

Analyse comparative de l'interaction fondation-écran de soutènement

Chogueur Aissa¹, Zadjaoui Abdeldjalil¹

¹ Fg Pasteur BP119, Laboratoire RisAM, Faculté de Technologie, Université de Tlemcen (Algérie).

most_chog@yahoo.fr; a.zadjaoui@gmail.com

RÉSUMÉ. L'objet du présent article porte sur la modélisation numérique et l'analyse du comportement d'un écran de soutènement autostable du type paroi moulée en béton armé, fiché dans un sable lorsque le sol soutenu est chargé d'une fondation filante. Deux approches ont été employées. La première approche combine la méthode conventionnelle d'équilibre limite et celle de la poutre élastique sur des ressorts non linéaires en tenant compte des recommandations de l'Eurocode 7 et de quelques codes nationaux. La deuxième approche concerne l'utilisation de la méthode classique des éléments finis MEF en 2D et 3D sans usage de codes de calculs. L'effet de l'interaction écran fondation est discuté en tenant compte de la distance entre la fondation et l'écran ainsi que son ancrage dans le sol et la variation de l'angle de frottement interne du sol. Une confrontation des résultats (la déformée de la paroi, les moments fléchissants, les déplacements horizontaux) aux mesures expérimentales d'un modèle réduit a conduit à des conclusions encourageantes et utiles à la pratique de l'ingénieur.

ABSTRACT. The purpose of this article focuses on numerical modeling and analysis of the behavior of a freestanding retaining wall of reinforced concrete kind; stuck in the sand when supported soil is loaded by a strip foundation. Two approaches were used. The first approach combines conventional method of limit equilibrium and that of the elastic beam on nonlinear springs taking into account the recommendations of Eurocode 7 and some national codes. The second approach uses the conventional finite element method MEF in 2D and 3D without computing codes. The wall foundation interaction is discussed taking into account the distance between the foundation and the wall as well as the variation of the angle of internal friction of the soil. A comparison between numerical results (the deformation of the wall, bending moments and horizontal movements) and experimental measurements of reduced model has led to encouraging and useful conclusions for the practice of engineering.

MOTS-CLÉS: Eurocode 7, Coefficient de sécurité, Equilibre limite, Élément finis, Fondation, Soutènement, Interaction.

KEY WORDS: Eurocode 7, Safety factor, Limit equilibrium, Finite element, Foundation, Retaining, Interaction.

1. Introduction

Les analyses numériques sont largement utilisées dans la pratique de l'ingénierie géotechnique pour évaluer le comportement de déformation des excavations profondes, en particulier lorsque l'influence sur les infrastructures existantes telles que des bâtiments ou des tunnels adjacents doit être évaluée. En outre, il devient de plus en plus courant d'utiliser les résultats de l'analyse numérique comme une base pour la conception. Donc, la compatibilité de la conception avec des normes et des codes de pratique, valable dans le pays concerné, doit être assurée. Dans ce passage, nous allons discuter l'influence de ces codes sur les résultats des calculs notamment l'Eurocode7 et les codes nationaux tels que DIM-2008 italien, code allemand DIN1054, BSEN1997 britannique. Tous, ces codes recommandent l'application des coefficients partiels de sécurité particulièrement définis en tenant compte des propriétés du sol, des résistances et des actions influençant la stabilité de la structure. En général, c'est une procédure bien établie lors de l'utilisation classique par exemple, des calculs basés sur les méthodes d'équilibre limite, mais il n'y a pas de lignes directrices claires comment cela peut être réalisé lorsque les méthodes numériques sont utilisées. Peu ayant trait à cette question sont disponibles, bien que certaines tentatives aient été faites par exemple BAUDUIN et al. (2000), SCHWEIGER (2005, 2009), SIMPSON (2000, 2007). Visant à adapter ces méthodes aux exigences des codes de conception, l'approche réduction des forces fut développée pour calculer le coefficient de sécurité global. En effet, les caractéristiques $\tan\phi$ et c du sol sont réduites progressivement jusqu'à l'obtention de la rupture à une étape donnée de l'analyse. Cette approche apparaît insuffisante pour prédire correctement le comportement des structures étudiées. De ce fait, l'introduction des coefficients partiels de sécurité dans les méthodes aux éléments finis MEF portait un intérêt primordial pour quelques chercheurs qui ont en particulier publié des exemples de calculs numériques selon l'Eurocode7 (SCHWEIGER, 2010).

Dans cet article on s'intéresse à la modélisation numérique et l'analyse du comportement d'un écran de soutènement autostable du type paroi moulée en béton armé, fiché dans le sable lorsque le sol soutenu est chargé d'une fondation filante. Les résultats commentés sont issus des calculs réalisés selon deux approches. Dans un premier temps, les calculs sont réalisés à l'aide du progiciel DEEPXCAV qui utilise une approche combinée. Cette approche combine une méthode conventionnelle d'équilibre limite avec celle de la poutre élastique sur ressorts non linéaires. Dans cette partie, il est discuté l'influence de l'application des différents coefficients partiels recommandés par les trois principales approches de conception DA-1 à DA-3 conçues par Eurocode7 et les autres codes sus cités. En deuxième phase, Différentes simulations sont réalisées en utilisant la méthode classique des éléments finis MEF en 2D et 3D et sans codes de calculs. Par choix, nous avons opté pour des calculs des coefficients de sécurité totaux en se basant sur la réduction des caractéristiques mécaniques (*Phi-c réduction*) qui est une option disponible dans le code de calcul PLAXIS.

2. Approche combinée

Une étude numérique suivant une approche combinée a été menée par le biais du logiciel DEEPXCAV pour modélisation et analyse du comportement d'une paroi moulée autostable, fichée dans le sable lorsque le sol soutenu est chargé d'une semelle filante. Cette approche combine entre les méthodes d'équilibre limite et la méthode élastoplastique. Une fois l'analyse conventionnelle d'équilibre limite basée sur les calculs des coefficients de sécurité classique est achevée, l'analyse élastoplastique est lancée. Celle-ci réutilise ces mêmes coefficients dans des calculs non linéaires tout en divisant le sol en N ressorts non linéaires en partie active et passive autour de l'écran. On note que les pressions latérales sur l'écran dépendent alors des propriétés du sol et de l'histoire proposée durant les phases de construction. Le sol est modélisé par une seule couche de sable de Fontainebleau, d'une hauteur de 18m quand l'écran ainsi modélisé est du type paroi moulée en béton armé, les deux ont les propriétés indiquées dans le tableau1. Les phases de construction sont modélisées par des couches de sol excavé d'une hauteur de 1m pour chacune, mise à part la dernière phase qui est dépendante de la convergence des calculs accomplis. La fondation est modélisée par application d'une charge uniformément répartie de 305 kN/m^2 à une distance de 0.75m à partir de l'écran et pour une profondeur d'ancrage de 2.25 m-*Figure1-(b)*. Les calculs sont menés en considérant que l'écran est libre « Free earth » avec charge variable. Les calculs par MEL ont été élaborés à la fois sans et avec codes de calculs pour un coefficient de frottement sol/écran $\delta = 2/3\phi$.

2.1. Propriétés du sol et de la paroi moulée

Les propriétés du sol et de la paroi moulée sont résumées dans le tableau suivant (Tableau 1) :

Tableau 1. Propriétés du sol et de la paroi moulée.

Sol			Paroi moulée		
γ (kN/m ³)	c (kPa)	φ (°)	E_b (MPa)	d (m)	h (m)
16	2,60	39,40±0,5	22350	0,152	10

3. Approche FEM

3.1. Conception du modèle numérique

Les dimensions géométriques du même modèle numérique que celui appliqué dans le cas de l'approche combinée sont celles de l'ouvrage prototype et non pas celle du modèle réduit centrifugé sous une accélération de 50g réalisé par GAUDIN, (2002). L'écran est fiché dans le sol d'une hauteur de 10 m et ayant un produit d'inertie de 6,54 MN.m². Les conditions aux limites (déplacements horizontaux nuls et déplacements verticaux nuls) sont appliquées aux bords du modèle. Ces dimensions sont inférieures à celles établies par Mestat (1997) qui recommande une distance derrière la paroi supérieure à six fois la hauteur excavée et une profondeur sous la paroi égale à quatre fois la hauteur excavée. Le sol homogène et sec, est modélisé en déformation plane par une loi élastoplastique de Mohr- Coulomb non associé quand la paroi moulée et la fondation sont modélisées respectivement par l'élément « poutre » et des éléments de massif- *Figure1-(a)* et *(b)*. Une charge uniformément répartie de 305kN/m² est appliquée sur la fondation à une distance de 0.75m à partir de l'écran et pour une profondeur d'ancrage de 2.25m. Les phases de construction sont modélisées par des couches de sol excavé d'une hauteur de 1m pour chacune sauf pour la dernière phase qui est dépendante de la convergence des calculs réalisés. Le nombre total des nœuds issus des maillages varie entre 4383 et 5847 selon la configuration étudiée et on note ici que les analyses numériques antérieures effectuées pour valider le modèle numérique, ont montré que 4000 nœuds étaient suffisants pour fournir des résultats avec une bonne précision (POPA et al, 2010). Enfin, l'interface sol-écran est considérée non frottante.

3.2. Propriétés du sol

Les paramètres initiaux des calculs aux éléments finis sont résumés dans le tableau 2 suivant :

Tableau 2. Propriétés des couches de sol et des interfaces

E_{ref} (MPa)	ν	c_{ref} (kPa)	φ (°)	Ψ (°)	R_{inter}
10	0,275	2,60	39,40	16,70	0,88

3.3. Propriétés de la paroi moulée

Les propriétés de la paroi moulée en béton armé sont les suivantes:

Tableau 3. Propriétés de la paroi moulée

E_b (MPa)	d (m)	h (m)	ν
22350	0,152	10	0,30

3.4. Propriétés de la fondation

Les propriétés de la fondation en béton armé sont récapitulées dans le tableau suivant (tableau 4):

Tableau 4. Propriétés de la fondation

E_b (MPa)	L(m)	e (m)	ν
50000	2,20	2	0,30

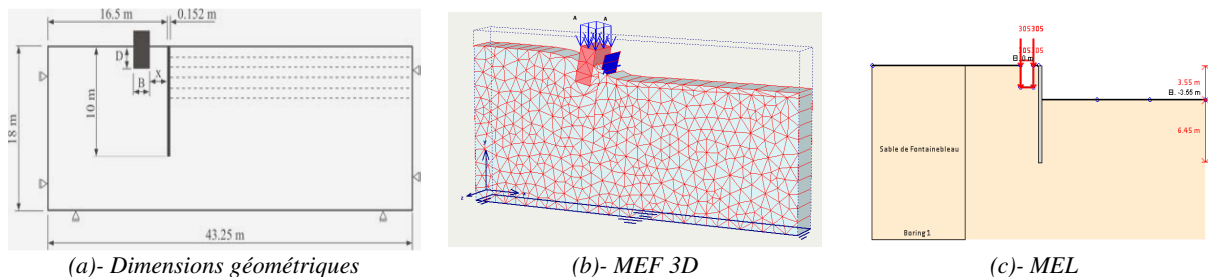


Figure 1. Modèle des calculs numériques et maillages déformés

4. Résultats de l'approche combinée

Les résultats des moments et les déplacements maximaux ainsi que les principaux coefficients de sécurité, issus de l'approche combinée par l'application des codes de bonne pratique sont résumés dans le tableau ci-dessous :

Tableau 5. Comparaison des résultats issus des deux méthodes combinées MEL et calcul non linéaire.

Code	M_{max}	Δ_{max}	F_{Semb}	F_{Spas}	F_{Sact}	F_{SRot}	F_{swall}
ELS	58.81	9.59	1.45	5.93	1.24	2.16	1.00
ELSx1.50	88.22	14.39					1.50
EC7-a	87.31	10.81	1.18	4.01	1.22	1.45	1.48
EC7-b	145.56	28.90	1.00	2.81	1.13	1.03	2.48
EC7-c	98.61	12.79	1.00	2.86	1.22	1.04	1.68
EC7-d	171.34	35.40	0.90	2.49	1.11	0.90	2.91
BSEN -a	149.21	29.77	1.00	2.79	1.12	1.02	2.54
DIN 1054 -a	93.24	11.77	1.00	2.82	1.21	1.02	1.59
DIN 1054 -b	79.14	11.10	1.13	3.51	1.22	1.27	1.35
DIN 1054 -c	60.39	9.91	1.30	4.91	1.24	1.79	1.03
DM08-a	87.19	11.33	1.18	4.02	1.21	1.45	1.48
DM08-b	145.56	28.90	1.00	2.81	1.13	1.03	2.48
DM08-c	87.19	11.33	1.18	4.02	1.21	1.45	1.48

4.1. Interprétation des résultats et commentaires

Il ressort des résultats obtenus que toutes les combinaisons des différents codes appliqués aient produit des valeurs plus grandes des moments de flexion lorsque ces valeurs sont comparées à l'approche typique état ultime ELU obtenue par multiplication de l'état limite de service ELS et un coefficient de sécurité égal à 1.5. On note que la combinaison EC7-d n'a pas convergé puisque le sol résistant n'est pas suffisant pour fixer l'écran donnant un $F_{SRot} < 1$. Les valeurs des moments maximums issues de l'ensemble des combinaisons diffèrent de -1,04% à 48.51% de la valeur du moment maximal calculé selon le cas (ELS x 1.5). Cette différence est équivalente d'appliquer un coefficient de sécurité de 1,35 à 2,54 aux résultats de flexion de la paroi en état limite de service.

Dans le calcul non linéaire, les coefficients de sécurité de résistances de mobilisation active et passive (F_{Sact} et F_{Spas}) peuvent être particulièrement utiles pour évaluer la performance de l'excavation. Dans l'état limite ultime, le coefficient de sécurité $F_s \geq 1$ est recommandé. On aurait tendance donc à rendre $F_{Sact} = 1,2$ pour que le reste des combinaisons soient acceptables mise à part les combinaisons EC7- b ; EC7-d. BSEN-b et DM08-b. Cependant tous les coefficients de sécurité passive mobilisables sont nettement supérieurs au facteur de sécurité désirable soit $F_{Spas} \geq 1,35$.

5. Résultats groupés issus de l'approche combinée et l'approche MEF

Sous forme de graphes comparés, Les résultats aboutis par l'application des deux approches pratiquées sont présentés ci-dessous :

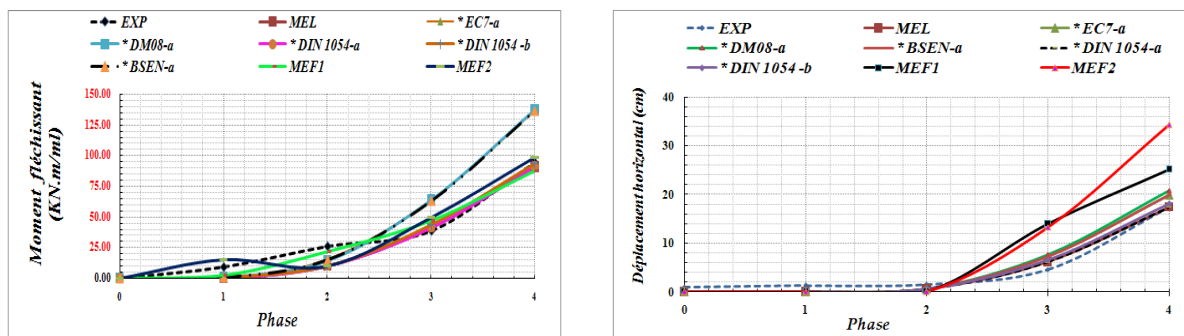


Figure 2. Comparaison des moments fléchissants et déplacements horizontaux pour $D=2,25m$ et $X=0,75m$

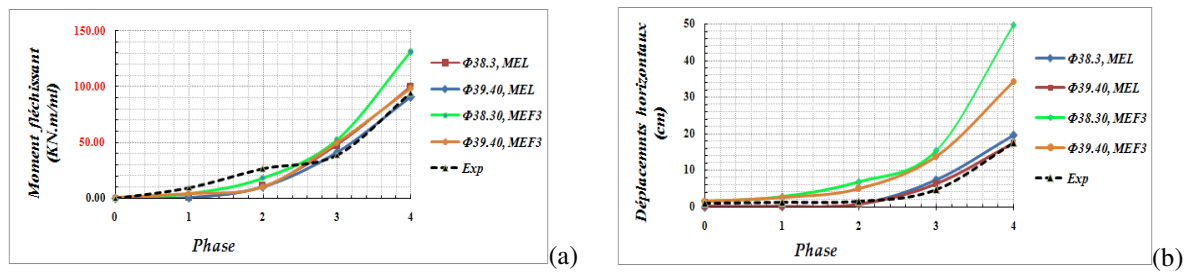


Figure 3. Comparaison des moments fléchissants (a) et déplacements horizontaux (b) selon l'angle de frottement

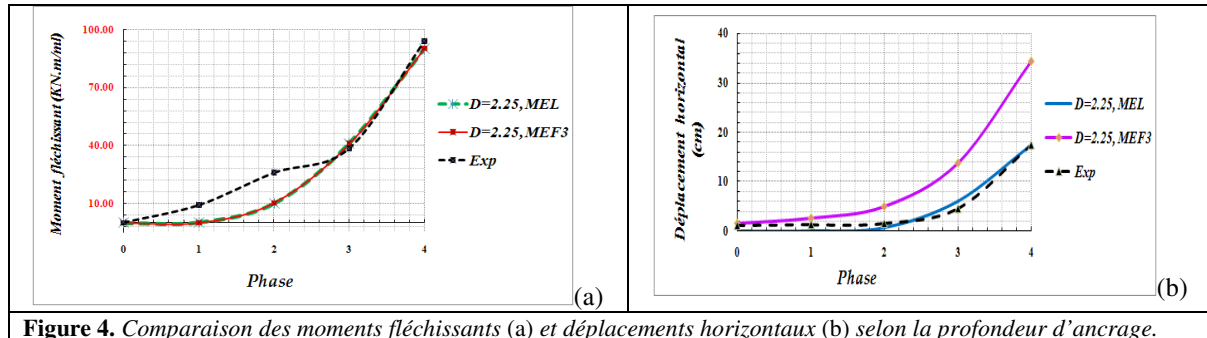


Figure 4. Comparaison des moments fléchissants (a) et déplacements horizontaux (b) selon la profondeur d'ancrage.

6. Conclusion

Il ressort de cette étude comparative les conclusions suivantes : En particulier pour les deux premières phases d'excavation, l'effet de l'interaction écran fondation en tenant compte de la distance entre la fondation et l'écran ainsi que son ancrage dans le sol, n'est pas correctement transcrit pour l'ensemble des codes de calculs appliqués. Les valeurs des moments de flexion enregistrés sont sous estimées vis-à-vis les mesures expérimentales. Avec peu de précision, les valeurs réalisées par la méthode des éléments finis en déformation plane MEF1, se rapprochent relativement à celles expérimentales. A partir de la 3^{ème} phase jusqu'à la dernière phase, on constate une bonne cohérence entre l'ensemble des courbes issues des calculs réalisés avec mise à part des codes BESEN-a, DIM08-a et la méthode des éléments finis en déformation tridimensionnelle MEF2 qui ont quasiment surestimé les valeurs des moments fléchissants. En revanche, les deux méthodes MEF1 et MEF2 ont entièrement surestimé les valeurs des déplacements quand le reste des codes ont pu converger les résultats cohérents avec ceux expérimentaux.

En résumé, l'effet d'interaction écran fondation semble traduit par l'influence de l'angle de frottement interne du sol. Les valeurs des moments fléchissants augmentent inversement avec la dégression de l'angle de frottement interne du sol. Les calculs menés par la méthode conventionnelle d'équilibre limite MEL enregistrent des résultats cohérents et meilleurs que ceux réalisés par la méthode des éléments finis FEM.

7. Bibliographie

- [BAU 00] BAUDUIN C., DE VOS M., SIMPSON B., « Some considerations on the use of Finite Element Methods in Ultimate Limit State design », *International Workshop on Limit State Design in Geotechnical Engineering, ISSMGE TC23*, 2000, Melbourne, Australia.
- [BRI 91] BRINKGREVE R.B.J., BAKKER H.L., « Non-linear finite element analysis of safety factors », *International Conference on Computer Methods and Advances in Geomechanics (Booker & Carter, eds.)*, 1991, Balkema, 1117-1122.
- [BRI 06] BRINKGREVE R.B.J., « Plaxis: Finite element code for soil and rock analyses, users manual », 2006, Balkema.
- [DEE 12] DEEPXCAV Software Program.; « User's Manual for developed by Ce.A.S. Srl, Italy and Deep Excavation LLC, U.S.A », 2012.
- [DEL 99] DELATTRE L., « Comportement des écrans de soutènement - Expérimentations et calculs », Thèse de doctorat, Paris, ENPC, 1999, 498 pages.

- [DEL 99] DELATTRE L., «Un siècle de méthodes de calcul d'écrans de soutènement I. L'approche par le calcul. Les méthodes classiques et la méthode du coefficient de réaction», *Bulletin des LPC*, 234, 2002, pp. 35-55.
- [GAU 02] GAUDIN C., Modélisation physique et numérique d'un écran de soutènement autostable, application à l'étude de l'interaction écran-fondation - Thèse de doctorat, 2002, Ecole centrale de Nantes, France.
- [MES 97] MESTAT P., «Maillage d'éléments finis pour les ouvrages de géotechnique, conseils et recommandations», *Bulletin des laboratoires des ponts et chaussées*, Décembre 1997.
- [POP 10] POPA H., LORETTA B., «Using Finite Element Method in geotechnical design, Soil constitutive laws and calibration of the parameters. Retaining wall case study », *Technical University of Civil Engineering of Bucharest*, July 2010, Romania.
- [POP 03] POPA H., GAUDIN C., GARNIER J., THOREL L., «Interaction fondation superficielle - paroi de soutènement – modélisation expérimentale et numérique», *Symposium International Fondation Superficielle FONDSUP*, 5-7 Nov. 2003, Paris, France.
- [SCH 05] SCHWEIGER. H.F. & BREYMANN, H., « FE-analysis of five deep excavations in lacustrine clay and comparison with in-situ measurements. In (K.J. Bakker, A. Bezuijen, W. Broere, E.A. Kwast, eds.) », *Proc 5th Int. Symp. Geotechnical Aspects of Underground Construction in Soft Ground*, Amsterdam, June 15–17, 2005, Taylor & Francis/Balkema, Leiden, 887–892.
- [SCH 05] SCHWEIGER. H.F., «Application of FEM to ULS design (Eurocodes) in surface and near surface geotechnical structures», *Proc. 11th Int. Conference of IACMAG*, Turin, Italy, 19-24 June 2005. Bologna: Patron Editore. 419-430.
- [SCH 09] SCHWEIGER. H.F., «Influence of constitutive model and EC7 design approach in FEM analysis of deep excavations." *Proc. ISSMGE Int. Seminar on Deep Excavations and Retaining Structures (Mahler & Nagy, eds.)*, 2009, Budapest, 99-114.
- [SCH 10] SCHWEIGER. H.F., «Numerical analysis of deep excavations and tunnels in accordance with EC7 design approaches», *Proceedings Interational Conferece on Geotechnical Challenges in Megacities (Petrukhin, Ulitsky, Kolybin, Lisyuk & Kholmyansky, eds.)*, June 7-10, 2010, Mowkow, Vol. 1, 206-217.
- [SCH 10] SCHWEIGER. H.F., «Design of deep excavations with FEM - Influence of constitutive model and comparison of EC7 design approaches», *proceeding of the 2010 earth retention conference (finno,r.j., hashash, y.m.a., arduino, p., eds.)- bellevue, washington, Usa, 1.-4. August 2010, Asce*, 804-817
- [SIM 00] SIMPSON B.,«Partial factors: where to apply them», *Proc. Int. Workshop on Limit State Design in Geotechnical Engineering*, 2000, Melbourne, 145-154.
- [SIM 07] SIMPSON B., «Approaches to ULS design – The merits of Design Approach 1 in Eurocode 7», *First International Symposium on Geotechnical Safety & Risk*, Oct. 18-19, 2007, Shanghai, Tongji University, China.

8. Notations

BSEN-a	BSEN 1997-1: DA-1, Comb2: A2 + M2+ R1	F_{Sact}	Coefficient de sécurité de résistance active
C_{ref}	Cohésion du sol	F_{SPas}	Coefficient de sécurité de résistance passive
d	Epaisseur équivalente de l'écran	F_{SRot}	Coefficient de sécurité rotationnel
D	Profondeur d'ancrage de la fondation	F_{swall}	Coefficient de sécurité global de capacité de la paroi
DIN1054-a	DIN 1054 (2005): GZ 1B_LC1	h	Hauteur libre de la paroi
DIN1054-b	DIN 1054 (2005): GZ 1B_LC2	MEL	Méthode d'équilibre limite
DIN1054-c	DIN 1054 (2005): GZ 1B_LC3	MEF1	Méthode des éléments finis 2D-1ml
DM008-a	DM08_ITA: Comb1: A1+M1+R1	MEF2	Méthode des éléments finis 3D-1ml
DM008-b	DM08_ITA: Comb2: A2+M2+R1	MEF3	Méthode des éléments finis 3D-4ml
DM008-c	DM08_ITA: Comb3: A1+M1+R3	M_{max}	Moment de flexion maximal
E_b	Module d' Young du béton	L	Largeur de la semelle filante
EC7-a	Eurocode7, 2007: DA-1, Comb1:A1+M1+R1	R_{inter}	Coefficient de réduction d'interaction
EC7-b	Eurocode7, 2007:DA-1, Comb2:A2+M2+ R1	X	Distance entre l'écran et la fondation
EC7-c	Eurocode7, 2007: DA-2: A1 + M1 + R2	ν	Coefficient de Poisson
EC7-d	Eurocode7, 2007:DA-3:(A1* or A2)+M2+R3	γ	Poids volumique du sol
E_{ref}	Module d' Young du sol	ϕ	Angle de frottement interne
Exp	Résultats expérimentaux	Ψ	Angle de dilatance
e	Epaisseur de la semelle filante	δ	Coefficient de la rugosité sol écran
F_{Semb}	Coefficient de sécurité de longueur de la fiche	Δ_{max}	Déplacement horizontal maximal