

Une technique innovante de renforcement de fondation pour pylônes électriques

Suite aux avaries sur le Réseau de Transport d'Electricité lors des tempêtes de 1999, RTE a entrepris un programme de sécurisation du réseau. Ce programme comprend des renforcements de superstructures (les pylônes) et d'infrastructures (les fondations).

Une solution innovante signée Scetauroute, complémentaire aux méthodes de renforcement classique des fondations, est actuellement en cours de validation auprès de RTE. L'article décrit cette innovation.

■ CONTEXTE ET ENJEUX

Les tempêtes des 26 et 27 décembre 1999 sont encore présentes dans toutes les mémoires. La puissance dévastatrice des vents a privé d'électricité des millions de Français – entre autres dégâts.

Sur le territoire couvert par l'entreprise de service public "RTE EDF Transport", des lignes à haute et très haute tension (HT/THT) ont été endommagées du fait de la destruction totale ou partielle de quelque 1 000 pylônes sur 270 000.

RTE EDF Transport est le gestionnaire du Réseau de Transport de l'Electricité français. Il exploite, entretient et développe le réseau haute tension depuis les centrales de production jusqu'aux transformateurs appartenant au réseau de distribution moyenne tension.

Pour accroître la capacité de son réseau à faire face à ces événements climatiques exceptionnels, RTE a engagé depuis l'année 2000 un vaste programme de sécurisation mécanique s'élevant à 1,7 milliard d'euros sur 15 ans.

Cette action conduit notamment à installer des pylônes anti-cascades et augmenter la robustesse des pylônes intermédiaires.

En cohérence avec le renforcement des superstructures (les pylônes), les infrastructures (les fondations) sont également renforcées, le plus souvent par une technique de micropieux.

Une solution innovante signée Scetauroute, complémentaire aux méthodes de renforcement classique des fondations, est actuellement en cours de validation auprès de RTE.

Le système concerne les ouvrages de tension supérieure ou égale à 63 000 volts, et plus généralement l'ensemble des structures dont les fondations sont soumises à un effort d'arrachement. Il consiste à rendre plus solidaire le terrain environnant pour lui permettre d'opposer davantage de résistance aux sollicitations transmises par le pylône sous

l'effet du vent ou du givre, c'est l'effet "racine". Simple dans son principe, le système ne s'applique pas directement à la fondation mais au sol qui l'environne, sans liaison mécanique ni intervention lourde.

L'enjeu est d'importance, le réseau HT et THT de RTE totalisant quelque 100 000 km de lignes. Quand on sait que les pylônes utilisés à l'étranger sont bâtis, dans leur grande majorité, sur le même principe, les perspectives qui s'ouvrent au système Scetauroute sont pour le moins prometteuses. Une même démarche de sécurisation des réseaux est à l'étude en Europe et sur les autres continents. Ce potentiel explique le dépôt d'un brevet international.

■ L'INNOVATION ET LE PROJET

L'objectif de Scetauroute est d'offrir à RTE une alternative qui s'appuie sur l'expérience développée dans les projets d'infrastructures linéaires en traitement des sols et en renforcement des talus par clouage.

Le procédé innovant consiste donc à renforcer le sol autour de la fondation pour améliorer sa résistance à l'arrachement pour des charges intermédiaires, plutôt que de renforcer la fondation elle-même. Le procédé innovant développe quatre concepts. Un premier concept est actuellement en cours d'essai et de validation en vue d'une exploitation industrielle. Il consiste à réaliser un traitement du sol en place par des liants hydrauliques de façon à constituer une dalle de sol traité.

Cette dalle permet d'améliorer la résistance au cisaillement du sol environnant, de mobiliser un volume de terre plus important par le poids mort et les frottements latéraux.

Cette amélioration permet de reprendre le différentiel entre la tenue initiale du massif et le nouvel objectif de tenue fixé dans le cadre de la

Michel Deniot



CO-INVENTEUR
ET DIRECTEUR
DU PROJET
Scetauroute

Jérôme Dufour



CHARGÉ D'AFFAIRES
FONDATIONS
RTE

François Depardon



CO-INVENTEUR. ADJOINT
AU DIRECTEUR
DE LA DIRECTION
GÉOTECHNIQUE
ET MATÉRIAUX
Scetauroute

Bruno Mazare



CO-INVENTEUR.
RESPONSABLE
DU SECTEUR
FONDATIONS
À LA DIRECTION
GÉOTECHNIQUE
ET MATÉRIAUX
Scetauroute

Mise en œuvre de la dalle
en sol traité

Laying the slab
in treated soil



► sécurisation. Elle permet de s'adapter à une gamme d'efforts différentiels à reprendre allant de 20 à 400 kN, voire plus (figure 1).

Points forts de l'innovation

La solution Scetauroute est innovante à plusieurs titres :

- ◆ elle renforce le sol environnant plutôt que la fondation elle-même ;
- ◆ elle mobilise un volume de sol plus important autour de la fondation – effet "racine" ;
- ◆ elle évite la mise en œuvre de liens mécaniques avec la fondation superficielle existante et le pylône ;
- ◆ elle transpose un savoir-faire autoroutier de traitements de sol à des lignes électriques, avec une mise en œuvre utilisant des moyens du type agricole pour des petites quantités ;
- ◆ elle fait travailler la technique du traitement de sol à l'arrachement, en utilisant les caractéristiques mécaniques des matériaux (cohésion, frottement et résistance à la traction) par un effet racine.

Principaux avantages

Respect du milieu naturel et développement durable

L'enfouissement du système évite les impacts sur l'exploitation des couches supérieures qui restent ainsi disponibles pour leur utilisation naturelle. L'innovation Scetauroute utilise 90 à 95 % du sol en place. 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'emploi de composant à faible émission de poussière rend leur dispersion très limitée en phase travaux et totalement nulle en phase exploitation.

La mise en œuvre est assurée par des engins de type agricole ce qui limite considérablement l'impact des travaux de renforcement sur les accès, les sites ou les cultures environnantes.

Les travaux n'occasionnent pas de transport en décharge de matériaux excédentaires.

Ces points confèrent à la solution Scetauroute un caractère environnemental prépondérant en totale harmonie avec la politique et les engagements de RTE en la matière.

Amélioration continue

L'innovation proposée à RTE s'inscrit dans le processus de sécurisation du réseau sans rupture du service. Les travaux de renforcement sont réalisés sur les ouvrages en exploitation sans arrêt ni coupure du transport d'énergie.

Au-delà de la simple application de la réglementation, RTE et Scetauroute, attentifs au développement durable, s'inscrivent dans une démarche continue de prévention des impacts environnementaux, tout en préservant les intérêts économiques de tous les utilisateurs de l'électricité.

Cette démarche se traduit concrètement au travers des premiers avantages procurés par l'innovation. Ils sont liés au fait qu'il n'y ait pas de conséquence sur la servitude ou l'emprise du pylône et au po-

tentiel d'économie sensible sur les coûts de renforcement habituels.

Intérêt direct pour Scetauroute et le groupe Egis

L'innovation a permis au groupe Egis, leader français de l'ingénierie des infrastructures de transport, et à sa filiale Scetauroute de se faire connaître auprès du gestionnaire de Réseau de Transport d'Electricité français.

Le savoir-faire de Scetauroute en matière de maîtrise d'œuvre complète des infrastructures de transport linéaire lui permet d'innover, concevoir, développer et d'apporter des solutions spécifiquement appropriées aux besoins de ses clients.

Notoriété : les brevets nationaux et internationaux déposés par Scetauroute, l'intégration du procédé à la liste des systèmes de renforcement reconnus efficaces par RTE et les références "mondiales" qui pourraient en découler permettront à terme d'étendre la notoriété du groupe Egis et de Scetauroute au domaine du transport d'énergie. Cette innovation a reçu le premier prix du concours Innovation Egis 2005-2006 dans la catégorie "Conception de projet" (cf. encadré "Partenariats").

Le processus de validation

Ce processus en cours comprend trois phases :

- ◆ phase expérimentale ;
- ◆ phase préindustrielle ;
- ◆ phase industrielle.

PARTENARIATS

L'innovation Scetauroute a réuni autour du projet :

- les compétences du Réseau de Transport d'Electricité avec :
 - Groupe d'ingénierie maintenance réseau Nord Est,
 - Groupe d'ingénierie maintenance réseau Est,
 - Centre national d'expertise réseau ;
 - les compétences du groupe TP NGE avec :
 - Guintoli DRNN et la Direction technique,
 - GTS ;
 - les compétences pluridisciplinaires de Scetauroute avec :
 - Direction du développement (direction de projet),
 - Direction géotechnique et matériaux,
 - Direction travaux,
 - Direction technique méthode et qualité,
 - Direction des ouvrages d'art,
 - Direction de l'environnement,
- L'ensemble du groupe Egis avec le financement en 2003 du projet de recherche interne

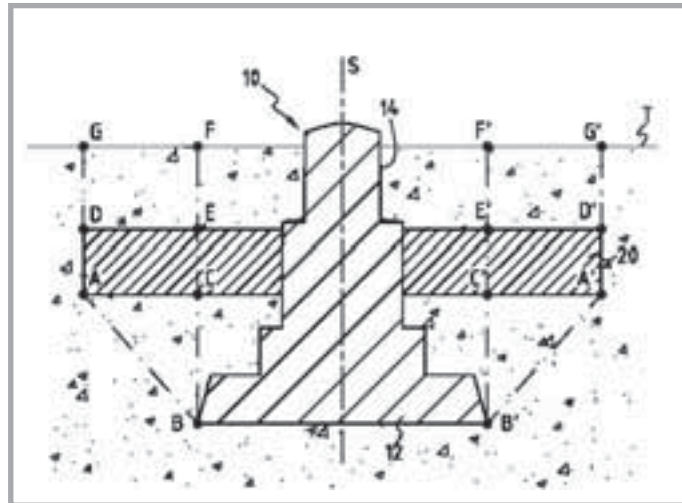
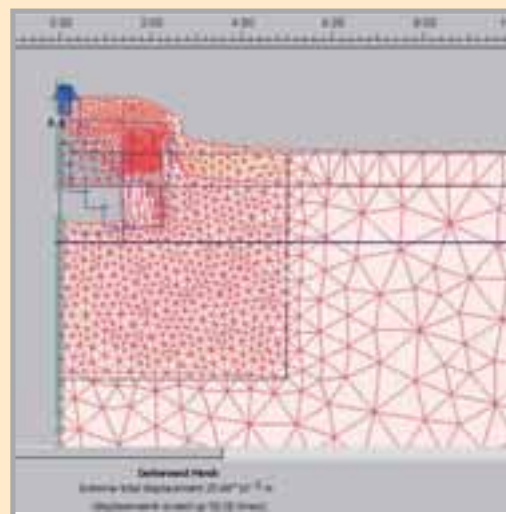
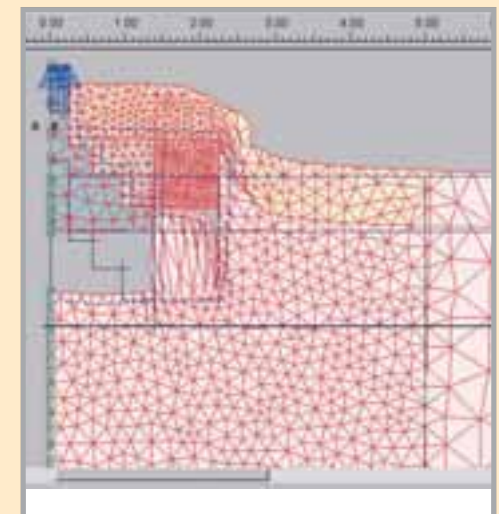


Figure 1
Principe de renforcement de sol par dalle traitée autour d'une fondation soumise à l'arrachement

Technique of ground reinforcement by treated slab around a foundation subjected to wrenching forces

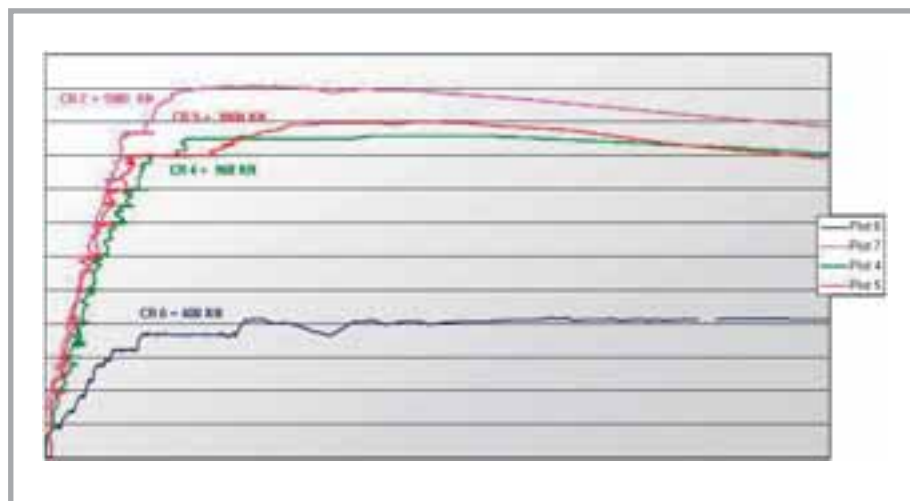


Maillage déformé (déplacement 26 mm) sol renforcé



Zoom sur le maillage déformé (déplacement 26 mm) sol renforcé

Modélisation par élément fini des déplacements
Finite element modelling of displacements



Comparaison entre un massif existant et trois massifs renforcés
Comparison between an existing foundation and three reinforced foundations

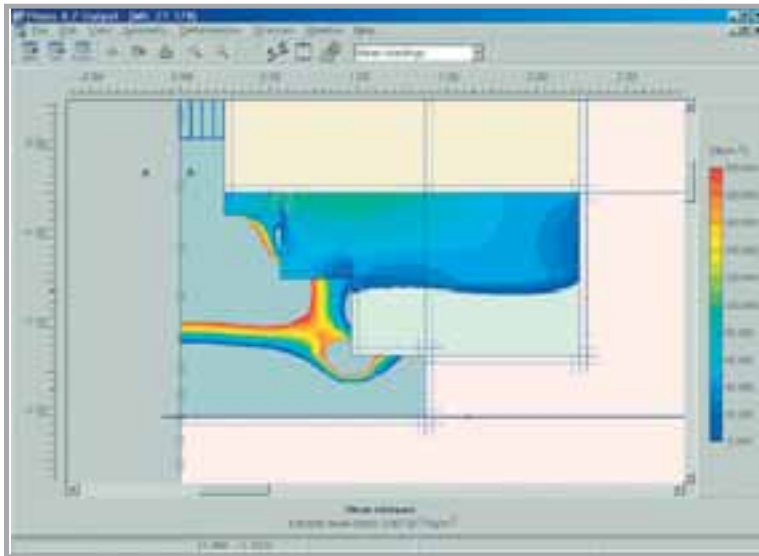
Dalle de sol traité
en place
autour d'une fondation
expérimentale de pylône

*Slab in treated soil
in place
around an experimental
pylon foundation*



Modélisation
par élément fini
des contraintes
dans le sol traité

*Finite element modelling
of stresses
in the treated soil*



Essai
d'arrachement
sur massif
de fondation
renforcé

*Pull-out test
on reinforced
foundation block*



La phase expérimentale comprenait :

- ◆ plusieurs séries d'essais destructifs en vraie grandeur sur des fondations de pylônes de type cheminée-dalle dans différents types de sols ;
 - ◆ une justification détaillée des modèles de calcul par méthodes aux éléments finis ;
 - ◆ une validation par un organisme de contrôle agréé.
- L'objectif de cette phase était de valider et certifier la solution en précisant les efforts mobilisables à l'arrachement ainsi que les déformations des massifs avant la rupture.

La phase préindustrielle comprendra plusieurs chantiers expérimentaux d'environ une vingtaine de pylônes chacun. L'objectif est de corroborer les coûts et les délais de réalisation.

Cette technique, en cours de validation, permettra à Scetauroute de proposer cette solution aux autres gestionnaires de réseaux intervenant en Europe mais aussi dans d'autres pays dont les réseaux ont été éprouvés par les tempêtes ou cyclones.

Résultats de la phase expérimentale

Les essais destructifs réalisés sur les fondations de pylônes existants et les calculs numériques menés sous PLAXIS ont permis d'atteindre les objectifs de la phase expérimentale. Ils mettent en évidence :

- ◆ l'accroissement de la résistance à l'arrachement apporté par le sol placé au-dessus de la fondation avec un faible déplacement de l'ensemble (inférieur à 10 mm) ; le concept de l'innovation "Effet racine" fonctionne ;
- ◆ un gain sur les efforts à l'arrachement parfois supérieur aux attentes : la tenue du système a été parfois supérieure à la capacité du dispositif d'essai (1 450 kN) ;
- ◆ les caractéristiques mécaniques à la traction des sols traités sont compatibles avec la résistance intrinsèque attendue de la dalle (de 150 à 350 kPa selon la nature des sols) ;
- ◆ le savoir-faire et la méthode de traitement de sol type "autoroutier" (gros débit) sont transposables à des petites quantités à condition de mettre en place un mode opératoire et un système de contrôle spécifique.

Les résultats obtenus sont très encourageants. La phase préindustrielle devrait valider les rendements attendus.

En marge de la phase expérimentale, Scetauroute a conçu et réalisé des essais expérimentaux d'arrachement clés en main avec la mise au point :

- ◆ une instrumentation de précision informatisée permettant d'observer en temps réel les déplacements de l'ordre du 1/10 de millimètre sur le fût du massif mais aussi sur toute l'emprise du système ;
- ◆ des restitutions 3D permettant de visualiser en temps réel le comportement du système renforcé.

■ TRANSFÉRABILITÉ ET PERSPECTIVES

En cas de validation générique, l'innovation sera intégrée à la liste des systèmes de renforcement reconnus efficaces par RTE.

Elle peut être dimensionnée par une méthode de calcul voisine des formules analytiques standards utilisées par RTE pour le calcul de ces ouvrages. L'innovation met en œuvre des moyens matériels et humains normalement utilisés par les entreprises de terrassement dans le domaine des TP ou du type agricole (malaxeur, godet cribleur, dame vibrante, mini-station de concassage, traitement de matériaux). Elle est donc accessible aux entreprises de travaux publics spécialisées dans le traitement de sol. Cela permet à RTE d'élargir le panel et activer ainsi la concurrence parmi les entreprises susceptibles d'effectuer des travaux de sécurisation pour son compte.

Le développement des trois autres concepts incluant le clouage pourrait être envisagé pour répondre à des renforcements présentant des configurations spécifiques (faible entraxe, massifs déjàugés...).

Prise en compte des contraintes

Scetauroute a pris en compte les contraintes d'exploitation dans la conception de son innovation :

- ◆ personnel habilité pour exécuter des travaux sur ouvrages stratégiques en exploitation et sous tension (THT);
- ◆ garantie de stabilité de l'ouvrage lors des travaux (massifs déchaussés);
- ◆ évite la mise en œuvre de pistes d'accès aux ouvrages par l'emploi de moyens légers ou du type agricole;
- ◆ enfouissement du système, aucun impact pour l'exploitation des couches supérieures cultivées;
- ◆ pas de conséquence sur la servitude ou l'emprise du pylône;
- ◆ l'innovation ne dégrade pas la résistance de la fondation initiale (marge de sécurité + contrôle qualité du traitement).

■ CONCLUSION

La phase expérimentale d'essai d'arrachement sur des fondations superficielles renforcées par dalle de sol traité a permis de valider le fonctionnement du concept et le principe de dimensionnement du procédé.

La concrétisation de l'innovation a été rendue possible grâce à la mise en commun des savoir-faire techniques et une collaboration étroite entre RTE, Scetauroute et Guintoli. Le SETP du Centre national d'expertise du réseau (CNER) de RTE EDF Transport qui, avec l'appui et les moyens des Groupes d'ingénierie maintenance réseau (GIMR), a :



Mise en œuvre des traitements de sol *in situ*
Application of soil treatments in situ



Dispositif expérimental d'essai d'arrachement
Experimental pull-out test system

- ◆ mis en place un solide processus de validation du procédé;
- ◆ contribué aux réflexions permettant d'adapter le procédé aux lignes à haute et très haute tension. La Direction du développement de Scetauroute qui, avec l'appui de la Direction géotechnique et matériaux, a permis de conduire avec succès :
- ◆ la définition des attentes et des besoins du maître d'ouvrage (RTE);
- ◆ la proposition de solutions concrètes innovantes dont le dimensionnement est justifié scientifiquement;





Pilotage informatique de l'essai d'arrachement
Computer controller for the pull-out test

- ◆ l'adaptation de l'expérience globale de l'entreprise acquise dans l'ingénierie du traitement de sol après 30 ans d'application dans le domaine autoroutier ;
- ◆ le management et la réalisation de toutes les étapes du projet jusqu'à la validation du procédé. La Direction régionale Nord Normandie de Guintoli qui, avec l'appui de la Direction technique du groupe et de GTS, a contribué à l'application du procédé.

ABSTRACT

An innovative foundation reinforcement technique for electricity pylons

M. Deniot, J. Dufour, Fr. Depardon, Br. Mazare

Following damage to the electricity transport network during the 1999 storms, RTE undertook a programme to make the network more secure. This programme comprises superstructure reinforcements (the pylons) and infrastructure reinforcements (the foundations).

An innovative solution from Scetauroute, complementary to the conventional foundation reinforcement methods, is currently undergoing validation with RTE. The article describes this innovation.

RESUMEN ESPAÑOL

Una técnica innovadora de refuerzo de cimientos para torres eléctricas

M. Deniot, J. Dufour, Fr. Depardon y Br. Mazare

A raíz de las averías en la Red de Transporte de Electricidad durante los ciclones de 1999, RTE ha llevado a cabo un programa de securización de la red. Este programa incluye diversas consolidaciones de las superestructuras (las torres) y de infraestructuras (los cimientos).

Una solución innovadora firmada Scetauroute, complementaria con los métodos de consolidación convencional de las cimentaciones, se encuentra actualmente en curso de validación con RTE. En el presente artículo se describe esta innovación.