



21, rue d'Artois, F-75008 PARIS
[http : //www.cigre.org](http://www.cigre.org)

Colloque CIGRÉ-CEI 2016
9 au 11 mai 2016
Montréal (Québec), Canada

Conception d'une fondation mort terrain évoluée pour pylônes rigides fortement sollicités en territoire éloigné.

S. PRUD'HOMME, L.-P. BÉRUBÉ, N. LEMIEUX et J.-F. GRAVEL
Hydro-Québec Équipement
Canada

SOMMAIRE

L'augmentation de la demande énergétique conjointement avec le réchauffement climatique ont pour effet de forcer les utilités à exploiter des sources d'énergie renouvelables de plus en plus éloignées. Le développement de nouveaux pylônes d'angle et arrêt THT pour des zones où les charges climatiques (verglas et vent) sont extrêmes entraîne des efforts très importants aux fondations. Alors que les fondations grillage mort terrain typiques sont efficaces pour transmettre les efforts de compression au sol, le volume de remblais compacté requis pour équilibrer les efforts de soulèvement de la fondation devient de plus en plus imposant. Ce volume constitue un défi supplémentaire pour l'installation de ces fondations en territoire éloigné, ce qui accroît les coûts reliés à l'acheminement du remblai si il n'y pas de banc d'emprunt à proximité. Bien qu'il a toujours été possible d'acheminer le remblai requis jusqu'à présent, un nouveau concept de fondation hybride pour pylône autoporteur à 4 pieds a été ébauché afin d'améliorer l'efficacité lors de la construction des lignes de transport en territoire éloigné. Selon ce concept, un grillage mort terrain est couplé à des tirants d'ancrages au roc. Les ancres se rattachent directement au haut de la colonne de la fondation, ce qui permet un forage à posteriori à partir du niveau du sol et une reprise directe des efforts de soulèvement sans transmission au grillage. Cette fondation peut donc être installée simplement sous la profondeur du gel, soit environ 2,4 m, et être remblayée avec le matériel natif en place, ce qui réduit grandement le besoin en remblai granulaire et limite la profondeur d'excavation. Le concept a été validé numériquement à l'aide d'un modèle du grillage, supporté par des éléments poutre en grand déplacement, qui est en contact sans frottement avec un massif de sol supporté par des éléments volumiques. Puisque le grillage repose sur du mort terrain et qu'un tassement à long terme est alors possible, un jeu uniforme et variable a été modélisé entre l'écrasement de chacun des ancres et la tête de la colonne de fondation. Il a été observé qu'un ajustement non-uniforme des ancres amplifie de façon remarquable les contraintes dans ces derniers et altère grandement la zone de contact entre le grillage et le sol. D'autres variables, telles que la longueur et l'angle des tirants d'ancrages, ont aussi été étudiées. Les résultats des analyses numériques donnent des pistes de solution permettant de rendre ce concept fonctionnel pour maintenant passer aux essais de mise en place et de résistance.

MOTS CLÉS

Fondation mort-terrain; Pylône d'arrêt autoporteur; Territoire éloigné; Ancrage au roc; Modélisation par éléments finis avancée.

prudhomme.simon@hydro.qc.ca

INTRODUCTION

L'augmentation de la demande énergétique conjointement avec le réchauffement climatique ont pour effet de forcer les utilités à exploiter des sources d'énergie renouvelables de plus en plus éloignées. Le développement de nouveaux pylônes d'angle et arrêt THT pour des zones où les charges climatiques (verglas et vent) sont extrêmes entraîne des efforts très importants aux fondations, de l'ordre de 5300 kN en compression et de 4300 kN en soulèvement pour les pylônes en arrêt.

Alors que les fondations grillage mort terrain typiques sont efficaces pour transmettre les efforts de compression au sol, le volume de remblais compacté requis pour équilibrer les efforts de soulèvement de la fondation est imposant. Approximativement 475 m³ de pierre concassée sont requis pour résister à cette charge soulèvement, ce qui résulte en une profondeur d'installation de 3,7 m. Ce volume constitue un défi supplémentaire pour l'installation de ces fondations en territoire éloigné, ce qui accroît les coûts reliés à l'acheminement du remblai si il n'y pas de banc d'emprunt à proximité.

D'autres types de fondation sont aussi disponibles pour ces pylônes rigides, tels que les fondations sur pieux ou sur caissons. Toutefois, la problématique d'acheminement du matériel et de l'équipement nécessaire à l'installation de ces fondations en territoire éloigné demeure entière. De leur côté, les structures haubanées sont souvent privilégiées dans ces conditions étant donné leur simplicité de mise en place, notamment au niveau de leurs fondations qui sont composées de fondations conventionnelles qui reprennent les efforts de compression et d'ancrages d'haubans qui reprennent les efforts de soulèvement/tension. Toutefois, l'envergure et l'encombrement causé par leurs haubans limitent leur utilisation en territoire fortement accidenté ou habité.

Bien qu'il a toujours été possible d'acheminer le remblai requis jusqu'à présent, un nouveau concept de fondation hybride pour pylône autoporteur à 4 pieds a été ébauché afin d'améliorer l'efficacité lors de la construction des lignes de transport en territoire éloigné et ainsi générer des économies. Selon ce concept, un grillage mort terrain est couplé à des tirants d'ancrages au roc. Cette fondation peut donc être installée simplement sous la profondeur du gel, soit environ 2,4 m, et être remblayée avec le matériel natif en place, ce qui réduit grandement le besoin en remblai granulaire.

Cet article présente les caractéristiques de cette fondation ainsi que les résultats d'une étude paramétrique effectuée à l'aide d'un modèle numérique avancée permettant la simulation du système sol-fondation sous différents chargements statiques et incluant un jeu variable au point de fixation de chacun des ancrages, ainsi que des longueurs et des orientations d'ancrages variables.

MODÈLE ET PARAMÈTRES À L'ÉTUDE

Caractéristiques de la fondation

Une conception préliminaire du grillage mort-terrain a été effectuée en considérant une capacité de sol de 100 kPa. La Figure 1 présente un croquis de la fondation. Elle a été conçue pour reprendre les efforts de compression seulement et a donc été placée à une profondeur permettant la protection de celle-ci contre le gel. Puisque l'objectif premier de ce type de fondation est d'éviter le remblai compacté, aucun support latéral n'a été considéré pour le dimensionnement de la colonne. Deux poutrelles ont dûes être retirées dans le but de laisser passer les ancrages. On remarque que les ancrages et la colonne sont en conflit avec les poutres secondaires, ce détail devra être corrigé en conception finale. Les ancrages seront fixés à une plaque installée au bout supérieur de la colonne, ce qui permet un forage à posteriori à partir du niveau du sol et une reprise directe des efforts de soulèvement sans transmission au grillage. Ils seront espacés de 800 mm c/c. et suivront une trajectoire parallèle à celle la colonne. L'ouverture de la trajectoire des tirants est cependant envisagée afin de solliciter un plus grand volume de roc et éviter l'interdépendance des tirants lors des opérations de forage et d'injection du coulis. Les ancrages considérés sont des barres d'acier haute résistances de 63,5 mm de diamètre (nommées T18). Le roc a été considéré à une profondeur de 8 m sous le niveau de grillage comme hypothèse de départ.

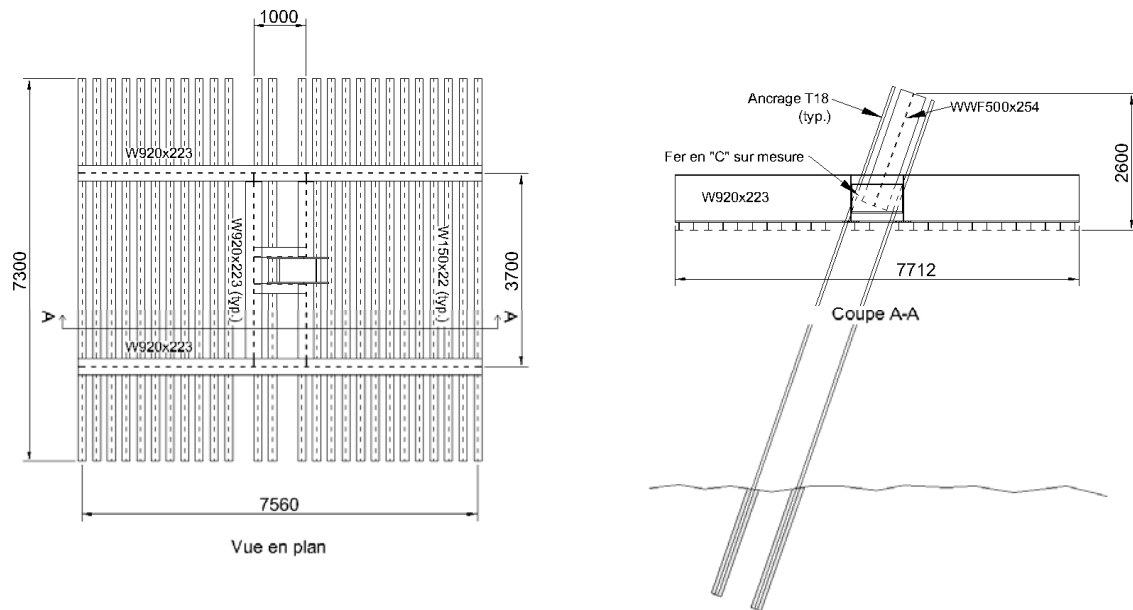


Figure 1 - Croquis du grillage métallique

Modèle numérique

La modélisation de la fondation a été effectuée à l'aide du pré-processeur Salome [7] et du logiciel d'analyse par éléments finis Code_Aster [1].

Le grillage de fondation mort terrain a été modélisé à l'aide d'éléments poutre (voir Figure 2). Les poutres utilisées pour la modélisation des ancrages et de la colonne sont des poutres de Timoshenko multifibres avec prise en compte du gauchissement [3]. Leur matrice de rigidité est corrigée pour prendre en compte les grands déplacements et les grandes rotations. Les poutres utilisées pour le reste du grillage sont des poutres de Timoshenko [4]. Des liens rigides réguliers ont été employés pour relier le bas de la colonne (WWF500x253) aux centres des profilés en « C », le haut de la colonne aux « ancrages », ainsi que les poutrelles (W150x22) aux poutres principales (W920x223). Des éléments de rigidité discrets de type « gap elements » [6] [5] ont été ajoutés en série à l'extrémité supérieure de chacun des ancrages. Ces éléments sont des éléments discrets de contact. Lorsque les deux nœuds de leurs extrémités se rapprochent d'une distance supérieure au jeu qui leur est attribué, l'élément devient rigide, ce qui permet de transférer les efforts. Afin de leur attribuer une rigidité avant le contact, particulièrement pour les degrés de liberté (ddl) autres que celui axial, une deuxième série d'éléments discrets, qui partagent les mêmes nœuds que les éléments « gap », a été ajoutée. Pour faciliter la convergence des cas avec jeux, une rigidité axiale de $5e5$ N/m (environ $1/1000$ de la rigidité d'un ancrage) a aussi été ajoutée. Cette rigidité entraîne donc un effort axial dans l'ancrage d'une valeur maximal de 2 kN ($5e5$ kN/m * $0,0381$ m), ce qui est marginal comparativement aux efforts anticipés. Des rigidités nodales dans la plan horizontal ont été ajoutées orthogonalement sur les nœuds d'une poutrelle et d'une poutre principale afin de représenter la butée de sol. Le bout des ancrages est encastré au niveau du roc.

Un massif de sol a été modélisé à l'aide d'éléments volumique à 4 nœuds. Une discrétisation particulière a été forcée dans la zone de contact afin de compenser pour la dimension des poutres en contact (ligne plutôt que surface). Les dimensions choisies pour le massif sont de 3 fois les dimensions horizontales du grillage pour la largeur et la profondeur et de $3,5$ m + 2 fois la plus petite dimension du grillage ($18,1$ m total) pour la hauteur. Le sol modélisé est de l'argile rigide avec un module d'élasticité $E = 10$ MPa et un coefficient de poisson de $0,3$. Les conditions limites de la face inférieure du massif empêchent sa translation tout en permettant son expansion. Le choix de l'argile permet d'assurer de considérer le sol donnant le plus grand tassement à long terme et influence le comportement des ancrages.

La formulation de contact utilisée pour l'interface grillage-sol est la formulation continue [2]. Cette formulation implique des degrés de libertés additionnels permettant l'écriture variationnelle des conditions de contact. Le contact est donc traité en continu et en simultané avec la résolution de l'équilibre du système. Cette formulation ne nécessite théoriquement aucun autre support que le contact. La méthode d'appariement maître-esclave a été retenue.

L'intégration numérique a ensuite été effectuée à l'aide du schéma d'intégration incrémental de Newton prenant en compte les non-linéarités dues aux grands déplacements et au contact.

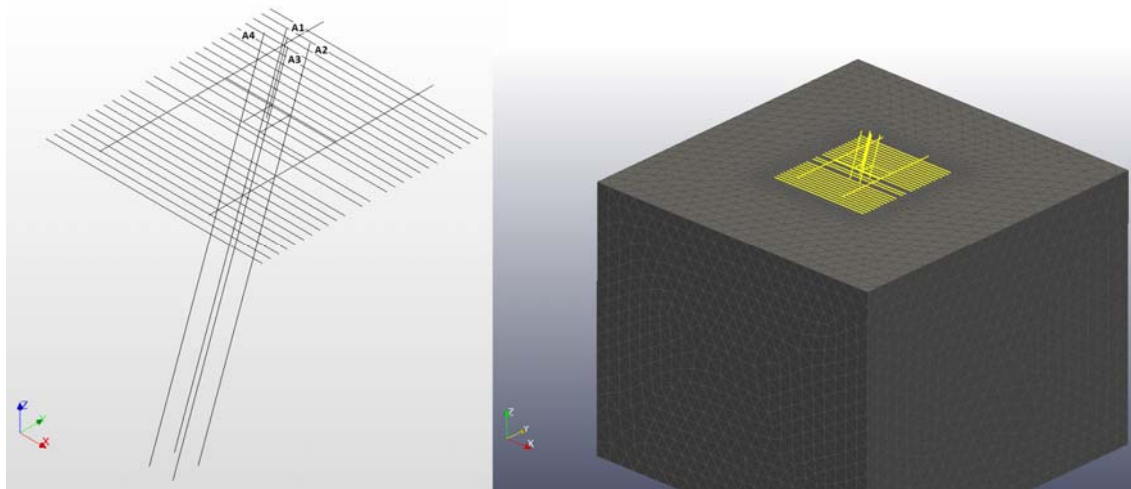


Figure 2 - Maillages du modèle numérique.

À gauche: grillage seul. À droite: grillage et massif de sol

Paramètres à l'étude

Deux cas d'efforts ont été pris en compte, un cas en compression et un cas en soulèvement. Les efforts, appliqués au nœud supérieur de la colonne de la fondation, selon les axes du modèle, sont :

	Cas 1 (Compression)	Cas 2 (Soulèvement)
Fx	-49,5 kN	14,9 kN
Fy	-2003,9 kN	1595,9 kN
Fz	-5352,0 kN	4324,0 kN

Les efforts sont appliqués progressivement de façon linéaire dans le but de faciliter la convergence. Le poids de la fondation ainsi que le poids de 0,5 m de remblais à 1800 kg/m³ sur le grillage a été imposé avant le début de l'application de la charge. Le poids du matériel servant à remblayer les 1,9 m restants a été négligé puisque ce matériel peut être de toutes natures.

Afin de simuler le fluage du sol, un ajustement imparfait de l'écrou des ancrages ou un allongement indu d'un ancrage au roc, différentes options de distribution du jeu ont été étudiés. Aucune prétension n'a été prise en compte dans les tirants. Les différentes dispositions sont présentées au Tableau 1.

Afin de simuler une variation de la profondeur du roc ainsi que certaines irrégularités du massif (un faille par exemple), la longueur des ancrages a été variée. 4 cas supplémentaires ont été ajoutés : Cas3A où le roc est à une profondeur de 18 m sous le grillage, le Cas3B où le roc est à une profondeur de 4 m sous le grillage et les Cas3C et Cas3D où le roc est à une profondeur de 4 m pour 2 ancrages et 5 m pour les 2 autres. Tous les autres paramètres sont ceux du Cas2A.

Afin d'étudier l'effet de l'ouverture des ancrages, un angle de ±19,84 degré par rapport à Z dans le plan XZ a été considéré. Tous les autres paramètres sont ceux du Cas2A. Cet angle a été choisi pour faciliter le forage, puisqu'il correspond à l'angle des ancrages dans le plan YZ.

Tableau 1 - Disposition des jeux

	Jeu (mm)			
	A1*	A2*	A3*	A4*
Cas1 et 2	0	0	0	0
Cas2A	25,4	25,4	25,4	25,4
Cas2B	12,7	25,4	25,4	25,4
Cas2C	25,4	12,7	25,4	25,4
Cas2D	25,4	25,4	12,7	25,4
Cas2E	25,4	25,4	25,4	12,7
Cas2F	38,1	25,4	25,4	25,4
Cas2G	25,4	38,1	25,4	25,4
Cas2H	25,4	25,4	38,1	25,4
Cas2I	25,4	25,4	25,4	38,1

* Voir Figure 2 pour la disposition des ancrages

RÉSULTATS

Variation des jeux

La Figure 3 présente des vues déformées du modèle pour le Cas2H avec un facteur d'amplification de 5. On peut bien observer le soulèvement d'un coin de la fondation. Il est à noter qu'il est normal que la fondation ne « touche » pas au massif de sol, même du côté X négatif, puisque le contact prend la forme d'un cylindre virtuel de 76 mm autour des poutres (profondeur des poutrelles divisée par 2).

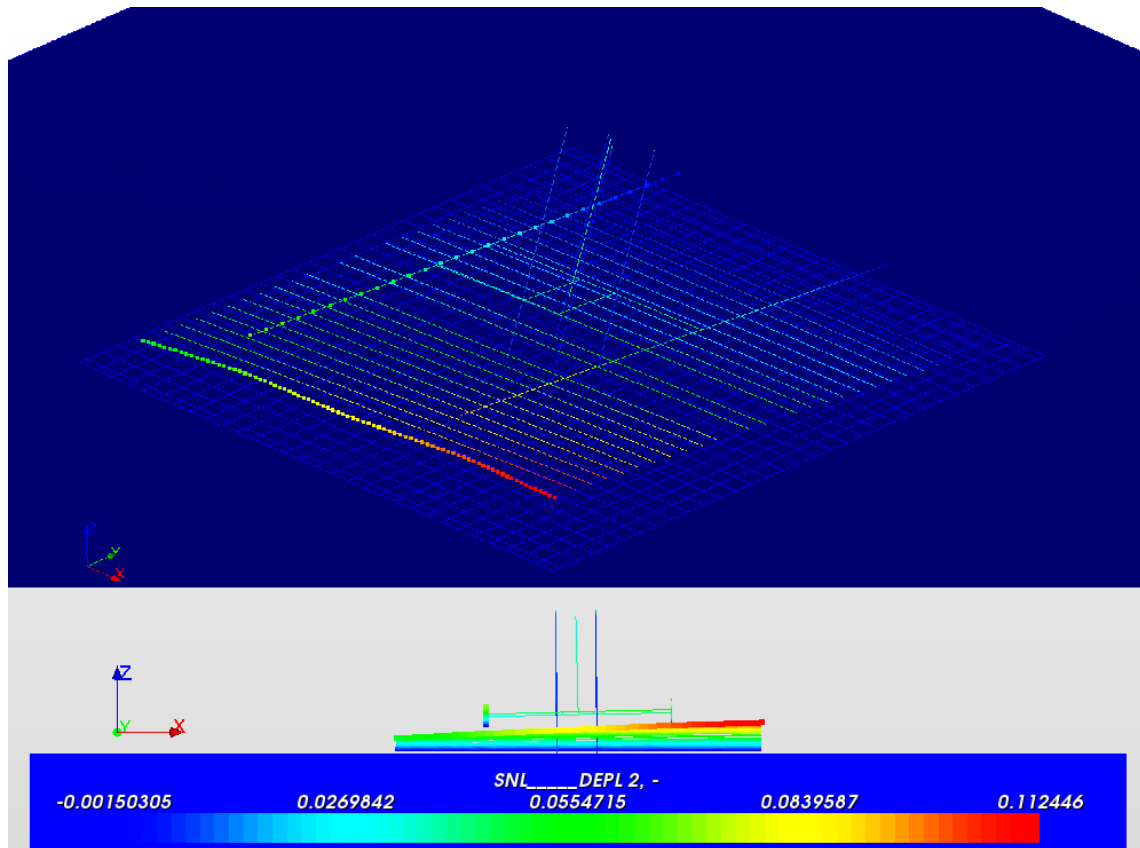


Figure 3 - Déplacement en Z pour le Cas2H (x5)

La Figure 4 présente l'évolution des efforts dans les ancrages pour le Cas2A et le Cas2E en fonction du pourcentage de charge appliqué. Le Tableau 2 présente les efforts maximums dans les ancrages pour chaque cas à l'étude. On peut constater que le Cas2E est le plus pénalisant et que l'effort de traction (1310 kN) est largement supérieur au quart de l'effort total dans les ancrages (3991 kN / 4 =

998 kN), ce qui représente une augmentation d'environ 31%. Si on ne considère que les cas où les jeux sont tous égaux (Cas2 et Cas2A), on constate que la répartition de la traction dans les ancrages est pratiquement uniforme, avec une variation à la moyenne maximum d'environ 6% et que la traction maximale est de 1064 kN. Une erreur d'uniformité dans le serrage des ancrages, représentée par les cas avec jeux non-uniformes, entraîne donc une augmentation substantielle de l'effort dans ceux-ci. En comparant le Cas2 au Cas2A, on constate que la variation des efforts de traction dans les ancrages est minime. L'éloignement d'environ 25,4 mm du grillage par rapport au sol ne semble pas affecter grandement les conditions de contact à l'ultime. Pour les cas où l'on retranche 12,7 mm au jeu d'un ancrage (B, C, D et E), les efforts sont maximums dans l'ancrage avec le plus petit jeu. Pour les cas où on additionne 12,7 mm au jeu d'un ancrage (F, G, H et I), les efforts sont maximum dans l'ancrage A3 ou A4, selon la direction de la rotation imposée par l'ancrage avec le jeu plus grand.

Tableau 2 - Efforts maximums dans les ancrages en fonction du jeu

	somme	A1			A2			A3			A4			
		N (kN)	V (kN)	M (kN-m)	N (kN)	V (kN)	M (kN-m)	N (kN)	V (kN)	M (kN-m)	N (kN)	V (kN)	M (kN-m)	
Cas1		-4	-1	0,5	1,3	-1	0,5	1,3	-1	0,5	1,3	-1	0,5	1,3
Cas2	4025	975	2,1	0,8	948	2,1	0,8	1038	2,2	0,8	1064	2,2	0,8	
Cas2A	4021	919	6,0	2,4	1002	6,4	2,4	1036	6,5	2,5	1064	6,8	2,5	
Cas2B	4033	1190	8,4	3,0	795	6,0	2,5	1120	8,1	3,0	928	6,8	2,7	
Cas2C	4032	819	6,7	2,8	1160	9,0	3,2	903	7,2	2,9	1150	9,0	3,3	
Cas2D	3994	1011	5,5	2,1	737	4,2	1,8	1277	6,5	2,3	969	5,0	2,0	
Cas2E	3991	756	3,4	1,5	977	4,3	1,7	948	4,0	1,6	1310	5,4	1,9	
Cas2F	3993	708	4,3	1,9	1038	6,1	2,3	976	5,5	2,1	1271	6,9	2,4	
Cas2G	3990	1061	5,1	1,9	672	3,4	1,5	1250	5,7	2,0	1007	4,7	1,8	
Cas2H	4026	889	6,9	2,8	1060	8,1	3,0	856	6,7	2,8	1221	9,1	3,2	
Cas2I	4024	1094	9,1	3,4	848	7,2	3,0	1208	9,8	3,5	874	7,5	3,0	

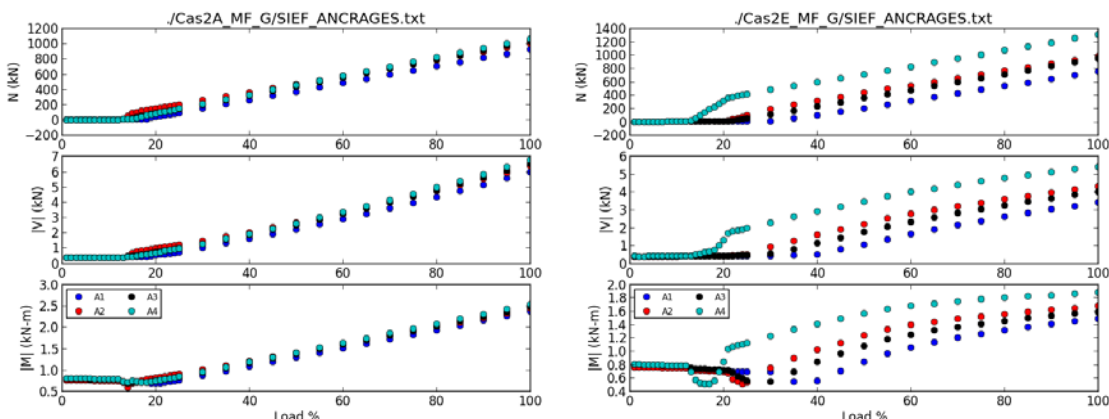


Figure 4 - Efforts dans les ancrages en fonction du niveau de charge pour les Cas2A et 2E

Le Tableau 3 présente le déplacement du nœud supérieur de la colonne à 100% de la charge pour le Cas1, le Cas2 et le Cas2A. La comparaison des déplacements du Cas2 avec ceux du Cas2A montrent une différence significative au niveau des translations. Cette différence est toutefois majoritairement due au jeu de 25,4 mm qui a été ajouté au bout de chaque ancrage. Toutefois, on peut constater un léger déplacement supplémentaire en Y ainsi qu'une légère rotation supplémentaire autour de l'axe X alors que le déplacement différentiel en Z diminue ($0,028 \text{ m} - 0,0254 \text{ m} = 0,003 \text{ m} < 0,008 \text{ m}$). Ces variations sont probablement dues au changement d'état de contact avec le sol. La variation étant minimale, on peut donc considérer que le décolllement de la fondation par rapport au sol n'affecte que très peu le comportement de la fondation en traction, pour autant que la butée de sol sur les poutres et poutrelles du grillage puisse toujours être développée.

Dans le but de faciliter l'analyse des déplacements pour les cas de jeux inégaux, le Tableau 4 présente le déplacement différentiel du nœud du bout de la colonne à 100% de la charge entre les cas à jeux

inégaux et le Cas2A. De façon générale, les déplacements latéraux varient d'au plus 0,025 m et le soulèvement varie d'au plus 0,013 m. Les rotations autour des axes horizontaux (X et Y) varient considérablement, jusqu'à 0,73 degré, ce qui est supérieur à la rotation absolue du Cas2A. Une vérification de la jambe du pylône devrait être effectuée afin de s'assurer que son mode de flambement n'est pas précipité.

Tableau 3 - Déplacement du nœud supérieur de la colonne à 100% de la charge; effet du jeu des ancrages

	DX (m)	DY (m)	DZ (m)	DRX (deg)	DRY (deg)	DRZ (deg)
Cas1	0,002	-0,200	-0,076	0,37	0,09	0,00
Cas2	0,002	0,029	0,008	-0,16	0,05	0,03
Cas2A	0,011	0,043	0,028	-0,48	0,31	-0,01

Tableau 4 - Déplacement différentiel des Cas2B à Cas2I

	DX (m)	DY (m)	DZ (m)	DRX (deg)	DRY (deg)	DRZ (deg)
Cas2B	-0,021	0,002	0,001	-0,07	-0,61	0,07
Cas2C	0,003	0,002	0,000	-0,08	0,09	-0,04
Cas2D	0,005	-0,017	0,007	0,50	0,18	0,11
Cas2E	-0,023	-0,015	0,006	0,48	-0,68	-0,02
Cas2F	0,006	-0,015	0,013	0,46	0,23	0,13
Cas2G	-0,025	-0,013	0,012	0,44	-0,73	-0,03
Cas2H	-0,021	0,005	0,006	-0,11	-0,60	0,04
Cas2I	0,003	0,005	0,006	-0,13	0,09	-0,01

Variation de la longueur des ancrages

Le Tableau 5 présente les efforts maximums dans les ancrages pour chaque cas de longueur d'ancrage et pour le cas de référence Cas2A.

Tableau 5 - Efforts maximums dans les ancrages en fonction de leur longueur

	somme	A1			A2			A3			A4		
	N (kN)	N (kN)	V (kN)	M (kN-m)	N (kN)	V (kN)	M (kN-m)	N (kN)	V (kN)	M (kN-m)	N (kN)	V (kN)	M (kN-m)
Cas2A	4021	919	6,0	2,4	1002	6,4	2,4	1036	6,5	2,5	1064	6,8	2,5
Cas3A	3993	909	7,1	3,2	887	6,9	3,2	1088	8,1	3,5	1109	8,2	3,5
Cas3B	3999	911	3,3	1,2	883	3,3	1,3	1089	3,8	1,3	1116	3,8	1,3
Cas3C	4011	945	3,7	1,4	915	3,6	1,4	1063	3,4	1,2	1088	3,4	1,2
Cas3D	4000	907	2,9	1,1	890	3,3	1,3	1108	3,9	1,3	1095	3,3	1,2

On peut constater que pour les 2 nouveaux cas où la profondeur de roc est uniforme, la somme des efforts axiaux dans les ancrages est légèrement inférieure à celle du Cas2A. La Figure 5 présente les zones de contact entre le grillage et le sol à l'état final pour les Cas3B (4 m), Cas2A (8 m) et Cas3A (18 m) respectivement. On peut constater que le Cas2A est le cas où la surface de grillage en contact avec le sol est la plus grande. On peut alors présumer que l'effet de levier est plus important, ce qui aurait pour effet d'augmenter les efforts dans les ancrages. La diminution de la surface en contact pour le Cas3A pourrait être causée par un déplacement vertical plus important, ce qui distance le grillage par rapport au sol, alors qu'une plus grande rigidité en rotation due aux ancrages plus courts limiterait la rotation de la fondation et donc diminuerait son appui sur le sol pour le Cas3B.

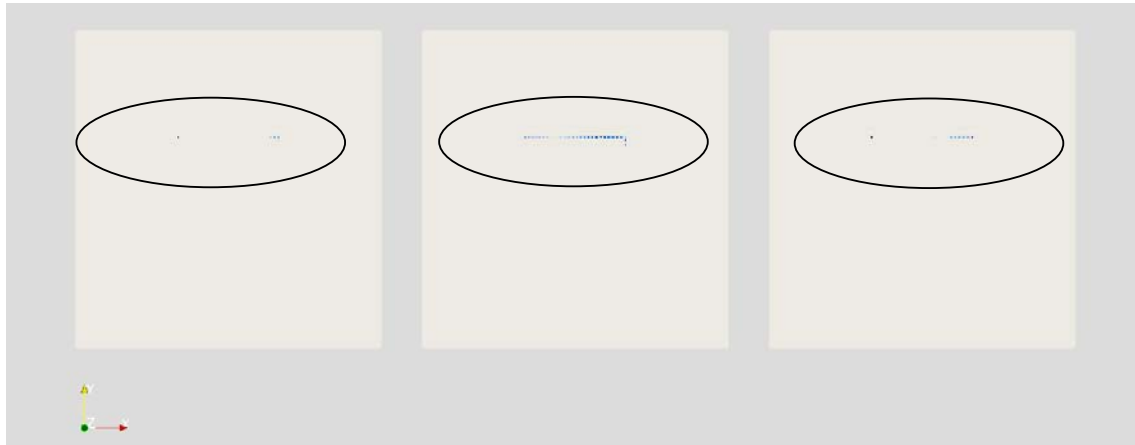


Figure 5 - Zones de contact à la charge maximale; de gauche à droite: Cas3B, Cas2A et Cas3A

Pour les cas où le roc est plus bas pour 2 ancrages sur 4 (Cas3C et Cas3D), on peut constater une légère augmentation de la charge totale dans les ancrages. Cette augmentation est plus prononcée pour les ancrages plus courts puisqu'ils sont plus rigides.

Variation de l'angle des ancrages

Le Tableau 6 présente les efforts maximums dans les ancrages pour le Cas2A et le Cas4A. On peut constater que l'effort axial dans les ancrages est plus important pour le Cas4A par rapport au Cas2A, ce qui est un effet direct de l'angle des ancrages. En effet : $4021 \text{ kN} / 4202 \text{ kN} = 0,957 \approx \cos(19.84) = 0,941$.

Tableau 6 - Efforts maximums dans les ancrages en fonction de leur angle

	somme	A1			A2			A3			A4		
	N (kN)	N (kN)	V (kN)	M (kN-m)	N (kN)	V (kN)	M (kN-m)	N (kN)	V (kN)	M (kN-m)	N (kN)	V (kN)	M (kN-m)
Cas2A	4021	919	6,0	2,4	1002	6,4	2,4	1036	6,5	2,5	1064	6,8	2,5
Cas4A	4202	973	5,4	2,1	961	5,5	2,1	1127	6,4	2,3	1141	6,3	2,3

Le Tableau 7 présente le déplacement du nœud supérieur de la colonne à 100% de la charge pour le cas avec les ancrages ouverts (Cas4A) et pour le cas de référence Cas2A. On peut constater que le déplacement en Z est presque 50% plus important lorsque les ancrages sont ouverts, les ancrages étant moins efficaces pour reprendre une charge verticale. Toutefois, on peut constater que le déplacement selon X est complètement bloqué dans cette configuration, ce qui est cohérent avec l'orientation des ancrages.

Tableau 7 - Déplacement du nœud supérieur de la colonne à 100% de la charge en fonction de leur angle

	DX (m)	DY (m)	DZ (m)	DRX (deg)	DRY (deg)	DRZ (deg)
Cas2A	0,011	0,043	0,028	-0,48	0,31	-0,01
Cas4A	0,000	0,047	0,036	-0,52	0,00	-0,02

CONCLUSION

D'après les résultats présentés, le concept de fondation hybride semble fonctionnel. Les déplacements obtenus en soulèvement sont acceptables et les efforts dans les ancrages sont inférieurs à leur limite et ce, même en considérant un déséquilibre dans les ancrages. Une variation non-linéaire de l'effet de levier en fonction de la profondeur du roc (longueur des ancrages) a été observée. Bien qu'une profondeur du roc de 8 m sous la fondation semble produire un effet près d'un maximum, il serait requis de valider la sensibilité de ce paramètre. L'ouverture des ancrages augmente le déplacement

vertical ainsi que les efforts dans les ancrages, mais stabilise le déplacement latéral en X. L'ouverture des ancrages en Y pourrait être étudiée dans le but de limiter les déplacements dans cette direction.

Une variation importante de la valeur absolue du déplacement est observée entre le cas de compression et les cas de soulèvement. De plus, en conditions journalières, les pieds en compression subiront probablement du fluage du sol alors que les pieds en soulèvement seront toujours retenus par les ancrages. Toutefois, suite à une avarie, les conditions d'appuis (compression vs soulèvement) risquent de changer. Une étude incluant 4 fondations ainsi que la structure du pylône serait requise afin de mieux définir la répartition des efforts et l'effet du tassement différentiel. Un modèle complet permettrait aussi de valider l'effet de la continuité de la colonne de fondation avec la membrure principale du pylône. D'autres études paramétriques sont requises pour valider l'effet de différentes rigidités de sol. Une évaluation du comportement de la fondation sous des charges journalières est requise afin de s'assurer de la stabilité du système.

Une analyse économique ainsi que des essais de mise-en-place sont à prévoir à moyen terme afin de confirmer la viabilité du concept. Ce n'est qu'une fois que l'ensemble des essais techniques et l'analyse économique complétés qu'Hydro-Québec pourra évaluer la possibilité d'une implantation à plus large échelle de ce type de fondation.

BIBLIOGRAPHIE

- [1] EDF *Code_Aster* (<http://www.code-aster.org>).
- [2] T. DeSoza *Notice d'utilisation du contact dans Code_Aster* (http://www.code-aster.org/V2/doc/v11/fr/man_u/u2/u2.04.04.pdf, septembre 2013).
- [3] T. DeSoza *Poutres multi-fibres en grands déplacements* (http://www.code-aster.org/V2/doc/v11/fr/man_r/r3/r3.08.09.pdf, mars 2013).
- [4] J.-L. Fléjou *Éléments "exacts" de poutres (droites et courbes)* (http://www.code-aster.org/V2/doc/v11/fr/man_r/r3/r3.08.01.pdf, avril 2013).
- [5] J.-L. Fléjou *Opérateur AFFE_CARA_ELEM* (http://www.code-aster.org/V2/doc/v11/fr/man_u/u4/u4.42.01.pdf, avril 2013).
- [6] J.-L. Fléjou *Relations de comportement des éléments discrets* (http://www.code-aster.org/V2/doc/v11/fr/man_r/r5/r5.03.17.pdf, janvier 2013).
- [7] OPEN CASCADE *Salome* (<http://salome-platform.org/>).