

## ***CHAPITRE 1***

# ***ETUDE ET ANALYSE HISTORIQUE DES ETATS DE COMPORTEMENT DES STRUCTURES ETAGEES EN BETON ARME "EN PORTIQUE"***

### **1.1 ANALYSE THEORIQUE ET EXPERIMENTALE DE COMPORTEMENT DES STRUCTURES EN BETON ARME SOUMISES AUX CHARGES STATIQUES:**

Une structure hyperstatique composée d'éléments linéaires, soumise à une charge statique, peut se rompre de différentes façons :

- (a) Une ou plusieurs sections se rompent soit par déformation excessive ou par rupture de l'armature, soit par écrasement du béton,
- (b) L'un des éléments constitutif se rompt par cisaillement ou par épuisement de l'adhérence entre l'armature et le béton.
- (c) La structure, ou l'une de ses parties, ou l'un des éléments constitutifs flambe.

Dans les raisonnements qui suivent, on considérera que les ruptures des types (b) et (c) ne peuvent pas se produire par exemple, on raison des dispositions constitutives, des méthodes de calcul ... etc., il ne sera donc question que des ruptures du type (a).

Pour pouvoir élucider la notion de capacité portante ultime ou pour donner sa définition même, il faut se faire idée globale des différentes phases du comportement de la structure. Considérons alors une structure hyperstatique quelconque, en béton armé à la quelle est appliqué un certain type de charge. Si cette charge augmente à partir de zéro, des changements importants se produisent dans la structure du point de vue de son utilisation.

Pour certaines structures en béton armé et pour la plupart des structures précontraintes, une charge particulière est très importante : celle qui fait naître les premières fissures – la limite de fissuration  $R$ . les différentes résistances dépendent des propriétés mécaniques de la structure et du type de charge qui y est appliquée. Si ce dernier subit des variations de disposition de durée d'action, de répétition etc. les valeurs des résistances changent, c'est –à-dire qu'elles concernent d'autres sections.

Il existe donc, pour chaque type de charge possible, une caractéristique individuelle de la structure. Dans un tel cas, On prend pour capacité portante ultime la charge  $U_e$  sous laquelle le moment ultime s'est produit dans l'une des sections critiques. Il résulte des raisonnements que :  $U_e \leq U_{col}$  Cependant, la relation entre  $U_e$  et  $U_i$  n'est pas très claire.

**TICHY [1959]** a signalé que l'on peut avoir :

$U_i \leq U_e$  c'est à dire que la capacité portante ultime réelle peut être inférieure à la capacité calculée selon la théorie élastique. Cette hypothèse a été vérifiée expérimentalement (**TICHY [1961]**) et théoriquement (**KAUFMAN et MAMES [1961]**).

A présent, la relation  $U_i \leq U_e$  est généralement reconnue et elle est regardée comme évidente (**MACCHI [1965]**) bien qu'on ait cru, au début que la limite inférieure de la capacité portante ultime était constituée justement par la valeur  $U_e$ .

La conception des calculs jusqu'alors en vigueur regarde comme contradictoires les notions de sécurité et d'économie. Cela résulte de l'opinion que la majoration de la sécurité de la structure accompagnée d'un agrandissement de ses dimensions conduit nécessairement à une réduction d'économie et que, par contre, tout effort d'économie de matériau a pour conséquence une réduction des dimensions de la structure et entraîne une réduction de la sécurité.

La notion de sécurité présente, en elle-même, un inconvénient notable parce qu'elle est, dans la plupart des cas, subjectif. L'économie ou, en termes plus précis, l'efficacité économique de la structure est, par contre, une notion objective qui peut être exprimée de façon satisfaisante, le lecteur à la littérature adéquate (**TICHY et VORLICEK [1972]**). Il faut, toutefois, faire brièvement ressortir certaines propriétés de la structure et de la charge qui est déterminantes, soit que l'on considère la sécurité, soit que l'on envisage l'efficacité économique.

Contrairement à la méthode des contraintes admissibles, basée sur la relation entre la contrainte et la propriété mécanique du matériau, les méthodes modernes partent des conditions de sécurité basées sur la relation entre la charge et une ou plusieurs résistances de la structure (déformation admissible  $a_{lim}$ , limite de fissuration  $R$ , capacité portante ultime  $U$ , etc...).

La réalisation d'une certaine résistance de la structure est désignée comme l'obtention d'un état limite et l'ensemble des méthodes de calcul basées sur la susdite relation sont appelées méthodes d'états – limites.

La plus ancienne de ce groupe est la méthode de la capacité portante ultime on s'en sert pour justifier la relation existant entre la charge ou éventuellement son effet  $S$ , et la capacité portante ultime  $U$  la méthode exige soit satisfaite la condition de sécurité :  $\gamma S_{nom} \leq U_{nom}$ .

La quantité  $\gamma$  est le coefficient de sécurité , la charge  $S_{nom}$  correspond approximativement à la charge de service est plutôt toujours légèrement supérieure à cette dernière , la capacité  $U_{nom}$  se détermine d'après une relation fonctionnelle dans laquelle sont introduite , comme données , les valeurs des propriétés mécanique du matériau, voisines des valeurs moyennes ( pour le béton ) ou de celles dites garanties ( pour l'acier) en résumé on peut désigner les valeurs  $S_{nom}$  ,  $U_{nom}$  comme valeurs centrales.

On appelle ainsi toutes les valeurs qui sont voisines des valeurs moyennes. elles peuvent être : soit directement les moyennes de la distribution statistique soit des valeurs caractéristiques, valeurs dites nominales, ou enfin des valeurs réelles trouvées , par exemple par l'étude faite dans le but de vérifier la sécurité d'un ouvrage existant.

La condition  $\gamma S_{nom} \leq U_{nom}$  doit être observée dans chaque section de la structure, tant hyperstatique qu'isostatique; le dimensionnement économique exige toutefois que l'inégalité soit convertie en égalité condition qu'il n'est évidemment pas possible de remplir dans toutes les sections. Admettons quand même que cela soit possible, dans une structure hyperstatique du moins en sections critiques.

La méthode du coefficient de sécurité est avantageuse pour faire ressortir l'importance de la redistribution des moments du point de vue des économies d'armature. Sans considérer la méthode par laquelle se détermine la répartition des moments, on sait que pour chaque élément de la structure, le diagramme des moments rapportés à la ligne de fermeture doit toujours correspondre, en forme ainsi qu'en grandeur, au diagramme des moments dans une poutre sur deux appuis simples. A titre d'exemple considérons une poutre encastree à ses deux extrémités soumises à la charge uniformément répartie  $q_{nom}$  et multiplions cette dernière par le coefficient de sécurité  $\gamma$  ; au milieu de la portée on doit toujours avoir :  $M_{uo} = 1/8 \cdot \gamma \cdot q_{nom} \cdot L^2$ .

La dépense théorique d'armature est donnée par l'aire totale des moments agissants (aires hachurées). Il est évident que cette dépense théorique dépend de la relation  $M_1/M_2$ . Il résulte d'un calcul plus détaillé que la dépense théorique sera minimale pour  $M_1/M_2=3$ .

Cependant, en pratique, la dépense réelle, dépend aussi d'autres facteurs et avant tout, des dispositions constructives ; on peut la représenter approximativement par des rectangles circonscrits aux différentes parties du diagramme des moments. Dans un tel cas, on obtient, pour le rapport optimal des moments, la valeur  $M_1/M_2=1.7$ . Un raisonnement analogue peut être fait pour la charge concentrée, où le rapport optimal, pour la dépense théorique et pratique, est égal à l'unité.

Si maintenant pour une poutre encastree parfaitement à ses deux extrémités, de section constante, et bi axialement symétrique soumise à une charge uniformément répartie ou concentrée, on porte sur un diagramme le rapport de la dépense théorique, ou le rapport de la dépense pratique d'armature  $D$ , à la dépense théorique ou pratique d'armature dans le cas du comportement élastique de la poutre  $D$  en fonction de la relation  $M_1/M_2$ , il apparaît donc que le calcul plastique peut conduire à une consommation élevée d'armature si, naturellement, on ne prend pas considération les avantages constructifs dus à la disposition plus favorable de l'armature (suppression de l'accumulation des barres d'armature.....).

Une telle conclusion n'est valable que si, dans l'élément examiné de la structure, peut intervenir un seul type de diagramme des moments (par exemple, le diagramme parabolique). Si, cependant différents types de diagramme des moments sont possibles, le calcul plastique conduit à des économies d'armatures. Prenons, pour le prouver, l'exemple suivant : Considérons une poutre encastree à ses deux extrémités, soumise, une fois, à une charge uniformément répartie **q<sub>nom</sub>** et une autre fois à une charge concentrée **P<sub>nom</sub>** située à mi-portée et d'une valeur telle que les moments dans la poutre sur deux appuis simples lors de l'obtention de la capacité portante ultime, soient égaux pour les deux charges, à savoir :

$$1/8.\gamma. qnom.L^2 = 1/4.\gamma. pnom.L^2$$

On aura, par conséquent :

$$pnom/ qnom.L = 1/2.$$

En général, on peut dire que dans le calcul par la méthode de la capacité portante ultime, le calcul plastique conduit à des économies d'armature dans les cas où peuvent agir sur la structure des charges variables ; si la charge permanente est seule appliquée les diagrammes des moments ne peuvent varier et le calcul plastique ne présente aucun avantage (si, évidemment, on néglige les avantages résultants de la meilleure disposition constructive de l'armature).

Dans le but de vérifier le comportement et la sécurité des structures hyperstatiques exceptionnelles ou au contraire, des structures normalisées des essais sont souvent exécutés ou demandés, dans la plupart des cas en grandeur nature ( sur des parties de structures) ; parfois aussi sur des modèles.

De tels essais sont généralement coûteux, ils exigent des travaux préparatoires importants ainsi que des mesures difficiles et ne donnent en général que très peu d'informations utiles, parfois même, ils peuvent conduire à des conclusions erronées, aussi bien optimistes que pessimistes, sur le comportement de la structure étudiée.

C'est pourquoi nous nous proposons d'attirer l'attention sur les erreurs qui interviennent fréquemment et qui sont dues en majeure partie à une connaissance insuffisante du problème par ce qui est des portiques, des difficultés apparaissent dans la conservation de toutes les liaisons présumées.

Les expérimentateurs cherchent fréquemment à décharger la structure au cours des essais, jusqu'à une charge fondamentale très faibles ou égale à zéro. Ceci n'est cependant recommandé que dans les limites du comportement élastique de la structure, afin de vérifier le fonctionnement des appareils et, de déterminer les rigidités.

Dès que des fissures sont nées, il est recommandé de ne plus décharger la structure ; notamment dans les phases précédant la rupture l'influence de la fatigue plastique peut, après déchargement ; conduire à une capacité portante ultime inférieure à la charge maximale atteinte préalablement.

Parfois, il est observé, durant les essais, que la capacité portante ultime est supérieure à celle résultant du calcul selon la théorie plastique. Ceci avant de procéder aux préparatifs des essais coûteux d'une structure hyperstatique, il est recommandé de prendre le conseil d'un spécialiste compétent. Notamment, on peut souvent simplifier les essais et éviter un essai inutile et coûteux.

A l'heure actuelle, il existe un nombre suffisant de moyens susceptibles de justifier mathématiquement le comportement de la structure, en particulier en se servant des ordinateurs, de sorte qu'il est possible de concentrer les expériences sur un seul problème spécifique.

On peut obtenir de bons résultats des informations suffisantes même sur le comportement des systèmes relativement complexes (**RICHARDS et LAZARO [1971]**).

Pour étudier une structure hyperstatique dont les différentes sections se comportent élasto-plastiquement, on peut, au fond, employer les mêmes méthodes que dans le calcul selon la théorie élastique, telles que ; par exemple, la méthode des déformations, la méthode de CROSS etc.

Pour les exposés à venir et souvent aussi pour le calcul pratique. Il est avantageux de se savoir de la méthode des forces dont les principes pour des structures à comportement élastique sont bien connus c'est-à-dire d'employer le principe des déplacements virtuels (**BAKER [1961]**).

Considérons un système plan  $n$ - fois hyperstatique ; par la suppression de  $n$  liaisons le système est rendu isostatique. Nous allons supposer les liaisons supprimées par introduction de rotules et non par coupures des barres. On a donc en général besoin de  $n$  rotules.

Soit, par exemple, un portique continu à trois travées figure (1.1.a) soumis à une charge verticale et une charge horizontale, et rendu isostatique par introduction de neuf rotules, comme représenté sur la figure (1.1.b). Dans chaque rotule,  $i$  ou  $k$  appliquons, aux sections adjacentes et l'un contre l'autre, deux moments extérieurs égaux entre eux,  $X_i$  ou  $X_k$  remplaçant les liaisons supprimées et de façon à ramener à zéro les relations mutuelles, sous l'action des charges, des sections contiguës aux rotules.

La valeur de ces moments n'est pas connue actuellement. Dans la rotule 6 du portique considéré figure (1.1.c) seront alors appliqués deux moments  $X_6$ .

Supposons qu'apparaissent dans les barres du système étudié des zones plastiques. Pour des raisons méthodiques, on les classe en deux groupes :

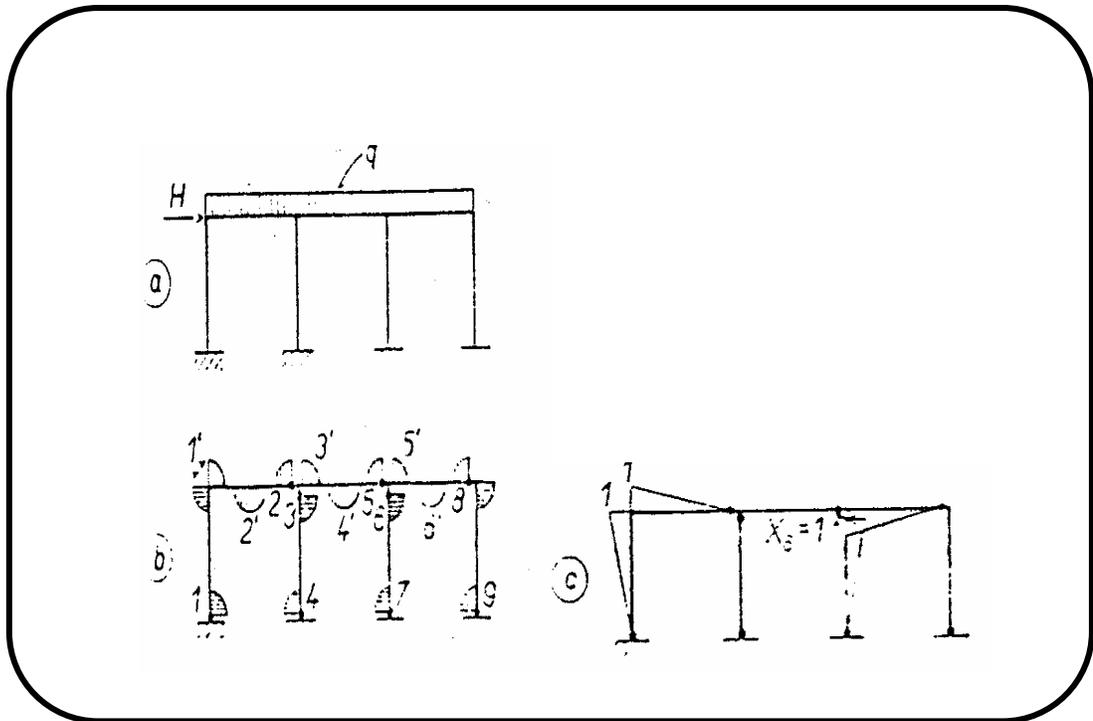
Celui des zones adjacentes aux rotules du système rendu isostatique et celui des zones situés aux endroits où aucune rotule n'est supposée (pour indiquer la différence, le numérotage du second groupe est affecté de l'indice prime).

Les composantes plastiques de la courbure  $\chi_p$  naissant dans ces zones sont portées du côté des fibres tendues figure (1.1.b).

La répartition exacte des moments n'étant pas connue à l'avance, le sens de l'action des moments  $X_i$ ,  $X_k$  et la position des diagrammes des composantes plastiques  $\chi_p$  doit être déterminés par estimation.

Étudions maintenant la rotule  $i$  dans le cas où sont appliquées au système rendu isostatique toutes les charges extérieures considérées, parmi lesquelles on compte aussi les moments  $X_i$ ,  $X_k$  et où sont nées des déformations plastiques dans les régions des sections critiques.

D'après le principe des déplacements virtuels. Le travail virtuel des forces extérieures est égale à celui des forces intérieures de façon à ce que l'on ait, si on néglige l'influence' des efforts normaux et tranchants sur la déformation.



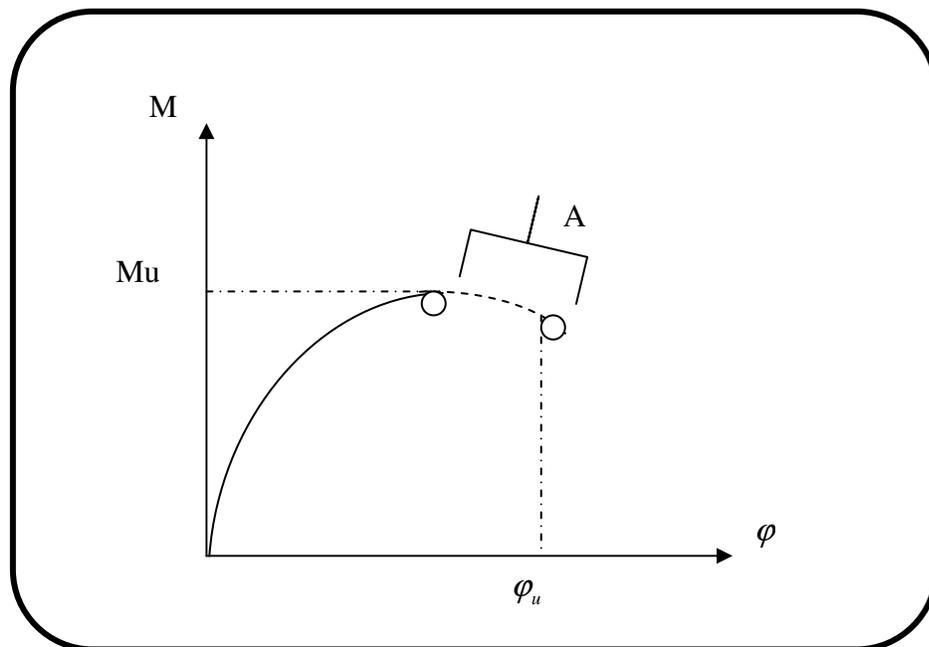
**Figure 1.1 :** Portique à trois travées neuf fois hyperstatique.

L'allure et le résultat de la redistribution des moments dépendaient des propriétés de déformation des sections critiques et des zones voisines de celles-ci. Les propriétés de déformation d'une section isolée sont données en général, par la relation entre le moment fléchissant  $M$  et la courbure de la déformée  $\chi$  diagramme moments courbures.

Toutefois, dans le cas général, le diagramme  $[M, \varphi]$  présente encore un tronçon descendant figure (1.2) La valeur maximale du moment fléchissant que l'on prend pour valeur du moment ultime  $M_u$  atteinte, la rupture de la section ne se produit pas encore; la section est capable de continuer à se déformer tandis que le moment fléchissant diminue, et ne se rompt qu'au moment où la courbure ultime  $\varphi_u$  est atteinte.

Le tronçon descendant ne peut entrer en jeu que là où le caractère du chargement ou la disposition constructive de la structure le permettent c'est-à-dire, lorsque la structure peut profiter de ses propriétés de déformation. L'introduction du tronçon descendant dans les calculs pratiques entraîne un certain nombre de difficultés:

En premier lieu, elle complique la solution. Comme, en outre, son influence sur la capacité portante ultime est positive, on ne s'occupera plus, des diagrammes moments courbures avec tronçon descendant et on supposera que le diagramme  $[M, \varphi]$  et ceux qui en découlent ont le pour des analyses ultérieures.



**Figure 1.2:** Diagramme  $[M, \varphi]$  avec tronçon descendant 'A'.

## **1.2 ANALYSE THEORIQUE ET EXPERIMENTALE DE COMPORTEMENT DES STRUCTURES EN BETON ARME SOUMISES AUX CHARGES DYNAMIQUES:**

L'analyse dynamique de structures au séisme se déroule habituellement selon une approche linéaire modale spectrale sur des structures modélisées en comportement élastique. Ces calculs permettent d'obtenir les efforts dynamiques agissant dans les éléments. Des justifications locales particulières permettent sur la base de ces efforts de calculer l'état des contraintes dans les éléments.

On suppose alors que le calcul élastique des efforts dans une structure n'est pas trop modifié par les non-linéarités pouvant apparaître localement dans la structure (par exemple, apparition de rotules plastiques, décollement des appuis). Cependant, cette approche élastique des efforts globaux surestime bien souvent les efforts réels, et par ailleurs ne permet pas de calculer les déplacements réels de la structure. Une approche plus fine du comportement des structures en béton armé ou en charpentes métalliques, vis-à-vis de sollicitations dynamiques ou statiques.

Ainsi, le logiciel "poutres" permet de calculer les efforts statiques réels se développant dans une structure plane Béton Armé type poteaux-poutres soumise à un chargement de type "force" en tenant compte des redistributions d'efforts entre éléments, liés à l'apparition de fissures dans le béton ou à la plastification des matériaux. En dynamique, outre la redistribution d'efforts, qui apparaît au-delà du seuil élastique des matériaux, l'abaissement de la rigidité des structures est une autre conséquence du dépassement du seuil élastique des structures.

L'analyse dynamique non linéaire des structures complexes de génie civil basées sur un modèle fini détaillé d'élément exige des calculs à grande échelle et manipule des techniques sensibles de solution. La nécessité pour réaliser des études paramétriques dues à la caractéristique stochastique des accélérations d'entrée impose modéliser numériquement simplifié qui réduira le coût de calcul.

Ce travail est réalisé en choisissant le modèle d'une poutre classique, (**EULER et BERNOULLI**) pour représenter le comportement global des composantes structurales d'une structure complexe de génie civil.

Pour réaliser un essai de compression dynamique au moyen des barres de **HOPKINSON** (**HOPKINSON [1914]**), on place un échantillon entre deux barres. On induit grâce à un projectile une onde longitudinale de compression dans une barre que l'on nommera barre entrante. Les signaux sont recueillis sur les barres au moyen des jauges de déformation qui leur ont été apposées.

L'analyse des résultats obtenus met en lumière deux phénomènes :  
En premier lieu, les contraintes à rupture en dynamique sont supérieures à celles que l'on trouve en statique; l'écart est d'environ 26 %.

Ce phénomène est connu sous le nom d'effet vitesse (**BISCHOFF et PERRY [1991]**) et semble avoir différentes origines comme la présence d'eau libre dans le béton (**ROSSI [1991]**, **TOUTLEMONDE [1995]**), l'opposition des forces d'inertie aux mouvements de la matière dans le sens perpendiculaire (**KLEPACZKO [1988]**), ou d'origine structurelle, c'est-à-dire liée à un état de contrainte non homogène dans l'éprouvette (**BAILLY [1994]**).

Ces phénomènes dynamiques non linéaires de redistributions d'efforts, de dissipation d'énergie et d'abaissement de fréquences modales nous amènent à poursuivre le développement du programme poutres pour l'adapter aux calculs dynamiques de réponse temporelle d'une structure en béton armé à un accélérogramme de séisme donné.

Un certain nombre de travaux a été édités afin d'entrer une meilleure perspicacité dans le comportement concret dans la compression dynamique et étudier l'influence du taux de chargement. Par exemple, (**BISCHOFF et PERRY [1991]**) montrent, comme corroboré par une synthèse bibliographique significative, qu'il y a une augmentation de la résistance à la pression concrète à un taux de déformation plus élevé.

Juste comme l'essai de compressibilité, l'essai simple de tension doit également être adapté à dynamique. En particulier, en employant une version modifiée de l'essai de barre de **(HOPKINSON, KLEPACZKO et BARARA [2001])**, ont obtenu les résultats expérimentaux dans lesquels le taux de déformation est au sujet  $100 \text{ s}^{-1}$  également ont rassemblé les résultats présentés dans la littérature que nous pouvons voir que juste comme dans la compression, deux modes distincts apparaissent dans l'augmentation de la résistance à la traction due au taux élevé de déformation.

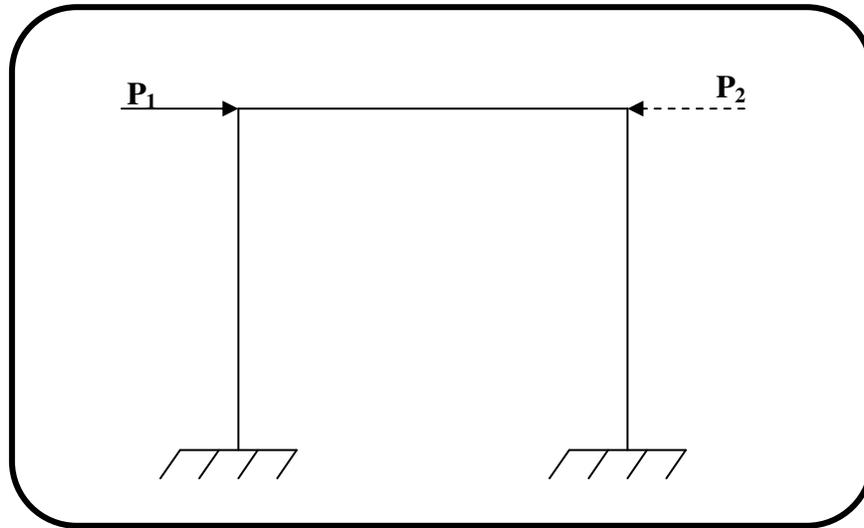
### 1.3 ETUDE DE L'ACTION DES CHARGES DYNAMIQUES A CARACTERE ALTERNE SUR LES STRUCTURES HYPERSTATIQUES EN BETON ARME (PORTIQUES):

La charge influe sur l'allure de la redistribution de deux façons: d'une part, par sa configuration qui affecte la forme et la position du diagramme des moments, et, de l'autre, par sa durée ou sa répétition. Dans la première influence le diagramme des moments dépend du système statique de la structure.

Dans les structures en béton armé, sous charges de service, il existe toujours des fissures et, de ce fait, une redistribution des moments s'est déjà produite partiellement; la répartition des moments ne correspond pas alors à la théorie élastique. Parfois, il faut en tenir compte dans la vérification de la déformation.

Les charges de service présentent des composantes de courte durée et de longue durée; il serait alors possible de conclure que l'influence des charges de longue durée sur la redistribution des moments est favorable. En outre l'ordre d'application des charges à la structure (histoire du chargement) influe sur l'allure et le résultat de la redistribution des moments.

Si les charges sont **alternées**, c'est-à-dire si elles agissent sur tout ou partie de la structure en sens inverses figure (1.3), les éléments peuvent être sollicités de telle façon que les déformations plastiques de sections se produisent alternativement pour des moments de sens contraires. Ceci est suivi de la rupture de certaines sections. Il s'agit, au fond, d'un phénomène qui est voisin de la fatigue du matériau.



**Figure 1.3:** Structure sous charges alternées; est appliquée à la structure soit la charge **1** soit la charge **2**

#### 1.4 PROBLEMATIQUE:

L'insuffisance totale de l'étude de redistribution d'effort dans les structures en portiques en béton armé où leurs éléments sollicités à la flexion composée avec effort de compression ou traction et flexion simple les dernières influent directement sur l'état de  $(\sigma, \varepsilon)$  de la structure globale.

Par ailleurs, une bonne limitation de la qualité des essais dont les initiations d'études du non-linéarité des déformations des systèmes en portiques sous l'action des charges dynamiques alternées. (Type sismique) prédétermine le but ou l'objectif des essais sur la résistance et déformation, des structures en portiques en béton armé en tenant compte de la redistribution des efforts dus aux charges dynamiques alternées.

L'objectif de notre travail est l'étude de la résistance et déformation des structures étagées en portiques en béton armé et aussi la redistribution des efforts dans les éléments fléchies des portiques sous l'action des charges dynamiques alternées sur la base de:

- ❖ Etude de l'influence du degré de ferrailage et le régime de chargement sur le caractère de distribution d'effort **HH** model (ou spectre) de portique à deux travées en béton armé.
- ❖ Mettre au point les méthodes de calcul des déformations du béton et l'acier dans les sections les plus sollicitées selon les modes de chargement et déchargement, y compris les toujours décroissants de déformabilité dans les phases proches de la rupture.
- ❖ Précision des méthodes de calcul de la redistribution des efforts dans les structures en portiques en béton armé au moment des chargements dynamiques alternés.
- ❖ Proposition élaborée sur le calcul de la résistance déformation des structures en portiques en béton armé, dont en étudiant l'influence de chargements dynamiques alternés sur leurs états ( $\sigma - \varepsilon$ ).
- ❖ Etats de ( $\sigma - \varepsilon$ ) des sections normales fléchies et fléchies avec effort de compression des éléments des structures en portique en béton armé sous l'action, des charges dynamiques alternées, à partir des résultats expérimentaux et théoriques obtenus.
- ❖ Organigrammes de calculs de la distribution des contraintes et des efforts les sections fléchies, des éléments selon les branches ou tronçons croissantes ou décroissantes de déformabilité.

- ❖ Redistribution des efforts, capacité portante et rigidité des sections critiques des éléments des structures en portiques en béton armé sous l'action des charges statiques et dynamiques cycliques à partir des résultats expérimentaux et théoriques obtenues.
  
- ❖ Proposition établie sur l'influence des charges dynamiques alternées selon le chargement des paramètres pour l'évaluation de la résistance rigidités et courbures des sections les plus sollicitées des éléments des structures en portiques en béton armé.