

# *Dynamique des structures*

**Abdellatif MEGNOUNIF**

e-mail: [abdellatif\\_megnounif@yahoo.fr](mailto:abdellatif_megnounif@yahoo.fr)

**Partie 3 : Conception parasismique**  
**Sous Partie 3B : Méthode Statique Non Linéaire Equivalente**

**Chap. 19**

**Méthode Push Over**  
**(Méthode statique non linéaire)**

**COURS 19 Jeudi 22.02.2024**

© **Abdellatif MEGNOUNIF** FT-Tlemcen

# STRUCTURE DU COURS

## Troisième Partie: Conception parasismique. Méthode statique non linéaire équivalentes.

### 19. Méthode statique non linéaire: Méthode Push Over

- Introduction.
- Méthode des forces Vs Méthode des déplacements.
- Origine de l'analyse Push Over.
- Système à un seul DDL équivalent.
- SAP2000 et étapes de la méthode Push over.

### 20. Méthode du spectre de capacité ATC 40 et sa version modifiée ATC 55 (FEMA 440).

- Introduction.
- Hypothèses de la méthode.
- Etapes de la méthode.
- Procédures de calcul.
- SAP 2000 et la méthode ATC 40.
- Etat de déplacement de la structure.
- ATC 55 : Amélioration de la méthode spectrale de capacité.

## **21. Méthode de calcul des coefficients de déplacements FEMA 273/356 et sa version modifiée FEMA 440 (ATC 55).**

- Introduction.
- Chargement appliqué latéral.
- Détermination de la période fondamentale.
- Calcul du déplacement maximal.
- Calcul de l'effort tranchant à la base.
- Distribution verticale des forces sismiques.
- Distribution horizontale des forces sismiques.
- FEMA 440. Amélioration de la méthode de calcul des coefficients de déplacement

## **22. Méthode NLRHA pour le système 1SDDL équivalent**

- Introduction.
- Etapes de la méthode.

## **23. Méthode N2 et ses variantes**

- Introduction.
- Description de la méthode N2.
- La méthode N1.
- La méthode N2 étendue.

## **24. Analyse temporelle de la réponse modale non couplée.**

- Introduction.
- Expansion modale des forces sismiques effectives.
- Analyse temporelle des réponses modales non couplées pour les bâtiments à étages multiples élastiques.
- Analyse temporelle des réponses modales non couplées pour les bâtiments à étages multiples inélastiques.

## **25. Analyse push over modale et ses variantes.**

- Introduction.
- Analyse push over modale pour les systèmes linéaires élastiques.
- Analyse push over modale pour les systèmes non linéaires inélastiques.
- Analyse push over modale modifiée.
- Analyse push over modale améliorée.



# 1. Introduction

Méthode push over (analyse statique non linéaire)

- Méthode approchée.
- Méthode statique équivalente non linéaire.
- Permet l'estimation de la performance sismique inélastique.
- Très pratique pour les codes de réhabilitation.
- Permet le suivi des séquences de formation des rotules plastiques et de l'apparition de la ruine dans les différents éléments de la structure.

**Push over : Pousser la structure jusqu'à ce qu'elle atteigne son déplacement maximal**

Les procédures d'analyse Push over est une analyse non linéaire recommandée pour la 1<sup>ère</sup> génération de conception sismique basée sur la performance (**Performance based seismic design (PBD)**)

**Push over : Pousser la structure jusqu'à ce qu'elle atteigne son déplacement maximal**

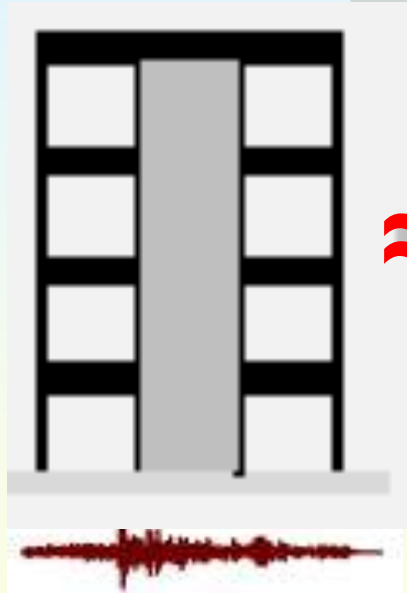
**Procédure statique non linéaire dans laquelle la structure est soumise à des charges latérales qu'on augmente leur intensité jusqu'à ce que les modes de ruine commencent à apparaître.**

- ✓ **Au début, certains éléments présentent des rotules plastiques.**
- ✓ **Le modèle structurel sera modifié pour tenir compte de la rigidité réduite des membres.**
- ✓ **On augmente de nouveau les forces latérales jusqu'à apparition de rotules plastiques supplémentaires.**
- ✓ **Le processus continue soit jusqu'à atteindre le déplacement cible soit jusqu'à ce que la structure devienne instable.**

Les résultats du push over sont représentés sous forme de courbe reliant l'effort tranchant à la base au déplacement au sommet.

## Idée de base de l'analyse Push over?

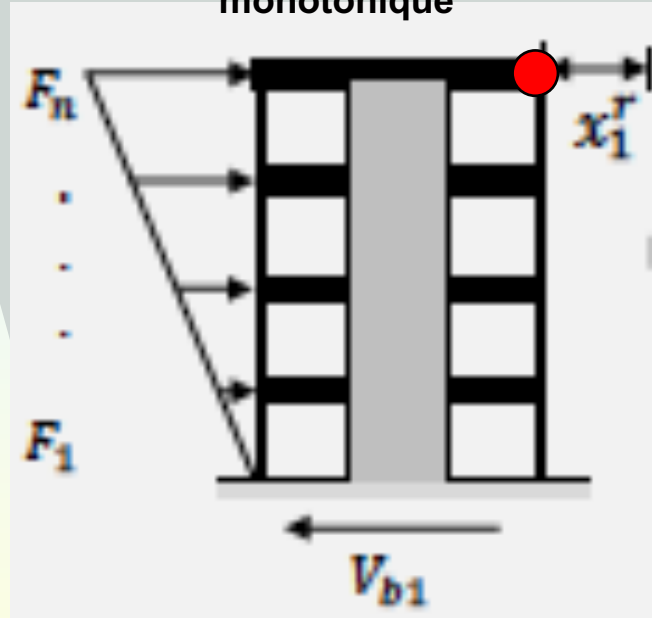
Modèle SPDDL  
non linéaire 3D



Structure de mouvement du sol dans une direction X ou Y particulière

Analyse temporelle non linéaire dynamique (SPDDL)

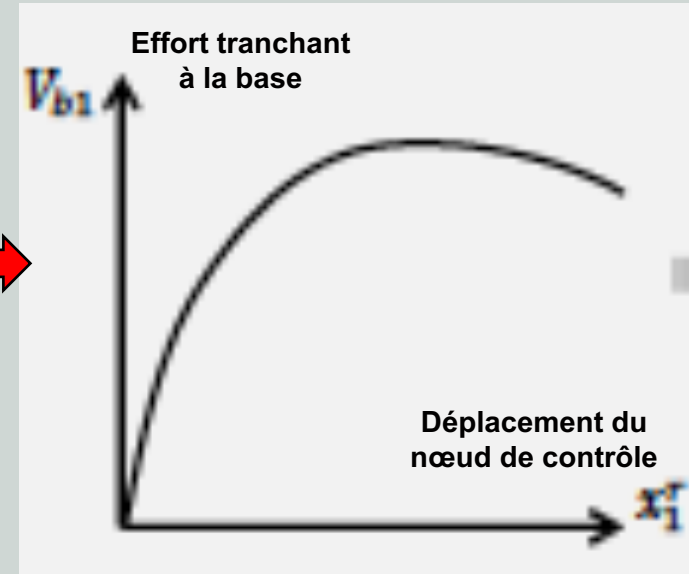
Analyse Push over  
monotonique



Incrémentation de la charge latérale de façon monotone pour pousser la structure dans cette direction particulière X ou Y

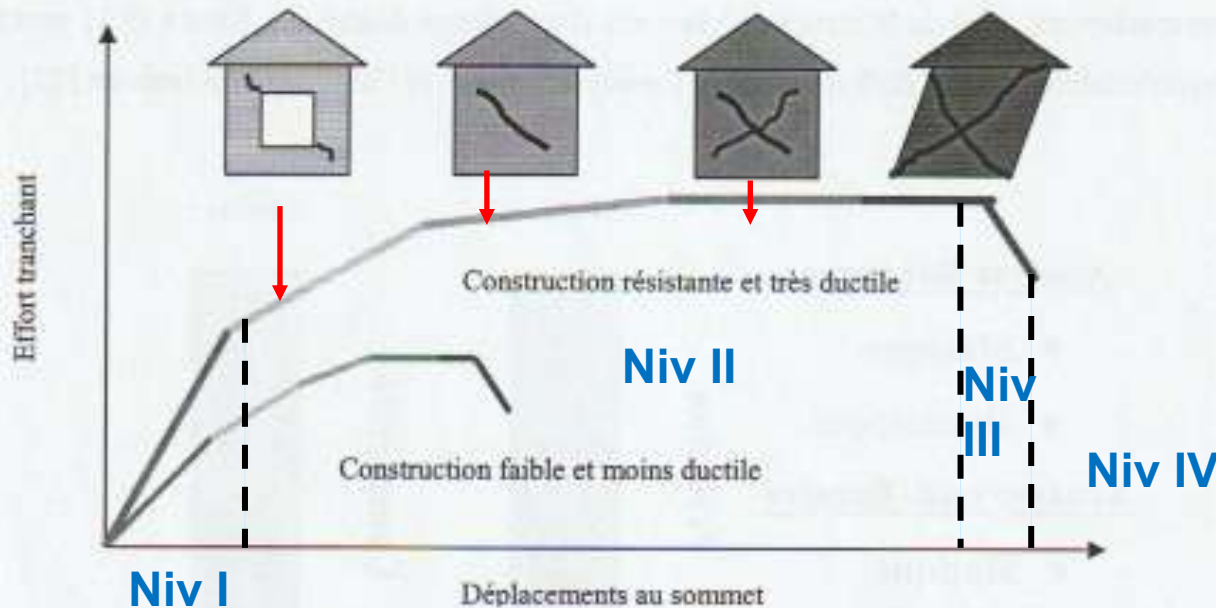
Analyse statique non linéaire (SPDDL)

Courbe Push over



Développer la relation  
 $V_{b1}$  Vs  $x_{1r}$

 Nœud de contrôle



Exemple de  
courbe de capacité

### *Courbe de capacité*

- **Niveau I :** correspondant au comportement élastique de la structure. Conception parasismique utilisée. Pas d'endommagement ou endommagement superficiel.
- **Niveau II :** Endommagement correspondant à un niveau de dommage contrôlé (endommagement mineur). Stabilité de la structure n'est pas en danger.
- **Niveau III :** Etat d'endommagement avancé, la stabilité de la structure est en danger.
- **Niveau IV :** La structure est susceptible de s'effondrer et ne présente aucune capacité à la résistance.



## Objectif de l'analyse Push over ?

**Le but est de décrire le comportement de la structure en utilisant une analyse statique non linéaire et d'évaluer les différents paramètres en termes de forces et déplacements et les sollicitations dans les éléments structuraux.**

**Fournit des informations sur plusieurs caractéristiques de la réponse (non obtenues par une analyse élastique)**

### *Méthode Push over*

- **Détermination des sollicitations réelles sur les éléments fragiles (exemple les demandes en force axiale des poteaux, moment sur les assemblages poutre-poteau, les sollicitations de cisaillement).**
- **Estimation des déformations dans le cas des éléments ductiles afin de dissiper de l'énergie communiquée à la structure par le mouvement du sol.**
- **Les conséquences de la détérioration locale des éléments sur le comportement global (effet de redistribution des efforts).**
- **L'identification des zones critiques dans lesquelles les déformations sont supposées être grandes.**
- **L'identification des discontinuités de résistance en plan et en élévation entraînant des variations dans les caractéristiques dynamiques dans le domaine inélastique (Formation de rotules plastiques dans les poteaux des niveaux intermédiaires).**
- **L'estimation des déplacements inter-étage qui tiennent compte de la rigidité et de la résistance qui peuvent être utilisés dans le contrôle de l'endommagement.**

## Les limites de la méthode ?

### *Limites de la Méthode Push over*

- La méthode est imprécise pour des structures où les modes plus élevés ont un effet significatif dans la réponse.
- Si la demande de déplacement est affectée par la dégradation de la rigidité, la détérioration de force ou l'effet  $P-\Delta$ , les caractéristiques hystérétiques du SPDDL doivent être incorporées au modèle équivalent à 1SDDL.
- Basée sur le principe du chargement statique elle ne peut pas représenter les phénomènes dynamiques avec une grande précision.
- Le choix de la distribution des charges latérales influe sur la courbe de capacité. Généralement la distribution des forces d'inertie changent avec la sévérité du séisme avec le temps pendant le tremblement de terre.
- Le choix du déplacement cible suppose que la réponse est contrôlée par le mode fondamental qui reste constant pendant toute l'histoire de la réponse.
- Les effets de torsion (dus à la masse, rigidité et irrégularité de la force) ne sont pas pris en compte dans la méthode.
- Les problèmes 3D (effets d'orthogonalité, direction du chargement, diaphragmes semi-rigides, etc...) ne sont pas pris en compte.
- Enfin, les issus cumulatifs des dommages ne sont pas considérés dans le modèle.

## 2. Méthode des forces Vs Méthode des déplacements

La dégradation d'un bâtiment est plus sensible au « déplacement » qu'à la « force », car la ruine est plus liée à une atteinte de la limite en déformation qu'au dépassement d'une limite en effort.

**RPA (analyse linéaire) est basée sur la méthode des forces : Insuffisant par rapport à la méthode des déplacements, si on veut tenir compte de la non linéarité des matériaux**

### *Limitations de la méthode des forces*

- L'estimation de la période fondamentale est obligatoire pour débuter les calculs. Les codes utilisent des expressions empiriques en fonction du système de contreventement et de la géométrie de la structure.
- Choix, difficile à justifier, du facteur de comportement pour exprimer le calcul inélastique.
- Le déplacement est considéré en second importance dans le calcul (pour vérification). Il a été montré que le déplacement doit être considéré dès le début du calcul

Paramètres définissant le comportement d'une structure

- 
1. Force,
  2. Déplacement,
  3. Ductilité
  4. Période élastique

| Paramètres à : | M. Des forces        | M. Des déplacements      |
|----------------|----------------------|--------------------------|
| Supposer       | Période<br>Ductilité | Déplacement<br>Ductilité |
| Déterminer     | Force<br>Déplacement | Période<br>Force         |

### 3. Origine de l'analyse pushover

- ✓ Il s'agit d'une analyse en déplacement. L'idée est de fixer un objectif en déplacement et de vérifier que le bâtiment peut résister aux efforts qui en résultent.
- ✓ Cet objectif est censé représenter le déplacement maximal qu'aura à subir le bâtiment lors du séisme.
- ✓ La méthode n'a pas une base théorique rigoureuse. Elle est basée sur l'hypothèse que :
  - La réponse de la structure SPDDL peut être assimilée à la réponse d'une S1DDL équivalent.
- ✓ La réponse est donc fondamentalement contrôlée par un seul mode de vibration et la forme du mode ne change pas pendant le séisme.
- ✓ Ces hypothèses restent très acceptables, uniquement lorsque le premier mode d'une structure est dominant.

#### *Historique de la méthode*

- Pour la 1<sup>ère</sup> fois, en 1975, Freeman et al. ont présenté une approche empirique simplifiée et rapide pour évaluer **la performance sismique** d'une série de 80 bâtiments aux états unis. L'étude a combiné l'utilisation des méthodes **analytiques** avec des **spectres de réponse** de site pour estimer : l'effet structural maximal, les demandes maximales de ductilité, la période équivalente de vibration, les pourcentages de l'amortissement critique équivalents et les capacités.

# 4. Système à 1 seul DDL équivalent

## i. Equation du mouvement

- ✓ Lorsque le 1<sup>er</sup> mode de vibration est dominant, le déplacement d'un SPDDL peut être approximativement égal au déplacement d'un S1DDL.
- ✓ Plusieurs méthodes de résolution, la plus commune est que la déformée du SPDDL peut être représentée par une forme de vecteur  $\{\phi\}$  qui reste constant durant le mouvement.

En posant :  $x = \{\phi\} x_t$  (19.1)

$x$  : déplacement relatif  
 $x_t$  : déplacement au sommet de la structure

On aura :

$$[M]\{\phi\} \ddot{x}_t + [C]\{\phi\} \dot{x}_t + [Q] = -[M]\{\Delta\} \ddot{x}_g \quad (19.2)$$

$[M]$  : Matrice masse  
 $[C]$  : Matrice amortissement  
 $[Q]$  : Vecteur des forces dans les niveaux de la structure  
 $\ddot{x}_g$  : Accélération du sol

Système à 1 seul DDL équivalent *i. Equation du mouvement*

$$[M]\{\phi\} \ddot{x}_t + [C]\{\phi\} \dot{x}_t + [Q] = -[M]\{\Delta\} \ddot{x}_g \quad (19.2)$$

$$\{\Delta\} = \begin{Bmatrix} 1 \\ 1 \\ \vdots \\ 1 \\ \vdots \\ 1 \end{Bmatrix}$$

En pré multipliant (19.2) par  $\{\phi\}^T$  :

$$\{\phi\}^T [M]\{\phi\} \ddot{x}_t + \{\phi\}^T [C]\{\phi\} \dot{x}_t + \{\phi\}^T [Q] = -\{\phi\}^T [M]\{\Delta\} \ddot{x}_g$$

En posant :

$$x^* = \frac{\{\phi\}^T [M]\{\phi\}}{\{\phi\}^T [M]\{\Delta\}} x_t \quad (19.3)$$

$x^*$  : déplacement du S1DDL équivalent

D'où:

$$\ddot{x}_t = \frac{\{\phi\}^T [M]\{\Delta\}}{\{\phi\}^T [M]\{\phi\}} \ddot{x}^* \quad \dot{x}_t = \frac{\{\phi\}^T [M]\{\Delta\}}{\{\phi\}^T [M]\{\phi\}} \dot{x}^*$$

On aura :

$$\{\phi\}^T [M]\{\Delta\} \ddot{x}^* + \{\phi\}^T [C]\{\phi\} \frac{\{\phi\}^T [M]\{\Delta\}}{\{\phi\}^T [M]\{\phi\}} \dot{x}^* + \{\phi\}^T [Q] = -\{\phi\}^T [M]\{\Delta\} \ddot{x}_g$$

Soit :

$$M^* \ddot{x}^* + C^* \dot{x}^* + Q^* = -M^* \ddot{x}_g \quad (19.4)$$

$$\begin{aligned} M^* &= \{\phi\}^T [M]\{\Delta\} \\ C^* &= \{\phi\}^T [C]\{\phi\} \frac{\{\phi\}^T [M]\{\Delta\}}{\{\phi\}^T [M]\{\phi\}} \\ Q^* &= \{\phi\}^T [Q] \end{aligned}$$

$M^*$ ,  $C^*$  et  $Q^*$  : propriétés du S1DDL équivalent

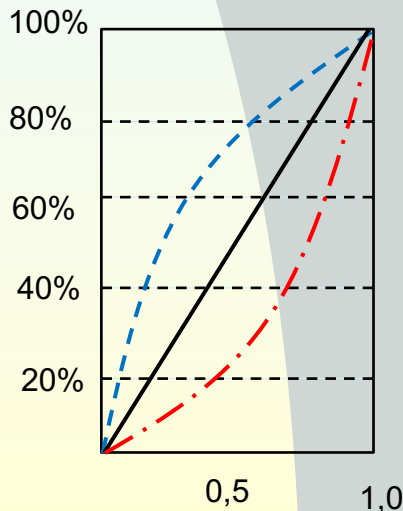
(19.5)

$$M^* \ddot{x}^* + C^* \dot{x}^* + Q^* = -M^* \ddot{x}_g$$

Choix de  
 $\{\phi\}$  ?



- ✓ Pourra être le premier mode d'un SPDDL.
- ✓ Le nœud pour lequel le déplacement est calculé est situé au sommet du bâtiment (centre de masse du dernier plancher) et  $\{\phi\}$  est normalisé pour avoir une amplitude égale à « 1 » au sommet.
- ✓  $\{\phi\}$  prend généralement 03 formes, hyperbolique, triangulaire et parabolique.



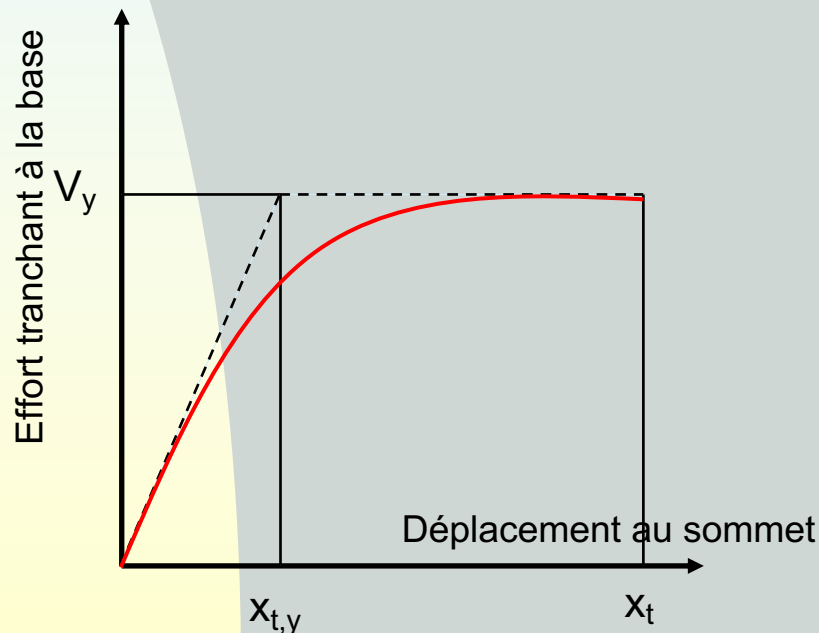
--- Hyperbolique  
— Triangulaire  
- . - Parabolique

Le plus utilisé et le plus simple est que  $\{\phi\}$  choisie en forme linéaire

Courbe  
Pushover ?



- ✓ Relation force -déplacement du S1DDL équivalent ( $Q^*$ ,  $x^*$ ) peut être déterminée à partir d'une analyse statique non-linéaire d'un SPDDL et représentera la variation de l'effort tranchant à la base avec le déplacement au sommet de la structure «  $x_t$  »



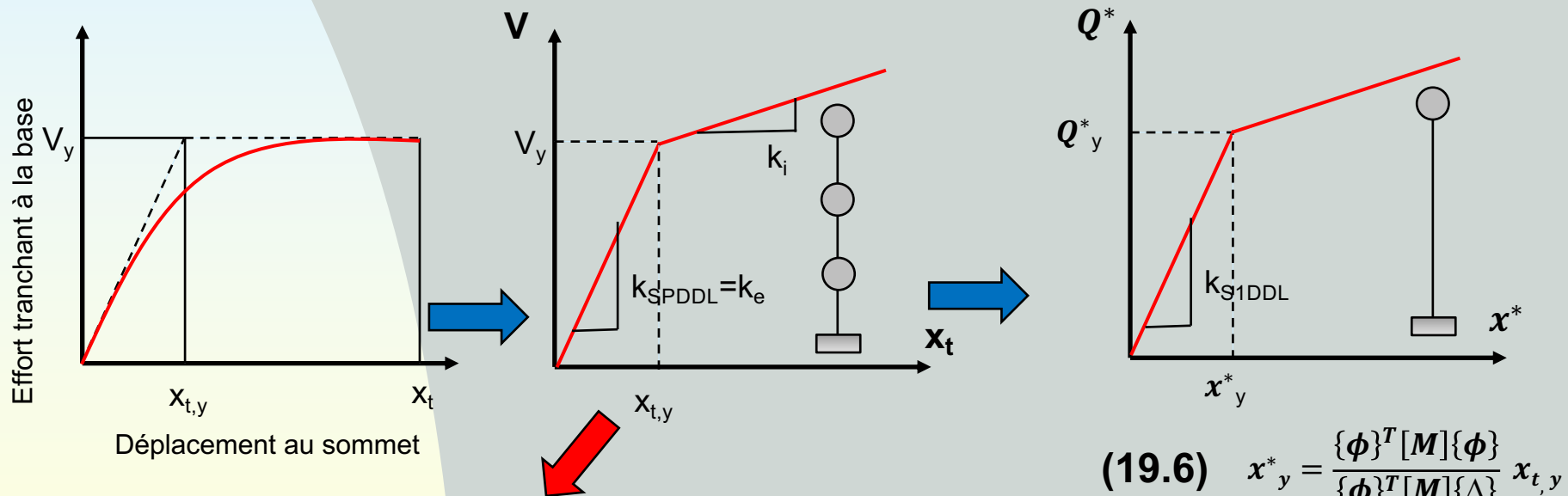
**Courbe PushOver**

**Pour un SPDDL**



Courbe Pushover ?

✓ La courbe pushover (SPDDL) non-linéaire doit être idéalisée à une courbe bi-linéaire pour identifier les paramètres globaux en terme de déplacement et de force, ce qui permet de définir l'effort tranchant à la limite élastique



✓ De cette courbe, on tire  $V_y$  et  $x_{t,y}$

✓ On peut calculer  $k_e = \frac{V_y}{x_{t,y}}$  et  $k_i = \alpha k_e$

✓ On remplace  $V_y$  et  $x_{t,y}$  dans (19.3) et (19.5)

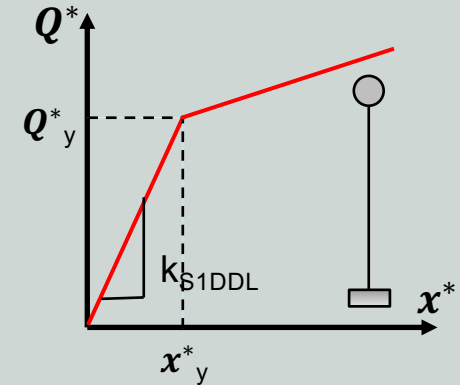
$$Q_y^* = \{\phi\}^T [Q_y]$$

$$(19.6) \quad x_y^* = \frac{\{\phi\}^T [M] \{\phi\}}{\{\phi\}^T [M] \{\Delta\}} x_{t,y}$$

$$(19.7) \quad \text{Avec: } V_y = \{\Delta\}^T [Q_y]$$

## Système à 1 seul DDL équivalent *i. Equation du mouvement*

Avec: 
$$x_y^* = \frac{\{\phi\}^T [M] \{\phi\}}{\{\phi\}^T [M] \{\Delta\}} x_{t,y} \quad \text{et:} \quad Q_y^* = \{\phi\}^T [Q_y]$$

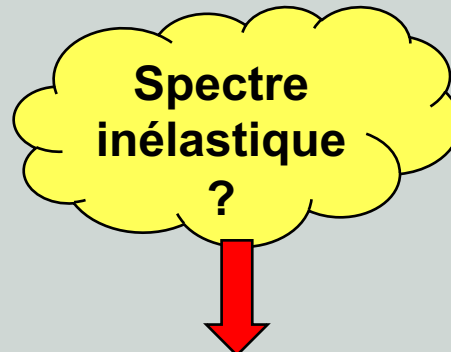


On aura la période propre élastique du S1DDL:

Avec  $K_{S1DDL} = \frac{Q_y^*}{x_y^*}$  et  $T_{eq} = 2\pi \sqrt{\frac{M^*}{K_{S1DDL}}}$

$$T_{eq} = 2\pi \sqrt{\frac{x_y^* M^*}{Q_y^*}} \quad (19.8)$$

- ✓ Il faut utiliser un **spectre inélastique**, pour calculer le déplacement d'un système inélastique ( $M^* \ddot{x}^* + C^* \dot{x}^* + Q^* = -M^* \ddot{x}_g$ )
- ✓ Il faut connaître « le facteur de comportement » pour déterminer le spectre inélastique



Soit l'équation du mouvement d'un S1DDL

$$M^* \ddot{x}^* + C^* \dot{x}^* + Q^* = -M^* \ddot{x}_g \quad (19.4)$$

En divisant par «  $M^*$  » on obtient le spectre inélastique :

$$\ddot{x}^* + \frac{C^*}{M^*} \dot{x}^* + \frac{Q^*}{M^*} = -\ddot{x}_g \quad (19.9)$$



Réponse d'un S1DDL avec une période «  $T_{eq}$  » et une **force limite élastique** :

$$S_{ay} = \frac{Q_y^*}{M^*} \quad (19.10)$$

Ayant les 02 spectres on peut calculer le facteur de réduction ou facteur de comportement

$$R_\mu = \frac{S_{ae}}{S_{ay}} = \frac{S_{ae}(T_{eq}) M^*}{Q_y^*} \quad (19.11)$$

$S_{ae}(T_{eq})$  : la force élastique du système équivalent tirée du spectre élastique (connu) .  
C'est l'ordonnée spectrale du spectre d'accélération correspondant à la période ( $T_{eq}$ ).

## Système à 1 seul DDL équivalent

### Critères qui affectent la précision de l'analyse pushover

Le déplacement maximal

Le choix de la forme du chargement latéral (représentant l'action sismique)

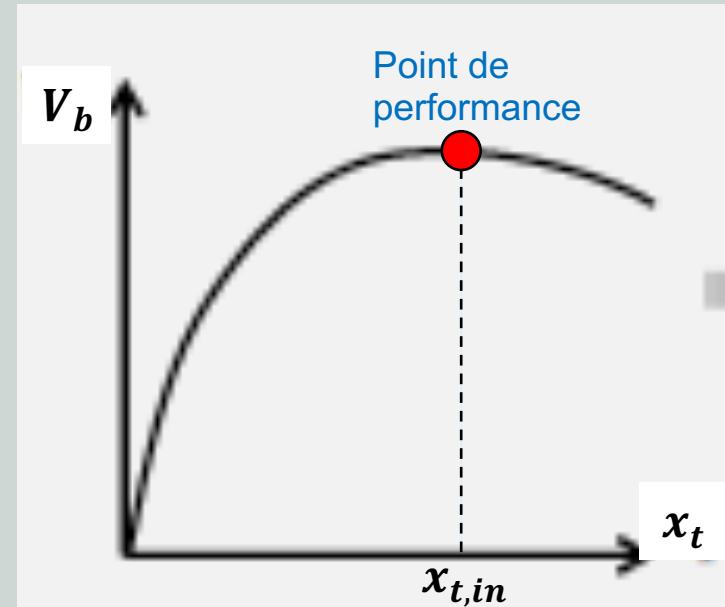
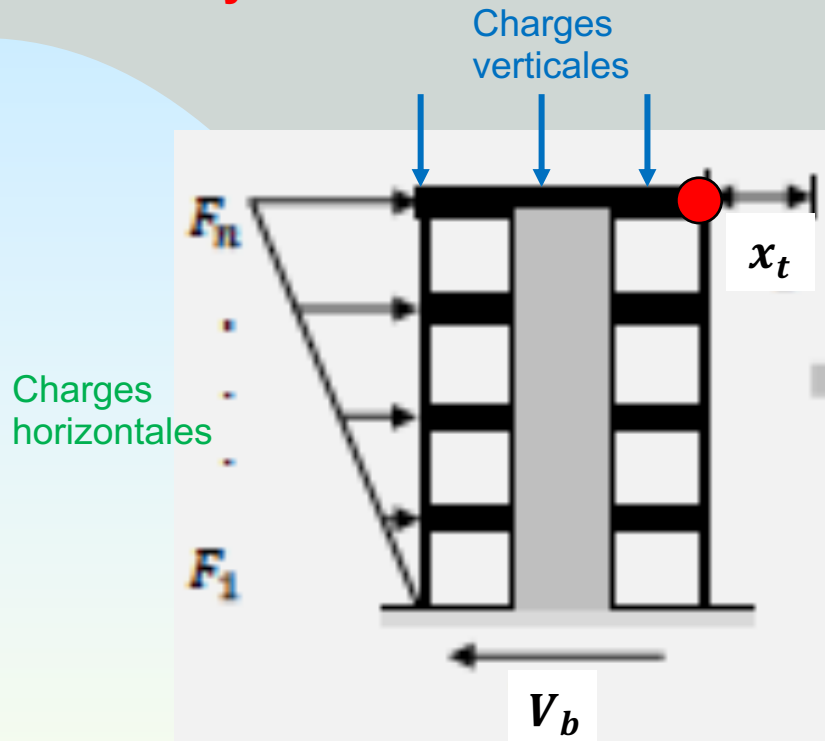
### ii. Déplacement maximal

- ✓ Dans l'analyse Pushover, le déplacement maximal de la structure est déterminé à partir du déplacement d'un S1DDL équivalent en utilisant (19.3)  $x^* = \frac{\{\phi\}^T [M] \{\phi\}}{\{\phi\}^T [M] \{\Delta\}} x t$ . Ce déplacement est contrôlé par un seul mode (les autres modes sont négligés).
- ✓ Par expérience, des structures en portiques et en voiles avec une période du 1<sup>er</sup> mode < à 2 s, la méthode est bonne. Cependant pour des structures ayant une longue période, la méthode ne peut pas être utilisée.
- ✓ Le déplacement inélastique du S1DDL équivalent est calculé en convertissant la courbe effort tranchant à la base - déplacement au sommet de la structure en courbe force-déplacement du S1DDL équivalent et en estimant le facteur de réduction «  $R_\mu$  ».
- ✓ Une fois le facteur connu, le déplacement du S1DDL peut être calculé soit directement à partir d'une analyse temporelle, soit indirectement à partir d'un spectre de réponse élastique.

### iii. Chargement latéral

- ✓ Le mode de chargement choisi est sensé représenter les forces d'inertie dans le calcul sismique, qui normalement varient en fonction de la sévérité du séisme.
- ✓ Dans l'analyse pushover, la distribution des forces latérales est supposée invariante et que les déformations obtenues doivent être comparables avec celles données par un calcul dynamique.
- ✓ Ceci est vrai, si les modes supérieures ont une influence négligeable sur la réponse dynamique.
- ✓ Il est donc recommandé d'utiliser au moins 02 distributions de forces latérales:
  1. Distribution uniforme (à chaque niveau la force est proportionnelle à la masse de chaque niveau)
  2. Distribution modale proportionnelle aux forces latérales déterminées en utilisant une analyse élastique. L'une des 03 cas:
    - ❖ Distribution selon le mode fondamental de vibration  $S_j = m_j \phi_{j1}$  où  $\phi_{j1}$  est la valeur du mode propre « j » (utilisé dans les codes de calcul)
    - ❖ Distribution triangulaire  $S_j = m_j h_j^k$  où  $h_j$  est la hauteur du niveau « j » par rapport à la base. « k=1 » si  $T \leq 0,5$  s et « k=2 » si  $T \geq 2,5$  s
    - ❖ Distribution proportionnelle aux forces d'inertie des étages et compatible avec la distribution des efforts tranchants dans ces étages. Elle est déterminée par analyse spectrale basée sur la combinaison SRSS avec un nombre suffisant de modes pour avoir 90% de la masse totale.

## L'analyse Push over Pour l'évaluation de la performance des bâtiments ?



### Procédures basées sur la méthode Push over

- Construire le modèle structural non linéaire et sélectionner les charges
- Appliquer les charges gravitationnelles.
- Appliquer le modèle de charge horizontal (Habituellement le 1<sup>er</sup> mode)
- Appliquer le modèle de façon incrémentale pour avoir la courbe Push over
- En utilisant différentes procédures (de façon séparée), déterminer le point de performance (Point «  $x_{t,in}$  »)
- Evaluer la performance structurelle au point «  $x_{t,in}$  » (Critères de réussite ou d'échec évalués sur la base de composante par composante ou bien la structure globale)

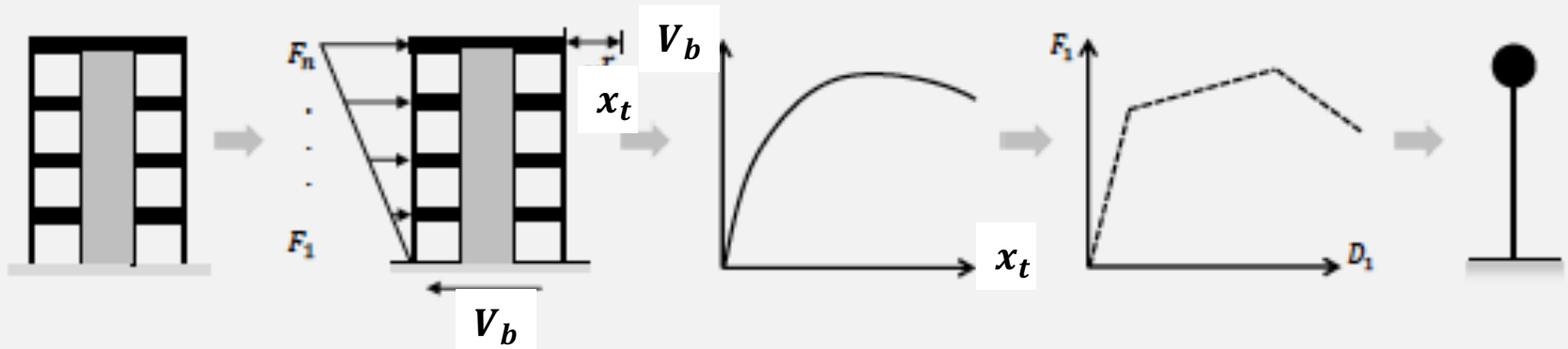
### Résultats

- Point de performance. Le point sur la courbe Push Over correspondant au déplacement inélastique maximal du nœud de contrôle «  $x_{t,in}$  » pendant l'excitation du sol.
- En d'autres termes, le prochain séisme est supposé poussé le bâtiment jusqu'à ce point.

«  $x_{t,in}$  » est appelé des fois « Déplacement cible »

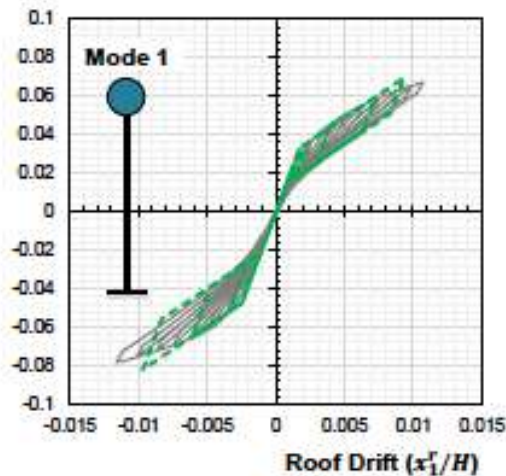
## Le concept du système à 01 SDDL équivalent ?

Full 3D Nonlinear MDF Model    Monotonic Pushover Analysis    Determination of Pushover Curve    Idealization of Pushover Curve    Equivalent SDF System



Convertir un SPDD non linéaire en un S1DDL NL équivalent

Normalized Base Shear ( $V_{b1}/W$ )



— Cyclic pushover curve  
--- Idealized SDF system

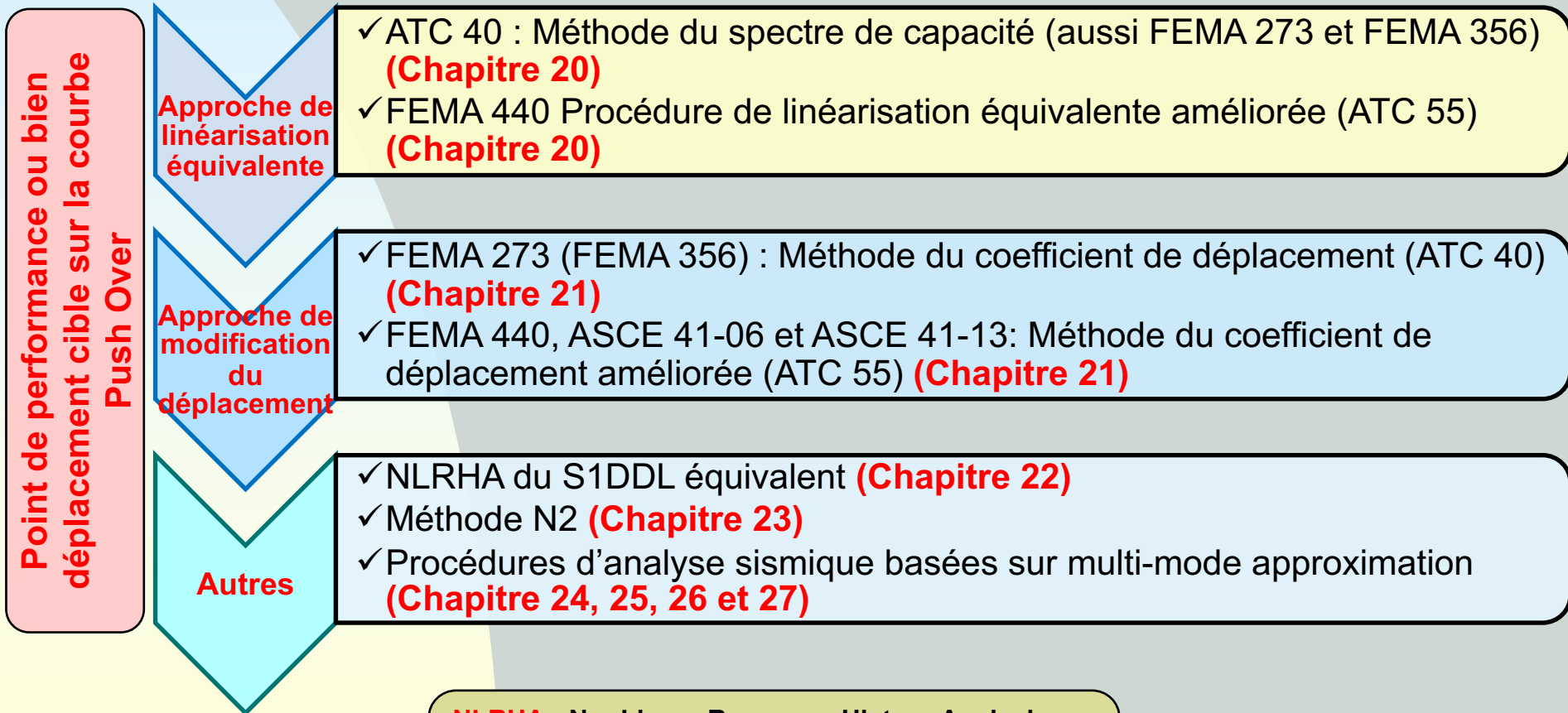
- Convertir une courbe Push over (SPDDL) (effort tranchant à la base (normalisé Vs déviation du sommet) en une courbe force-déplacement
- Convertir la courbe force-déplacement en une courbe idéalisée force-déplacement (pour une seule hystérésis)
- Appliquer cette courbe idéalisée au S1DDL pour calculer le déplacement inélastique maximal «  $x_{t,in}$  »

$x_{t,in}$  ?

Différentes procédures Push over

## Différentes Procédures basées sur la méthode Push Over

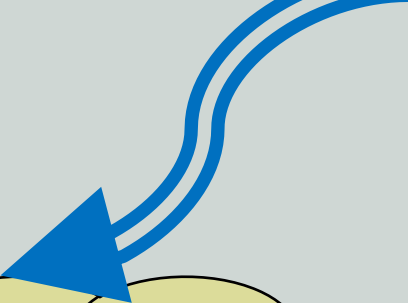
### Méthodes Statiques non Linéaires équivalentes



**NLRHA** : NonLinear Response History Analysis  
**FEMA** : Federal Emergency Management Agency  
**ATC** : Applied Technology Council  
**ASCE** : American Society of Civil Engineering



**PUSH Over**

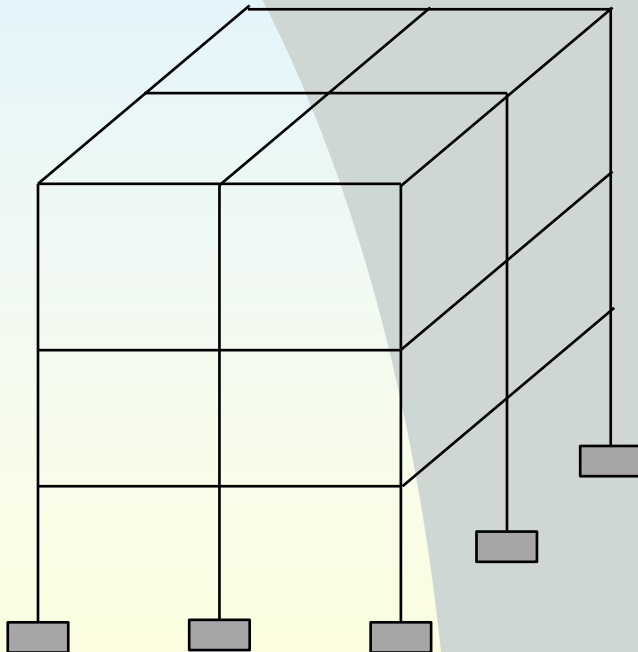


**SAP 2000**

# 5. Etapes de la méthode Pushover

**SAP2000**

## 1. Création du modèle de calcul



- ✓ Choisir le type de structure (modèle)
- ✓ Définir le type de matériau (*Define materials*)
- ✓ Définir et attribuer les sections des éléments poteaux et poutres (*Define/Assign Section properties*)
- ✓ Appliquer les CL (*Assign joint restraints*)
- ✓ Définir les modèles de chargement (*Define load patterns*)
- ✓ Définir et attribuer la notion de « plancher rigide » par étage (*Diaphragms*) (*define/assign joint constraints diaphragms*)

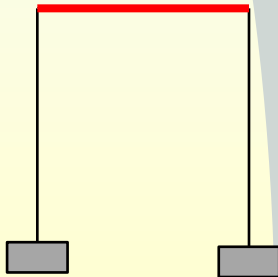
### 2. Définition et attribution de rotules plastiques aux éléments du modèle de structure

- ✓ Il faut avoir une idée sur la capacité du portique. Il faut surtout connaître où peut se produire les dommages (Expériences, anciens photos d'endommagement de séismes,...)
- ✓ Connaître où se produisent les plastifications.
  - Dans les poteaux d'abord ?
  - Dans les poutres d'abord ?
  - Dans les poutres et poteaux en même temps ?

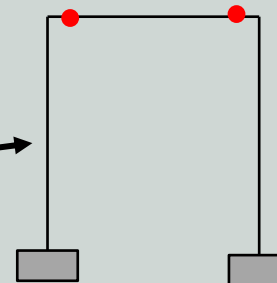
Attribuer la non linéarité matérielle de 02 manières

Distributed plasticity approach

Lumped plasticity approach



Résultats pas trop différents



Plus simple et la plus utilisée

- ✓ Définir les rotules plastiques (*Define Section properties Hinge properties Add new properties*). Soit
  - *User defined hinges* (introduire les paramètres manuellement)
  - *Auto hinge* (utiliser de la bibliothèque de SAP) (La plus utilisée)

- ✓ Attribuer les rotules plastiques (après avoir sélectionner les éléments)

\* *Relative distance*



- \* *Auto Hinge Type* : (Table ASCE 41-17 (code américain))
  - ✓ Pour les poutres (en BA) : *Concrete beam flexion DOF M3*
  - ✓ Pour les poteaux (en BA) : *Concrete Column DOF P-M2-M3*.

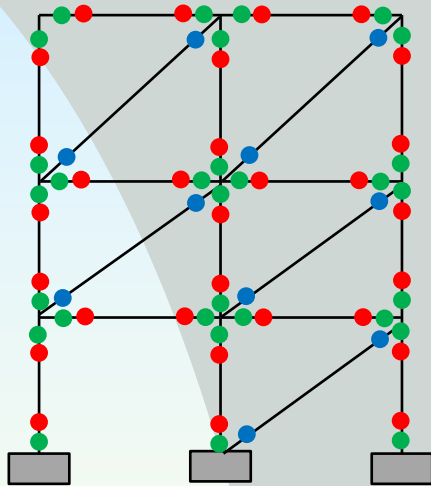
*P values from : Case/Combo*

- \* *Transverse reinforcing* : Lié à la ductilité de la structure.

Nouvelle structure : Cocher

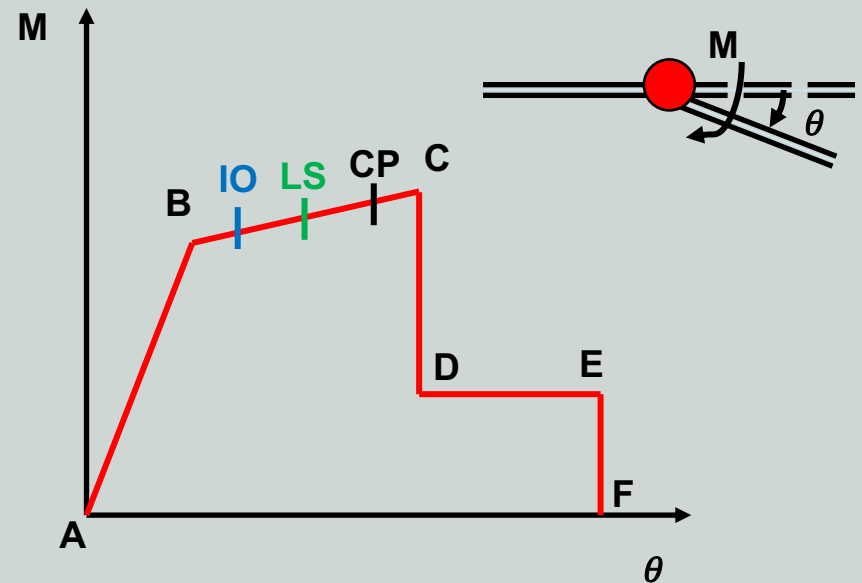
Ancienne structure (maçonnerie, réhabilitation) :  
ne pas cocher

✓ 03 types de rotule plastique



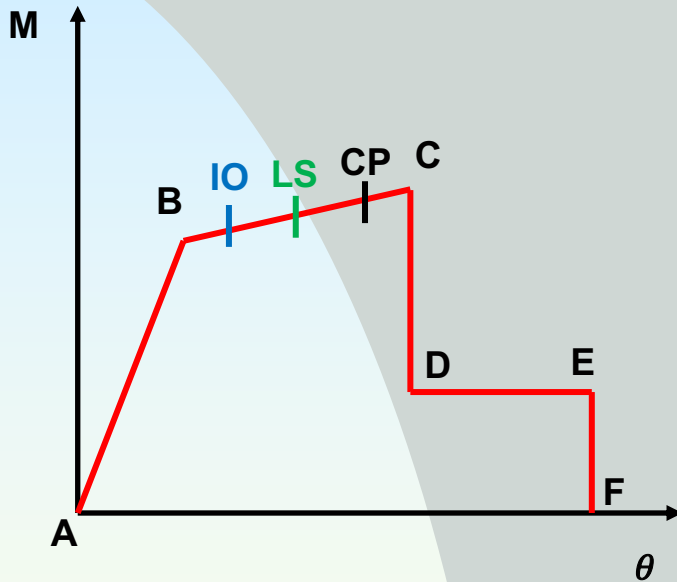
- Rotule flexionnelle
- Rotule de cisaillement
- Rotule axiale (en cas de modélisation du mur en maçonnerie)

Une rotule plastique représente la relation force-déplacement localisée d'un élément à travers ses phases élastique et inélastique.



Exemple : Propriété d'une rotule flexionnelle typique (Moment-rotation) d'une poutre

Courbe moment rotation



- A** : Etat non chargé.
- B** : Début de la plastification. Aucune déformation n'apparaît dans la rotule plastique, en dehors de la déformation en B.
- C** : Capacité ultime pour l'analyse « Push over ». Entre B et C, la rigidité diminue. (Ductilité)
- CD** : Réduction soudaine dans la résistance de charge. (Moment)
- DE** : Réduction dans la résistance
- EF** : Perte totale de résistance

Différents états de la rotule plastique

- IO** : « Immediate Occupancy » : Occupation immédiate. Etat d'endommagement négligeable. Le bâtiment peut être occupé mais nécessite peut être des petites réparations. Déplacement relatif  $< 0,2\%$
- LS** : « Life Safety » : Sécurité des vies. Effondrement des éléments secondaires. Etat d'endommagement irréparable avec un déplacement relatif  $< 0,5\%$ .
- CP** : « Collapse Prevention » : Prévention de l'effondrement. Consiste à éviter les vies et les biens. La structure peut engendrer un sérieux dommage mais doit rester debout après le séisme. Le déplacement  $< 2,5\%$

3. Définition de la distribution verticale des charges horizontales
4. Définition d'un déplacement cible comme référence du déplacement attendu de la structure lors du séisme
5. Application des charges de gravité comme conditions initiales de l'analyse Pushover qui doivent être maintenues constantes durant l'analyse

✓ **Add new load case** : Commencer par « dead load » en le changeant en analyse non linéaire pour entamer le « push over ». De préférence changer le nom  
DL-NL : **Load case type : Static Nonlinear**

- ✓ Définir les modèles de chargement horizontal (Define load patterns)
- ✓ Définir les cas de chargement (Define load cases). Exemples
  - Dead (et/ou LL)
  - Push X
  - Push Y

### 6. Application des charges horizontales représentant le séisme, que l'on fait croître de façon monotone jusqu'à l'atteinte de l'état limite ultime correspondant à l'initiation de l'effondrement de la structure.

- ✓ **Add new load case** : Application de la charge horizontale direction « x ».  
PUSH-X : *Load case type : Static Nonlinear*  
*Initial conditions : Continue from state at end of NL static (DL-NL)*  
*Load applied : 03 possibilités*
- ✓ **Add new load case** : Application de la charge horizontale direction « y ».  
PUSH-Y : *Load case type : Static Nonlinear*  
*Initial conditions : Continue from state at end of NL static (DL-NL)*  
*Load applied : 03 possibilités*

#### Load application

1. **Load pattern** (forces concentrées appliquées aux nœud latéraux). Sélectionner les nœuds, définir le chargement (Push X ou Y) et attribuer *Assign joints loads forces PUSH-X*
2. **Acc** : charge uniforme proportionnelles à la masse par étage. Définir la direction « Ux » et le multiplier « 1 »
3. **Mode** : en utilisant le mode dominant de vibration. Dans cette section, il faut ajouter « modal » dans les load case. Faire une analyse de pulsations et modes propres de vibration



## Etapas de la méthode Pushover

Load Case Data - Nonlinear Static

Load Case Name:   Notes: 

Load Case Type:  

Initial Conditions

☐ Zero Initial Conditions - Start from Unstressed State

☒ Continue from State at End of Nonlinear Case

Important Note: Loads from this previous case are included in the current case

Modal Load Case

All Modal Loads Applied Use Modes from Case

Loads Applied

| Load Type                          | Load Name                       | Scale Factor                     |
|------------------------------------|---------------------------------|----------------------------------|
| <input type="text" value="Accel"/> | <input type="text" value="UX"/> | <input type="text" value="-1."/> |
| <input type="text" value="Accel"/> | <input type="text" value="UX"/> | <input type="text" value="-1."/> |

Other Parameters

Load Application:  

Results Saved:  

Nonlinear Parameters:

## Etapas de la méthode Pushover

Results Saved for Nonlinear Static Load Cases

Results Saved

☐ Final State Only    ☒ Multiple States

For Each Stage

Minimum Number of Saved States

Maximum Number of Saved States

☒ Save positive Displacement Increments Only

Load Application Control for Nonlinear Static Analysis

Load Application Control

☐ Full Load  
☒ Displacement Control

Control Displacement

☐ Use Conjugate Displacement  
☒ Use Monitored Displacement

Load to a Monitored Displacement Magnitude of

Monitored Displacement

☒ DOF  at Joint   
☐ Generalized Displacement

**Merci. Fin du chapitre 19**

# *Dynamique des structures*

**Abdellatif MEGNOUNIF**

**Prochain Cours**

**Chap. 20**

**Méthode du spectre de capacité  
ATC 40 et sa version modifiée ATC  
55 (FEMA 440)**

**(Méthode Statique Non Linéaire)**

**COURS 20**