

TECHNIQUE INNOVANTE POUR LE RENFORCEMENT DES FONDATIONS DE PYLONES ELECTRIQUES

AN INOVATIVE SOLUTION FOR THE REINFORCEMENT OF ELECTRICAL PYLON FOUNDATIONS

Bruno MAZARÉ ¹, François DEPARDON ²

1 EGIS Géotechnique, Grenoble, France

2 EGIS Géotechnique, Paris, France

RESUME - A la suite de la tempête de 1999, Réseau de Transport et d'Electricité (RTE) a entrepris le renforcement de ses pylônes soumis à des efforts d'arrachement. L'article décrit une technique innovante en matière de renforcement des fondations superficielles soumises à des efforts d'arrachement, basée sur un renforcement des sols surmontant la semelle de fondation par traitement aux liants hydrauliques.

ABSTRACT - Following damages to the electricity transport network during the 1999 storms, RTE (electric transport network company) undertook a programme to enhance the security of this network. This article describes an innovative solution of reinforcement of shallow or mass foundations subjected to uplift load by reinforcing the soil surrounding the foundation by treating the soil by mixing with hydraulic or cement binders.

1. Introduction

Lors de la tempête de décembre 1999, près de 1000 pylônes électriques des lignes à haute et très haute tension ont été endommagés. Pour faire face à ces événements climatiques exceptionnels et pour accroître la capacité de son réseau, Réseau de Transport et d'Electricité (RTE) a donc engagé un vaste programme de sécurisation de ses lignes qui s'étale sur 15 ans.

Ce programme consiste à renforcer d'une part les superstructures et d'autre part les infrastructures (fondations). On s'intéressera dans cet article à décrire une solution innovante de renforcement des fondations soumises à un effort d'arrachement, solution imaginée et mise au point par Egis.

Jusqu'à présent le renforcement des fondations de lignes électriques était réalisé de manière quasi systématique par la technique des micropieux.

La solution innovante conçue par Egis concerne les ouvrages de tension supérieure ou égale à 63.000 Volts, et plus généralement l'ensemble des structures dont les fondations superficielles sont soumises à un effort d'arrachement. Elle s'applique actuellement à des fondations existantes présentant un déficit de résistance à l'arrachement (du fait de l'accroissement des sollicitations climatiques) compris entre quelques dizaines à quelques centaines de kilo Newton (20 à 400 kN environ).

2. Description de la solution innovante Egis

Les pylônes électriques de lignes haute tension (quadripode) sont majoritairement fondés sur des semelles superficielles massives, en béton, en forme de gradins, encastrées entre 2 et 3 m de profondeur dans le terrain naturel de bonne compacité.



Figure 1 fondation de pylône excavée

Chaque semelle est calculée pour reprendre l'effort d'arrachement généré par l'effet du vent et/ou du givre sur la ligne aérienne.

Le dimensionnement des semelles de fondation est régi par des règles de calcul propres à RTE (Recueil des solutions types – méthode EPRI)

L'effort d'arrachement sollicitant chaque semelle est repris d'une part par le poids mort surmontant le débord de la semelle de fondation et d'autre part par la résistance au cisaillement du sol sus-jacent à la semelle (plan de cisaillement vertical passant par l'arête extérieur de la semelle de fondation – plan BF de la figure 1 ci dessous).

Certaines semelles sont conçues dans les sols cohérents avec un redans en partie inférieure afin de mobiliser un effort de cisaillement majoré ; le plan de cisaillement se localisant alors dans le terrain en place et non dans le terrain remanié par l'excavation liée à la réalisation de la semelle.

Le procédé innovant proposé par Egis consiste à renforcer la résistance à l'arrachement du massif de fondation existant en traitant le sol en place aux liants hydrauliques sur une épaisseur de l'ordre du mètre au dessus de la semelle de fondation. Ce système permet de créer une "dalle" débordante réalisée à l'aide des matériaux de la fouille traités.

De par ses dimensions, cette dalle permet d'augmenter le poids mort stabilisateur coiffant la fondation. Elle permet également de mobiliser un effort de frottement latéral supplémentaire sol – dalle en périphérie de ce renforcement du fait de l'augmentation du périmètre de la fondation.

Pour peu que la dalle de sol traité soit suffisamment résistante, le volume de sol stabilisateur mobilisé pour reprendre l'effort d'arrachement passe de BFF'B' à BCAGG'A'B' (voir figure 2). Cela s'avère largement suffisant pour améliorer la résistance à l'arrachement de quelques dizaines à quelques centaines de kilo Newton.

Le procédé a fait l'objet d'un dépôt de brevets nationaux et internationaux.

Egis travaille également sur trois autres concepts de renforcement adaptés à des configurations de fondations particulières (faible entraxe entre appuis, massif de fondation coulé sous nappe). Ceux ci ne sont pas développés dans cet article.

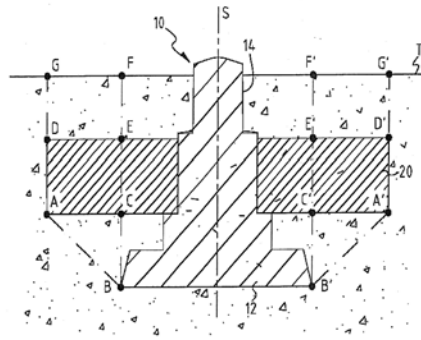


Figure 2 Schéma de semelle renforcée par une dalle débordante

3. Intérêt du procédé du point de vue économique et environnemental

L'intérêt de ce procédé du point de vue économique et environnemental est évident :

- Les travaux sont réalisés avec des moyens mécaniques légers qui préservent le site (un grand nombre de pylônes sont d'accès difficile ou implantés au milieu de zones agricoles) ;
- Les matériaux issus de la fouille sont remis en place après traitement, ce qui évite les mises en dépôt et limite les apports extérieurs ; le savoir faire autoroutier en matière de traitement des sols est ici transposé au domaine des lignes électriques ;
- L'enfouissement de la dalle dans le terrain naturel évite les impacts sur l'exploitation du terrain en surface et à faible profondeur (exploitations agricoles notamment) ;
- La mise en œuvre de liens mécaniques entre le renforcement et la fondation existante n'est pas nécessaire, ce qui réduit la difficulté et le coût des travaux.

Le procédé permet de réutiliser la quasi-totalité des sols en place pour peu qu'ils soient traitables aux liants hydrauliques. L'emploi de produits industrialisés est donc extrêmement limité.

Les liants issus de produits naturels classiques sont conformes à la réglementation en vigueur et non polluants. L'émission de poussières en phase travaux est très limitée.

La mise en œuvre est assurée par des engins de gabarit réduit, type agricole, ce qui limite considérablement l'impact des travaux d'accès sur les sites et cultures. Cette technique d'amélioration est donc accessible aux entreprises de travaux publics maîtrisant le traitement des sols en petites quantités.

En définitive, ce procédé répond parfaitement à la politique et aux engagements de RTE en matière environnementale et de développement durable.

4. Phase expérimentale du procédé

La phase expérimentale de cette innovation a été assurée par EGIS sous le contrôle de RTE.

Elle a consisté en des modélisations analytiques et aux éléments finis, des essais d'identification et de traitement en laboratoire, complétés par des essais en vraie grandeur sur deux sites distincts (mise en œuvre de la dalle en matériaux traités sur huit massifs de fondation, puis arrachements et suivis en temps réel par une instrumentation spécifique).

Cette phase expérimentale a débouché sur une adaptation des formules RTE de dimensionnement des fondations superficielles à l'effort d'arrachement et sur un cahier de charges de mise en œuvre de ces renforcements et de leur contrôle.

On décrit ci après les différentes phases de cette étude expérimentale.

4.1 Modélisation analytique

Sur la base du schéma présenté sur la figure 2, Egis a, dans un premier temps, développé une adaptation des formules analytiques utilisées par RTE dans le cadre de ses dimensionnements de fondation soumise à un effort d'arrachement. Cette méthode propre à RTE inclut le poids propre de la fondation et les efforts de résistance par cisaillement du sol au dessus de la semelle, fonction de la cohésion et de l'angle de frottement (Réf1).

Comme explicité ci avant, le volume de sol stabilisateur mobilisé pour reprendre l'effort d'arrachement (voir figure 2) passe de BFF'B' avant renforcement à BCAG-G'A'B' après renforcement par la dalle de matériaux traités.

Cependant, lors du soulèvement de la fondation, du fait du poids du sol supporté par la dalle de matériaux traités et du frottement latérale au pourtour de cette dernière sur le sol environnant, un moment de flexion sollicite la dalle. Or celle-ci est de résistance limitée du fait de sa nature (sol traité).

Un optimum a donc du être trouvé entre la valeur du débord de la dalle par rapport à la semelle existante et la résistance intrinsèque de celle-ci. Sur la base des résistances à la traction mesurées lors d'essais en laboratoire, après analyse bibliographique de publications sur différents sols traités, et grâce à l'expérience de Egis en matière de traitement de sols très divers aux liants hydrauliques , un débord de l'ordre du mètre a été retenu.

4.2 Modélisation aux éléments finis

Après calage de la formulation analytique, il est apparu nécessaire de poursuivre l'analyse à l'aide d'un logiciel aux éléments finis pour visualiser la sollicitation et la déformation de la dalle de sol traité sous un effort d'arrachement ainsi que la valeur et la répartition des contraintes dans cette dalle.

Cette modélisation a été réalisée à l'aide du logiciel Plaxis en 2 dimensions. La situation est représentée par un modèle axisymétrique avec approximation des formes parallélépipédiques par des couronnes.

Cette modélisation a permis de confirmer que :

- les contraintes de traction maximales se localisent en fibre supérieure de la dalle traitée, entre le fut et le point E de la figure 2 ;
- pour un déplacement de l'embase du pylône inférieur à 10 mm, la contrainte de traction dans la dalle en matériaux traités reste inférieure à la valeur fixée de 200 kPa ;
- la déformation de la dalle sous l'effort d'arrachement se fait en forme d'accent circonflexe (déplacement maximal vertical localisé au droit de la semelle exis-

- tante); le frottement latéral périphérique à la dalle apparaît peu sollicité pour un faible déplacement ;
- pour ce même déplacement réduit, l'effort d'arrachement supplémentaire mobilisable par le renforcement est conforme aux objectifs cités au paragraphe 1.

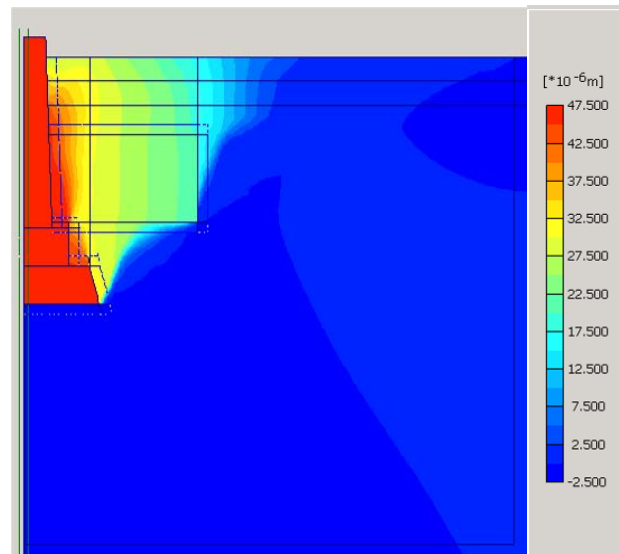


Figure 3 : Calcul Plaxis (déplacement)

4.3 Essais en vraie grandeur sur sites

Deux sites expérimentaux ont été testés, l'un près d'Amiens (ligne existante) et l'autre près de Nancy (massifs expérimentaux). Ces essais ont consisté à traiter les fondations de pylônes THT courants de type quadripodes. Les sols traités étaient des craies et des limons.

Dans un premier temps une reconnaissance de sols a été réalisée sur chaque site. Elle a consisté en sondages à la pelle mécanique pour échantillonnage des terrains en place, essais d'identification et essais de "traitabilité" aux liants hydrauliques en laboratoire.

Ces puits à la pelle ont été complétés par des sondages pressiométriques et essais phicométriques afin d'apprécier au mieux la résistance au cisaillement du terrain existant avant travaux.

Sur la base de ces résultats et à partir des formulations analytiques mises au point lors des phases d'études précédentes, la dalle de renforcement a été dimensionnée : débord 1 m ; épaisseur 1.2 m.

La dalle en matériaux traités du site a ensuite été mise en œuvre au droit de 3 fondations, la dernière, non renforcée servant de témoins.

La fragmentation des matériaux issus des excavations et leur malaxage avec un liant de type CEM II /B-LL 32.5 R, à raison de 1% de chaux et 8% de ciment ont été réalisés sur site avec un matériel adapté aux quantités relativement restreintes de ce traitement de sol.

Le matériau traité a ensuite été remis en place selon les dimensions géométriques établies, par couches de 20 cm compactées. L'objectif de compactage était d'obtenir une compacité réelle "in situ" minimum de 96 % de l'OPN.



Figure 4 : Réalisation de la dalle

La compacité obtenue a été contrôlée en cours de travaux par des mesures de densité au gamma densimètre. Des éprouvettes en matériau traité réalisées à la densité "in situ" ont également été confectionnées pour des essais en laboratoire (poids volumique, résistance à la compression, résistance à la traction et mesure du module de déformation). Les caractéristiques des sols traités augmentent sensiblement par rapport à celle du sol vierge.

La dalle en matériaux traités une fois mise en place et après délais de "séchage" de 28 jours, Egis a conçu et mis en œuvre une expérimentation d'essai de traction sur chacune des fondations.

Ce dispositif consistait à porter à la rupture par arrachement les fondations renforcées et la fondation témoin.

Chaque dispositif comprenait :

- des capteurs permettant de suivre l'effort d'arrachement mobilisé au niveau du fût en fonction du temps ;
- des capteurs de déplacement disposés selon deux axes perpendiculaires au droit et au-delà de la dalle traitée pour mesurer sa déformation au 1/10 ème de millimètre en fonction du temps ;
- des cellules de pression totales disposées en sous face de la dalle traitée afin de suivre le déjaugage de cette dalle en fonction du temps.

L'ensemble des essais était suivi de manière informatisée, avec restitution graphique en temps réel et en 3 dimensions du dispositif de renforcement.



Figure 5 : Dispositif d'arrachement

Cette expérimentation a permis de visualiser l'effet de ce renforcement et sa cinématique : amélioration importante de la résistance à l'arrachement (coefficient supérieur à 2) pour un déplacement vertical du fût limité et plus faible que celui de la fondation témoin ; déformation de la dalle traitée en accent circonflexe.

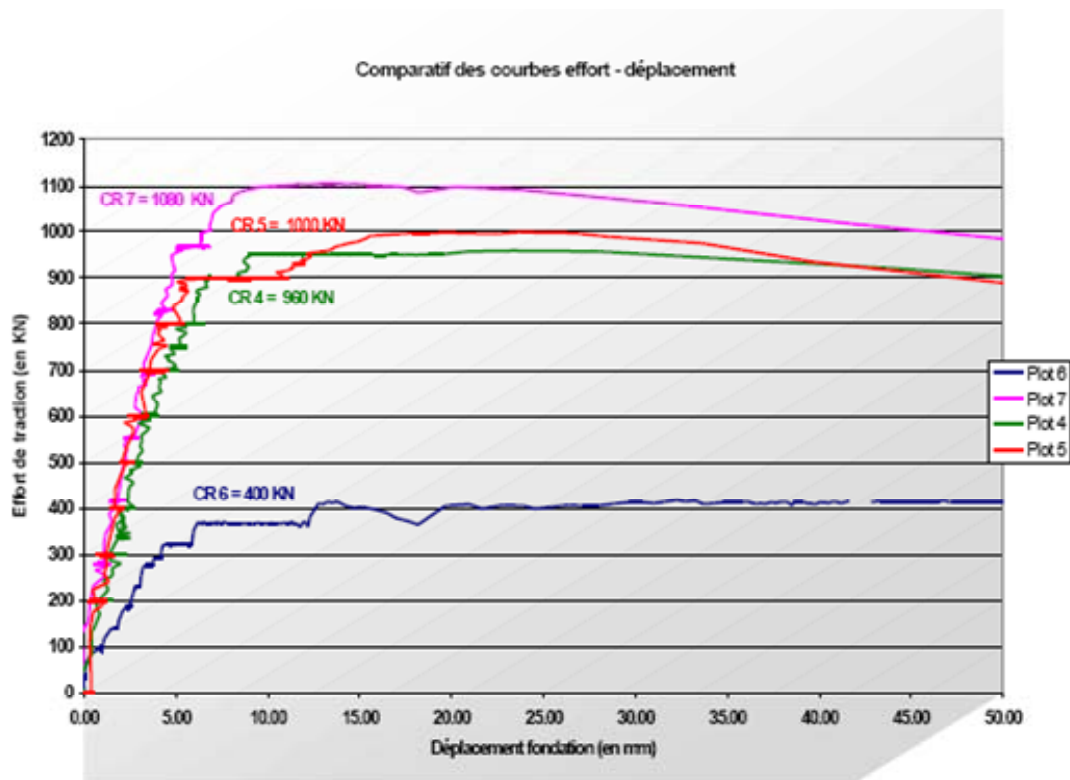


Figure 6 : Courbes effort-déformation

Après essais, la fondation et le dispositif de renforcement par dalle ont été excavés. Un relevé détaillé des fissures affectant la dalle traitée a été effectué et reporté sur plans. La localisation de ces fissures a permis de compléter la compréhension de la cinématique de destruction de la dalle sous grand déplacement.



Figure 7 : Report des fissures affectant la dalle traitée

4.4 Cinématique de prise

Parallèlement à ces études de comportement à long terme une étude particulière a été effectuée pour étudier la montée en résistance de la dalle en matériaux traités (mesures de R_c -résistance à la compression, R_t – résistance à la traction et E - module de déformation) en fonction du temps.

Cette étude a permis d'adopter une loi de comportement de la dalle en fonction du temps et de vérifier la stabilité du pylône lors des phases travaux et jusqu'à obtention des caractéristiques mécaniques nominales.

5 Conclusion

La phase expérimentale, de mise en œuvre et essais d'arrachement de semelle de fondation renforcée par dalle en matériaux traités du site, a permis de valider le concept, le principe de dimensionnement, et le fonctionnement du procédé.

Le procédé a également fait l'objet d'une validation par un organisme agréé.

La concrétisation de cette innovation a été rendue possible grâce à la mise en commun des savoir faire et la collaboration entre RTE, EGIS et l'entreprise GUINTOLI qui a procédé à la mise en œuvre du procédé.

Une phase pré - industrielle de traitement de fondations de pylônes THT est en cours. Elle permettra notamment d'optimiser les matériels de mise en œuvre et de confirmer l'intérêt économique de ce procédé pour des fondations dont le déficit de résistance à l'arrachement varie de quelques dizaines à quelques centaines de kilo Newton.

6 Références

Recueil des solutions types Partie 5 « Fondations » réf NA-CNER-STEP-FCM-03-00043 ind 1. Documentation RTE/EDF