

# **CHAPITRE 8**

## **CONCLUSIONS GENERALES**

Les observations post-sismiques sur des bâtiments endommagés par des tremblements de terre récents de Northridge (Californie) 1994 et celui de Kobe (Japon) 1995 ont montré que la rupture fragile était dominante et les modes de rupture sont influencés par les types d'assemblages. Cela signifie que des lacunes significatives dans la méconnaissance du comportement sismique des structures métalliques demeurent. En particulier, on peut citer l'influence de la vitesse de déformation, les modes supérieurs de vibration et le caractère impulsif des sollicitations induites par l'action sismique en champ proche. Ces facteurs ont une influence considérable sur le mécanisme de ruine et par conséquent sur la capacité de dissipation d'énergie et d'accumulation des rotations plastiques. Ceci implique des faiblesses dans les règles de dimensionnement de ce type de structures.

L'objectif de ce travail est réalisé par les trois étapes suivantes :

- L'étape initiale consiste à résumer l'état des dommages subis par les structures métalliques durant les séismes de Northridge et de Kobe et à examiner les investigations expérimentales post-sismiques réalisées dans le but d'identifier les facteurs qui ont contribué à des ruptures prématurées des assemblages.
- La deuxième étape consiste à réaliser une étude bibliographique destinée à mettre en évidence l'influence de la vitesse de déformation sur le comportement dynamique des matériaux et en particulier sur les aciers usuels de construction. On a examiné plusieurs modèles de lois constitutives tenant compte de l'influence de la vitesse de déformation développés ces dernières années par divers chercheurs. Pour des raisons de simplicité et de disponibilité des données expérimentales, on a opté pour le modèle de PERZYNA. Brièvement nous pouvons rappeler que tous les modèles donnent une relation entre la vitesse de déformation inélastique et le déviateur de la contrainte avec des équations pour des variables internes d'état, représentant la résistance du matériau à l'écoulement plastique. La majorité des formulations utilisent la variable scalaire associée à l'écrouissage isotrope et une variable tensorielle concernant l'écrouissage cinématique. Parmi les différentes lois, on peut distinguer, de manière générale, deux groupes selon la formulation mathématique. Le premier groupe ne fait pas référence à la surface d'écoulement. C'est la plus grande différence entre ces deux modèles. L'absence de la surface d'écoulement dans le premier groupe nécessite une formulation mathématique plus élaborée, pour produire directement le passage entre la partie linéaire et curviligne du diagramme contrainte déformation observée pendant les essais de chargement et déchargement des éprouvettes. Le modèle de PERZYNA appartient au deuxième groupe qui fait référence à la contrainte interne isotrope représentant la surface d'écoulement plastique ; il permet de manière claire de distinguer les domaines linéairement élastiques et inélastiques dans le comportement des matériaux.
- La troisième étape consiste à introduire le modèle de PERZYNA dans la formulation en éléments finis, cette tâche est développée au chapitre. 4. Les formulations en éléments finis classiques même à comportement non linéaire ne permettent pas de tenir compte d'une manière directe de l'influence de la vitesse de déformation. Deux éléments finis dans lesquels les lois de comportement sont explicites ont permis de tenir compte de l'influence de la vitesse de déformation. Il s'agit d'un élément poutre qui est conçu pour tenir compte de l'écrouissage et de la distribution des déformations plastiques en profondeur et en longueur dans la partie déformable de l'élément. Cet élément est subdivisé en segments et chaque segment est subdivisé en couches appelées fibres. La précision de ce modèle augmente avec le nombre de segments et de fibres. Dans cet élément on a introduit au niveau de chaque fibre la restriction du modèle de PERZYNA au cas d'un allongement-raccourcissement pur. L'utilisation des fibres dans la modélisation de l'élément tient compte rationnellement de l'interaction entre le moment fléchissant et de l'effort normal.

Le deuxième élément utilisé est l'élément ressort qui modélise le comportement non linéaire de l'assemblage et en particulier le comportement au cisaillement du panneau d'âme. Dans cet élément on a introduit la restriction du modèle de PERZYNA au cas du cisaillement pur. Cette modélisation a montré de très bonnes performances en terme de concordance des résultats obtenus expérimentalement et ceux déduits des simulations numériques. Les graphes et les tableaux qui illustrent les paramètres qui représentent le comportement des structures montrent que la prise en compte de l'influence de la vitesse de déformation permet d'approcher avec une très bonne précision le comportement dynamique réel des structures et celui de leurs éléments.

De l'ensemble des analyses et des développements effectués on peut tirer les conclusions suivantes.

1. Les essais de laboratoire effectués sur des éprouvettes de formes variées sous différentes vitesses de déformation, ont montré que la limite élastique et la contrainte ultime augmentent avec la vitesse de déformation, la limite élastique est plus sensible à la vitesse de déformation que la contrainte ultime. Le rapport entre la limite élastique et la contrainte ultime croît et tend vers 1 pour les vitesses de déformation supérieures. Sous la vitesse de déformation de  $0.01s^{-1}$  l'accroissement de la limite élastique est de l'ordre de 10%, celui de la contrainte ultime est de 5%. La réduction de l'aire de la section transversale, de l'élongation uniforme et de l'élongation à la rupture est insensible à la vitesse de déformation. Tous les chercheurs sont unanimes pour affirmer ces résultats.
2. La comparaison des résultats expérimentaux des structures d'essais SW1 et SW2 sollicitées respectivement sous les fréquences d'excitation 0.3 Hz et 0.5 Hz montrent qu'une variation de 0.2 Hz réduit la capacité de dissipation d'énergie de 22%, la capacité d'accumulation des rotations plastiques de 11.5% et le nombre de cycles à la ruine de 12%. Ceci confirme expérimentalement une influence considérable de la vitesse de déformation sur les structures sollicitées sous des fréquences élevées.
3. Les structures d'essais n'étaient le siège d'aucun type de voilement local à l'exception de la structure d'essai SW1 qui a montré les premiers signes de voilement local de la semelle de la poutre. Ceci est en bon accord avec les règles de l'EC3 et des auteurs qui classent les sections des éléments constitutifs des structures d'essais dans la catégorie des classes compactes. L'absence du voilement local a constitué un atout très important pour mettre en évidence l'influence de la vitesse de déformation sur le comportement dynamique des structures d'essais car, d'une part, le logiciel DRAIN-2D ne tient pas compte du voilement local, d'autre part, le voilement local a pour effet d'atténuer l'influence de la vitesse de déformation sur le comportement dynamique des éléments de la structure.
4. A l'exception de la structure d'essai UB1, les diagrammes qui représentent la résistance et l'énergie dissipée par cycle montrent qu'il n'y a aucune réduction ni dans la résistance ni dans la capacité de dissipation d'énergie cyclique jusqu'à la ruine où la chute de la résistance et de la capacité de dissipation d'énergie se produit d'une manière brutale. Ce type de comportement caractérise l'endommagement par propagation de la fissuration. Seule la structure UB1 présente une réduction très importante dans la résistance et dans la capacité de dissipation d'énergie dès les premiers cycles de chargement dynamique. Ce type de comportement qui est semblable à celui qui caractérise l'endommagement par voilement local est dû au glissement des boulons de part et d'autre de la position d'équilibre durant la phase de chargement dynamique. Ce phénomène a réduit

considérablement l'influence de la vitesse de déformation sur le comportement dynamique de la structure d'essai UB1.

5. La vitesse de déformation n'a pas d'influence directe sur la rigidité initiale de la structure. Cependant elle s'oppose aux déplacements nodaux de la structure à cause du retard qui apparaît dans le processus de plastification. Plus la vitesse de déformation est élevée plus la résistance est grande pour un même déplacement. Un changement de vitesse de déformation en cours de chargement produit un changement immédiat dans l'histoire des déplacements nodaux
6. L'énergie moyenne dissipée par cycle dépend de la rigidité de la structure. Elle est plus importante pour les structures rigides SW1, SW2 et SB1. Elle est de l'ordre de 2 à 3 fois plus grandes que celles des structures moins rigides UB1 et UB2. Cependant l'influence de la vitesse de déformation ne dépend que de la fréquence d'excitation
7. La plus faible énergie totale dissipée est observée pour la structure rigide SW2 sollicitée sous la fréquence supérieure de 0.5 Hz
8. Les structure boulonnées non symétriques UB1 et UB2 présentent des valeurs de rotations plastiques accumulées et des nombres de cycles à la ruine beaucoup plus importantes, soit trois fois plus grandes que celles observées pour les structures plus rigides SW1, SW2 et SB1. Cependant l'influence de la vitesse de déformation ne dépend que de la fréquence d'excitation.
9. Les structures SW2, SB1, UB2 qui sont sollicitées sous la fréquence supérieure de 0.5 Hz sont les plus influencées par la vitesse de déformation. La structure UB1 qui sollicitée sous la fréquence de 0.5 Hz est influencée dans les mêmes proportions que la structure SW1 qui est sollicitée sous une fréquence inférieure de 0.3 Hz. Ceci à cause du glissement des boulons qui a eu lieu dans la structure UB1 pendant la phase de chargement dynamique et qui a pour effet d'atténuer l'influence de la vitesse de déformation au même titre que l'effet du voilement local
10. La prise en compte de l'influence de la vitesse de déformation sur le comportement local et sur le comportement global est introduite de manière différente. Cependant les résultats obtenus ont montré des influences similaires
11. En présence du voilement plan, l'influence de la vitesse de déformation diminue considérablement. Le voilement hors plan réduit la résistance et la structure devient insensible à la vitesse de déformation.
12. En terminant cette étude consacrée au calcul de la réponse dynamique des structures dans le domaine au-delà de la limite élastique, on peut constater que dans l'état actuel des recherches, il est difficile de trouver des auteurs qui donnent une solution satisfaisante à ce problème. La nécessité de prendre en compte l'influence de la vitesse de déformation impose le choix d'un modèle constitutif parmi plusieurs, pas forcément adaptés aux problèmes dynamiques. Si le modèle de PERZYNA est le plus adapté, donc le plus utilisé pour analyser le comportement dynamique des structures, on trouve de nombreuses autres lois, dont la majorité est utilisée pour décrire les évolutions rhéologiques lentes tels que le fluage ou la relaxation. Ceci démontre que les résultats des calculs dépendent du choix de

la formulation constitutive utilisée et peut conduire à des différences significatives pour des structures sollicitées sous des fréquences élevées et des amplitudes importantes.

13. Au cours de ce travail nous avons constaté que la base de données matérielles est très restreinte. Les publications contenant les valeurs de paramètres sont rares. Celles qui sont publiées sont donc d'une grande importance pour les applications numériques. Cependant, il faut signaler qu'on trouve les différents jeux de paramètres pour le matériau identique et la même loi conduisant à des résultats différents. On rencontre un problème identique avec des paramètres destinés à des lois différentes et au même matériau.
14. Il est évident que l'histoire du matériau et son traitement antérieur ont une importance prépondérante et peuvent être la cause de dispersions.
15. Nous pouvons nous demander si la formulation des lois constitutives tenant compte de l'influence de la vitesse de déformation, telles qu'elles sont proposées aujourd'hui est adéquate au comportement des structures sous sollicitations dynamiques. En effet, au cours des vibrations, la vitesse de déformation varie beau coup. L'accélération joue un rôle très important. Pourtant, dans les formulations utilisées dans le calcul, nous avons seulement une relation entre la vitesse de déformation et la contrainte. De plus, la détermination des paramètres se fait dans les conditions d'une vitesse de déformation constante. On peut donc s'interroger s'il ne faut pas donner un nouveau modèle du comportement de matériau, adapté aux conditions des structures et tenir compte de l'accélération dans la détermination des paramètres.
16. Les méthodes et les différentes approches utilisées pour évaluer le facteur de comportement ont été présentées.  
Trois exemples de structures soumises aux accélérogrammes de Kobé et de Northridge ont été analysés en utilisant les deux méthodes de BALLIO-SETTI et énergétiques pour évaluer le facteur de comportement tout en tenant compte de l'influence de la vitesse de déformation à l'aide du logiciel DRAIN-HASSOUNI.  
Les résultats qui sont présentés au Tableau 7.14 montrent que l'effet de la vitesse de déformation réduit la capacité de dissipation de l'énergie induite par le séisme et par conséquent la ductilité et le facteur de comportement se trouvent réduits de l'ordre de 15% pour des vitesses de déformation assez importantes surtout des zones de champs proche. Cette étude a bien révélé l'intérêt de tenir compte de l'effet de la vitesse de déformation en champs proche dans l'évaluation des performances sismiques des structures.
17. Pour dominer encore plus l'influence de la vitesse de déformation sur le comportement des structures en champs proche et sur le facteur de comportement, des recherches nouvelles sont nécessaires.