

Dynamique des structures

NEW !!!

Abdellatif MEGNOUNIF

e-mail: abdellatif_megnounif@yahoo.fr

Chap. 18J

RPA 2024

Introduction au Calcul Capacitaire **Annexe J**

1. Introduction

2003, 2024

Idem

i. Choix de la méthode

03 méthodes

MSE



Méthodes dynamiques



Méthode d'analyse dynamique par accélérogrammes : Détaillée (Chap 3.3.4)

- ✓ Méthode statique équivalente
- ✓ Méthode d'analyse modale spectrale
- ✓ Méthode d'analyse dynamique par accélérogrammes

- ❖ Bâtiments réguliers en plan et en élévation avec une hauteur max de 65 m en zones I, II et III et 32 m en zone IV, V et VI
- ❖ Bâtiments irréguliers de hauteur max de 65 m en zones I, II et III et 32 m en zone IV, V et VI avec, en plus :
 - ✓ Zone I et II : tous groupes. Pas de limite de niv ou hauteur
 - ✓ Zone III et IV : Gr 3; Gr 2 si $h \leq 7$ niv et ≤ 23 m ; Gr 1B si $h \leq 5$ niv et ≤ 17 m ; Gr 1A si $h \leq 3$ niv et ≤ 11 m
 - ✓ Zones V et VI : Gr 3 et 2 si $h \leq 5$ niv et ≤ 17 m ; Gr 1B si $h \leq 3$ niv et ≤ 11 m ; Gr 1A si $h \leq 2$ niv et ≤ 8 m.

- ❖ Méthode d'analyse modale spectrale dans tous les cas, et en particulier dans le cas où la MSE n'est pas permise.
- ❖ Méthode d'analyse dynamique par accélérogrammes au cas par cas par un personnel qualifié, ayant justifié les choix des séismes de calcul et des lois de comportement utilisées ainsi que la méthode d'interprétation des résultats et les critères de sécurité à satisfaire.

Push Over ?

ii. Méthode Push-Over

PO

§ 2.6 Modélisation et méthodes de calcul

Commentaire : L'analyse statique non linéaire (Analyse en poussée progressive « Push-over ») peut également être utilisée (cf. Annexe J)

✓ Annexe J

Introduction au calcul capacitaire

Annexe, informative, qui expose les principes de la méthode dite « Push-over » (Poussée progressive) qui est une procédure statique non linéaire

2. Principes et exigences de la méthode

- Justifier convenablement les analyses non linéaires (solicitation sismique, modèle choisi, interprétation des résultats et prescriptions à respecter).
- Bien choisir le modèle mathématique en analyse élastique (tient compte de la résistance des éléments structuraux et de leur comportement post-élastique).
- Structure soumise à des charges gravitaires et des forces horizontales progressivement croissantes, avec une distribution invariable sur toute la hauteur., jusqu'à atteindre une valeur cible du déplacement.
- L'hypothèse de base est que le 1^{er} mode est dominant et l'on considère que les déplacements de translation (Planchers rigides, pas de rotations). La forme modale (pour ce mode fondamental) reste invariable dans le domaine inélastique.
- La MPO peut être appliquée pour vérifier ou évaluer la performance des structures
- Analyse effectuée dans les 02 directions horizontales avec des modèles plans choisis suite à la vérification des critères de régularité.
- Pour les structures irrégulières, elles doivent être analysées en 3D.
- Le mécanisme plastique à déterminer pour les 02 cas de chargement latérale choisi et doit être conforme aux mécanismes sur lesquels se fonde le coefficient « R » de calcul.
- Les déplacements obtenus en MPO, sont directement utilisés sans modification.

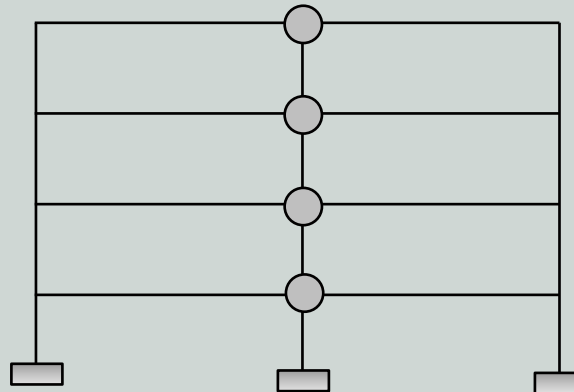


3. Procédure Statique non Linéaire

Etape 1

Données de la méthode ?

- Une structure SPDDL en modèle plan est considérée.
- La relation non linéaire force-déplacement pour les éléments structuraux sous chargement monotonique est exigée.
- Un spectre élastique de pseudo-accélération « S_{ae} » dans lequel $S_{ae} = S a_e (T, \xi \%)$



Système plan à plusieurs DDL

Etape 2

Application de l'analyse PushOver?

- Analyse statique SPDDL soumis à des charges latérales incrémentées jusqu'à ce que le déplacement de la structure atteigne son maximum.
- Le choix d'une distribution appropriée des forces latérales est très important dans le pushover.
- RPA2024 utilise, comme charges latérales :

Pour le « i^{ème} niveau », on aura

$$\overline{F}_i = m_i \phi_i \quad (18J.1)$$

$\overline{F}_i$: Force latérale normalisée dans la direction considérée appliquée au plancher « i » (ou nœud « i »).

m_i : Masse du nœud « i ».

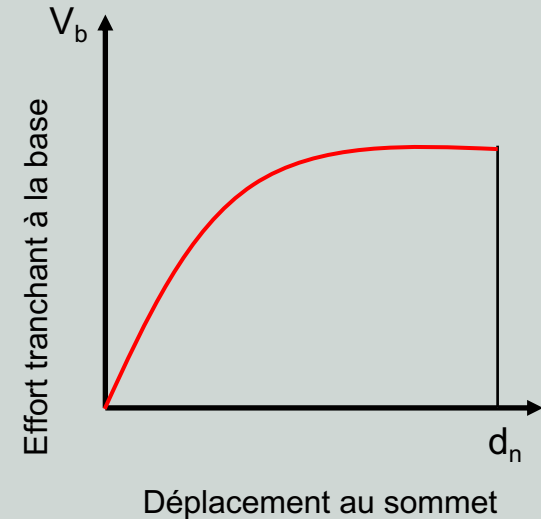
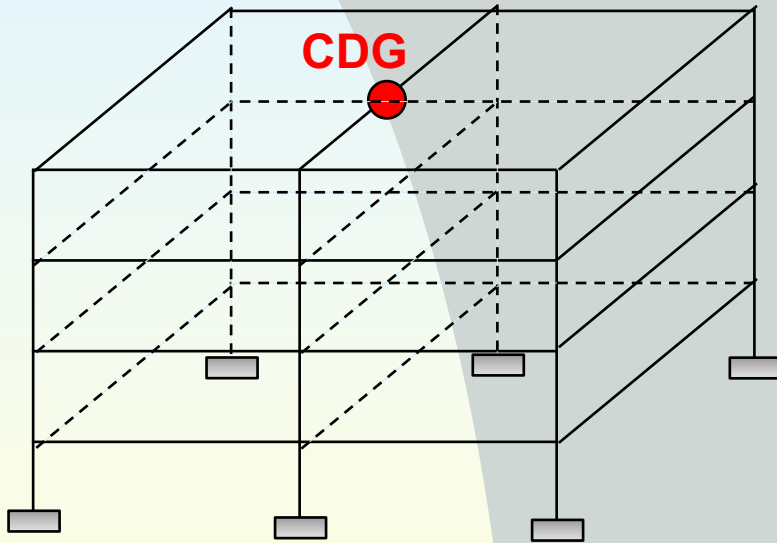
ϕ : Mode de vibration qui correspond à la plus grande valeur de la masse modale effective pour la direction d'action considérée.

ϕ_i : Valeur du déplacement du mode ϕ au nœud « i » dans la direction considérée de l'action sismique.

Etape 3

Courbe de capacité

- ✓ La courbe pushover (SPDDL) non-linéaire doit être déterminée reliant l'effort tranchant à la base au déplacement de contrôle (**Courbe de capacité**) (V_b-d_n)



- **Point cible ou déplacement de contrôle = CDG de la terrasse du bâtiment.**

Eviter le sommet d'un appentis en terrasse comme point de contrôle

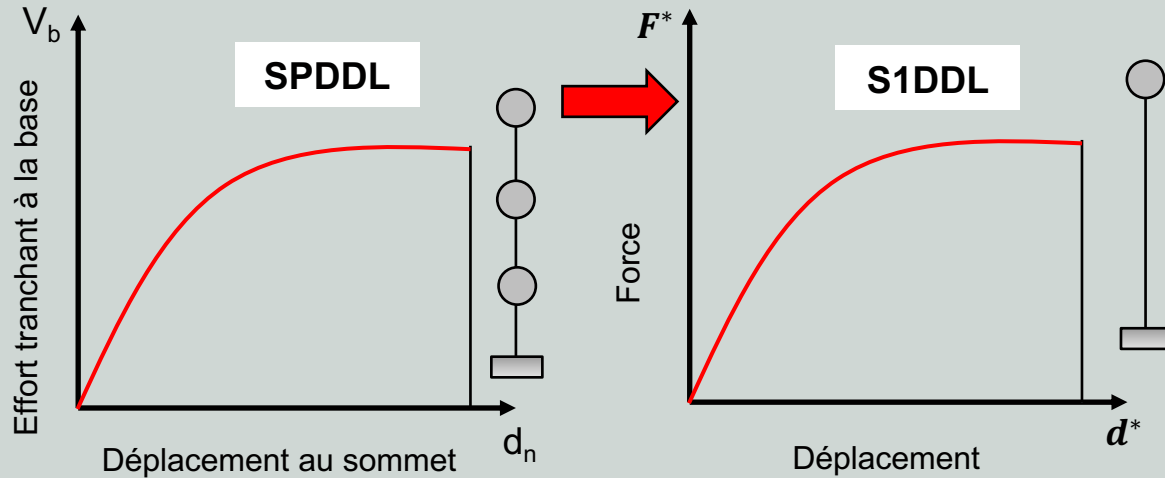
Etape 4

Modèle à S1DDL équivalent ?

- Pour utiliser le spectre de réponse, il faut passer au S1DDL équivalent
- La transformation du SPDDL à un S1DDL équivalent se fera comme suit :

$$F^* = \frac{V_b}{\Gamma} \quad (18J.2)$$

$$d^* = \frac{d_n}{\Gamma} \quad (18J.3)$$



Avec

$$m^* = \sum_{i=1}^n m_i \phi_i = \sum_{i=1}^n \bar{F}_i \quad (18J.4)$$

$$\Gamma = \frac{\sum_{i=1}^n m_i \phi_i}{\sum_{i=1}^n m_i \phi_i^2} = \frac{m^*}{\sum_{i=1}^n m_i \phi_i^2} = \frac{\sum_{i=1}^n \bar{F}_i}{\sum_{i=1}^n \frac{\bar{F}_i^2}{m_i}} \quad (18J.5)$$

m^* : Masse équivalente d'un S1DDL
 d^* : Déplacement du S1DDL équivalent
 F^* : Force équivalente du S1DDL
 Γ : Constante pour contrôler la transformation du SPDDL au S1DDL
 V_b : Effort tranchant à la base SPDDL
 d_n : Déplacement du nœud de contrôle SPDDL

$$d^* = \frac{d_n}{\Gamma} \quad F^* = \frac{V_b}{\Gamma} \quad \Gamma = \frac{\sum_{i=1}^n m_i \phi_i}{\sum_{i=1}^n m_i \phi_i^2}$$

Etape 4

Modèle à S1DDL équivalent ?

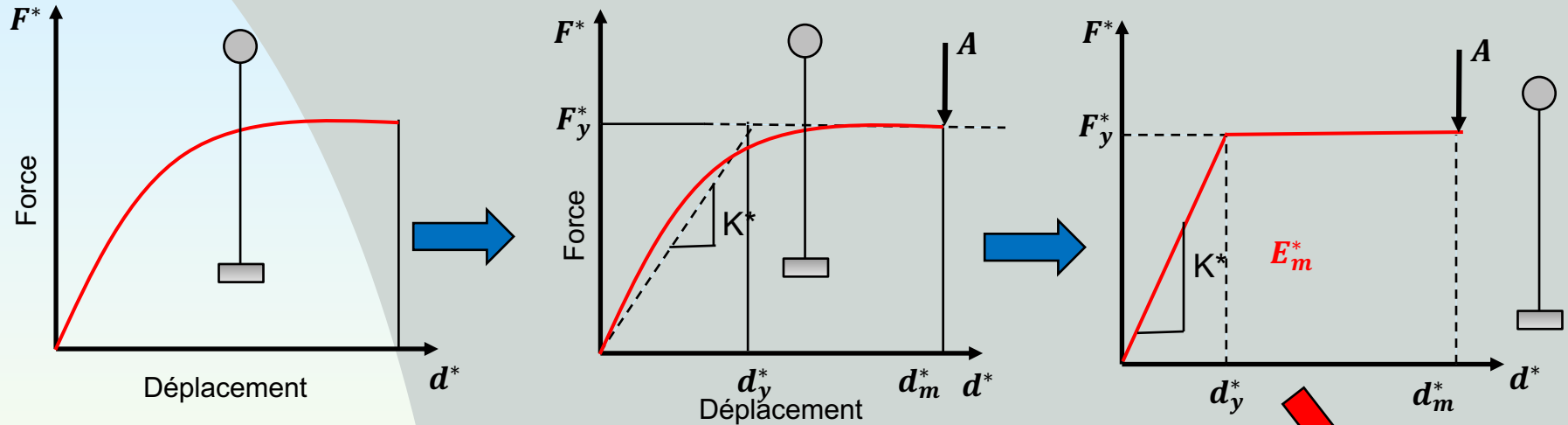
$$m^* \ddot{x}^* + F^* = -m^* \ddot{x}_g \quad (18J.6)$$

La même constante « Γ » est appliquée au déplacement et à la force. Par conséquent la relation force-déplacement SPDDL (V_b - d_n) est aussi appliquée au S1DDL (F^* , d^*) (sauf à diviser par « Γ »).

La méthode RPA2024 exige que la rigidité de post plastification d'un S1DDL équivalent soit égale à zéro, puisque le facteur de réduction « R_μ » est défini comme le rapport entre la résistance élastique et la résistance plastique

Etape 5 ?

✓ La courbe pushover (S1DDL) non-linéaire doit être idéalisée en 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



✓ « F_y^* » La résistance ultime du système idéalisé égale à l'effort tranchant à la base à la formation du mécanisme plastique.

✓ Représente aussi Force à la limite élastique du S1DDL

✓ De cette courbe, on tire F_y^* et d_y^* pour calculer la rigidité élastique et la période élastique du S1DDL

E_m^* : Énergie de déformation réelle jusqu'à la formation du mécanisme plastique

F_y^* : Force à la limite élastique du S1DDL. Représente aussi la résistance ultime du système idéalisé.

d_m^* : Déplacement ultime du S1DDL

$$d_y^* = 2 \left(d_m^* - \frac{E_m^*}{F_y^*} \right) \quad (18J.9)$$

$$k^* = \frac{F_y^*}{d_y^*} \quad (18J.7)$$

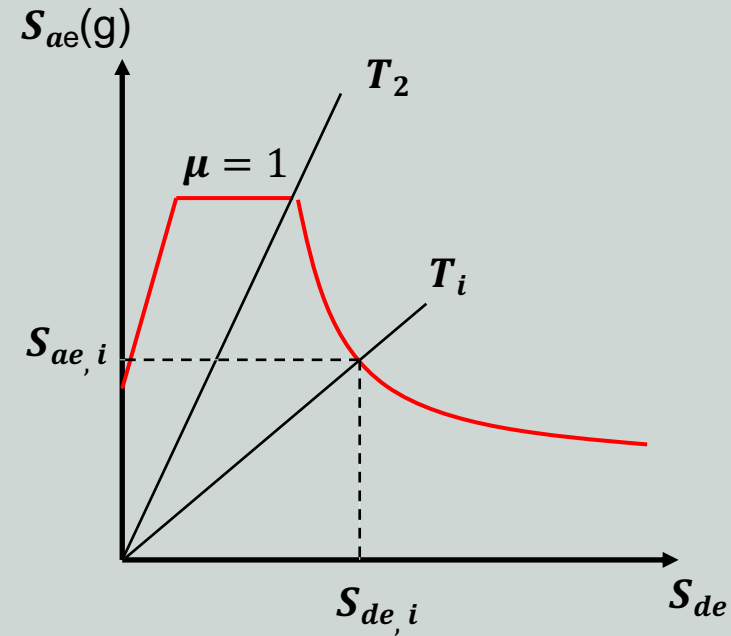
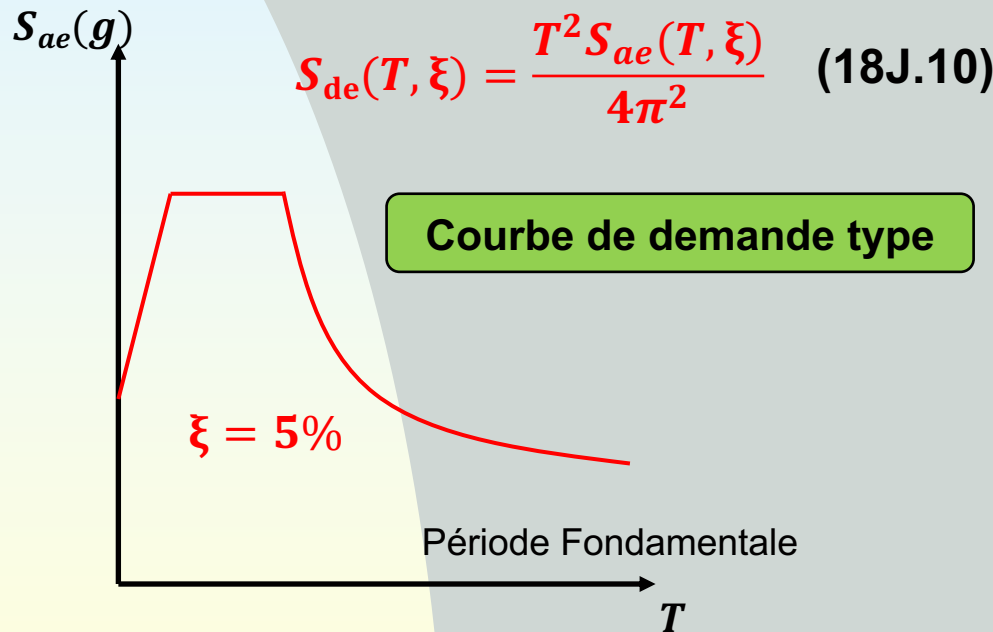
$$T^* = 2\pi \sqrt{\frac{m^*}{k^*}} \quad (18J.8)$$

Etape 6

Courbe de demande en format Accélération-déplacement ?

(Spectre de réponse inélastique de constante de ductilité)

- On détermine un spectre inélastique à partir du spectre élastique.
- Pour un système S1DDL élastique, on le transforme du repère traditionnel (S_{ae}, T) au format (S_{ae}, S_{de}) par la relation :



T_2 : Période caractéristique du spectre de réponse, définie comme étant la période de transition entre le segment des accélérations constantes (gamme des courtes périodes) et le segment des vitesses constantes (gamme des moyennes périodes).

(S_{ae}) et (S_{de}) accélération et déplacement dans le spectre élastique correspondant aux périodes « T » et « $\xi = 5\%$ »

Etape 6

Courbe de demande en format Accélération-déplacement ?

(Spectre de réponse inélastique de constante de ductilité)

- Pour un spectre inélastique (S1DDL) avec une relation bi-linéaire, S_a et S_d peuvent être déterminés par :

$$S_a(T, \xi) = \frac{S_{ae}(T, \xi)}{R_\mu} \quad (18J.11)$$

$$S_d(T, \xi) = \frac{\mu}{R_\mu} S_{de}(T, \xi) = \frac{\mu}{R_\mu} \frac{T^2 S_{ae}(T, \xi)}{4\pi^2} = \mu \frac{T^2}{4\pi^2} S_a(T, \xi) \quad (18J.12)$$

$S_a(T, \xi)$: Accélération inélastique.
 $S_d(T, \xi)$: Déplacement inélastique
 μ : Facteur de ductilité
 R_μ : facteur de réduction

- Parmi plusieurs propositions pour « R_μ » on retient celles du RPA2024

$$\begin{aligned} R_\mu &= (\mu - 1) \frac{T}{T_2} + 1 & T < T_2 \\ R_\mu &= \mu & T > T_2 \end{aligned} \quad (18J.13)$$

T : Période de vibration S1DDL linéaire.
 T_2 : Limite supérieure des périodes correspondant au palier d'accélération spectrale constante

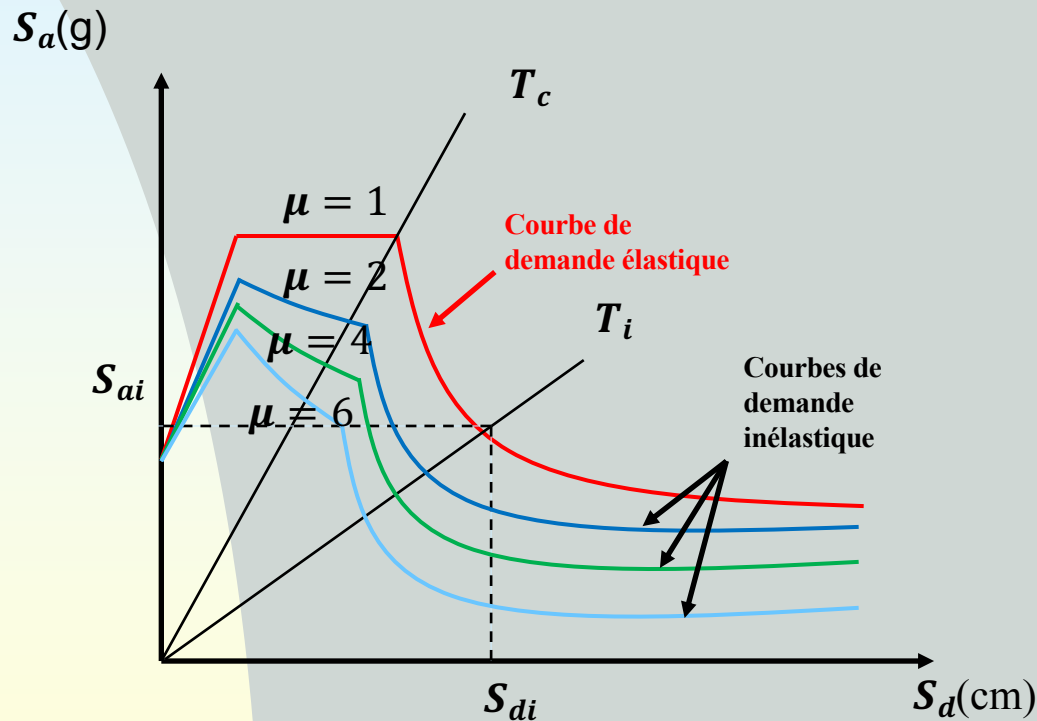
- En remplaçant (18J.12) dans (18J.12) on déduit que dans la gamme des moyennes et longues périodes, $S_d = S_{de}$, avec la même période

Etape 6

Courbe de demande en format Accélération-déplacement ?

(Spectre de réponse inélastique de constante de ductilité)

- A partir du spectre élastique (figure) et en utilisant (18J.11) à (18J.13), on peut construire les spectres inélastiques pour des valeurs de « μ constantes »



**Spectres de demande pour « μ constantes »
dans le format (S_a , S_d)**

Etape 7

Déplacement cible pour le S1DDL équivalent ?

Déplacement cible à comportement élastique illimité

$$d_{et}^* = S_e(T^*) \left[\frac{T^*}{2 \cdot \pi} \right]^2 \quad (18J.14)$$

d_{et}^* : déplacement cible de la structure avec une période « T^* » et un comportement élastique illimité.

$S_e(T^*)$: Spectre de réponse en accélération à la période « T^* »

d_t^* ?

Le calcul du déplacement cible « d_t^* » dans le domaine des périodes courtes et moyennes et longues dépend de la période du S1DDL équivalent « T^* » et de la position de cette période par rapport à la période caractéristique « T_2 ».

On aura

Etape 7

Déplacement cible pour le S1DDL équivalent ?

1^{er} cas : $T^* < T_2$

Domaine des périodes courtes

02 sous cas :

$$\frac{F_y^*}{m^*} \geq S_e(T^*)$$

Réponse élastique

$$\frac{F_y^*}{m^*} < S_e(T^*)$$

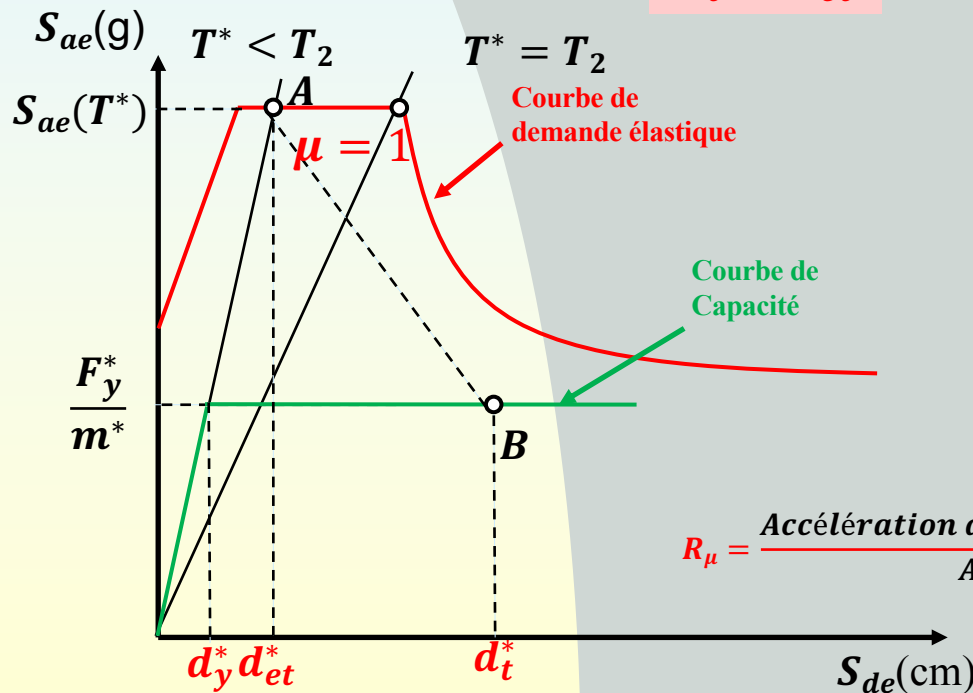
Réponse non linéaire

$$d_t^* = d_{et}^*$$

$$d_t^* = \frac{d_{et}^*}{R_\mu} \left(1 + (R_\mu - 1) \frac{T_2}{T^*} \right) \geq d_{et}^*$$

$$R_\mu = \frac{S_e(T^*) \cdot m^*}{F_y^*} \quad (18J.15)$$

$$d_t^* \leq 3 d_{et}^*$$



$$R_\mu = \frac{\text{Accélération dans la structure à comportement élastique illimité } S_e(T^*)}{\text{Accélération avec une résistance limitée } F_y^*/m^*}$$

Etape 7

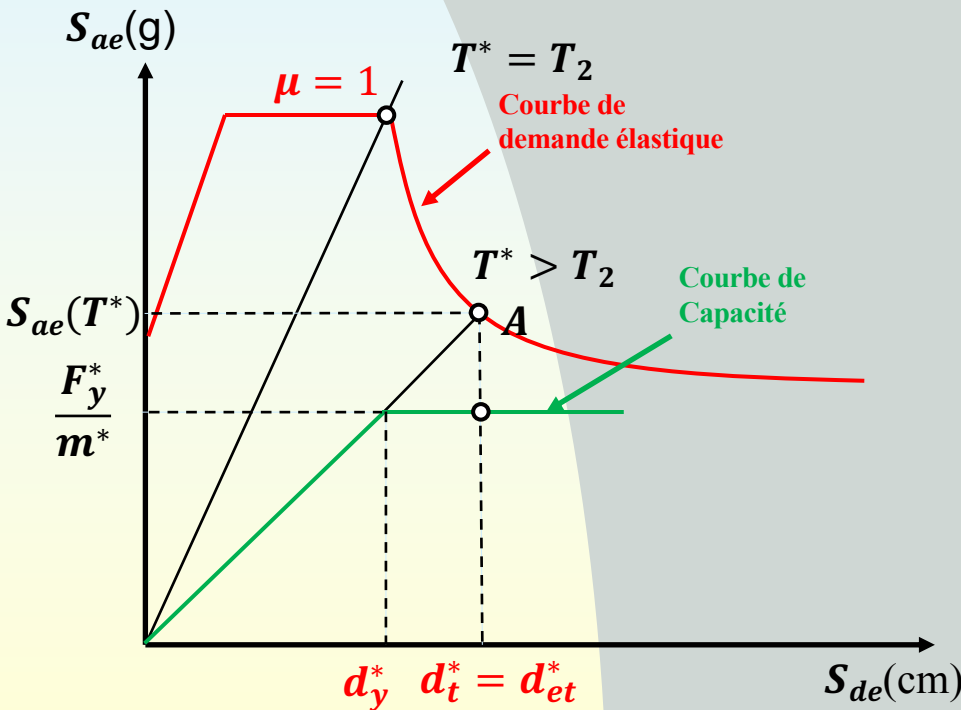
2^{ème} cas : $T^* \geq T_2$

Domaine des périodes moyennes et longues

$$d_t^* = d_{et}^*$$

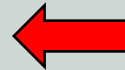
(18J.16)

Dans ce cas, le déplacement élastique « $d_{et}^* = d_t^*$ » au déplacement inélastique (critère d'égalité des déplacements dans la gamme des moyennes et longues périodes) et la ductilité « $\mu = R_\mu$ ».



1. L'intersection de la ligne radiale correspondant à la période du système (T^*) avec le spectre de demande élastique donne le point A($d_t^* = d_{et}^*$, $S_{ae}(T^*)$)

Spectres élastique et courbe de capacité pour « μ constante » dans le format (S_{ae} , S_{de})



Etape 8

Demande sismique globale (déplacement globale) du SPDDL ?

Une fois le déplacement du système S1DDL équivalent est déterminé, on peut calculer le déplacement maximal au sommet du SPDDL (appelé déplacement cible du SPDDL).

Soit

$$d_{t \text{ in}} = \Gamma \cdot d_t^*$$

(18J.17)

Avec

$$\Gamma = \frac{\sum_{i=1}^n m_i \phi_i}{\sum_{i=1}^n m_i \phi_i^2}$$

Coefficient de participation

Etape 8

Demande sismique globale (déplacement globale) du SPDDL ?

$$d_{t, \text{in}} = \Gamma \cdot d_t^*$$

Une fois le déplacement maximal au sommet « $d_{t, \text{in}}$ » est calculé, il faut calculer toutes les demandes sismiques locales (déplacement par niveau, rotules plastiques,...).

Après
 $d_{t, \text{in}}$?



Ce n'est pas
encore
précisée dans
les RPA2024

02 possibilités ?

Philosophie « N2 »
(la plus appropriée)

Philosophie « ATC40 »

N2 ?

On calcule l'effort tranchant à la base et on le distribue suivant la hauteur

Puisque

$$F^* = \frac{V_b}{\Gamma_1}$$



$$V_b = F_y^* * \Gamma_1 \quad (18J.18)$$

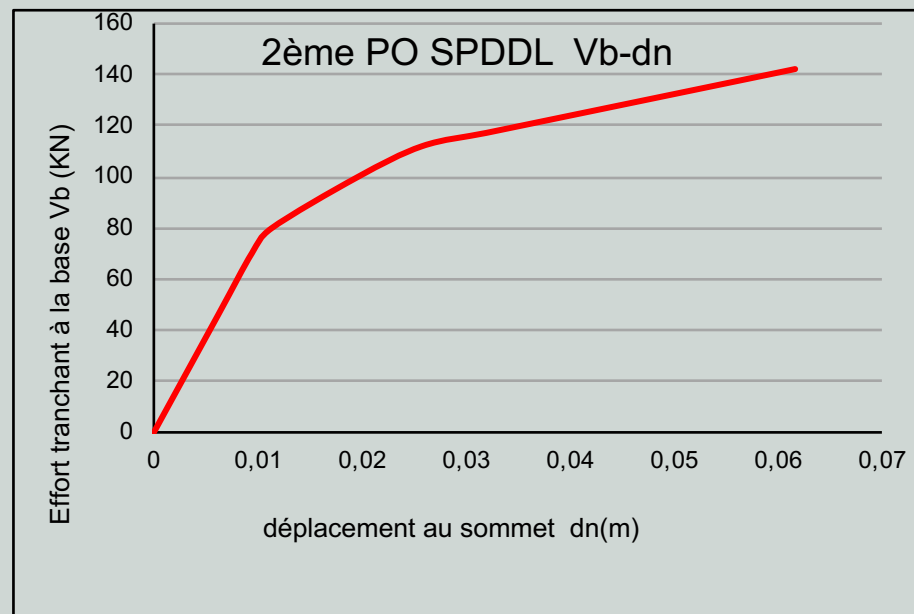
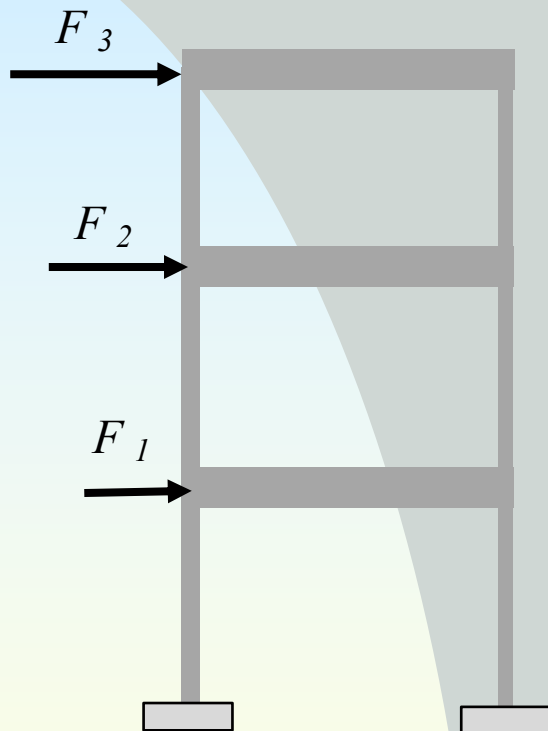
Distribution suivant la hauteur

$$F_i = \frac{m_i \phi_i}{\sum_{j=1}^n m_j \phi_j} V_b \quad (18J.19)$$

N2 ?

Appliquer une 2^{ème} « Push over » au modèle avec SPDDL soumis aux forces « F_i » jusqu'à atteindre le déplacement « $d_{t,in}$ »

$$F_i = \frac{m_i \phi_i}{\sum_{j=1}^n m_j \phi_j} V_b$$



Déterminer les quantités locales (effort tranchant à la base, déplacement relatifs des étages, rotation des joints etc...) correspondant à « $d_{t,in}$ »

Etape suivante

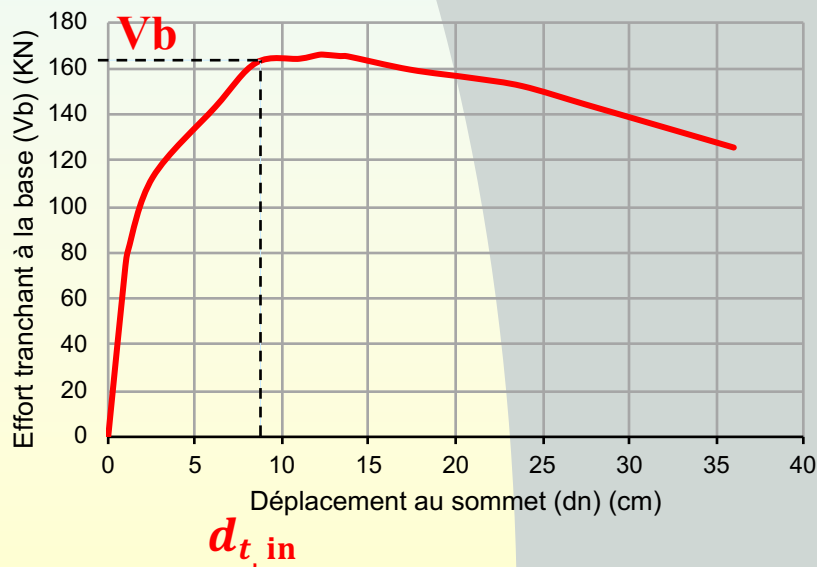
Calcul du déplacement et de l'effort tranchant à la base du SPDDL

Avec

$$d_{t, in} = \Gamma \cdot d_t^*$$

A partir de cette valeur de « $d_{t, in}$ » on va vers la table des valeurs du push over initiale et on tire la valeur de « V_b » correspondante

Courbe Push Over (V_b , d_n)



LoadCase	Step	Displacement	BaseForce	AtoB
Text	Unitless	m	KN	Unitless
Push	3	0,025646	112,805	12
Push	4	0,061646	143,345	12
Push	5	0,085305	162,623	10
Push	6	0,110116	164,298	10
Push	7	0,120578	165,907	10

On tire la valeur exacte de « V » par interpolation

Avec, ces 02 valeurs, au sommet du bâtiment « $d_{t, in}$ » et « V_b » on va les distribuer sur les hauteurs

Les déplacements par étage, seront :

$$x_i = \phi_1 d_{t, in} \quad (18J.20) \quad \text{Avec} \quad \{\phi_1\} = \begin{Bmatrix} \phi_{11} \\ \phi_{12} \\ \phi_{13} = 1, 0 \end{Bmatrix}$$

Et l'effort tranchant à la base sera répartie suivant la hauteur par

$$F_i = \frac{W_i h_i}{\sum_{j=1}^n W_j h_j} V_b \quad (18J.21)$$

Merci. Fin du chapitre 18J

