

Dynamique des structures

Abdellatif MEGNOUNIF

e-mail: abdellatif_megnounif@yahoo.fr

Chap. 20

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

(Méthode Statique Non Linéaire)

Méthodes Statiques non Linéaires équivalentes

Point de performance ou bien
déplacement cible sur la courbe
Push Over

Approche de
linéarisation
équivalente

✓ **ATC 40 : Méthode du spectre de capacité (aussi FEMA 273 et FEMA 356) (Chapitre 20)**

✓ FEMA 440 Procédure de linéarisation équivalente améliorée (ATC 55) (Chapitre 20)

Approche de
modification
du
déplacement

✓ FEMA 273 (FEMA 356) : Méthode du coefficient de déplacement (ATC 40) (Chapitre 21)

✓ FEMA 440, ASCE 41-06 et ASCE 41-13: Méthode du coefficient de déplacement améliorée (ATC 55) (Chapitre 21)

Autres

✓ NLRHA du S1DDL équivalent (Chapitre 22)

✓ Méthode N2 (Chapitre 23)

✓ Procédures d'analyse sismique basées sur multi-mode approximation (Chapitre 24, 25, 26 et 27)

NLRHA : NonLinear Response History Analysis

FEMA : Federal Emergency Management Agency

ATC : Applied Technology Council

ASCE : American Society of Civil Engineering

1. Introduction

ATC (1996): Applied Technology Council, USA

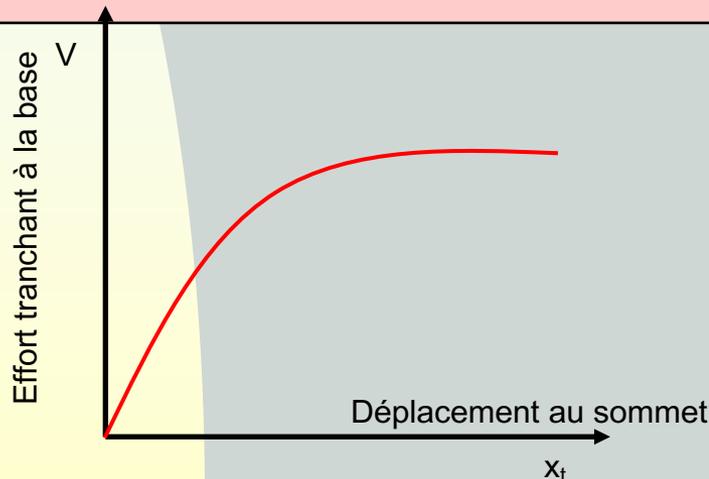
- ✓ La méthode du spectre de capacité adoptée par ATC 40, considère que la réponse inélastique peut être approchée par une succession de résolutions d'une structure linéaire dont l'amortissement est ajusté de manière itérative pour rendre en compte de la dissipation d'énergie liée à l'endommagement.
- ✓ Le spectre élastique est remplacé par des spectres inélastiques à des ductilités constantes.
- ✓ La méthode consiste à comparer l'aptitude (Capacity) de la structure à se déformer au besoin (demand) de déformation imposé par le séisme.
- ✓ Le principe de la méthode consiste à superposer une courbe de capacité obtenue pour 1SDDL par une analyse statique non-linéaire (pushover) sous un champ d'efforts représentant les forces d'inertie dues au séisme avec une courbe de demande représentative de la sollicitation apportée par le séisme dérivé du spectre de réponse élastique à amortissement imposé.
- ✓ L'intersection des 02 courbes représente un point appelé « point de performance » on calcule son déplacement, dit déplacement cible.
- ✓ Le déplacement du S1DDL est converti en déplacement d'un SPDDL correspondant.
- ✓ Finalement, par comparaison de déplacement obtenu au déplacement permis, la structure est évaluée si elle répond aux exigences de conception parasismique

2. Hypothèses de la méthode

- ✓ La distribution des forces latérales dans l'analyse « pushover » tient compte uniquement du 1^{er} mode de vibration
- ✓ La déformation inélastique d'un S1DDL est estimée à partir d'une série de systèmes linéaires équivalents à travers une procédure itérative ce qui évite l'utilisation d'une analyse dynamique d'un système inélastique.

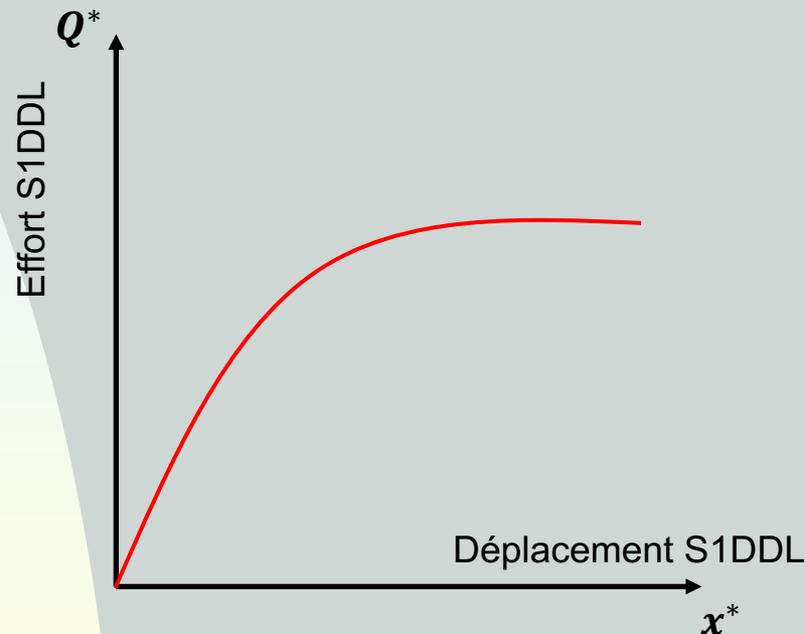
3. Etapes de la méthode

1. Etablir la relation effort tranchant à la base (V) – déplacement du sommet (x_t) du SPDDL à partir de l'analyse « pushover »



Courbe type de capacité (V - x_t)
d'un SPDDL par « pushover »

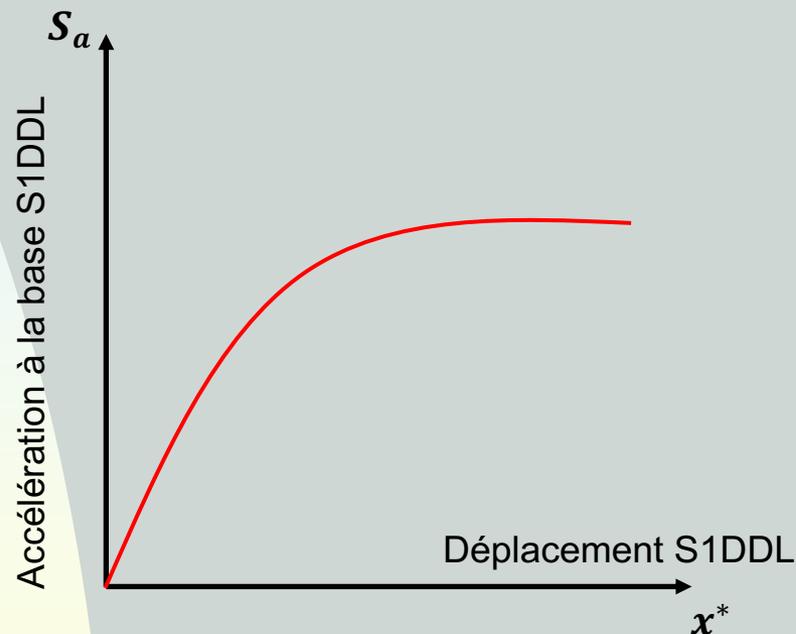
2. Transformer la courbe pushover obtenue du SPDDL en une courbe « pushover » pour un S1DDL en divisant l'effort tranchant et le déplacement par le facteur de participation modal $\Gamma = \frac{\sum_{i=1}^n M_i \phi_i}{\sum_{i=1}^n M_i \phi_i^2}$



Courbe de capacité « effort-déplacement (Q* - x*) d'un S1DDL

- 3. Transformer la courbe de capacité (Q^* - x^*) en courbe accélération à la base (S_a) – déplacement (x^*) d'un S1DDL en divisant l'effort par la masse effective $M^* =$**

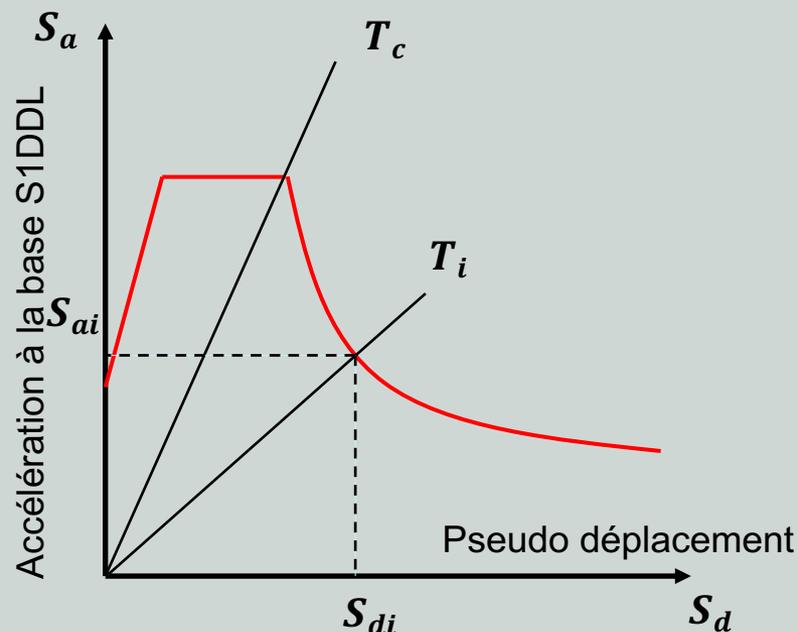
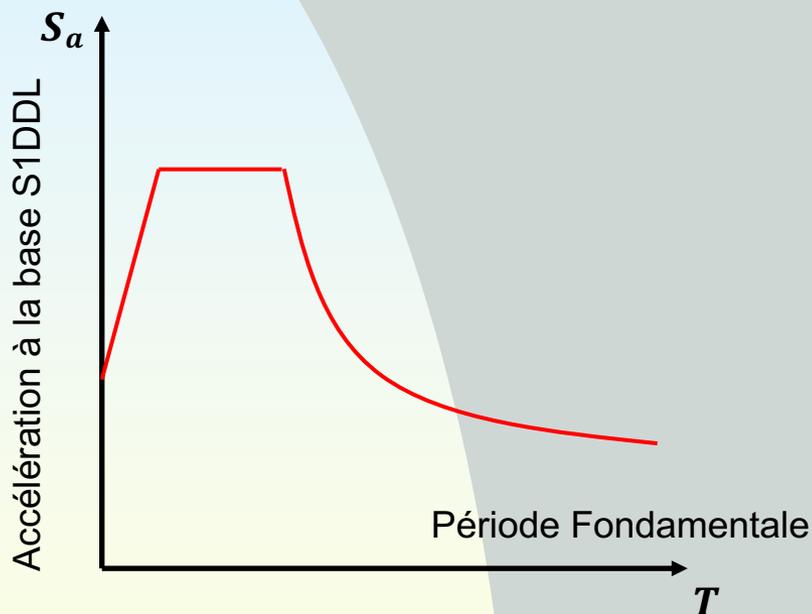
$$\{\phi\}^T [M] \{\Delta\} \quad S_{ay} = \frac{Q^* y}{M^*}$$



Courbe de capacité « accélération-déplacement (S_a - x^*) d'un S1DDL

4. Transformer le spectre élastique du format standard (S_a, T) au format (S_a, S_d)

$S_d = \frac{T^2 S_a}{4\pi^2}$ puisque la réponse de la structure est donnée sous forme de force (accélération) et de déplacements. C'est la **courbe de demande**.

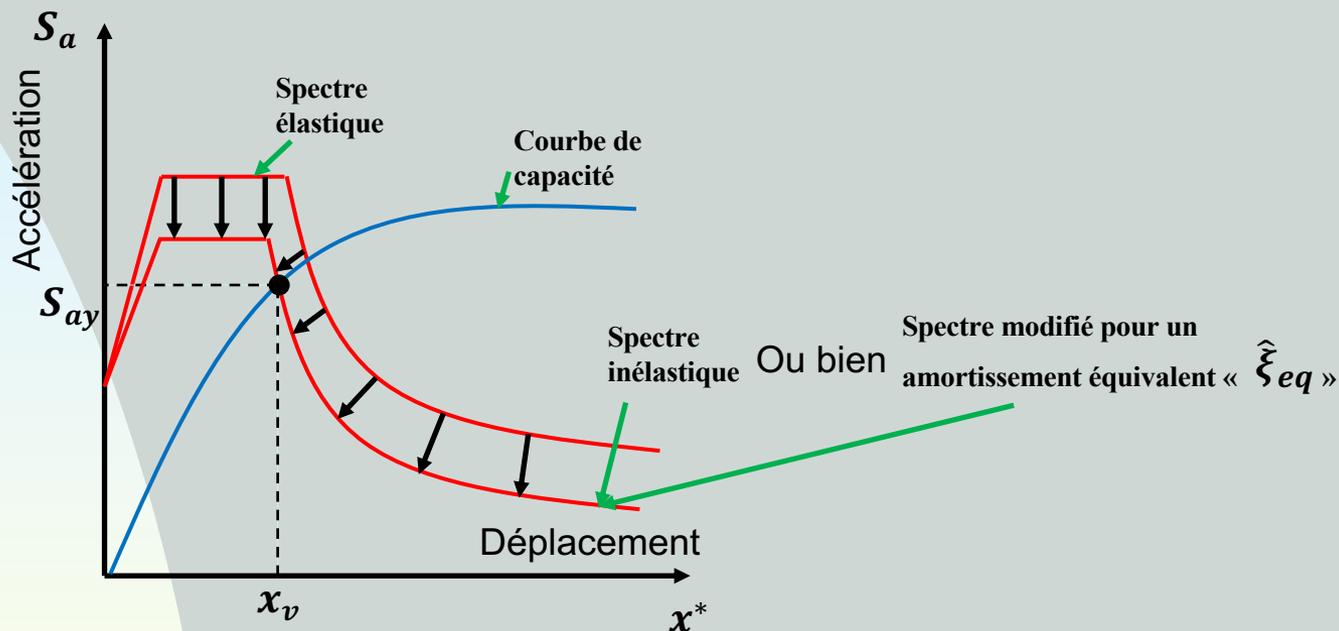


Conversion du spectre de réponse
(S_a, T) au format (S_a, S_d)

Courbe de demande

T_c : Période caractéristique du spectre de réponse, définie comme étant la période de transition entre le segment des accélérations constantes et le segment des vitesses constantes.

5. Représenter la courbe de capacité et la courbe de demande sismique dans un même graphe pour l'obtention du point d'intersection



Détermination du déplacement

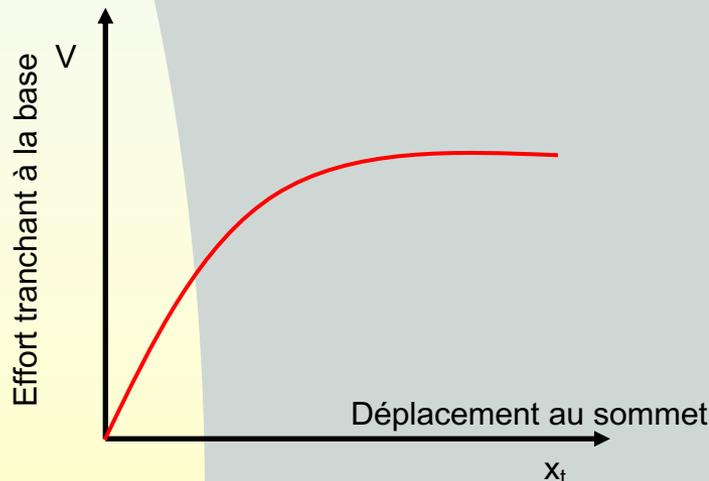
Spectre modifié pour un amortissement équivalent « $\hat{\xi}_{eq}$ » ???



Conversion d'un S1DDL Non linéaire en un S1DDL linéaire équivalent (d'où procédure de linéarisation équivalente)

4. Procédures de calcul

1. ATC 40 spécifie 03 procédures (A, B et C) pour estimer les déformations induites dans une structure et obtenir le **point de fonctionnement** ou **point de performance**.
2. Ces procédures reposent sur le même principe mais différent par leur application.
3. Les procédures A et B sont semi-analytiques (nécessitent une programmation) et la procédure C est graphique (calcul manuel, méthode d'application directe).
4. La procédure A est jugée la meilleure parmi les 03 méthodes.



Courbe type de capacité ($V- x_t$)
d'un SPDDL par « pushover »

Procédure A

1. Tracer la courbe force-déplacement et le spectre de réponse élastique correspondant dans un format accélération-déplacement en prenant un amortissement « $\xi = 5\%$ »
 2. Déterminer le déplacement maximal « x_t » et la pseudo-accélération « S_a » correspondante à partir de la courbe de capacité. Au début du calcul itératif supposer « $x_i^* = x(T, \xi = 5\%)$ » et déterminer la période « T » à partir du spectre de déplacement.
 3. Calculer la ductilité « $\mu = x_i^*/x_y^*$ » avec x_y^* : déplacement à la limite élastique
4. Calculer le rapport d'amortissement équivalent

$$\hat{\xi}_{eq} = \xi + \kappa \xi_{eq} \quad (19.20)$$

κ : facteur correcteur de l'amortissement qui dépend du comportement hystérétique du système.

ATC 40 propose 03 types de comportement hystérétique:

Type A : comportement avec une pente stable, pour un système tel que :

$\kappa = 1$ si $\xi_{eq} \leq 16,25\%$; $\kappa = 0,77$ si $\xi_{eq} \geq 45\%$; si $16,25\% \leq \xi_{eq} \leq 45\%$ interpolation linéaire

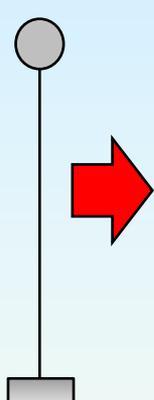
Type B : Comportement hystérétique intermédiaire entre A et C

Type C : Comportement hystérétique dont les boucles sont étroites

« $\hat{\xi}_{eq}$ » ???



Conversion d'un S1DDL Non linéaire en un S1DDL linéaire équivalent (d'où procédure de linéarisation équivalente)

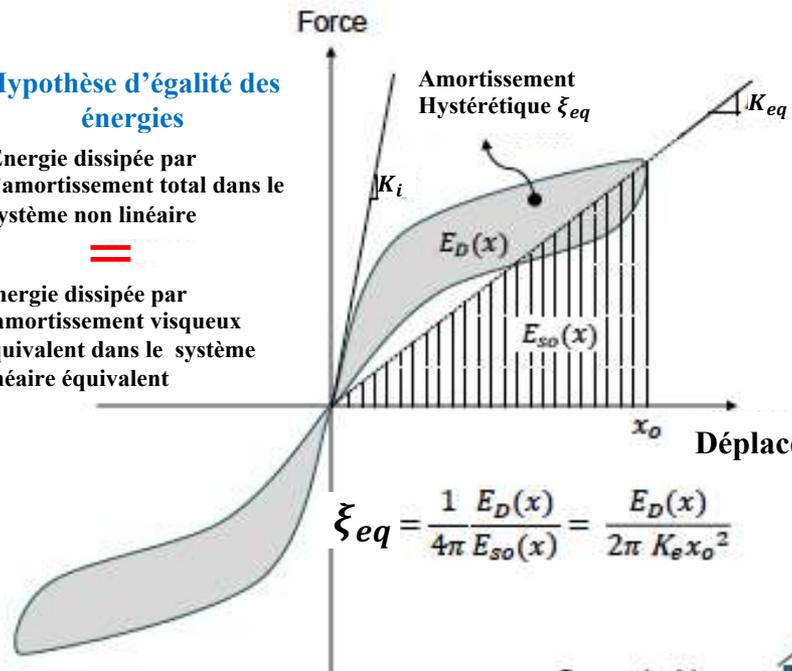


Hypothèse d'égalité des énergies

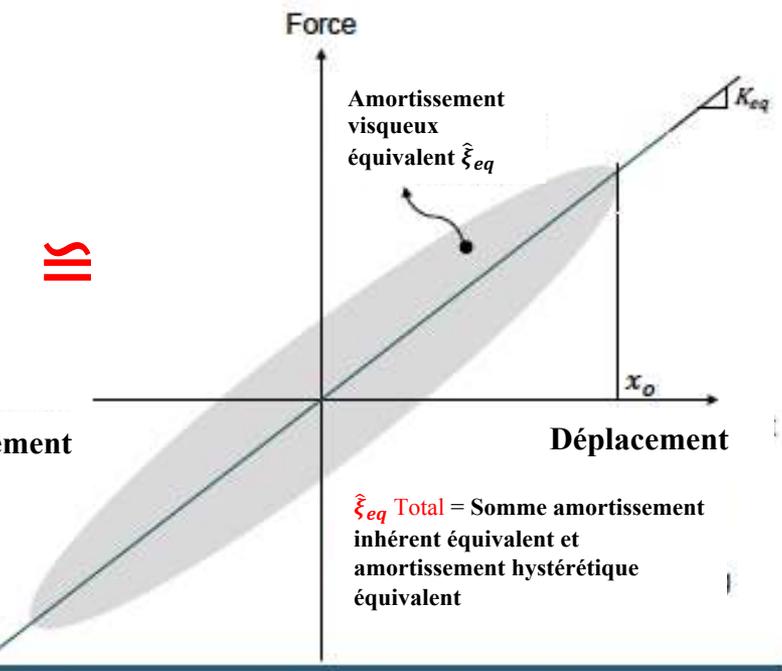
Énergie dissipée par l'amortissement total dans le système non linéaire

=

Énergie dissipée par l'amortissement visqueux équivalent dans le système linéaire équivalent



≅



A Nonlinear System → Converted to → An Equivalent Linear System with Elongated Period and Additional Damping

Les propriétés linéaires équivalents:
 $\hat{\xi}_{eq} = \xi + \kappa \xi_{eq}$
 $T_{eq} = \frac{2\pi}{\omega_{eq}}$

$$K_{eq} = m \omega_{eq}^2$$

$$K_i = m \omega_i^2$$

K_i : Rigidité initiale correspondante à la période initiale du système non linéaire

Lors de la conversion, le système équivalent doit avoir une période allongée et un amortissement visqueux additionnel

$$\hat{\xi}_{eq} = \xi + \kappa \xi_{eq} \quad (19.20)$$

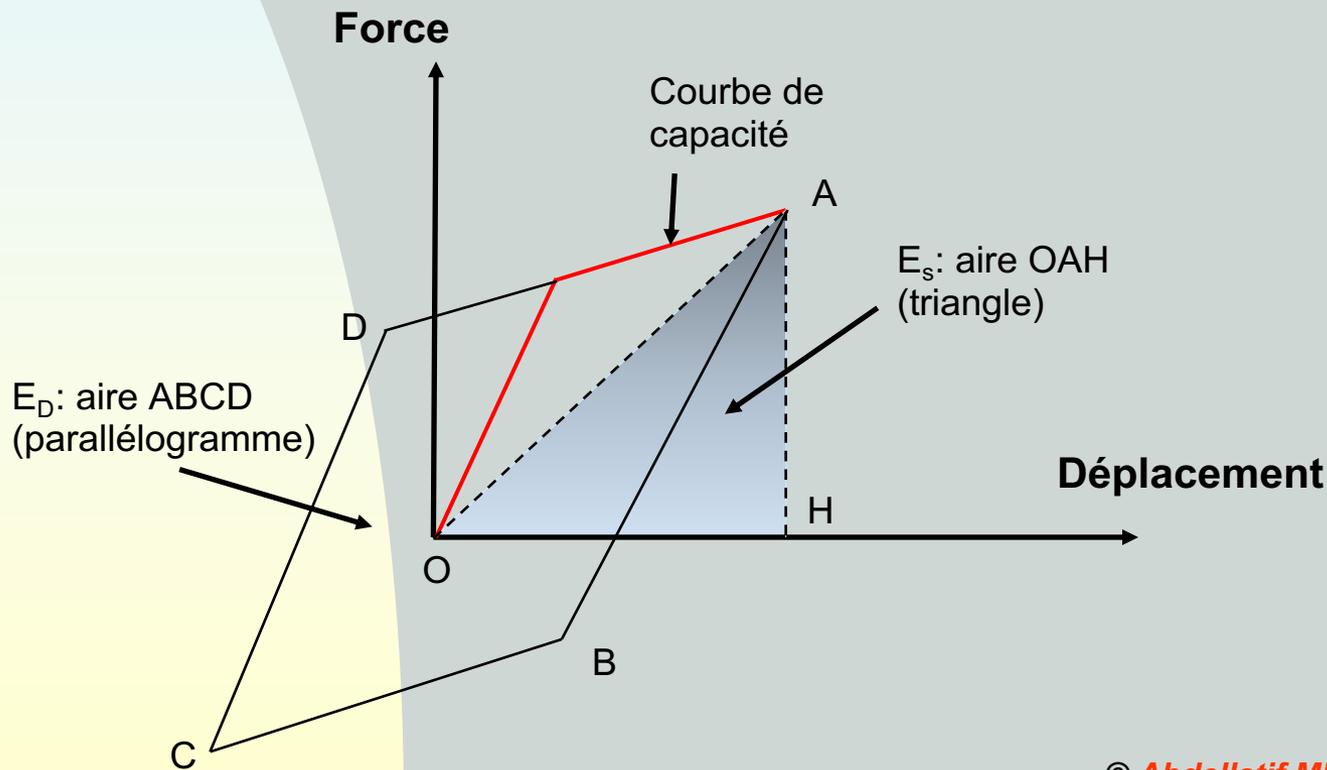
ξ_{eq} : rapport d'amortissement visqueux du S1DDL équivalent.

$\xi = 5\%$: Amortissement visqueux du domaine élastique.

$$\xi_{eq} = \frac{E_D}{4\pi E_S} \quad (19.20)$$

E_D : Énergie dissipée par le système inélastique (bi-linéaire).

E_S : Énergie dissipée par le système élastique équivalent).



Procédure A

5. Tracer le diagramme élastique pour la valeur de « $\hat{\xi}_{eq}$ » déterminée par (19.20) et lire la valeur du déplacement « x_j^* » quand ce diagramme coupe la courbe de capacité.
6. Si $\frac{x_j^* - x_i^*}{x_j^*} < \textit{tolérance} (= 0,05)$ le déplacement du S1DDL $x^* = x_j^*$
Sinon prendre $x_i^* = x_j^*$ et répéter les étapes 3 à 6

Procédure B

1. Tracer la courbe de capacité
2. Estimer le déplacement « x_i^* » supposé au début du calcul tel que « $x_i^* = x^*(T_n, \xi = 5\%)$ »
3. Calculer la ductilité « $\mu = x_i^*/x_y^*$ » avec x_y^* : déplacement à la limite élastique
4. Calculer la période équivalente et la rapport d'amortissement

$$T_{eq} = T_0 \sqrt{\frac{\mu}{1 + \alpha\mu - \alpha}} \quad (19.21)$$

$$\text{et} \quad \hat{\xi}_{eq} = \xi + \kappa \xi_{eq}$$

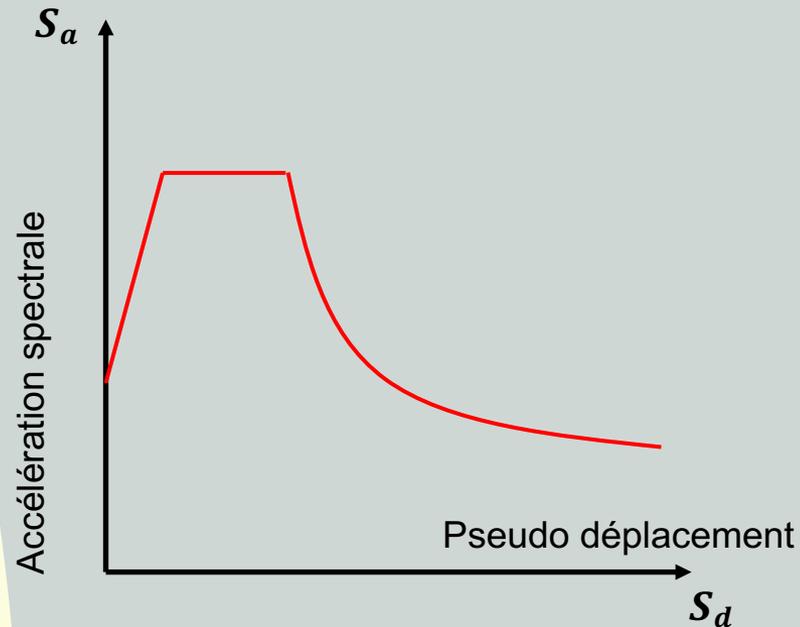
$T_{eq} = T_{sec}$ (point d'intersection entre la capacité et la demande à $\hat{\xi}_{eq}$)

T_0 : période initiale de vibration du système non linéaire
 α : pente de la courbe post plastique

5. Calculer le déplacement maximal « $x^*(T_{eq}, \hat{\xi}_{eq})$ » et la pseudo-accélération « $S_a(T_{eq}, \hat{\xi}_{eq})$ » du spectre élastique à S1DDL
6. Dessiner le point de coordonnées $x^*(T_{eq}, \hat{\xi}_{eq})$ et $S_a(T_{eq}, \hat{\xi}_{eq})$
7. Vérifier si la courbe tracée en connectant le point du 6) et le point déterminé précédemment coupe la courbe de capacité. Si c'est vérifiée, passer à l'étape suivante sinon répéter de 3) à 7) avec une nouvelle valeur de « x_i^* ».
8. Identifier le déplacement imposé par le séisme à la structure qui est donné par la valeur de « x^* » au point d'intersection.

Procédure C

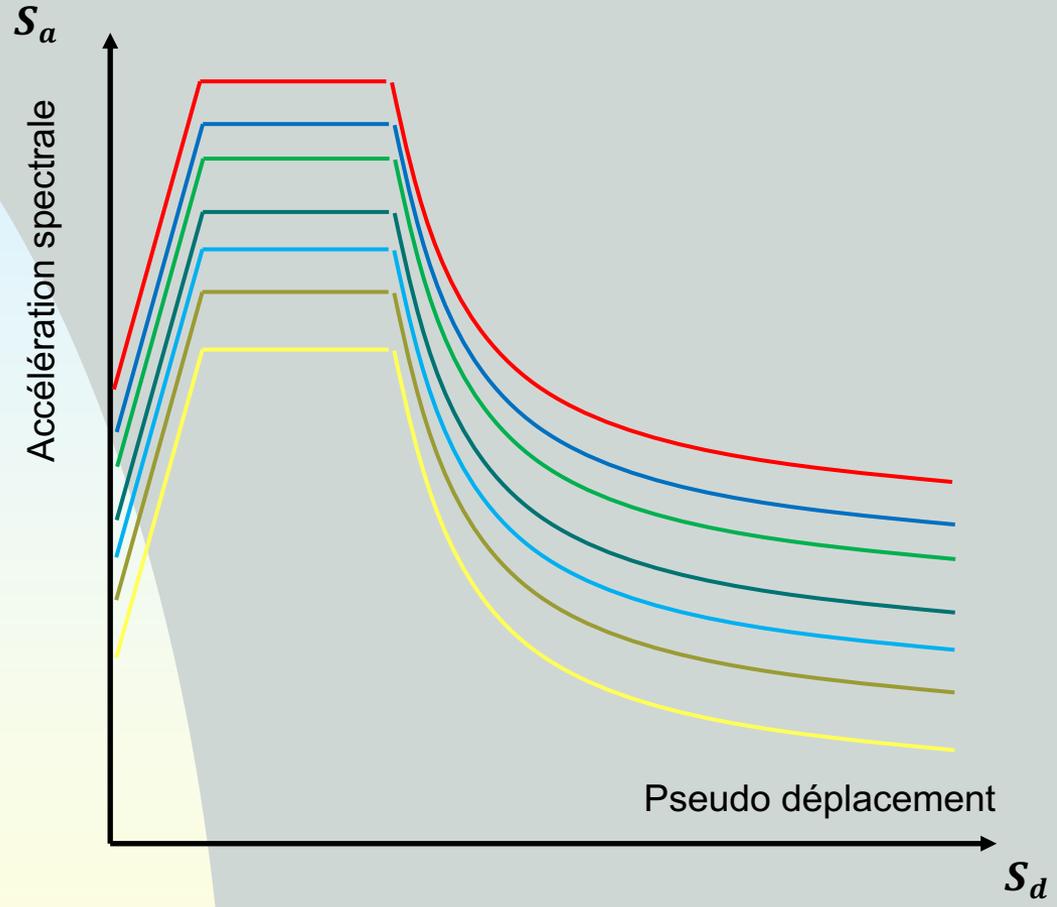
1. Tracer le spectre de réponse élastique correspondant dans un format accélération-déplacement en prenant un amortissement « $\xi = 5\%$ »



Procédure C

2. Tracer les spectres réduits pour « $\xi > 5\%$ » où « $\xi_{\text{eff}} \text{ }_{\text{max}}$ » est un paramètre qui dépend directement de la typologie de la structure (Voir étape 6)

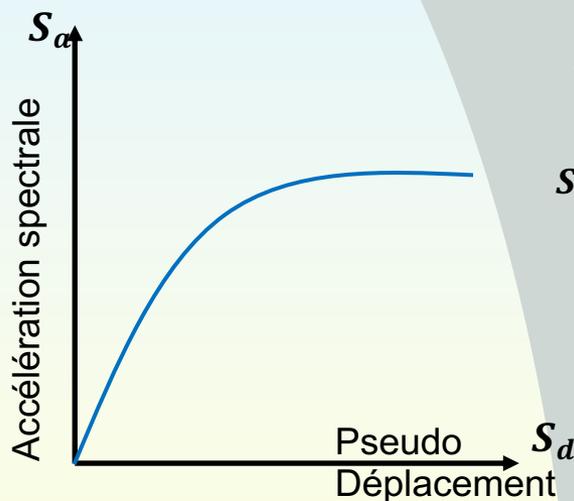
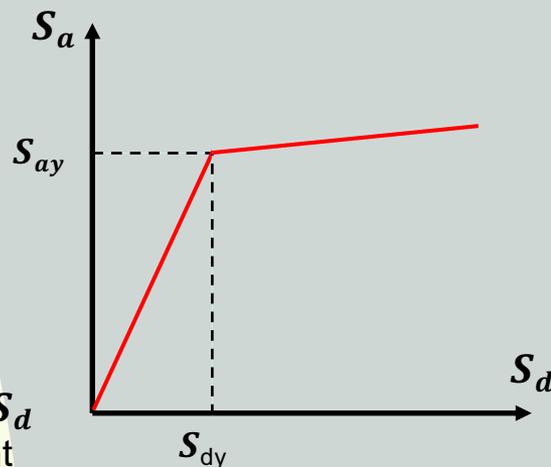
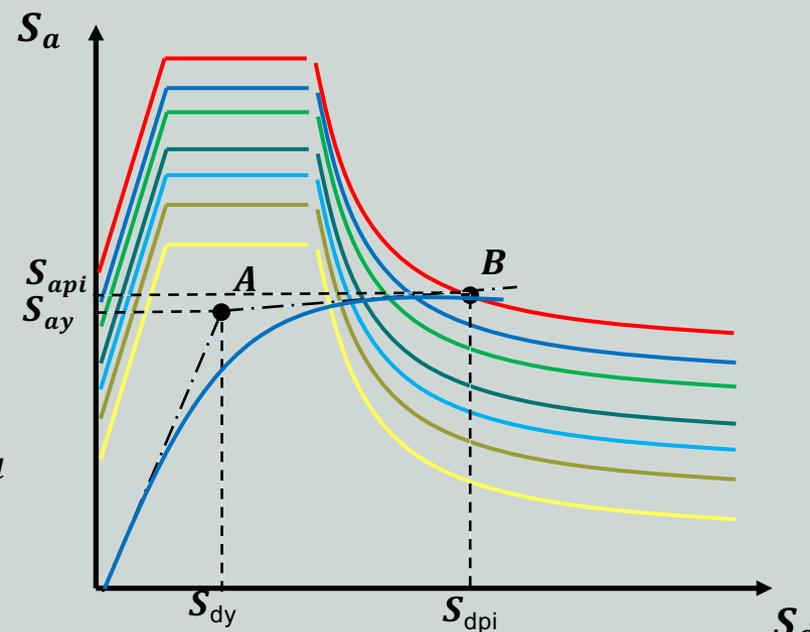
Typologie	Description des structures
Classe A ($\mu_{\Delta} > 6,5$)	✓ Bâtiments contreventés par des portiques en acier avec remplissage en maçonnerie
Classe B ($4,0 < \mu_{\Delta} < 6,5$)	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Bâtiments contreventés par des portiques en BA avec remplissage en maçonnerie. ✓ Bâtiments contreventés par des voiles en béton ✓ Bâtiments contreventés par des portiques et des voiles.
Classe C ($1,0 < \mu_{\Delta} < 4,0$)	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Maçonnerie ancienne en pierre non taillées. ✓ Maçonnerie chaînée en éléments préfabriqués en béton ou terre cuite, avec planchers en BA



- $\xi_{eff} = 5\%$
- $\xi_{eff} = 7\%$
- $\xi_{eff} = 10\%$
- $\xi_{eff} = 15\%$
- $\xi_{eff} = 20\%$
- $\xi_{eff} = 25\%$
- $\xi_{eff} = 30\%$
- ...



3. Tracer la courbe de capacité en format (S_a, S_d) (Spectre de capacité)
4. Développer la représentation bilinéaire du spectre de capacité caractérisé par le point $A(S_{dy}, S_{ay})$ limites élastiques. Combiner cette courbe avec la courbe des spectres réduits « étape 2 », on notera le point $B(S_{dpi}, S_{api})$ représentant l'intersection de la courbe représentant la courbe de demande à 5% d'amortissement et la courbe représentant la capacité.

Courbe de capacité $(S_a - S_d)$ Courbe de capacité $(S_a - S_d)$ en bilinéaireSpectre de réponse correspondant à « ξ »

5. Calculer les rapports

$$\left[\frac{S_{dpi}}{S_{dy}} ; \frac{\frac{S_{api}}{S_{ay}} - 1}{\frac{S_{dpi}}{S_{dy}} - 1} \right] \quad (19.22)$$

6. En fonction de la typologie de structure (A, B et C), calculer les « ξ_{eff} » en fonction des rapports obtenus en 5)

$$\xi_{\text{eff}} = \xi + \kappa \xi_{eq} = 5 + \kappa \xi_{eq} \quad \xi_{eq} = \frac{E_D}{4\pi E_S}$$

$$\xi_{\text{eff}} = 5 + \frac{S_{ay}S_{dpi} - S_{dy}S_{api}}{S_{api}S_{dpi}} \quad (\%) \quad (19.23)$$

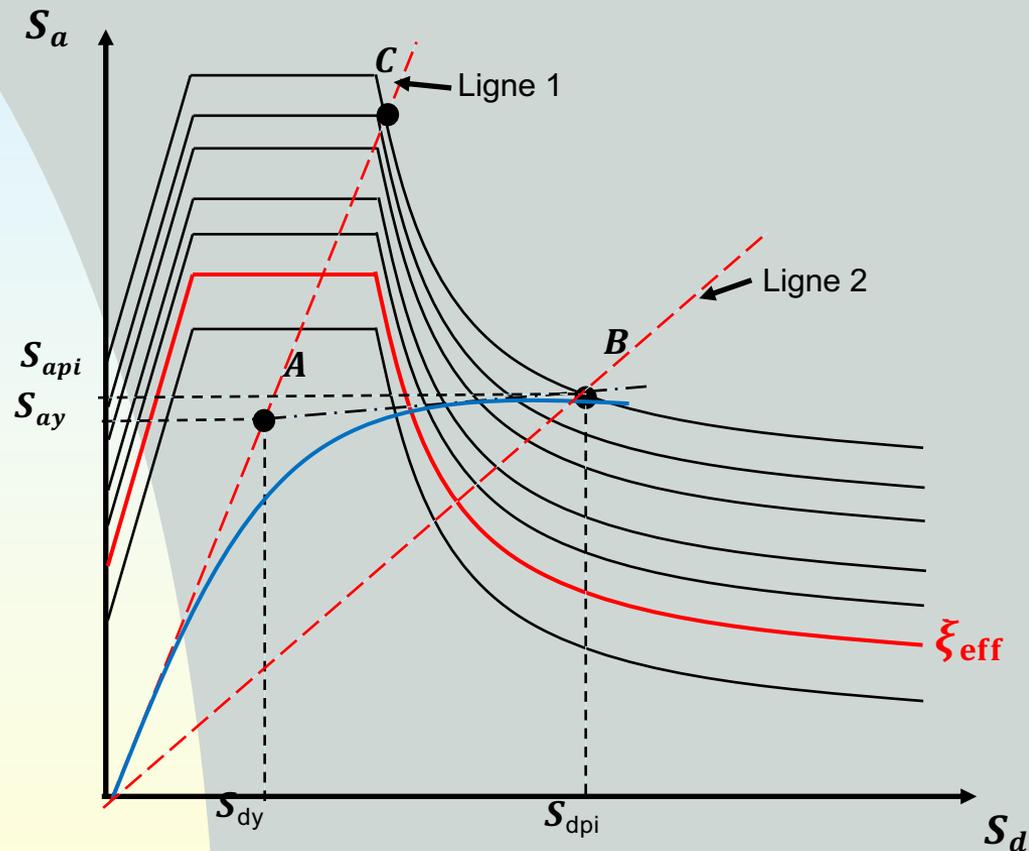
E_D : Énergie dissipée par le système inélastique (bi-linéaire).

E_S : Énergie dissipée par le système élastique équivalent).

S_{ay} : limite élastique en accélération

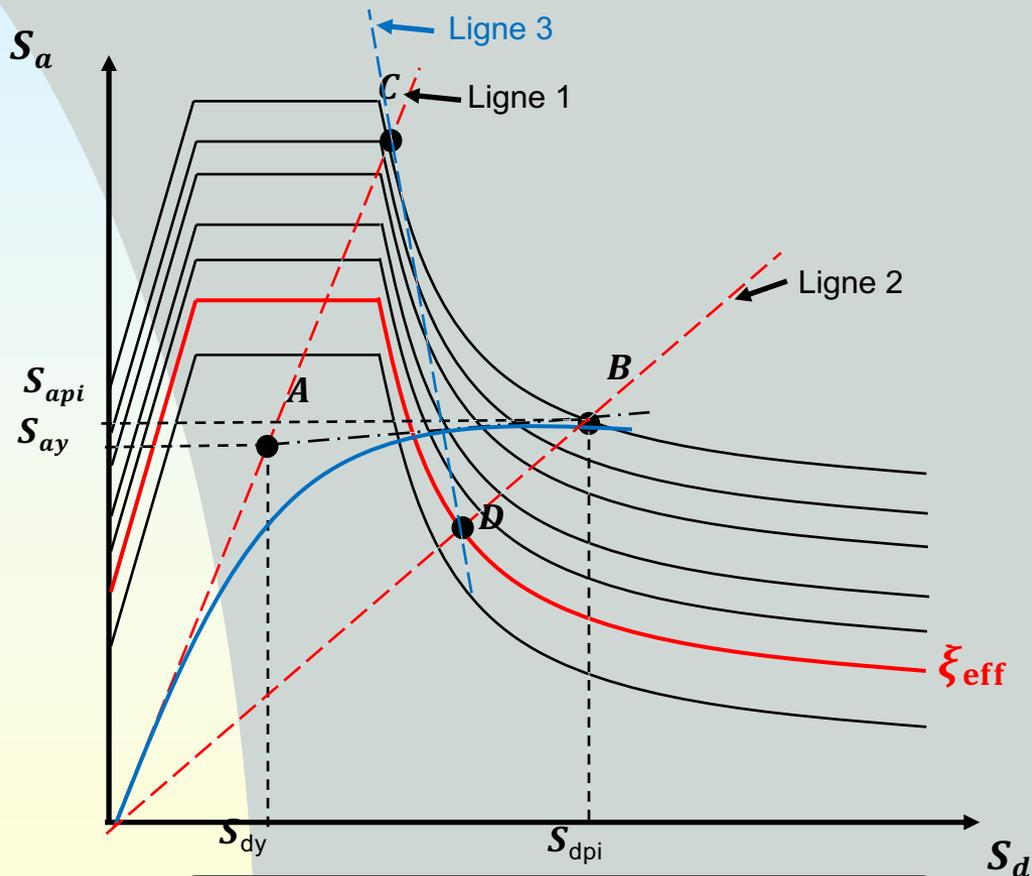
S_{dy} : limite élastique en déplacement

7. Tracer la tangente à l'origine (ligne 1) coupant le spectre à 5% au point C, ensuite tracer la ligne 2 joignant l'origine et le point B



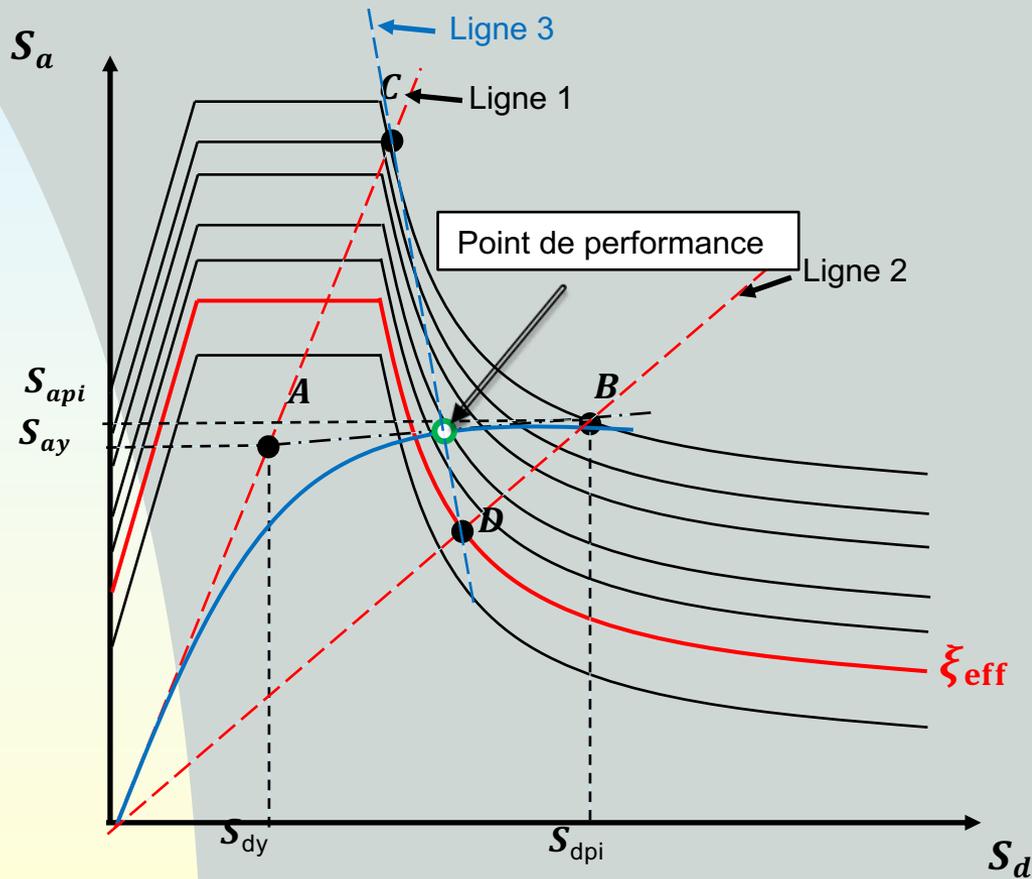
Courbe de capacité après la 7^{ème} étape

8. Tracer la ligne 3 en joignant le point d'intersection de la ligne 2 et le spectre de réponse réduit « ξ_{eff} » avec le point C



Courbe de capacité après la 8^{ème} étape

9. Le point d'intersection entre la courbe de capacité et la ligne 3 représente le point de performance recherché (S_{dp2} , S_{ap2}).



Evaluation du point de performance

10. Vérifier

- ✓ si le déplacement $S_{dp2} < 5\%$ de S_{dp1} , (convergence) alors le point $(S_{dp2}-S_{ap2})$ est le point de **performance de la structure**.
- ✓ Sinon, aller à l'étape 4) et répéter le processus en incrémentant « i » de « 1 ». La 2^{ème} itération, la ligne 2 sera tracée de l'origine pour diriger S_{ap2} , S_{dp2}

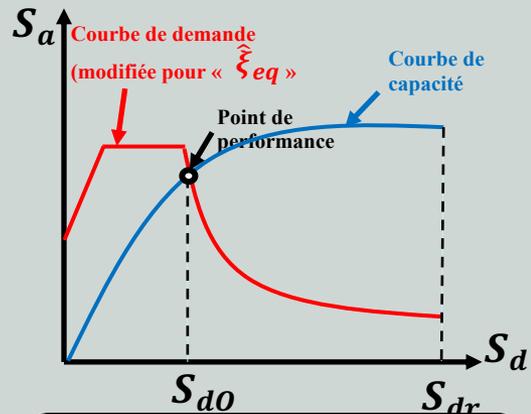
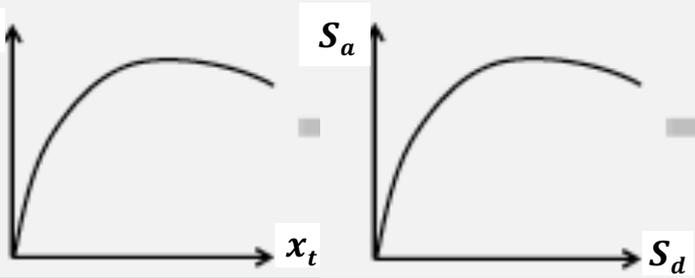
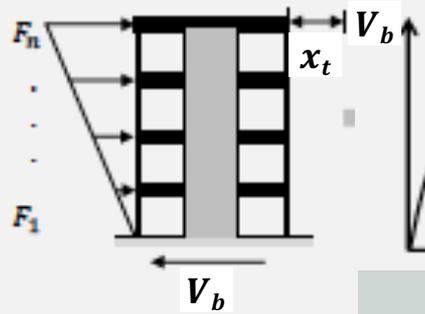
Résumé de la méthode ACT 40

Modèle PDDL 3D

Analyse Push Over monotonique

Conversion de la courbe Push Over en format ADRS (AD response spectrum)

Détermination du point de performance



Déterminer les propriétés modales Γ, ϕ_1, T

Pousser pour obtenir V_b Vs x_t

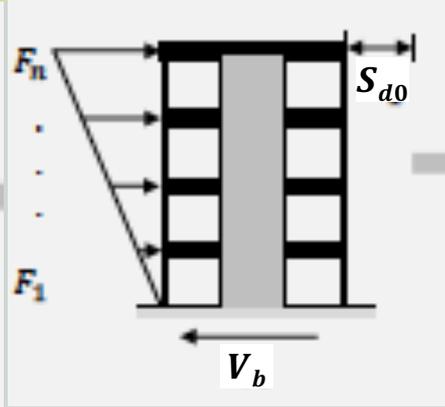
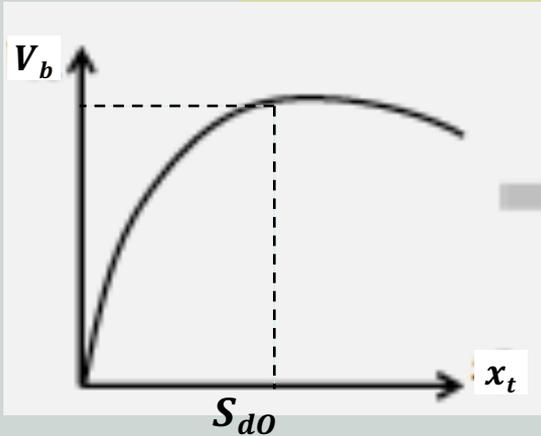
Convertir du format $V_b - x_t$ au format accélération déplacement response spectrum (ADRS)

Le « spectre de demande » est la forme réduite du spectre amorti à « $\xi = 5\%$ »

Détermination des réponses

Spectre de capacité : Une autre forme de la courbe Push Over (format Sa-Sd)

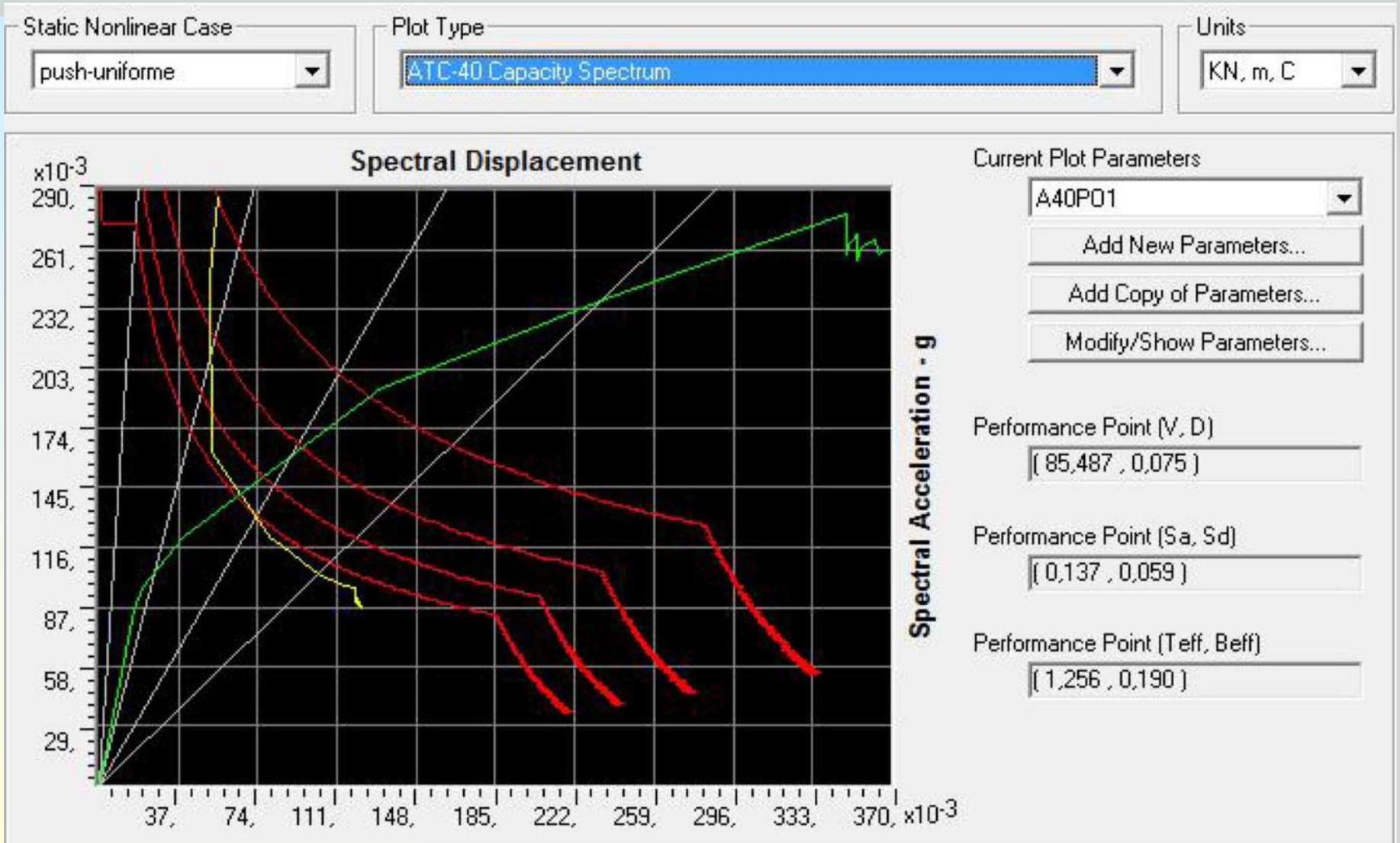
Spectre de demande : Une autre forme du spectre de réponse (format ADRS) réduit à la base d'un amortissement effectif (i.e amortissement inhérent original + amortissement hystérétique additionnel)



Extraire les réponses de la base de données Push over au point « S_{d0} »

ACT 40

SAP 2000



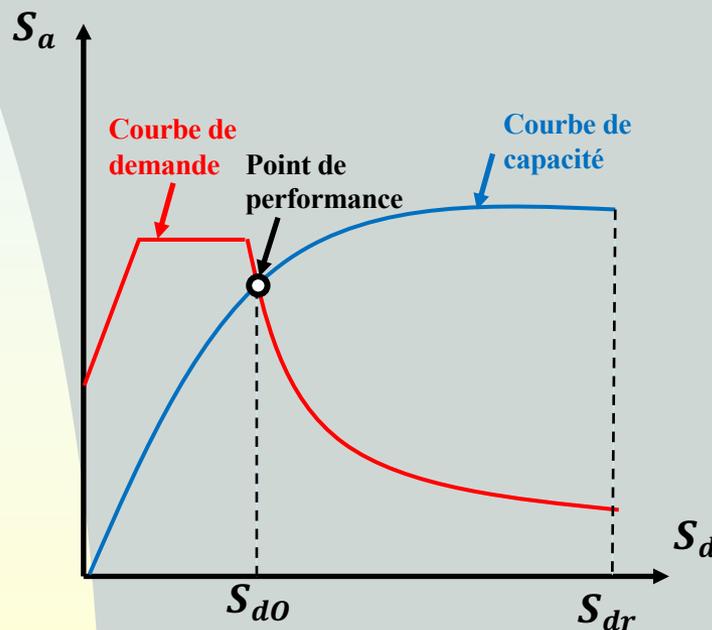
5. Etat de déplacement de la structure

A la fin des procédures, il faut comparer le déplacement maximal supporté par la structure (Capacité) avec le déplacement imposé par les séisme (Demande):

On aura 03 cas possibles

Cas 1 : Demande < Capacité

S_{dr} : déplacement max de la structure
 S_{do} : déplacement max sous le séisme



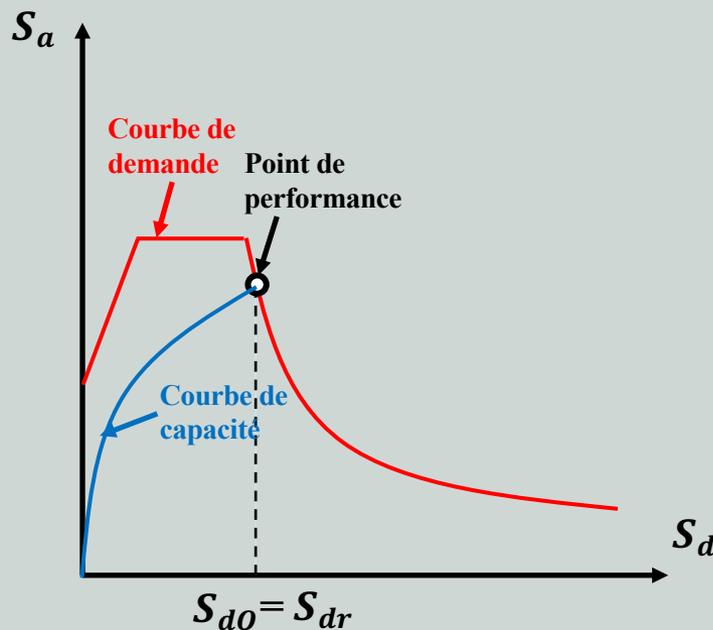
Courbes Demande-Capacité
(Demande < Capacité)

$$S_{dr} > S_{do}$$

Dans ce cas, la structure ne s'effondre pas, mais elle subit des dommages que l'on peut estimer par la position du point de performance sur la courbe de capacité.

Cas 2 : Demande = Capacité

S_{dr} : déplacement max de la structure
 S_{do} : déplacement max sous le séisme

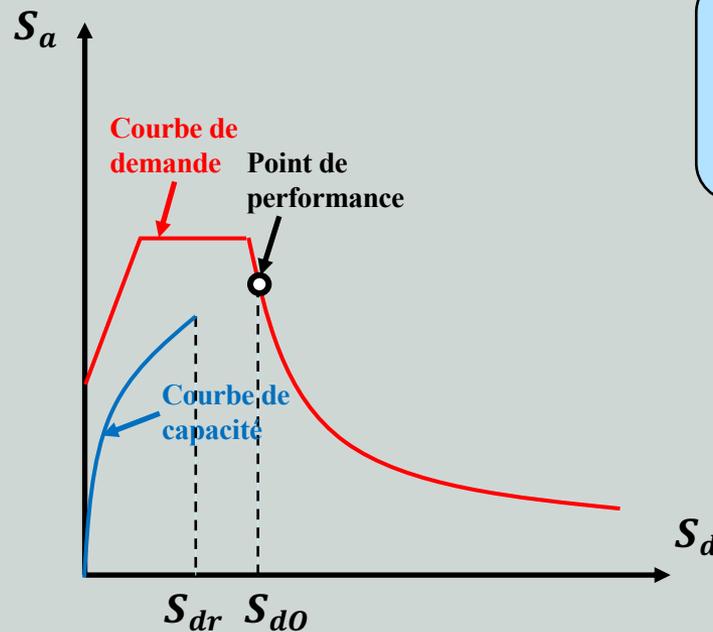


$$S_{dr} = S_{do}$$

Courbes Demande-Capacité
(Demande = Capacité)

Cas 3 : Demande > Capacité

S_{dr} : déplacement max de la structure
 S_{do} : déplacement max sous le séisme



$S_{dr} < S_{do}$
Dans ce cas, on a effondrement total de la structure

Courbes Demande-Capacité
(Demande > Capacité)

Méthodes Statiques non Linéaires équivalentes

Point de performance ou bien déplacement cible sur la courbe Push Over

Approche de linéarisation équivalente

✓ ATC 40 : Méthode du spectre de capacité (aussi FEMA 273 et FEMA 356) (Chapitre 20)

✓ **FEMA 440 Procédure de linéarisation équivalente améliorée (ATC 55) (Chapitre 20)**

Approche de modification du déplacement

✓ FEMA 273 (FEMA 356) : Méthode du coefficient de déplacement (ATC 40) (Chapitre 21)

✓ FEMA 440, ASCE 41-06 et ASCE 41-13: Méthode du coefficient de déplacement améliorée (ATC 55) (Chapitre 21)

Autres

✓ NLRHA du S1DDL équivalent (Chapitre 22)

✓ Méthode N2 (Chapitre 23)

✓ Procédures d'analyse sismique basées sur multi-mode approximation (Chapitre 24, 25, 26 et 27)

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

8. ATC 55 (2005) Amélioration de la méthode spectrale de capacité



Improvement of Nonlinear Static Seismic Analysis Procedures

FEMA 440

June 2005



ATC 55 (aussi FEMA 440) en 2005 améliore les 02 méthodes : méthode spectrale de capacité et méthode des coefficients de déplacements.

1996 : ATC 40. *Seismic evaluation and retrofit of concrete building*. Projet financé par FEMA.

1997: FEMA 273 (préparé par ATC) *guidelines for the seismic rehabilitation of buildings*.

1997: FEMA 274 : *commentaires* de FEMA 273

2000: ASCE prépare FEMA 356 *Prestandard and commentary for the seismic rehabilitation of buildings* (le successeur de FEMA 273/274).

ATC 40 : Méthode du spectre de capacité

Utilise la courbe push over pour représenter le comportement force-déformation inélastique d'un bâtiment.

Différence dans la technique utilisée pour calculer la demande en déplacement inélastique pour une certaine excitation du sol

- ✓ L'idée des améliorations est de justifier les différences dans les résultats obtenus par les différentes procédures.
- ✓ La technique consiste à développer des séries d'oscillateurs non linéaires à 1SDDL avec des périodes, résistance et comportement hystérétique diverses.
- ✓ Ces S1DDL étaient soumis à des mouvements de sol représentant des conditions de site différentes.
- ✓ La base de données de plus de 180 000 prédictions du déplacement maximal a été utilisée comme benchmark pour juger de la précision de la méthode statique non linéaire.
- ✓ Des comparaisons ont été faites (S1DDL) avec la méthode exacte temporelle non linéaire et les différences ont été traitées statistiquement.

Amélioration ?

- Estimation de la période équivalente et de l'amortissement

La période effective « T_{eff} » et l'amortissement effectif « ξ_{eff} » sont déterminés à partir d'une analyse statistique qui minimise, de manière rigoureuse, les occurrences extrêmes des différences (i.e erreurs) entre la réponse maximale du système inélastique actuel et son équivalent linéaire.

Amortissement effectif

Cas 1 :

Pour tous les types de modèle hystérétique (Type A, B ou C) et les valeurs de « α » (pente inélastique)

$$1, 0 < \mu < 4, 0 \quad \xi_{eff} = A(\mu - 1)^2 + B(\mu - 1)^3 + \xi_0$$

$$4, 0 \leq \mu \leq 6, 5 \quad \xi_{eff} = C + D(\mu - 1) + \xi_0$$

$$\mu > 6, 5 \quad \xi_{eff} = E \left[\frac{F(\mu - 1) - 1}{F(\mu - 1)^2} \right] \left(\frac{T_{eff}}{T_0} \right)^2 + \xi_0$$

$\xi_0 = 5\%$ pour BA

Les valeurs des différents coefficients sont données dans le tableau suivant

Table 6-1 Coefficients for use in Equations for Effective Damping

Model	α (%)	A	B	C	D	E	F
Bilinear hysteretic	0	3.2	-0.66	11	0.12	19	0.73
Bilinear hysteretic	2	3.3	-0.64	9.4	1.1	19	0.42
Bilinear hysteretic	5	4.2	-0.83	10	1.6	22	0.40
Bilinear hysteretic	10	5.1	-1.1	12	1.6	24	0.36
Bilinear hysteretic	20	4.6	-0.99	12	1.1	25	0.37
Stiffness degrading	0	5.1	-1.1	12	1.4	20	0.62
Stiffness degrading	2	5.3	-1.2	11	1.6	20	0.51
Stiffness degrading	5	5.6	-1.3	10	1.8	20	0.38
Stiffness degrading	10	5.3	-1.2	9.2	1.9	21	0.37
Stiffness degrading	20	4.6	-1.0	9.6	1.3	23	0.34
Strength degrading	-3 ^a	5.3	-1.2	14	0.69	24	0.90
Strength degrading	-5 ^a	5.6	-1.3	14	0.61	22	0.90

a. Negative values of post-elastic stiffness should be limited to α_y , as discussed in Section 4.3

Attention !!!

Ces coefficients ont été optimisés pour s'adapter aux résultats empiriques pour les oscillateurs idéalisés **ayant un comportement hystérétique bien défini** (Elasto-plastique parfait (EPP), Dégradation de la rigidité (SD) et dégradation de la résistance et de la rigidité (SSD))

Mais !!!

Pour les bâtiments réels, c'est pas évident d'avoir un comportement hystérétique exactement comme celui de l'oscillateur simple.

Dans ce cas, on utilise les équations suivantes, pour n'importe quelle courbe de capacité ou valeur de « α ».

Cas 2 :

Pour n'importe quelle courbe de capacité et valeurs de « α » (pente inélastique)

$$1,0 < \mu < 4,0 \quad \xi_{\text{eff}} = 4,9 (\mu - 1)^2 - 1,1 (\mu - 1)^3 + \xi_0$$

$$4,0 \leq \mu \leq 6,5 \quad \xi_{\text{eff}} = 14,0 + 0,32 (\mu - 1) + \xi_0$$

$$\mu > 6,5 \quad \xi_{\text{eff}} = 19 \left[\frac{0,64 (\mu - 1) - 1}{0,64 (\mu - 1)^2} \right] \left(\frac{T_{\text{eff}}}{T_0} \right)^2 + \xi_0$$

Période effective

Mêmes considérations que l'amortissement effectif

Cas 1 :

Pour tous les types de modèle hystérétique (Type A, B ou C) et les valeurs de « α » (pente inélastique)

$$1,0 < \mu < 4,0$$

$$T_{\text{eff}} = [G(\mu - 1)^2 + H(\mu - 1)^3 + 1] T_0$$

$$4,0 \leq \mu \leq 6,5$$

$$T_{\text{eff}} = [I + J(\mu - 1) + 1] T_0$$

$$\mu > 6,5$$

$$T_{\text{eff}} = \left\{ K \left[\sqrt{\frac{(\mu - 1)}{1 + L(\mu - 2)}} - 1 \right] + 1 \right\} T_0$$

T_0 : Période initiale de vibration du système non linéaire

μ : Ductilité

Les valeurs des différents coefficients sont données dans le tableau suivant

Table 6-2 Coefficients for use in Equations for Effective Period

Model	$\alpha(\%)$	G	H	I	J	K	L
Bilinear hysteretic	0	0.11	-0.017	0.27	0.090	0.57	0.00
Bilinear hysteretic	2	0.10	-0.014	0.17	0.12	0.67	0.02
Bilinear hysteretic	5	0.11	-0.018	0.09	0.14	0.77	0.05
Bilinear hysteretic	10	0.13	-0.022	0.27	0.10	0.87	0.10
Bilinear hysteretic	20	0.10	-0.015	0.17	0.094	0.98	0.20
Stiffness degrading	0	0.17	-0.032	0.10	0.19	0.85	0.00
Stiffness degrading	2	0.18	-0.034	0.22	0.16	0.88	0.02
Stiffness degrading	5	0.18	-0.037	0.15	0.16	0.92	0.05
Stiffness degrading	10	0.17	-0.034	0.26	0.12	0.97	0.10
Stiffness degrading	20	0.13	-0.027	0.11	0.11	1.0	0.20
Strength degrading	-3 ^a	0.18	-0.033	0.17	0.18	0.76	-0.03
Strength degrading	-5 ^a	0.20	-0.038	0.25	0.17	0.71	-0.05

^a Negative values of post-elastic stiffness may be limited to α_p , as discussed in Section 4.3

Attention !!!

Mêmes remarques que l'amortissement effectif

Ces coefficients ont été optimisés pour s'adapter aux résultats empiriques pour les oscillateurs idéalisés **ayant un comportement hystérétique bien défini** (Elasto-plastique parfait (EPP), Dégradation de la rigidité (SD) et dégradation de la résistance et de la rigidité (SSD))

Mais !!!

Pour les bâtiments réels, c'est pas évident d'avoir un comportement hystérétique exactement comme celui de l'oscillateur simple.

Dans ce cas, on utilise les équations suivantes, pour n'importe quelle courbe de capacité ou valeur de « α ».

Cas 2 :

Pour n'importe quelle capacité spectrale et valeurs de « α » (pente inélastique)

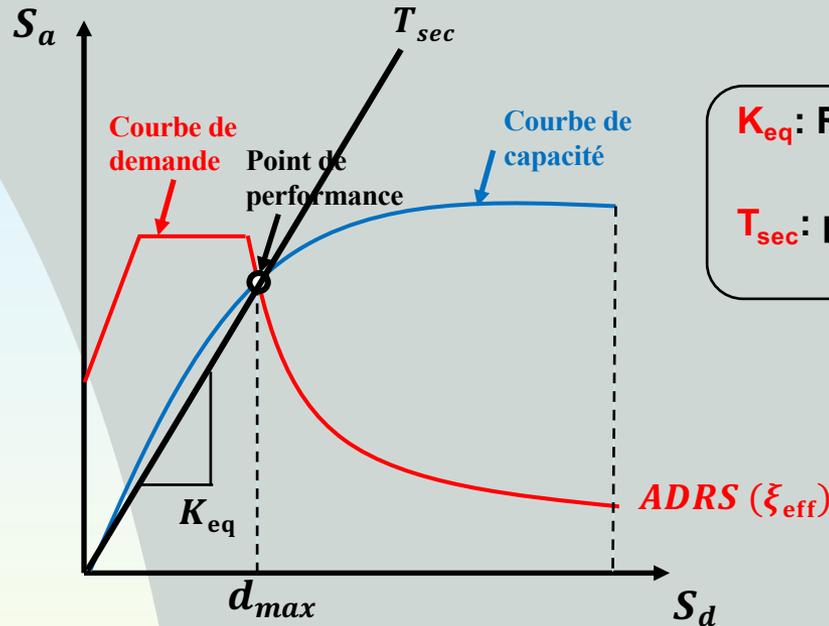
$$1,0 < \mu < 4,0 \quad T_{\text{eff}} = [0,02 (\mu - 1)^2 - 0,038 (\mu - 1)^3 + 1] T_0$$

$$4,0 \leq \mu \leq 6,5 \quad T_{\text{eff}} = [0,28 + 0,13 (\mu - 1) + 1] T_0$$

$$\mu > 6,5 \quad T_{\text{eff}} = \left\{ 0,89 \left[\sqrt{\frac{(\mu - 1)}{1 + 0,05 (\mu - 2)}} - 1 \right] + 1 \right\} T_0$$

Equations valables uniquement pour $T_0 = 0,2$ à $2,0$ s

FEMA 440 propose une nouvelle définition de la période (équivalente vers effective)



K_{eq} : Rigidité du système linéaire équivalent (correspondant à T_{eq})

T_{sec} : période correspondante à (ξ_{eff}) dans l'ancienne ATC 40

Courbes Demande-Capacité
(Demande < Capacité)

FEMA 440. On passe T_{sec} à T_{eff}

Si on veut utiliser la période initiale « T_{sec} », FEMA 440 propose une modification du spectre S_a - S_d (ADRS: Acceleration-displacement response spectrum) en MADRS

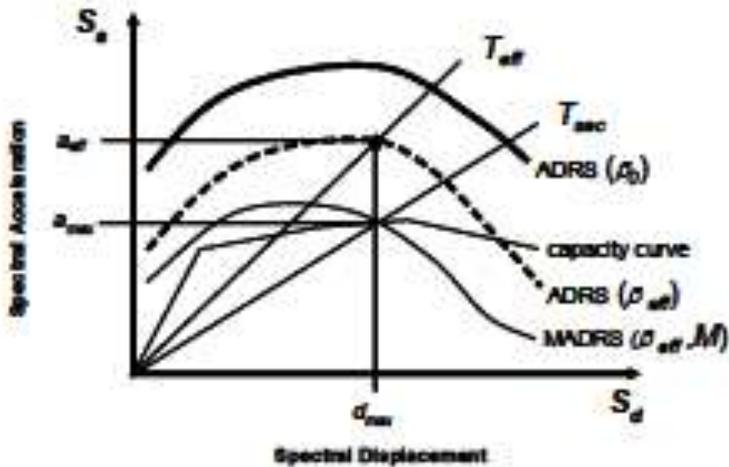


Figure 6-4 Modified acceleration-displacement response spectrum (MADRS) for use with secant period, T_{sec} .

ATC 40 conventionnelle utilise « T_{sec} » comme « T_{eff} » pour déterminer le déplacement maximal (Point de performance). C'est le point d'intersection entre la courbe de capacité et la courbe de demande à « ξ_{eff} » dans le format ADRS. C'est très pratique pour l'ingénieur, par visualisation, une comparaison graphique directe entre la capacité et la demande. Nouvelles stratégies reposent sur la courbe de demande modifiée (MADRS) qui coupe la capacité au déplacement maximal

Pour que l'accélération « a_{max} » correspondante à « d_{max} » coïncide avec la courbe de capacité, il faut traduire les coordonnées du repère ADRS, correspondant à « ξ_{eff} » par le facteur de modification (On aura MADRS):

$$M = \frac{a_{max}}{a_{eff}}$$

$$M = \frac{a_{max}}{a_{eff}}$$

Sachant que les accélérations sont reliées aux périodes correspondantes, on aura:

$$M = \frac{a_{max}}{a_{eff}} = \left(\frac{T_{eff}}{T_{sec}}\right)^2 = \left(\frac{T_{eff}}{T_0}\right)^2 \left(\frac{T_0}{T_{sec}}\right)^2$$

or

$$T_{eq} = T_{sec} = T_0 \sqrt{\frac{\mu}{1 + \alpha(\mu - 1)}}$$

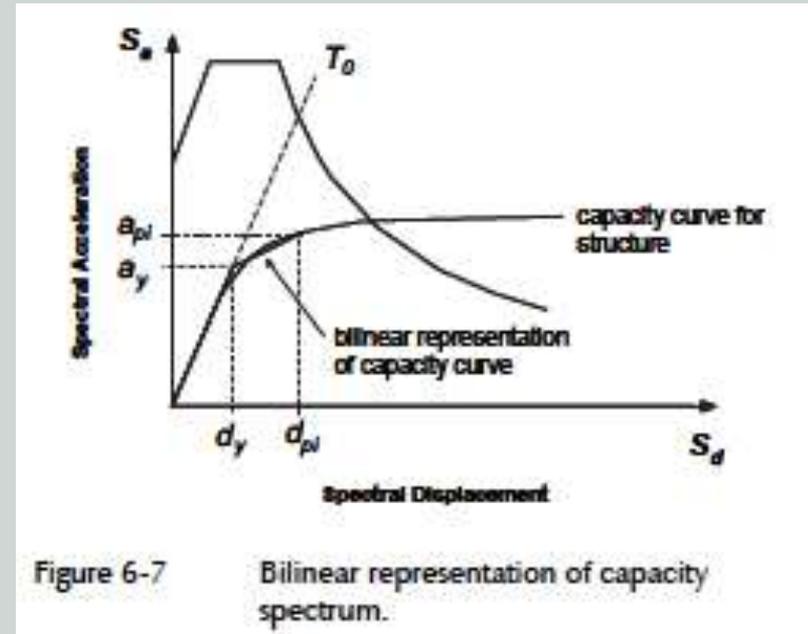
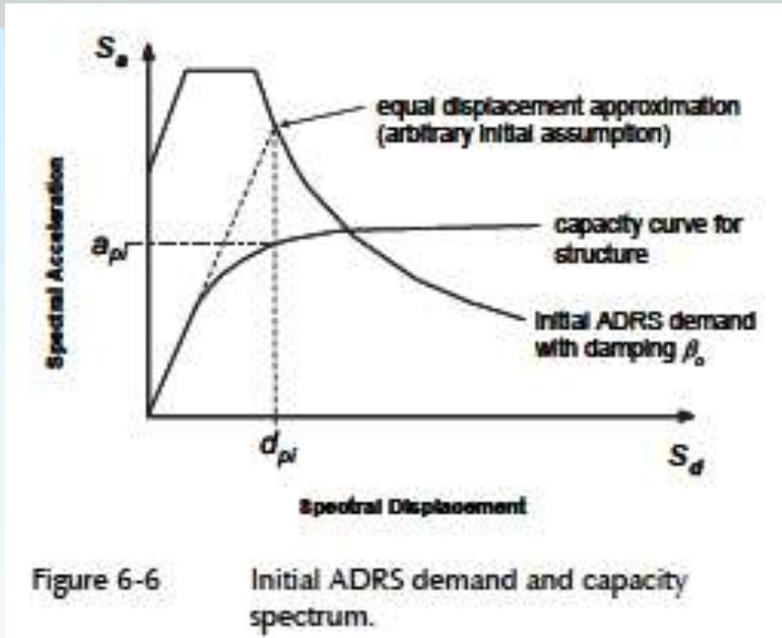
D'où

$$\left(\frac{T_0}{T_{sec}}\right)^2 = \frac{1 + \alpha(\mu - 1)}{\mu}$$

et

$$M = \frac{1 + \alpha(\mu - 1)}{\mu} \left(\frac{T_{eff}}{T_0}\right)^2$$

Avec



$$\alpha = \frac{\left(\frac{a_{pi} - a_y}{d_{pi} - d_y}\right)}{\left(\frac{a_y}{d_y}\right)} \quad \text{et} \quad \mu = \frac{d_{pi}}{d_y}$$

N.B : Procédure complète de la méthode, voir §6.4, PP 6-6 à 6-10 (FEMA 440 : Improvement of nonlinear static seismic analysis procedures)

Merci. Fin du chapitre 20

Dynamique des structures

Abdellatif MEGNOUNIF

Prochain Cours

Chap. 21

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