

**Journée d'étude "Dimensionnement
sismique des fondations"
Bruxelles 15/03/2018**

**Cadre réglementaire Belge et
principes de conception**

Hervé Degée, André Plumier



UHASSELT

KNOWLEDGE IN ACTION

Conditions d'applications de l'EC 8 en Belgique

Statut de l'Eurocode 8 en Belgique:

Comme toutes les autres normes de construction

= état de l'art technique que les concepteurs ne sont pas censés ignorer

= pas d'obligation légale d'application

EN 1998-5: "Calcul des structures pour leur résistance aux séismes – partie 5: Fondations, ouvrages de soutènement et aspects géotechniques"

L'annexe nationale Belge valide l'ensemble des valeurs recommandées pour les paramètres dont le choix peut être fixé au niveau national

→ Contenu:

- Propriétés du sol
- Prescriptions relatives au choix du site et aux sols de fondations
 - Choix du site (y.c. stabilité des pentes et risque de liquéfaction)
 - Reconnaissance et études de sol
- Systèmes de fondations et interactions sol-structure
- Ouvrages de soutènement

+ compléments pratiques dans des annexes normatives ou informatives

Conditions d'applications de l'EC 8 en Belgique

Notion de sismicité très faible, faible et modérée

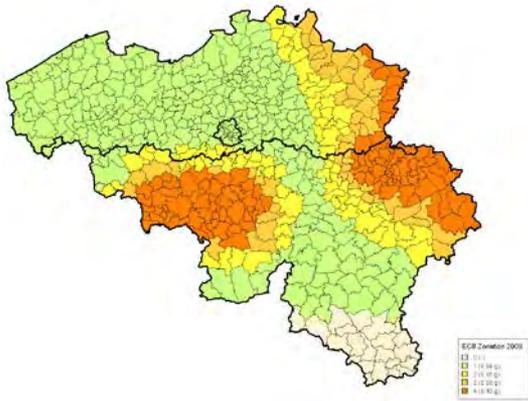
Basée sur le produit $\gamma_I a_{gR} S$:

• $\gamma_I a_{gR} S \leq 0.06$ g **Sismicité très faible** → action négligeable

• $\gamma_I a_{gR} S \leq 0.10$ g **Sismicité faible** → DCL (ou DCM)

• $\gamma_I a_{gR} S > 0.10$ g

Sismicité modérée → DCM recommandé



$\gamma_I = 1.0$		Sol				
		A	B	C	D	E
Zone	a_g [g]	$a_g S$				
0	0.00	Green	Green	Green	Green	Green
1	0.04	Green	Green	Green	Yellow	Yellow
2	0.06	Green	Yellow	Yellow	Red	Yellow
3	0.08	Yellow	Red	Red	Red	Red
4	1.00	Yellow	Red	Red	Red	Red

!!! **Obligation de vérifier au séisme** \neq **le séisme est dimensionnant**

(Effet de la masse de la structure, dimensionnement au vent...)

L'interaction sol – structure et son influence sur les sollicitations

Deux « interactions sol – structure »

cinématique

inertielle

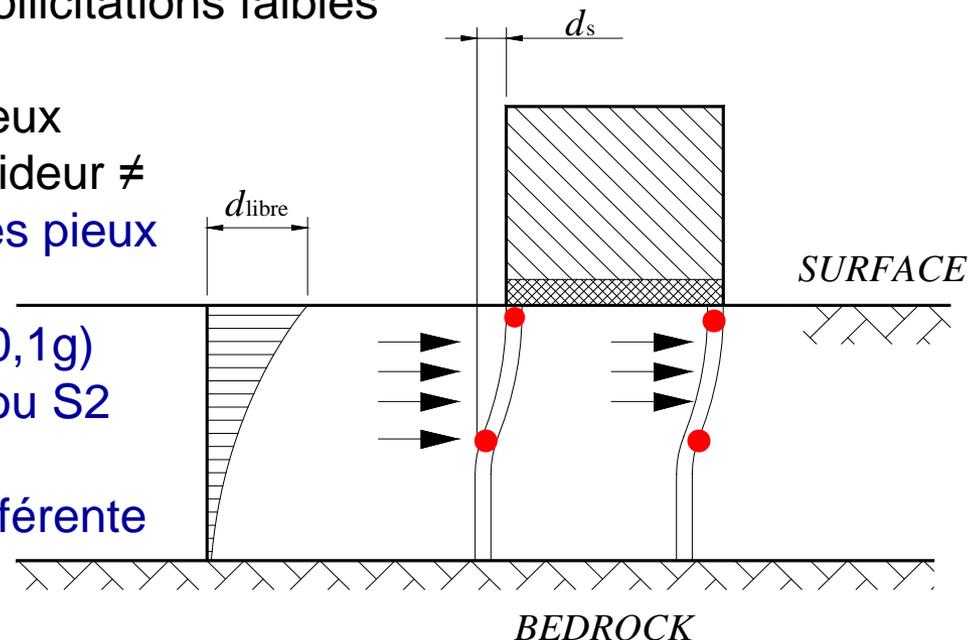
Interaction cinématique

- Séisme => Le milieu se déforme en continu
 - => mouvement sismique horizontal relatif d_{libre} entre couches basses superficielles
- Déformations \Leftrightarrow raideurs des couches de sol
- Fondation profonde : raideur différente du sol
 - => ne suit pas exactement les déformations du milieu
 - => déplacement en surface d_s est inférieur à d_{libre}
 - => sollicitations dans la fondation, dans le sol environnant et à l'interface

Si le sol est le point faible: ruptures dans le sol, excavation à l'arrière des pieux...

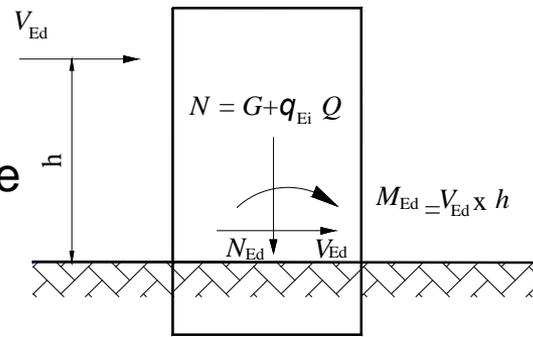
Si les pieux sont très déformables: sollicitations faibles

- Possibilité : rotules plastiques ●
 - à l'encastrement à la poutre sur pieux
 - aux interfaces entre couches de raideur \neq
- Effets d'interaction cinématique sur les pieux à évaluer si:
 - sismicité modérée à forte ($a_g S > 0,1g$)
 - et ● sol de profil stratigraphique D, S1 ou S2 avec $v_s < 200$ m/s
 - et ● couches successives de rigidité différente rapport des modules $G > 6$



Interaction inertielle

= déformation sous les forces d'inertie



Séisme => sollicitations M_{Ed} V_{Ed} N_{Ed} appliquées à la fondation par les forces d'inertie calculées au départ du spectre de réponse $V_{Ed} = m S_d(T) \lambda$
=> Déformations du sol et des fondations (Ex.: déformation axiale des pieux)
=> La liaison de la structure à la fondation n'est pas un encastrement rigide

Effet de cette déformabilité :

Période fondamentale T_{st+s} (structure + sol) $>$ T_{st} (structure encastree)

Forme des spectres de réponse => $T \uparrow \Leftrightarrow$ sollicitations \downarrow

=> Codes: l'évaluation de la réponse des structures négligeant l'interaction sol – structure place en sécurité

Mais $T \uparrow$ => déplacements \uparrow de la structure par rapport au sol

=> **EC8** prescrit de considérer l'interaction inertielle dans les structures :

- où l'effet $P-\Delta$ est important
- avec des fondations massives ou profondes: silos, caissons offshore
- élancées
- fondées sur des sols très mous (classe S1 vitesse ondes de cisaillement $v_s < 100$ m/s)

L'interaction sol – structure et le projet

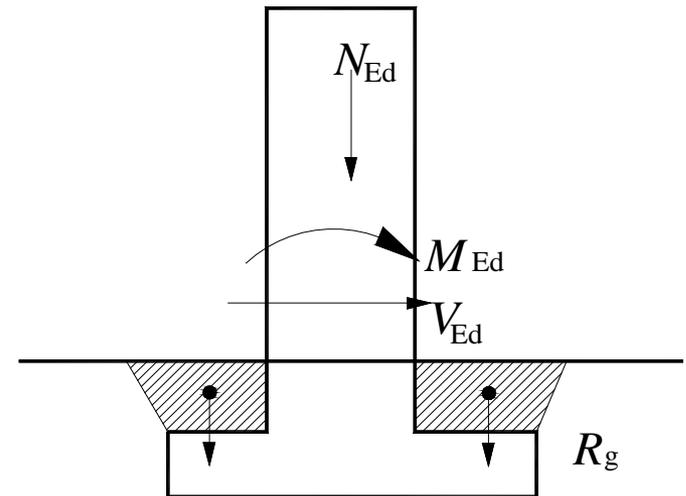
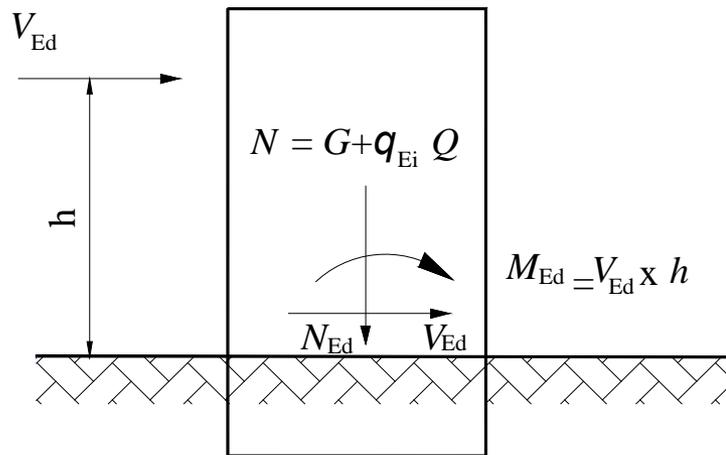
- Interaction sol - structure négligée
 - pour les bâtiments courants
 - construits sur des sols de qualité normale types A, B, C, D, E
 - Sols de type S1 & S2 => études spécialisées
 - Remarque

Les propriétés des sols pour l'analyse n'ont pas une valeur unique et précise:

 - incertitudes sur la représentativité d'un échantillon pour caractériser un volume
 - incertitudes des méthodes expérimentales de détermination des propriétés
 - module de cisaillement G d'un sol pour l'analyse :
 - G sécant, dépend de l'importance des déformations du sol, non connues
 - incertitude sur l'amortissement à attribuer au sol
- ⇒ L'analyse de l'interaction sol – structure doit couvrir raisonnablement le domaine des valeurs possibles des paramètres sol

Sollicitations à la fondation

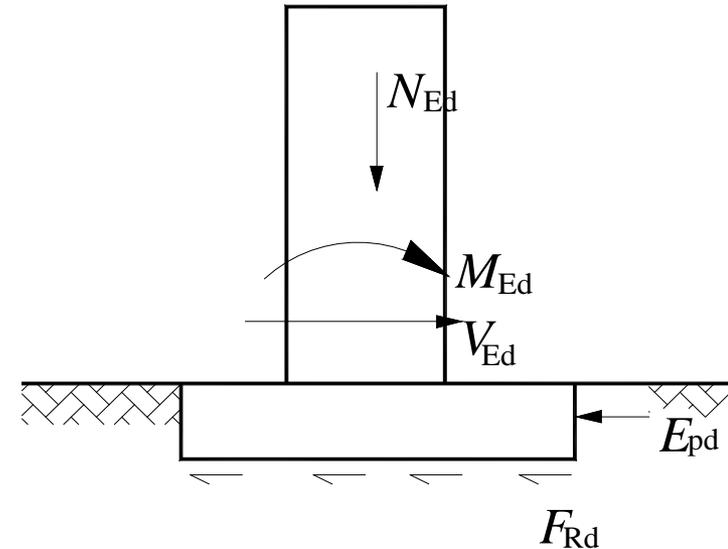
- Trouvées en retenant comme masse sismique $m = G + \psi_{Ei} Q$
- Les fondations d'un bâtiment doivent transférer vers le sol :
 - la résultante sismique de cisaillement horizontal de calcul V_{Ed}
 - le moment de renversement $M_{Ed} = V_{Ed} \times h$
 - la résultante verticale $N_{Ed} = G + \psi_{2i} Q$
- Les sollicitations de calcul N_{Ed} et M_{Ed} appliquées à la fondation comprennent éventuellement l'effet du poids R_g de massifs de sol portés par la fondation



- Sollicitations sismiques de calcul des fondations :
 - V_{Ed} et M_{Ed} résultent d'un dimensionnement en capacité qui se réfère à la **résistance plastique** de la superstructure $E_{Fd} = E_{F,G} + \gamma_{Rd} \Omega E_{F,E}$
 - plafonnées à celles correspondant à l'hypothèse du comportement élastique de la structure $q = 1,0$

Résistances offertes à la fondation

- Le transfert global de N_{Ed} V_{Ed} M_{Ed} à la fondation dépend du :
 - système de contreventement en superstructure :
 - portiques
 - murs
 - palées triangulées
 - sol: capacité portante faible ou élevée disponible en surface ou en profondeur
 - système de fondations :
 - directe sur semelles
 - niveaux de sous-sol & murs périphériques
 - planchers diaphragmes et voiles
 - pieux en compression/traction
 - parfois flexion
 - butée latérale présente ou non



● **Résistances offertes à la fondation**

pour la reprise du cisaillement horizontal V_{Ed} :

- frottement F_{Rd} à l'interface horizontale béton – sol
- frottement latéral des faces verticales de la fondation parallèles à V_{Ed}
- butée E_{pd} si sol mobilisé compact le long de la face verticale
partie supérieure des pieux

[coefficient de poussée des terres passives K_p]

- Addition de toutes les réactions possibles en valeur max : **non**

Eurocode 8 : maximum combiné frottement + butée = $F_{Rd} + 0,3 \times E_{pd}$

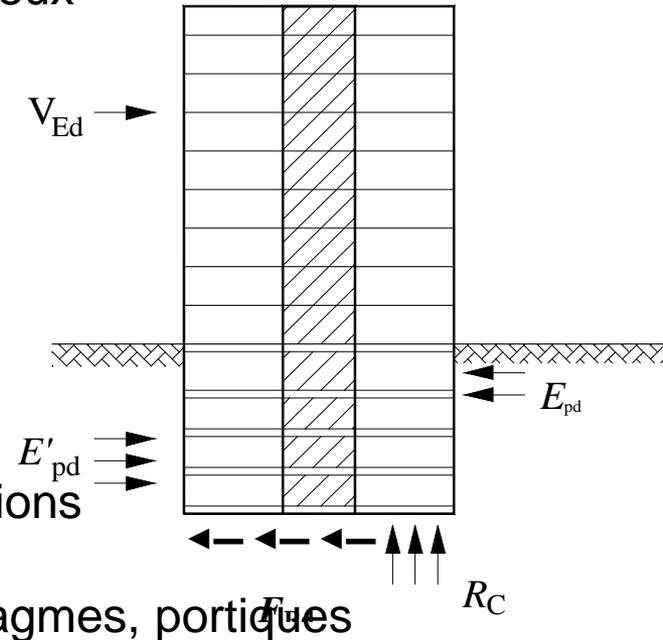
Pour des semelles, si compactage du remblai : = $F_{Rd} + E_{pd}$

ou coulage de la semelle contre une surface verticale propre de sol

Reprise du moment de renversement $M_{Ed} = V_{Ed} \times h$ et de la résultante N_{Ed}

• Résistances offertes à la fondation pour la reprise de M_{Ed}

- compressions verticales résistantes excentrées R_C sous la fondation
- moment engendré par les forces verticales de calcul résultant du frottement entre le sol et les parois des fondations enterrées et profondes parois de la « boîte » de fondation, caissons, puits, pieux
- moment engendré par la force horizontale de calcul du frottement entre le sol et les parois des éléments de fondations profondes: pieux, caissons
- moment engendré par les butées E_{pd} et E'_{pd} réalisées à des niveaux décalés
significatif si la « boîte » est plus profonde que large



• Infrastructure « boîte » de fondation : sollicitations fonctions

- des éléments structuraux:

murs latéraux, murs et noyaux intérieurs, diaphragmes, portiques

- de la raideur des couches de sol => très hyperstatique
- Approche: « boîte » de fondation rigide

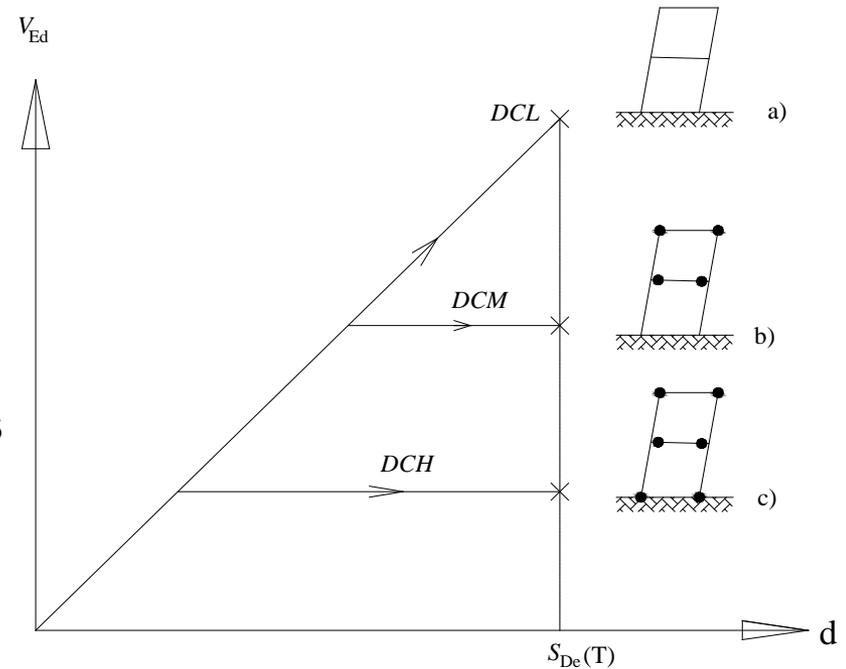
solution statiquement admissible : V_{Ed} , M_{Ed} , N_{Ed}

équilibré par des distributions de contraintes admissibles à la fondation

Options de projet

Rappel

- Structure ou infrastructure dissipative
=> fondation plus économique
 - Modélisation du sol par
 - des ressorts
 - des éléments finis
- => Meilleure connaissance des distributions réelles de contraintes au sol
- => Prise en compte de l'interaction inertielle



Superstructure	Infrastructure	Implications
Non dissipative Option 1 OK EC8	Non dissipative	Superstructure & infrastructure vérifiées sous les sollicitations définies par l'analyse. Sollicitations en fondations les plus élevées.
Dissipative $q > 1,5$ Option 2 OK EC8	Non dissipative	Infrastructure vérifiée sous des sollicitations > établies par l'analyse Sollicitations au sol plus réduites que dans option 1
Non dissipative Option 3 non EC8!	Dissipative	Sollicitations au sol plus réduites que dans option 1. Si les éléments structurels dissipatifs sont inaccessibles, problème d'évaluation de leur état après séisme
Dissipative Option 4 non EC8!	Dissipative	C'est pour la capacité plastique de l'ensemble infra et superstructure que les contraintes au sol sont à vérifier.
Superstructure peu dissipative. Soulèvement Transitoire Option 5 OK EC8	peu dissipative. Soulèvement Transitoire	Cas du « rocking » (balancement). Eurocode 8 : murs de grandes dimensions faiblement armés Approches explicites par analyse dynamique non linéaire ou par analyse en poussée progressive.

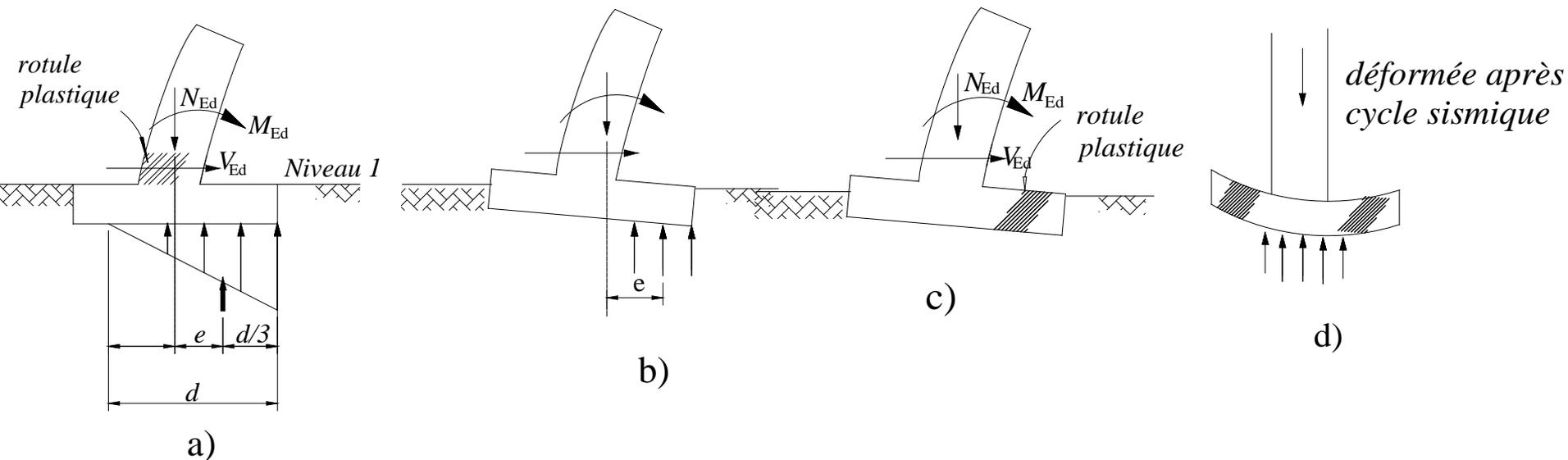
Fondations directes des ossatures en portique

Semelles isolées.

3 modes de réaction élastique du sol

M_{Ed} N_{Ed} V_{Ed} équilibrés par:

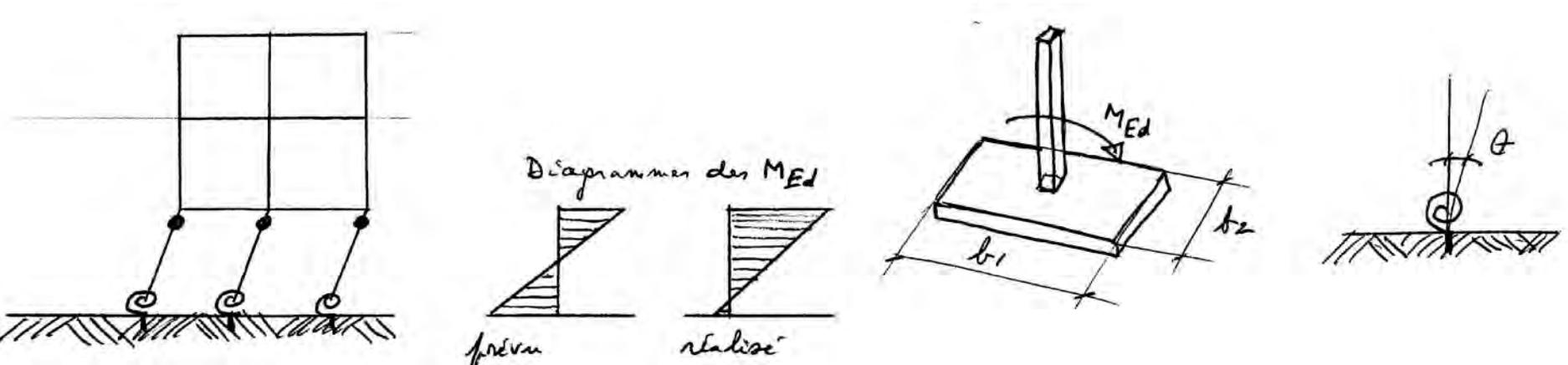
- un trapèze de contraintes résultante excentrée $e = M_{Ed} / N_{Ed}$
poteau dissipatif ou non, semelle élastique.
- un triangle de contraintes; résultante excentrée hors du noyau central
soulèvement partiel de la semelle; poteau dissipatif ou non
contraintes au sol plus élevées ; possibilité de tassements non symétriques
possible déformations permanentes du sol, surtout si semelles dissipatives
distribution modifiée des contraintes sous charge gravitaire



Fondations directes des ossatures en portique

Semelles isolées

- Sol non infiniment raide => rotation de la semelle sous M_{Ed}
 - ⇒ pas d'encastrement parfait
 - ⇒ diagramme des moments dans le poteau modifié
 - ⇒ effet $P-\Delta$
 - ⇒ risque de rotule plastique en tête du poteau
 - ⇒ possible mécanisme de ruine locale « étage mou »



- Possibilité de modéliser l'encastrement semi – rigide par un ressort de rotation

Raideur \Leftrightarrow module de déformation k du sol :

$$\theta = 1 / \rho = M / k l = M / K \Rightarrow K = k l$$

$$l = b_2 \times b_1^3 / 12 \quad (k \text{ en MPa})$$

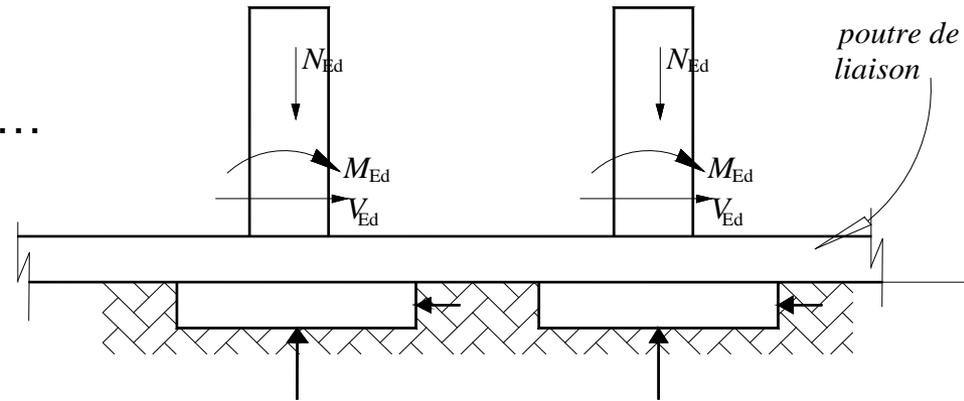
Fondations directes des ossatures en portique

Les semelles doivent être reliées par des poutres ou longrines

- Objectif: éviter le déplacement relatif des semelles et l'effet induit en superstructure
 - Favorable : poutre de liaison raide
 - Les semelles transmettent N_{Ed} et V_{Ed} M_{Ed} est équilibré par la poutre
- ⇒ évite la reprise de moments de flexion importants par le sol de fondation
⇒ réduit les incertitudes sur la reprise de la flexion par le sol
- dépend de la distance entre semelles...

EC8:

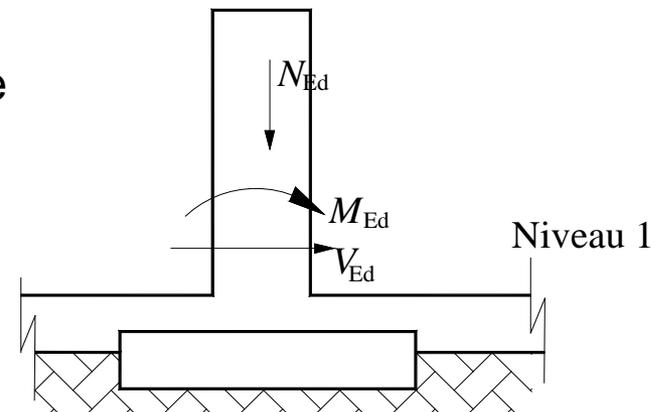
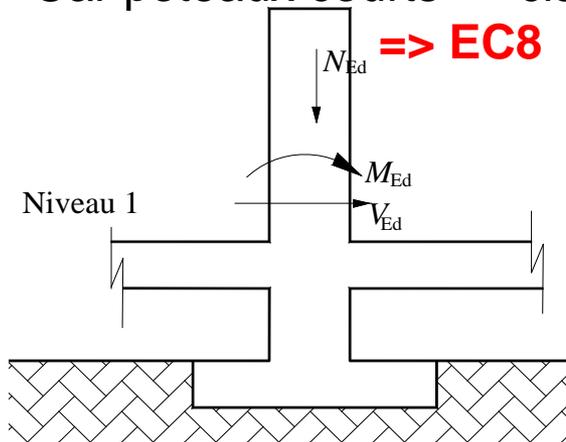
$N_{longrine}$ sol de classe D: $\pm 0,6\alpha \cdot S \cdot N_{Ed}$



- **Interdit** : poteaux courts entre face sup. semelle et face inf. poutre

Car poteaux courts \Leftrightarrow cisaillement important

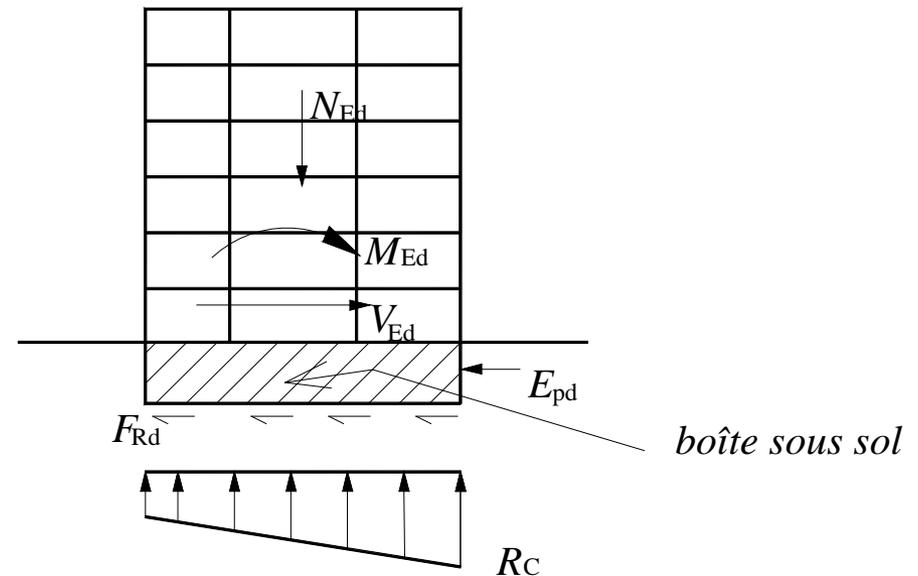
=> EC8 face inf. des poutres
sous face sup. semelle



Infrastructure comportant des niveaux en sous sol

- **Solution idéale** pour la reprise des sollicitations en pied des portiques
 si sous sol = boîte raidie par
 - murs périphériques
 - radier
 - planchers diaphragmes
 - murs & voiles intérieurs

=> portiques encastrés



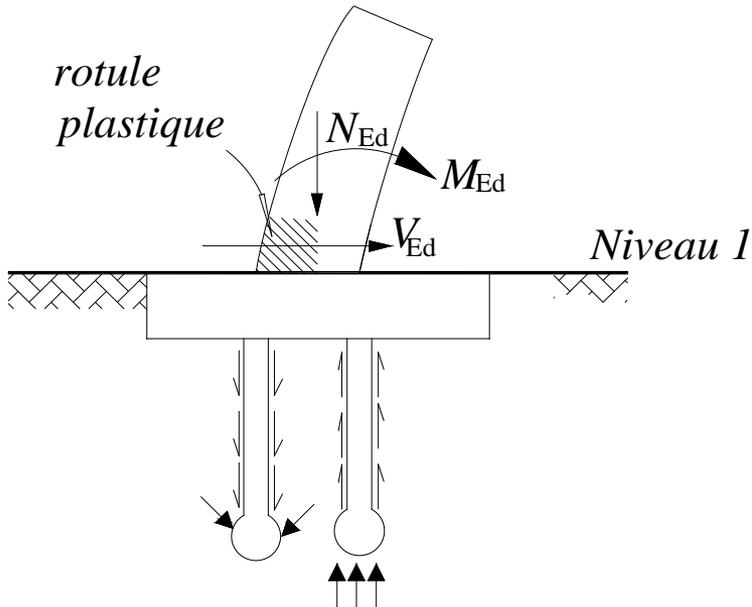
- Contraintes au sol déduites directement de M_{Ed} N_{Ed} V_{Ed} d'ensemble du bâtiment
 « boîte sous sol » = « grosse semelle »

$$b_x \quad b_y \quad A = b_x b_y \quad W = I/v = b_y b_x^2 / 6 \quad \sigma_c = N_{Ed} / A + M_{Ed} / W$$

Fondations sur pieux

• Dimensionnement capacitif des pieux

- dissipation d'énergie dans la superstructure
- éviter un état limite ultime dans les pieux
 - ▶ étirement plastique des pieux en traction
 - => compressions élevées au renversement d'effort
 - => armatures de confinement importantes
 - ▶ épuisement de la résistance latérale à l'interface sol-pieu
 - => perte de résistance en traction
 - => stabilité globale de la structure en danger :
basculement, enfoncement
 - ▶ incertitudes après séisme sur la situation réelle des pieux



Pieux dans un sol multi - couches

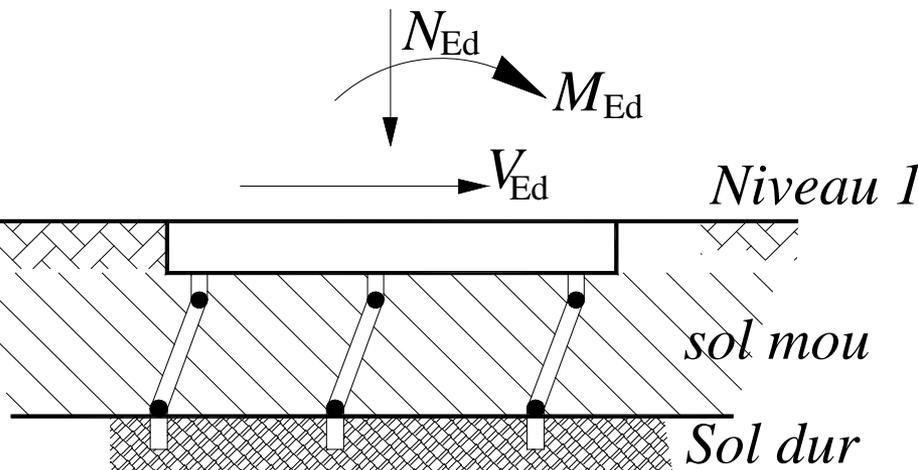
Sollicitations difficiles à estimer, car le pieu est:

- sollicité par un cisaillement horizontal V_{Ed} et un moment de flexion M_{Ed}
- appuyé latéralement sur les différentes couches de sol
- sollicité par des déplacements horizontaux différentiels entre points haut et bas de chaque couche
- sollicité par des déplacements horizontaux différentiels entre les couches de sol

Situation où les pieux traversent une couche de sol mou et se fichent dans un sol dur

Rotules plastiques possibles

- à l'encastrement à la semelle sur pieux
- à chaque interface entre couches de sol



=> **EC8** Armatures transversales de confinement type zones critiques des poteaux

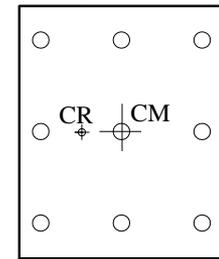
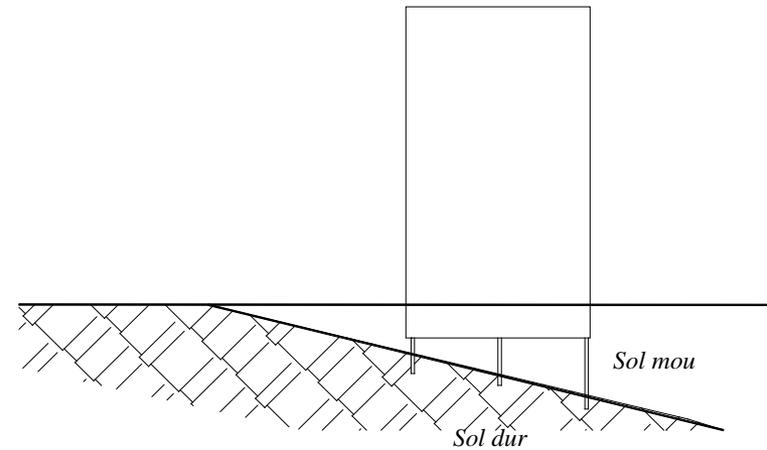
Zones critiques:

- ▶ sommet du pieu sur $2d$ à partir de la face inférieure de la semelle sur pieu
- ▶ zones sur $2d$ de part et d'autre des interfaces entre couches de sol de rigidités au cisaillement sensiblement différentes (rapport des $G > 6$)

Pieux dans des couches de sol inclinées

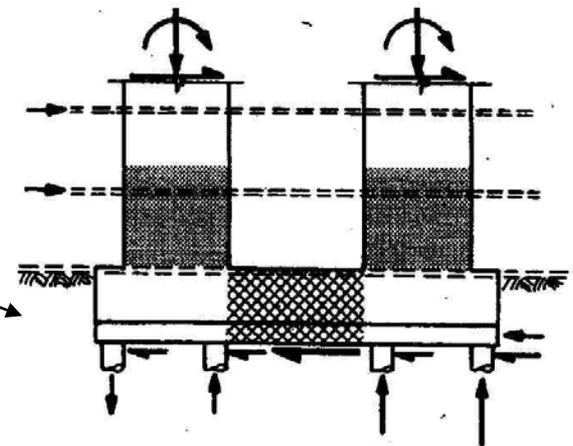
Longueur et donc flexibilité des pieux varient

- ⇒ centre de raideur CR de la fondation
≠ du centre de gravité CM de la structure
- ⇒ torsion influençant la force de cisaillement
en tête de chaque pieu



Conclusions relatives à la conception de structures sur pieux

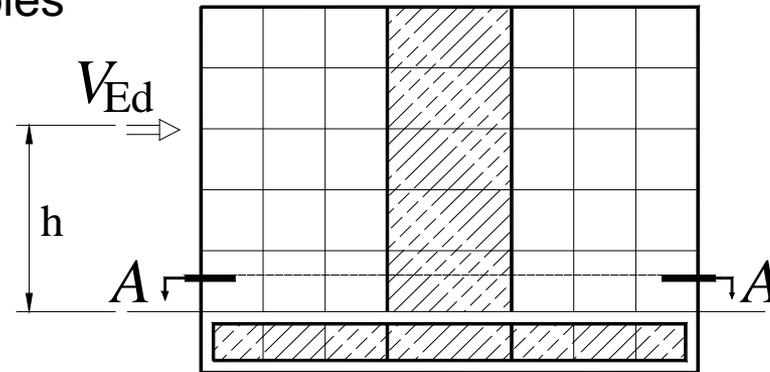
- réaliser la superstructure la plus dissipative possible
afin de réduire les sollicitations à la fondation
- si plusieurs semelles sur pieux
les associer pour
élargir la base
réduire les sollicitations par pieu



Discussion de la conception de l'infrastructure

Fondation d'un voile de contreventement ductile par une poutre en sous sol

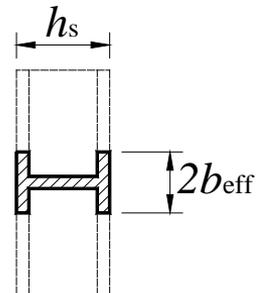
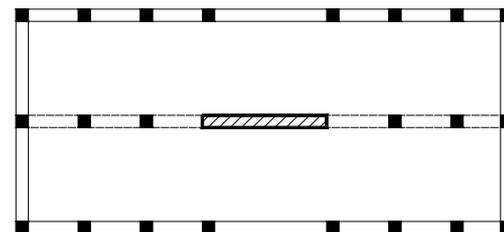
- Solution la plus efficace pour la reprise de M_{Ed} N_{Ed} V_{Ed}
une poutre horizontale raide utilisant la hauteur du niveau sous sol du bâtiment
- Transmission directe du moment de flexion
- Similaire à une jonction poutre poteau de portique pivotée de 90°
une âme : le mur en béton armé du sous sol
2 ailes : les planchers diaphragmes largeur participante $2 b_{eff}$
- Vérification en poutre OK
si ouvertures dans l'âme négligeables



- Si raideur du sous sol apportée aussi par voiles portiques
murs périphériques

⇒ modèle numérique nécessaire pour établir contraintes et déformations

Coupe AA



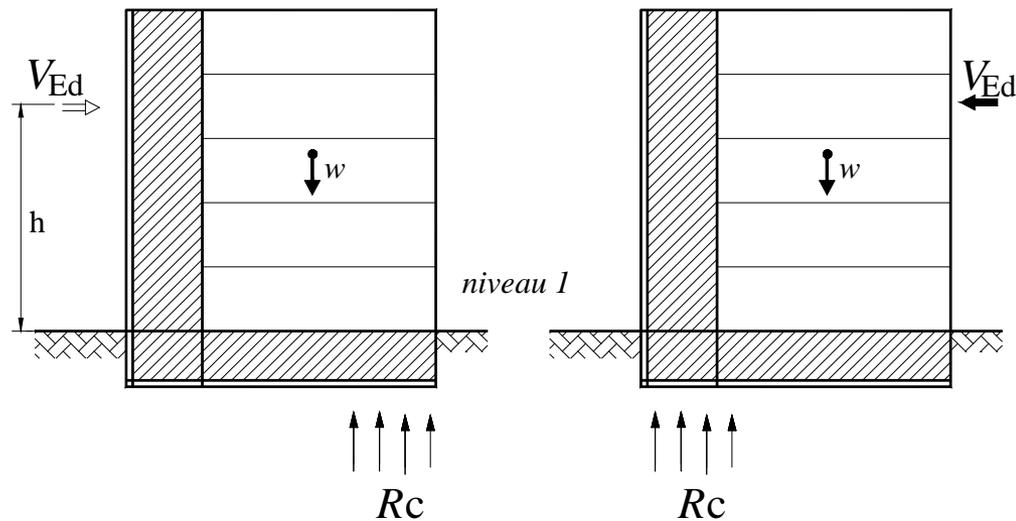
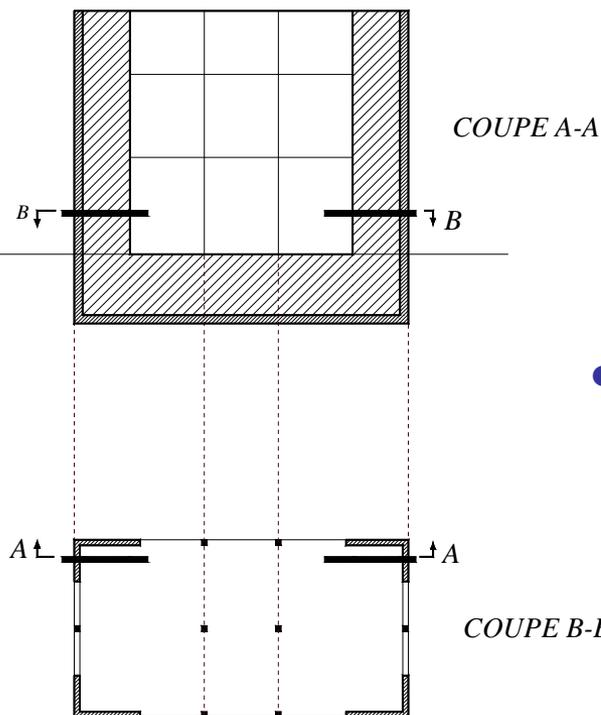
Discussion de la conception de l'infrastructure

Fondation d'un voile de contreventement ductile par une poutre en sous sol (suite)

- Une poutre en sous sol est nécessaire pour un voile proche de la limite de propriété
- Cas courant: cages d'escalier, ascenseur en périphérie

- Poutre horizontale en sous sol

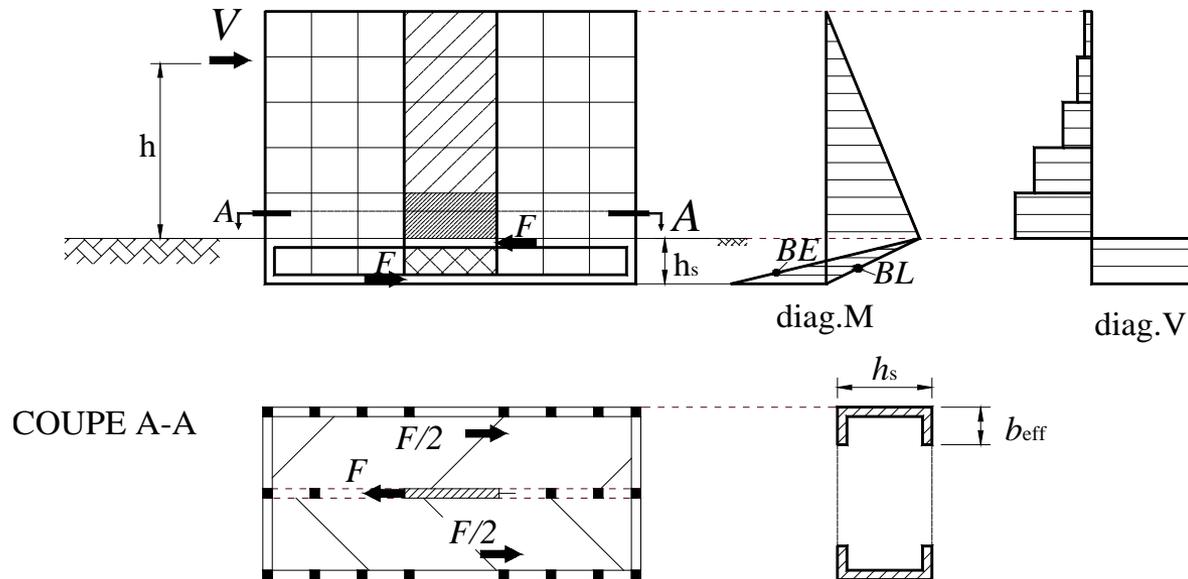
=> reprise de $M = V_{Ed} h$
pour V_{Ed} dirigé à droite
à gauche



- Circonstance où la fondation d'un voile est automatiquement assurée par des poutres horizontales sans ouverture en sous sol:
 - ▶ voiles en façade des bâtiments
 - encastés aux murs périphériques du sous sol

Encastrément du voile contreventement par les planchers du sous sol

- Sous sol avec murs périphériques
=> Transmission du $M_{\text{ped de voile}}$ vers les murs périphériques
- Le voile, poutre verticale, a 2 appuis horizontaux sur les diaphragmes sup et inf
=> Couple de forces $F \Rightarrow M = V_{\text{Ed}} h$
- Vérif: les diaphragmes peuvent assurer le transfert de F vers les murs périphériques
Note: $F \gg V_{\text{Ed}}$ Au niveau 1: $F = V_{\text{Ed}} \times (h / h_s)$
- Diaphragmes : flexibles F : long chemin => diaphragmes \neq appuis fixes
=> rotation en pied du voile
- La raideur du radier influence le diagramme des M_{voile} sur la hauteur du sous sol



Symboles

BE Base Encastrée

BL Base Libre en rotation

Encastrement d'un voile interrompu au dessus de l'infrastructure.

Moment de flexion en pied de voile: équilibré par l'ensemble de l'infrastructure

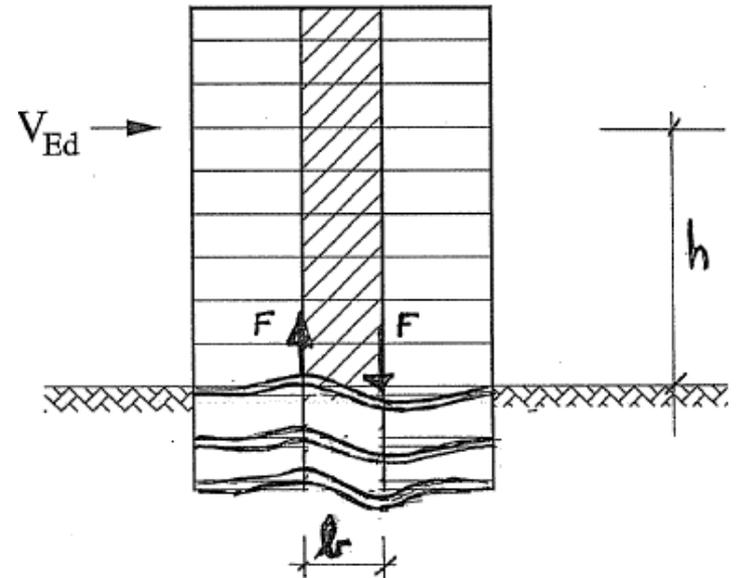
⇒ forte épaisseur de radier peut être nécessaire

⇒ déformations de flexion des planchers du sous sol et du radier

⇒ modèle numérique nécessaire

pour établir les sollicitations des éléments de l'infrastructure

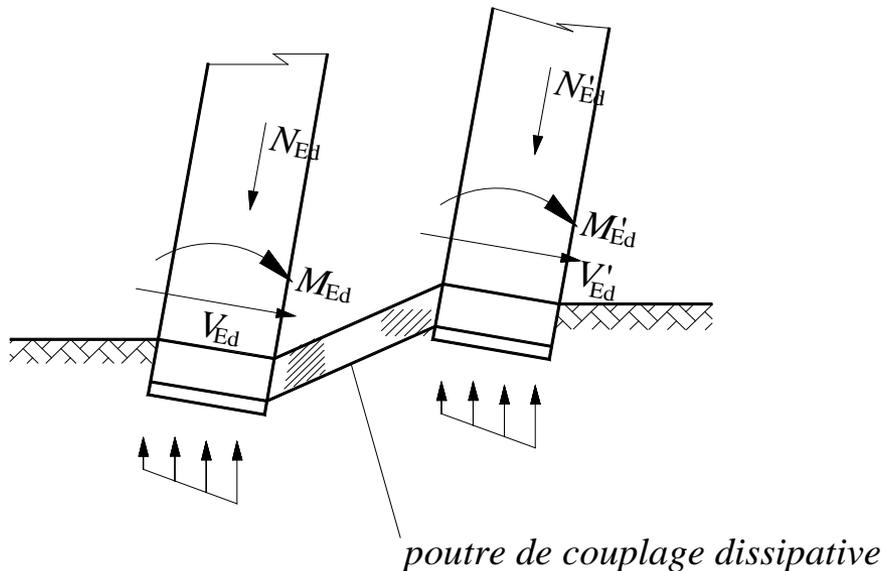
Les forces F :
 $F \gg V_{Ed}$
 $F = V_{Ed} \times (h / b)$



Poutres de fondation dissipatives

Non EC8

- Si la résistance en flexion des contreventements est très élevée à cause de dispositions architecturales
règles sur armature minimum, limitation de flexibilité, ...
possibilité de zones dissipatives dans les poutres de couplage de pied de voile
- A étudier : la rotation en base des contreventements
correspondant aux déformations de la poutre de couplage
la distribution des contraintes au sol dans la situation déformée



Infrastructure et joint de dilatation.

Grands immeubles => joints de dilatation souvent nécessaires en superstructure

Pour les sollicitations sismiques : ne pas prolonger ce joint en infrastructure
=> large base => contraintes au sol réduites

Note : disposition obligatoire en Algérie

Pour éviter les fissurations de retrait en infrastructure :
claver le joint d'infra en phase finale

