

EFFET DU GEL SUR LA REPONSE DES TIRANTS D'ANCRAGE ET SUR LA STABILITE D'UN OUVRAGE DE SOUTÈNEMENT

EFFECT OF FREEZING ON THE RESPONSE OF ANCHORS AND THE STABILITY OF A RETAINING WALL

Emmanuel BOURGEOIS¹, Alain LE KOUBY¹, Christelle TABBICHE¹, Bakri BASMAJI², Guy HENRYON², Maryan KOLANEK³, Xavier MARCHAL³

¹ Université Gustave Eiffel, Marne-la-Vallée, France

² Cerema, Centre d'études et d'expertise sur les risques, l'environnement, la mobilité et l'aménagement, Groupe EEVPI, Nancy

³ Voies Navigables de France, Béthune

RÉSUMÉ – Un rideau de palplanches ancré par des tirants à Neuves-Maisons (54) a subi une rupture en 2001, suite à un épisode de gel. On présente une modèle numérique permettant d'expliquer la rupture par une augmentation excessive de l'effort dans les tirants d'ancrage. Des études paramétriques permettent d'évaluer l'influence de quelques paramètres clés (intensité de la déformation due au gel, profondeur de gel, etc.).

ABSTRACT – The failure of a sheetpile wall in Neuves-Maisons (Meurthe et Moselle, France) which occurred in 2001 during an episode of frost, is discussed using a numerical model. It makes it possible to explain the failure by an excessive increase in the force in the anchors. Parametric studies are carried out to evaluate the influence of a few key parameters, such as the intensity of deformation due to frost, the depth of frost.

Mots clés : gel – gonflement – rupture – surveillance - efforts

1. Introduction

Dans les régions subissant des conditions hivernales rudes, les ouvrages sont régulièrement exposés à de fortes fluctuations thermiques. Ils peuvent en particulier être soumis à un phénomène de gonflement au gel, susceptible d'augmenter la poussée sur les murs, d'endommager leur structure et compromettre leur durabilité.

En 2001, une rupture est survenue sur un ouvrage situé en Meurthe-et-Moselle, sur la commune de Neuves-Maisons, à 10 km au sud-ouest de Nancy, pendant l'hiver (figure 3). L'ouvrage étudié est une digue située entre la Moselle sauvage et un canal. Elle sert de voie d'accès à une entreprise industrielle. Il a été construit pendant les années 1970.

La rupture a été attribuée aux conditions météorologiques défavorables juste avant la rupture : crue importante de la Moselle, suivie d'un épisode de grand froid (Sylvestre *et al.*, 2012). Certains tirants, qui constituent l'ouvrage, étaient également très dégradés à cause de la corrosion mais l'étude proposée dans ce papier ne traite que de l'effet du gel.

L'ouvrage a été divisé en plusieurs zones pour des raisons de renforcement et de surveillance. Dans la zone A, où la rupture s'est produite, l'ouvrage est composé d'un rideau de palplanches de 17 m de haut et d'un rideau arrière de 13 m, distants de 15 mètres et reliés par des tirants horizontaux. Cette zone a été réparée par la mise en place d'un nouveau rideau de palplanches à l'arrière du rideau principal. Celui-ci a été raccordé au rideau arrière par l'intermédiaire de tirants mono-barre traversants. La zone B comprend un rideau de palplanches de 12,6 m de haut, relié par des tirants horizontaux à un contre-rideau de 2,3 m de profondeur, à une distance de 14 mètres. Le rideau est soutenu par des tirants inclinés. Des désordres ont été constatés, comme des déformations circulaires sur la chaussée. Cette zone a été confortée par la mise en place

d'un lit de tirants mono-barres ancrés dans la marne. La zone intermédiaire entre les zones A et B n'a pas été réparée.

Des cales ont été installées pour mesurer les efforts en tête des tirants, ainsi que des inclinomètres, des piézomètres et une sonde de température, qui sont maintenus en place jusqu'à présent. Certaines instrumentations (la mesure de température, un piézomètre, et deux cales de tirants) mesurent les données en continu, toutes les 3 heures. Les mesures montrent une forte augmentation des efforts sur les ancrages pendant les périodes de gel. L'instrumentation ainsi que les mesures ont été décrites dans Sylvestre et al. (2012) et <https://www.cfms-sols.org/sites/default/files/journee-20230118/05-de-l-interet-d-instrumenter-en-continu-les-tirants-d-ancrage-pdf-20230531150946.pdf>

Cette communication présente des calculs par éléments finis réalisés avec le logiciel CESAR-LCPC, pour la zone A, qui modélisent l'effet de l'augmentation de volume qui accompagne la transformation de l'eau en glace, considérée comme la cause des soulèvements et ruptures dus au gel (Brun, 1977), et l'influence de l'étendue de la zone où l'eau contenue dans le sol gèle. Les calculs montrent des augmentations importantes des efforts dans les tirants dues au gel. L'installation d'instruments de mesure des efforts dans la zone A est essentielle pour surveiller cette zone, pour mieux comprendre le comportement des ouvrages soumis au gel en calibrant des modèles numériques, et prendre les mesures nécessaires pour les préserver. Dans le cadre du projet, des sondages à la pelle ont été réalisés à proximité des palplanches et des essais d'identification et de gonflement au gel ont été effectués sur des échantillons prélevés dans les sondages.

2. Essais sur les sols

Dans le cadre de ce travail, une expertise sur le comportement du matériau in-situ a été réalisée : deux sondages à la pelle de 2 mètres de profondeur ont permis de récupérer des matériaux pour faire des essais d'identification et des essais de gonflement au gel. Les matériaux sont classés en B3-B4 selon le GTR. Afin de déterminer la gélivité des sols, un essai de gonflement au gel suivant la norme NF P98-234-2 a été réalisé au Cerema-Agence de Nancy. Les matériaux ont été compactés en éprouvettes de 150 mm de diamètre sur 320 mm de long qui ont été plongées durant 12 jours dans une cellule de telle sorte qu'une extrémité représente une nappe phréatique régulée à 2°C tandis que la tête de l'éprouvette est à -5,7°C, créant ainsi le mécanisme de succion cryogénique. Après 12 jours d'essais, les quatre éprouvettes rendent des résultats similaires : un front de gel visible autour de 150 mm de profondeur avec des lentilles de glace de 1mm et des fissures circulaires de 1 à 2 mm. Le diamètre est passé de 150 mm à 164 mm pour une teneur en eau de 24,8%. L'indice de gel est calculé selon la formule $X_g=f(\sqrt{I})$, ce qui classe ce matériau en très gélif.



Figure 1 – Rupture de l'ouvrage en 2001

fortement lors d'épisodes de gel. On fait donc l'hypothèse que le gel peut conduire à des efforts importants dans les tirants, et qu'ils ont pu provoquer la rupture de 2001.

On se place en déformation plane, et on prend en compte deux couches de sol : une couche de graves sableuses sur une épaisseur de 10 m, et une couche de Marnes Saines sur une épaisseur de 15 m. L'ouvrage est constitué d'un rideau de palplanches de 17m de hauteur d'un côté, et d'un deuxième rideau de 13 m de profondeur, de mêmes caractéristiques. La distance entre les rideaux est de 15 m. La largeur totale du domaine maillé est de 55 m (figure 4). Les tirants ont un diamètre de 45 mm et l'espacement entre les tirants est de 1,6 m.

Les couches de sol sont discrétisées par des éléments surfaciques à interpolation quadratique (triangles à 6 nœuds ou quadrangles à 8 nœuds) ; les rideaux par des éléments de poutre à 3 nœuds. Des éléments d'interface sont placés entre le sol et les rideaux. Le tirant est représenté par un élément de barre nœud-à-nœud qui se comporte comme un ressort dont les extrémités sont accrochées aux rideaux, à 5,5 m de profondeur.

On adopte pour modéliser le comportement de la couche de graves sableuses le modèle de Mohr Coulomb (Sylvestre et al., 2012), avec

$$E = 15 \text{ MPa}, \nu = 0,3, c = 5 \text{ kPa}, \varphi = 35 \text{ degrés}, \psi = 10 \text{ degrés}.$$

Pour la couche de marnes saines, on prend :

$$E = 150 \text{ MPa}, \nu = 0,3, c = 50 \text{ kPa}, \varphi = 25 \text{ degrés}, \psi = 5 \text{ degrés}.$$

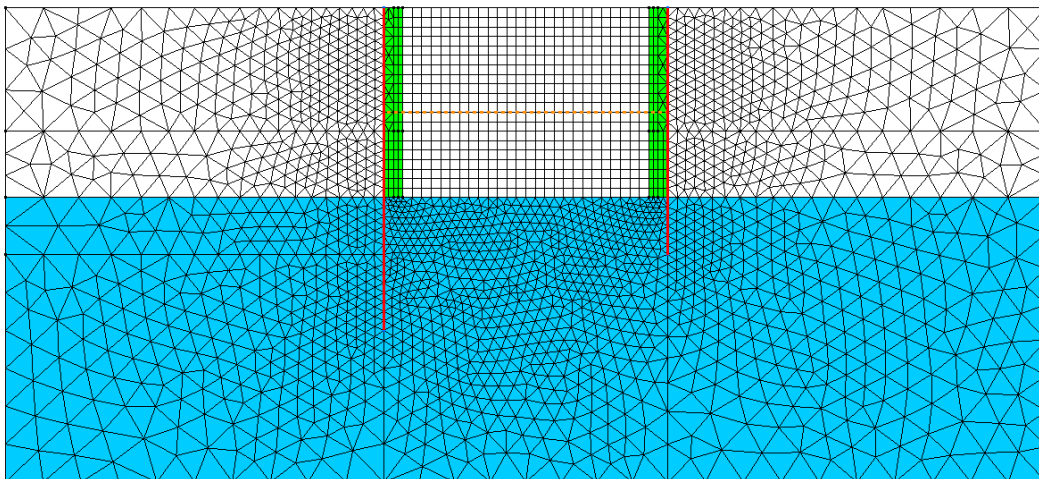


Figure 4 – Maillage utilisé pour les calculs (9500 nœuds, 4500 éléments quadratiques)

On modélise la construction de l'ouvrage, et on applique, sur une zone de sol située derrière chacun des rideaux, une déformation volumique associée à la dilatation de l'eau lorsqu'elle gèle dans le sol. Cette approche suppose d'évaluer la profondeur de la zone où l'eau gèle derrière les rideaux, et la déformation induite par le phénomène de gel. Initialement la nappe est située au niveau du terrain naturel. Les contraintes effectives initiales sont supposées géostatiques (avec $K_0=1-\sin \varphi$ et $\gamma'=8 \text{ kN/m}^3$ dans la couche de graves sableuses et $\gamma'=10 \text{ kN/m}^3$ dans les marnes saines). Les conditions aux limites sont les conditions standards (déplacement horizontal bloqué sur les limites gauche $x=0$ et droite $x=55 \text{ m}$; deux composantes du déplacement bloquées sur la base du maillage $y = -25 \text{ m}$). On enchaîne les étapes de calcul suivantes :

- on représente d'abord une excavation (sous eau) jusqu'à -6,5 m (soit 1 m au-dessous de la position future du lit de tirants). On rabat ensuite la nappe jusqu'à -5,5 m ;
- on active le tirant et on excave à -13 m à gauche et -10 m à droite ;
- la dernière étape correspond à la prise en compte de la déformation due au gel.

4.1 Estimation de la déformation due au gel

(Dysli, 1991) donne une formule permettant d'évaluer la déformation volumique due au gel, en fonction de la teneur en eau (en %) :

$$\varepsilon_{gel} = \frac{9w}{w + 37} \quad (1)$$

Pour une teneur en eau de 10%, on trouve 1,9% et pour une teneur en eau de 15%, on trouve 2,6%. A titre de comparaison, la masse volumique de l'eau à 0° est proche de 999 kg/m³, et celle de la glace est de 931 kg/m³, la déformation volumique est donc de 7% lorsque l'eau gèle. Ces déformations sont très grandes par rapport à la variation de volume liée aux déformations thermiques (pour la plupart des solides, la déformation thermique volumique est de l'ordre de 0,3% pour une augmentation de température de 100 degrés) : la déformation due au gel est donc susceptible de générer des déformations très importantes, et donc de conduire à la ruine des ouvrages. Dans les calculs présentés dans la suite, on prend pour la déformation volumique une valeur de référence égale à 2%.

4.2 Estimation de la profondeur de gel

Plusieurs formules permettant d'évaluer la profondeur de pénétration du gel, la première solution proposée est celle de Stefan (Andersland et Ladanyi, 2004, Nixon et Mc Roberts, 1973):

$$X = 416 \sqrt{\frac{k n FI}{L}} \quad (2)$$

Où X est la profondeur de gel (en m), k la conductivité thermique du sol (en W/m/K), n un facteur de correction de l'indice de gel de l'air (sans dimension, $0.8 < n < 0.9$), FI l'indice de gel (frost index), en K.jour, et L la chaleur latente de fusion du sol gelé (en J/m³). Un indice de gel de 10 correspond à 1 jour à -5 degrés ou 5 jours à -1 degré, ce qui conduit à une profondeur de 20 cm. Dans la suite, on considère des épisodes de gel plus sévères, correspondant à une épaisseur de gel derrière les palplanches, de 50 cm (6 jours à -5 degrés) à 1 m (8 jours à -15 degrés).

4.3 Résultats

La prise en compte du gel conduit à un gonflement du sol derrière les palplanches, contenu par le tirant qui se trouve mis en tension. La déformée calculée (entre avant et après le gel) a l'allure présentée sur la figure 5. Les déplacements horizontaux maximaux, obtenus en haut des palplanches, sont de l'ordre de 5 à 8 mm.

Pour une déformation volumique due au gel de 2% et une profondeur de gel de 50 cm, on obtient un effort dans le tirant égal à 54 kN avant le gel, et 144 kN après le gel. Autrement dit, dans le cadre de cette modélisation simplifiée, on obtient une variation d'effort dans chaque tirant de 90 kN qui est loin d'être négligeable et qui doit être prise en compte pour évaluer la sécurité de l'ouvrage vis-à-vis des conséquences du gel.

On peut aussi noter que le gel induit une augmentation forte de la contrainte horizontale exercée par le sol sur le rideau (figure 6). On observe que l'allure des courbes obtenues n'est pas très réaliste : on pourrait sans doute améliorer la modélisation du comportement des interfaces sol-rideau.

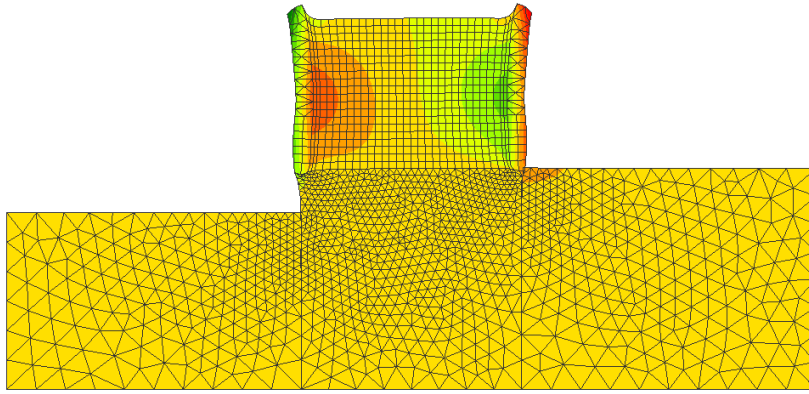


Figure 5 – Déformation du mur induite par le gel (isovaleurs des déplacements horizontaux)

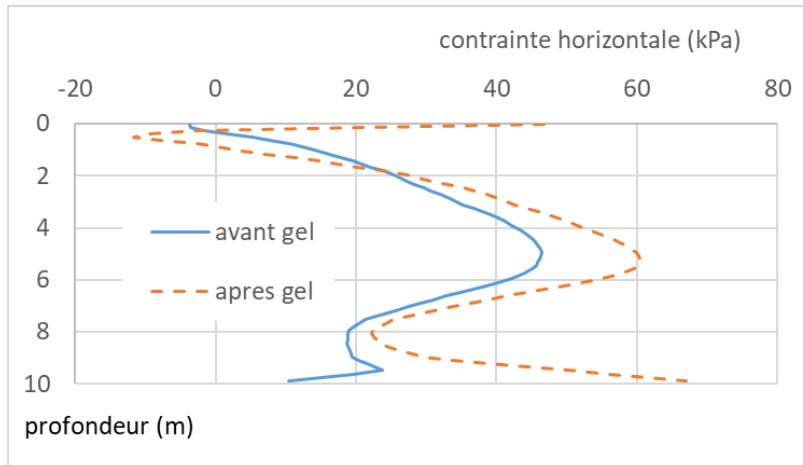


Figure 6 – Variation de la contrainte horizontale sur le mur due au gel

5. Etude paramétrique

5.1 Influence de la déformation due au gel

On a fait le calcul pour une profondeur de gel de 50 cm et pour une déformation due au gel égale à 2%, 4% et 6%. Sur cette gamme de valeurs, l'incrément de traction dans le tirant varie pratiquement linéairement avec la déformation imposée (figure 7).

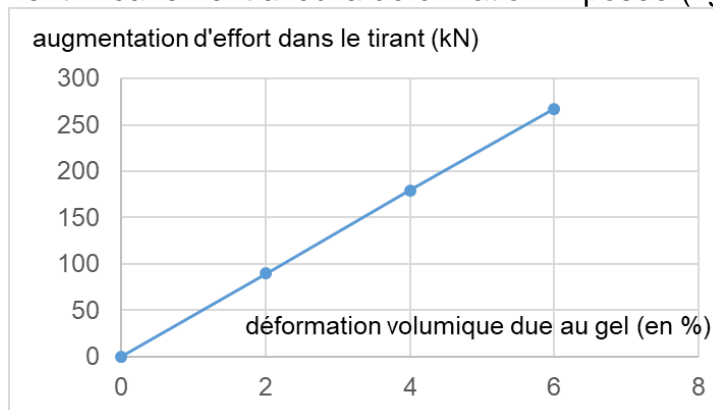


Figure 7 – Influence de la déformation volumique due au gel

On peut représenter les mêmes résultats en fonction de la teneur en eau initiale (figure 8) : on constate qu'entre 10 et 30% de teneur en eau, ce paramètre a une influence très importante sur l'augmentation des efforts dans le tirant.

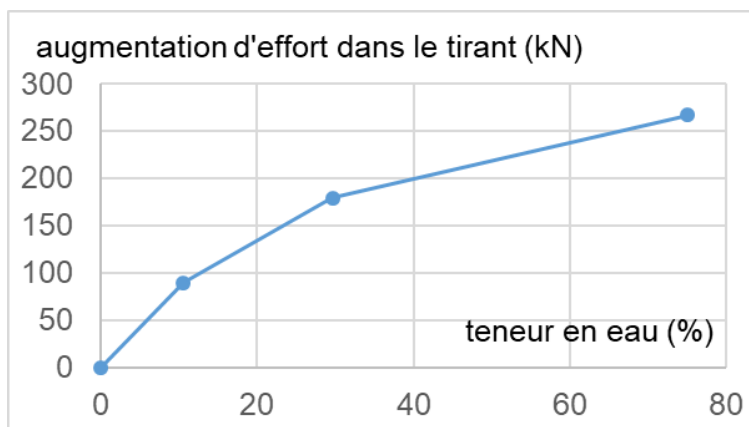


Figure 8 – Augmentation des efforts en fonction de la teneur en eau initiale

5.2. Influence de la raideur des tirants

La variation d'effort dans le tirant due au gel dépend de la raideur des tirants, mais pas de manière linéaire. A titre indicatif, si on divise la section des tirants par deux dans le calcul, la variation de l'effort de traction dans un tirant due au gel est de 67 kN, soit 25% de moins que dans le calcul de référence ; si on multiplie la section des tirants par 2 dans le calcul, la variation de l'effort de traction due au gel vaut 109 kN, soit (seulement) 21% de plus que la valeur de référence.

5.3. Influence du module des Graves Sableuses

Avec la modélisation employée dans cette étude, le module de la zone des graves a une influence directe sur les efforts induits dans le tirant lorsque le sol gonfle. En refaisant le calcul de référence (50 cm de profondeur de gel, déformation 2%) avec un module de 25 MPa dans les graves au lieu de la valeur de référence de 15 MPa (ce qui correspond à une augmentation du module de 67%), on obtient une augmentation de l'effort de 78 kN au lieu de 60 kN (soit une augmentation de 30%).

5.4. Influence de la profondeur de gel

D'un point de vue numérique, étudier l'influence de la profondeur de gel est plus laborieux, parce que cela nécessite (au moins avec les outils numériques disponibles actuellement dans CESAR-LCPC) de prévoir dans le maillage les limites entre les zones soumises ou non au gel. On a prévu pour cette étude trois profondeurs de gel : 50, 75 et 100 cm. La figure 9 montre que l'incrément de traction dans le tirant horizontal augmente fortement lorsque l'épaisseur de sol gelé augmente.

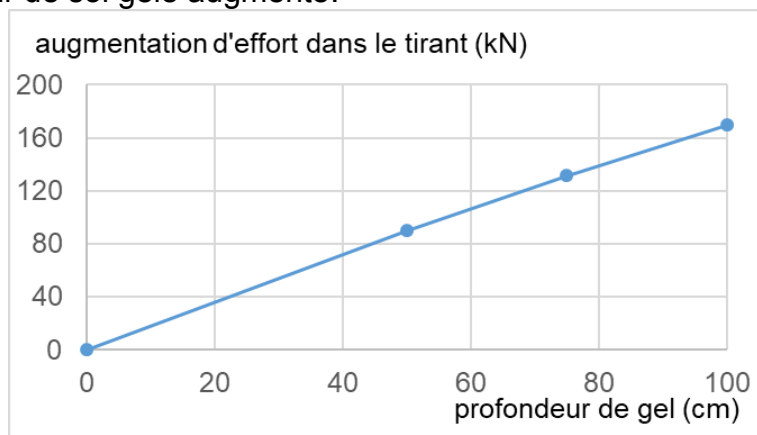


Figure 9 – Augmentation des efforts en fonction de la profondeur de gel

6. Le cas du rideau de Neuves Maisons

Pour une contrainte élastique limite de 350 MPa, l'effort maximal dans le tirant est de l'ordre de 440 kN. Les modélisations précédentes, pour une profondeur de gel de 1 m et une déformation volumique de 6%, conduisent à un effort dans le tirant de 54 kN avant le gel, et de 478 kN après le gel. Bien que l'approche simple utilisée ne rende pas compte de tous les aspects du problème (en particulier, les mesures indiquent une dérive progressive dans le temps), elle permet d'expliquer la rupture – moyennant des hypothèses qui pourraient être discutées de manière plus approfondie. En particulier, différentes actions sont actuellement menées pour mieux caractériser la réponse au gel du matériau en place. Les ordres de grandeur des efforts calculés sont du même ordre de grandeur que ceux qui ont été mesurés dans le cadre de l'instrumentation actuelle (Sylvestre et al., 2012).

7. Conclusion et perspectives

Une modélisation simple permet de produire numériquement une très grande augmentation des efforts dans les tirants d'ancrage d'un rideau de palplanches en modélisant l'effet du gel par une déformation de gonflement localisée derrière le rideau sur une certaine profondeur.

Cette augmentation est difficile à observer si les tirants ne sont pas équipés de capteurs permettant une mesure continue.

La profondeur de gel de 1m et la déformation volumique de 6% sont un peu élevées mais les ordres de grandeur obtenus sont cohérents avec les mesures effectuées sur un ouvrage réel situé à Neuves Maisons, et le modèle peut être utilisé pour étudier l'influence d'un certain nombre de paramètres : l'intensité de la déformation due au gel, l'épaisseur de la zone gelée, la raideur du sol qui gèle et celle des tirants.

La mesure de la poussée réelle appliquée à la structure à différentes profondeurs pendant une période de gel peut être utile pour améliorer la compréhension du phénomène.

8. Références

- Andersland OB, Ladanyi B (2004). *Frozen Ground Engineering* (2 ed.). John Wiley & sons.
- Brun KN (1977) Action du gel sur les fondations. *Digeste de la Construction au Canada* Division des recherches en construction, Conseil national de recherches Canada, avril 1977.
- Dysli, M. (1991). Le gel et son action sur les sols et les fondations. Complément au traité de génie civil de l'école polytechnique fédérale de Lausanne, 1991. 247 p.
<https://www.cfms-sols.org/sites/default/files/journee-20230118/05-de-l-interet-d-instrumenter-en-continu-les-tirants-d-ancrage-pdf-20230531150946.pdf>
- Nixon JF, McRoberts EC (1973). A study of some factors affecting. *Canadian Geotechnical Journal*, 10(3), 439-452.
- Sylvestre L, Stock R, Hervé M, Habert J, Herbaux M, Le Kouby A, Kolanek M (2012) De l'intérêt d'instrumenter en continu les tirants d'ancrage, JNGG 2012, Bordeaux.