



J. INTRODUCTION AU CALCUL CAPACITAIRE

Cette annexe, **informative**, expose les principes de la méthode dite "Pushover" (Poussée Progressive) qui est une procédure statique non linéaire .

J.1 Principes et exigences de la méthode

Les principes de base et les exigences de la méthode "Pushover" sont multiples, i.e. :

- Il convient de justifier, convenablement, les analyses non linéaires en ce qui concerne la sollicitation sismique d'entrée, le modèle constitutif utilisé, la méthode d'interprétation des résultats de l'analyse et les prescriptions à respecter.
- Le modèle mathématique de la structure, utilisé pour l'analyse élastique, doit tenir compte de la résistance des éléments structuraux et de leur comportement post-élastique.
- Dans une analyse statique non linéaire, la structure est 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 prédéterminé du déplacement.
- La distribution des forces et le déplacement cible sont fondés sur l'hypothèse de la réponse contrôlée par le mode fondamental, tandis que la forme modale (pour ce mode fondamental) reste invariable dans le domaine inélastique. Il existe des méthodes multimodes, dans lesquelles plusieurs analyses "Pushover" sont effectuées avec différentes distributions de force et plusieurs modèles équivalent à 1DDL sont établis.
- L'analyse statique non linéaire « Pushover » peut être appliquée pour vérifier ou évaluer la performance des structures.
- L'analyse peut être effectuée à l'aide de deux modèles plans, un pour chacune des deux direction horizontale. La précision du modèle est tributaire des critères de régularité (§3.7.1). Les bâtiments qui ne respectent pas ces critères doivent alors être analysés à l'aide d'un modèle spatial. Le mécanisme plastique doit être déterminé pour les deux distributions de charges latérales appliquées. Les mécanismes plastiques doivent être conformes aux mécanismes sur lesquels se fonde le coefficient de comportement R dans le calcul.
- Dans l'analyse statique non linéaire, les déplacements sont ceux obtenus directement par l'analyse, sans modification.

J.2 Procédure statique non linéaire (Pushover)

J.2.1 Charge latérale et courbe de capacité

La force latérale, normalisée dans la direction considérée appliquée au plancher " i " (ou noeud " i " dans la représentation en modèle "brochette"), de ce modèle de charge est définie par Eqn. (J.1):

$$\bar{F}_i = m_i \cdot \phi_i \quad (\text{J.1})$$

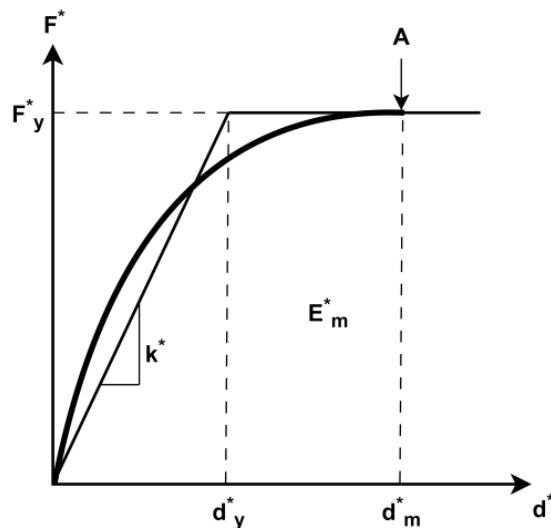
avec:

- m_i : masse du noeud " 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 noeud " i " dans la direction considérée de l'action sismique.

Il convient, en outre, de déterminer la relation entre l'effort tranchant à la base et le déplacement de contrôle (la courbe de capacité) par l'analyse en poussée progressive (cf. J.1).

Le déplacement de contrôle peut être pris au centre de gravité de la terrasse du bâtiment. Il convient de ne pas considérer le sommet d'un appentis en terrasse comme point de contrôle.

Figure J.1: Idéalisation de la courbe de capacité



J.2.2 Système équivalent à un seul degré de liberté (1 DDL)

La masse d'un système équivalent à un seul degré de liberté, m^* , est déterminée comme suit :

$$m^* = \sum m_i \cdot \phi_i = \sum \bar{F}_i \quad (\text{J.2})$$

et le coefficient de transformation entre un système à N DDL et le système équivalent à 1 DDL est donné par :

$$\Gamma = \frac{m^*}{\sum m_i \cdot \phi_i^2} = \frac{\sum \bar{F}_i}{\sum \left(\frac{\bar{F}_i^2}{m_i} \right)} \quad (\text{J.3})$$

La force F^* et le déplacement d^* d'un système équivalent à un seul degré de liberté sont calculés comme suit :

$$F^* = \frac{V_b}{\Gamma} \quad (\text{J.4})$$

$$d^* = \frac{d_n}{\Gamma} \quad (\text{J.5})$$

où: V_b et d_n sont respectivement l'effort tranchant à la base et le déplacement du noeud de contrôle du système à N DDL.

J.2.3 Comportement idéalisé force-déplacement de la structure

La relation force-déformation F^* et d^* du modèle équivalent à 1 DDL peut être idéalisée comme un modèle élasto-plastique parfait (cf. J.1).

La période T^* du système équivalent à un seul degré de liberté idéalisé est déterminée par :

$$T^* = 2\pi \sqrt{\frac{m^*}{k^*}} \quad (\text{J.6})$$

où : $k^* = \frac{F_y^*}{d_y^*}$ est la rigidité élastique du système équivalent à 1 DDL.

L'effort plastique F_y^* , qui représente également la résistance ultime du système idéalisé, est égal à l'effort tranchant à la base à la formation du mécanisme plastique.

Sur la base de cette hypothèse, le déplacement à la limite d'élasticité du système équivalent à un seul degré de liberté d_y^* , est donné par :

$$d_y^* = 2(d_m^* - \frac{E_m^*}{F_y^*}) \quad (\text{J.7})$$

où:

- E_m^* est l'énergie de déformation réelle jusqu'à la formation du mécanisme plastique.
- F_y^* est la force à la limite élastique du système équivalent à 1 DDL.
- d_m^* est le déplacement ultime du système équivalent à 1 DDL.

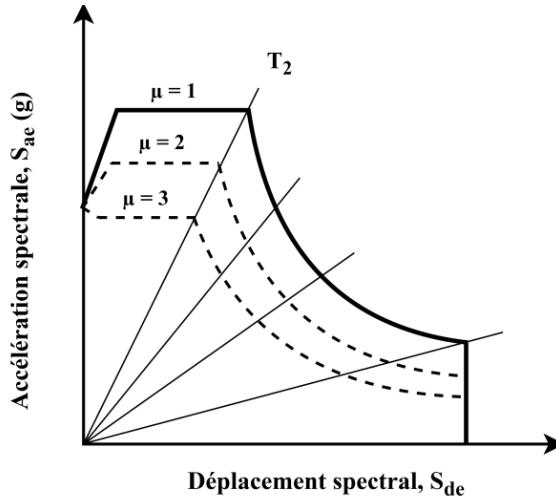
Demande sismique (spectre de réponse inélastique de constante de ductilité)

Le spectre inélastique est déduit à partir du spectre élastique en appliquant les expressions suivantes :

$$S_a = \frac{S_{ae}}{R_\mu} \text{ et } S_d = \frac{\mu}{R_\mu} \cdot S_{de} \quad (\text{J.8})$$

$$S_a(T, \xi) = \frac{S_{ae}(T, \xi)}{R_\mu} \quad (\text{J.9})$$

Figure J.2: Spectre de réponse inélastique en fonction de la ductilité



$$S_{de}(T, \xi) = \frac{T^2}{4\pi^2} \cdot S_{ae}(T, \xi) \quad (\text{J.10})$$

où :

- ξ : valeur d'amortissement visqueux fixée à 5%.
- $S_{ae}(T, \xi)$

: accélération dans le spectre élastique, correspondant aux périodes T et $\xi = 5\%$
 • $S_{de}(T, \xi)$: déplacement dans le spectre élastique, correspondant aux périodes T et $\xi = 5\%$.

$$S_d(T, \xi) = \frac{\mu}{R_\mu} \cdot S_{de}(T, \xi) = \frac{\mu}{R_\mu} \cdot \frac{T^2}{4\pi^2} \cdot S_{ae}(T, \xi) = \mu \cdot \frac{T^2}{4\pi^2} \cdot S_a(T, \xi) \quad (\text{J.11})$$

avec:

- $S_a(T, \xi)$: Accélération inélastique
- $S_d(T, \xi)$: Déplacement inélastique
- μ : Facteur de ductilité
- R_μ : Facteur de réduction donné par :

$$R_\mu = \begin{cases} (\mu - 1) \cdot \frac{T}{T_2} + 1 & \text{si } T < T_2 \\ \mu & \text{si } T \geq T_2 \end{cases} \quad (\text{J.12})$$

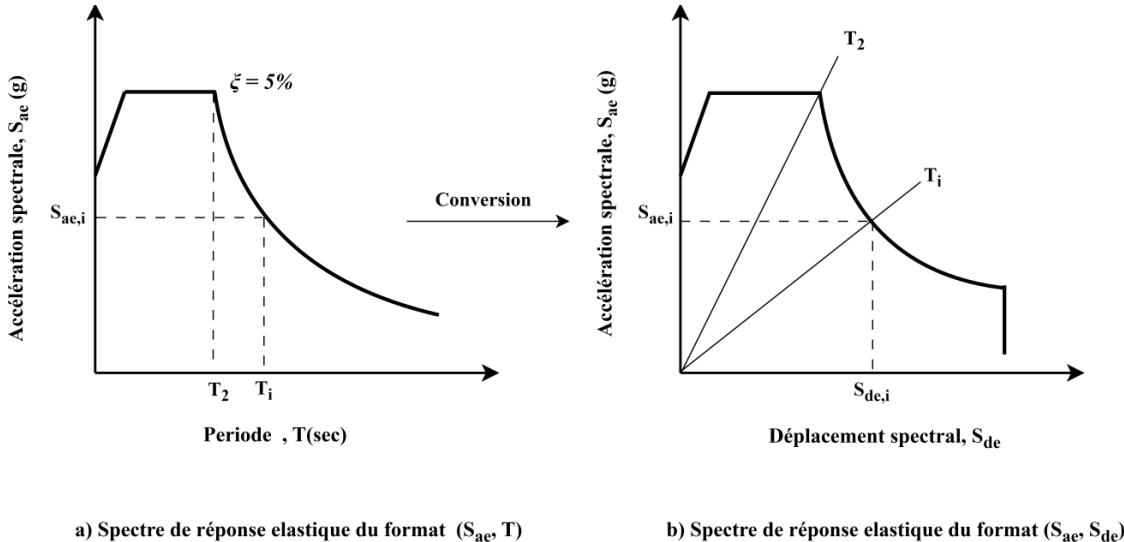
et:

- T : période de vibration d'un système linéaire à un seul degré de liberté
- T_2 : limite supérieure des périodes correspondant au palier d'accélération spectrale constante (cf. § 3.3.1)

J.2.4 Détermination du déplacement cible pour le système équivalent à 1 DDL

Le déplacement cible de la structure avec une période T^* et un comportement élastique illimité, est donné par :

Figure J.3: Spectre inélastique en format ADRS (accélération spectrale – déplacement spectral)



$$d_{et}^* = S_e(T^*) \left[\frac{T^*}{2\pi} \right]^2 \quad (J.13)$$

où: $S_e(T^*)$ est le spectre de réponse en accélération à la période T^* .

Pour la détermination du déplacement cible d_t^* des structures, dans le domaine des périodes courtes et des structures dans les domaines des périodes moyennes et longues, il convient d'utiliser différentes expressions, comme indiqué ci-dessous. La période limite, entre les domaines des périodes courtes et des périodes moyennes, est T_2 (cf. § 3.3.1).

T_2 représente la limite supérieure des périodes correspondant au palier d'accélération spectrale constante.

- Domaine des périodes courtes: $T^* < T_2$
 - Si $\frac{F_y^*}{m^*} \geq S_e(T^*)$: la réponse est élastique soit donc

$$d_t^* = d_{et}^* \quad (J.14)$$

- Si $\frac{F_y^*}{m^*} < S_e(T^*)$: la réponse est non linéaire, et :

$$[d_t^* = \frac{d_{et}^*}{R_\mu} \cdot (1 + (R_\mu - 1) \cdot \frac{T_2}{T^*})] \geq d_{et}^* \quad (J.15)$$

où:

R_μ est le rapport entre l'accélération $S_e(T^*)$ dans la structure ayant un comportement élastique illimité et l'accélération F_y^*/m^* dans la structure avec une résistance limitée, i.e.

$$R_\mu = \frac{S_e(T^*) \cdot m^*}{F_y^*} \quad (J.16)$$

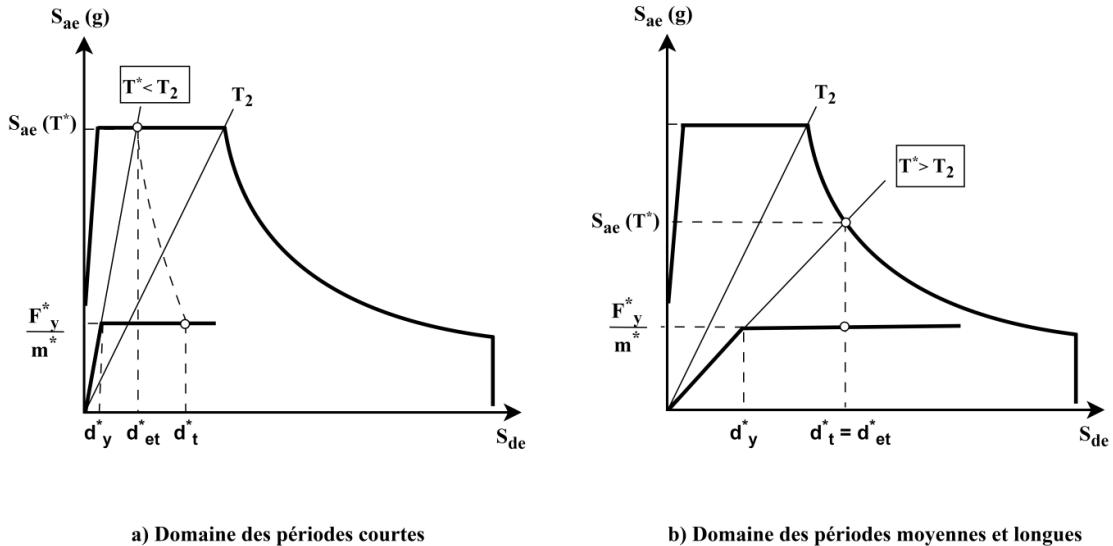
- Domaine des périodes moyennes et longues: $T^* \leq T_2$

$$d_t^* = d_{et}^* \quad (J.17)$$

Il n'est pas nécessaire que d_t^* dépasse $3.d_{et}^*$.

La relation entre les différentes grandeurs peut être visualisée dans les Figures J.4). Les figures sont présentées dans des axes accélération/déplacement. La période T^* est représentée par la droite radiale partant de l'origine du système de coordonnées jusqu'au point du spectre de réponse élastique défini par les coordonnées $d^* = S_e(T^*) \cdot (T^*/2\pi)^2$ et $S_e(T^*)$.

Figure J.4: Détermination du déplacement cible pour le système équivalent à 1DDL



J.2.5 Détermination du déplacement cible pour le système à N DDL

Le déplacement cible du système à N DDL est donné par :

$$d_t = \Gamma \cdot d_t^* \quad (\text{J.18})$$

Le déplacement cible correspond au noeud de contrôle.