

Comportement de la structure de sol amélioré par inclusions rigides, supportant une éolienne

Behaviour of soil foundation improved by rigid columns, supporting a wind turbine

Haza-Rozier E., Vincelas G.
Cete Normandie-Centre/DERDI/CER

Le Kouby A.
Université Paris Est/IFSTTAR

Crochemore O.
Theolia France

RÉSUMÉ: Dans le cadre du projet national ASIRi (Amélioration des Sols par Inclusions Rigides, 2006-2011), le CER (Centre d'Expérimentation et de Recherche du Cete Normandie-Centre) a instrumenté la structure de fondation d'une éolienne. Le principe de fondation est tel que l'éolienne est fixée sur une semelle rigide, coulée sur une couche granulaire de répartition de charges, déposé sur le sol en place, amélioré par 84 inclusions rigides. Des déplacements verticaux, des pressions totales transmises en tête d'inclusion et sur le sol sont mesurés. Les capteurs sont installés principalement en périphérie de l'éolienne, dans les zones qui doivent supporter les variations de contraintes les plus élevées. De plus, des extensomètres à cordes vibrantes sont installés dans deux inclusions pour accéder aux descentes de charges. Le comportement de la structure est suivi depuis la phase de terrassement, jusqu'au montage de la machine, puis durant le fonctionnement de l'éolienne, jusqu'à aujourd'hui. La plateforme de travail induit un confinement important des têtes d'inclusions. Les pressions se concentrent en périphérie et les déplacements restent faibles. L'effet de la vitesse du vent sur la distribution des contraintes est tout à fait significatif.

ABSTRACT: Within the French National Project ASIRi (Soil reinforcement with rigid inclusions, 2006-2011), CER (Experimentations and Researches Centre, Rouen) instrumented foundations of a wind turbine. The foundation principle is such that wind turbine is fixed on a rigid slab, lying on a granular layer, allowing strength distribution on in-situ subgrade improved by 84 rigid columns. Vertical displacements and total stress sensors at the head of columns and on soil are measured. Sensors are placed on wind turbine edge essentially, in areas supporting highest stresses variations. Moreover, vibrating wire extensometers are positioned in two columns in order to measure load distribution. Behaviour of the structure has been monitored since excavation stage, till machine construction, and then during service working of the turbine wind until now. Working platform induced an important confinement of columns' heads. Pressures are concentrated on edge, displacement are still small. The effect of wind speed on load distribution has been shown to be significant.

KEYWORDS: Instrumentation, rigid columns, foundation, wind turbine

MOTS-CLÉS: Instrumentation, inclusions rigides, fondation, éolienne

1 INTRODUCTION

Lorsqu'une éolienne est construite sur un terrain de caractéristiques mécaniques médiocres, elle est traditionnellement fondée sur un réseau de pieux fixés sur sa semelle de fondation. Cependant, un nouveau type de fondation fait face à cette technique plus traditionnelle : la semelle de l'éolienne repose sur une épaisseur de sol, constituant une couche de répartition de charges, qui surmonte un réseau d'inclusions rigides (IR). La qualité mécanique du sol en place et sa capacité portante sont améliorées par la présence des IR. L'éolienne est alors construite avec une fondation superficielle, sur un terrain de bonne portance (Figure 1).

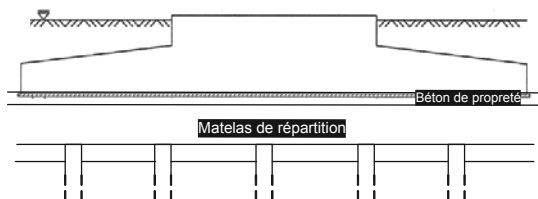


Figure 1. Semelle de fondation de l'éolienne.

Dans le cadre du projet national ASIRi (Amélioration des Sols par Inclusions Rigides, 2006-2011), du Réseau Génie Civil et Urbain, pour mieux comprendre comment une structure

d'amélioration de sol par IR fonctionne (Briançon 2002), le CER a instrumenté un tel système de fondation. Construite par Theolia, dans un parc Boralex, dans la région de Neuchâtel en Bray (76), l'éolienne 3.6 a été suivie depuis sa construction en 2009 (Haza-Rozier 2011), sa mise en service en août 2010, jusqu'à ce jour (Haza-Rozier & al. 2012).

Cet article décrit l'instrumentation mise en place, l'essentiel des résultats de mesures et une approche de l'effet du vent sur le comportement de la structure de fondation.

2 DESCRIPTION DE L'OUVRAGE

2.1 Profil géotechnique

La coupe géotechnique locale est constituée de 1,6 m de terre végétale et de limon, puis de l'argile à silex jusqu'à 10,60 m de profondeur (avec des valeurs de module pressiométrique entre 2,2 et 18,1 MPa). Apparaît alors une frange de craie altérée sur 1 m (module pressiométrique entre 2,8 et 12,6 MPa), puis la craie de plus en plus saine, jusqu'à 20 m de profondeur (module pressiométrique entre 44 et 200 MPa).

2.2 Structure de fondation de l'éolienne 3.6

L'éolienne est constituée d'un mât de 78 m, fixé sur une semelle rigide de 18m de diamètre et de 2,5 m d'épaisseur en son centre (en béton, fortement ferrillée). Cette dernière est posée sur une couche granulaire de répartition de charges, de 80 cm d'épaisseur (sol 0/90 mm sur 70 cm et 0/31,5 mm sur 10 cm en

partie supérieure), dont les caractéristiques mécaniques ont été déterminées à la boîte de cisaillement de grande dimension (500 x 500 mm), du CER : $C = 63,7 \text{ kPa}$ et $\phi = 53,3^\circ$. Cette couche granulaire est mise en place sur le sol renforcé par 84 inclusions rigides, de 8 m de long et 0,36 m de diamètre (Figure 2).



Figure 2. Forage et coulage des IR en fond de fouille.

3 INSTRUMENTATION

L'instrumentation est composée de capteurs électriques de déplacement et de capteurs de pression totale (notés respectivement T et CPT dans la suite), positionnés en tête d'inclusion et dans le sol. Ils sont installés sur deux niveaux : un premier, sous la couche de répartition, au niveau des têtes d'IR (

Figure 3, 14 CPT et 8 T) et un second en partie haute de cette couche, sous la semelle de l'éolienne (Figure 4, 8 CPT et 11 T).

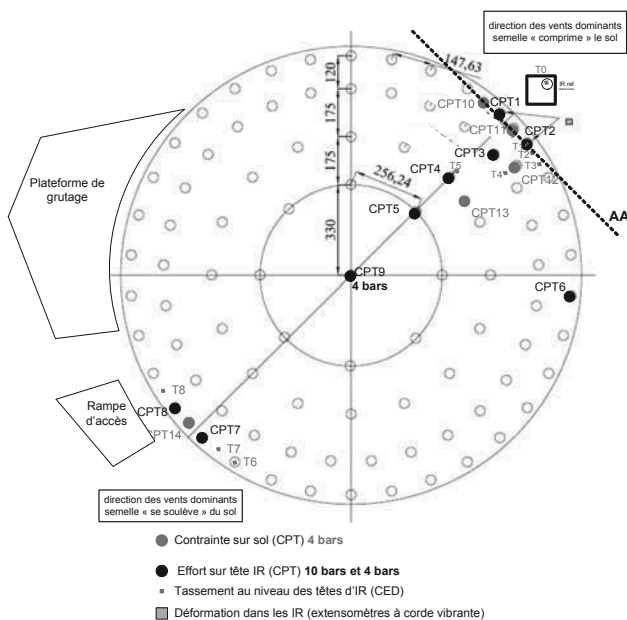


Figure 3. Plan d'instrumentation au niveau des têtes d'IR (1^{er} niveau).

Les capteurs sont installés principalement en périphérie de la semelle de l'éolienne, zone qui doit supporter les contraintes et les variations de contraintes les plus élevées. Ils sont ainsi disposés sur la ligne des vents dominants, afin de mesurer les plus forts effets du vent.

De plus, des extensomètres à cordes vibrantes (notées CV) sont installés dans deux inclusions pour y déterminer la

descente de charges. Les capteurs sont relevés automatiquement toutes les 6 heures depuis le début de la construction.

Les mesures sont faites depuis la phase de terrassement, jusqu'au montage de la machine, sur une période de six mois. Puis, le suivi est mené après la mise en service de l'éolienne, plus de deux ans après la pose de l'instrumentation.

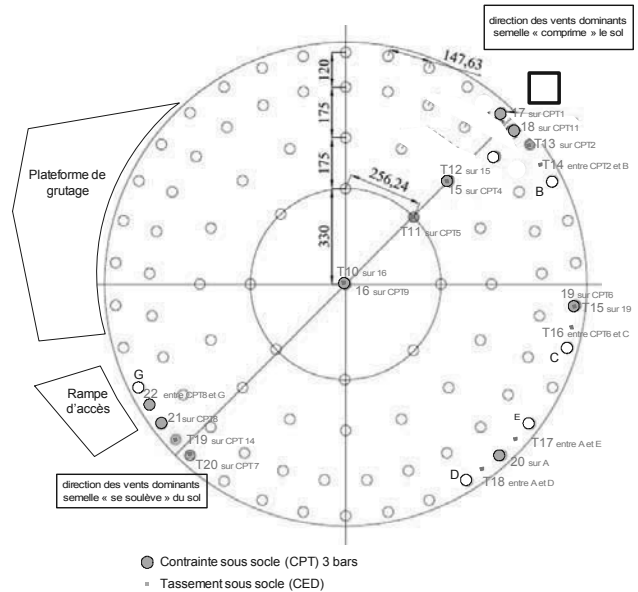


Figure 4. Plan d'instrumentation en partie supérieure de la couche de répartition, sous la semelle (2^{ème} niveau).

4 RESULTATS

Les mesures sont acquises pendant la construction de l'ouvrage et après sa mise en service. Les données propres de l'éolienne (vitesse du vent, orientation de la nacelle, puissance produite) sont acquises depuis le printemps 2012 et permettent une première observation de l'effet du vent sur le comportement de la structure de fondation.

4.1 Transfert des efforts pendant la construction

Depuis la mise en place des CPT, directement sous la semelle de l'éolienne, leurs indications ne dépassent pas 65 kPa jusqu'à la mise en service. Par contre, les pressions totales mesurées sur 9 IR, avant la mise en service de l'éolienne (Figure 5), augmentent fortement lors du coulage de la semelle, sauf en son centre (CPT9), qui reste très peu sollicité.

Les mesures des CPT1 et CPT2 (comme les CPT7 et CPT8) diffèrent dès ce moment, malgré la proximité des capteurs, mais leur évolutions restent cohérentes.

L'IR située sous le CPT5 est positionnée sous l'influence d'un des appuis de la virole (qui supportera la base du mât de l'éolienne); cela explique pourquoi elle est très fortement chargée. Les différences notables entre les valeurs mesurées par les capteurs s'initient à cette phase de la construction, pour se maintenir jusqu'à la mise en service de l'éolienne, qui va subir de fortes sollicitations avant cette date (tests d'arrêt d'urgence, survitesse).

Les pressions mesurées sur les têtes d'IR s'échelonnent entre 360 kPa (36,6 kN sur l'IR) à 796 kPa (81 kN), pour une moyenne de 596 kPa. Les 34 IR situées en périphérie de la semelle supportent 16 % du poids statique de l'éolienne.

La pression exercée sur le sol varie entre 100 et 200 kPa, sans être maximale en périphérie de la semelle.

En fin de construction, le sol situé dans une frange de 0,5 m en périphérie de la semelle, reprend 24,4 % du poids de l'éolienne (en considérant une pression moyenne de 120 kPa exercée).

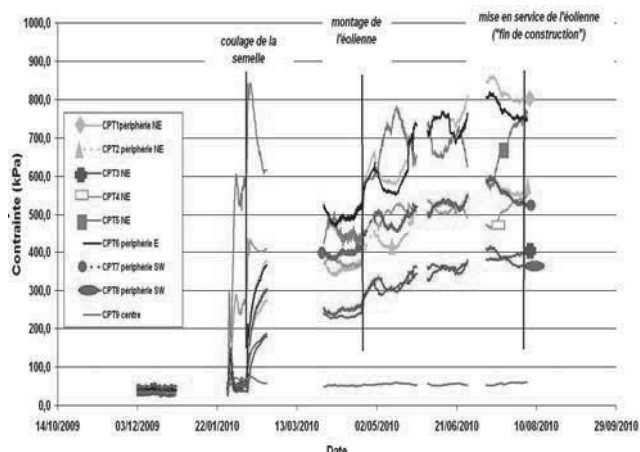


Figure 5. Pressions totales sur les IR pendant la construction.

Ainsi, cette frange périphérique (soit 22,5 % de la surface totale de la semelle), reprend 40,4 % de la charge statique totale.

4.2 Tassement

Les tassements sont calculés par rapport à un capteur de référence, assurément immobile, afin d'annuler les effets des variations hydriques et de température de la zone expérimentale. La Figure 6 présente le tassement du sol de fondation au niveau d'élevation des têtes d'IR.

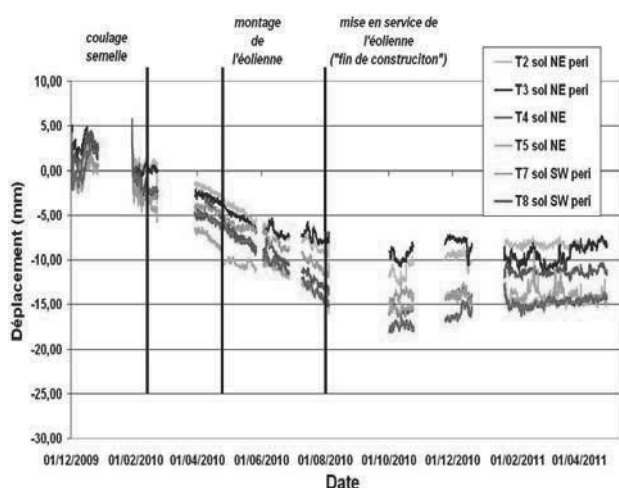


Figure 6. Tassement du sol de base, au niveau des têtes d'IR.

Au cours de la construction, le sol de fondation tasse légèrement plus que les IR, pour se stabiliser, au moment de la mise en service, à moins de 17 mm (et 10 mm pour les IR). Les variations relevées depuis n'excèdent pas ± 6 mm sur le sol et en surface de la couche de répartition de charge.

4.3 Transfert des efforts après mise en service

Après la mise en service de l'éolienne, les mesures montrent des charges aléatoires, du fait des variations de charges engendrées par le vent et la rotation des pales. La variation des pressions exercées sur les IR, depuis la mise en service de l'éolienne (Figure 7), est similaire pour toutes les IR. Les variations saisonnières sont plus en périphérie de la semelle qu'en se rapprochant du centre de la fondation. Ces variations de pression peuvent avoir une amplitude de 400kPa entre été et hiver.

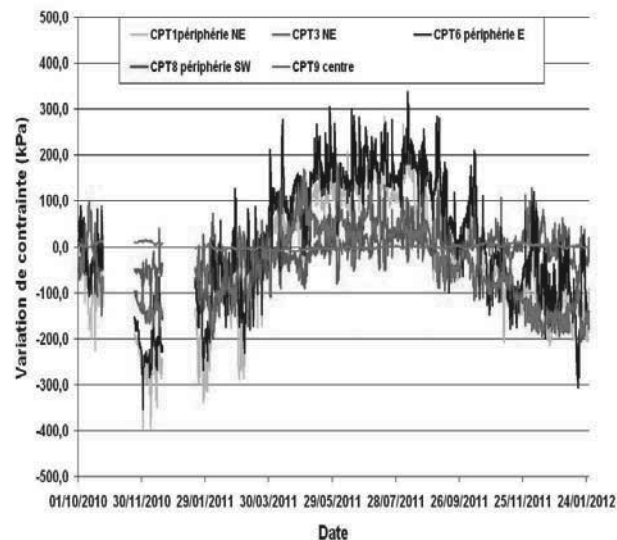


Figure 7. Variation des pressions sur IR après mise en service.

Après mise en service, les pressions exercées sur le sol entre IR, bien que plus chaotiques que durant la construction, ne fluctuent quasiment pas. Un suivi de plusieurs années permettra de confirmer un tel comportement.

4.4 Déformation d'une inclusion rigide

Des extensomètres à cordes vibrantes (CV) sont installés dans deux IR, à des profondeurs différentes, pour accéder aux déformations de l'IR et ainsi au mécanisme de transfert des efforts dans la colonne. Seuls deux CV ont pu être mesurés dans la durée, malgré un fort bruit dû aux vibrations de l'ouvrage. Sur la figure 8 sont tracées les déformations mesurées en partie supérieure et à 1,36 m de profondeur de l'IR coiffée par le CPT2. La mesure de la pression exercée sur cette IR est également présentée.

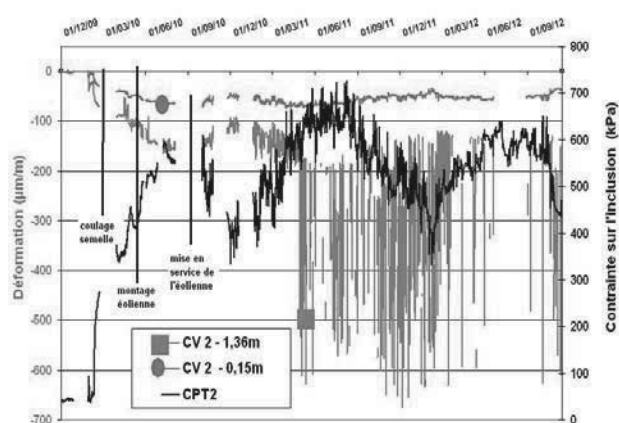


Figure 8. Déformation d'une IR et pression exercée sur sa tête (CPT2).

Dès le coulage de la semelle, l'IR s'est déformée, de façon plus accentuée en profondeur. Cela peut s'expliquer par la plateforme de travail (de 30 cm d'épaisseur, mise en place pour permettre l'accès à la foreuse en fond de fouille) enserre la tête de l'IR et l'empêche ainsi de se déformer.

Elle reporte les efforts qu'elle reçoit à sa surface, comme ceux que lui transmet l'IR, plus en profondeur, sous sa base. Une déformation mesurée plus importante en profondeur peut faire apparaître la présence de frottement négatif le long de la colonne. Les fluctuations de pression exercée sur l'IR sollicitent également l'IR plus en profondeur.

4.5 Effets du vent

La vitesse du vent et l'orientation de la nacelle sont enregistrées en continu. En admettant que les pâles sont toujours perpendiculaires à la direction du vent, on peut accéder à la valeur de la projection de la vitesse du vent sur l'axe des vents dominants. En la superposant à celle du vent, on visualise si le vent souffle dans cet axe ou non.

Lorsque la vitesse du vent dépasse 8 m/s, le pas d'acquisition des mesures des capteurs est automatiquement réduit à moins d'une minute, par le biais d'une deuxième centrale d'acquisition. Cela permet d'accéder à leur variations, exclusivement au cours d'un vent violent. Notons que seules les CPT répondent instantanément en mesure rapide, alors que les CV et les T nécessitent plusieurs secondes pour se stabiliser.

4.6 Variation des pressions appliquées

En s'intéressant aux capteurs positionnés dans l'axe des vents dominants, on peut observer l'évolution des pressions appliquées, en fonction de la vitesse et du sens du vent (Figure 9). Il s'avère que, dans cet axe, lorsque la nacelle change de sens, les pressions exercées au niveau des têtes d'IR augmentent d'un côté de la semelle pour diminuer de l'autre (entouré A sur la

Figure 7). Par vent fort, les variations respectives de contraintes atteignent 200 kPa (entouré B). Dans une moindre ampleur, les pressions exercées sur le sol présentent le même type de variations.

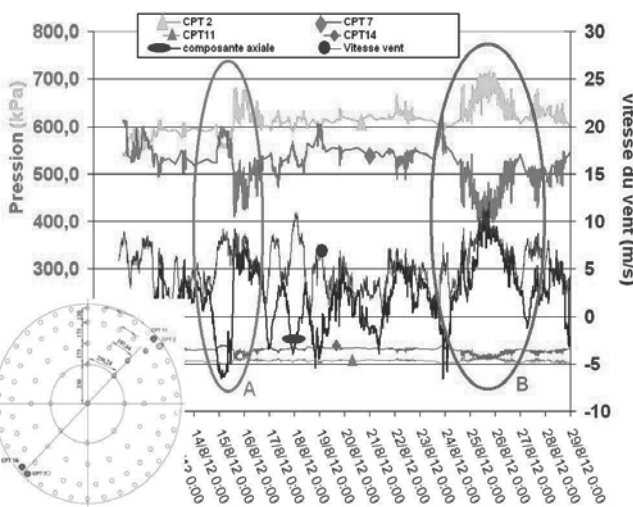


Figure 9. Pression au niveau des têtes d'IR (sol et IR), dans l'axe des vents dominants; vitesse du vent et projection sur l'axe.

4.7 Évolution des tassements en fonction de la vitesse du vent

Sur la Figure 10 sont superposées la puissance développée par l'éolienne, des mesures de CPT et les mesures de tassement sous la semelle de l'éolienne et sur le sol au niveau des têtes d'IR, en périphérie de l'éolienne, sur l'axe des vents dominants. Lorsque l'éolienne ne produit pas d'électricité (puissance nulle, entouré sur la figure 10), les pressions sous l'ouvrage diminuent et le sol semble se relaxer, avant de retrouver sa position lorsque la rotation des pâles reprend. La présence d'eau en pied de semelle peut expliquer ce phénomène car elle n'est plus chassée par l'effet dynamique des battements dus aux rafales de vent.

5 CONCLUSION

L'instrumentation du chantier d'une éolienne du parc éolien de Boralex, au nord de Rouen, fondée sur une structure de sol

amélioré par inclusions rigides, a permis de suivre l'évolution des tassements, pressions exercées et déformation d'IR et du sol, au cours de la construction et pendant la vie de l'ouvrage.

En fin de construction, les efforts se concentrent légèrement sur la périphérie de la semelle de fondation, ce qui montre un fonctionnement en fondation rigide.

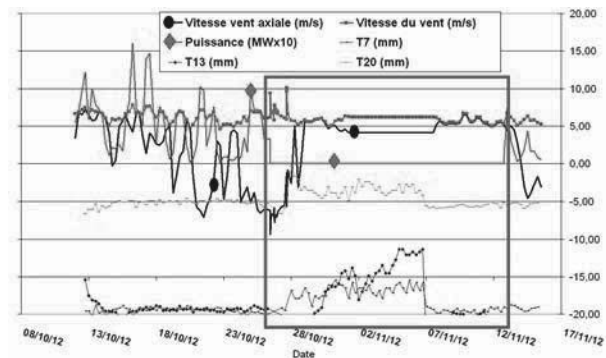


Figure 10. Pression au niveau des têtes d'IR (sol et IR), dans l'axe des vents dominants; vitesse du vent et projection sur l'axe.

Une fois en service, les pressions varient plus amplement et évoluent avec les variations de température saisonnières, qui impactent la structure de l'éolienne. La poursuite des mesures permettra d'observer éventuellement une tendance de comportement de la structure.

Les tassements du sol et des IR restent faibles. La tête des IR a tassé d'1 cm, alors que le sol en place a tassé d'environ 2 cm en fin de construction. En service, l'amplitude des tassements ne dépasse pas 5 mm.

Les déformations internes des IR sont difficilement accessibles par le système d'acquisition installé. Cependant, le mécanisme observé dans la partie supérieure d'une IR montre que la présence de la plateforme de travail, qui enserre la tête des IR, a un effet réel sur le comportement mécanique de la structure, en favorisant le développement de frottement négatif le long des colonnes, ce qui ramène plus en profondeur le point neutre de fonctionnement de la colonne.

Nous poursuivons l'analyse des mesures de tassement et de déformation d'une IR pour accéder à son comportement d'une IR au cours d'un fort coup de vent.

6 REMERCIEMENT

Les auteurs remercient l'Agence Nationale pour la Recherche pour l'aide financière apportée au montage du projet national ASIRi, géré par l'IREX, dans le cadre du RGPU, ainsi que les sociétés Theolia et Boralex qui ont assumé une part importante du coût de l'instrumentation. Ils remercient également la société ANTEA, membre du projet national pour le montage du projet, comme la société Egis, intervenue lors du montage expérimental.

7 REFERENCES

Briançon L. 2002. Renforcement des sols par inclusions rigides, État de l'art en France et à l'étranger, Irex, *Opération du réseau Génie Civil et urbain*, septembre, 180 p.
 Haza-Rozier E. Vincelas G. Le Kouby A. et Duprez T. 2012. Instrumentation des fondations d'une éolienne – Cas des inclusions rigides, *Journées Nationales de Géotechniques et de Géologie de l'ingénieur, JNGG, 4-6 juillet 2012, Bordeaux, France*, 561-568.
 Haza-Rozier E. 2011. Projet national ASIRi – Éolienne fondée sur inclusions rigides, *rapport de recherche Cete Normandie-Centre/CER*, juillet, 28 p.