

Texte de la 553^e conférence de l'Université de tous les savoirs donnée le 23 octobre 2004

Philippe Bisch : « **Buildings et bâtiments de grande hauteur : un défi pour les structures** »

La conception des bâtiments

Le sujet qui nous intéresse ici porte sur les grands bâtiments, que ce soit en hauteur ou horizontalement. Ainsi, nous allons nous préoccuper des bâtiments exceptionnels et tout particulièrement de leur conception, qui est basée sur certains objectifs :

- en premier, la *fonctionnalité*, c'est-à-dire l'adéquation entre la forme d'un bâtiment, son architecture et sa fonction. En effet, un même terrain peut accueillir une diversité de bâtiments, conçus en rapport à leur fonction respective : bureaux, logements, amphithéâtre, hall de gare...
- ensuite, la *stabilité* et la *résistance* ;
- enfin, la *durabilité*, critère essentiel pour des raisons économiques évidentes et qui tend à occuper un rôle de plus en plus important.

En ce qui concerne les aspects techniques, une réglementation existe et doit bien entendu être respectée. Elle est composée de lois, décrets, arrêtés administratifs, mais aussi et surtout de règles techniques qui forment le corpus de normalisation et qui touchent différents aspects de la construction, en ne se restreignant nullement au domaine des structures.

La conception des bâtiments est en général partagée entre deux acteurs :

- d'un côté, l'architecte, qui est l'instigateur d'une création architecturale et qui règle les problèmes de fonctionnalité à travers le *design* du bâtiment.
- de l'autre, l'ingénieur qui se penche quant à lui sur les détails purement techniques de *stabilité*, *résistance* et de *durabilité*.

Pour concevoir un bâtiment, plusieurs corps de métier, qui sont appelés corps d'état, participent au chantier : le premier dans le temps s'occupe du gros œuvre, autrement dit de la structure elle-même, tandis que le second œuvre fait notamment référence aux travaux de finition : peinture, moquette, cloisons... Dans les bâtiments modernes, une grande part est consacrée aux réseaux : pour le gaz, l'électricité, la climatisation, l'acoustique, mais aussi ceux dédiés à la communication. Ainsi, une multitude de techniciens opérant dans divers corps de métier cohabitent et travaillent ensemble dans une même direction : ériger le bâtiment.

Nous allons développer ici uniquement le pôle « structure d'un bâtiment », et ce en trois volets. D'abord, nous allons mettre en lumière les règles régissant la conception d'une structure. Ensuite, nous aborderons la fonction de portage qui reste évidemment le caractère premier de l'ouvrage. Enfin, nous étudierons plus en détail la notion de contreventement qui pose bien souvent les problèmes les plus délicats.

La conception des structures se fonde d'une part sur certaines exigences réglementaires et normatives, liées à la Mécanique ; d'autre part, il existe des précautions à prendre quant à la protection contre le feu, l'acoustique, etc., qui induisent également des contraintes sur la forme de la structure. De la même façon, les caractéristiques architecturales, que ce soit au niveau de la fonctionnalité de l'ouvrage ou au niveau de sa forme, vont s'y répercuter : la géométrie ainsi que la consistance des structures vont ainsi être influencées. Par exemple, pour atténuer d'éventuelles nuisances sonores, les murs doivent avoir une épaisseur minimale de

béton, épaisseur qui ne sera pas absolument nécessaire en ce qui concerne l'aspect structural du bâtiment.

Qu'est ce qu'une structure ?

Une structure est en quelque sorte le squelette d'un bâtiment et lui permet de résister aux efforts¹ auxquels il est soumis. Pour simplifier, nous pouvons classer les structures en trois catégories :

- un ensemble de poutres et de poteaux, construits avec des matériaux différents selon les époques (au Moyen Age, le bois était majoritairement représenté, alors que désormais le béton et l'acier sont rois). Dans ce principe, les poutres horizontales et les poteaux verticaux n'ont pas de contreventement, autrement dit de diagonale. Ces structures en ossature sont assez souples et fonctionnent principalement en flexion, sauf les poteaux qui travaillent également en compression en subissant les effets du poids propre. En général, les structures de ce type sont assez ductiles.

- un deuxième type de constructions assez courantes, surtout en France, comprend des murs, appelés « voiles » par les ingénieurs, faits en béton, en maçonnerie, en panneaux métalliques ou en bois (mais plus rarement). On peut également classer dans le même type de constructions les palées de contreventement en métal. Des structures à palées de contreventement sont caractérisées par exemple par des croix de Saint André qui travaillent en traction ou en compression et qui permettent ainsi une résistance aux efforts horizontaux ; bien souvent, ce type d'agencement se retrouve dans les structures métalliques. En général, ces types de structures sont plutôt raides et, d'un point de vue dynamique, les domaines de fréquences de ce type de constructions seront notablement plus élevés que dans le cas des ensembles de poutres.

- le troisième type de constructions est constitué de « boîtes » bien closes, aussi appelées constructions tubulaires, qui sont également largement utilisées en France. Elles sont construites en béton banché, peu armé, mais très raide. Par exemple, la tour Areva, contrairement à d'autres tours de la Défense, est construite avec des murs périphériques en béton qui donnent à l'ensemble une certaine rigidité et cela malgré les ouvertures. Ces structures fonctionnent à des fréquences encore plus élevées et sont relativement peu ductiles. Par contre, leur résistance est indéniable.

Sur quels concepts va-t-on baser la conception des structures ?

Un principe contenu dans l'EN1990, partie de l'Eurocode qui regroupe les règles de la conception structurale en Europe, énonce l'essentiel : « une structure doit être conçue et réalisée de sorte que, pendant sa durée de vie escomptée, avec des niveaux de

¹ *Petite parenthèse pour les non initiés : la traction est un effort qui tend à étirer un élément rectiligne ; à l'inverse, une compression le raccourcit. La flexion provoque un fléchissement qui correspond à un changement de forme, tandis que la torsion est un moment qui tord (comme son nom l'indique) ; c'est l'image typique du linge que l'on essore. Ces modes de fonctionnement sont spécifiques et une étude séparée de chacun d'entre eux est nécessaire. L'ingénieur de structure tente de construire un bâtiment capable de résister à chacune de ces sollicitations.*

fiabilité appropriés et de façon économique, elle résiste à toutes les actions et influences susceptibles d'intervenir pendant son exécution et son utilisation et reste adaptée à l'usage pour lequel elle a été conçue. ». Cette citation met en lumière la notion de *durée de vie*, qui se réfère aux problèmes de durabilité : un bâtiment doit rester fonctionnel pendant toute sa durée de vie.

D'autres notions plus approfondies, notamment celle de fiabilité, doivent aussi être prises en considération. Aujourd'hui, on ne peut plus dire que les conceptions d'ouvrages sont déterministes : un substratum probabiliste prend en effet une place de plus en plus importante et intervient dans la conception elle-même, tout au moins dans la manière dont sont rédigées les normes.

Après une très longue période de gestation, le système de normes de calcul va passer sous le régime des Eurocodes, en tout cas dans tous les pays associés au CEN, le Comité Européen de Normalisation. Dès le début des années 90, le Comité européen de normalisation (CEN) a entrepris la rédaction des Eurocodes, normes européennes de conception et de dimensionnement des structures. Cette démarche vise à pallier l'absence d'harmonisation entre les règles de construction à travers l'Europe et donne aux Eurocodes un statut de normes européennes. Les Eurocodes sont au nombre de dix, avec des numérotations de 0 à 9. Le premier, qui porte l'indicatif 0, présente les bases « philosophiques » de la conception des structures, les autres traitant des différents types de matériaux. Au total, les Eurocodes recouvrent environ 60 normes et doivent venir à l'usage des ingénieurs dans les années à venir.

L'introduction des Eurocodes va ainsi bouleverser les habitudes des ingénieurs européens. Cependant, en France, les ingénieurs ne seront pas dépaysés, dans le sens où les bases de calcul introduites dans les Eurocodes y sont déjà utilisées depuis de nombreuses années.

La méthode de justification mise en œuvre dans les Eurocodes est une méthode semi probabiliste de conception et de dimensionnement appelée la *méthode des états limites*. Le principe de cette méthode consiste à définir différents états limites qui ne pourront à aucun moment être dépassés sous peine de rupture, par exemple. On doit ainsi vérifier par des calculs appropriés que les efforts exercés sur la structure n'induisent jamais des déformations excessives et restent toujours en dessous des états limites. La vérification va toucher différents aspects de résistance, de stabilité et de fonctionnalité : les stabilités générale et locale bien entendu, la stabilité au feu, la résistance des éléments structuraux... La fonctionnalité du bâtiment sera aussi vérifiée, « celle de l'ingénieur », dans le sens où l'aspect architectural ne sera pas remis en cause ; ce sera plutôt l'aptitude de la structure à remplir la fonction pour laquelle elle a été construite qui sera vérifiée, par exemple la limitation des vibrations, des déformations, etc. En effet, même si la structure résiste à des charges élevées, elle peut malheureusement être insatisfaisante du point de vue de l'usage, c'est-à-dire en rapport aux contraintes fonctionnelles induites par l'usage dans la vie quotidienne du bâtiment ; d'où les vérifications faites à ce sujet. Un dernier objectif clairement explicité dans les Eurocodes est la durabilité, ceci évidemment dans le but de protéger le patrimoine sur le long terme.

Parmi les états limites, certains sont parfaitement normalisés. Les plus usuels sont :

- *l'État Limite Ultime*, noté ELU dans la littérature, qui concerne en fait toutes les vérifications de sécurité de la structure : la stabilité, la résistance...
- *l'Etat Limite de Service*, noté ELS dans la littérature, qui permet de vérifier certains aspects de bon fonctionnement de la structure dans des conditions d'usage habituelles.

Un Maître d’ouvrage construisant un édifice particulier peut s’appuyer désormais sur ces normes pour définir ses propres états limites. Il faut bien sûr leur associer des situations réelles que la structure sera amenée à supporter, situations pondérées par des coefficients de sécurité. Cette souplesse a été utilisée dans la norme qui traite de la réévaluation des bâtiments existants vis-à-vis des risques sismiques, dans laquelle des états limites spécifiques ont été mis en place. Par exemple, l’état limite de limitation de dommage, qui s’inscrit dans la catégorie des ELS, peut s’énoncer comme ceci : « si un séisme d’une certaine amplitude a lieu, l’ouvrage doit tout de même être réparable ». Un état limite proche de l’effondrement est un autre exemple : « le séisme a lieu et la structure doit tenir jusqu’à la complète évacuation du bâtiment ». Ainsi, dans cet état limite, les vies des personnes présentes à l’intérieur de l’ouvrage priment et la ruine du bâtiment n’est pas considérée, à condition que toutes les personnes soient saines et sauvées au final. À ces états limites sont associées des situations de calcul que l’ingénieur peut traiter avec les outils dont il dispose. Les paramètres suivants influent sur ces états limites :

- la durée de vie du projet, généralement cinquante ans pour les bâtiments, plus pour les ouvrages d’art ;
- les actions subies par la structure ;
- les matériaux utilisés pour l’érection du bâtiment ainsi que sa géométrie.

Les modes de défaillance et les vérifications de sécurité

L’examen des modes de défaillance de la structure se fait à travers différentes situations de projet. En vue d’examiner ces modes de défaillance, des états limites vont être établis et des actions considérées (**figure 1**).

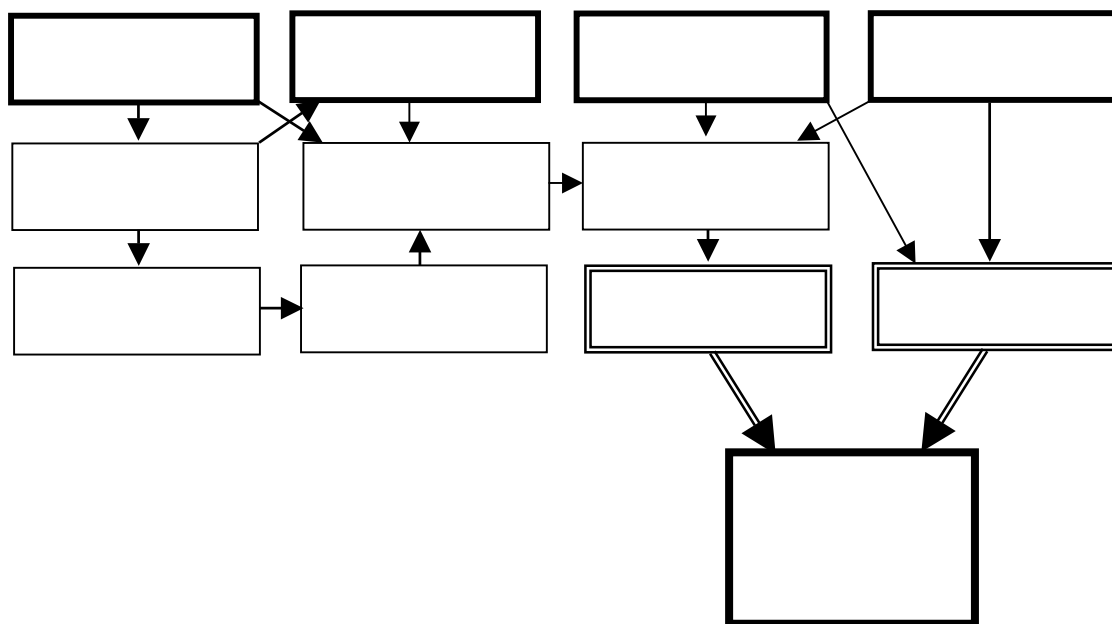


Figure 1 : logique de vérification d’une structure

Ainsi, la géométrie du bâtiment et les combinaisons d’actions permettent de concevoir la structure sur les plans statiques et dynamiques. Cela passe évidemment par la détermination des paramètres idoines de calcul, les « effets de calcul », que ce soient les déformations, les déplacements, les contraintes, les moments fléchissants... en résumé tout ce qui préoccupe l’ingénieur en ce qui concerne les vérifications d’un ouvrage. Or, une fois les hypothèses de calcul bien choisies, hypothèses qui devront

être vérifiées expérimentalement pour ce qui concerne les matériaux, une modélisation de la structure est choisie et alors des relations entre tous les effets de calcul apparaissent. Ces effets de calcul prennent finalement place dans une inéquation de stabilité : les effets de calcul, autrement dit la façon dont le bâtiment réagit face aux charges imposées, doivent à tout moment et en tout point de la structure être inférieurs à leurs résistances ou à leurs limites respectives, notions explicitées ci-après. À partir de la géométrie des matériaux utilisés, de la connaissance de leurs propriétés mécaniques et donc des résistances de calcul, on va construire en face des effets de calcul considérés les résistances correspondantes. Le but de tout cela est bien sûr de s'assurer qu'à tout moment et en tout point de la structure les effets de calcul vérifient l'inéquation et sont bien inférieurs à leurs résistances respectives. On peut choisir par exemple les déplacements comme effet de calcul prépondérant et baser nos calculs en fonction du non dépassement d'un déplacement à un endroit donné. Mais de manière générale, l'effet considéré peut être un effort normal, un moment fléchissant, une contrainte...

La vérification de fiabilité est quant à elle entreprise à travers un certain nombre de coefficients de sécurité. En ce qui concerne les effets de calcul (contraintes, déplacements, déformations...), on va considérer un nombre fini d'actions à l'origine de ces effets : les charges permanentes, les effets thermiques, du vent, de la neige, des séismes, des accidents (par exemple, les tours du World Trade Center étaient-elles conçues pour résister à une collision avec un avion perdu dans le brouillard ?...). Toutes ces actions sont pondérées par des coefficients de sécurité qui donnent une marge quant à l'intensité des événements pris en compte et par des facteurs de combinaison qui rendent compte de la probabilité de leurs présences simultanées. Les normes fixent d'ailleurs l'exact détail de ces combinaisons. Bien évidemment, les dimensions de l'ouvrage sont elles aussi prises en compte à toutes les étapes du calcul.

La fonction de portage

La conception passe en particulier par le dimensionnement de la structure et par les vérifications de stabilité. Il ne faut pas oublier que la fonction première des structures est le portage, c'est-à-dire leur aptitude à descendre les actions verticales dues à la pesanteur, aux surcharges, et ceci de leur point d'application jusqu'aux fondations du

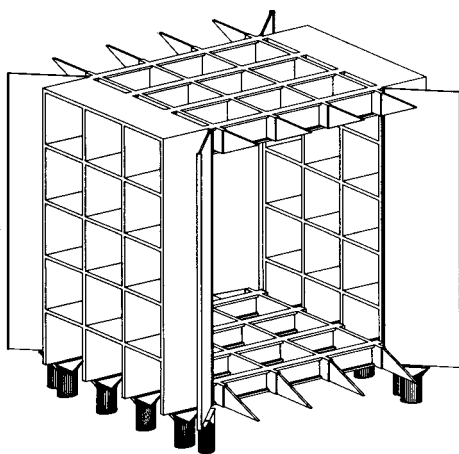


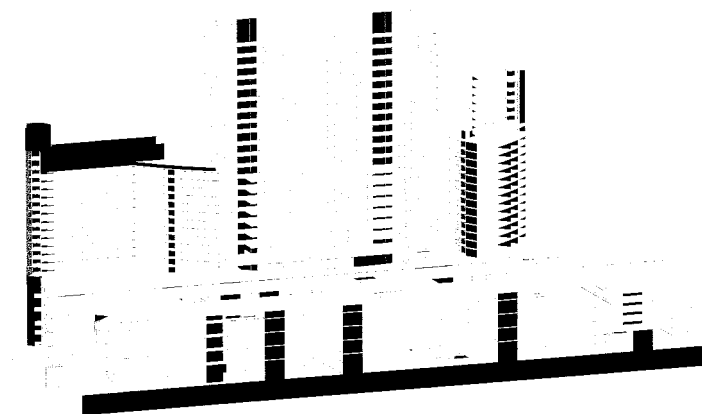
Figure 2 : ossature principale de l'Arche de la Défense

bâtiment. Le portage s'effectue comme ceci : les planchers reportent le poids supporté vers la structure verticale porteuse, des murs ou des poteaux par exemple. Des planchers de reprise permettent éventuellement de transférer les efforts d'une structure porteuse vers une autre. Ainsi de suite, les charges descendent progressivement jusqu'à un niveau de fondation qui sera apte à résister.

Analysons d'un peu plus près l'Arche de la Défense. Il possède une forme de cube ouvert, avec des côtés dont les dimensions avoisinent les 110 mètres. En réalité, la structure est assez simple (**figure 2**). L'ensemble de la structure

flotte en effet sur des piles, elles mêmes ancrées dans le rocher : les appuis entre l'ouvrage (le cube) et ses fondations (les piles) sont en élastomère fretté, c'est-à-dire des appuis semblables à ceux utilisés pour les tabliers de pont. Ils ont été choisis pour leur souplesse dans le plan horizontal et permettent ainsi à l'ouvrage de respirer. La structure du cube est composée quant à elle de quatre mégastructures en forme de cadre qui lui donnent sa robustesse. Un problème lors de la conception de l'ouvrage a rapidement émergé : comment construire le plateau supérieur ? En effet, il est loin d'être évident de construire une telle plate forme à plus de cent mètres de hauteur. Plusieurs solutions ont été imaginées par les ingénieurs. Une des solutions consistait à construire le plateau supérieur, ou tout du moins une partie, sur le plateau inférieur et à le lever ensuite ; mais celle-ci ne fut pas retenue. La solution effectivement mise en place consistait simplement en ceci : positionner des tours de grue en milieu de travée, placer des cintres appuyés sur ses montants, c'est-à-dire des coffrages autoportants, et construire les méga poutres une par une pour finalement atteindre la hauteur requise et mettre en place le plancher supérieur. En outre, pour assurer la stabilité en phase provisoire, des butons assez conséquents ont été nécessaires.

Pour construire un tel ouvrage, des calculs précis sont entrepris, mais certains stades de construction ne requièrent pas une très grande précision. Par exemple, considérons un calcul de structure basé sur un modèle de poutres s'appuyant sur le squelette de la **figure 2**. Lors d'une étude préliminaire, les différentes phases de construction peuvent être modélisées simplement à l'aide d'un système de poutres planes, extrêmement simple. De cette façon, sans entrer dans le détail des calculs, nous obtenons l'essentiel du comportement de la structure, ce qui est suffisant dans une phase de prédimensionnement, par exemple. On doit ainsi élaborer des modèles de calcul en fonction des objectifs et du stade de conception atteints.



d'Abou Dhabi

A l'autre extrémité de la chaîne de modélisation, un autre exemple est donné avec le « Trade Centre » d'Abou Dhabi, qui est un ensemble où on trouve un centre commercial, un hôtel, des bureaux... Cet ouvrage à grande échelle comprend des structures élancées en béton précontraint avec des portées très grandes qui finalement donnent à ce bâtiment des allures d'ouvrage d'art. La

justification finale de cet ouvrage a donné lieu à un modèle de calcul complet et précis montré sur la **figure 3**.

Cette fonction de portage dont nous venons de parler n'est pas forcément réalisée que par des structures verticales. Dans certains cas, par effet portique ou par effet d'arc, le fonctionnement de la structure peut, du fait de sa géométrie, se traduire par de la flexion ou de la compression. Ainsi, lorsqu'il y a très peu d'appuis, la structure de portage peut être très horizontale ; les planchers transfèrent alors les charges vers des

structures travaillant en flexion et reportant les charges vers les quelques appuis existants, qui eux mêmes permettent de descendre les efforts jusqu'aux fondations. Un autre type de portage par arc porteur est très visible dans un immeuble à Londres ; l'immeuble est conçu par l'architecte de manière à exhiber l'arc porteur. Ce dernier soutient l'immeuble sur toute sa longueur pour enjamber les voies de chemin de fer. Les structures verticales « secondaires » travaillent dès lors soit en traction pour celles situées en dessous de l'arc soit en compression pour les autres.

En ce qui concerne cette fonction de portage, nous pouvons nous demander quelles sont les limites en hauteur. Prenons un bâtiment, avec son pourcentage de vide v . Le reste, occupant en pourcentage $1-v$, représente donc la structure. Supposons maintenant que le pourcentage d'appui sur le sol soit sensiblement le même, c'est à dire $1-v$, cette hypothèse simplificatrice se révélant d'ailleurs tout à fait acceptable. La contrainte, la pression exercée sur le sol est limitée par la contrainte admissible du matériau selon une formule du type : $\sigma \approx h \left(\varpi + \frac{q}{e} \frac{v}{1-v} \right) \leq \bar{\sigma}$. En fait, le poids propre est

l'élément déterminant dans le sens où les termes de surcharge q n'ont pas beaucoup d'influence sur cette contrainte. La résistance de l'ouvrage peut ainsi être modélisée par celle d'une colonne du même matériau puisque l'effet de la surcharge q est négligeable eu regard au poids propre de l'ouvrage.

Appliquons cette « règle de la colonne ». Par exemple, prenons du béton. En appliquant la règle précédente avec des valeurs appropriées, nous pouvons calculer la hauteur maximale d'un ouvrage en béton : 500 mètres pour un béton classique avec une résistance peu élevée, tandis qu'avec du béton haute performance, la hauteur maximale atteint les 2 000 mètres. Si on appliquait cette méthode à l'acier, on pourrait élever des structures encore plus hautes, sous réserve de la maîtrise du coulage de l'acier dans un coffrage. L'industrie sidérurgique ne produisant pour le moment que des profilés métalliques, la hauteur maximale constructible est en fait réduite par la géométrie limitée du profilé. Des bâtiments de très grande hauteur pourraient ainsi être érigés et des progrès en la matière sont d'ores et déjà entrepris. Un autre aspect primordial de la conception d'un ouvrage concerne les fondations sans lesquelles l'ouvrage ne tient pas en place. Le sol doit en effet pouvoir porter les charges sans s'affaisser, se fissurer... ce qui en pratique impose un sol très résistant pour un bâtiment de grande hauteur. La stabilité locale des éléments structuraux sous l'effet de fortes compressions devra également elle aussi être étudiée minutieusement.

Dès le XIX^{ème} siècle, la tour Eiffel en est l'exemple le plus flagrant, des ouvrages de très grande hauteur, de plus de trois cent mètres, pouvaient être construits. Notons que

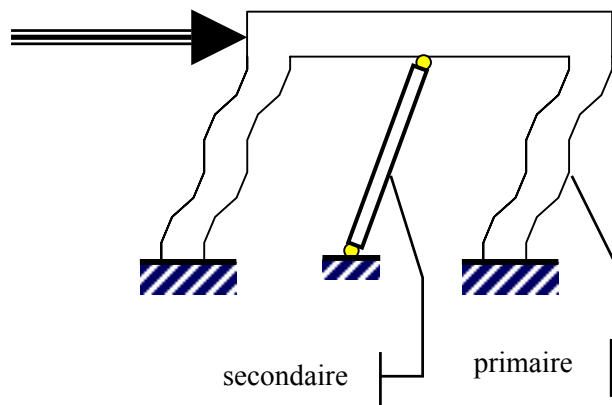


Figure 4 : Structures primaires et secondaires

la forme utilisée pour cette construction ressemble peu à une colonne, ce qui ébranle un peu notre estimation des hauteurs faite ci-dessus. La tour Eiffel a une forme évasée, pour assurer une deuxième fonction, celle de contreventement. Ainsi, la structure assure principalement une reprise des charges verticales, mais elle est également soumise à des efforts horizontaux induits en permanence ou aléatoirement, tels le vent stationnaire ou

instationnaire, ou éventuellement un séisme. La structure doit ainsi résister à ces sollicitations horizontales variables.

La fonction de contreventement

Dans une structure, les éléments dits « primaires » sont ceux qui assurent une fonction de contreventement, tandis que les éléments dits « secondaires » réalisent le portage, résistent aux sollicitations induites par le poids propre (**figure 4**). Ces deux types d'éléments composent la structure mais ne jouent pas du tout le même rôle. Le contreventement et la résistance des structures aux actions verticales vont en effet de paire et les deux sont essentiels quant à la stabilité du bâtiment ; néanmoins, des éléments spécifiques à chaque fonction sont requis, eux-mêmes se distinguant entre les appellations primaires et secondaires suivant leurs rôles respectifs. Par exemple, les contreventements usuels en métal sont des portiques travaillant en flexion, ou des triangulations de type croix de Saint André, ou des structures en K, ces dernières acceptables vis-à-vis du vent mais guère vis-à-vis des séismes.

Considérons maintenant un bâtiment symétrique, avec trois éléments de

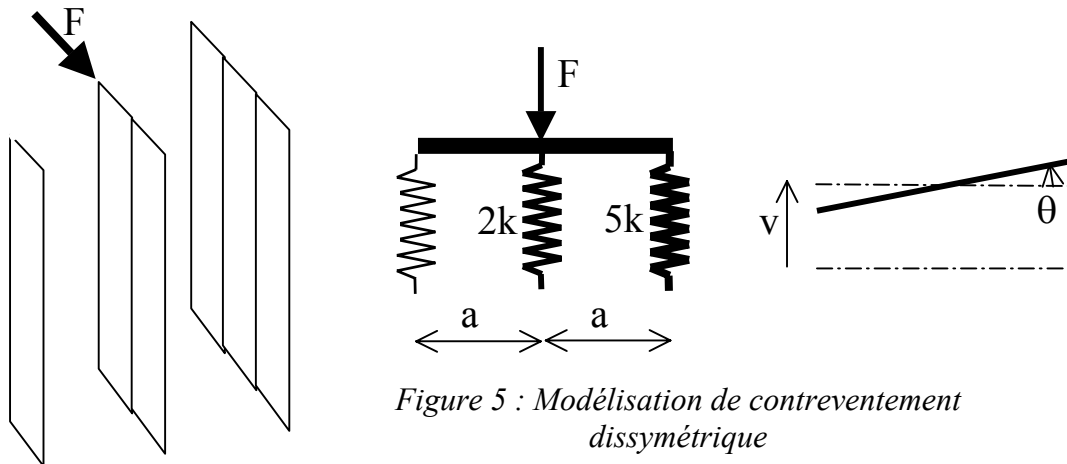


Figure 5 : Modélisation de contreventement dissymétrique

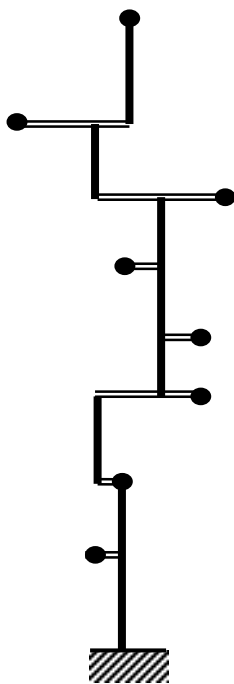


Figure 6 : Modèle « brochette »

contreventement, géométriquement dissymétriques. Supposons que la terrasse soit rigide et les éléments de contreventement élastiques, à chacun étant associée sa raideur propre (**figure 5**). Un déplacement v dans le sens de la force, caractérisant la flexion d'ensemble, ainsi qu'une rotation θ caractérisant la torsion d'axe vertical, sont pris comme paramètres de calcul.

Appliquons le principe fondamental de la dynamique avec les théorèmes de la résultante et du moment résultant :

$$\begin{cases} k(v - a\theta) + 2kv + 5k(v + a\theta) = F \\ ka(v - a\theta) - 5ka(v + a\theta) = 0 \end{cases}$$

Les équations obtenues sont linéaires et la résolution facile ; une flexion générale ainsi qu'une torsion en sont déduites :

$$\begin{cases} v = 3F / 16k \\ \theta = -F / 8ka \end{cases}$$

Cet exemple met en lumière le fait que le comportement global dépend de la répartition des masses et des raideurs

dans la structure. D'ailleurs, en matière de séisme, la torsion induite dans les bâtiments crée beaucoup de dommages et il faut s'en prémunir.

Divers modèles de calcul sont utilisés pour le calcul du contreventement : le modèle « brochette » (**figure 6**) qui consiste à placer des poutres verticales représentant la

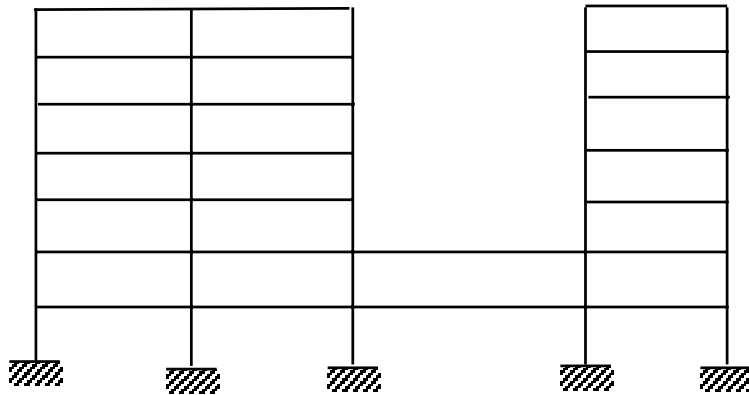


Figure 7 : Modèle « ossature »

souplesse des différents éléments, ceci au niveau des centres de flexion. Au droit de chaque centre de gravité des planchers sont positionnées les masses représentant chaque niveau. Tous les éléments de cette structure sont ainsi reliés entre eux par des barres horizontales suffisamment raides, pour faciliter les calculs.

Ces modèles tridimensionnels s'exploitent assez facilement, mais demeurent relativement difficiles à construire. Cette modélisation à l'aide de barres reste également valable pour les éléments raides d'une structure, par exemple les voiles ou les palées de contreventement. Pour des éléments d'ossature, on utilise plutôt des systèmes poteaux poutres dans le calcul (**figure 7**), qui représentent bien la réalité. Si les calculs doivent être approfondis, les modèles utilisés alors sont plus fins, et utilisent la méthode des éléments finis, qui permet par exemple d'apprécier la réponse sismique d'un ouvrage. À l'aide de ce type de modèle, la modélisation varie du médiocre à l'excellence (**figure 3**) suivant la finesse de maillage choisie.

La plupart du temps, en ce qui concerne la résistance au vent, des actions quasi statiques, c'est-à-dire celles induites par la pression du vent sur les façades sont utilisées dans les calculs. Néanmoins, les actions dynamiques ne peuvent pas toujours être négligées, étant du même ordre de grandeur que les actions quasi statiques pertinentes ; citons comme exemple les effets des tourbillons de Von Karman qui,

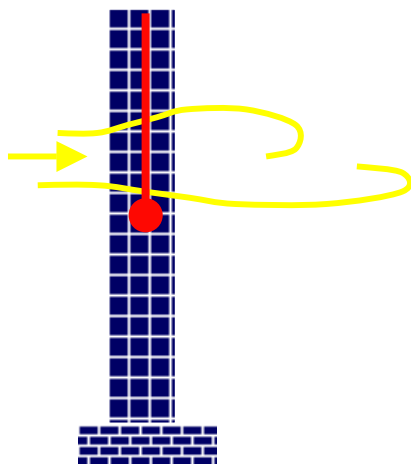


Figure 8 : Etouffoir par pendule

pour certaines fréquences et vitesses de vent, ont un impact non négligeable sur les profils des obstacles. À partir du nombre de Strouhal du profilé, on sait calculer les fréquences de résonance dues à ces tourbillons en fonction du type de profilé et des vitesses atteintes. Continuons sur cet exemple et examinons d'un peu plus près les conséquences de ces tourbillons.

Des systèmes passifs comme des pendules peuvent être ajoutés au bâtiment. Un tel pendule fait office d'oscillateur simple de déplacement y , avec une raideur et une masse connues (**figure 8**). Simplifions alors le problème et faisons l'hypothèse que le bâtiment puisse être représenté par son premier mode de vibration d'amplitude x , approximation valable dans le cadre d'une

modélisation grossière. On obtient alors des équations du mouvement faisant

intervenir les accélérations respectives du pendule et du bâtiment, ce dernier soumis à une excitation harmonique de fréquence égale à celle des tourbillons :

$$\begin{cases} M\ddot{x} + Kx - k(y-x) = F_0 \cos \Omega t \\ m\ddot{y} + k(y-x) = 0 \end{cases}$$

L'amplification dynamique du bâtiment soumis à cette sollicitation peut dès lors être calculée, dans les deux situations, avec et sans le pendule additionnel :

- le système sans l'adjonction du pendule possède ainsi une courbe de résonance bien connue ; autrement dit, si la fréquence des tourbillons de Von Karman s'approche de celle du premier mode de vibration de la structure, des

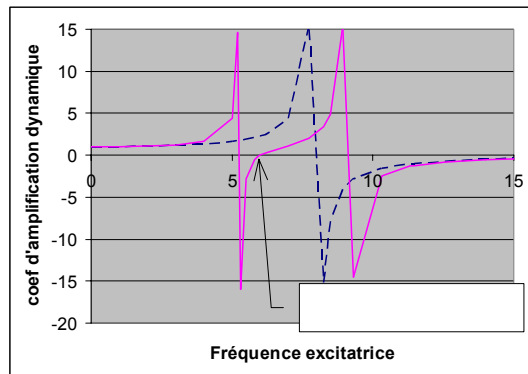


Figure 9 : Antirésonance

degradations importantes, voire la ruine du bâtiment, pourront survenir du fait de l'amplification des vibrations.

- La structure avec système additionnel possède une deuxième fréquence de résonance, celle du pendule. Dès lors, un point d'anti-résonance apparaît (figure 9), ceci signifiant que, si la fréquence de résonance du pendule est bien calée, le mouvement est dynamiquement éteint, sans

amortissement, et cela seulement grâce à l'adjonction de masses. Dans toute la zone de résonance du bâtiment, la réponse dynamique est ainsi réduite en comparaison à celle de l'ouvrage sans masse additionnelle.

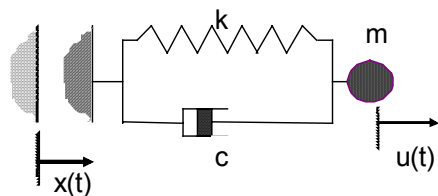


Figure 10 : Modèle d'oscillateur

Ces principes permettent de mettre en œuvre des systèmes dynamiques de deux sortes : soit actifs si un apport d'énergie est nécessaire, soit passifs avec des dispositifs tels le pendule, qui permettent de contrebalancer les effets de résonance du bâtiment seul. Lorsqu'un amortisseur est ajouté à ce dispositif, une partie de l'énergie donnant naissance aux vibrations est dissipée et ces dernières sont drastiquement atténuées. En outre, ce dispositif se révèle efficace dans les conceptions parasismiques.

La protection parasismique

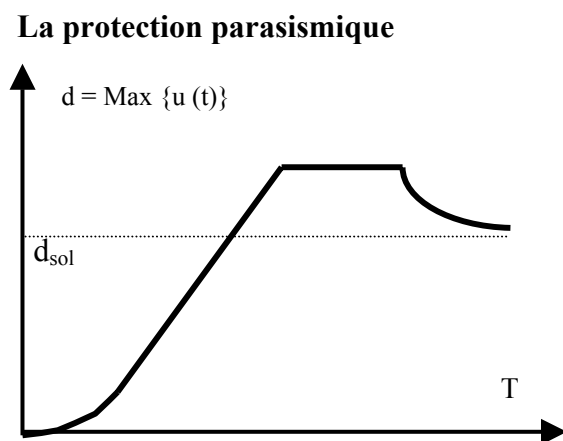


Figure 11 : Spectre de réponse d'oscillateur

Étudions un peu plus en détail le problème des séismes. Tout d'abord, un séisme est une propagation d'ondes sollicitant la structure à sa base. Une modélisation simple de ce phénomène peut alors être entreprise. L'ouvrage est tout d'abord assimilé à un oscillateur simple doté d'un ressort, d'une masse et d'un amortisseur (figure 10). Ensuite, cet amortisseur est soumis à un déplacement d'appui $x(t)$, afin de connaître la déformation du

bâtiment, c'est-à-dire le mouvement relatif $u(t)$ de la masse dans le référentiel lié au sol se déplaçant sous l'effet du séisme. Une solution exacte est d'ailleurs connue sous la forme d'une intégrale prenant en compte les caractéristiques du système. Un ingénieur s'intéresse essentiellement à la réponse maximale, autrement dit au déplacement relatif extrême.

En fait, cette déformation de la structure dépend de sa fréquence propre. Or, le spectre de réponse en déplacement (**figure 11**) est connu pour un oscillateur simple et peut ainsi être appliqué à la structure, en tenant compte du fait que ce modèle reste approché et donc fiable sous certaines conditions. Dans le cas d'un oscillateur très raide, on peut remarquer que le déplacement relatif est nul. À l'inverse, si le bâtiment est infiniment souple, la masse étant en quelque sorte suspendue, le sol va bouger sans que le bâtiment soit affecté et le déplacement relatif de l'ouvrage sera donc inverse à celui du sol, puisque le déplacement absolu est nul. D'ailleurs, tant que la structure résiste, ses déplacements sont limités. Il faut éviter les fréquences où le mouvement est amplifié, car on risque de dépasser rapidement le seuil de rupture. On devra éviter tout particulièrement les périodes entre 0,1 et 1 seconde.

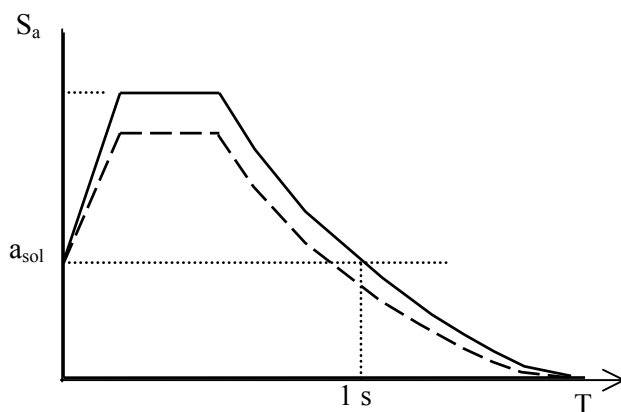


Figure 12 : Spectre de pseudo accélération

Généralement, on utilise plutôt les spectres d'accélération (**figure 12**), ceci dans le but de déterminer les forces dans la structure, les deux étant liées par le principe fondamental de Newton. De la même façon qu'auparavant, une structure raide possède une accélération égale à celle du sol, tandis qu'une structure souple ne sent pas les mouvements du sol et son accélération tend donc vers 0, quand sa période diminue vers 0. En outre, plus l'amortissement est

efficace, plus l'accélération est faible. Les amortisseurs ont ainsi un effet positif, comme on s'y attendait. On peut également noter que l'accélération subie par la structure est amplifiée par la réponse dynamique du système ; en effet, les gammes de

fréquences des séismes correspondent souvent aux fréquences de résonance des bâtiments. Ainsi, lors d'un séisme, il existe une amplification du mouvement venant de la coïncidence entre le contenu fréquentiel du séisme et la fréquence de résonance de l'ouvrage. C'est ce point qui rend les séismes si dévastateurs.

Cependant, à San Francisco, des bâtiments de grande hauteur ont résisté à des séismes. Ainsi, on peut concevoir des structures résistantes aux séismes, ce fait remarquable étant dû à l'ingéniosité des ingénieurs qui emploient à l'heure actuelle plusieurs méthodes.

L'une d'entre elles s'appelle l'isolation à la base. Considérons un bâtiment modélisé

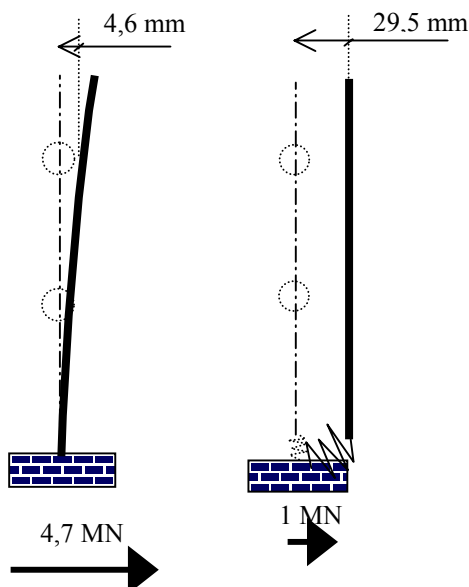


Figure 13 : Isolation à la base

avec deux modes propres, soit deux masses et deux ressorts. Isolons maintenant la superstructure de ses fondations avec un système souple horizontalement, permettant des débattements relativement importants, et raide en vertical. En ce qui concerne la modélisation, on place désormais entre le bâtiment et ses fondations un ressort avec une raideur faible. Comparons alors les deux modèles, le premier avec le bâtiment en contact direct avec le sol et l'autre isolé à la base (**figure 13**). Pour la première situation, un premier mode de vibration représentant une flexion généralisée donne deux fréquences propres, avec des déplacements de l'ordre de 4,6 millimètres et une résultante des actions horizontales en pied, autrement dit l'effort tranchant à la base de 4,7 MN. En revanche, le même bâtiment isolé à la base résiste mieux aux sollicitations. D'abord, en ce qui concerne les périodes, le premier mode est passé de 0,25 seconde à 1,52 seconde ; on est ainsi à une position plus favorable sur le spectre et l'accélération que subit la structure est plus faible que dans le cas non isolé. Le deuxième mode de vibration reste quant à lui quasiment inchangé. La forme du déplacement change également. Cette fois-ci, la souplesse est concentrée en pied de la structure ; le bâtiment lui-même se translate de façon rigide, en un bloc, et ne subit donc pas d'amplification en fonction de la hauteur. En définitive, on peut remarquer que les forces subies par l'ouvrage sont quasiment cinq fois plus faibles. En revanche, dans cette situation, le bâtiment doit permettre des déplacements plus grands. Afin d'isoler la structure de ses fondations, plusieurs systèmes ont ainsi vu le jour ; par exemple, une couche d'élastomère frété permettant une déformation horizontale conséquente ou des ressorts couplés à des amortisseurs.

La deuxième méthode de conception fait appel à la ductilité des éléments structuraux. Prenons une éprouvette de métal et étirons la de manière cyclique. On obtient alors des cycles de déformation stables à condition de ne pas détériorer le matériau. On constate qu'au fur et à mesure de l'augmentation de la déformation maximale, les cycles s'ouvrent. Or on démontre facilement que l'aire des cycles correspond en fait à l'énergie dissipée sous forme de chaleur, simplement par plastification du matériau. Comme le but recherché est de dissiper une part de l'énergie apportée dans la structure par le séisme, ce phénomène de dissipation est intéressant. Un matériau tel que l'acier possède un comportement de ce type, sous réserve de sa non-détérioration. En revanche, d'autres matériaux ont des comportements différents. Par exemple, une poutre en béton armé travaillant en flexion s'assouplit au cours des cycles de déformation. En effet, le béton armé se fissure et perd donc de sa rigidité au fur et à mesure des cycles. Par contre, la résistance de cette poutre, même fissurée, est quasiment maintenue, puisqu'elle est déterminée par les armatures métalliques. Au final, une poutre en béton armé possède un bon comportement, à ceci près qu'il faut

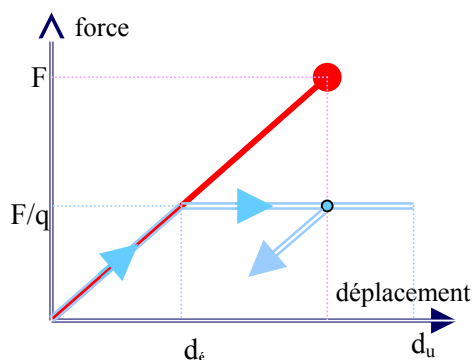


Figure 14 : Principe du coefficient de comportement

prendre en compte l'assouplissement mentionné ci-dessus. D'autres matériaux se comportent beaucoup moins bien et perdent à la fois leur rigidité et leur résistance. De ce fait, ces matériaux se détériorent au fur et à mesure des cycles du mouvement sismique, ce qui peut aboutir à l'effondrement du bâtiment. Tout le but de la conception parasismique consiste ainsi à obtenir des comportements stables au cours des cycles, au moins en ce qui concerne la résistance de la structure.

Considérons à nouveau la barre en métal

que l'on étire. Au départ, le comportement de la barre est linéaire, autrement dit la force étirant la barre est proportionnelle à son étirement. En réalité, il existe une limite, située sur un palier plastique où la barre s'étire sans effort supplémentaire important, c'est-à-dire une force au delà de laquelle l'éprouvette ne pourra résister. Or, on peut démontrer que, lors des cycles de déformation, lorsque l'on entre dans ce domaine plastique, le déplacement maximal obtenu est de l'ordre de grandeur de celui subi par la structure associée indéfiniment élastique (**figure 14**). Le calcul sismique consiste ainsi à travailler sur le modèle élastique et à pondérer les résultats obtenus en termes de forces par un coefficient diviseur, dit « de comportement ». Sans considération de ce coefficient, les déplacements obtenus seront considérés comme ceux de la structure élastique. Ce coefficient de comportement dépend en outre de la géométrie de la structure prise en compte (une poutre, un mur...), de sa régularité, du matériau constitutif... Afin d'utiliser des coefficients fiables, il faut ainsi mettre en place des dispositions permettant d'assurer la ductilité de la structure, et ceci dans le but d'avoir un comportement stable au cours du mouvement. Cette précaution est réalisée par le biais de dispositions constructives particulières retrouvées dans toutes les normes. Les valeurs de ce coefficient de comportement peuvent être trouvées dans l'Eurocode 8, intitulé « Calculs des structures pour leur résistance aux séismes ».

La conception parasismique de structures revêt ainsi plusieurs aspects : il faut maîtriser en premier la stabilité en déterminant les comportements d'ensemble. Dans un second temps, les comportements particuliers, autrement dit ceux de certains niveaux, doivent être vérifiés, tout comme finalement les comportements locaux, pour la résistance et la stabilité ; la perte de stabilité d'un bâtiment est d'ailleurs souvent associée à une rupture au niveau inférieur de la structure. Par exemple, on cherche à éviter un mauvais comportement dynamique d'ensemble qui peut induire de la torsion, ou des dysfonctionnements particuliers et ainsi une fragilisation de la structure à certains niveaux. Ce phénomène de fragilisation est appelé « transparence » de certains niveaux spécifiques du bâtiment. La résistance doit aussi être assurée au niveau local, par exemple pour les poteaux soutenant des charges.

Deux aspects de la conception moderne pour la prévention des séismes méritent également d'être cités. En premier lieu, la méthode de dimensionnement en capacité, traduction française de « capacity design », dont les objectifs sont les suivants : on essaie de faire travailler les structures dans le domaine post-élastique, en maîtrisant les différentes facettes du processus de plastification ; cette méthode de dimensionnement en capacité permet justement cela. En effet, les zones de positionnement des rotules plastiques, autrement dit les zones dissipatives, sont volontairement plutôt situées dans les poutres que dans les poteaux. Ainsi, ceci permet en cas de sollicitations trop importantes d'avoir une rupture localisée dans les poutres, ce qui n'induit pas automatiquement l'écroulement de l'ensemble du bâtiment. La formation de mécanismes instables doit également être empêchée, et cela en évitant de placer plusieurs rotules successivement dans un poteau, arrangement qui tend à l'instabilité. En outre, les ruptures fragiles devront être contrôlées : certains mécanismes considérés sont ductiles, à savoir possèdent une réserve de plasticité, ce qui rend leur comportement plus simple à maîtriser. D'autres mécanismes sont fragiles et les éléments peuvent casser dès leur limite de résistance selon un tel mécanisme atteint. Pour éviter cela, il suffit de dimensionner en considérant simplement l'équilibre et en prenant en compte la capacité résistante réelle des sections. Par exemple, une poutre possède un mode de rupture à l'effort tranchant habituellement fragile et on souhaite l'éviter. À cet effet, on va donner un surcroît de résistance vis-à-vis de l'effort tranchant par rapport à la flexion. Ainsi, à partir des

moments résistants déterminés par le calcul aux deux extrémités de la poutre, où sont situées les rotules plastiques, et des lois d'équilibre du morceau de poutre, on en déduit l'effort tranchant maximal que peut potentiellement subir la structure, effort pour lequel la poutre est dimensionnée, afin d'éviter ce type de rupture.

Dans les années qui viennent de s'écouler est apparue une nouvelle méthode de calcul qu'on appelle analyse en poussée progressive, traduction de « push over ». Cette analyse tend à être beaucoup plus fine que la méthode du coefficient de comportement abordée ci-dessus, qui est fiable mais néanmoins approximative. Cette méthode consiste à appuyer statiquement sur le bâtiment avec une répartition de forces définie au préalable à l'aide d'un calcul dynamique élastique. En poussant progressivement, on arrive finalement à la rupture de la structure en passant par un stade de plastification. Il se produira en effet une rupture quand le bâtiment aura atteint ses capacités de déformation limites. Au final, on obtient un diagramme force/déplacement, une courbe qui traduit la capacité de la structure à résister à des forces de plus en plus importantes. On compare ensuite ce diagramme au spectre de calcul représentant la sollicitation sismique, tout ceci dans le but de démontrer que la structure résiste, c'est-à-dire que la capacité résistante de la structure est supérieure aux actions qui peuvent lui être appliquées. Cette démarche est entreprise toujours selon le principe de vérification de fiabilité ; en d'autres termes, l'effet de l'action doit rester inférieur à la résistance, qui en l'occurrence se traduit en terme de déplacements.

Pour conclure le volet sismique : par un bon dimensionnement d'ensemble, en recherchant une ductilité au niveau local, mais aussi au niveau global, en utilisant des matériaux appropriés, en prenant des dispositions constructives idoines et un soin exemplaire dans la construction, nous arrivons à construire des structures aptes à résister aux catastrophes naturelles, telles que tornades, tremblements de terre, typhons...