

NOTIONS DE BASE DE DYNAMIQUE DES STRUCTURES

- Déformations élastique et plastique des éléments soumis à des forces
- Les forces d'inertie: représentation de l'action d'un séisme
- Introduction à la dynamique de l'oscillateur simple et de l'oscillateur multiple
- Utilité des incursions dans le domaine plastique
- Notions d'Isolation PS et d'amortissement

1. Déformation élastique des éléments soumis à des forces

Une **déformation élastique** est définie comme une déformation

- qui est sensiblement **proportionnelle à la force** qui la provoque (notion de linéarité)
- et qui disparaît après la suppression des charges qui l'ont provoquée (déformation **réversible**).

Déformation plastique

- Pour chaque sollicitation et chaque corps, il existe une force limite au delà de laquelle les déformations cessent d'être élastiques, c'est la **limite d'élasticité**.
- Au delà de cette limite, une partie de la déformation subsiste lorsque l'action extérieure cesse, on dit que le corps a subi une **déformation permanente** ou **plastique** ou **post-élastique**.

Domaine élastique:

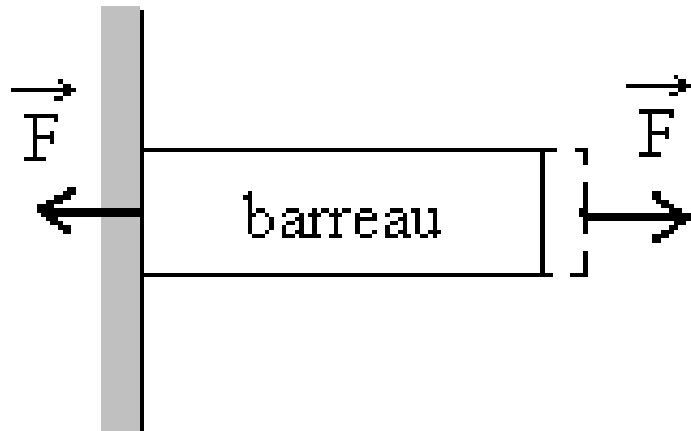
Type de contrainte – Type de déformation

- Un solide n'est jamais parfaitement rigide : soumis à des forces extérieures, il se déforme.
- **On distingue plusieurs types de déformations : variation des dimensions sous l'effet**
 - de **contraintes normales**,
 - de **flexion**,
 - de **cisaillement**,
 - de **torsion**.

Types de contraintes et modes de déformation

- Effets des actions normales : traction et compression
- Effets des actions composées :
 - Cisaillement
 - Flexion
 - torsion

Effets des actions normales : traction et compression

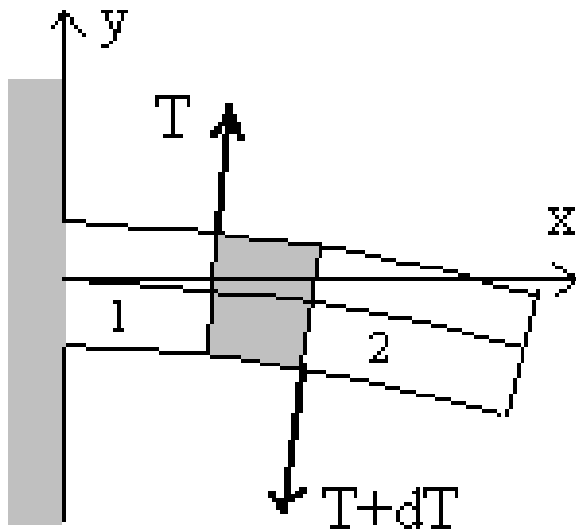


- Ces variations de dimensions suivent une loi linéaire et réversible tant que la force exercée F est inférieure à F_e , sa valeur qui caractérise la limite d'élasticité.
- Ces variations de dimensions sont proportionnelles à la contrainte exercée et à un coefficient caractéristique du matériau : le module de déformation (module d'Young).

Effets des actions composées

- **Cisaillement ou flexion ?**
- **La flexion** se traduit dans l'élément par des efforts de traction et de compression dans le sens longitudinal de l'élément.
- **Le cisaillement** génère des efforts de traction et compression dans le sens des diagonales de cet élément.
- L étant la hauteur de l'élément et h la dimension de sa section dans le sens de la sollicitation, si $L/h > 1$, la prédominance de la flexion sur le cisaillement croît avec ce rapport.

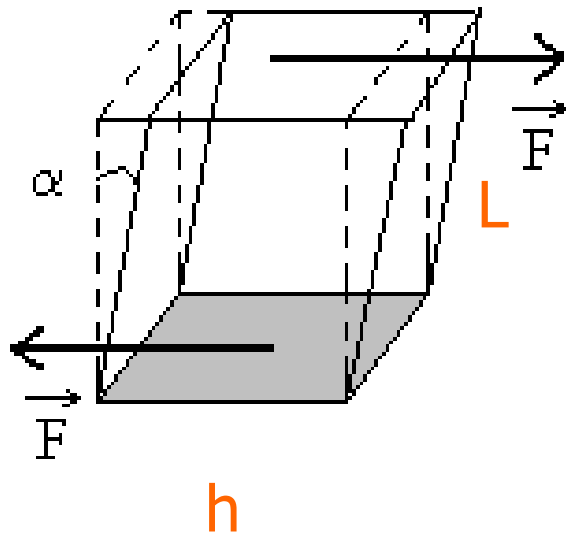
Flexion



- Cas d'une console soumise à l'action de la pesanteur:
 - les dimensions supérieures s'allongent sous l'effet d'un **effort en traction**
 - les dimensions inférieures se raccourcissent sous l'effet d'un **effort en compression**.
 - La fibre neutre garde la même longueur.

Une « tranche » donnée subit de la part de la partie amont (1) une force tangentielle ascendante et de la partie aval (2) une force tangentielle descendante (efforts tranchants) dont les effets sont de provoquer sa flexion (rotation).

Cisaillement



- Sur les faces opposées d'un élément pour lequel L/h est faible, on exerce des forces tangentielles d'intensité égales et opposées.
- Le parallélépipède se déforme d'un angle α .
- **Tant que l'on reste en deçà de la limite élastique, l'angle de la déformation est proportionnel à la contrainte tangentielle et inversement proportionnel à la rigidité du matériau.**

Torsion

- L'élément ou la structure soumis à un couple de torsion ne subit pas des niveaux de contraintes homogènes. Plus le « bras de levier » du couple de torsion est important, plus les contraintes sont élevées à proximité du centre de torsion et plus les déformations sont importantes à l'autre extrémité.

Rigidité/flexibilité des systèmes soumis à une force latérale

- **Vis à vis des mouvements du sol, les structures se comportent comme des oscillateurs dont les modes propres d'oscillation dépendent notamment de la raideur (ou rigidité) des éléments de la structure.**
- **Il convient de rappeler les paramètres de la rigidité**

Raideur - déformation

- **La déformation des éléments est proportionnelle à la force exercée.**
- **Le coefficient de proportionnalité est la raideur (k).**

$$\mathbf{F = k.X} \Leftrightarrow \mathbf{k = F/X}$$

- F [N] Force,
- X [m] Déplacement,
- k [N/m] Raideur.

Quels sont les paramètres de la rigidité ?

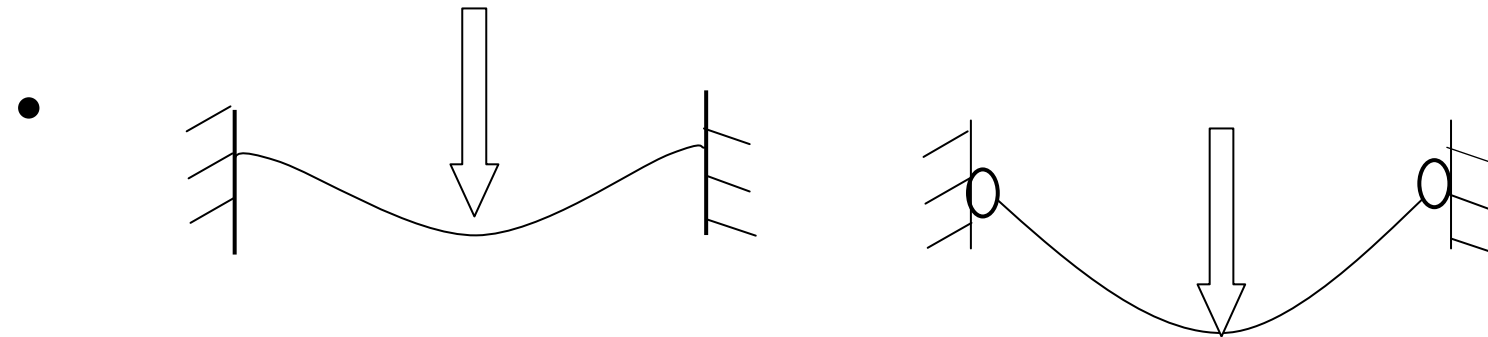
La raideur des éléments constructifs est fonction de **quatre paramètres sur lesquels le concepteur de la structure peut agir.**

- Nature des liaisons de l'élément
- Nature du matériau de l'élément
- Section de l'élément
- Elancement de l'élément

Nature des liaisons

(articulations, encastrement...)

- Elle est représentée par un coefficient de symbole « n »



- Exemple : la flèche est beaucoup plus importante pour les poutres articulées que pour les poutres encastées, le coefficient n est plus élevé pour les encastements.

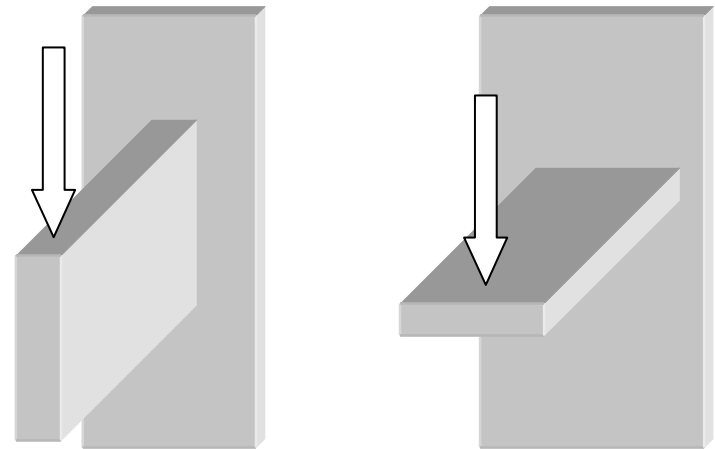
Inertie des sections

(dans le sens de la sollicitation)

- $I [m^4] = (b \times h^3) / 12$
 - h : dimension dans le sens de la sollicitation,
 - b : dimension perpendiculaire

La raideur croît avec le cube de la dimension de la section sollicitée.

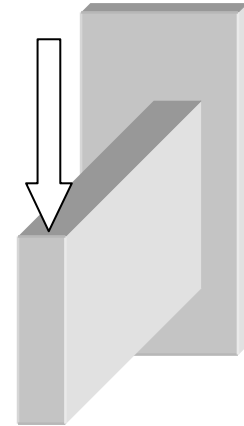
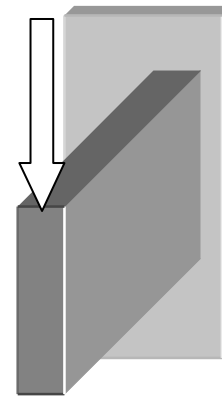
Ce paramètre de la raideur, mal maîtrisé, est à l'origine de la plupart des dommages dus à une mauvaise conception de la structure.



Le matériau

(module de déformation)

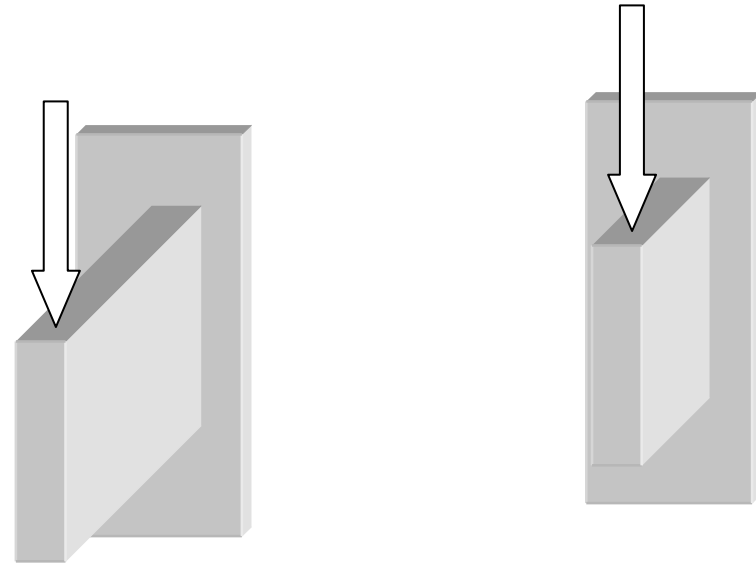
- **E [Mpa]**
- Acier : module d'Young
- Béton : module de déformation longitudinale



La raideur croît avec le module de déformation du matériau.

La longueur des éléments

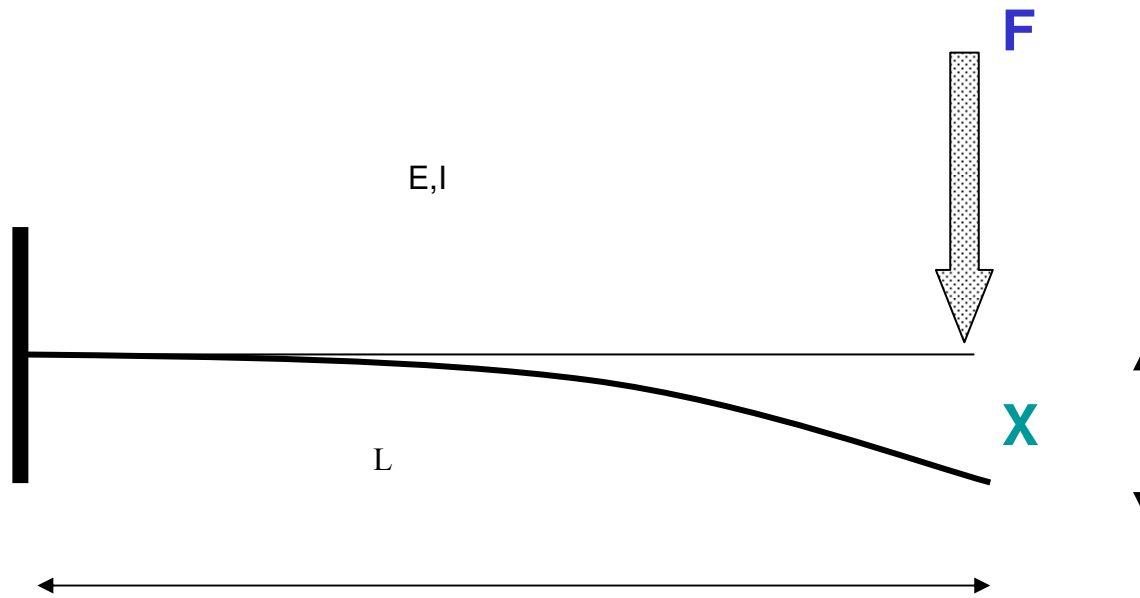
- **L [m]**
- La raideur décroît selon le cube de la longueur
- Mal maîtrisé, ce paramètre est à l'origine d'un grand nombre de dommages dus à une mauvaise conception de la structure.



En résumé

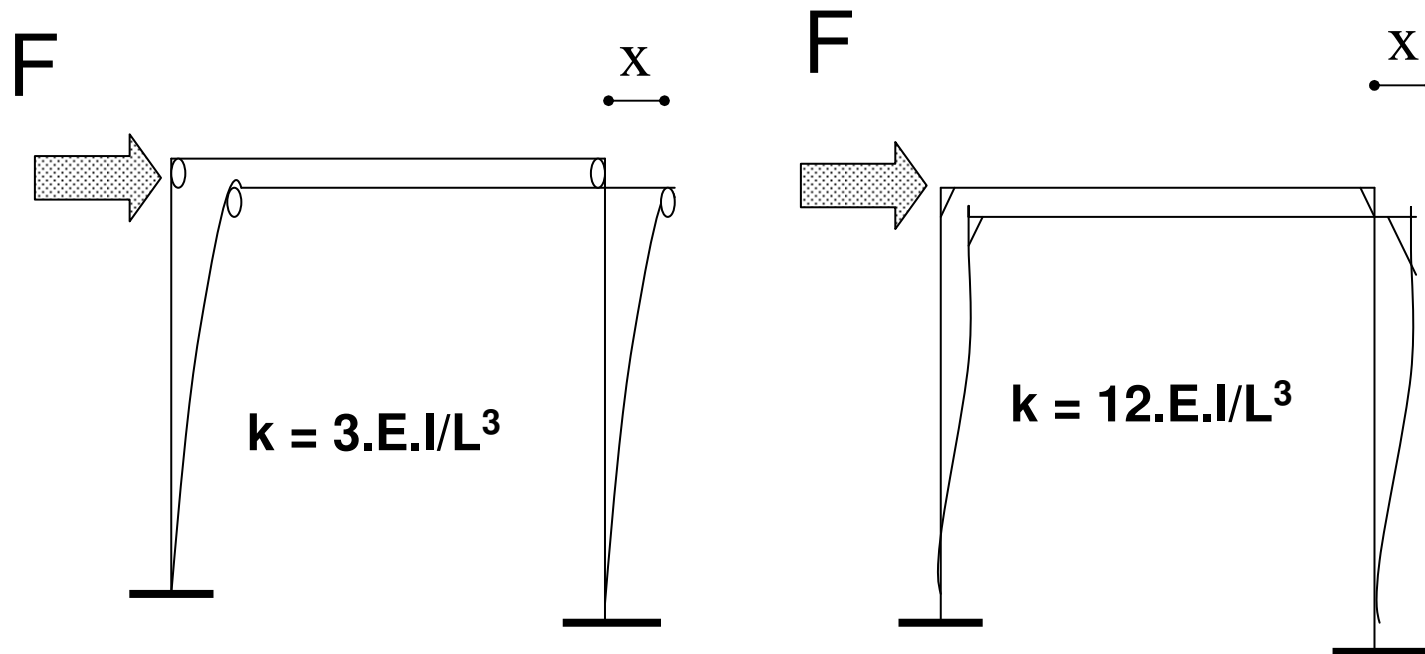
- **k** [MN/m] coefficient de raideur de l'élément
coefficient fonction de
- **n** [-] la nature des **liaisons** de l'élément
- **E** [MPa] **module d'Young** du matériau
- **I** [m⁴] **inertie des sections** de l'élément
avec $I = b \cdot h^3 / 12$
- **L** [m] **longueur** de l'élément

Raideur d'une poutre en console



$$x = \frac{F \cdot L^3}{3 \cdot E \cdot I} \text{ or } F = k \cdot x \text{ d'où } k = \frac{3 \cdot E \cdot I}{L^3}$$

Raideur d'un portique



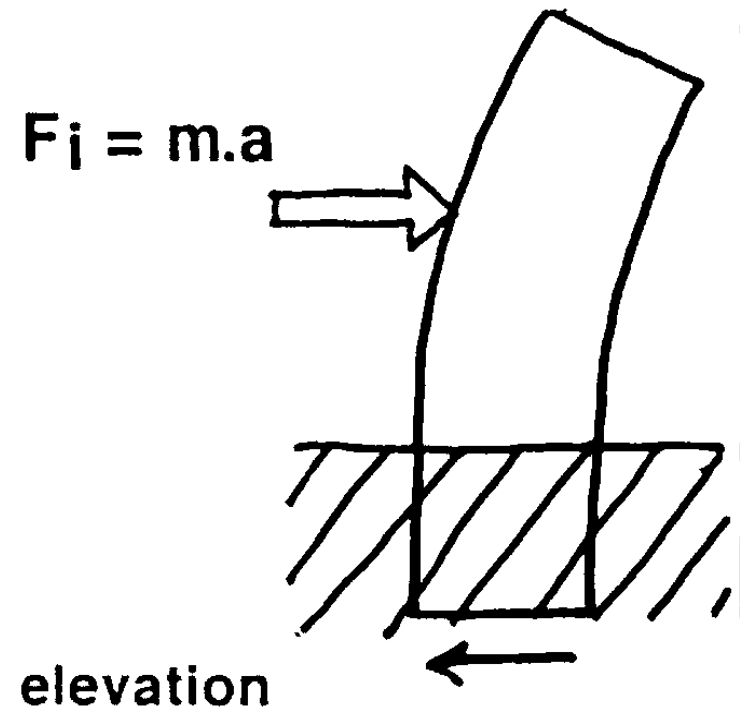
Avec L hauteur des poteaux et I somme des inerties des poteaux

2. Forces d'inertie : représentation de l'action d'un séisme

- Paramètres des forces d'inertie, conséquences pour la conception des structures
- Bilan énergétique d'une structure en mouvement
- Le bâtiment doit-il résister à une force ou absorber l'énergie du séisme ?

Généralités

- La force d'inertie agissant sur un corps est égale au produit de sa masse par son accélération : **$F_i = m.a$** (2^{ème} loi de Newton).
- On acceptera par simplification que a est une « pseudo-accélération » dans un repère relatif



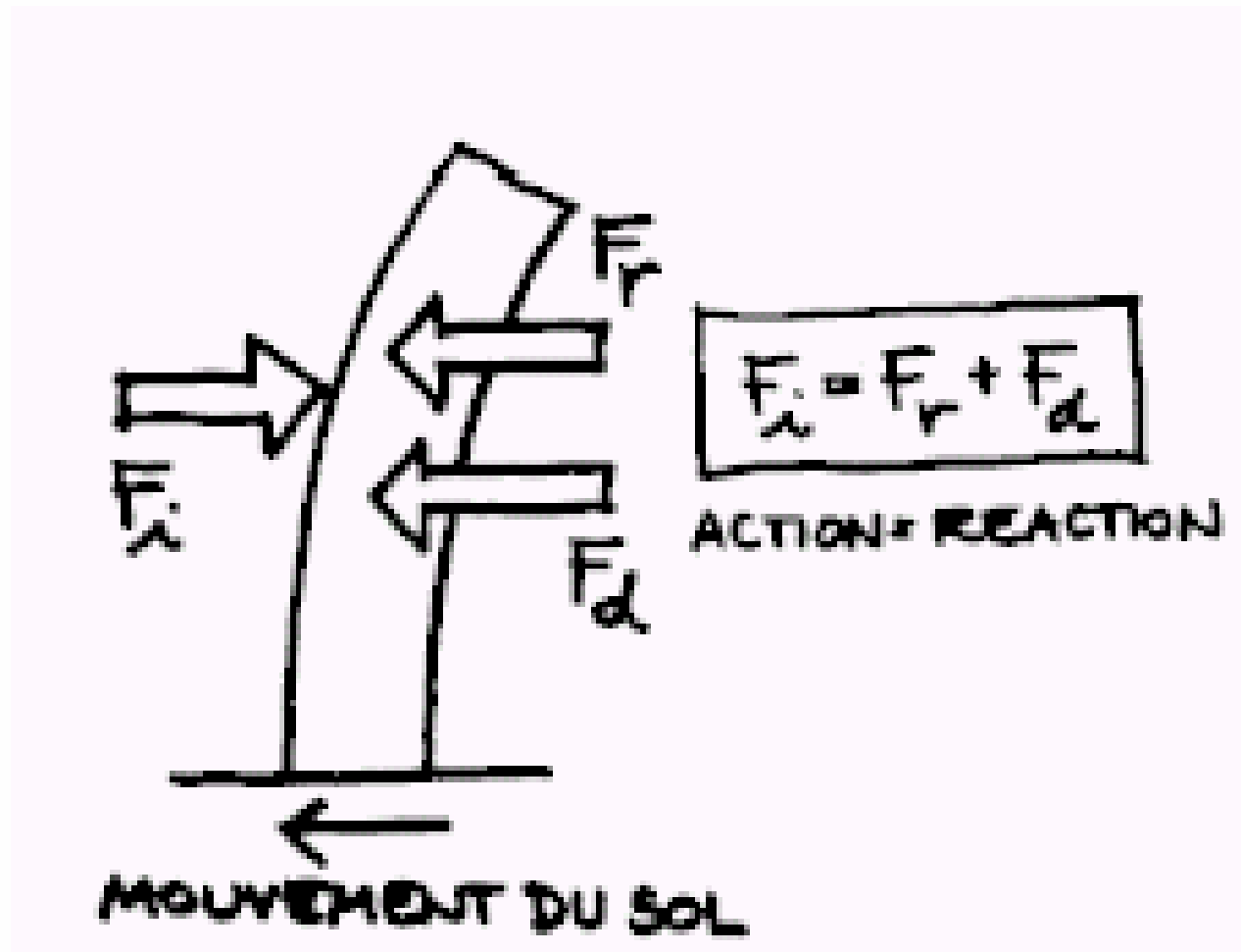
Maîtriser l'action d'un séisme = Maîtrise de la masse $F_i = m \cdot a$

- Les Forces d'inertie s'appliquent sur les masses de la construction. Dans le cas général on considèrera que les masses sont concentrées dans les planchers.
- Ainsi, la réduction des masses permet de minimiser les sollicitations d'origine sismique. **Pour le projet on considèrera, en fonction de sa nature et ses volumes, que la recherche d'un rapport résistance/masse volumique élevé est un facteur à optimiser.**

Maîtrise des accélérations $F_i = m.a$

- Il s'agit des accélérations de la structure en réponse à celles du sol.
- **La maîtrise des accélérations signifiera concrètement l'éviction pour la structure des périodes propres susceptibles d'entrer en résonance avec celles du sol (Ou la recherche du sur-amortissement)**

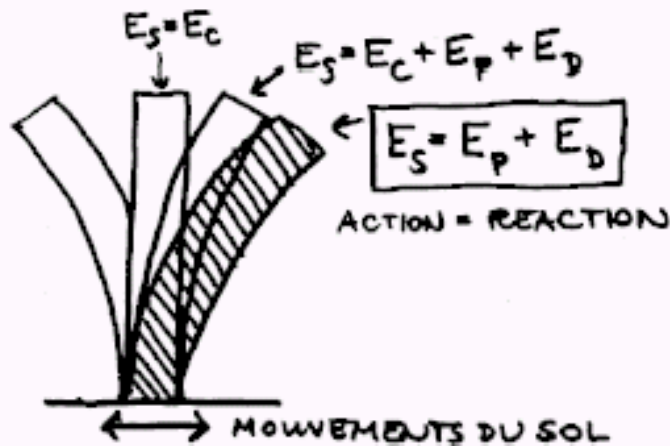
Equilibre des forces en présence



Notion d'équilibre énergétique : absorption de l'énergie sismique par la structure

- Une structure qui subit des oscillations possède de **l'énergie cinétique** (E_c).
- Celle-ci produit un travail de déformation qui, si les **déformations imposées** ne peuvent pas être « **absorbées** » **par la structure**, devient un travail de rupture.
- On constate en effet que l'effondrement des ouvrages lors d'un séisme est plutôt dû à un manque de déformabilité qu'à un manque de résistance pure des matériaux vis-à-vis des forces.

- **Le stockage de l'énergie communiquée** : **énergie potentielle (E_p)** qui sera restituée sous la forme d'énergie cinétique pour ramener la structure à sa position d'origine.



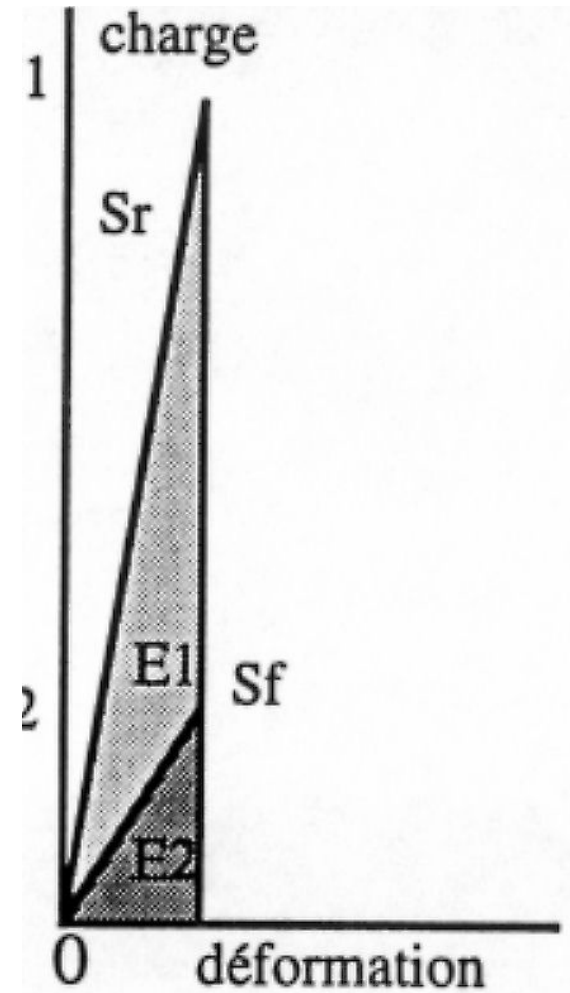
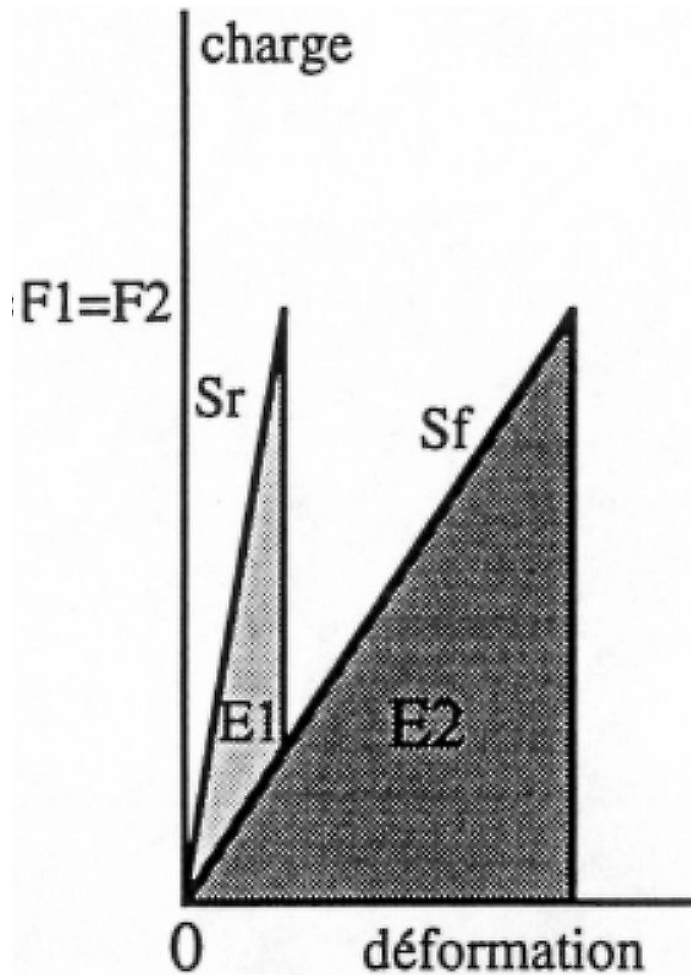
- **La dissipation d'énergie** : une partie de l'énergie du séisme est **dissipée (E_d)** sous forme de chaleur sous l'effet des déformations élastiques de la structure. Nous verrons que l'endommagement peut également être utilisé à cet effet, sous réserve de ne pas provoquer la ruine de la construction.

Energie stockée par la structure (déformations élastiques)

- La quantité d'énergie stockée croît avec l'importance des déformations élastiques.
- Les déformations élastiques étant temporaires (réversibles), le stockage l'est aussi ; à chaque cycle d'oscillation, l'énergie non dissipée est reconvertie en énergie cinétique pour rappeler la structure à sa position d'origine.

Principe de stockage : effet de ressort, or $F = k.x$

A charges égales $E_{s2} \gg E_{s1}$ A déformations égales $F_1 \gg F_2$

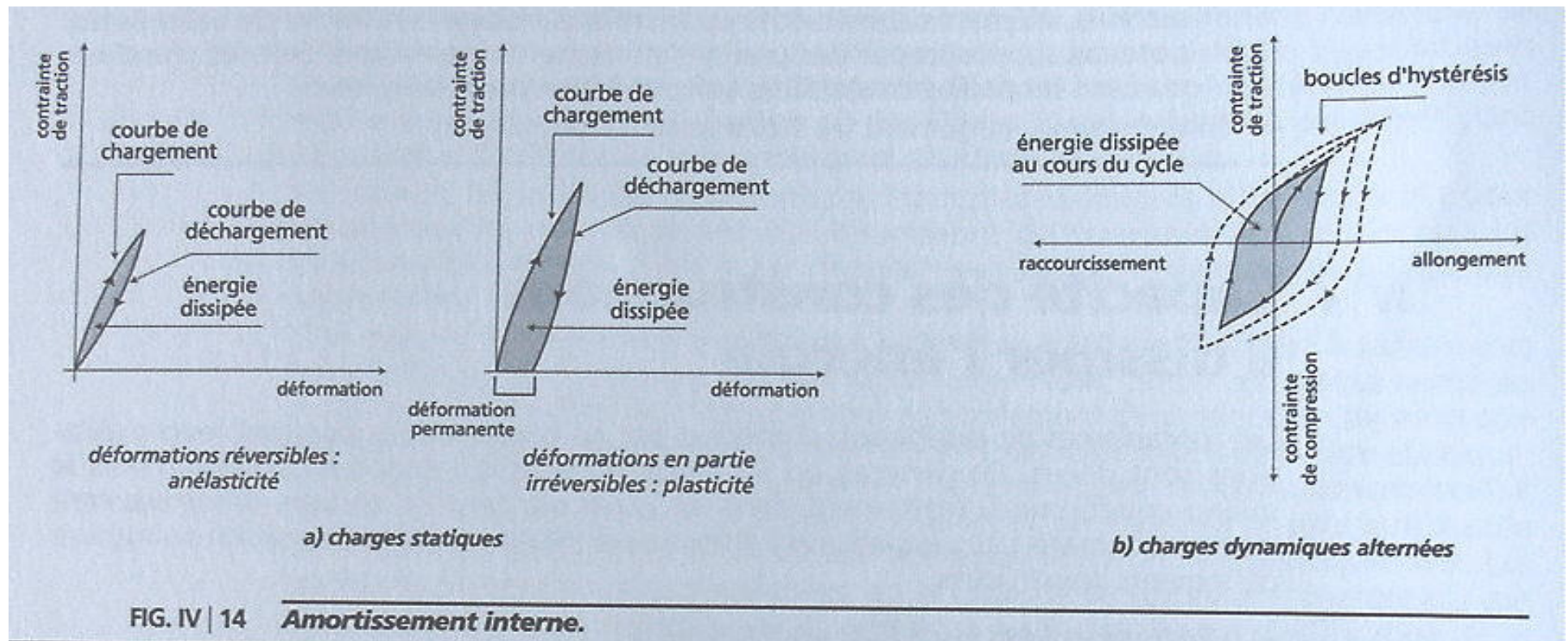


Energie dissipée par la structure en mouvement (Dissipation anélastique)

- Pendant les oscillations, la dissipation d'énergie sous forme de chaleur (amortissement) a pour conséquence une réduction de leurs amplitudes.
- L'amortissement nécessite des déformations, il est **proportionnel à la vitesse des déformations**.
- **Amortissement critique** : amortissement strictement suffisant à un oscillateur déporté de sa position d'équilibre pour qu'il revienne au repos sans effectuer d'oscillations (100% de l'énergie est dissipée sur un cycle).
- **Amortissement relatif** : (ξ) amortissement anélastique exprimé en % de l'amortissement critique. Il caractérise le système.

Amortissement

- Le travail, qui est un transfert d'énergie, est défini par le produit d'une force par une longueur, qui peut être représenté sur les schéma ci-dessous par les surfaces grisées.



Stratégies pour l'absorption de l'énergie sismique par la structure

- **Action : $F_i = m.a$**
 - Maîtriser les masses
 - Maîtriser les accélérations
- **Réaction : $F_i = -k.x - c.x'$**
 - $k.x =$ optimiser les forces de rappel
- (k coefficient de raideur et x déplacement à l'instant considéré)
 - $c.x' =$ optimiser les forces dissipées
- (c coefficient d'amortissement du système et x' vitesse à l'instant considéré)

En termes d'énergie

On peut exprimer les objectifs de la façon suivante

- **Le stockage de l'énergie** – énergie potentielle – (domaine élastique) sera favorisé en **autorisant les déformations de la structure** par le choix d'un mode constructif le permettant, et dans les limites autorisées par les règles.

La dissipation d'énergie sera obtenue :

- par le choix de structures ayant un **coefficient d'amortissement anélastique élevé**.
- par **l'ajout de systèmes amortisseurs**
- par **l'endommagement maîtrisé** des éléments structuraux ou non structuraux (domaine post-élastique).

En résumé

- Optimisation de la capacité d'absorption d'énergie de la structure,
 - **ne vise pas** l'augmentation de la résistance des éléments structuraux aux contraintes, en termes de **résistance pure**, ce qui n'est pas forcément suffisant en cas de séisme majeur.
 - **on cherche à plutôt à limiter les contraintes** induites par les mouvements sismiques de manière qu'elles n'atteignent pas la limite de rupture.
- **Le but est de soustraire les constructions aux sollicitations excessives d'ensemble ou localisées.**

Le bâtiment doit-il résister à une force ou absorber l'énergie du séisme ?

- - Le bâtiment doit réglementairement résister aux forces statiques équivalentes calculées pour l'action réputée maximale du séisme,
- - Même dimensionné pour l'action sismique « réglementaire » mais mal conçu, le bâtiment peut périr par accumulations de contraintes localisées.
- L'expérience post-sismique montre que des bâtiments ne répondant pas aux normes de construction parasismique, si leur conception leur permet de minimiser l'action sismique et d'absorber l'énergie sismique, se comportent bien.

En pré-conclusion...

- Un bon bâtiment « parasismique » est
- - **bien conçu** selon tous les critères qualitatifs précités, qui seront développés en termes d'applications concrètes.
- - **dimensionné par le calcul**, si possible avec les données du site comme vérification des données réglementaires,
- - et **bien réalisé** ...

Equation amortie du mouvement oscillatoire

- $F(\text{inertie}) + F(\text{rappel}) + F(\text{amortiss}^t) = 0$
- $\Leftrightarrow m \cdot x'' + kx + cx' = 0$
 - $m = \text{masse}$
 - $x'' = \text{pseudo-accélération}$
 - $k = \text{raideur}$
 - $x = \text{déplacement (déformée)}$
 - $c = \text{amortissement}$
 - $x' = \text{vitesse}$

Résolution mathématique

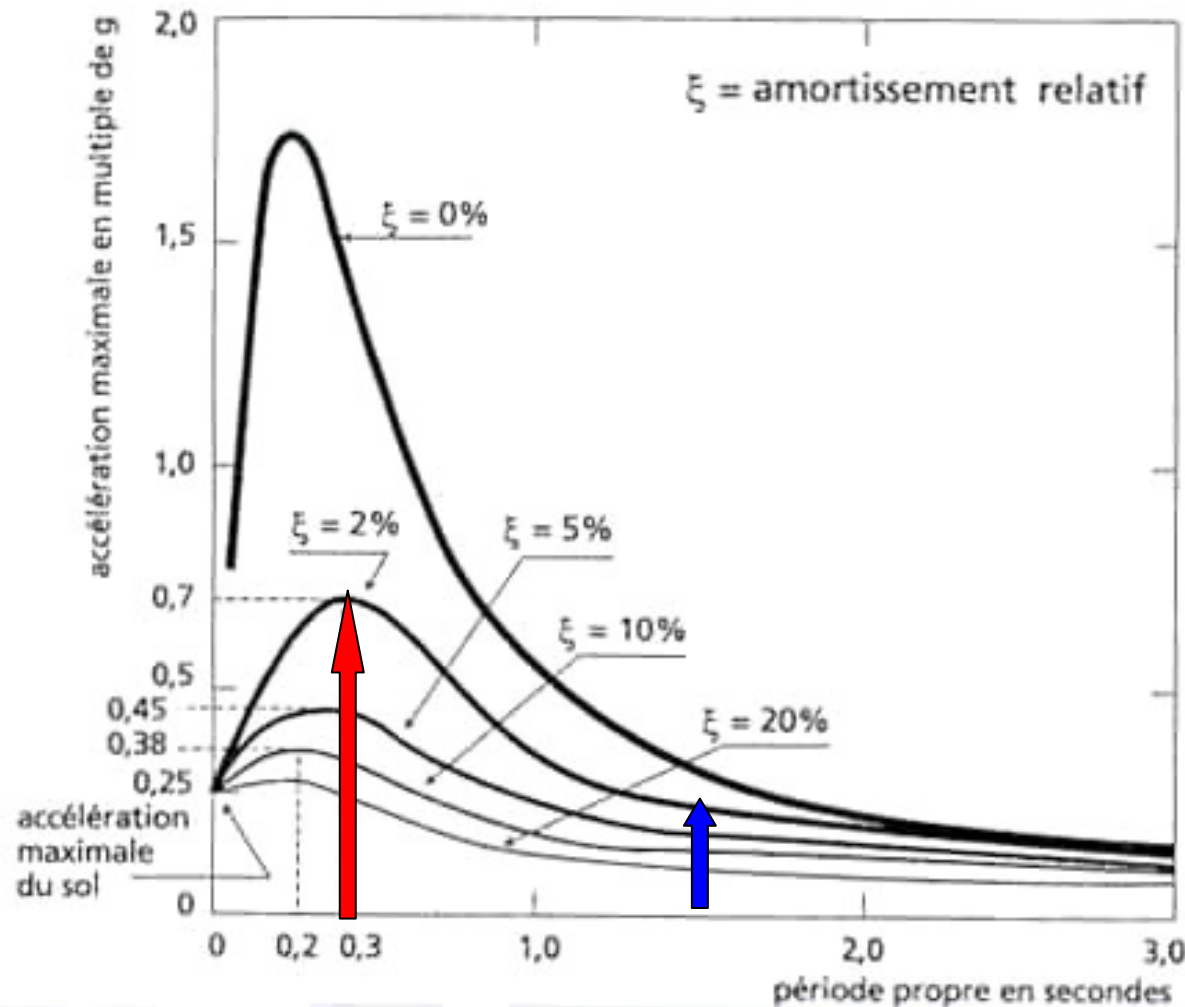
« pas à pas »

- On estime les déformations de la structure en fonction du temps, en utilisant pour hypothèse de déplacements du sol d'implantation des accélérogrammes compatibles avec le spectre de réponse du sol établi sur mouvements faibles ou bruits de fond.
- On cherche à obtenir les paramètres suivants pour chaque instant t :
 - $x(t)$ déplacement en fonction du temps,
 - $x'(t)$ vitesse
 - $x''(t)$ accélération .

Résolution à l'aide d'un spectre de réponse

- Pour les projets courants on utilisera une méthode plus rapide, visant l'estimation de la sollicitation maximum, avec les limites de fiabilité déjà exposées.
 - x_{\max} déplacement maxi
 - x''_{\max} accélération maxi
- Une fois établies les périodes d'oscillation des structures (analyse modale), on lit sur le spectre l'accélération en réponse supposée maximale, (analyse spectrale).

- **REPONSE SPECTRALE (ici, sol dur).**
- **Le bâtiment A ($T = 0,3$ s) amplifie les secousses**
- **Le bâtiment B ($T = 1,5$ s) les atténue.**



SPECTRE DE REPONSE (1)

- Le spectre de réponse des structures est un outil pour estimer la réponse d'un bâtiment au séisme.
- En général il s'agit de réponse en accélération, mais il existe des spectres en déplacement et en vitesse.
- Le spectre de réponse est une « courbe » sur laquelle on lit les valeurs maximales de l'amplification du mouvement du sol.
- Il caractérise le type de sol.
- Il est évalué pour le pic du mouvement sismique.
- Il est établi pour un amortissement relatif donné.
- Du point de vue du calcul, les valeurs sont données pour un niveau (cas de l'oscillateur simple) et sont extrapolées pour l'oscillateur multiple.

SPECTRE DE REPONSE (2)

- Les constructions sont repérées sur le spectre de réponse par leur période propre et leur amortissement relatif.
- On distingue:
 - Les spectres de réponse d'un site donné pour un séisme donné
 - Les spectres de réponse élastiques standard pour un site ou un type de sites
 - Les spectres de réponse élastique standard réglementaires
 - Les spectres de dimensionnement (élasto-plastiques)

SPECTRE DE REPONSE (3)

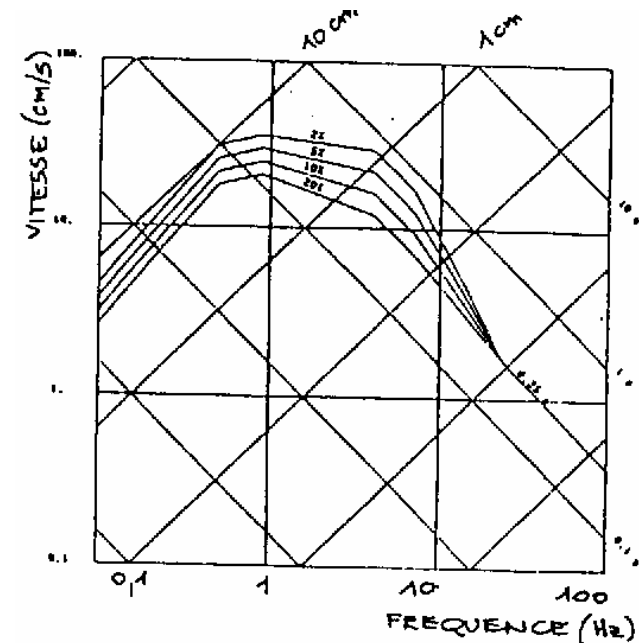
- Les spectres sont obtenus par le calcul de la réponse maximale d'un ensemble d'oscillateurs simples amortis (masse + ressort + amortisseur visqueux) excités à leur base par un accélérogramme.
- Le **spectre d'un séisme particulier sur un site** donné ne caractérise pas de façon satisfaisante la réponse des constructions à un séisme futur dont les caractéristiques peuvent être très différentes (source différente).

SPECTRE DE REPONSE (4)

- Pour un site et un séisme donnés on note sur l'accélérogramme le pic du mouvement sismique. C'est sur ce pic que le spectre de réponse sera « calé ».
- Cette valeur sera considérée comme la valeur « $T = 0$ », c'est à dire l'accélération du sol ou celle d'une structure qui bouge avec le sol sans réponse (absence totale de déformation)

SPECTRE DE REPONSE (5)

- Le spectre de réponse peut être représenté:
 - Dans un repère orthogonal, dans ce cas on peut établir un spectre pour chaque paramètre du mouvement (déplacement, vitesse, accélération)
 - Dans un repère quadrilogarithmique, dans ce cas un seul spectre donne tous les paramètres du mouvement.



Spectre quadrilogarithmique

SPECTRE DE REPONSE (6)

- **Amortissement d'une structure en oscillation:** capacité d'une structure à réduire l'amplitude des oscillations par dissipation d'énergie sous forme de chaleur.
- L'amortissement est caractéristique de chaque type de structure. Il est exprimé par le coefficient d'**amortissement relatif** (ξ) qui est un des paramètres du calcul du comportement dynamique.
- L'amortissement relatif est exprimé en pourcentage de l'**amortissement critique**.

SPECTRE DE REPONSE (7)

- **Valeurs moyennes retenues pour l'amortissement structural:**
 - Portiques d'acier autostables 1-4%
 - Idem avec parois rigides 3-6%
 - Portiques BA avec parois rigides 6-10%
 - Maçonnerie avec chaînages de BA 5%,
 - Maçonnerie de pierres 8-10%,
 - Ossature bois 8-15%,
 - Un amortissement $>20\%$ tend à faire disparaître les phénomènes d'amplification.

SPECTRE DE REPONSE (8)

- Les caractéristiques du spectre varient avec:
 - L'amortissement des constructions,
 - La nature du sol,
 - La distance épacentrale,
- Les spectres ne prennent pas en compte:
 - La durée des secousses,
 - Les fluctuations des oscillations du sol
 - L'interaction sol-structure (les constructions sont considérées comme parfaitement encastrées dans un sol infiniment rigide)

SPECTRES CALIFORNIENS ISSUS DU SEISME D'EL CENTRO

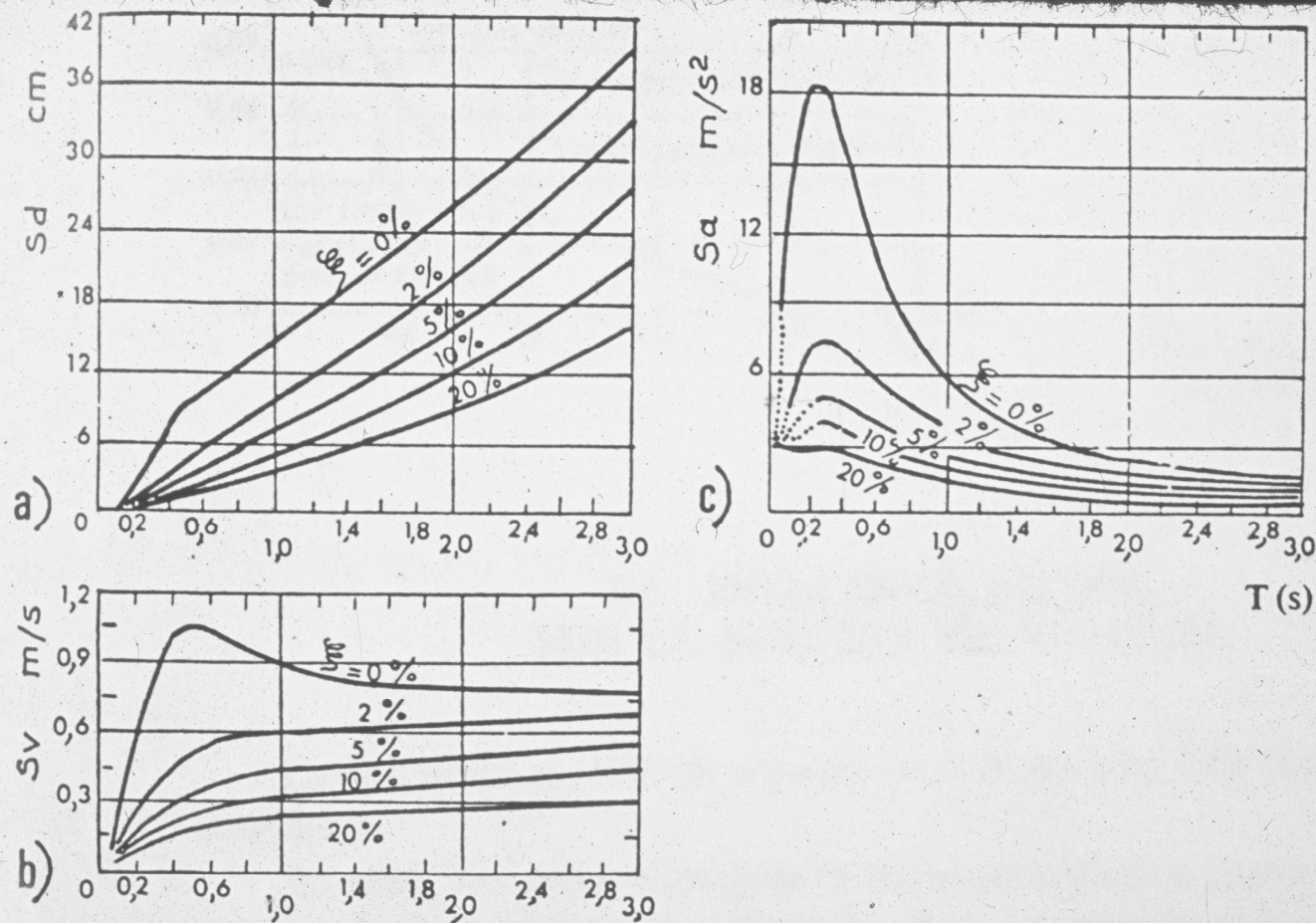


FIG. 3.12. — Spectre de calcul. — a) Spectre de déplacement S_d .
b) Spectre de vitesse S_v . — c) Spectre d'accélération S_a

SPECTRES DE REPONSE ELASTIQUE REGLEMENTAIRES

- On utilise ce type de spectres pour les constructions qui doivent rester dans le domaine élastique (pas de déformation plastique admise).

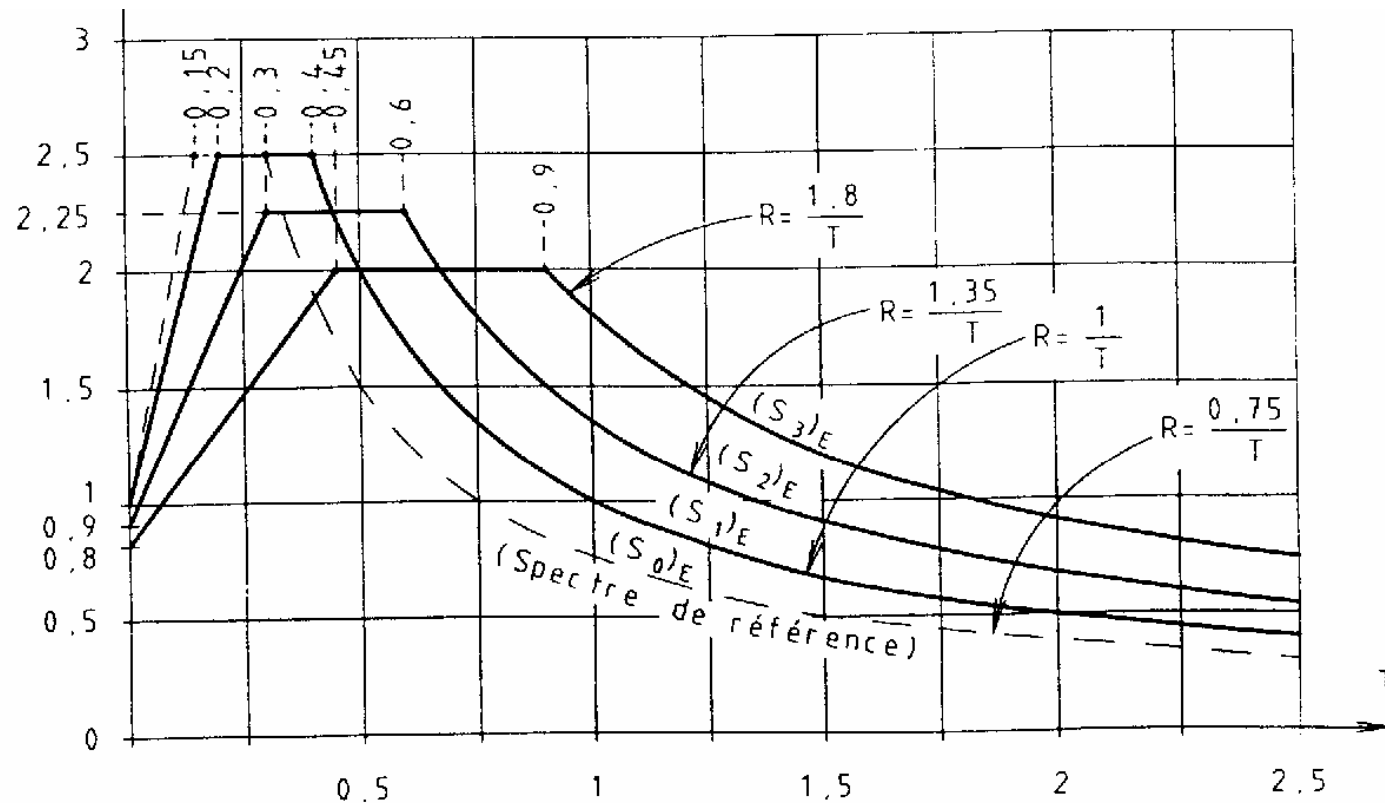
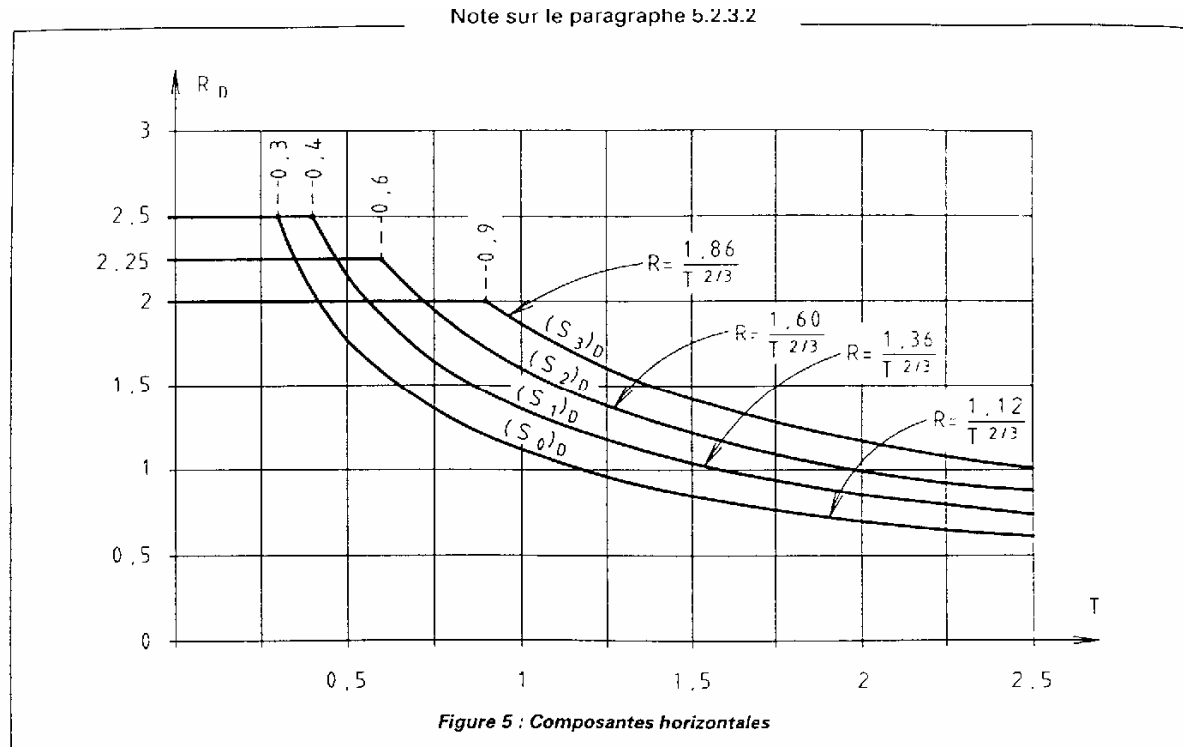


Figure A.2 : Spectres des composantes horizontales

SPECTRES DE DIMENSIONNEMENT REGLEMENTAIRES

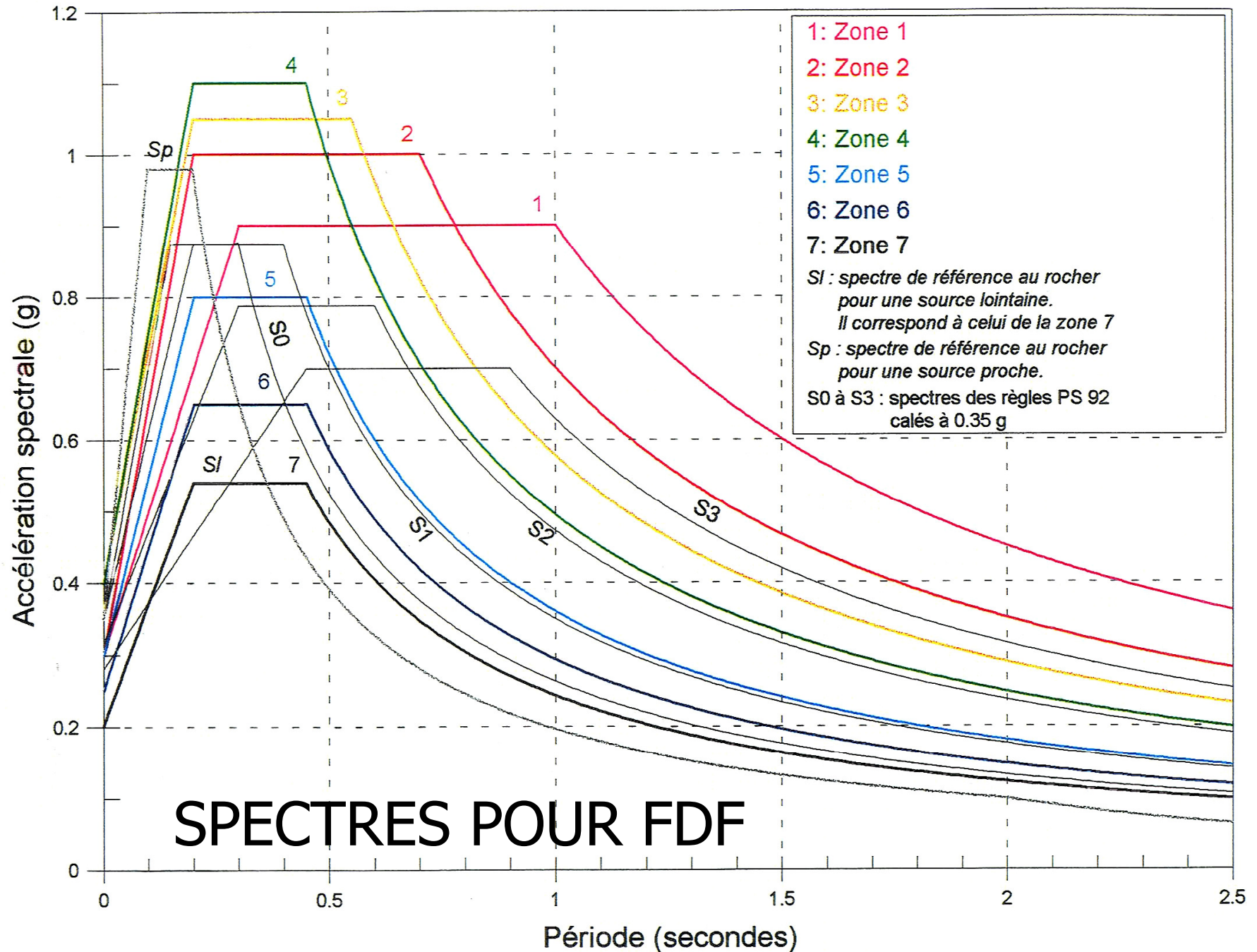
- On utilise ce type de spectre (élastoplastique) pour le calcul des structures pour lesquelles on admet des incursions dans le domaine plastique (ORN soumis aux règles PS92)

- Par rapport aux spectres élastiques on néglige le gain sur les périodes courtes et on aggrave la réponse sur les périodes longues. Pour la conception, le spectre élastique est plus utile.



SPECTRE DE REPONSE SPECIFIQUE D'UN SITE

- Il s'agit d'un spectre élastique ou élastoplastique correspondant aux séismes pouvant se produire sur un site particulier. Il tient compte des effets de site et du contexte sismotectonique local. (Ne pas confondre avec le spectre d'un séisme particulier)
- L'établissement de ces spectres et leur utilisation est obligatoire pour les ORS.



SPECTRES POUR FDF

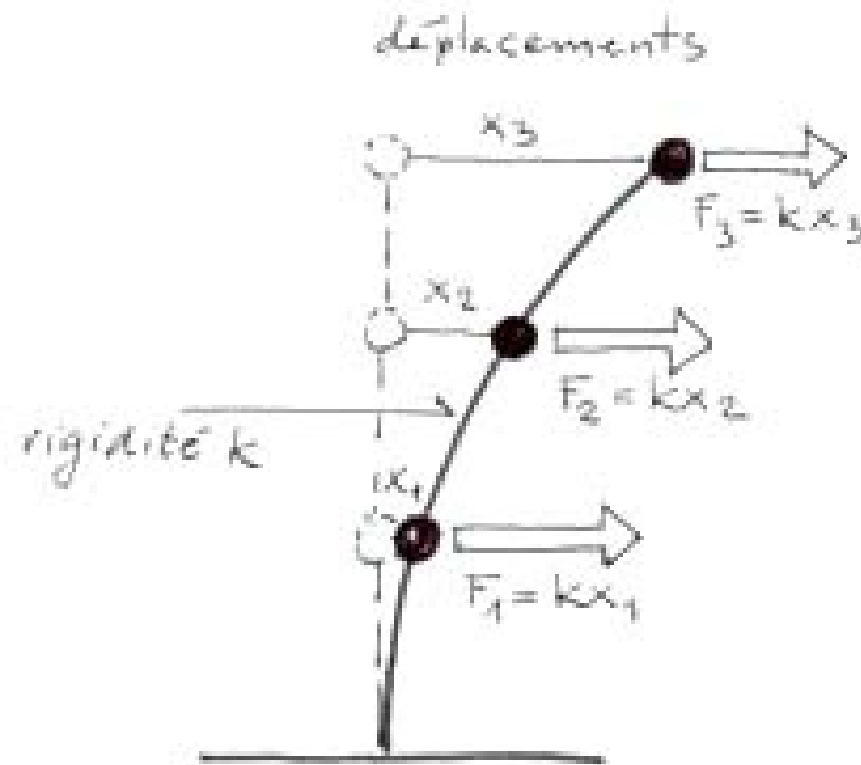
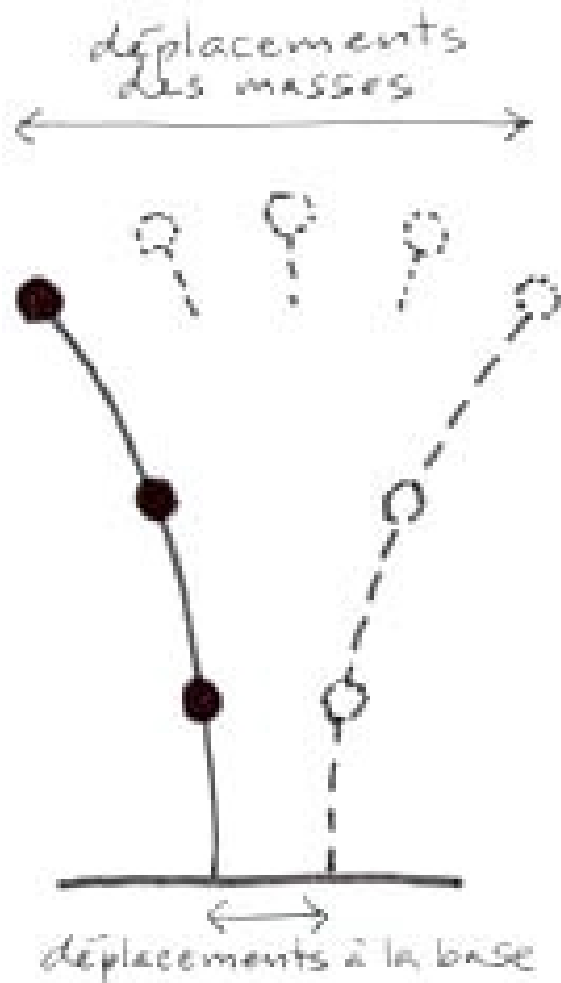
Spectres de réponse élastiques horizontaux (amortissement 5%)

3. Introduction à la dynamique des oscillateurs multiples

- Modes d'oscillation d'une structure
- Analyse modale spectrale, généralités
- Analyse modale spectrale, méthodologie
- Problématique de la localisation irrégulière des raideurs

Généralités

- **$F = k.x.$**
- Les déplacements relatifs des différents planchers d'un bâtiment et leurs paramètres (déplacement, vitesse et accélération) dépendent de l'importance et de la répartition des masses qui les constituent, de la rigidité des différents éléments porteurs et de leur localisation.



- a) **Amplification des déplacements**
- b) **Forces appliquées sur le ressort (1° mode)**

Modes d'oscillation d'une structure

Notion de degrés de liberté en translation et en torsion

- Le degré de liberté est la possibilité, pour un système donné, de subir une translation ou une rotation. En principe un corps a six degrés de liberté :
 - Translation dans les 3 plans
 - Rotation dans les 3 plans.

S'agissant d'une structure la nature des éléments et de leurs liaisons va conditionner la pertinence des degrés de liberté pris en considération pour la modélisation.

Modes d'oscillation

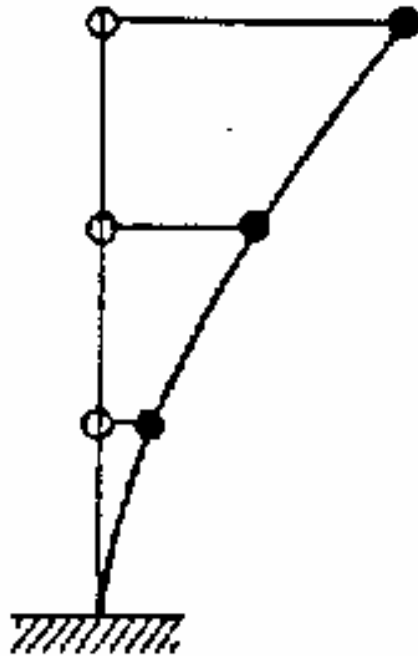
(oscillateur simple et oscillateur multiple)

- Le mouvement d'oscillation d'une structure qui comporte plusieurs masses (planchers par exemple) étant complexe, pour l'analyser on le décompose en plusieurs modes d'oscillation : mode fondamental et modes supérieurs.
- Pour le mode fondamental, les diverses masses oscillent en phase.
- Pour les modes supérieurs, elles sont plus ou moins déphasées.

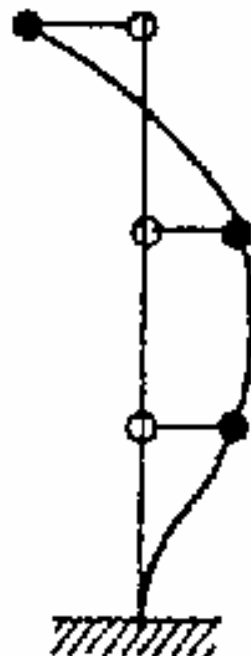
MODES D'OSCILLATION D'UN OSCILATEUR TRIPLE EN TRANSLATION

MODE FONDAMENTAL

1^{er} MODE



2^e MODE



3^e MODE

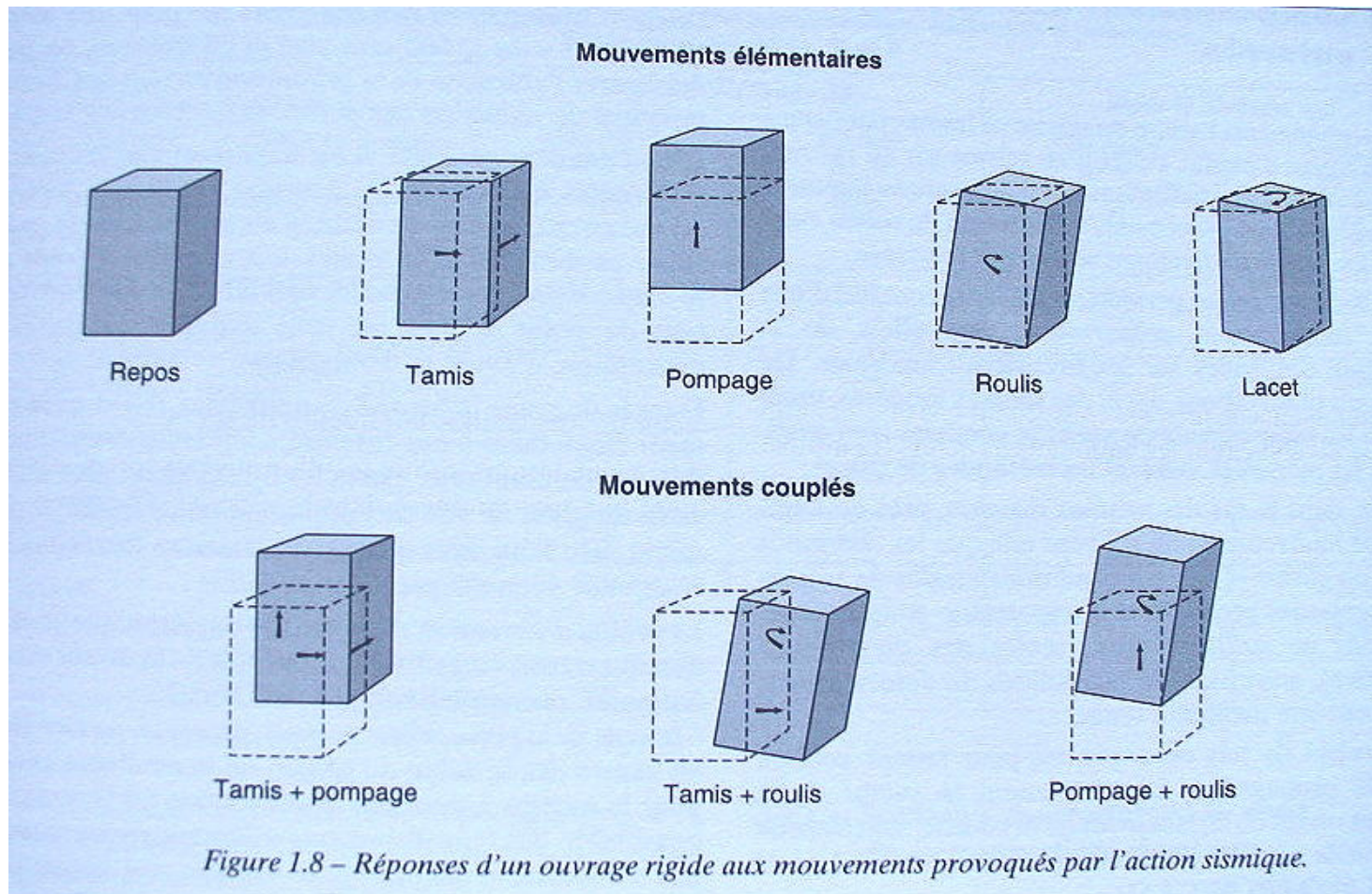


ETC.

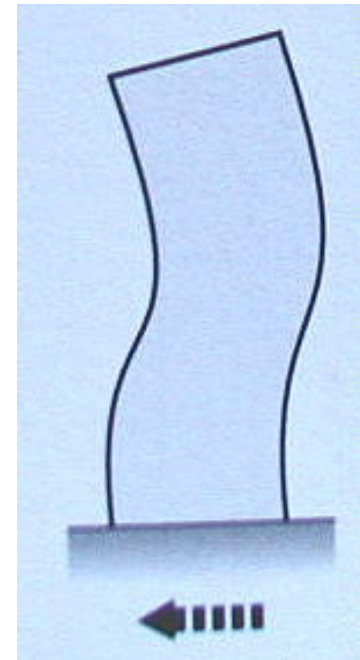
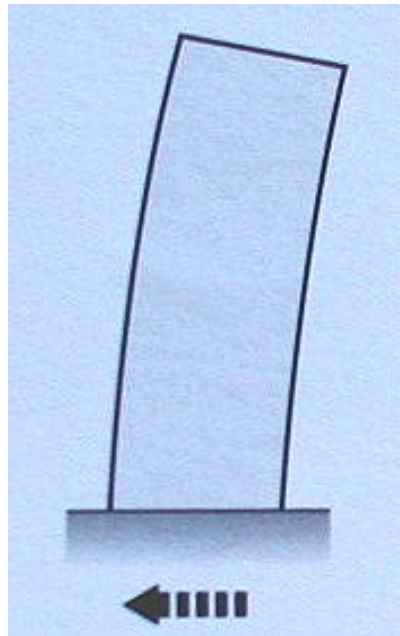
MODES PROPRES D'OSCILLATION

- La réponse de la structure à un séisme dépend donc de ses modes propres d'oscillation.
- Or ces modes propres de vibrations ne dépendent pas du séisme. Ils peuvent être visualisés lorsque la structure est en oscillations libres.
- **C'est l'amplification plus ou moins importante des oscillations par la réponse de la structure, selon chacun de ces modes, qui doit être identifiée par le calcul modal spectral.**

- Les modes, c'est à dire la forme, des oscillations d'une structure dépend de la réponse de la structure aux différents mouvements imposés par le sol et par ses propres caractéristiques (raideurs, masses) : tamis, pompage, roulis, lacet.



Exemples de modes d'oscillation en translation



- - **1^o mode** (à gauche), tous les planchers se déplacent en même temps dans la même direction
- - **mode supérieur** (à droite), tous les planchers ne se déplacent pas dans la même direction).

4. Utilité des incursions dans le domaine plastique

- Equilibre énergétique incluant un comportement non linéaire
- Conséquences pour le projet
- Coefficient q

Généralités

- Lorsque les matériaux (et leur mise en œuvre) présentent une capacité importante de déformation plastique avant rupture il est possible d'obtenir une sécurité acceptable en autorisant des incursions significatives dans le domaine plastique (post-élastique).
- La ductilité ainsi définie se traduit par une augmentation des déformations sans élévation notable du niveau de contraintes dans la structure.

- **Ductilité** : capacité d'un matériau, et par extension d'un élément ou d'une structure, de subir, avant la rupture, des déformations plastiques (irréversibles) sans perte significative de résistance. Ces matériaux "préviennent" donc de l'approche de leur rupture.

- **Déformation plastique (ou post-élastique)** : déformation irréversible des éléments réalisés en matériaux ductiles après que ceux-ci ont été chargés au-delà de leur limite d'élasticité. Elle peut donner lieu à une importante dissipation d'énergie.

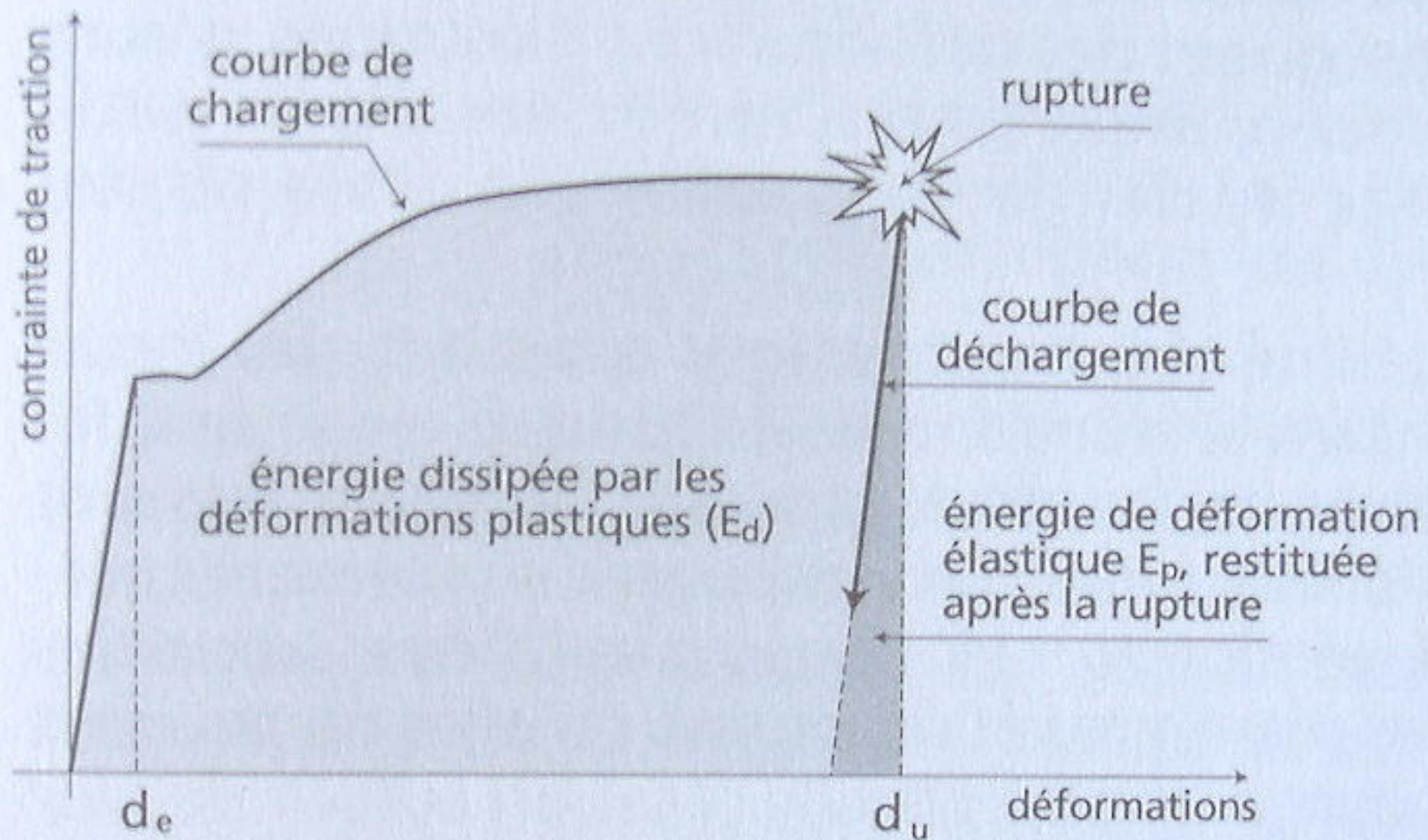
- **Rotule plastique** : zone plastifiée d'un élément de structure (poteau, poutre, ...). Une telle zone se comporte comme une rotule mécanique, autorisant la rotation sur son axe des autres parties de l'élément.
- **Rupture ductile** : rupture précédée de déformations plastiques notables.
- **Rupture fragile** : rupture soudaine et quasi instantanée.

PS-92 - § 4.41 : Ductilité

- *Les divers éléments structuraux doivent présenter une ductilité suffisante pour conserver leur résistance de calcul sous les déformations qu'ils sont exposés à subir au cours du mouvement sismique.*
- *A défaut d'autres justifications, cette condition est réputée satisfaite si, l'ouvrage étant calculé conformément aux présentes règles, les dispositions techniques définies dans le présent document pour les différents matériaux sont respectées.*

Notion de limitation des contraintes par l'endommagement

- Le comportement est linéaire jusqu'au point d_e . (limite élastique)
- Au delà de ce point l'accroissement des déformations se fait sans élévation significative des contraintes, mais ces déformations sont irréversibles, l'élément a plastifié.
- La rupture se produit lorsque la déformation plastique atteint sa « limite utile » d_u . Entre d_e et d_u il n'y a pas de perte significative de résistance.



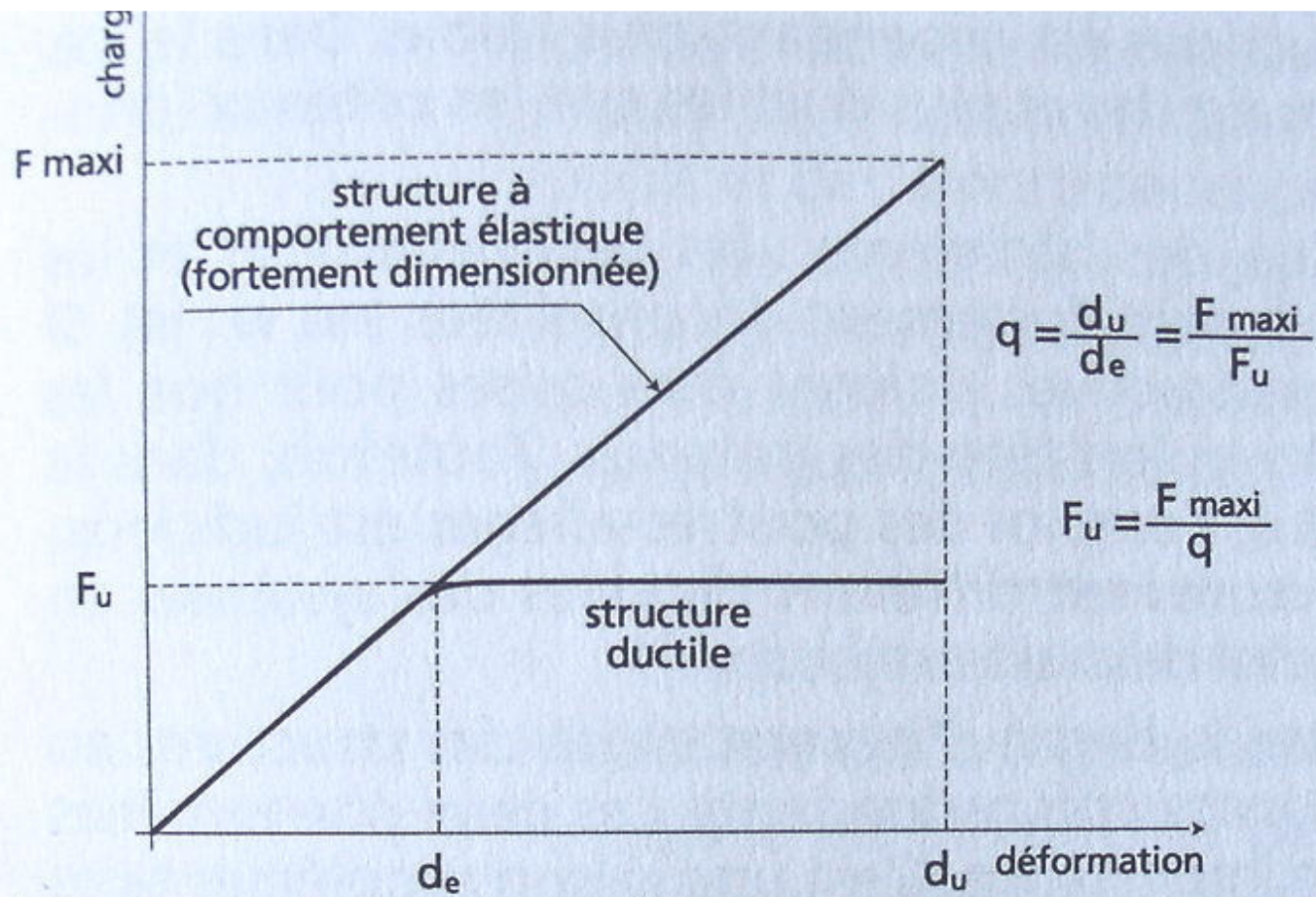
$E_d + E_p$ = énergie utilisée pour la rupture de l'élément
 d_e = déformation élastique maximale
 d_u = déformation ultime

FIG. IV | 16

Energie dissipée par la rupture d'un élément en acier (charge statique).

Coefficient de comportement

- Le coefficient q des règles PS-92 constate l'aptitude d'une structure à conserver sa résistance d'ensemble (non effondrement) après avoir plastifié à de multiples endroits.
- Le rapport entre le niveau de contraintes que subit une construction pour une déformation donnée sans dommage et le niveau de contraintes pour une même déformation avec incursions dans le domaine plastique, avant la rupture, est la valeur du coefficient q .



- F_{maxi} = charge maximale sollicitant la structure élastique
- F_u = charge ultime de la structure ductile
- d_e = déformation élastique maximale
- d_u = déformation ultime
- q = coefficient de comportement

FIG. IV | 17 **Réduction des charges sismiques par la ductilité.**

Coefficient q

- Les règles PS-92 expliquent
 - comment **le calculer**
 - ou
 - comment en suivant des prescriptions précises de mise en œuvre pour chaque type de structure utiliser un **coefficient q forfaitaire en fonction du type de structure** et des matériaux de construction de cette structure.
- On pourra alors diviser l'action sismique résultant de l'application des autres paramètres (accélération nominale, réponse spectrale, coefficient topographique et amortissement structural) par q sans risquer l'effondrement de celle-ci... si les hypothèses de calcul sont bonnes et si le bâtiment est conçu pour être hyperstatique

Conséquences pour le projet

- Le choix du parti architectural et du parti constructif, opéré par l'architecte, fige généralement le « fonctionnement » mécanique du bâtiment, ses modes et périodes d'oscillation et détermine donc la nature des sollicitations des divers éléments structuraux, ainsi que son comportement plus ou moins ductile sous séisme.
- **Le choix du coefficient de comportement q vient constater de façon réglementaire la ductilité prévisible de la structure.**

Application réglementaire (PS-92) aux ouvrages à risque normal

L'action sismique = le séisme x la structure

Le séisme = L'accélération nominale x coefficient topo

La structure = La réponse au signal x l'amortissement
x $1/q$

PS-92 - § 5.2 : Définition de l'action sismique.

- *Le mouvement sismique de calcul est défini par les paramètres suivants :*
- *- L'accélération nominale a_N déjà définie au 3.3.,*
- *- L'ordonnée du spectre de dimensionnement normalisé dépendant des formations géologiques du site et de la période T , appelée $R_D(T)$,*
- *- Un coefficient lié à la topographie τ ,*
- *- Un coefficient correctif d'amortissement ρ ,*
- *On désigne par la suite le produit de ces paramètres par $R(T)$*
 - $R(T) = a_N \cdot R_D(T) \cdot \rho \cdot \tau$

Les règles PS 92, de même que l'Eurocode 8, portent sur :

- **Des dispositions constructives** générales et dispositions particulières à divers matériaux ou procédés de construction ;
- **Des règles de calcul** (évaluation des actions sismiques de calcul, vérification de la résistance et des déformations de la structure).

- **ces règles n'imposent aucune disposition architecturale** ; elles s'appliquent sur un projet déjà défini qui peut, a priori, être mal conçu du point de vue parasismique.
- **Seule la notion de « régularité de la structure » est prise en considération au travers d'un coefficient minorant le coefficient q .**
- **Sa ductilité est appréciée de façon forfaitaire par q .**

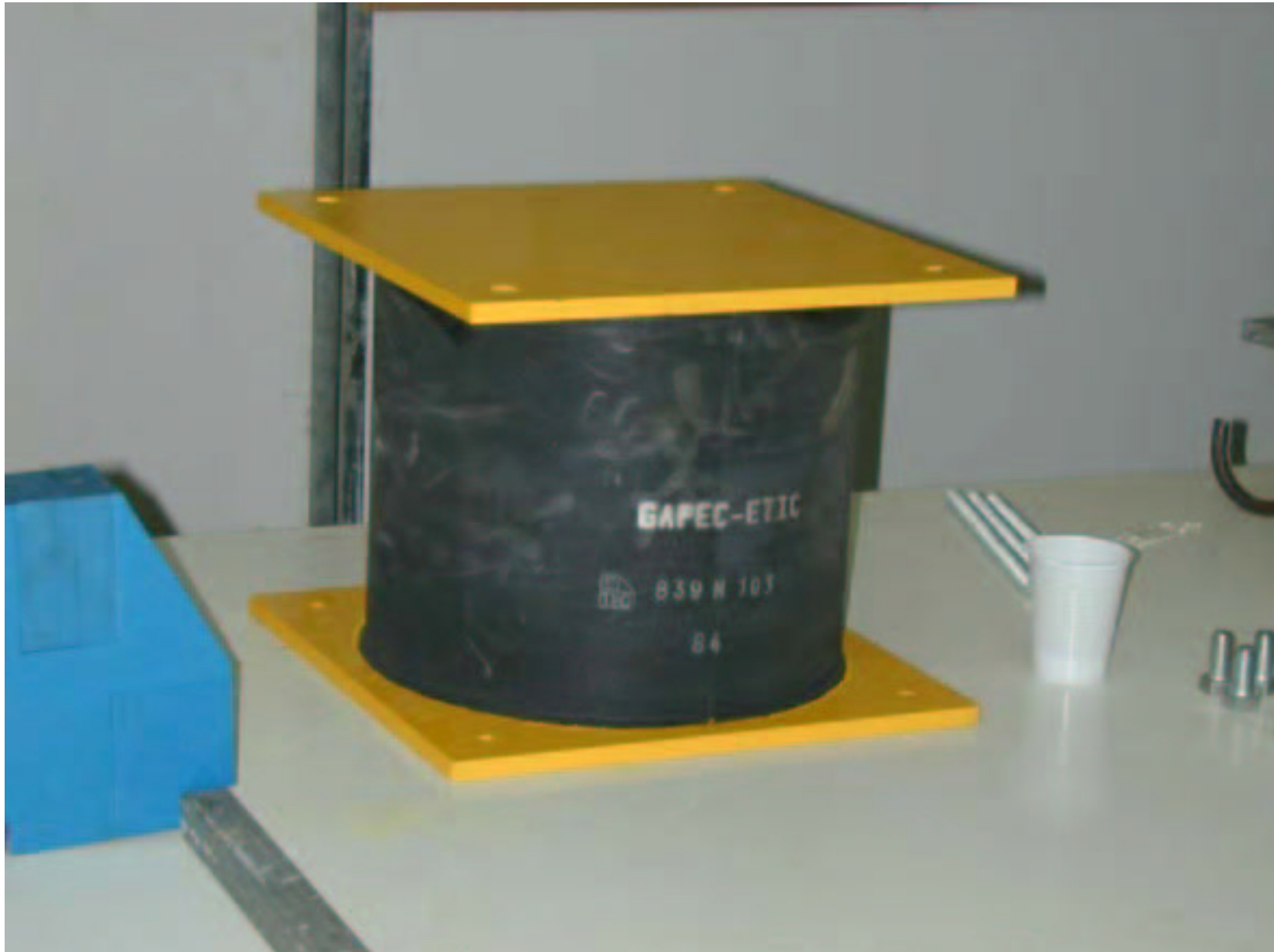
Alors?

- En tenant compte des concepts physiques que nous avons précisés, une bonne conception peut garantir les objectifs de sécurité plus sûrement que le simple calcul réglementaire.
- Elle permet également de minimiser le niveau d'endommagement sans accroître le coût de la construction.
- Il ne reste plus qu'à voir comment...

5. L'isolation parasismique

- L'isolation parasismique a pour objectif de **découpler l'infrastructure**, qui se déplace avec le sol sans se déformer (déplacements horizontaux), **de la superstructure**, qui réagit à l'action du sol et se déforme sous l'effet des forces d'inertie.
- Elle vise à minimiser l'action sismique sur la structure en allongeant sa période propre. Le but de sa conception est de **conférer à l'ensemble une période permettant la dé-amplification de l'action sismique**.
- Elle est **associée à des dispositifs amortisseurs** qui limitent l'amplitude des déplacements de la structure.

Isolateur à déformation



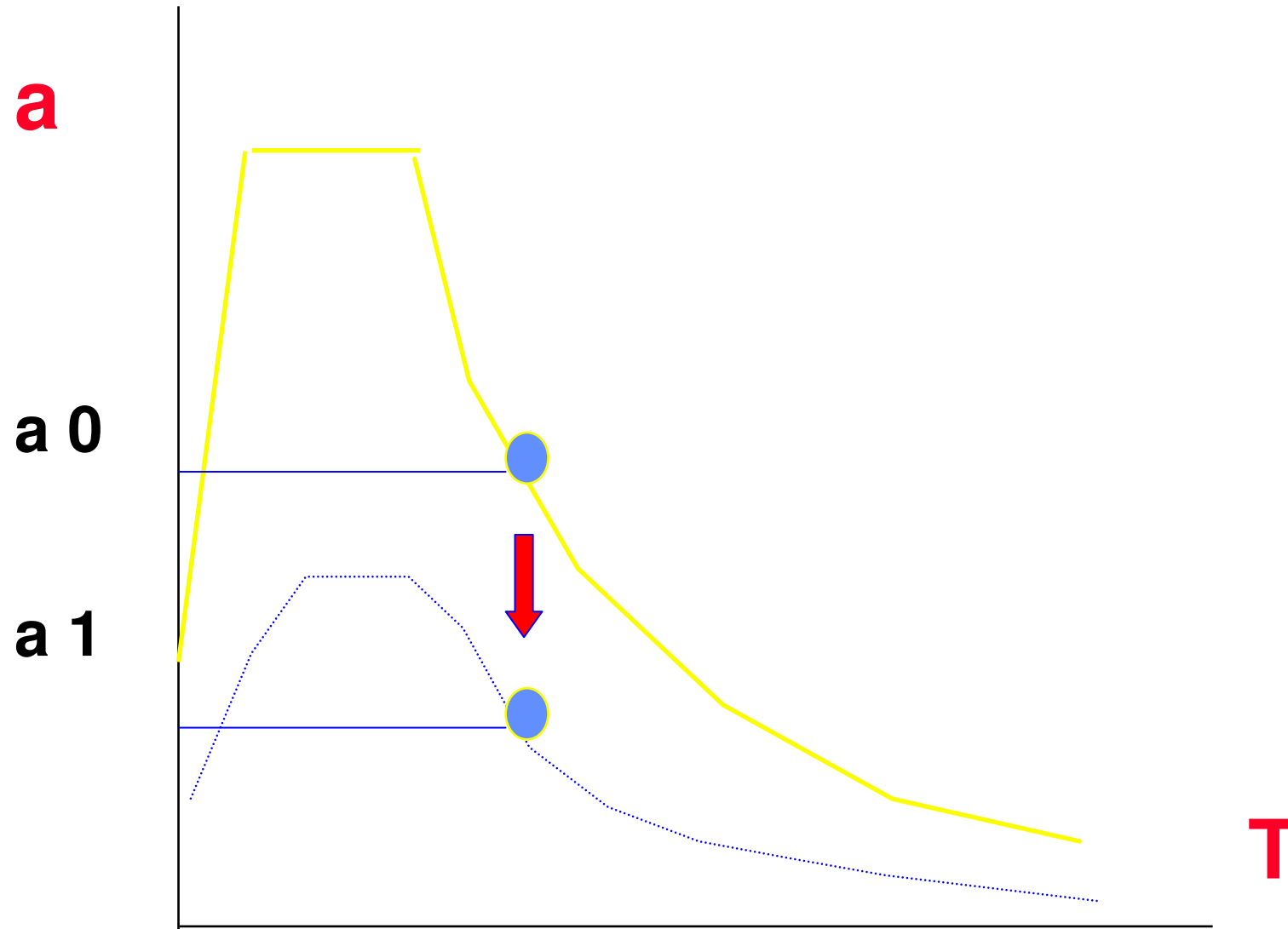
- Isolateur à déformation (à gauche) et groupe d'amortisseurs hystérétiques (barres d'acier doux, à droite).



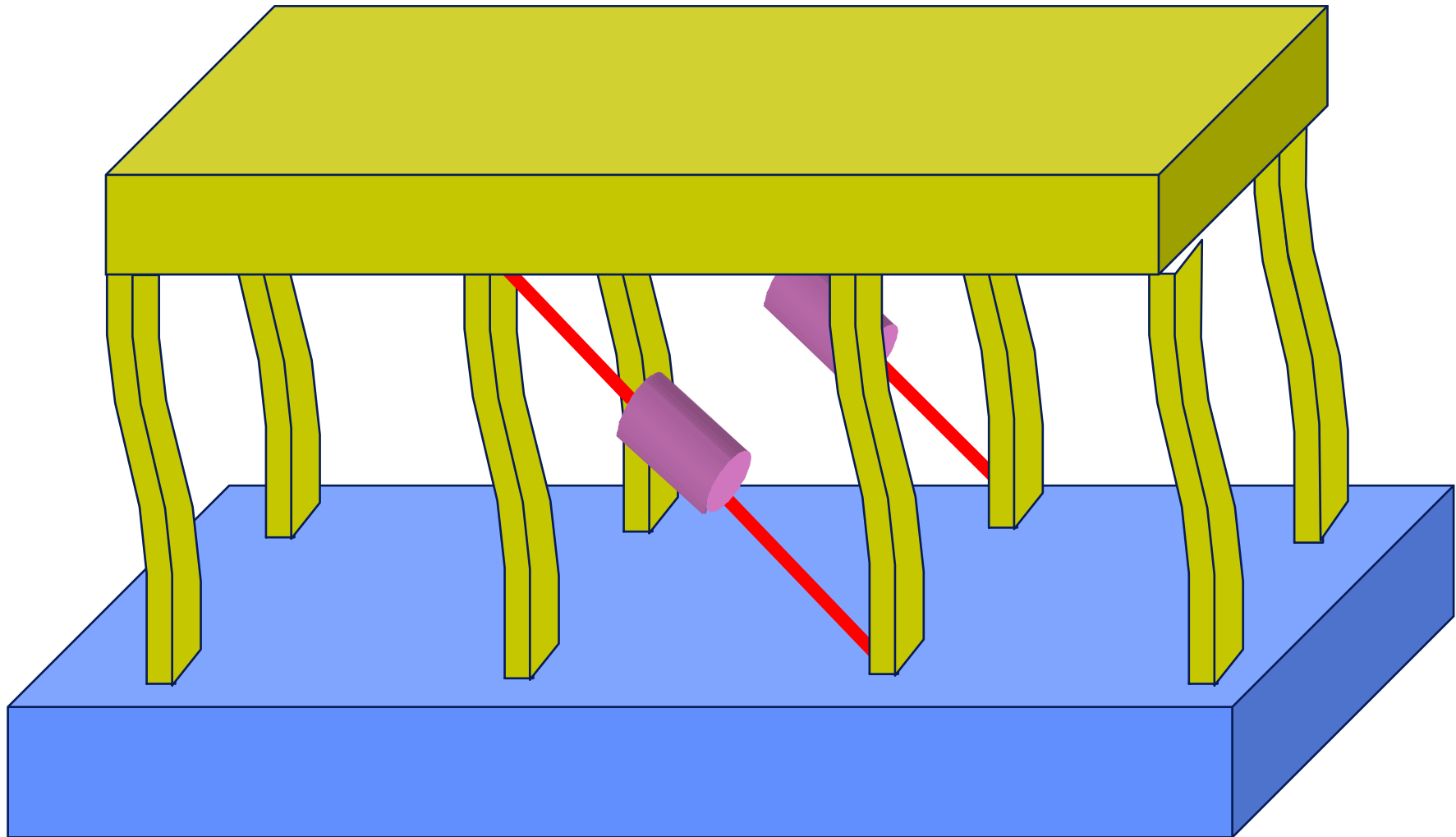
Amortisseurs

- On peut donc utiliser les déformations des structures flexibles, en y associant un système d'amortisseurs, pour dissiper de l'énergie et réduire des déplacements, tout en maintenant celles-ci dans le domaine élastique.
- On associe des amortisseurs aux isolateurs à ces fins.

Amortissement



Amortissement



Amortisseurs hystérétiques



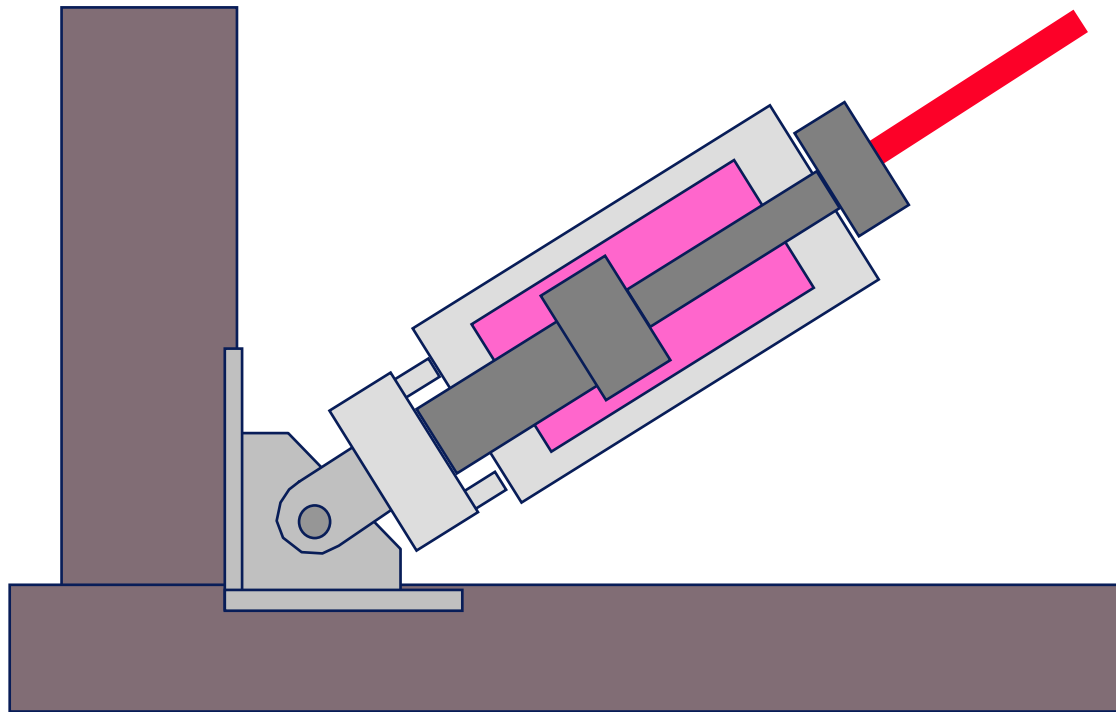
Amortisseurs visqueux



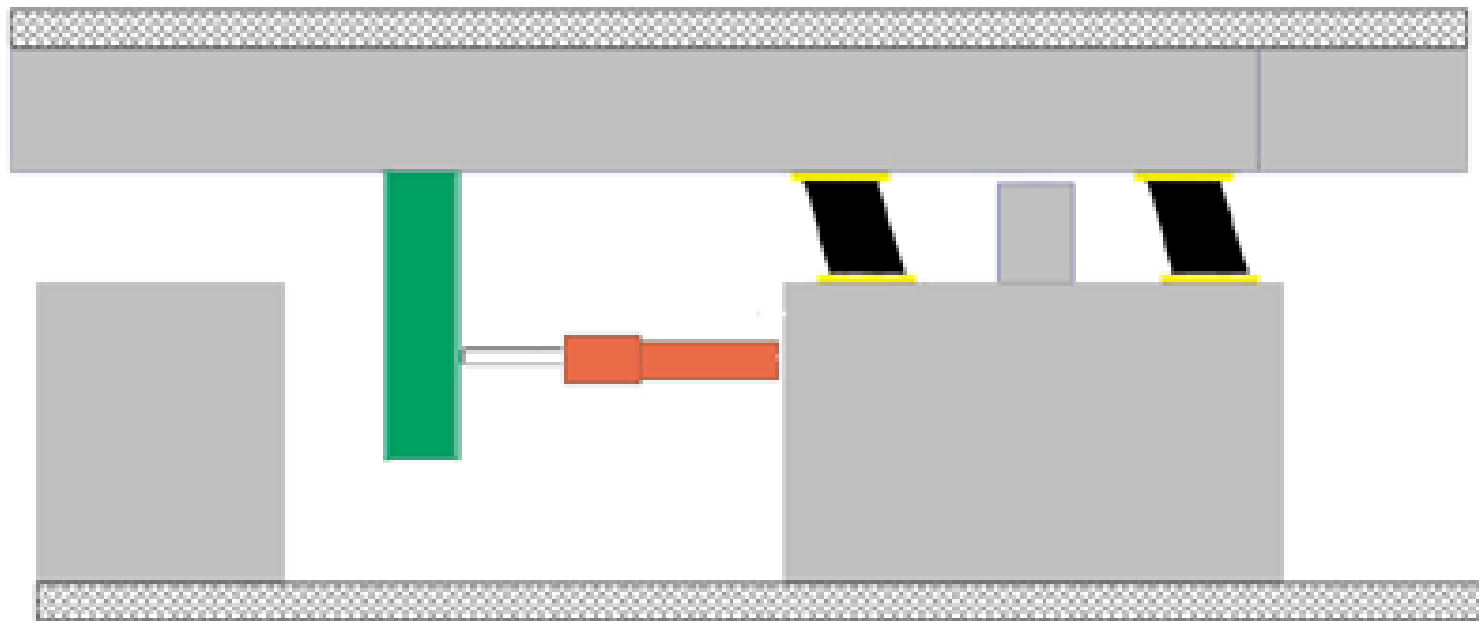
Amortisseur à frottement



Amortisseur sur diagonale



Amortisseur avec isolateurs



Séisme

