévoient uniquement des déformations plastiques et le voilement local. L'étude des dommages subis par les constructions lors du séisme de Northridge a fait l'objet de nombreux rapports détaillés [S17, S18, S19, S20]. La synthèse de ces rapports permet de résumer comme suit les types de dommages fréquemment observés:

- De nombreux types de dommages sont apparus au niveau de la poutre, ces dommages consistent en voilement local, plastifications et fractures dans les zones thermiquement affectées des semelles supérieures ou inférieures de la poutre. Le voilement, la plastification et les fractures sont également observés dans l'âme de la poutre. Les dommages dans les semelles de la poutre dus aux déformations plastiques sont les moins significatifs, ils sont difficilement détectables et ils n'ont aucune incidence notable sur la dégradation de la résistance. Le voilement a entraîné une perte significative de la résistance plastique des poutres. La perte de résistance des sections compactes croît rapidement avec

le nombre de cycles et l'étendue des excursions dans le domaine plastique. Une fois que ce type de dommage a eu lieu, la semelle de la poutre perd rapidement sa capacité de résistance sous chargement cyclique. Cependant une certaine résistance à la compression demeure dans la semelle. Avec les structures en acier conventionnel, la fissuration se produit dans les zones des semelles de la poutre affectées thermiquement, ce type de dommage a une grande probabilité de se produire. Un dommage similaire au précédent se produit dans le métal de base des semelles de la poutre, ce type de dommage entraîne la perte entière de la capacité de résistance à la traction de la semelle de la poutre et par conséquent une réduction dans la contribution à la rigidité et à la résistance latérale de la structure. Les dommages dans la poutre sont détectés essentiellement au niveau de la semelle inférieure. Cependant des ruptures en nombre réduit sont également détectées au niveau de la semelle supérieure. Il existe plusieurs raisons qui expliquent ceci. L'une des raisons est l'action composite induite par la présence du plancher qui repose sur les semelles supérieures de la poutre et qui tend à déplacer l'axe neutre de la poutre vers la semelle supérieure de la poutre. Il en résulte une grande demande de déformation au niveau de la semelle inférieure par rapport à la semelle supérieure de la poutre. De plus, la présence du plancher tend largement à réduire la chance du voilement local de la semelle supérieure, la semelle inférieure qui est moins restreinte peut voiler facilement. Lors des essais préliminaires conduits par le SAC (Seismic Analysis Code) sur des structures en vraie grandeur en l'absence du plancher, la rupture dans ces structures se produit de façon aléatoire tantôt dans la semelle supérieure, tantôt dans la semelle inférieure, ce qui signifie que le plancher a une influence significative sur le comportement de la poutre.

- De nombreux types de dommages sont observés au niveau de la colonne, ces dommages consistent en fissurations élémentaires à l'intérieur de l'épaisseur de l'aile, typiquement au voisinage de la jonction semelle de la poutre semelle de la colonne. Ce dommage n'affecte pas toute l'épaisseur de la section de la semelle de la colonne et ne peut être détectable que par des techniques non destructives. Ce dommage peut consister en voilement local de la semelle, arrachement lamellaire, fissuration complète ou partielle des zones thermiquement affectées et du métal de base
- Les dommages les plus fréquents sont ceux observés dans les cordons de soudure qui assemblent les semelles de la poutre à celle de la colonne.
- D'autres types de dommages sont observés au niveau des cornières d'assemblage entre l'âme de la poutre et la semelle de la colonne et au niveau de la zone du panneau d'âme de la colonne.

Les recherches des causes ayant déclenchés les ruptures fragiles des assemblages durant les derniers événements sismiques ont pris des directions différentes.

Au Japon, les recherches sont orientées essentiellement vers les essais dynamiques: influence de la vitesse de déformation, influence de la température, la géométrie des détails d'assemblages.

Aux Etats-Unis, les recherches sont orientées vers la compréhension du comportement non linéaire des structures endommagées par rupture fragile, les programmes d'essais sont focalisés essentiellement sur le développement de nouveaux types d'assemblages et sur les procédés de soudage. L'influence de la vitesse de déformation n'a pas été l'objet d'investigations expérimentales. Néanmoins plusieurs auteurs [C31, D6, M18] estiment que l'influence de la vitesse de déformation est l'un des facteurs qui ont contribué à la rupture fragile des assemblages durant le séisme de Northridge.

En Europe, le progrès des connaissances s'est poursuivi, grâce à des activités de recherche visant à l'amélioration continue des codes parasismiques. En effet dans le programme de recherche expérimental [M19], MAZZOLANI a conclu que la vitesse de déformation possède

une influence non négligeable sur le comportement des assemblages. Dans les conditions d'un chargement monotonique sous des vitesses de déformation supérieures à $0.1s^{-1}$, on observe que la résistance augmente considérablement et la ductilité est réduite de plus de 27%. Cependant dans les conditions d'un chargement cyclique la réduction de la ductilité due à des vitesses de déformation élevées n'est pas tout à fait clair, les résultats obtenus sont plutôt dispersés. Des études expérimentales réalisées par [G14, P8] ont montré que pour des vitesses de déformation allant de 0.1 à $10 s^{-1}$ la réduction de la capacité de rotation des assemblages est de l'ordre de 40 à 50%.

Notre travail exploite les résultats des essais effectués dans le cadre du projet de recherche Européen RECOS intitulé : "Research on the reliability of moment resistance of steel buildings". Ce projet comporte plusieurs tâches, mais nos développements portent sur la simulation du comportement des structures d'essais qui ont fait l'objet du rapport D.Beg, A. Plumier, C. Remec, L. Sanchez, dont la synthèse est détaillée au chapitre 3.

1.2. PLAN DE LA THESE

Le travail est présenté en huit chapitres.

Le premier chapitre est la présente introduction

Le deuxième chapitre donne une synthèse des approches développées par divers chercheurs concernant l'influence de la vitesse de déformation sur les propriétés mécaniques des matériaux. On présente alors une formulation générale des lois de comportement viscoplastiques des matériaux, notamment le modèle de PERZYNA que nous avons utilisé dans le cadre de notre travail. Afin de faciliter son application aux structures métalliques, ce modèle est restreint au cas de la traction compression pure et au cas du cisaillement pur.

Au troisième chapitre, on présente une étude expérimentale effectuée à l'université de liège. On décrit alors les spécimens testés et les essais effectués au laboratoire. On présente ensuite les résultats expérimentaux obtenus et l'analyse de ces résultats.

Au quatrième chapitre, on présente une formulation en éléments finis non linéaire dynamique des constructions métalliques considérant l'influence de la vitesse de déformation.

Dans le cinquième chapitre, on propose une modélisation en éléments finis des structures d'essais permettant de simuler jusqu'à la ruine le comportement dynamique non linéaire de ces structures avec et sans influence de la vitesse de déformation

Au sixième chapitre, on présente les résultats obtenus expérimentalement et ceux des simulations numériques. Notre analyse consiste à comparer les résultats obtenus expérimentalement aux résultats issus des deux types de simulations numériques; le premier type de simulation considère l'influence de la vitesse de déformation ; le deuxième type de simulation ignore cette influence. Sur la base de cette étude comparative, on évalue l'influence de la vitesse de déformation sur le comportement global et sur le comportement des éléments constitutifs des structures d'essais.

Au septième chapitre, on présente l'étude du comportement dynamique élasto-plastique des structures métalliques types tenant compte du comportement réel des matériaux à vitesse élevée de mise en charge. Les structures de références étudiées, leur mécanisme de ruine et les accélérogrammes considérés sont décrits en détail. Dans la première partie de ce chapitre, on

étudie l'influence de la vitesse de déformation sur le comportement local des structures de références, à savoir sur la capacité de rotation, la ductilité locale et sur la séquence de formation des rotules plastiques. Dans la deuxième partie de ce chapitre, on étudie l'influence de la vitesse de déformation sur le comportement global des structures de références. Ce comportement global est pris en compte au travers d'un coefficient global qui traduit l'aptitude de la structure à se déformer dans le domaine inélastique. On donne au préalable une synthèse des méthodes existantes d'évaluation du facteur de comportement q développé par divers chercheurs. Les deux méthodes que nous avons jugé appropriées pour tenir compte de l'influence de la vitesse de déformation sur le facteur de comportement sont celles de BALLIO et SETTI, qui utilisent l'analyse dynamique non linéaire et celle de COMMO et LANNI, qui utilise une approche basée sur un modèle simplifié des échanges d'énergie survenant dans une structure durant un tremblement de terre.

Le huitième chapitre rassemble les conclusions et les apports les plus significatifs de la thèse, ainsi que les développements futurs qui pourraient constituer la continuité de ce travail.