

CAS PRATIQUE D'UTILISATION DES ABAQUES DE KRANZ

PRACTICAL USE OF THE KRANZ CHART

Grégory MEYER¹

Luis CARPINTEIRO²

¹ *Géotechnicien, EGIS, Paris, France*

² *Direction technique, GINGER, Paris, France*

RÉSUMÉ – La norme d'application nationale française NF P94-282 de l'Eurocode 7 requiert l'analyse de la stabilité de Kranz d'un ouvrage de soutènement tiranté. La méthode a peu évolué depuis son développement en 1939. La bibliographie montre que cette vérification est nécessaire par rapport à une pratique parfois utilisée d'une exclusion seule du coin de poussée. Il a été développé par (Meyer, 2022) le calcul de l'effort déstabilisateur que peut induire une nappe de tirants sur un écran de soutènement, normalisé par l'effort stabilisateur d'un calcul classique à la rupture de type MEL. Cette méthode a abouti à la présentation d'abaques de stabilité, qui permettent de manière simplifiée de vérifier au stade du prédimensionnement d'un ouvrage la longueur utile d'un tirant nécessaire afin de satisfaire le coefficient normatif requis par la norme précitée. Après un bref rappel de la méthode et de ses conclusions, il sera présenté un exemple appliqué à un ouvrage réel sinistré dans lequel la vérification de Kranz n'a pas été correctement abordée. La vérification de cette stabilité par la méthode classique ou par les abaques proposés révèle ainsi toute son importance.

ABSTRACT – The French national standard NF P94-282 of Eurocode 7 requires the analysis of the Kranz stability of a tensioned retaining structure. The method has changed little since it was first developed in 1939. The bibliography shows that this verification is necessary, as opposed to the sometimes-used practice of excluding the thrust wedge alone. Meyer (2022) has developed a calculation of the destabilizing force that can be induced by a sheet of tie rods on a retaining wall, normalized by the stabilizing force of a conventional MEL-type failure calculation. This method has led to the presentation of stability abacuses, which provide a simplified means of checking, at the pre-dimensioning stage of a structure, the useful length of a tie-rod necessary to satisfy the normative coefficient required by the standard. After a brief review of the method and its conclusions, an example will be presented, applied to a real, damaged structure in which the Kranz verification has not been properly addressed. The importance of verifying this stability using either the classical method or the proposed abacuses are thus revealed.

1. Introduction

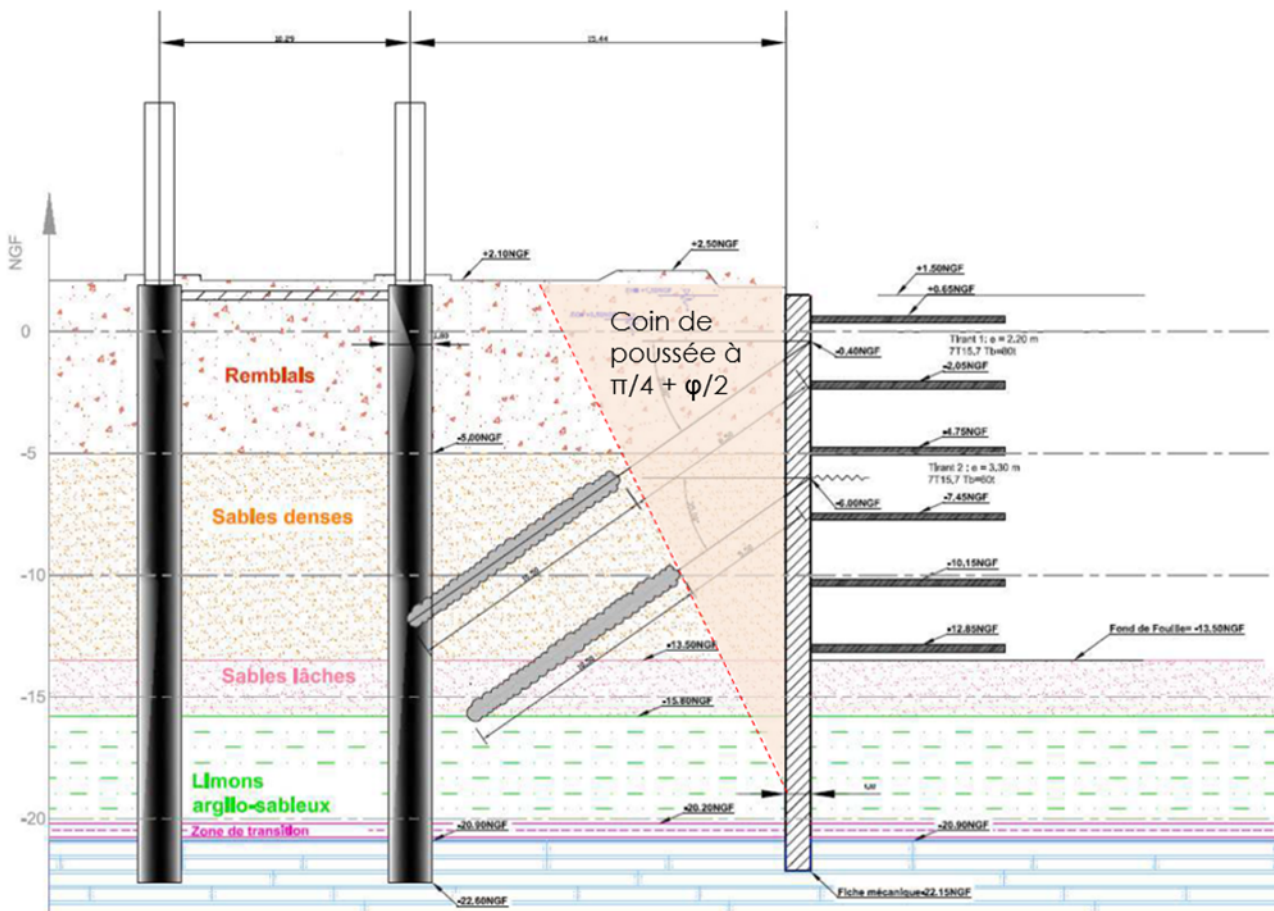
La nécessité de réaliser les vérifications de Kranz n'est plus à démontrer (Cuira, 2014, Meyer, 2022) et est demandé par la norme NF P94-282 (AFNOR, 2009). Le positionnement des tirants en dehors du coin de poussée de Coulomb est une condition nécessaire mais non suffisante. Le présent article présente un cas réel d'instabilité d'une fouille par défaut de Kranz et comparé aux abaques déterminés dans (Meyer, 2022). Ces abaques ont été établis à partir de l'équilibre de Kranz, dans un premier temps pour les sols frottants

uniquement puis par extension aux sols cohérents et frottants, avec ou sans présence de nappe.

2. Présentation du cas étudié

Le projet se situe dans le Sud de la France, et comporte jusqu'à 7 niveaux de sous-sol, à usage de parc de stationnement d'une capacité d'environ 750 places. Il est prévu de réaliser 4 tours à usage de bureaux, commerces et logements au-dessus du parc de stationnement, allant du R+9 au R+30. Le soutènement est constitué de parois moulées de 1 m d'épaisseur, maintenues par deux lits de tirants afin de libérer un maximum d'emprise à l'intérieur de la fouille lors des travaux de terrassement et lors de la réalisation de l'infrastructure.

Le terrain naturel se situe aux alentours de +2,5 m NGF, avec un niveau de nappe à 1 m de profondeur. En phase définitive, 6 niveaux de dalles et radier viennent soutenir la paroi. En phase provisoire, les tirants sont conçus avec une longueur scellée de 10,5 m, et une longueur libre de 8,5 m pour le premier lit, et 5,5 m pour le second lit, avec une inclinaison commune à 35° sur l'horizontale. Soit respectivement une longueur utile $L_u = L_l + \frac{1}{2} L_s$ de 13,8 m et 10,8 m. Les terrains sont constitués de remblais puis de sables denses, surmontant une couche de sable lâche et de limons argilo-sableux, avant de rencontrer le substratum du Stampien dans lequel se fiche la paroi moulée sur une hauteur de 1,2m.



3. Exécution des travaux

L'auscultation de l'ouvrage a montré des déplacements inattendus allant jusqu'à près de 10 cm en tête de la paroi moulée alors que les terrassements avaient atteint la cote de -10.5 m NGF, soit 3m au-dessus du fond de fouille. Les déplacements les plus importants ont lieu lors de cette phase de terrassement et concernent plus particulièrement les panneaux P23 et P25 (9 cm de déplacement horizontal chacun) et P27 (4 cm de déplacement). Les panneaux instrumentés sur les autres tympans de l'ouvrage présentent des déplacements moins importants, de l'ordre de 2 cm (Figure 2).

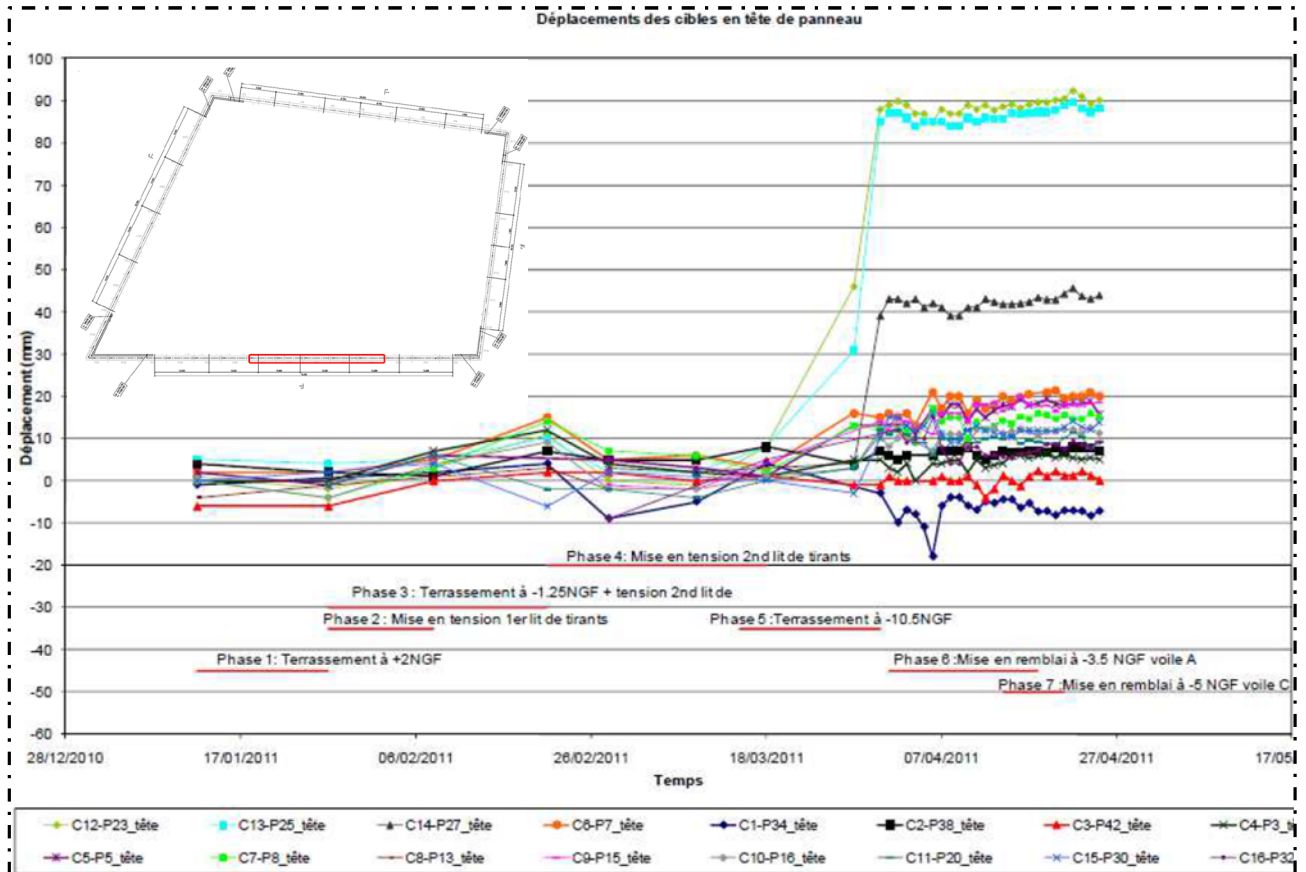


Figure 2 : Suivi des déformations de la paroi moulée pendant les phases de terrassement et représentation schématique de la zone présentant des déformations importantes (en rouge).

Des travaux ont été effectués en urgence pour stabiliser la paroi moulée. Après remblaiement, il a été observé l'absence d'évolution des déformations ce qui a permis de réaliser une étude de conception du renforcement du soutènement.

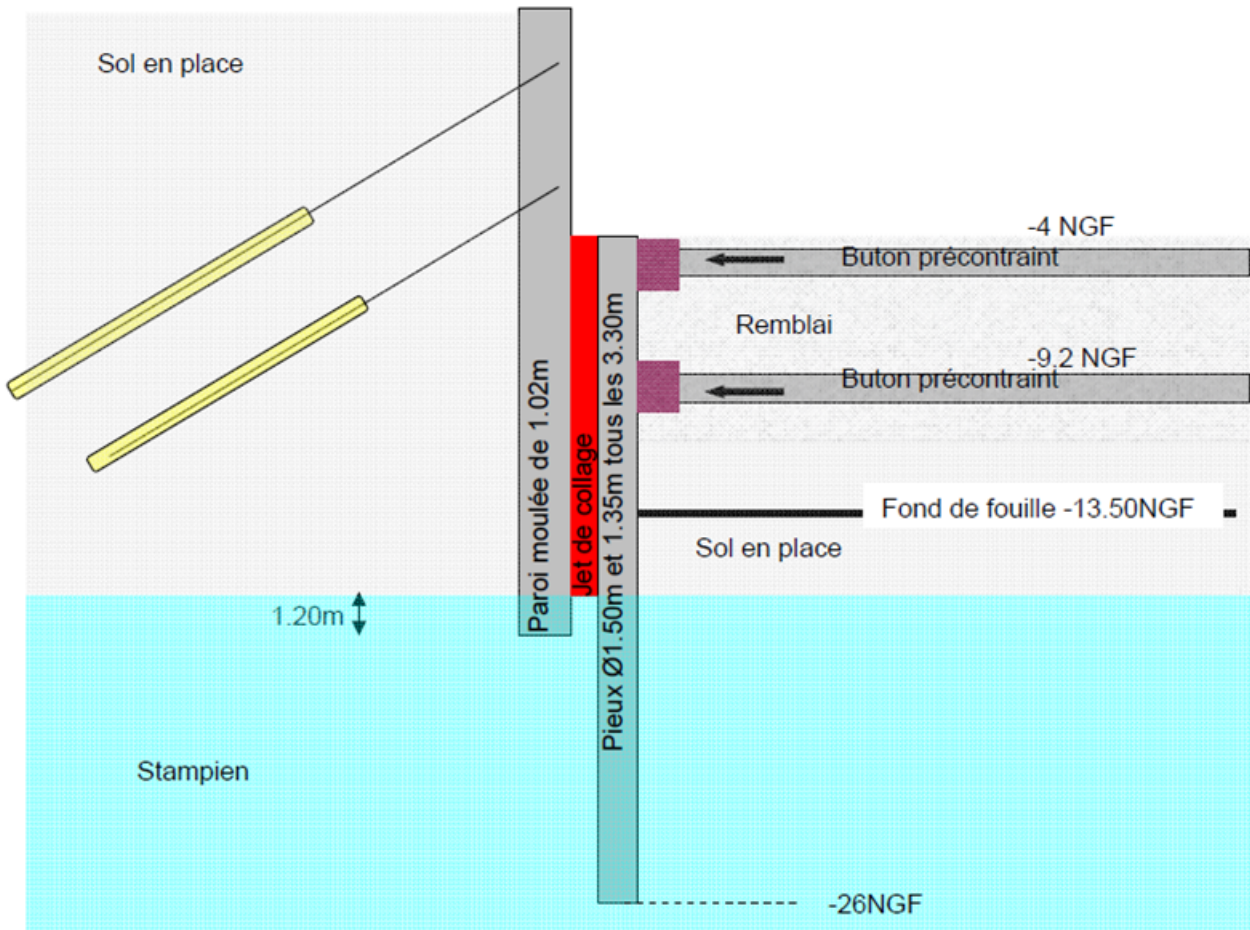


Figure 3 : Coupe schématique du renforcement de la paroi moulée.

Le renforcement a consisté à réaliser des pieux en gros diamètre devant la paroi moulée dont le collage entre ces derniers et la paroi a été assuré par des colonnes de sol ciment. L'ensemble du renforcement a été liaisonné par des liernes en béton armé de grande inertie butonnées par des éléments métalliques précontraints dont la charge était suivie et contrôlée par des vérins asservis à une centrale hydraulique, comme illustré sur la Figure 3.

4. Hypothèses de calculs

D'après les contre-calculs réalisés dans le cadre de cet article, il est possible de montrer que les tirants ont été réalisés selon une méthode IRS (Injection Répétitive et Sélective), à partir du critère sur le cisaillement admissible du bulbe de scellement. Les mouvements enregistrés correspondent à une rotation de la tête de l'écran (Figure 4), en lien avec un défaut des ancrages (norme NF P94-282, AFNOR, 2020).

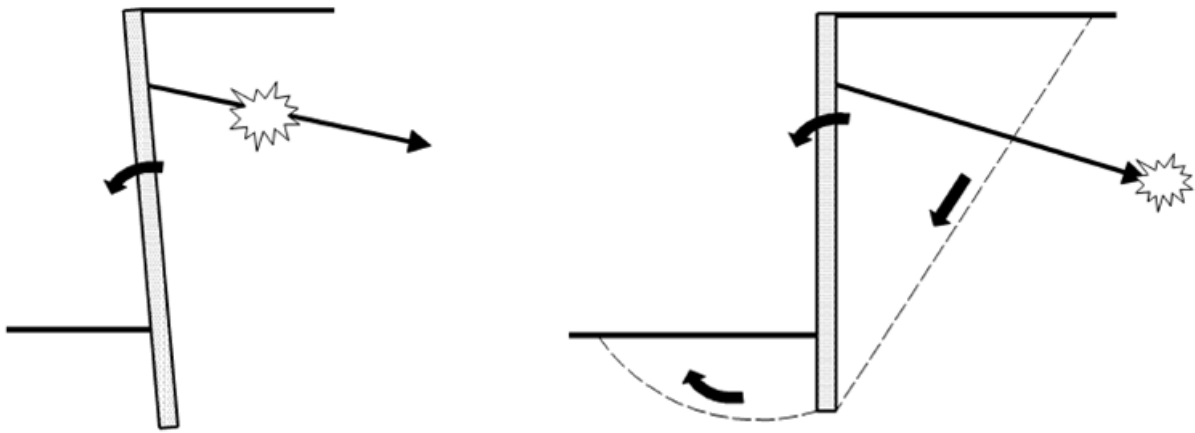


Figure 4 : Ruine d'un écran par rotation suite à la ruine d'un ancrage (AFNOR, 2020).

Gauche : Rupture d'un tirant d'ancrage

Droite : Arrachement d'un tirant d'ancrage

En recalculant la stabilité de l'écran par la méthode aux coefficients de réaction, on peut remarquer que la vérification sur la butée ($F_{butée} = 1,65 > 1,49$) est satisfaite. La disposition géométrique des tirants en dehors du coin de poussée a également été respectée (Figure 1), en partant du point d'effort tranchant nul calculé par la méthode MISS-K et en se basant sur l'angle de frottement des sables denses majoritairement représentés (avec un angle de frottement de 38°). En revanche, ces mêmes calculs montrent que la stabilité de Kranz n'est pas vérifiée, avec les coefficients de sécurité du Tableau 1.

Tableau 1. Coefficients de sécurité sur la stabilité de Kranz

Phases	Coefficient de sécurité Lit 1	Coefficient de sécurité Lit 2
2 (mise en place du premier lit)	$F = 0,65 < 1,00$	-
3 (mise en place du second lit)	$F = 0,58 < 1,00$	$F = 1,05 > 1,00$
4 (excavation fond de fouille)	$F = 0,22 < 1,00$	$F = 0,34 < 1,00$

Ces résultats montrent que la stabilité de Kranz, calculée selon la méthode normative actuellement en vigueur, n'est pas vérifiée pour la quasi-totalité des phases et des lits de tirants, excepté pour le lit 2 lors de sa pose. Au moment de l'arrêt des travaux correspondant à la phase 3 des calculs, l'instabilité est donc clairement avérée, ce qui peut expliquer la rotation observée sur les mesures de déformations de la tête de la paroi.

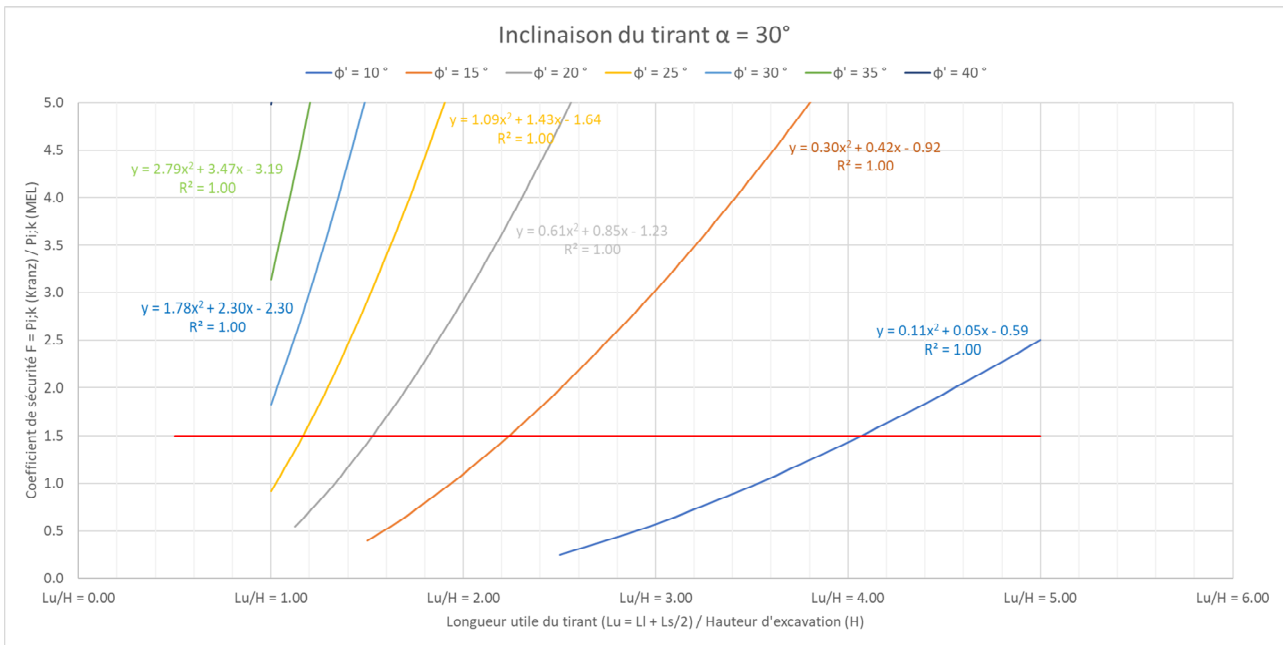


Figure 5 : Abaque de la stabilité de Kranz pour une inclinaison de 30° du tirant (Meyer, 2022).

Dans un tel cas, la détermination de la longueur utile du tirant à partir des abaques de (Meyer, 2022) aurait permis de vérifier ce critère. Il est conseillé d'être prudent sur les valeurs retenues intermédiaires lorsque les valeurs sortent des abaques et il convient de se placer du côté de la sécurité, c'est-à-dire avec les longueurs utiles les plus élevées. Soit dans le cas présent (pour $\phi = 38^\circ$ et $\alpha = 35^\circ$) un rapport L_u / H compris entre 0,69 et 0,82, soit pour $H = 16$ m jusqu'au fond de fouille, une longueur utile comprise entre 11,0 et 13,1 m (Tableau 2). Ces valeurs sont à majorer en cas de présence d'eau à l'arrière de l'écran (Meyer, 2022) par un coefficient compris entre 1,5 (choisi ici) et 2,0, soit une longueur utile comprise entre 16,5 et 20,0 m. En conservant une longueur scellée de 10,5 m permettant de reprendre par frottement l'effort attendu, la longueur libre aurait donc dû être comprise entre 11,3 et 14,8 m. Pour rappel, celles-ci ont été exécutées à 8,5 et 5,5 m pour respectivement le premier et second lit de tirants.

Tableau 2. Valeurs de longueurs utiles minimales normalisées par la hauteur d'excavation pour assurer la stabilité de Kranz (hors cohésion et présence d'une nappe).

NB : une erreur s'était glissée dans les valeurs de (MEYER, 2022), corrigée ci-dessous :

Lu/H min pour $F \geq 1,5$ (m)	$\phi' =$						
	10°	15°	20°	25°	30°	35°	40°
$\alpha = 0^\circ$	7.69	4.16	2.61	1.85	1.42	1.17	-
$\alpha = 10^\circ$	5.68	3.05	2.00	1.48	1.17	1.00	-
$\alpha = 20^\circ$	4.65	2.52	1.69	1.28	1.04	0.89	-
$\alpha = 30^\circ$	4.07	2.23	1.52	1.17	0.95	0.82	-
$\alpha = 40^\circ$	3.78	2.10	1.44	1.12	0.91	0.78	0.69
$\alpha = 50^\circ$	3.73	2.10	1.45	1.12	0.92	0.78	0.69
$\alpha = 60^\circ$	4.05	2.30	1.60	1.23	0.99	0.84	0.73
$\alpha = 70^\circ$	5.13	2.96	2.05	1.57	1.26	1.04	0.89

Le calcul MISS-K a montré qu'il était nécessaire de retenir une longueur libre de 14 m pour le premier lit et de 13 m pour le second lit. La synthèse de ces résultats est présentée dans le Tableau 3. Cela démontre que les abaques s'avèrent être une aide utile à la décision qui sont confirmés par les calculs aux coefficients de réaction. Il est néanmoins nécessaire de rester prudent avec les valeurs annoncées qui n'ont été calculées sur les abaques que pour un unique lit de tirants. Pour des fouilles de grande hauteur avec plusieurs niveaux d'ancrage, une adaptation de ces abaques serait nécessaire.

Tableau 3. Valeurs de longueurs utiles minimales pour assurer la stabilité de Kranz

Longueur libre (m)	Réalisé	Abaques + prise en compte de l'eau (x 1,5)	Calcul MISS-K
Lit 1 supérieur	8,5	11,3 à 14,8	14,0
Lit 2 supérieur	5,5		13,0

5. Conclusions

L'objet de cet article n'est bien entendu pas d'incriminer la méthode de stabilisation d'une fouille par tirants, mais d'alerter sur le fait que l'absence de vérification de la stabilité de Kranz peut entraîner des conséquences lourdes financières, de délais voire humaines. La seule hypothèse de placer la partie scellée en dehors du coin de poussée n'est pas suffisante comme cela été démontré dans le présent article. La méthode analytique proposée n'a pas pour vocation à se substituer aux calculs usuels utilisant les coefficients de réaction, mais peut permettre rapidement de vérifier le dimensionnement d'un système tiranté. Il s'agit d'une méthode simplifiée, mais qui montre, dans l'exemple présenté, qu'elle aurait suffi à éviter de lourdes conséquences sur le projet.

Bibliographie

NF P94-282, Norme d'application nationale de l'Eurocode 7, Ouvrages de soutènement, AFNOR, 2009

Cuira F., Le modèle Kranz : enjeux conceptuels et considérations pratiques, JNGG (2014)

Kranz E., Über die Verankerung von Spundwänden (1953)

Meyer G., Cas Pratiques d'Utilisation des Abaques de Kranz, JNGG (2022)

NF P94-282, Calcul géotechnique Ouvrages de soutènement, norme écrans, AFNOR (2009)

T.A. 95, Tirants d'ancrage. Recommandations concernant la conception, le calcul, l'exécution et le contrôle. Eyrolles, 151 p.

T.A. 2020, Règles professionnelles relatives à la conception, au calcul, à l'exécution, au contrôle et à la surveillance, CFMS, Corrigendum de Décembre 2020

Verdeyen J., Nuyens J., Vérification expérimentale des méthodes de calcul des rideaux d'ancrage de palplanches simplement ancrées, Symposium Rhéologie et mécanique des sols, Grenoble (1964)