



FONDATIONS



## FONDATIONS ONSHORE: HIGH-TECH EN SOUS-SOL

Avec l'augmentation de la taille des machines, les fondations sont elles aussi devenues gigantesques. Mais du géotechnicien au cimentier, toute la chaîne d'acteurs innove afin de réduire les coûts des soubassements des éoliennes terrestres.

PAR VINCENT BOULANGER



**L'**art et la manière de construire les fondations d'éoliennes ont beaucoup évolué depuis le décollage industriel de la filière. En une quinzaine d'années, les diamètres des fondations sont passés de 10-11 mètres à des tailles couramment situées aujourd'hui entre 16 et 24 m. La taille des machines actuelles fait qu'elles transmettent des charges énormes au mât, puis aux fondations et au sol. En outre, l'impact des forces et vibrations de l'éolienne est mieux compris. « Le contexte réglementaire s'est également complexifié, relève Alexander Martin, gérant du bureau d'études CTE Wind. En France

*Béton de propreté pour une fondation Soft Spot de CTE Wind, consistant à concevoir une fondation en forme d'anneau.*

*comme en Allemagne, des bureaux de contrôle doivent évaluer le dimensionnement des fondations, y compris durant la phase de construction. Tout cela fait que l'on peut parler aujourd'hui de fondations high-tech, dans lesquelles se loge une quantité impressionnante de connaissances. »*

Plusieurs critères influent sur le choix du type de fondation. L'expertise géotechnique révélera

d'abord la nature du sol, ce qui donne un premier éventail de solutions de fondations pouvant s'adapter au terrain. Mais le type d'éolienne a également une influence déterminante. D'abord, les charges propres à chaque machine ont un impact sur le dimensionnement de la fondation, puis les types de liaison entre le mât et la fondation et la nature du mât influent également son design. Les mâts hybrides en béton et acier demandent par exemple que les sections en béton soient contraintes par des câbles de serrage. Ce qui exige de concevoir une cavité au cœur de la fondation destinée à recevoir les ancrages.

De façon schématique, il existe trois grandes catégories de fondations. Le massif superficiel est, comme son nom l'indique, un socle de béton armé sur lequel repose l'éolienne. Il peut être conçu avec ou sans poussée d'eau, c'est-à-dire plus ou moins massif pour contrer la poussée d'Archimède. « Il faut automatiquement une fondation calculée contre la poussée d'eau dès que le rapport géotechnique informe sur un niveau d'eau proche du terrain naturel, ce qui est souvent le cas », explique Alexander Martin. Lorsque le sol n'est pas d'assez bonne qualité, la fondation peut être réalisée sur pieux ou sur un sol amélioré. Là où le sol est rocheux, en Scandinavie notamment, les éoliennes reposent sur un mince socle en béton lui-même ancré directement dans la roche *via* des tirants précontraints.

## PRÉPARER LE SOL

« Nous menons les études géotechniques permettant de définir les types de fondations adaptées, explique Éric Jandel, directeur scientifique de Fondasol.

Lorsqu'un renforcement de sol est nécessaire, nous dimensionnons également ce renforcement. Les sols avec des caractéristiques médiocres, typiquement dans le nord de la France, nécessitent souvent d'être améliorés par des inclusions rigides. » Il s'agit de pieux de béton non armé (sans ferrailage) réalisés sur une maille de 1,5 x 1,5 m en périphérie et de 3 x 3 m au centre, allant jusqu'à la couche de sol compact. Ils sont par conséquent mis en œuvre lorsque la géologie sous la fondation est constituée de sols mous reposant sur des sols compacts. Le massif superficiel peut ensuite être construit sur ce sol amélioré. Cette technique est plus simple et plus rapide à mettre en place que les fondations sur pieux, qui exigent un ferrailage des pieux liaisonnés au massif. « Si pour un même parc éolien vous avez besoin à la fois de fondations sur pieux et de massifs superficiels classiques, cela signifie que vous avez besoin de deux designs de fondations, des coffrages différents, etc., poursuit Éric Jandel. Avec les inclusions rigides, vous renforcez le sol et ensuite les fondations de l'ensemble du parc peuvent être construites sur le même design, ce qui permet d'optimiser le chantier. » Fondasol propose également une méthode pour créer des massifs "sans eau" (de pluie), permettant de diminuer le coût des fondations. En effet, une fois l'éolienne construite, la terre de remblai est moins compacte

**La taille des machines actuelles fait qu'elles transmettent des charges énormes au mât, puis aux fondations et au sol.**



que le sol naturel et l'eau de pluie a tendance à s'y concentrer. La teneur en eau du sol autour de la fondation crée un effet "piscine", une sous-pression risquant de déstabiliser l'éolienne. Sur les sites présentant une pente importante, il est assez facile de réaliser un drainage pour évacuer cette eau. En revanche, sur terrain plat, l'évacuation est problématique. Fondasol propose dans ce cas de forer des puits d'absorption à la périphérie de l'éolienne permettant d'infiltrer l'eau dans le sol, quand la géologie le permet. « Grâce à cette technique, nous pouvons concevoir des massifs sans

*eau ayant un diamètre de 10 à 15 % inférieur par rapport à un massif avec eau, assure Éric Jandel. Cela peut représenter 10 000 à 15 000 euros de moins par fondation d'éolienne, ce qui n'est pas négligeable. »*

**« Lors du coulage du béton, il faut en permanence mesurer la température, et au besoin refroidir. »**

#### FORMES INNOVANTES

CTE Wind développe pour sa part des propositions innovantes permettant également de diminuer la quantité de béton nécessaire : les fondations en étoile et le Soft Spot. Toutes deux sont en particulier indiquées dans les sols avec

poussée d'eau, où justement les fondations doivent être plus massives. « La forme en étoile est quelque chose que l'on a déjà vu sur ce marché par le passé, mais qui ne s'est pas imposé, explique Alexander Martin, notamment parce que les fondations étaient encore trop petites pour que ça vaille la peine. Néanmoins, la simple forme en étoile permet une économie de béton allant jusqu'à 40 % par fondation. » Ce type de fondation est constitué d'un socle en béton surplombé par une élévation en forme d'étoile, entre les

*Cage d'ancrage assurant la liaison entre le mât et la fondation. Une solution de fondation avec socle rehaussé proposée par CTE Wind afin de surélever la turbine.*

branches de laquelle la terre est compactée. Reste que le coffrage pour former les branches de l'étoile est plus compliqué que pour une fondation classique.

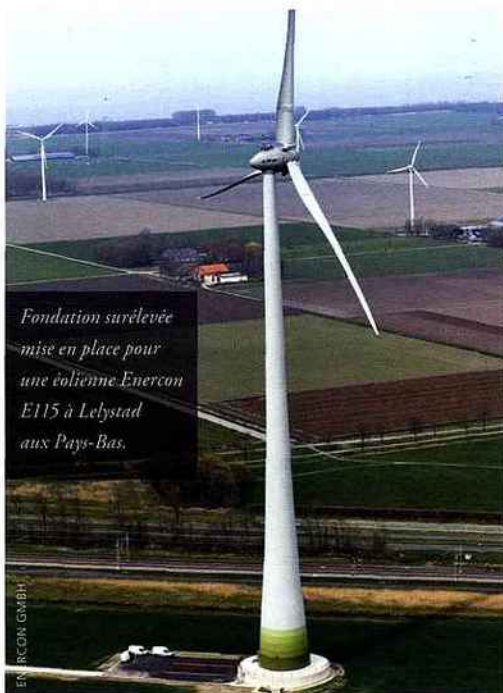
*« Vous économisez d'un côté sur le béton,*

*mais vous devez dépenser davantage pour le coffrage, poursuit Alexander Martin. Il faut donc que le jeu en vaille la chandelle. Ce n'est pas toujours évident dans les pays où le béton est bon marché. En France ou en Allemagne, c'est au cas par cas. Au Chili en revanche, le calcul est tout autre, car le béton est deux fois plus cher qu'ici et le coût de la main-d'œuvre moins élevé. »*

La fondation Soft Spot a, quant à elle, été développée l'an dernier et mise en œuvre en Thaïlande, mais Alexander Martin préfère ne pas livrer trop de détails à son sujet. « Pour la mettre en œuvre, il faut un sol avec une bonne portance, car on conçoit une fondation en anneau et non pas en massif plein, lâche-t-il tout de même. Cela permet d'économiser des centaines de mètres cubes de béton par rapport à une fondation typique. L'espace central réservé peut avoir un diamètre variable de 7 ou 13 m, mais nous avons démontré que la fondation en anneau ne décolle pas plus facilement du sol qu'une fondation pleine. »

#### PRÉFABRICATION

Depuis la montée en puissance de l'éolien, les groupes cimentiers accordent eux aussi davantage d'attention à ce secteur. En ce qui les concerne, le premier sujet à maîtriser est le phénomène de la chaleur d'hydratation, propre aux structures massives. En effet, l'hydratation du ciment dégage de la chaleur et ainsi le béton monte en température lors de sa prise et plus la structure est massive, plus la température est élevée pour atteindre une centaine de degrés dans certains cas. Or, au-delà d'un certain seuil, ces températures sont problématiques : des fissures apparaissent dans le béton, et une réaction chimique interne (connue sous le nom de Réaction Sulfatique Interne) peut fragiliser la fondation au cours du temps. « Nous travaillons à la fois sur la baisse et sur la maîtrise de la chaleur d'hydratation, avance Nicolas Swetchine, directeur grands comptes et marchés d'infrastructure du groupe LafargeHolcim. Il s'agit d'une part de mettre au point des formulations de béton aptes à diminuer le phénomène, de développer des conditions de bétonnage adaptées et d'autre part



Fondation surélevée  
mise en place pour  
une éolienne Enercon  
E115 à Lelystad  
aux Pays-Bas.

ENERCON GROUP

## FONDACTIONS OPTIMISÉES

Les fabricants d'éoliennes sont certes des constructeurs de machines avant d'être des experts en génie civil, mais leurs compétences sur le sujet ont grandi au fil des années. « La concurrence et la pression sur les prix augmentent sans cesse et les fabricants sont plus que jamais incités à proposer à leurs clients des produits et solutions compétitives, constate Felix Rehwald, directeur de la communication corporate d'Enercon. Dans le domaine des fondations, nos ingénieurs de développement épousent également cette approche.

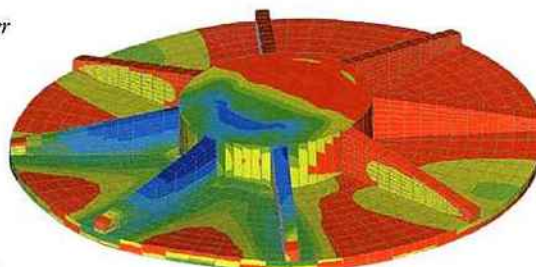
Par exemple, les fondations de notre nouvelle plateforme EP3 seront systématiquement construites avec une partie émergeant du sol. De cette façon, elles seront soumises à moins de poussées d'eau, ce qui permettra d'économiser d'importantes quantités de matériaux. »

En effet, plus les fondations sont enfoncées dans le sol, plus elles sont soumises à la poussée de l'eau. En relevant les fondations, il devient au contraire possible de diminuer la taille du massif superficiel. La technique n'est pas nouvelle, mais

elle sera mise en œuvre de façon standard pour la série EP3, avec ou sans talus. « D'autres modifications seront apportées pour les mâts hybrides béton-acier, comportant une cavité d'ancrage dans laquelle sont fixés les câbles de serrage, poursuit Felix Rehwald. Cette cavité sera conçue plus petite, si bien que l'ensemble du socle béton pourra également être dimensionné plus petit. L'économie de matériau aura là aussi un effet positif sur le coût global. »

d'assurer un contrôle de qualité sur le chantier même, quelles que soient les conditions. Lors du coulage du béton, il faut en permanence mesurer la température et au besoin refroidir le béton avec de l'eau réfrigérée, de la glace, voire injecter de l'azote liquide dans les camions malaxeurs dans certaines situations extrêmes. Ainsi au Brésil par exemple, nous avons, à côté des camions de béton, d'autres camions chargés de blocs de glace pour refroidir le béton avant le coulage. Cela paraît artisanal, mais nous sommes ainsi capables d'assurer un contrôle qualité dans des zones peu accessibles partout dans le monde. »

Une autre voie qu'étudie le groupe est le concept de fondations préfabriquées. Il s'agirait d'assembler sur site, comme des Lego, des éléments de fondation fabriqués en usine, à l'instar de ce qui se fait souvent pour les ponts. L'avan-



Structure d'une fondation  
en étoile.

tage est que le contrôle qualité peut être réalisé en usine. Cette solution ne peut pas être mise en œuvre partout, car la complexité vient de

l'acheminement sur site d'éléments lourds et massifs.

Enfin, ce qui devrait amener des évolutions dans la conception des fondations est la diffusion des mâts en béton. « Plus les tours sont hautes, plus les mâts en béton deviennent compétitifs, estime Nicolas Swerchine. Le fait que le couple tour/fondation soit fait du même matériau permet d'envisager de nouveaux designs de fondations. Cela peut vraiment changer la donne. D'ailleurs, notre programme de recherche aborde le couple mât/fondation comme un tout. » Mais pour en savoir davantage sur ce point, il faudra attendre que les projets sortent des cartons. ■