Journée technique du CFMS du 5 décembre 2017

« Pratique de l'interaction sol-structure sous sollicitations statiques et sismiques »

La pratique de l'ISS selon le point de vue de l'ingénieur structure : fondations superficielles et profondes

Présentateur : Gurvan SAYER (CTE Paris)

Contenu

- Introduction
- Ouvrages sur pieux
- Ouvrages sur semelles superficielles
- Ouvrages sur radier
- Conclusions

Introduction

La prise en compte de l'ISS dans le calcul sismique de l'ouvrage va modifier sa réponse globale :

1. Assouplissement du système ;
2. Modification de l'analyse modale ;
3. Prise en compte de l'amortissement du système de fondation.

L'assouplissement du système est souvent synonyme de diminution des efforts, mais le 2ème point est souvent oublié dans les conséquences de l'ISS et peut même engendrer une augmentation des efforts.

Introduction

Lors de l'utilisation de la méthode sismique de référence, l'analyse modale spectrale, la question du coefficient de comportement doit être posée:

1. As-t-on un mode de sol dominant ?
2. La structure est elle suffisamment souple pour assurer de la dissipation d'énergie ?

De plus cette méthode ne permet pas de tenir compte d'effet non linéaire comme :

1. Radiers et fondations superficielles : possibilité de décollement.
2. Pieux : raideurs différentes en traction et en compression, variation de la raideur horizontale en fonction de la plage d'effort.

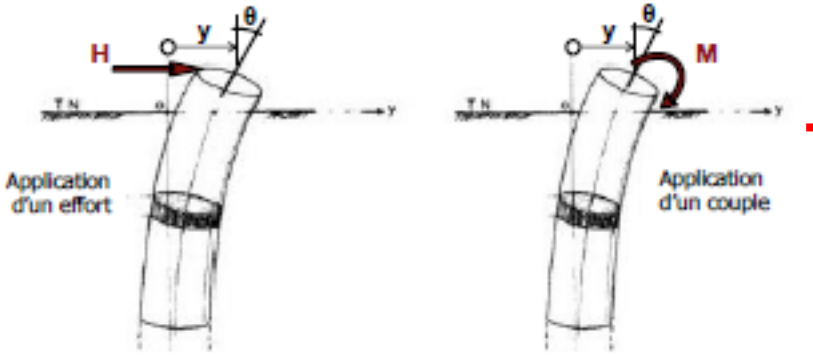
Ouvrages sur pieux

Incidence de la prise en compte de l'ISS

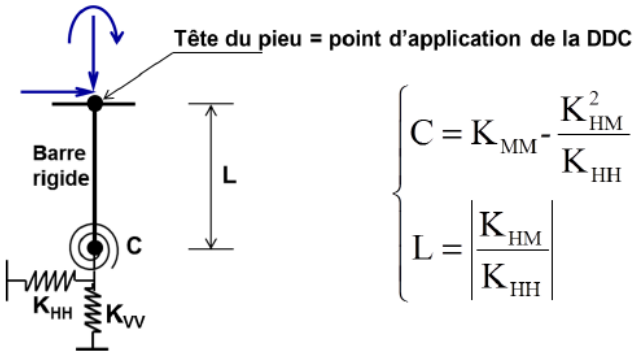
- Modification du comportement de l'ouvrage supporté ;
- Modélisation du système pieux-sol à la liaison avec la structure ;
- Atténuation des « pics » d'efforts verticaux ;
- Comportement non linéaire en traction / Compression du pieu.

Ouvrages sur pieux

Type de modélisation (cahier technique n°38)



$$\begin{pmatrix} K_{HH} & K_{HM} \\ K_{MH} & K_{MM} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} y \\ \theta \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} H \\ M \end{pmatrix}$$

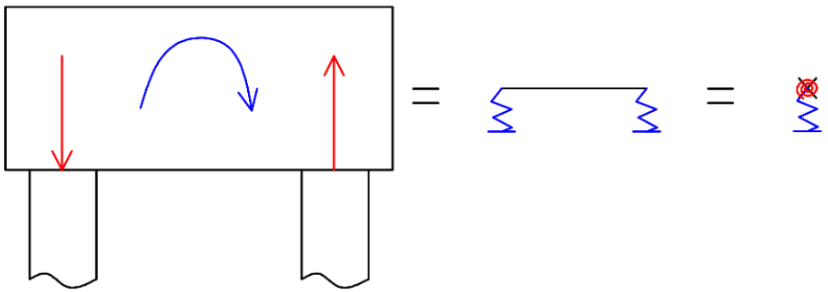


$$\begin{cases} C = K_{MM} - \dfrac{K_{HM}^2}{K_{HH}} \\ L = \left| \dfrac{K_{HM}}{K_{HH}} \right| \end{cases}$$

Ouvrages sur pieux

Type de modélisation : cas des groupes de pieux

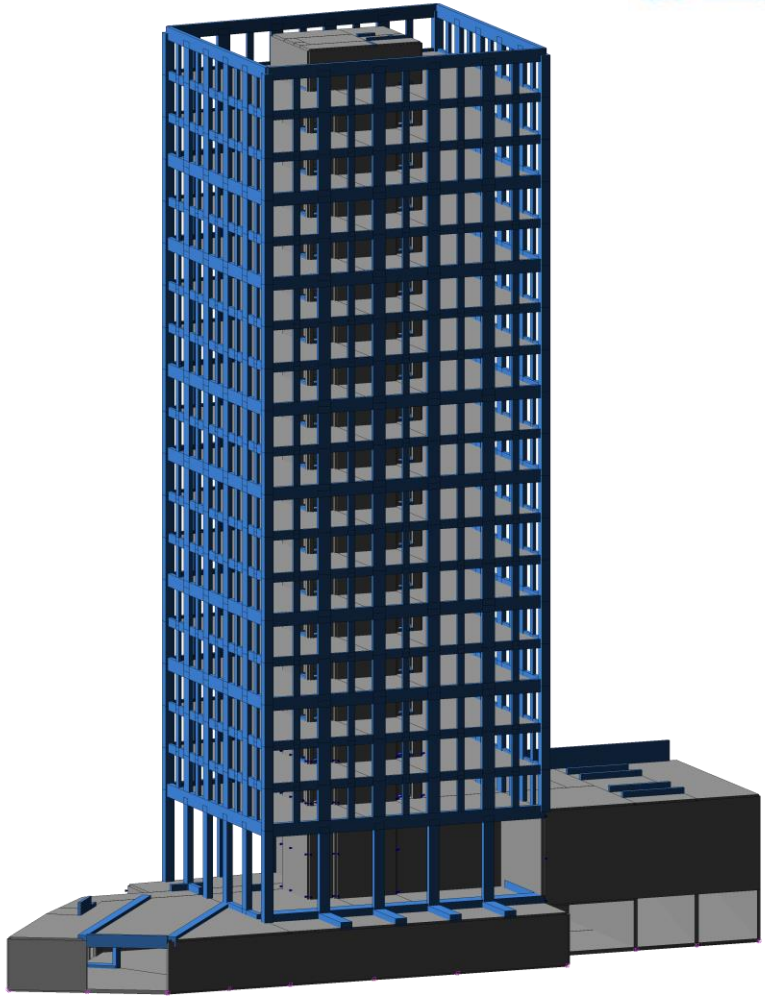
- Modélisation de chaque pieux
- Modélisation d'un seul appui regroupant les pieux :
  - Attention dans ce cas à l'effet de blocage en rotation engendré par le bras de levier entre pieux :



  - Un moment supplémentaire, se décomposant en effort de traction-compression dans les pieux est a prendre en compte.

Ouvrages sur pieux – ex n°1

- R+18
- Socle rigide
- Structure souple du R+1 au R+18
- Contreventé par noyau



Ouvrages sur pieux – ex n°1

Comparaison des efforts globaux en têtes de pieux :

- Sans ISS Ved = 1329 t + torsion = 3,31 m
- Avec ISS Ved = 1080 t (**soit 20 % de gain**) + torsion = 4,60 m

La prise en compte de la raideur de pieux permet de diminuer les efforts globaux en pieds d'ouvrage.

Néanmoins, la torsion est quant à elle augmentée du fait de la souplesse du système de pieux.

Ouvrages sur pieux – ex n°1

Comparaison des efforts de traction maxi (exemple du séisme EX) :

- Sans ISS Ned_{max} = 500 t
- Avec ISS Ned_{max} = 220 t (les 500 t se redistribuent sur plusieurs pieux)

C'est vis-à-vis des efforts verticaux que la prise en compte de l'ISS permet de réajuster les efforts.

Les appuis fixes n'admettent pas de redistribution élastique. La mise en place d'appuis élastiques soulage la structure par la présence d'une rotation globale en pieds.

Ouvrages sur pieux – ex n°1

<u>Comparaison des efforts globaux en pieds du R+1 :</u>

- Sans ISS Ved = 860 t
- Avec ISS Ved = 883 t (soit 3 % d'augmentation)

Cet exemple permet de montrer que l'ISS n'a pas ou très peu d'incidence sur les structures souples vis-à-vis de l'effort horizontal.

Il persiste néanmoins un intérêt vis-à-vis des « pics » de traction.

Ouvrages sur pieux – ex n°1

Analyse modale:

- Amortissement de la structure : 5%
- Amortissement des pieux : 10%

Mode N°	Pulsation (Rad/s)	Période (s)	Fréquence (Hz)	Énergie (J)	Masses modales		Amort. (%)
					X T (%)	Y T (%)	
1	3.21	1.96	0.51	3.22	121.16 (1.01)	6167.75 (51.26)	**5.07**
2	3.74	1.68	0.6	3.78	5951.46 (49.46)	227.61 (1.89)	**5.11**
3	5.86	1.07	0.93	9.01	437.57 (3.64)	38.09 (0.32)	**5.08**

- La valeur de 10 % pour les pieux n'est pas retenue pour le calcul mais permet juste de conclure sur la présence ou non de mode de sol.
- Dans le cas présent les modes principaux sollicitent principalement la structure, le coefficient de comportement peut donc rester identique à celui sans ISS (la correction d'amortissement ne devra néanmoins pas être prise en compte).
- Dans le cas inverse, le coefficient de comportement doit être borné à 1,50.

Ouvrages sur pieux – ex n°2

- R+17
- Socle rigide
- Structure semi rigides du R+1 au R+17

Ouvrages sur pieux – ex n°2

Comparaison des efforts globaux en têtes de pieux :

- Sans ISS Ved = 2500 t + torsion = 2,00 m
- Avec ISS Ved = 3000 t (**soit 20 % de plus**) + torsion = 2,15 m

Dans cet exemple, l'ISS a augmenté les efforts horizontaux sur les pieux.

Ouvrages sur pieux – ex n°1

Mode N°	Pulsation (Rad/s)	Période (s)	Fréquence (Hz)	Énergie (J)	Masses modales	
					X T (%)	Y T (%)
1	8.53	0.74	1.36	23.7	7659.28 (35.37)	634.26 (2.93)
2	13.22	0.48	2.1	56.22	72.52 (0.33)	11550.10 (53.33)
3	15.3	0.41	2.43	68.05	5003.41 (23.10)	340.55 (1.57)
4	27.74	0.23	4.41	241.11	2114.10 (9.76)	59.85 (0.28)
5	35.42	0.18	5.64	351.84	1160.69 (5.36)	1606.12 (7.42)
6	39.22	0.16	6.24	445.94	554.69 (2.56)	1684.00 (7.78)
7	51.46	0.12	8.19	772.48	234.95 (1.08)	8.73 (0.04)
8	51.88	0.12	8.26	455.17	44.48 (0.21)	1.10 (0.01)
9	53.25	0.12	8.48	915.72	228.43 (1.05)	311.28 (1.44)
10	60.63	0.1	9.65	1121.6	714.32 (3.30)	592.01 (2.73)

Mode N°	Pulsation (Rad/s)	Période (s)	Fréquence (Hz)	Énergie (J)	Masses modales	
					X T (%)	Y T (%)
1	6.85	0.92	1.09	17.25	9864.11 **(45.27)**	1011.51 (4.64)
2	10.15	0.62	1.61	38.95	444.66 (2.04)	12710.89 **(58.33)**
3	12.5	0.5	1.99	51.9	3710.77 (17.03)	219.81 (1.01)
4	25.39	0.25	4.04	213.93	2658.32 (12.20)	19.17 (0.09)
5	31.52	0.2	5.02	321.94	411.98 (1.89)	3828.06 **(17.57)**
6	34.03	0.18	5.42	377.5	1431.00 (6.57)	460.99 (2.12)
7	37.84	0.17	6.02	590.35	39.50 (0.18)	330.71 (1.52)
8	45.75	0.14	7.28	502.14	11.85 (0.05)	2.49 (0.01)
9	46.75	0.13	7.44	745.31	489.86 (2.25)	307.34 (1.41)
10	51.25	0.12	8.16	846.74	350.68 (1.61)	543.65 (2.49)

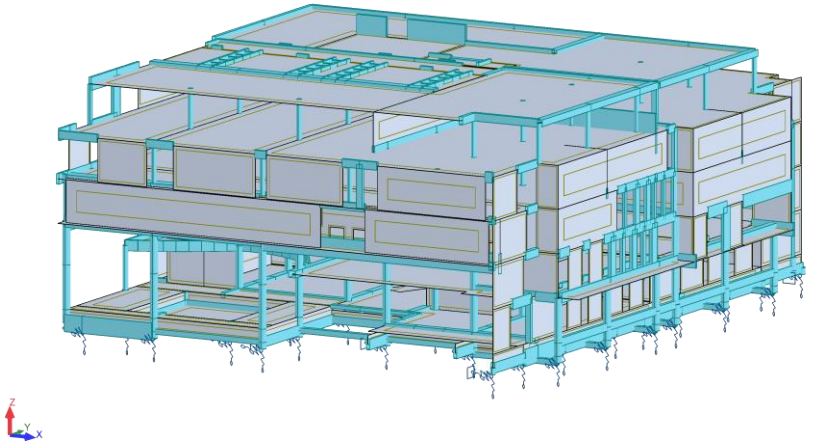
Ouvrages sur pieux – ex n°2

Cause de cette augmentation:

- L'analyse modale a évoluée en intégrant les raideurs des fondations.
- Les modes principaux concernent plus de masses :
    - Suivant X : 45% au lieu de 35 %
    - Suivant Y : 58% au lieu de 53%
- Le mode secondaire selon Y a regroupé 2 modes :
    - 17% au lieu de 7,42% + 7,78%

Ouvrages sur pieux – ex n°3

- R+4
- Structure rigide



Ouvrages sur pieux – ex n°2

Calcul initial sans ISS :

- L'analyse modale montre plusieurs modes sur la même plage de période :

Cas/Mode	Période [sec]	Masse Modale UX [%]	Masse Modale UY [%]
4/ 1	0.35	14.51	23.99
4/ 2	0.34	29.76	12.48
4/ 3	0.31	16.12	17.16
4/ 4	0.30	17.47	17.08
4/ 5	0.25	0.33	2.45
4/ 6	0.22	0.27	0.34
4/ 7	0.15	0.45	1.30
4/ 8	0.12	2.68	0.03
4/ 9	0.10	0.60	7.26
4/ 10	0.10	2.49	3.10

- La structure peut être jugée comme raide.

Ouvrages sur pieux – ex n°2

Introduction de l'ISS :

- L'analyse modale fait ressortir 2 modes principaux avec la quasi-totalité des masses en mouvement :

Cas/Mode	Période [sec]	Masse Modale UX [%]	Masse Modale UY [%]	Amortissement
4/ 1	0.60	89.03	1.71	0.08
4/ 2	0.59	1.19	93.61	0.08
4/ 3	0.54	6.65	0.66	0.08
4/ 4	0.42	0.06	0.02	0.05
4/ 5	0.33	0.22	0.23	0.05
4/ 6	0.28	0.01	0.03	0.05
4/ 7	0.21	0.02	0.21	0.05
4/ 8	0.18	0.01	2.90	0.06
4/ 9	0.17	1.87	0.00	0.06
4/ 10	0.16	0.00	0.04	0.05

- L'amortissement modale de 8% montre qu'il s'agit certainement de mode de fondation (4% pour le Béton et 10% pour les pieux, valeur uniquement utilisée lors de cette étape).

Ouvrages sur pieux – ex n°3

Coefficient de comportement :

- En appliquant l'EC8-1, la structure pourrais bénéficier d'un coefficient de comportement de l'ordre de 2.
- Néanmoins, comme l'analyse modale fait clairement apparaitre des modes de sol dominant, **la valeur du coefficient de comportement doit être bornée à 1,50.**

Comparaison des efforts globaux en têtes de pieux :

- Sans ISS Ved = 1200 t
- Avec ISS Ved = 1000 t (**20% de gain**)

Ouvrages sur semelles

Problématiques principales pour le calcul des structures

- Fondation avec un fonctionnement fortement non linéaire du fait du décollement ;
- Très peu d'ouvrages sont calculés avec des raideurs de sol ;
- Comment estimer les raideurs des appuis :
  - Méthode de Rosenblueth ;
  - Méthode de Deleuze ;
  - Méthode complète (Sassi, éléments finis, …) ;

Ouvrages sur semelles

Méthode de Rosenblueth

Raideur verticale : $$k_v = \frac{G}{1-nu}\beta_z.\sqrt{A}$$

Raideur horizontale : $$k_h = 2.(1+nu)G.\beta_x.\sqrt{A}$$

Raideur en basculement : $$k_\theta = \frac{G}{1-nu}\beta_\theta.a^2.b$$

Ouvrages sur semelles

Méthode de Deleuze (permet de tenir compte de la fréquence de la structure) :

Raideur verticale : $$k_v = G.r_{0T}.\frac{F_{V1}}{F_{V1^2} + FV_{2^2}}$$

Raideur horizontale : $$k_h = G.r_{0T}.\frac{F_{H1}}{F_{H1^2} + FH_{2^2}}$$

Raideur en basculement : $$k_\theta = G.r^3_{0RXouRY}.\frac{F_{R1}}{F_{R1}{}^2 + FR_2{}^2}$$

Ouvrages sur semelles

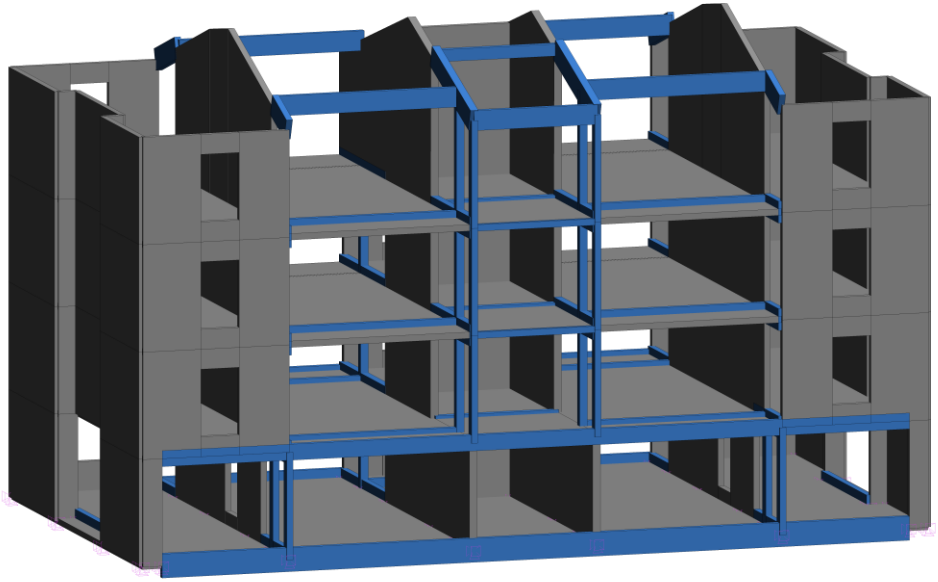
L’analyse modale spectrale classique ne permet pas de tenir compte d’un soulèvement des fondations :

- Le ferraillage obtenu n’est pas réaliste. Des tirants importants dans les zones soulevées sont la conséquence des arrachements fictifs dans les modèles.
- Les contraintes au sol du modèle ne sont pas correctes et sous évaluées, il faut donc repasser par un calcul manuel pour les estimer.

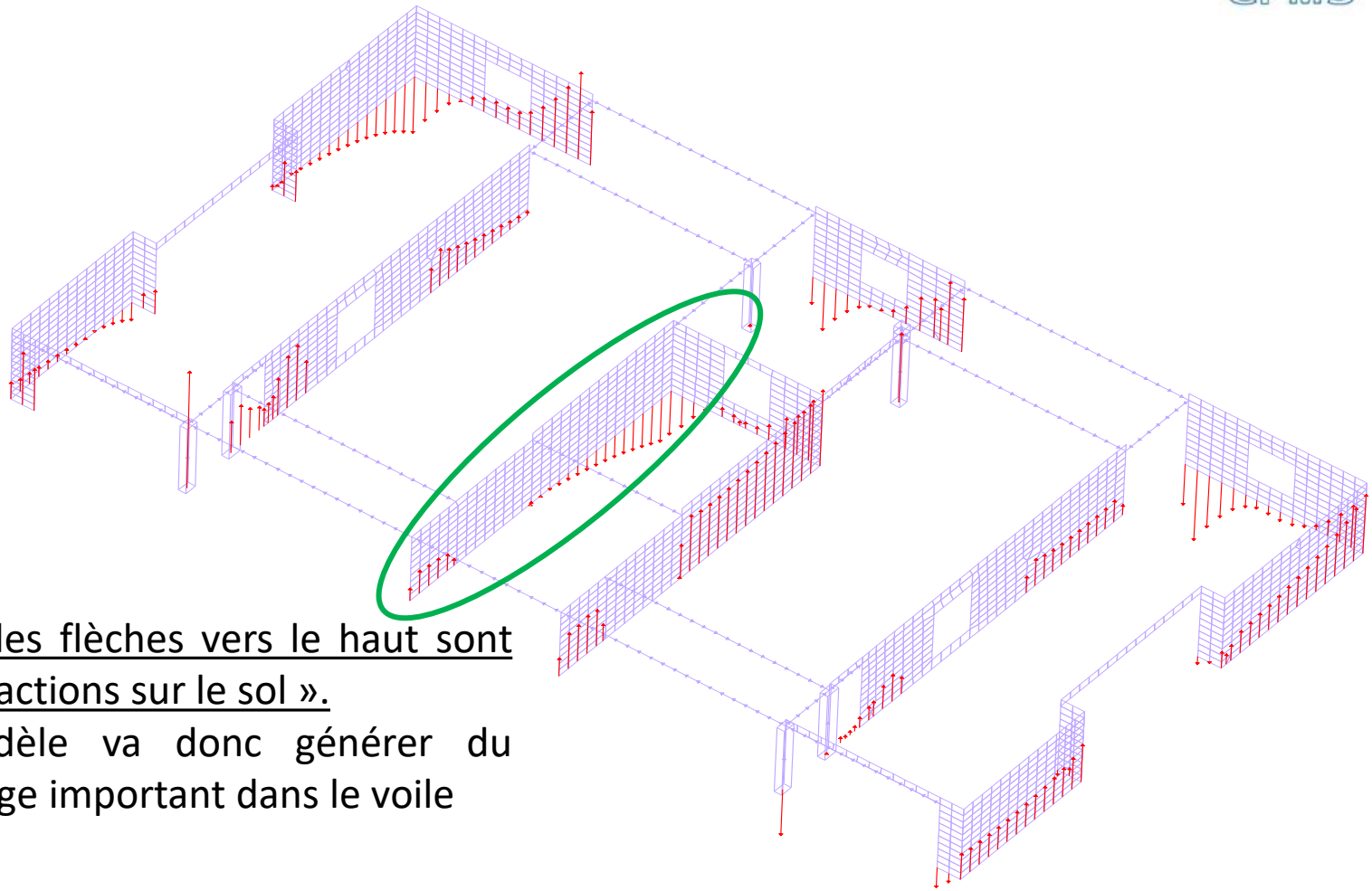
Ouvrages sur semelles

Illustration de la problématique et des solutions envisageables :

- Ouvrage de type R+4 en zone 5 ;
- Faiblement contreventé dans la direction longitudinal ;
- Mise en place de raideur de sol avec la méthode de Deleuze.



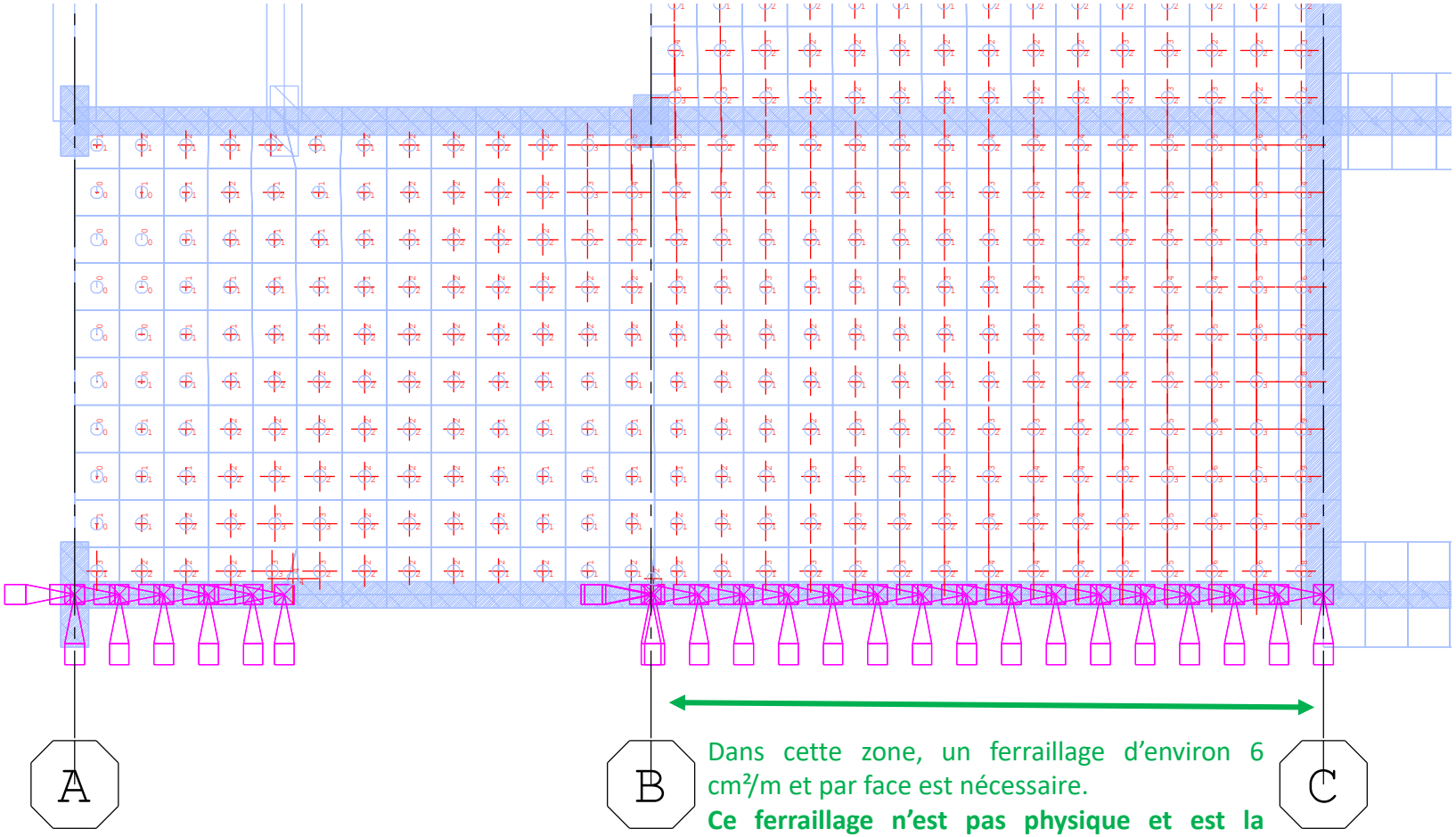
Ouvrages sur semelles



<u>Toutes les flèches vers le haut sont des « tractions sur le sol ».</u>

Le modèle va donc générer du ferraillage important dans le voile

Ouvrages sur semelles



Dans cette zone, un ferraillage d'environ 6 cm²/m et par face est nécessaire.

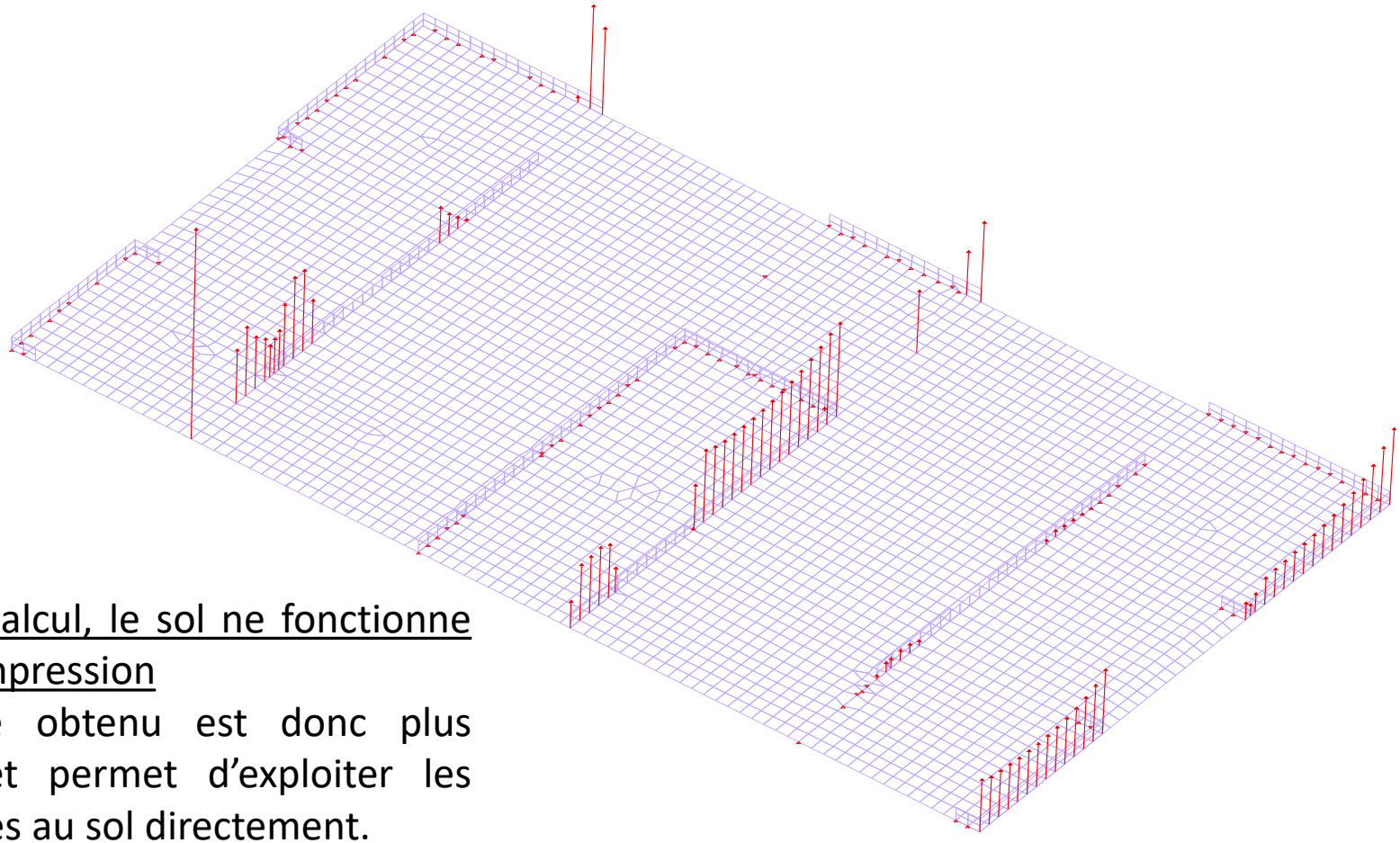
Ce ferraillage n'est pas physique et est la conséquence d'une mauvaise méthode de calcul.

Ouvrages sur semelles

Nouveau calcul effectué sur l'ouvrage :

- Transformation des champs d'accélérations sous EX et EY dans la structure en champs de forces ($f_i = m_i \times acc_i$ sur chaque nœud du modèle) ;
- Recalage du torseur global des champs de forces sur le tranchant et moment global issus de l'analyse modale spectrale.
- Introduction d'appuis autorisant le décollement.
- Réalisation d'un calcul non linéaire pour chaque combinaison ELU sismique.

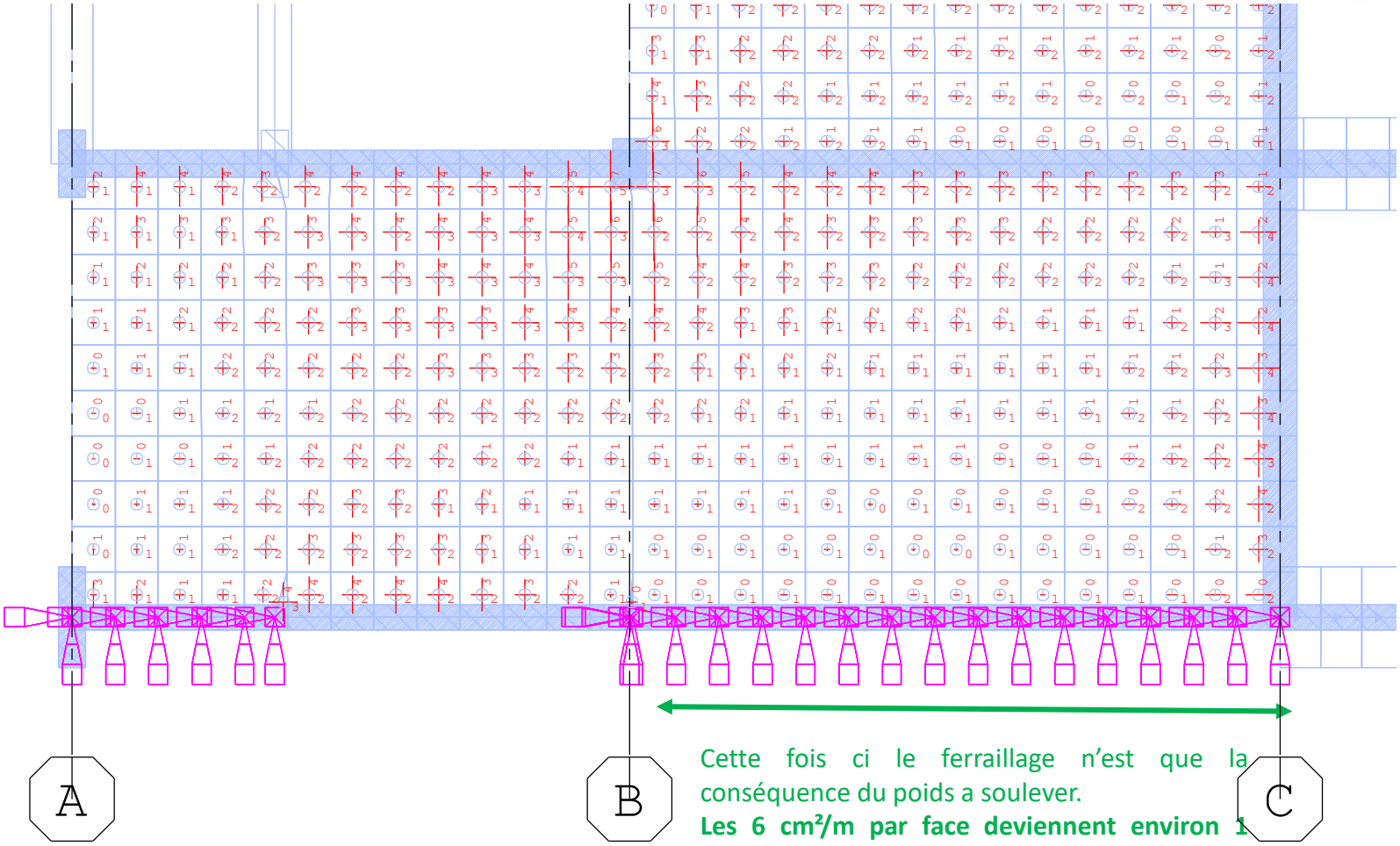
Ouvrages sur semelles



<u>Dans ce calcul, le sol ne fonctionne qu'en compression</u>

L'équilibre obtenu est donc plus réaliste et permet d'exploiter les contraintes au sol directement.

Ouvrages sur semelles

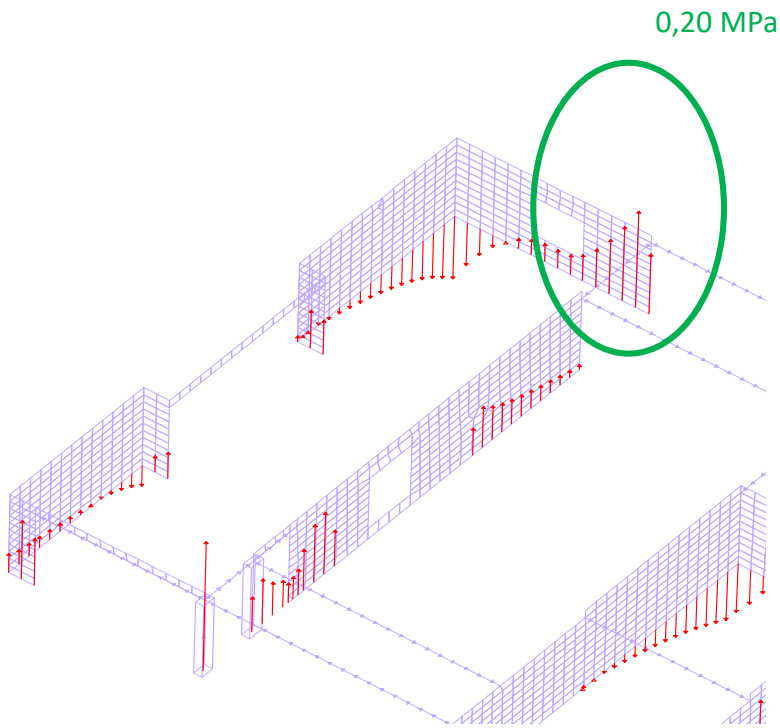


Cette fois ci le ferraillage n'est que la conséquence du poids a soulever.

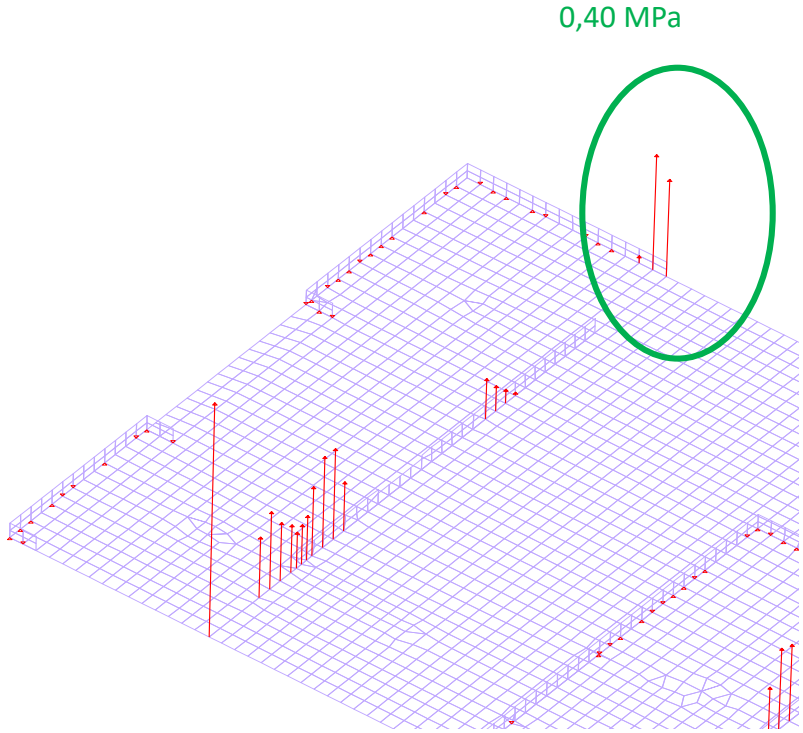
Les 6 cm²/m par face deviennent environ 1 cm²/m par face en partie basse et 3 cm²/m en partie sup du RDC !

Ouvrages sur semelles

Contrainte au sol :



Calcul linéaire



Calcul non linéaire

Ouvrages sur semelles

Difficultés principales pour la prise en compte de l'ISS dans le cas de semelles superficielles :

- Domaine d'application des méthodes simples (Rosenblueth et Deleuze = sol homogène) ;
- Utilisation des fonctions avancées des logiciels pour la transformation de l'analyse modale spectrale en forces statiques équivalentes ;

Avantages :

- Résultats plus réalistes dans la structure et sur le sol ;
- Gain de ferraillage dans les voiles (mais plus important dans les linteaux).

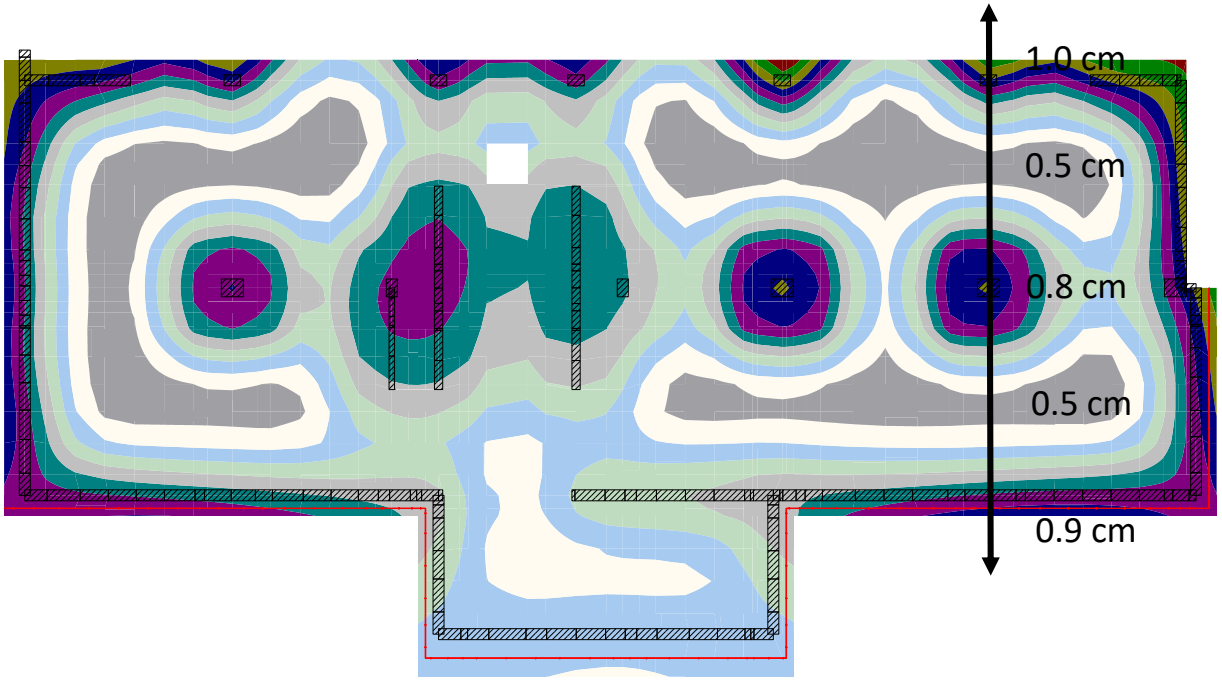
Ouvrages sur radier

Avec les fondations superficielles, les ouvrages sur radiers sont complexes a étudier :

- Le modèle de structure ne donne pas directement la même cartographie des tassement (Fonctionnement inversé) ;
- Prise en compte des décollements ;
- Prise en compte de la raideur en rotation
- …

Ouvrages sur radier

Fonctionnement sans tenir compte de la cartographie des tassement :

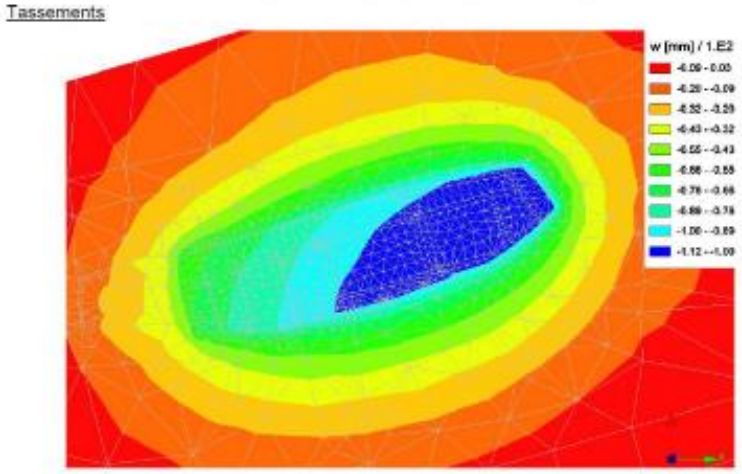


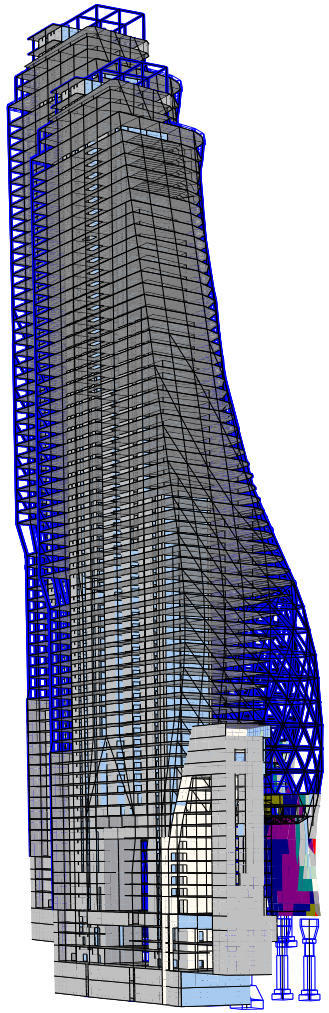
Tassements plus important en zone périphérique et sous poteau

Ouvrages sur radier – ex n°1

Même sous sollicitations statiques, la prise en compte de l'ISS est nécessaire pour un radier, en particulier dans le cas des structures importants :

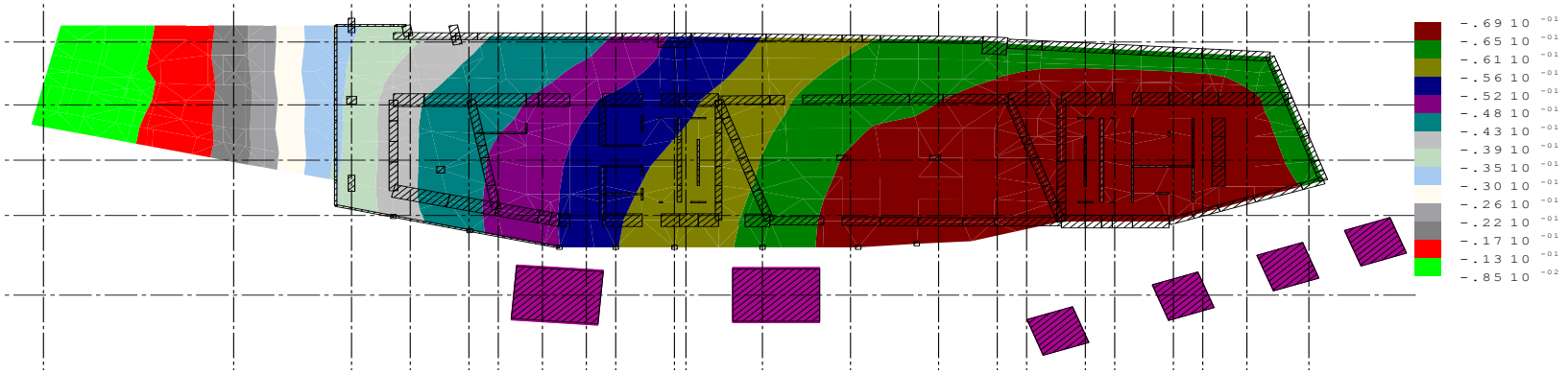
- Les ressorts de sol introduits dans le modèle doivent reproduire la cartographies des tassement envisagé dans l'étude géotechnique





Ouvrages sur radier – ex n°1

- Pour reproduire la cuvette des tassements, par itération :
  - les raideurs surfaciques sont modifiées localement
  - Vers le déplacement cible donné par l'étude géotechnique



Ouvrages sur radier – ex n°1

- Pour un ouvrage courant :
  - Possibilité d'augmenter fictivement la raideur en zone périphérique et diminuer celle en zone centrale :
    - 2,0 . K sur la périphérique de l'ouvrage
    - 0,5 . K sur la zone centrale

Ouvrages sur radier – ex n°2

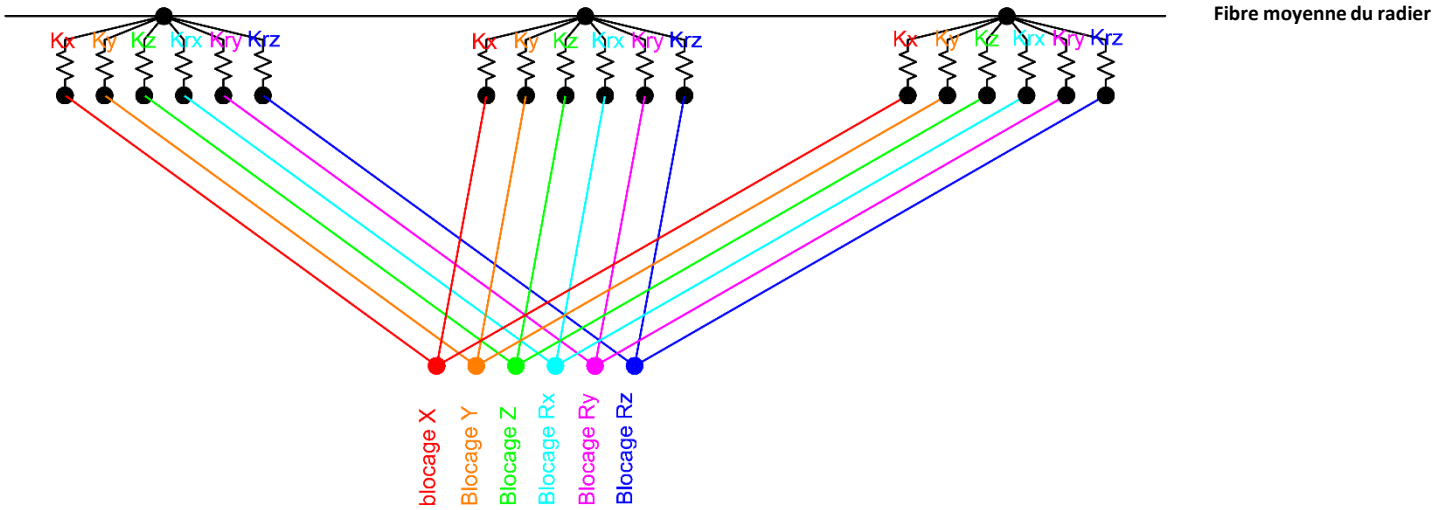
Pour le calcul sismique, la principale difficulté est de reproduire le comportement de la fondation. Si l'on assimile le radier à un point central, on obtient :

- 2 raideurs en translation Hz : Kx et Ky
- 1 raideur en translation Vert : Kz
- 2 raideurs en basculement : Krx et Kry
- 1 raideur en torsion : Krz

Ouvrages sur radier – ex n°2

Pour l'introduction de ces raideurs, 2 solutions sont possibles :

- Mise en place des 6 raideurs sur des nœuds centraux reliés a chaque nœud du radier :



Ouvrages sur radier – ex n°2

Cette méthode est très fastidieuse mais est la seule qui permet de reproduire le comportement réel de la fondation.

Elle peut néanmoins être remplacée par des appuis surfaciques :

- kX = kx/S ou Krz/J
- kY = ky/S ou Krz/J
- Kz = kz/S ou 12.krx/(bh^3) ou 12.kry/(hb^3)

Ouvrages sur radier – ex n°2

La principale difficulté est d'estimer si les raideurs surfaciques sont dirigées principalement par la translation ou le basculement.

Il est généralement recommandé de calculer la raideur surfacique verticale à partir des terme de basculement et non de la raideur verticale :

$Kz = 12.krx/(bh^3)$ ou $12.kry/(hb^3)$

Mais dans ce cas, il reste encore 2 raideurs en fonction de la direction du basculement !

Comme on peut le voir, cette méthode, bien que plus simple pour le Bureau d'Etude Structure, possède un grand nombre d'incertitude.

Ouvrages sur radier – ex n°2

Pour la prise en compte des soulèvements et le calcul du ferraillage du radier, il pourra être ensuite retenu la même méthode que pour les fondations superficielles :

- Transformation des champs d'accélérations sous EX et EY dans la structure en champs de forces ($f_i = m_i$ x acc_i sur chaque nœud du modèle) ;
- Recalage du torseur global des champs de forces sur le tranchant et moment global issus de l'analyse modale spectrale.
- Introduction d'appuis autorisant le décollement.
- Réalisation d'un calcul non linéaire pour chaque combinaison ELU sismique.

Conclusions

La prise en comte de l'ISS dans le calcul de la structure est un sujet sensible. Aussi bien en terme d'influence sur le comportement global de l'ouvrage que sur les résultats obtenus.

Même si l'introduction de raideurs dans les calculs des bâtiments est plus répandu (surtout pour les pieux), certains sujets restent peut traité par les Bureaux d'Etudes :

- Pris en compte des non linéarités, surtout dans le cas de calculs sismiques ;
- Vérification de la cohérence des tassements sous les radiers entre les modèles de structures et le modèles géotechnique ;
- Gestion de l'amortissement du système de fondation et conséquence sur le coefficient de comportement ;
- Incidence des valeurs sécuritaires retenues sur les caractéristiques des sols.