



Présentations de la 7^e matinée Décennale SCOR

Assurance des éoliennes terrestres



Sommaire

Préface	3
1 Développement de projets éoliens terrestres	4
2 Assurance des projets éoliens terrestres en France	11
3 Géotechnique et ingénierie éolienne	16
4 Dimensionnement de fondations éoliennes	26



*Les opinions et déclarations
exprimées dans cette publication
n'engagent que leurs auteurs.*

Préface

Chaque année, la matinée Décennale est l'occasion pour SCOR Global P&C de proposer une réflexion autour d'une thématique d'actualité, présentée par des experts renommés.

Pour cette septième matinée Décennale, nous avons souhaité explorer avec nos clients le thème de l'énergie éolienne.

Alors que l'énergie renouvelable a le vent en poupe, l'énergie éolienne terrestre suscite des réactions contrastées : les citoyens sont favorables à la construction d'un parc éolien mais ne souhaitent pas que les installations soient à proximité de leur habitation. L'obtention des autorisations de construction d'un parc éolien n'est donc pas aisée, et peut représenter un parcours chaotique mettant en relation des interlocuteurs multiples.

Sur le plan financier, les parcs éoliens requièrent un investissement lourd qu'il convient de protéger par des assurances, au même titre que tous les investissements. Cet aspect est important car les financiers sont particulièrement attentifs à l'assurance et à la protection financière de tout investissement.

Ce document est organisé en deux parties :

- Le déroulement d'un projet de parc éolien sera développé dans une première partie : nous verrons quelles en sont les différentes étapes et les inévitables difficultés ainsi que les besoins en assurance et plus particulièrement les besoins en couverture décennale.*
- Les risques inhérents à la construction d'une éolienne seront aussi abordés dans une deuxième partie. Construire au sens propre du terme une éolienne, et surtout sa fondation, est la partie qui importe le plus pour l'assureur/réassureur. C'est une opération techniquement difficile, notamment sur le plan de la modélisation d'un sol. C'est un projet isolé, en pleine nature et qui n'a pas de référentiel déjà existant sur place. Le dimensionnement de la fondation elle-même peut également être délicat.*

Didier Hellstern, Directeur Régional Développement et Agathe Jouneau, Chargée d'Affaires Environnementales auprès d'EDF Energies Nouvelles traiteront du développement d'un projet éolien terrestre ; Stéphanie Fuentes-Emmenecker, Responsable Assurances d'EDF Energies Nouvelles abordera le thème de l'assurance de ces projets. Gilles Bourne, Directeur de Alios Ingénierie, Responsable du service éolien, développera l'aspect géotechnique, et Alexander Martin, Directeur, Ingénieur Associé du bureau d'étude CTE Wind, expliquera les précautions à prendre lors du dimensionnement d'une fondation d'éolienne.

Pour terminer cette introduction, il semble pertinent d'indiquer quelques chiffres significatifs pour montrer l'extraordinaire développement de l'éolien.

En 2000, 61 mégawatts étaient installés contre presque 7 000 fin 2011. Le trajet parcouru en 10 ans est très éloquent : en 2000, l'énergie éolienne assurait la consommation domestique de 29 000 personnes pour 5 millions de personnes qui sont alimentées en 2011. Le développement est tout à fait substantiel.

Pour respecter les objectifs du Grenelle de l'Environnement, la puissance installée devrait être de 25 000 mégawatts en 2020 - 19 000 sur terre et 6 000 en mer. À cette fin, il faudrait multiplier par trois la puissance actuellement installée sur terre. Le développement substantiel de cette source d'énergie explique pourquoi l'équipe Assurance Décennale de SCOR Global P&C a souhaité inscrire l'éolien terrestre à l'agenda de la matinée Décennale 2013.

JEAN TUCCELLA

*Directeur Département Décennale
SCOR Global P&C*

DÉVELOPPEMENT DE PROJETS ÉOLIENS TERRESTRES

DIDIER HELLSTERN
*Directeur Régional Développement
EDF Énergies Nouvelles*

AGATHE JOUNEAU
*Chargée d'Affaires Environnementales
EDF Énergies Nouvelles*

Nous vous proposons de structurer notre exposé autour de 7 parties : après une brève présentation de notre société, de notre métier de développeur de projets éoliens terrestres et de ses objectifs, nous expliquerons la composition d'un parc éolien, comment le mettre en place, les délais nécessaires ; nous exposerons également le cadre réglementaire de notre activité et terminerons par les enjeux inhérents au développement d'un parc éolien.

I. Présentation d'EDF Énergies Nouvelles

EDF Énergies Nouvelles est la filiale « verte » du groupe EDF : cette entité développe, construit et exploite des centrales d'électricité verte, principalement en Europe et en Amérique du Nord, en priorité pour compte propre, mais aussi pour compte de tiers.

Un spécialiste de la production d'électricité verte

UN ACTEUR MULTI-FILIERES



UNE PRESENCE INTERNATIONALE

17 pays – 2 750 personnes



UN OPÉRATEUR INTÉGRÉ



PARMI LES LEADERS MONDIAUX

- 5 372 MW bruts installés
- 1 329 MW bruts en construction*
- 2 078 MW cédés (DVAS)
- 8 167 MW en exploitation-maintenance*

MANAGEMENT ENVIRONNEMENTAL

Certifié ISO 14001 depuis 2005



Chiffres au 31 déc. 2012

* Pour compte propre et compte de tiers

MW bruts : capacité totale des centrales dans lesquelles EDF EN est actionnaire



En tant qu'opérateur intégré, EDF Énergies Nouvelles est responsable de la conduite globale des projets d'énergies renouvelables : identification du site, conception du projet et obtention des autorisations, construction des éoliennes, production d'électricité et exploitation. EDF Énergies Nouvelles a aussi l'expérience du démantèlement d'éoliennes comme cela a d'ailleurs été le cas pour le compte de tiers dans un parc implanté dans le sud de la France.

II. Composition d'un parc éolien

Un parc éolien inclut les éoliennes et les infrastructures qui vont permettre la transformation électrique et leur transport ; il se compose d'un réseau électrique interne, un poste de transformation intégré à l'éolienne ainsi qu'un poste de livraison qui permet de collecter l'électricité comme illustré ci-dessous :

Composition d'un parc éolien



- ▶ Voies d'accès, aires de levage
- ▶ Poste(s) de livraison
- ▶ Raccordement et réseau de communication enterrés
- ▶ Mât de mesure de vent

▶ Éoliennes :

ex. d'une éolienne de 2 à 3 MW :

- Fondation
- Mât : hauteur 80 à 125 m
- Rotor à 3 pales : diamètre 80 à 120 m
- Réseau électrique interne
- Poste de transformation intégré



On ne peut évoquer les éoliennes sans mentionner la fondation qui porte le mât ; celui-ci est de hauteur variable selon la puissance et le type de l'éolienne ; les modèles actuels d'éoliennes ont des mâts d'une hauteur de 80 à 125 mètres sur lesquels vient s'insérer un rotor à trois pales dont l'envergure varie entre 40 et 60 mètres.



Un mât de mesure peut aussi être mis en place afin de collecter des données sur le vent.

Pour construire une éolienne, les équipes techniques mettent en place des plateformes de levage. Ces plateformes sont des aires aménagées capables d'accueillir des grues, camions et autres appareils utiles au chantier. Le chantier commence par des travaux de terrassement pour creuser la fondation et se termine par la phase de levage, selon le processus suivant :

- Renfort des chemins et de la plateforme de levage
- Terrassement
- Ferrailage de la fondation
- Aire de levage et fondation
- Enfouissement des câbles
- Transport des pales
- Levage

III. Définition et objectifs du développement de projet éolien

Les missions de développement commencent par une phase de prospection qui consiste en l'identification des sites où seront installés les futurs parcs éoliens.

Le développement inclut aussi l'ensemble des études réalisées sur les aspects techniques et environnementaux, études qui vont avoir un rôle central dans la conception du projet. Tout au long du développement du projet, les administrations locales, les riverains, les services de l'État et les propriétaires fonciers sont concertés. Ces acteurs locaux ont un rôle très important dans la bonne réalisation des projets.

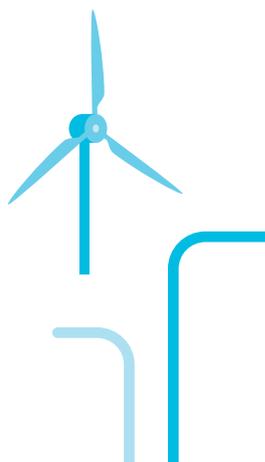
La constitution de dossiers administratifs et l'accès à des autorisations sont aussi des points indispensables dans la phase de développement et impliquent à ce titre le respect d'un cadre réglementaire qui passe par la tenue d'une enquête publique.

En cas de recours contre la réalisation d'un projet, le dossier est suivi par des avocats et des juristes.

EDF Énergies Nouvelles peut aussi être amené à faire du développement externe, c'est-à-dire travailler sous la forme de partenariats avec d'autres porteurs de projet ou acquérir un portefeuille de projets à tout stade de développement (projets prêts à construire par exemple). Le développement externe implique la réalisation d'audits sur les travaux et les infrastructures prévus, la vérification du respect des standards de qualité et le cas échéant, les démarches nécessaires pour remise à niveau.

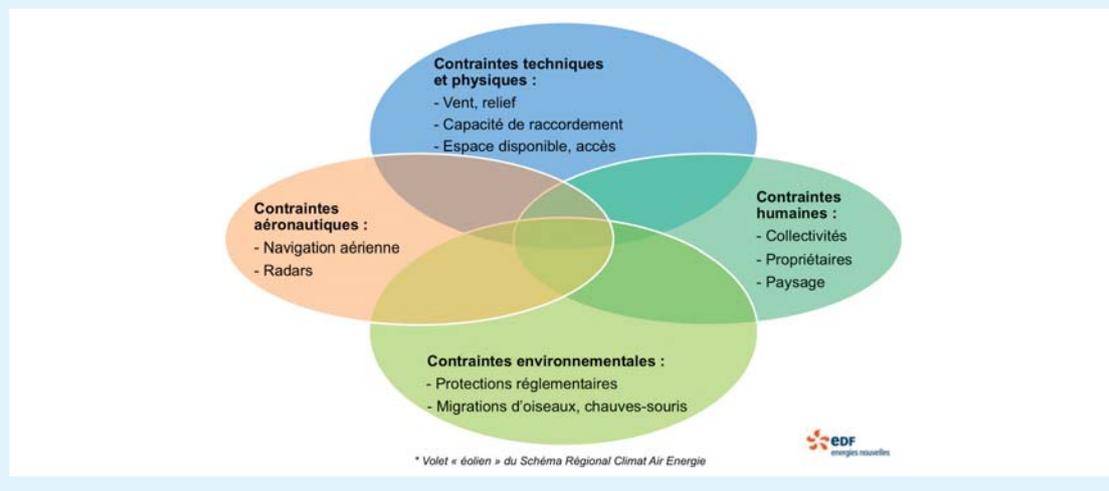
Rappel des objectifs du Grenelle de l'Environnement à 2020

- 23 % d'énergie renouvelable dont, pour l'éolien :
- 19 000 MW terrestres vs 7 450 MW actuellement
 - 6 000 MW offshore vs 0 MW actuellement



IV. Contraintes et potentialités du développement d'un projet éolien

Potentialités (prospection)



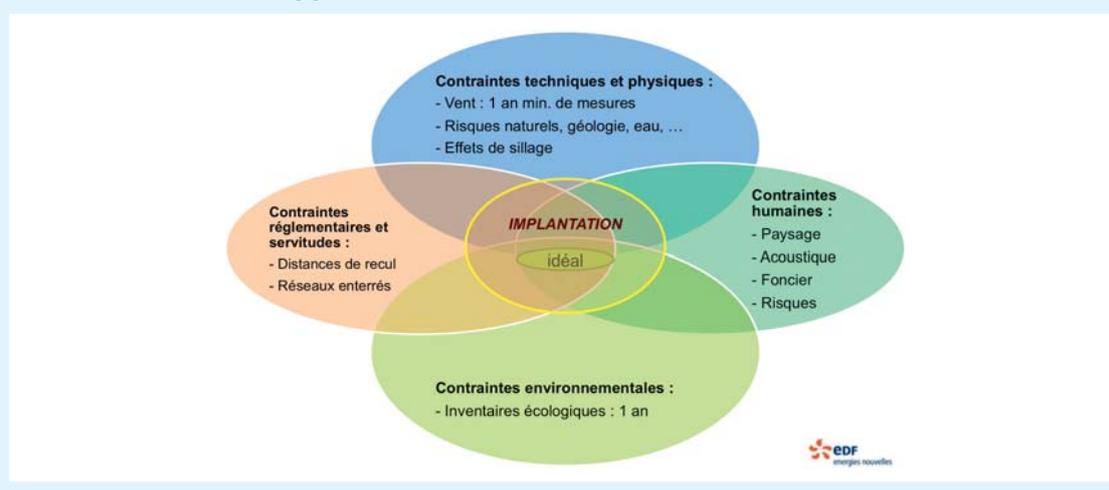
Tout au long de la phase d'identification et de développement du projet, un grand nombre de contraintes doivent être prises en compte. Pour trouver le site susceptible d'accueillir les éoliennes, les chefs de projet étudient un ensemble de contraintes à l'échelle régionale et locale. Compte tenu de la hauteur des installations, ces contraintes peuvent être d'ordre technique, humain, environnemental ou aéronautique.

Une fois l'emplacement identifié, un ensemble d'études plus fines sont réalisées à l'échelle du site, généralement par des spécialistes ou des bureaux d'études externes. Ces études incluent une analyse du vent et de l'environnement pendant une période d'au moins

un an. Un inventaire écologique est ainsi réalisé pour étudier les phases biologiques des espèces qui vivent sur le site et aux alentours. Les contraintes humaines sont très importantes au niveau du paysage, des impacts acoustiques, des problématiques foncières et des risques associés au projet. Les contraintes techniques incluent les risques naturels et géologiques, le vent et le relief qui vont être évidemment des éléments primordiaux dans le développement du parc éolien. Les projets sont aussi soumis à des études de risque et doivent respecter un certain nombre de contraintes réglementaires.

Le site idéal se trouve au carrefour de toutes ces contraintes :

Contraintes et développement





V. Cadre réglementaire

Le cadre réglementaire auquel le développement de projet éolien est soumis s'articule autour de quatre autorisations indispensables à leur réalisation.

Autorisation	Signée par
Délibération	Conseil municipal
Promesse de bail, bail emphytéotique	Propriétaires (et exploitants)
Permis de construire	Préfet de département (de région)
Autorisation d'exploiter ICPE	

En amont des projets, l'accord du Conseil Municipal et l'accord des propriétaires se manifestent par une délibération et des promesses de bail en phase projet, et se transforment en baux emphytéotiques lors de la mise en construction du projet. L'obtention d'un permis de construire et l'obtention d'une autorisation

d'exploiter au titre des ICPE (Installations Classées pour la Protection de l'Environnement) sont enfin deux autres éléments administratifs indispensables à la réalisation du projet. Dans la majorité des cas, ces autorisations sont données par le préfet du département.

À noter que chaque région a élaboré son propre Schéma Régional Éolien dans lequel elle indique quelles sont les zones favorables et défavorables au développement de l'énergie éolienne, selon une méthodologie qui lui est propre. Ce schéma n'est pas suffisant pour valider un projet. Des conflits d'usage entre une activité éolienne et une autre activité impliquant des notions de sécurité importante comme l'aéronautique peuvent par exemple bloquer les autorisations administratives et écarter un projet.

Les parcs éoliens sont aussi soumis au code de l'environnement, au code de l'urbanisme qui régit les obligations de distance par rapport à certaines infrastructures, et également au code de l'énergie qui encadre, de manière plus générale l'industrie de l'énergie.

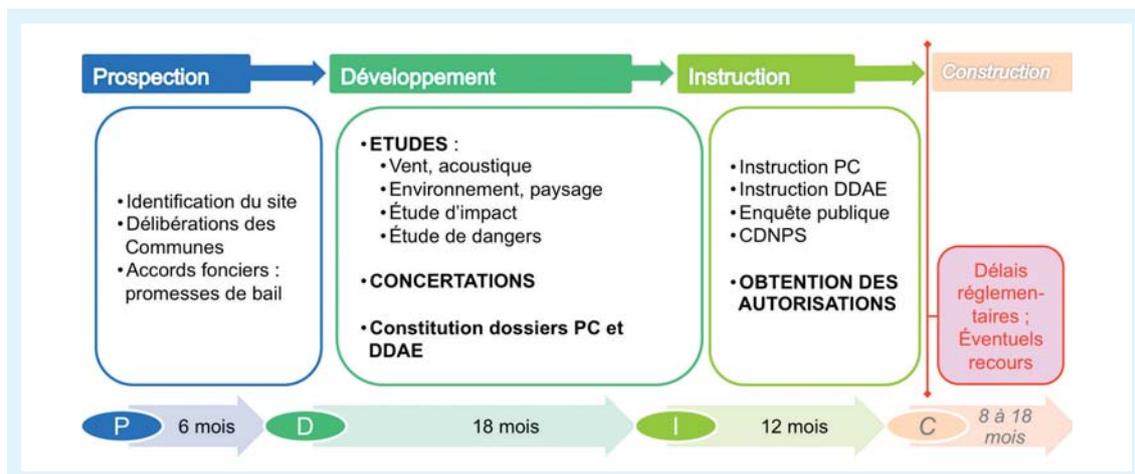
Cadre réglementaire

- ▶ **Schéma Régional Éolien** : volet « éolien » du Schéma Régional Climat, Air, Énergie
- ▶ **Obligation d'achat** : instaurée en 2000
- ▶ **Tarif d'achat** : instauré en 2001, révisé en 2006 : tarif d'achat sur 15 ans :
 - 8,2c€/kWh produit sur 10 ans,
 - puis dégressivité : entre 2,8 et 8,2 c€/kWh pendant 5 ans selon le facteur de charge
- ▶ **Code de l'Environnement** :
 - **Autorisation d'exploiter au titre des Installations Classées pour la Protection de l'Environnement (ICPE)**
 - **Enquête Publique**
 - **Démantèlement et garanties financières**
- ▶ **Code de l'Urbanisme** : **Permis de Construire**
- ▶ **Code de l'Énergie** : Dispositions générales, obligation d'achat

- Constitution de garanties financières : 50 000 €/éolienne
- Engagement écrit d'un établissement de crédit ou d'une entreprise d'assurance

VI. Délais et calendrier type

Le cadre temporel et les différentes étapes du développement d'un projet éolien terrestre se décomposent comme suit :

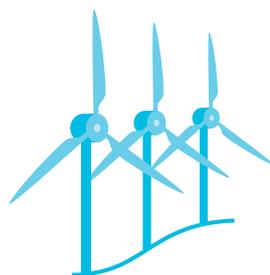


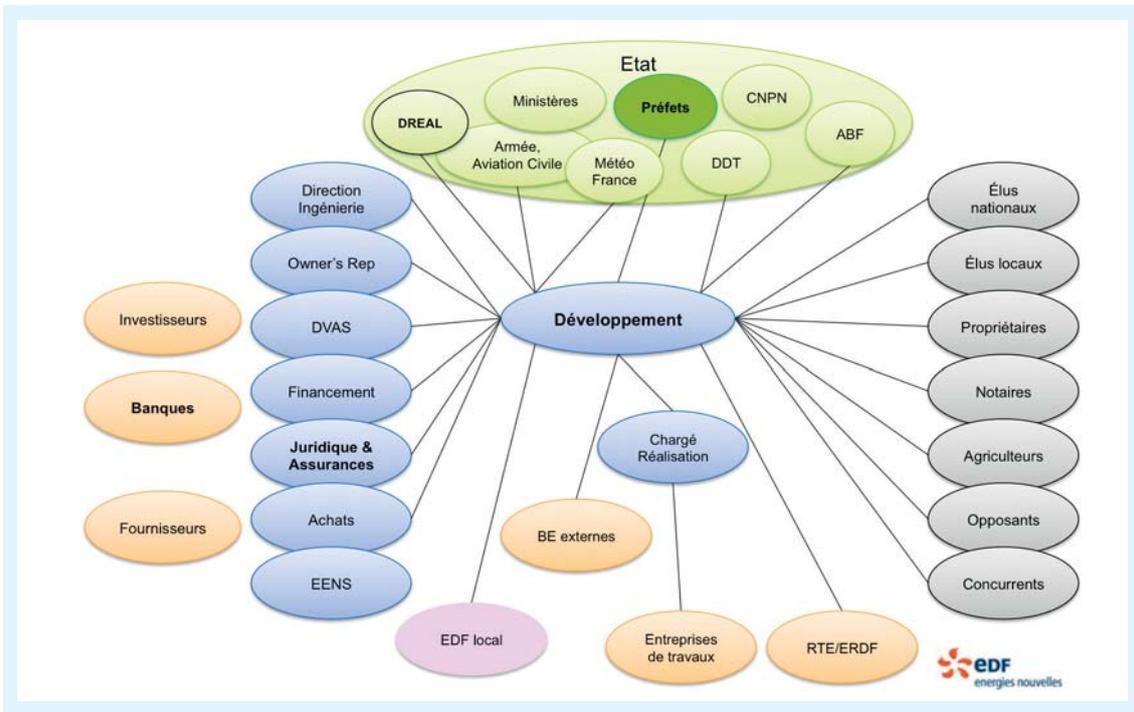
Trois étapes majeures sont à prendre en compte avant la construction d'un parc éolien :

- **Prospection** : identification du site, délibération des communes et obtention de l'accord des propriétaires fonciers. Cette phase préalable au développement du projet a une durée d'environ six mois, mais peut varier selon les contextes et l'envergure du site.
- **Développement** : études, concertations et constitution des dossiers. Afin d'appréhender au mieux les sites où seront installés les parcs éoliens, des études sur le vent et l'environnement sont menées pendant une durée d'environ 1 an. La phase de développement a une durée d'environ 18 mois.
- **Instruction des dossiers** : demande de permis de construire et demande d'autorisation d'exploiter. Il faut compter environ 12 mois pour obtenir les autorisations administratives. Le délai glissant peut dépendre des recours déposés sur les sites : deux mois pour un permis de construire et six mois pour une demande d'autorisation d'exploiter. Dans ces cas, la caducité des autorisations est suspendue et les délais deviennent incertains. À noter que certaines administrations sont plus exigeantes que d'autres, la réalisation de nouvelles études et la recherche d'éléments complémentaires peuvent ainsi être demandées, ralentissant la procédure d'instruction. Les autorisations sont valables trois ans chacune et sont conditionnées, pour le permis de construire, à la réalisation effective du parc et pour l'autorisation d'exploiter, à la mise en service du parc.

Une fois les autorisations accordées et purgées de tous recours, la phase de construction est envisagée. Le dossier est ensuite transmis à l'équipe construction qui est en charge de consulter les entreprises et de préparer le site pour monter les éoliennes. La construction et la mise en service sont des étapes qui peuvent être relativement rapides. Dès les premiers travaux effectués (accès, fondations, etc.), une éolienne peut être levée en une journée en l'absence de vent.

À noter que ces délais sont purement indicatifs et qu'ils sont souvent plus longs que prévu. Il faut compter en général 6 à 7 ans entre le début de la prospection et la finalisation de la construction.





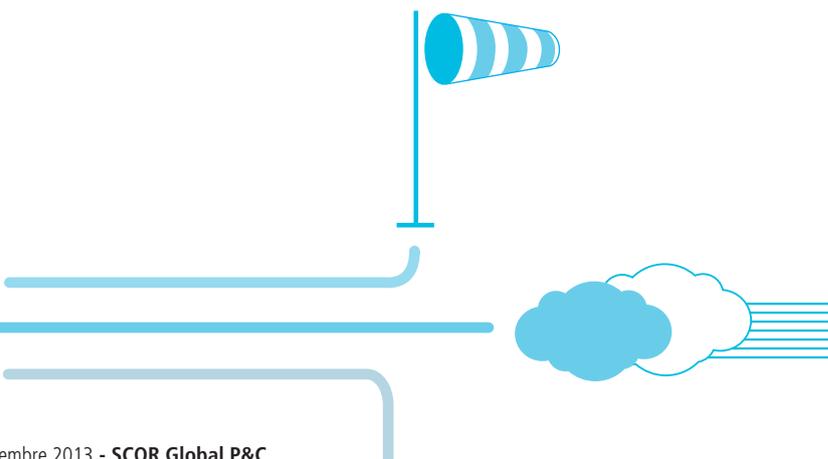
VII. Les enjeux du développement

Un des aspects significatifs du métier de développeur de parc éolien est d'être le chef d'orchestre en phase de début de projet. L'écosystème du développement de projet éolien est complexe et comprend des acteurs divers, internes et externes, qui auront un rôle essentiel dans sa réalisation (cf. schéma ci-dessus).

Il est important de souligner qu'un projet éolien ne peut être imposé ni à la collectivité, ni aux propriétaires fonciers, contrairement à un pylône EDF. Il est donc essentiel de nouer des partenariats avec l'ensemble des contributeurs directs ou indirects à la réalisation des projets, que ce soit avec les propriétaires de terrain, leurs exploitants, les élus et les entreprises de travaux.

Les élus sont des acteurs clés dans la réalisation du projet. Ils ont un rôle de partenaire, voire de porteur de projet dans certaines localités et peuvent être très impliqués dans le développement d'un projet éolien citoyen. Les propriétaires fonciers sont impliqués pendant toute la durée d'exploitation des contrats à partir de la signature des baux emphytéotiques.

Tous les points mentionnés ci-dessus confirment la complexité du métier de développeur de projet éolien qui requiert des qualités multiples : fiabilité et capacité à comprendre la situation dans sa globalité, appréhension des enjeux techniques, environnementaux et humains. Le développeur de projet devra aussi se confronter à des défis techniques et être capable de négocier avec différents interlocuteurs, et ce, tout au long de la durée de vie d'un parc éolien pouvant atteindre 30 ans.



ASSURANCE DES PROJETS ÉOLIENS TERRESTRES EN FRANCE

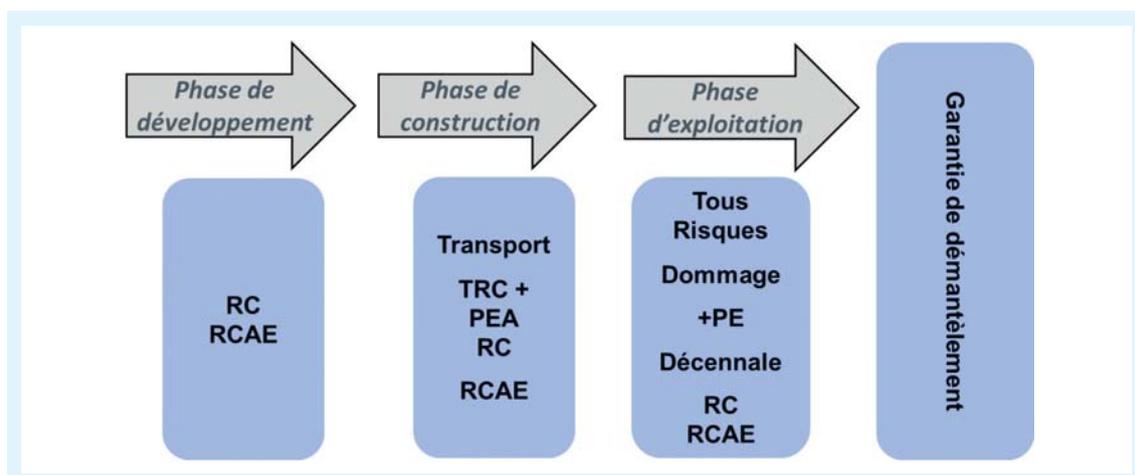
STÉPHANIE FUENTES-EMMENECKER,
Responsable Assurances
EDF Énergies Nouvelles

Comme évoqué dans l'article précédent, EDF Énergies Nouvelles (EDF EN) est un opérateur intégré dans le développement des projets éoliens terrestres intervenant à la fois comme maître d'ouvrage et comme constructeur. Nous vous proposons de vous présenter notre approche « client » de l'assurance des projets éoliens terrestres. Dans la première partie nous exposerons les différentes polices d'assurance qui peuvent être souscrites tout au long du développement d'un projet éolien terrestre y compris la phase de démantèlement, puis nous évoquerons les assurances décennales dans la deuxième partie.

I. Assurances souscrites dans le cadre d'un projet éolien terrestre en France

Nous présenterons dans cette première partie la gestion des risques et les différentes polices d'assurance disponibles tant pour l'activité de constructeur que de celle de maître d'ouvrage.

Le schéma ci-dessous présente l'éventail des différentes polices d'assurance susceptibles d'être souscrites dans le cadre d'un projet éolien. Nous noterons ici qu'à l'exception de la garantie de démantèlement, toutes les polices d'assurance sont facultatives. Il appartient donc au maître d'ouvrage et au constructeur de décider de s'assurer ou non pour les risques associés à l'ensemble du projet.



A - PHASE DE DÉVELOPPEMENT

Durant la phase de développement qui vient d'être présentée dans l'article précédent, seules les polices de Responsabilité Civile sont à considérer, c'est-à-dire les polices qui couvrent les dommages aux tiers. Celles-ci doivent être contractées par les sociétés amenées à signer des contrats qui peuvent engager leur responsabilité vis-à-vis de certains tiers : maître d'ouvrage, société de construction ou société de développement.

Il existe deux types de polices Responsabilité Civile dans le cadre de projets éoliens terrestres :

- Police RC classique générale, qui concerne tous les dommages corporels ou matériels pouvant être causés aux tiers ;
- Police RC Atteinte à l'Environnement (RCAE) qui a été mise en place suite à la loi sur la biodiversité.

B - PHASE DE CONSTRUCTION

En ce qui concerne le risque transport, le maître d'ouvrage peut soit s'assurer pour son propre compte, soit demander à bénéficier de la police souscrite par le constructeur ; si tel est le cas, le maître d'ouvrage est alors assuré additionnel sur la police du constructeur pour le transport concerné. Il convient de couvrir le risque de transport de marchandises transportées depuis des régions très éloignées, le plus souvent par voie maritime ou terrestre, rarement par voie aérienne. Il reste à définir comment cette étape s'articule avec la phase de construction, le déchargement étant souvent source de sinistres : très souvent l'assureur Tous Risques Chantier et l'assureur Transport ne savent pas comment répartir la responsabilité, définir la limite, ce qui explique l'existence de clauses 50/50 induisant la prise en charge à 50 % pour l'assureur des deux parties qui appliquent chacune 50 % de la franchise.

À partir de l'ouverture des travaux (terrassements, travaux de voirie par exemple), une assurance Tous Risques Chantier doit être souscrite afin de couvrir les risques pouvant survenir sur l'ensemble des travaux à réaliser jusqu'à la mise en service. Comme déjà évoqué, ce contrat peut être souscrit par le maître d'ouvrage ou les constructeurs. Cette police d'assurance couvre généralement tous les constructeurs intervenant sur le site ainsi que le maître d'ouvrage, notamment pour les Pertes d'Exploitation Anticipées (PEA) qui peuvent découler d'un sinistre intervenant pendant la phase de construction et entraînant des pertes d'exploitation dues à un retard dans la mise en service.

C - PHASE D'EXPLOITATION

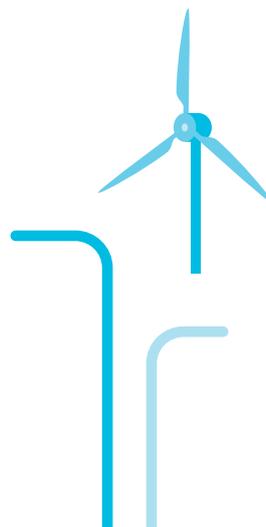
La phase d'exploitation commence généralement au moment de la réception des éoliennes. Dans le cas des éoliennes, il s'agit souvent d'une réception partielle ou réception par grappe d'éoliennes. Une fois la phase de mise en service établie, ce sont les polices Tous Risques Dommages qui entrent en compte, dénommées également Bris de Machines, et pertes d'exploitation associées à ces dommages matériels. Les polices Tous Risques Dommage ou Bris de Machines couvrent effectivement les dommages matériels de nature accidentelle, qui peuvent intervenir sur le parc éolien ainsi que les pertes d'exploitation qui pourraient découler du bris de machine, à condition que ce risque soit garanti par la police.

Les polices classiques dommages exploitation ne couvrent généralement pas les désordres de nature décennale afférents au parc éolien.

D - GARANTIE DE DÉMANTÈLEMENT

Lorsque le projet arrive en fin de vie, une garantie de démantèlement, qui peut être souscrite avant la phase de déconstruction de l'éolienne, doit être obligatoirement mise en place. En effet, comme les installations éoliennes sont classées comme Installations Classées pour la Protection de l'Environnement (ICPE), les développeurs de projet éolien doivent s'engager à démanteler les éoliennes à la fin de vie du parc. À ce sujet, s'est posé la question de savoir si la garantie est plutôt bancaire ou bien assurantielle : le choix s'est porté sur une assurance, plus précisément une convention de cautionnement qui intervient en cas de faillite ou de difficultés financières de l'entreprise, alors incapable de faire face à l'obligation de démantèlement.

Maintenant que le panorama des assurances classiques a été présenté, nous allons faire un focus sur les assurances décennales.

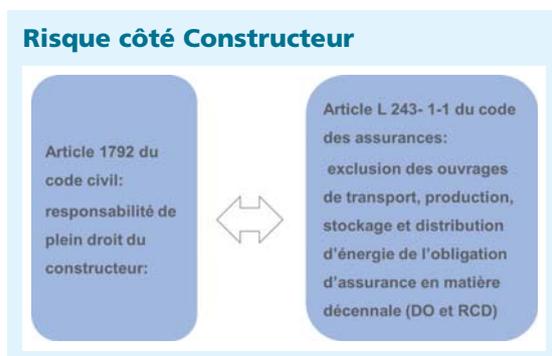


II – Les assurances décennales

Il s'avère que le désordre de nature décennale est l'un des risques les plus importants dans les projets éoliens terrestres. Or, ce risque n'est pas couvert par les assurances dites classiques, notamment par les polices Dommages qui excluent les désordres découlant de la Responsabilité Civile Décennale des Constructeurs.

A - DÉFINITION DU RISQUE ASSURABLE EN DÉCENNALE

Le principal risque assurable de nature décennale en matière d'éolienne est le défaut de stabilité et de solidité de l'ouvrage, et notamment la menace d'effondrement ou l'effondrement lui-même. Ce risque peut être dû à un défaut de conception (erreur de calcul), un défaut de matériaux (béton de mauvaise qualité) ou provenir de la réalisation (une mauvaise exécution des travaux). Les causes des problèmes de stabilité ou de solidité des éoliennes sont multiples : le risque de nature décennale est en fait un risque important pour lequel les polices d'assurance classiques ne proposent pas de réponse automatique aux développeurs de projets éoliens.



La situation juridique est complexe avec la présence d'un statut juridique et un statut assurance qui ne se répondent pas parfaitement.

Les constructeurs se retrouvent en effet confrontés à l'article 1792 du Code Civil qui indique qu'il y a une responsabilité de plein droit du constructeur vis-à-vis du maître de l'ouvrage. En parallèle, l'article L. 243-1-1 du Code des Assurances exclut du champ des garanties obligatoires les éoliennes puisqu'il s'agit d'ouvrages de production et de distribution d'électricité.

Cela signifie qu'il n'y a pas d'obligation de souscrire une police de Dommage Ouvrage ou une police de Responsabilité Civile Décennale pour les constructeurs de ce type d'ouvrage. Ainsi, les constructeurs d'éoliennes endossent une responsabilité sans être obligés de s'assurer pour ladite responsabilité. Cette situation est

en opposition au contexte juridique d'autres secteurs, comme celui du bâtiment où les constructeurs et le maître d'ouvrage doivent être obligatoirement assurés.

Il n'en reste pas moins que le risque est assez important : le constructeur se retrouve face à une responsabilité pouvant engager des enjeux financiers importants en cas de désordre de nature décennale qui lui est imputable. Comme déjà indiqué, les risques associés à un désordre de nature décennale sont souvent liés à des problèmes de stabilité et de solidité des éoliennes. Nous pouvons donc imaginer que ces dommages impliquent des réparations assez lourdes et assez coûteuses et qu'ils aient des effets de répétition sur plusieurs éoliennes, voire l'ensemble d'un parc. Il est vrai qu'un problème observé sur une éolienne peut se propager à d'autres éoliennes du parc, voire à l'ensemble du parc.

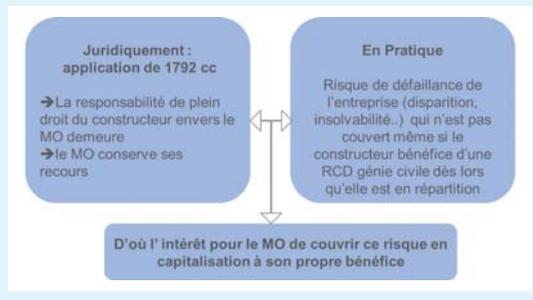
Si le constructeur engagé dans cette responsabilité n'est pas assuré, il va se retrouver face à un enjeu important et à des difficultés financières considérables. Le constructeur aura ainsi intérêt à transférer ce risque en souscrivant une assurance de Responsabilité Civile Décennale Génie Civil, une assurance qui n'est pas obligatoire.

Cette assurance lui permettra de bénéficier d'une couverture d'assurance et donc d'un transfert du risque financier, mais aussi d'un véritable avantage commercial : en effet, les maîtres d'ouvrage sont très sensibles à cet aspect et exigent très souvent contractuellement que le constructeur puisse justifier d'une assurance de Responsabilité Civile Décennale Génie Civil.

La réponse en matière d'assurance disponible pour les constructeurs de parcs éoliens terrestres est la Responsabilité Civile Décennale Génie Civil : cette police d'assurance couvre la responsabilité des constructeurs découlant de l'article 1792 du code Civil au titre de prestations réalisées sur un ouvrage non soumis à l'obligation d'assurance. Cette garantie s'achète le plus souvent en répartition et doit à ce titre être payée chaque année ; exceptionnellement elle peut être délivrée en capitalisation, ce qui est préférable pour le constructeur et pour le maître d'ouvrage.

L'assurance Responsabilité Civile Décennale Génie Civil est souvent limitée en montant maximum de chantier ou en montant de garantie. Les garanties étant facultatives, elles peuvent être renégociées en fonction des besoins du constructeur et des contraintes ou bien des demandes des assureurs.

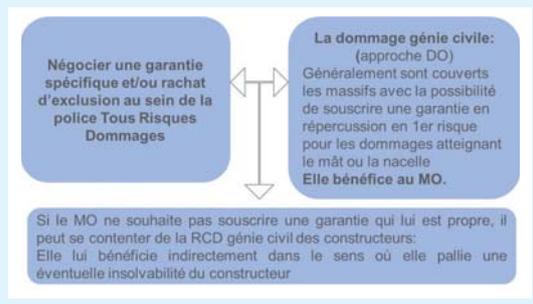
Risque côté Maître d'Ouvrage



Là aussi, on retrouve l'article 1792 du Code Civil qui instaure la responsabilité de plein droit des constructeurs envers le maître d'ouvrage. Cela signifie que contractuellement et juridiquement le maître d'ouvrage conserve tous ses recours juridiques envers le constructeur. En pratique cet article qui est d'ordre public et très protecteur ne couvre pas le risque de défaillance de l'entreprise ou son éventuelle insolvabilité. En cas de disparition de l'entreprise et en l'absence d'assurance ou de garantie bancaire, il n'y a aucune garantie pour le maître d'ouvrage.

Comme nous l'avons vu, le maître d'ouvrage a un grand intérêt à couvrir le risque décennal en capitalisation et à son propre bénéfice. La couverture de risque n'est cependant pas toujours évidente dans la mesure où il y a plusieurs réponses en matière d'assurance qui sont proposées au maître d'ouvrage.

Réponses assurance proposées au maître d'ouvrage



Parmi les trois options d'assurance, une seule répond à la problématique de capitalisation : l'assurance Dommage Génie Civil. Il s'agit d'une approche Dommage Ouvrage (DO) qui couvre les massifs des éoliennes. Les risques de défauts de stabilité et/ou solidité des éoliennes ont leur origine dans les massifs.

Généralement l'impropriété à destination n'est pas garantie : cela signifie qu'en cas de problème de stabilité sans dommage matériel, le risque n'est pas couvert. Dans le cas où un dommage matériel génère un problème de stabilité ou de solidité, les risques sont alors couverts. D'autres extensions peuvent d'ailleurs permettre de couvrir un risque de répercussion en premier risque, répercussion qui pourrait atteindre le mât, voire la nacelle.

La police Dommage Génie Civil bénéficie donc au maître d'ouvrage et peut inclure un abandon de recours contre tous les tiers intervenants dans le développement d'un parc éolien. Dans ce cas, elle dispense les constructeurs d'avoir leur propre assurance RC Génie Civil. La police dommage Génie Civil est généralement sans recours. Dans le cas contraire, il faut demander une assurance RC Décennale aux intervenants afin que l'assureur Dommage Génie Civil du maître d'ouvrage bénéficie d'un recours contre l'assureur des intervenants et pas uniquement contre les intervenants seuls.

L'une des autres solutions qui peut s'offrir au maître d'ouvrage est de négocier une garantie spécifique ou un rachat de l'exclusion au sein de la police Tous Risques Dommage, ou Bris de machines. Ainsi si le maître d'ouvrage ne souhaite pas souscrire une DO Génie Civil, il pourrait négocier ces garanties spécifiques de rachat en fonction des besoins et des retours d'expérience sur sinistre. Ces garanties restent cependant des garanties en répartition puisqu'elles sont négociées sur une base annuelle, voire parfois bisannuelle. Le risque associé au non-paiement de la prime est faible puisque le maître d'ouvrage est responsable de ces polices.

Une troisième solution assurantielle à destination des maîtres d'ouvrage est d'imposer contractuellement la RC Génie Civil au constructeur. Celle-ci peut en effet palier une insolvabilité si le constructeur a bien payé la prime l'année de son intervention.

Perspectives du marché de l'assurance des éoliennes terrestres

Le marché de l'éolien est assez récent et représente de larges opportunités pour les assureurs. À ce jour, les garanties associées aux risques éoliens sont peu souscrites par les assureurs et il semble que ce marché est voué à se développer compte tenu des besoins des clients, notamment en financement de projet. Les acteurs financiers regardent en effet de très près tous les risques ainsi que toutes les garanties qui sont proposées pour couvrir ces risques, et notamment les assurances qui font objet de procédures de *due diligence* ou d'audit. Les acteurs financiers sont aussi vigilants sur les moyens de couverture de risque et sur les possibilités d'assurance associés. Ces garanties présentent également un atout dans le cadre de cession de parcs puisque les acquéreurs ont les mêmes attentes que les banques en matière de couverture de risques.

Les attentes des clients sur les offres d'assurance

Il est souhaitable que le marché de l'assurance s'approprie de plus en plus ce risque et que le marché devienne plus concurrentiel, plus ouvert et plus mature. La couverture de ce type de risque est un véritable enjeu pour l'avenir : le risque étant très technique, les souscriptions sont trop limitées et les retours sur sinistre peu nombreux. Le développement de ce marché améliorera l'expérience, la maîtrise du risque et l'expertise des souscripteurs, ce qui permettra de créer une dynamique avec un nombre d'acteurs plus important. Ce point est d'autant plus important qu'il s'agit d'un domaine où tout est négociable ; avoir le choix parmi les acteurs est essentiel pour le client. Cela lui permettra notamment d'avoir plus de facilités pour négocier des garanties qui soient parfaitement adaptées à ses besoins propres. C'est aussi l'un des avantages de ces polices d'assurance : elles peuvent être modulées en fonction des besoins ou des attentes des acteurs financiers.

Un autre point mérite d'être mentionné : les aspects techniques. Nous noterons que pour les assurances Dommages Génie Civil, les assureurs demandent des dossiers techniques très complets qui peuvent inclure la validation du choix du bureau d'étude, la vérification des structures, le choix des fondations, des contrôles techniques et des études de sol. La DO Génie Civil est à cet égard comparable à la DO obligatoire, permettant à l'assureur de mieux maîtriser le risque, aux sociétés de développement de progresser par une meilleure connaissance et une plus grande expertise. Les relations société de développement/assureur DO Génie Civil doivent s'inscrire dans un véritable partenariat permettant de progresser pour éviter une sinistralité trop importante.



GÉOTECHNIQUE ET INGÉNIERIE ÉOLIENNE

GILLES BOURNE

*Responsable des Services Éoliens
Alios Ingénierie*

Avant de présenter l'aspect géotechnique de l'installation des éoliennes, voici quelques mots sur Alios Ingénierie : il s'agit d'un bureau d'études géotechniques créé en 1995 qui emploie actuellement 70 personnes, ingénieurs, techniciens et équipes de forage. Notre activité consiste à collecter des données géotechniques, les exploiter et en vérifier la qualité, un aspect essentiel pour l'ingénierie éolienne.

Alios Ingénierie intervient dans le secteur éolien depuis 2003, soit quasiment depuis les débuts de l'éolien industriel en France. Nous avons participé à l'étude d'environ 250 parcs, ce qui représente 2 000 fondations d'éoliennes en France, au Maroc, en Pologne, en Turquie et en Belgique.

Nous allons maintenant aborder le cœur du sujet : les spécificités du risque du sol lié aux éoliennes.

Tout d'abord, il est essentiel de souligner que contrairement à beaucoup d'ouvrages, les éoliennes sont des ouvrages très élancés reposant sur un appui unique : cela signifie que la moindre erreur peut avoir des conséquences considérables dès lors que la stabilité d'un ouvrage de plusieurs millions d'euros est impactée.

Avant de traiter le volet purement technique, nous aborderons l'aspect réglementaire, présenterons ensuite les documents utilisés dans le cadre de l'ingénierie géotechnique pour les éoliennes et enfin, nous analyserons le déroulement des études géotechniques et les points susceptibles d'être source de risque qui doivent être analysés avec attention. Il s'agit là d'un risque financier au sens où une mauvaise évaluation du

sol et de ses caractéristiques implique un risque pour la stabilité de l'ouvrage et peut conduire à des arrêts de chantier, et dans certains cas extrêmes, à un arrêt de la production de l'éolienne.

Les fondations d'éoliennes sont assez particulières dans le sens où elles ont des dimensions inhabituelles. Ce sont des massifs de 15 à 20, voire 22 ou 24 mètres de diamètre, et les documents techniques existants ne sont pas forcément applicables à ce type de fondation. Il s'agit en particulier du Fascicule 62, titre V qui avait été édité par le Ministère du Logement et des Transports et qui est surtout adapté aux ouvrages de génie civil. Il existe également les Eurocodes Calcul géotechnique – Norme NF EN 1997-1 qui ne sont actuellement pas appliqués dans l'éolien en France.

Les règles du Fascicule 62 étant parfois inadaptées à une fondation de ces dimensions, le Comité Français de Mécanique des Sols (CFMS) a créé un groupe de travail afin de compléter et d'adapter ces règles de calcul aux fondations de dimensions non courantes et à leur aspect vibratoire, puisque certaines de ces fondations sont soumises à des efforts cycliques et donc à des vibrations. Avant de revenir sur ces recommandations du CFMS, nous aborderons la norme NF P 94-500 de décembre 2006 qui présente et définit l'enchaînement des missions géotechniques en fonction de l'avancement du projet. Il est nécessaire de mentionner que cette norme va probablement changer très rapidement. L'une des évolutions principales est que la mission G12 en particulier risque de disparaître au profit des missions G2, l'objectif étant de faire correspondre cette norme à la Loi n° 85-704 du 12 juillet 1985 relative à la maîtrise d'ouvrage publique (MOP), ce qui n'est pas le cas actuellement.

Norme NF P 94.500

Enchaînement des missions		Investigations géotechniques
G11 : études géotechniques préliminaires Principes généraux d'adaptation du projet au site		Sommaires
G12 : études géotechniques d'avant-projet Systèmes de fondations envisageables – paramètres géotechniques nécessaires au dimensionnement des fondations.		Selon recommandations du CFMS
G2 : étude géotechnique de projet Phase projet : notes techniques et procédures d'exécution Phase assistance contrat de travaux : DCE, BP, assistance		Si nécessaire
G3 : étude et suivi géotechnique d'exécution (à la charge de l'entrepreneur) Phase étude : dimensionnement, méthodes et conditions d'exécution, procédure de contrôles Phase suivi : exécution des travaux, vérification des données géotechniques, dossier de fin de travaux	G4 : supervision géotechnique d'exécution (à la charge du maître d'ouvrage) Phase étude : avis sur l'étude d'exécution, sur les adaptations et optimisation de l'entrepreneur Phase suivi : interventions ponctuelles, avis sur le contexte géotechnique tel qu'observé	Si nécessaire
G5 : diagnostic géotechnique		Au cas par cas

La norme NF P 94-500 définit des missions différentes selon les stades d'avancement du projet. Les missions de type G11 représentent les études géotechniques préliminaires de site qui sont très en amont du projet. Elles sont généralement basées sur une reconnaissance de sol très sommaire, voire inexistante. Il peut s'agir d'une recherche documentaire pour indiquer le type de sol qu'un maître d'ouvrage est susceptible de rencontrer sur son site et les risques éventuels. Les missions de type G11 sont demandées dans le cadre d'acquisition de projet, lorsque peu d'études techniques ont été faites, voire aucune. Cela peut être le cas lorsque l'acquéreur d'un projet souhaiterait avoir une idée d'investissement au niveau du génie civil et s'informer sur les risques liés à la géologie du site.

Au moment de l'estimation du financement de projets éoliens, il s'agit de procéder aux études géotechniques d'avant-projet et aux études géotechniques de projet (missions G12 et G2). Ces études sont basées sur des reconnaissances de sol adaptées à l'ouvrage qui va être construit ainsi qu'à la géologie des sites. Le CFMS a fait des recommandations sur le contenu minimal de ces reconnaissances, qui doivent être adaptées par le géotechnicien aux spécificités et aux risques de chaque site. Ces recommandations sont applicables à des sites réputés sans anomalies géotechniques.

Ces études aboutissent à la définition d'un modèle de sol qui permettra au bureau d'études structure de faire un dimensionnement du massif de fondation d'éolienne et ainsi un chiffrage pour le financement de l'aspect génie civil.

L'étape de l'exécution construction requiert que les études d'exécution G3 et G4 soient réalisées simultanément. La G3 est à la charge des entreprises de construction qui doivent justifier leurs ouvrages géotechniques par des notes de calcul, des procédures d'exécution et des plans d'assurance qualité. Il est fortement conseillé au maître d'ouvrage de continuer à travailler avec le géotechnicien en mission G4, en supervision géotechnique afin de vérifier les documents des entreprises et leur cohérence afin que le chantier se déroule normalement et éventuellement adapter certaines dispositions selon les éléments susceptibles d'apparaître pendant le chantier. Il n'est pas nécessaire de s'attarder sur les missions G5 qui relèvent du diagnostic géotechnique et qui ne sont pas réellement nécessaires en l'absence de sinistre géotechnique sur des fondations d'éolienne.

Investigations géotechniques selon les recommandations du CFMS

Nombre d'éoliennes par groupe	Nombre minimal et nature des sondages		
	Carottages + prélèvements d'échantillons	Piézomètres	Mesures géophysiques au moins de V_2
1 à 6	1	1 pour 2 éoliennes	1
7 à 12	2	5	1
13 à 18	3	6	2
À partir	4 + 1 par «tranche» de 6	7 + 1 par «tranche» de 6	2 + 1 par «tranche» de 20

Pour les reconnaissances de sol à effectuer au moment des études géotechniques, certains bureaux d'études faisaient des sondages à 7 ou 8 mètres de profondeur pour des fondations qui nécessitent des sondages à 20 ou 25 mètres, ce qui équivaut à une reconnaissance quasiment inexistante. Le Comité Français de Mécanique des Sols a donc défini des règles d'investigations afin de standardiser la procédure. Ces règles se traduisent sous deux approches :

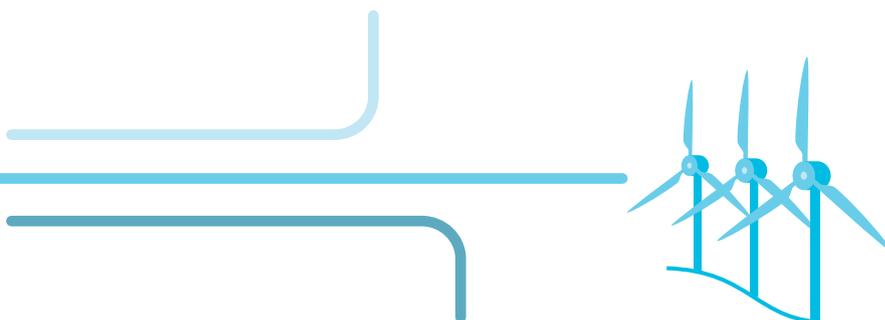
- l'une d'entre elles est une approche globale d'un parc où un certain nombre de groupes d'éoliennes doit être défini ; un groupe d'éoliennes est constitué d'éoliennes présentant des situations géologiques homogènes. Cette approche permet de déterminer un premier programme de sondages à réaliser pour un parc.
- Ensuite, chaque éolienne doit être étudiée en raison de la présence d'un appui unique déjà évoqué qui nécessite des reconnaissances de sol sous chacune des éoliennes.

Cette procédure s'applique aux sites sans anomalies avec un minimum de 4 sondages pour chaque éolienne, dont un qui permette de mesurer les caractéristiques

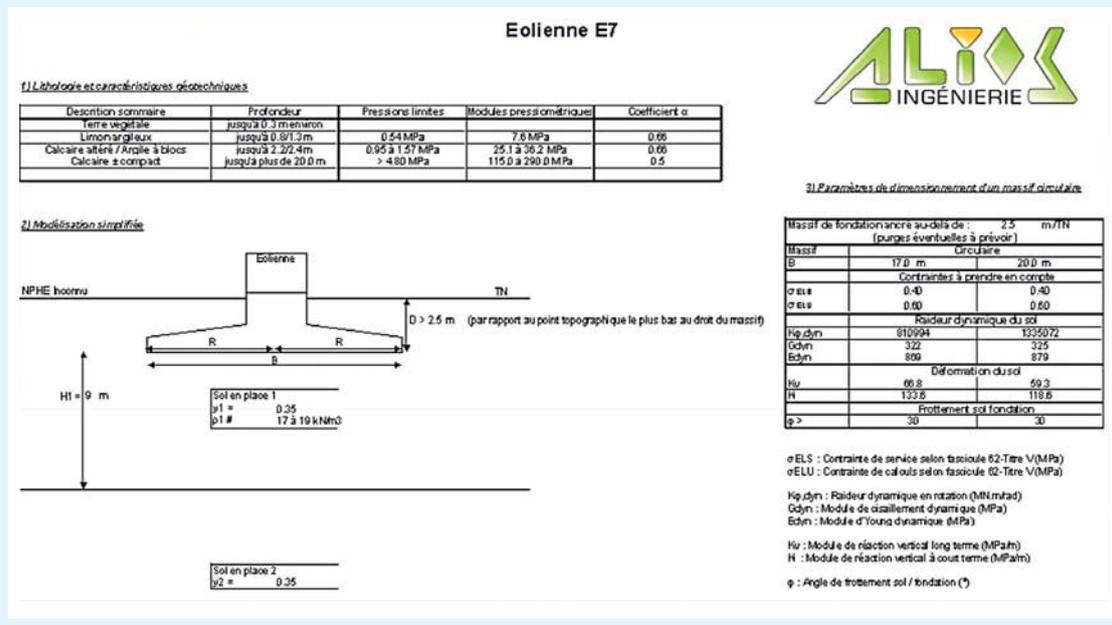
géotechniques du sol. Ce point est important car parmi les différents types de sondage existants, assez peu sont reconnus pour faire du dimensionnement, en particulier dans les règles de calculs utilisées actuellement en France. Dans les reconnaissances pour des fondations d'éolienne, le minimum est d'effectuer un sondage au pressiomètre ou un sondage au pénétromètre statique plus trois autres sondages qui permettent de vérifier l'homogénéité du sol.

En termes de profondeur, l'investigation doit descendre à une profondeur équivalente à 1,5 fois le diamètre de la fondation, sauf si les terrains s'avèrent être de caractéristiques suffisantes, c'est-à-dire être très peu déformables et incompressibles, formant un substratum rocheux, auquel cas la reconnaissance du sol peut être limitée à environ 1 diamètre sous la base de la fondation.

Les sondages et les études géotechniques doivent permettre d'aboutir à un modèle géotechnique qui constituera la base pour le dimensionnement des fondations. Le schéma ci-après présente un exemple très simple de modèle géotechnique comme c'est le cas pour un substratum rocheux très proche de la surface.



Modèle géotechnique simplifié



Ce modèle géotechnique doit en premier lieu définir un niveau d'assise pour la fondation : ce point va conditionner la nécessité d'avoir des dispositions spéciales, telles que des substitutions de sol pour récupérer le niveau du bon sol, ou des améliorations de sol ou des fondations profondes si le bon sol est trop profond.

Il convient de prendre également en compte les contraintes des constructeurs d'éoliennes, avec des encastremements de fondations limités à 2.5 ou 3 mètres de profondeur.

Ce modèle de sol va contenir également tous les paramètres géotechniques nécessaires au dimensionnement, à savoir les contraintes admissibles par le sol qui sont définies sur la base des essais réalisés. Tout ce qui concerne la déformation du sol – également dénommée module de réaction du sol - n'est pas une caractéristique intrinsèque du sol, mais est plutôt lié à la géométrie de la fondation. Ces caractéristiques peuvent être accompagnées d'une dimension de fondation.

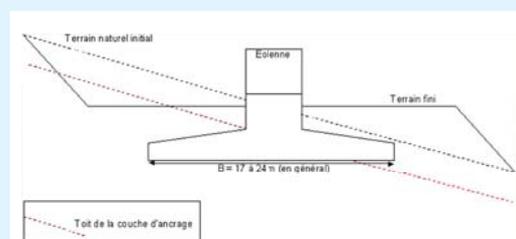
Par contre, au stade du dimensionnement de la fondation, il est important d'avoir une collaboration étroite entre le géotechnicien et le bureau d'études structure en charge du dimensionnement car les dimensions et donc les paramètres peuvent varier.

Des itérations sont nécessaires pour s'assurer que les paramètres donnés à la base sont ajustés à la fondation qui va réellement être réalisée.

Parmi les paramètres importants, il convient de citer les modules dynamiques tels que le module de cisaillement ou le module de Young qui vont permettre de définir la raideur en rotation dynamique. L'éolienne étant une machine vibrante, il s'agit de vérifier que le massif de fondation permet de dépasser la valeur définie par le constructeur afin d'éviter les phénomènes de résonance de l'ensemble de l'ouvrage et du sol d'assise.

Contrairement à tout autre type d'étude géotechnique, cette approche est une particularité de l'éolien et peut avoir des conséquences sur le dimensionnement. Elle nécessite de l'expérience car il ne s'agit pas d'un paramètre intrinsèque du sol mais d'un élément lié à chaque machine et donc au domaine de distorsion qui doit être analysé au cas par cas.

Fondation d'éolienne avec prise en compte de la topographie



L'illustration ci-dessus montre une autre particularité de ces fondations : leur dimension hors norme. Il s'agit donc actuellement de diamètres de l'ordre de 17 à 24 mètres en fonction de la présence d'eau ou non. Dans les contextes topographiques pentus, on observe une grande variabilité de l'encastrement entre le côté amont et le côté aval compte tenu du diamètre de la fondation. C'est une donnée extrêmement importante à prendre en compte afin d'éviter des surcoûts imprévus lors de la phase d'exécution. En présence d'un sol meuble à l'aval et d'un sol rocheux à l'amont, sachant que la fondation n'est pas faite pour fonctionner sur un sol hétérogène, il s'avère nécessaire de faire des purges et des substitutions par du gros béton, qui sont à la fois volumineuses et coûteuses pour le maître d'ouvrage.

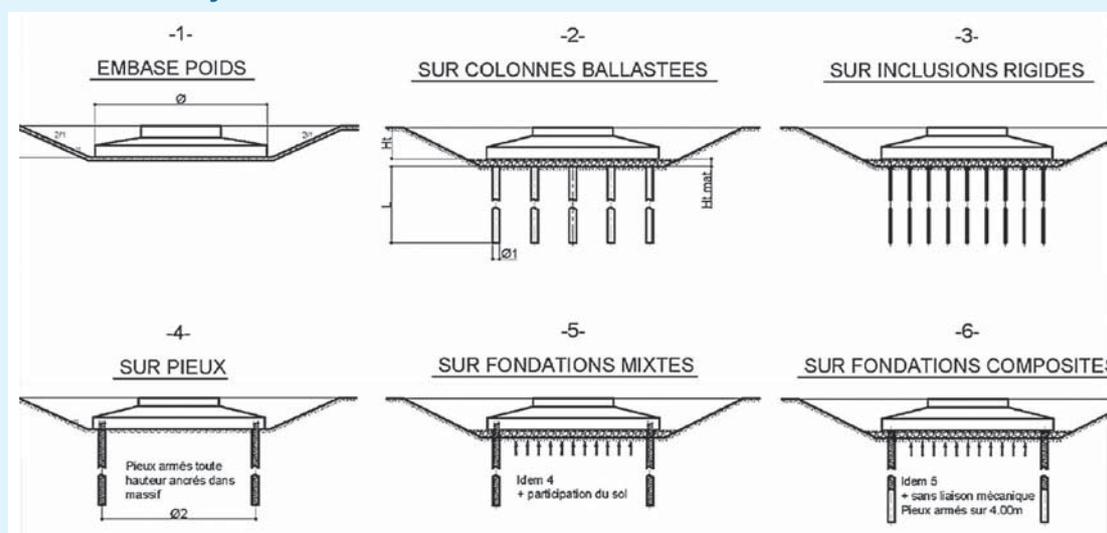
Ces différents éléments démontrent la nécessité de faire plusieurs sondages pour pouvoir dessiner des profils de sol et connaître le niveau d'assise optimum pour minimiser ces substitutions, voire anticiper la nécessité de faire des renforcements de sol sur une partie ou la totalité de la surface de la fondation.

Une fois le modèle géotechnique défini sur la base des investigations, il faut choisir le système de fondation le mieux adapté aux conditions de sol. Le système de fondation prisé par le maître d'ouvrage est l'embase-poids, un simple massif béton armé qui va être posé sur le sol et qui va fonctionner par son propre poids ; c'est donc son poids qui va créer de l'équilibre par rapport au renversement du moment que les caractéristiques du sol sont suffisantes au niveau de cette fondation.

Dans le cas contraire, il est possible d'adapter le sol par des substitutions : par exemple, surcreuser pour atteindre le bon sol et mettre en œuvre du matériau concassé et compacté qui fera office de matelas de répartition et qui permettra de reporter les charges jusqu'au bon sol. Ce sont des pratiques utilisées quand le niveau du bon sol atteint jusqu'à 1,50 mètre environ sous le niveau d'assise maximal de la fondation. Cependant, cela représente des contraintes tant au niveau économique que technique. Il existe d'autres systèmes de fondation tels que les colonnes ballastées, les inclusions rigides ou les fondations sur pieux. Ces dernières sont assez peu utilisées notamment en sites hétérogènes où le dimensionnement devient difficile par rapport à des transferts de charge entre des pieux très encastrés et des pieux moins encastrés (pieux de différentes longueurs).

Les systèmes de fondations mixtes ou fondations composites qui combinent le fonctionnement du massif classique et du renforcement de sol sont également peu développés. Le système le plus courant est l'embase-poids si le sol le permet, l'embase-poids sur substitution si la profondeur du bon sol n'est pas loin et finalement les inclusions rigides de type CMC, CMM ou autre procédé équivalent.

Les différents systèmes de fondation d'éoliennes



Le choix du système de fondation est totalement guidé par le sol sur la base de 5 critères :

- Homogénéité du sol
- Rupture du sol
- Déformation du sol
- Rotation du massif
- Critère dynamique

Il est primordial d'avoir un sol homogène afin de garantir une réaction homogène par rapport à l'ouvrage ; si tel n'est pas le cas, il conviendra de recourir à des procédés de substitution ou de renforcement de sol. En l'absence de l'un des 5 critères, des solutions devront être trouvées pour assurer la stabilité de la fondation.

Il s'agit d'évoquer maintenant un paramètre extrêmement important : l'eau. Il est généralement demandé au géotechnicien qui n'est pas toujours compétent en hydrogéologie de donner des conclusions par rapport au niveau d'eau. Pourquoi cette question sur l'eau ? On est en présence d'une fondation soumise à des efforts de renversement (moment et force horizontale) ; si elle est dans l'eau, elle est déjaugée, c'est-à-dire qu'elle subit des poussées d'Archimède, affichant donc un poids utile finalement beaucoup moins important : ce point doit être pris en compte dans le dimensionnement et est souvent le paramètre dimensionnant de la fondation.

Le problème de l'eau n'est pas des plus simples. La question est de savoir si le risque d'avoir de l'eau à proximité de la fondation est présent : la fondation va-t-elle être baignée dans l'eau, faut-il prendre en compte les poussées d'Archimède pour le dimensionnement ?

Dans certains cas, les actions se limitent à utiliser un piézomètre pour mesurer la pression de l'eau, ce qui se révèle insuffisant. La problématique de l'eau s'avère beaucoup plus complexe et se décline sur 3 niveaux :

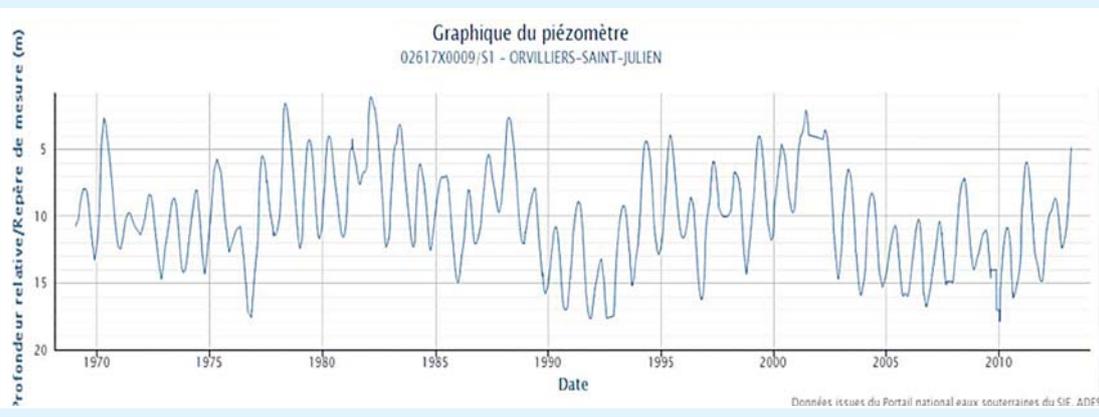
- Niveau des Plus Hautes Eaux (NPHE) / Piézométrie de la nappe
- Nappe perchée
- Retard d'infiltration dans les fouilles

En ce qui concerne la piézométrie, se contenter de mettre en place un piézomètre sur un site et le suivre même pendant une année est inutile, voire extrêmement dangereux. À titre d'illustration, prenons les résultats d'un piézomètre se situant dans l'Aude et qui est suivi depuis 44 ans. Il reflète les variations des niveaux d'eau au fil des années et des saisons et montre deux types de variations :

- Les variations saisonnières sont représentées par des multitudes de petites courbes changeant de niveau chaque année.
- Les variations interannuelles de la nappe sont représentées par une grande sinusoïde avec un retour de 10 à 15 ans.

Cette chronique piézométrique démontre que les plus hautes eaux connues sur ce site étaient en 1982. Installer un piézomètre et en suivre les enregistrements pendant 1 an, de 2009 à 2010 par exemple, ne permet pas de détecter le niveau des plus hautes eaux sur ce site.

Résultats du piézomètre Orvilliers Saint Julien – suivi de 44 ans

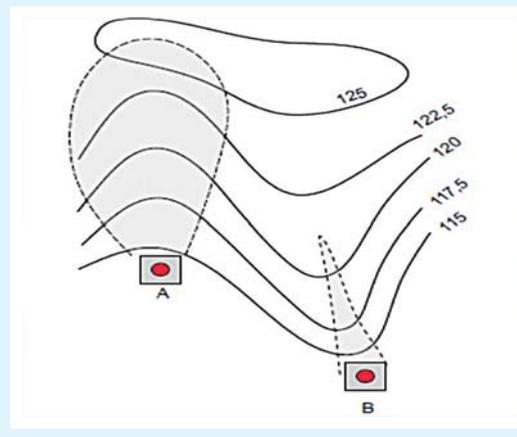


Il s'avère ainsi que l'étude hydrogéologique qui aboutit à la définition du niveau des plus hautes eaux à prendre en compte pour le dimensionnement doit impérativement passer par une recherche documentaire. Le seul moyen d'estimer le niveau des plus hautes eaux connues est de vérifier la corrélation de piézomètres suivis sur une longue durée avec les mouvements de la nappe observée sur le site. Le niveau des plus hautes eaux exceptionnelles, en revanche, ne sera jamais connu et représentera toujours un risque qu'il sera possible d'évaluer à partir de chroniques piézométriques de 15, 20, 30 ans - les chroniques de 40 ans étant en général très rares.

Les phénomènes de nappes perchées sont liés à des particularités géologiques entraînant un contraste de perméabilité entre les sols superficiels et les sols plus imperméables qui sont en dessous. Au moment d'épisodes pluvieux importants, il est possible d'observer une saturation temporaire des sols superficiels appelée nappe perchée. Ces nappes ne peuvent pas être suivies ni exploitées et sont donc très peu connues. Leur qualification passe par un relevé géologique du site, un relevé des niveaux de sources éventuelles et une enquête auprès des exploitants qui connaissent bien leurs terres et qui peuvent connaître l'existence de sources qui ne sont pas pérennes. Les nappes perchées sont très difficiles à caractériser : à partir du moment où on suspecte une configuration de sol susceptible de présenter ce phénomène, il devient nécessaire de prendre en compte l'eau jusqu'au terrain naturel puisqu'on ne sait pas définir un niveau des plus hautes eaux de cette nappe perchée.

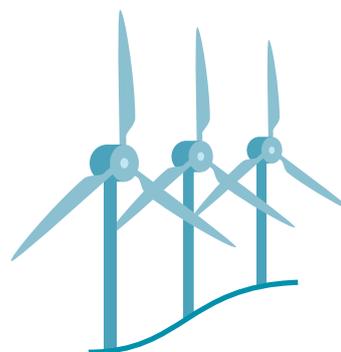
La troisième problématique liée aux techniques de construction est le retard d'infiltration. Afin de réaliser une fondation d'éolienne, il est nécessaire de faire une fouille, puis de couler un béton de propreté afin de créer une certaine étanchéité au niveau de fond de fouille. Dans le cas d'un terrain à perméabilité moyenne ou faible, il peut y avoir un contraste de perméabilité : lors du remblayage de la fouille, les terrains utilisés sont les terrains du site remanié qui risquent donc d'être plus perméables que le terrain encaissant ; en fonction des précipitations et du ruissellement, les conditions d'une nappe perchée naturelle sont créées. C'est un risque important à étudier dans des cas de terrains à faible perméabilité, risque qui est encore plus grand quand un impluvium amont concentre les eaux vers la fouille.

Retard d'infiltration



Ces trois éléments – le niveau de la nappe générale, les nappes perchées et le retard d'infiltration - sont extrêmement importants à étudier pour assurer la stabilité de l'ouvrage. À supposer que ces éléments ne soient pas indiqués, l'eau doit impérativement être prise en compte jusqu'au terrain naturel.

La dernière partie va être l'occasion de présenter quelques exemples de fouille rencontrés sur différents chantiers pour illustrer les inconnues par rapport aux reconnaissances de sol. Les sols du nord de la France constituent un contexte géologique constant formé de limons, d'argiles à silex et de craies. Les craies étant solubles dans l'eau, des phénomènes de dissolutions s'ensuivent, communément nommées karstifications.



L'exemple présenté ci-dessous (cf. photos 1 et 2) montre des poches d'argile en comblement de vide dans la craie qui n'avaient pas été détectées par les sondages. La craie avait été identifiée à une faible profondeur et à l'ouverture de la fouille, une multitude de ces petites poches d'argile est apparue. Ces caractéristiques sont jugées très insuffisantes pour une fondation d'éoliennes et il a donc fallu purger pour pouvoir construire avec des remplissages en gros béton qui n'étaient pas prévus. Dans certains cas extrêmes, cette situation impliquerait le changement du système de fondation.

Un second exemple montre des fouilles dans du calcaire, roche qui est aussi soumise à la karstification. À l'ouverture des fouilles, des failles importantes ont été mises en évidence, ce qui a nécessité des sondages complémentaires pendant le suivi d'exécution (mission G4). Ces sondages ont montré une énorme karstification du massif, notamment des cavités sous les futures fondations qui ont nécessité des travaux d'injection pour combler le massif calcaire.

Fouilles dans la craie



Fouille dans le calcaire (vue d'ensemble)



Viennent ensuite des problèmes liés à l'exécution des travaux : la photo de gauche présente en gros plan un fond de fouille avec une trace de pas, ce qui signifie que le fond de fouille n'est pas compact. La photo de droite a été prise après le passage du géotechnicien, montrant que le sol est calcaire, donc rocheux. L'entreprise de terrassement contactée ayant l'habitude de livrer des surfaces planes, ou billards, avait réétalé les déblais sur la surface du fond de fouille, ce qui a créé une couche de terrain complètement remaniée de 20 à 50 centimètres et de portance extrêmement faible. Il faut savoir que sur la vue d'ensemble de la fouille dans le calcaire, il s'agit de vraie roche : dans ce cas, avec un fond de fouille qui est en escalier, où il va y avoir des surépaisseurs de béton de propreté, la stabilité de l'éolienne positionnée au-dessus est assurée, ce qui n'est pas le cas lorsque les déblais sont étalés en fond de fouille (pour obtenir une surface plane) car ils constituent une couche molle intercalée entre la fondation et l'assise rocheuse.

Problèmes d'exécution



Il est important de mentionner que dans la plupart des cas, les sols sont sensibles à l'eau et aux variations hydriques, d'où la nécessité de protéger les fouilles par un béton de propreté après leur ouverture et de ne pas les laisser sans protection tant à la pluie qu'au soleil. Les sols sensibles aux variations hydriques (humidification ou dessiccation) doivent être protégés afin de préserver leurs caractéristiques mécaniques.

Dans le premier cas (cf. image ci-dessous), l'argile a subi des phénomènes de dessiccation, ce qui a nécessité de refaire une purge sur l'ensemble du fond de fouille pour retrouver un état correct des terrains.

Phénomène de dessiccation

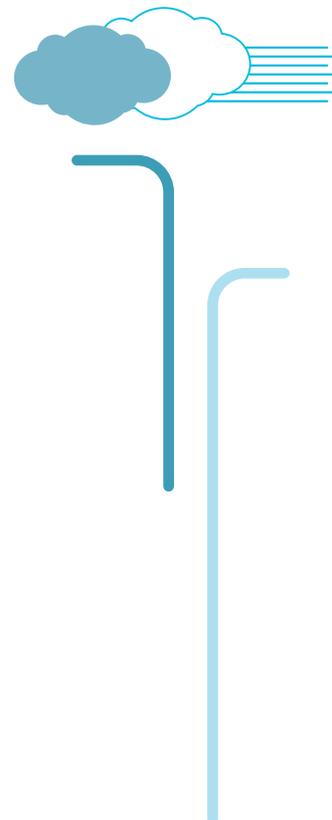


Le deuxième cas se situe dans le Pas-de-Calais : une fouille avait été pré-ouverte et laissée sans protection ; avec les pluies de printemps, elle s'était complètement remplie et a fini par se vider par le trou montré sur la photo. Ce trou avait été percé pour les sondages et avait été rebouché ; cependant avec la pression de l'eau et les différences de perméabilité, on a assisté à un débouffrage du forage dans la craie et l'eau s'est vidée par l'intermédiaire de ce trou.



Ce dernier exemple vient conclure la présentation de l'ensemble des problèmes résultant de la phase d'exécution.

Le dernier exemple représente une fouille qui a été exposée à la pluie après avoir été recompactée. Cela a créé une couche de sol fin qui, une fois gorgée d'eau, ne présente plus beaucoup de portance (cf. les traces de pelle à chenille) et qui a dû être purgée à nouveau.



4

DIMENSIONNEMENT DE FONDATIONS D'ÉOLIENNES

ALEXANDER MARTIN
Directeur - Ingénieur Associé
CTE Wind

CTE Wind est une société d'ingénierie spécialisée dans les fondations d'éoliennes et les systèmes photovoltaïques. C'est une société française également implantée au Brésil, en Allemagne, au Vietnam, en Pologne et depuis peu au Portugal. CTE Wind est spécialisée dans l'éolien depuis 10 ans sur la base d'un savoir-faire acquis en Allemagne et opère dans 20 pays.

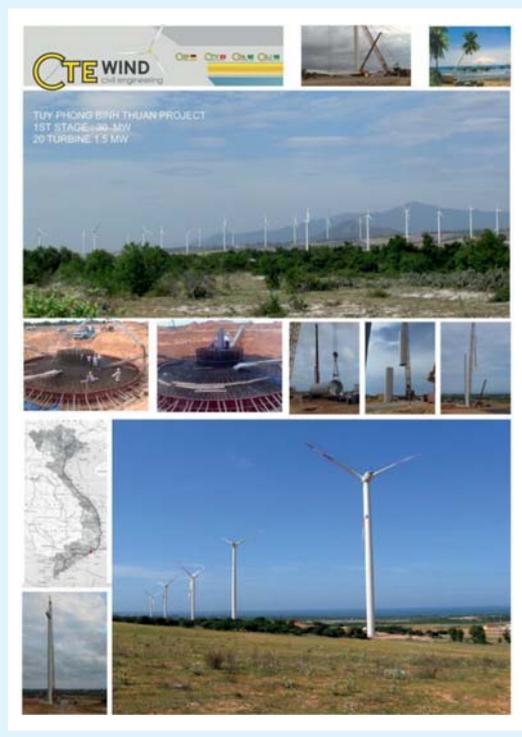
CTE Wind a conçu plus de 4 000 fondations depuis le début de son activité, sans litige enregistré sur l'une d'entre elles à ce jour !

Cette présentation sera principalement consacrée au dimensionnement des fondations d'éoliennes à l'aide de différents exemples. La première chose à prendre en compte lorsque nous parlons de la fondation d'une éolienne est sa conception. Celle-ci correspond au dimensionnement et intègre les charges des machines et des cages d'ancrage adaptées à chaque site. Pour chaque implantation, un rapport de sol est demandé ainsi qu'une estimation des coûts et des aspects de la sécurité.

En premier lieu, la forme de la fondation de l'éolienne est déterminée à partir des informations générales reçues du client et des données d'entrées techniques et géotechniques. Les dimensionnements sont effectués en fonction de ces informations et diffèrent selon le pays : En France, différentes normes locales sont utilisées pour la base des calculs, notamment les normes BAEL (béton armé aux états limites), le fascicule 62 qui édicte les règles appliquées aux fondations des ouvrages de génie civil et également les normes européennes Eurocodes. La norme IEC 61401 fixe les charges des machines et est utilisée en complément des précédentes ; il en va de même pour certaines recommandations étrangères comme les normes DNV dans les pays nordiques, les normes DBT et GL en Allemagne. Les recommandations du Comité Français de Mécanique des Sols (CFMS) indiquent la relation entre géotechnique et dimensionnement des fondations et l'Eurocode et le Model Code 1990 fournissent des informations sur les charges à la fatigue.

Les normes de calcul diffèrent selon les pays, l'illustration page suivante (cf. image 1) montre le chantier du premier parc éolien au Vietnam, où il a fallu s'adapter aux conditions locales en termes de géotechnique, de qualité des matériaux et de types de béton.

Image 1 : Premier parc éolien au Vietnam



Néanmoins, les données géotechniques restent les plus importantes à connaître avant de commencer un chantier. Pour ce faire, CTE Wind fournit une fiche type indiquant les caractéristiques nécessaires à renseigner, à savoir :

- Engagement sur les valeurs de sol,
- Indication du niveau d'eau – éventuellement à l'aide d'une étude hydrologique
- Suggestion du type de fondation et du niveau d'assise
- Mention du risque concernant les anomalies de sol (cavités karstiques, obus, sapes de guerre, marnières, etc.)

Les fondations les plus courantes sont les fondations superficielles octogonales, carrées ou rondes, même s'il existe également des fondations en forme de croix ou de poire. La semelle soutient le socle où viendra se placer la virole ou la cage d'ancrage où est logée la tour. Cela semble simple en apparence mais la présence d'un grand nombre d'éléments rend chaque fondation différente.

Le fabricant fournit également des spécifications relatives aux volumes minimaux et maximaux de l'éolienne dont la largeur est limitée par la taille de parcelle disponible.

Afin de proposer la solution la plus appropriée aux clients, des avant-projets sont préparés ; ce sont des coupes de fondations qui permettent de choisir les critères les mieux adaptés et les moins coûteux. Ces avant-projets permettent d'anticiper les améliorations de sol, les types de fondations, et la nécessité d'effectuer des études hydrologiques.

Le fabricant se doit de fournir les informations suivantes :

- les charges quasi-permanentes et extrêmes,
- les charges à la fatigue,
- les limites du tassement différentiel qui sont souvent de 3 millimètres par mètre,
- les facteurs de sécurité,
- le point d'application des charges,
- les critères de la rotation dynamique
- les plans de la virole ou de la cage d'ancrage ; il est important de connaître dès le début les mesures et formes des trous de virole pour éviter les mauvaises surprises pendant la conception.



La fiche technique des caractéristiques du sol montre une coupe qui donne une idée préalable aux géotechniciens sur les dimensions de la fondation. Il est impératif de fournir un certain nombre de valeurs par implantation de fondations d'éoliennes ; les reconnaissances de sol doivent en effet être effectuées pour l'ensemble des éoliennes. Dans certains pays comme le Maroc où le sol est très plat et le sable homogène, il peut être considéré superflu d'effectuer des sondages pour l'ensemble des machines, cela reste néanmoins inacceptable dans la majorité des projets.

La matrice suivante (cf. image 3) représente les différentes caractéristiques qui forment une fondation. Sur la partie horizontale se trouvent les données qui concernent le sol, et sur la partie verticale les différents éléments de la fondation. Cette matrice s'utilise pendant l'élaboration des formes de fondations d'éoliennes en choisissant les valeurs susceptibles de l'influencer : certaines valeurs engendrent des fondations plus ou moins larges ou plus ou moins épaisses, ces valeurs pouvant être éliminées ou fabriquées en fonction de la forme de fondation voulue.

Image 3 : Matrice pour fondation

<i>Geotechnical data</i>	<i>Fondation level deep/high</i>	<i>Water level</i>	<i>Charact. soil values</i>	<i>Embedment</i>	<i>Embankment</i>	<i>Agressivity</i>	<i>Slab form values</i>
<i>Part of the foundation</i>							
Pedestal height	x higher, reduced	x	x	x	possible	o	o
Pedestal width	o	o	o	x	possible	o	o
Slab thickness	x	x higher	x	x	possible	o	possible
Slab width	x	x	x	o	possible	o	x
Embankment	yes/no	yes/no	o	o	///////	o	o
Pedestal reinforcement	x	o	o	x	o	x	o
Slab reinforcement	x	x	x	o	possible	x	x
Concrete quality	o	possible	o	x	o	x	o

x = with impact / o = without impact

Maintenant évoquons rapidement des prototypes-découverte qui, en France, étaient surtout destinés aux Dom Tom. Ces prototypes peuvent être des bipales, des solutions de mâts pliables, des solutions hydrauliques ou des ascenseurs. Ces prototypes sont des projets à part parce qu'ils sont faits sous une approche itérative ; les systèmes d'ancrage sont souvent différents et les fonctionnements et les charges sont à valider. L'image 4 montre le prototype d'une fondation prévue pour l'offshore mais construite on-shore dans le sud de la France. Il est évident que le système de fondation peut parfois également être une fondation centrale. Dans cet exemple, la fondation centrale a été reliée aux trois fondations satellites (cf. images 5).

Image 4 : Prototype-découverte

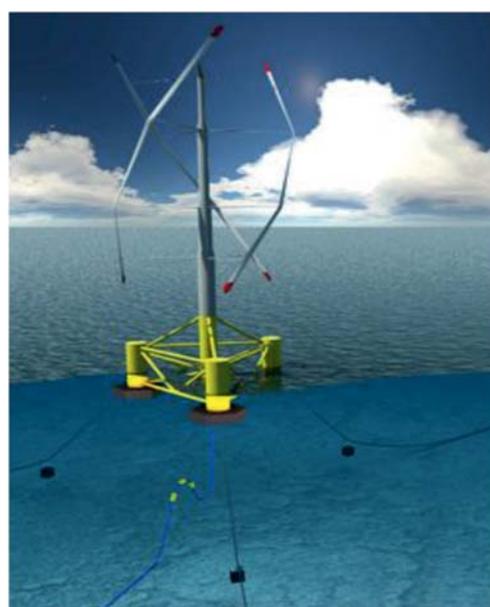
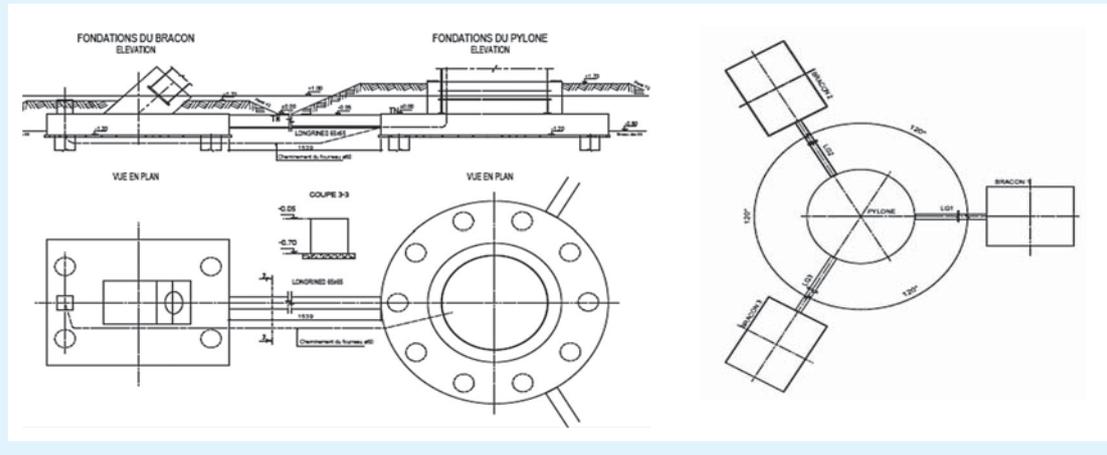


Image 5 : Optimisation de la fondation.



La partie suivante va présenter des exemples de chantiers qui ont présenté des difficultés. Les photos ci-dessous (cf. image 6) montrent une fondation qui a été très mal réalisée avec un béton de très mauvaise qualité. Deux fondations sur un même parc ont été complètement démolies et la cage d'ancrage n'était plus utilisable. Dans ce type de cas, CTE Wind intervient en effectuant des expertises pour déterminer l'origine du problème ; dans la plupart des cas, le problème survient dans la phase d'exécution mais peut aussi être d'ordre géotechnique ou provenir de la conception.

La photo 7 présente une exécution de pieux sur un chantier en Belgique. Le cercle bleu sur la photo met en exergue des barres d'armatures en attente entre lesquelles se trouvent des tubes métalliques ; ce sont des micropieux. Les armatures ont été ancrées trop profondément dans le sol à cause peut-être d'un forage excessif ou d'un mouvement autonome des armatures. Le pieu n'étant plus utilisable, il a fallu renforcer avec des pieux supplémentaires. Le travail de CTE Wind consiste à effectuer l'étude et à essayer de trouver une solution pour sauver la fondation. Dans ce cas particulier, le problème était une erreur de calcul, les pieux étaient complètement sortis du sol et l'armature était trop faible ; il était donc trop tard pour trouver une solution.

Image 6 : Problèmes pendant l'exécution



Image 7 : Exécution de pieux



Les photos suivantes présentent quelques exemples. La première image (image 8) montre une virole déjà installée avec des armatures inférieures finies. Les barres de la nappe supérieure doivent passer par les trous visibles entre les barres verticales, il est donc impératif de bien cibler. La difficulté qui se pose aujourd'hui est de placer des armatures de machines de 700 watts à 3 mégawatts, armatures qui sont beaucoup plus denses, sur les pièces d'installation – viroles ou cages d'ancrages – reçues par le fabricant.

Il est donc nécessaire de s'adapter aux chantiers : dans certains cas où le client est pressé il peut être suggéré de couler le béton – socle et semelle – d'un seul coup, ce qui peut impacter les armatures et d'autres éléments de construction.

Image 8 : Virole à armatures



Les tours en béton armé sont de plus en plus fréquentes : Au lieu de virole ou de cage, ce sont des barres d'armature en attente qui peuvent atteindre 5 mètres de hauteur qui reçoivent la tour en béton armé.

Image 9 : Barres d'armatures à la place de viroles



Un autre type de chantier est le chantier « near-shore » : ni terrestre ni offshore, il est sujet à des problèmes relatifs à l'eau. Le béton coulé peut être endommagé à cause des marées, ce qui signifie qu'il faut changer la manière de travailler dans ce type de chantiers.

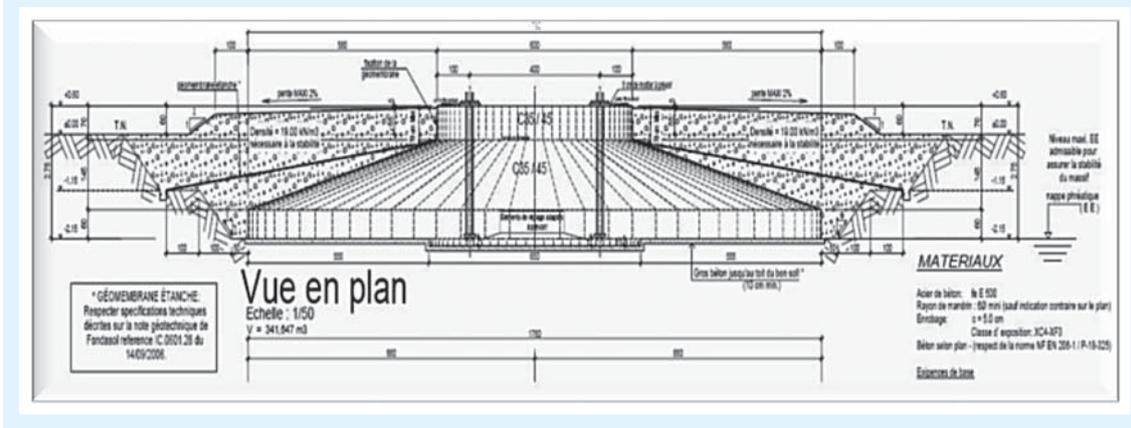
Image 10



Il existe aussi le problème de poussée d'eau mentionné précédemment par M. Bourne. La poussée d'eau signifie un soulèvement de la fondation dont le volume doit être augmenté de 25 % à 50 % pour pouvoir résister à cette poussée d'eau.

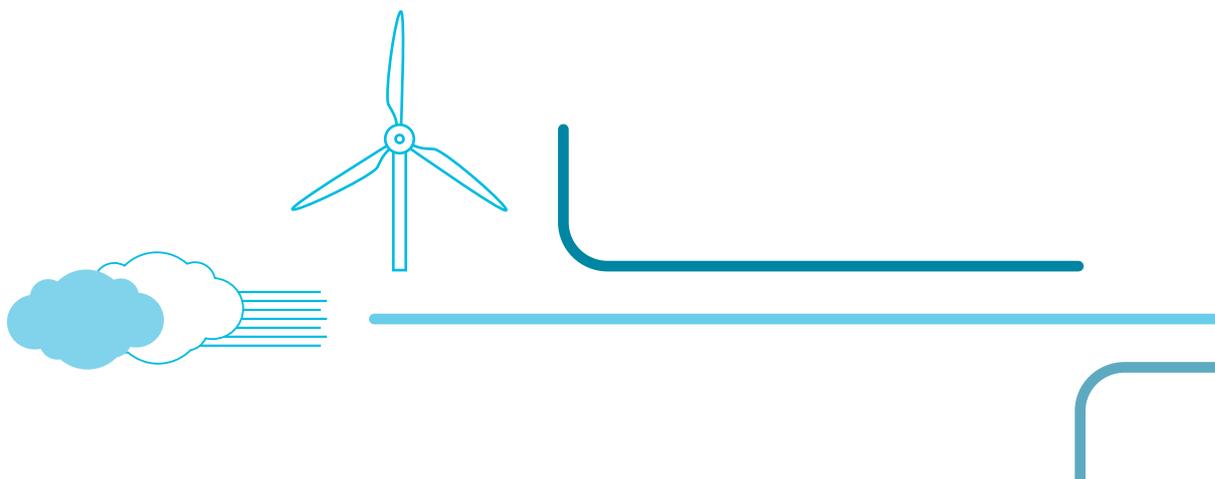
Tous ces exemples montrent que les pratiques de dimensionnement de fondations diffèrent selon les pays : au Brésil, par exemple, les pieux sont très courants et peu coûteux ; en Belgique, c'est une pratique très habituelle malgré les difficultés rencontrées. Les améliorations de sol, très prisées en France, ne sont pas du tout utilisées au Brésil.

Image 11 : Poussée d'eau



À titre de conclusion, il est important de souligner que les données doivent être claires et complètes pour éviter les erreurs et que les documents fournis doivent être cohérents et compréhensibles. Les facteurs de décision les plus importants sont l'éolienne elle-même, le fabricant, le génie civiliste, les géotechniciens, le bureau

d'études et le bureau de contrôle (obligatoire en France contrairement à d'autres pays). Il est pertinent (parfois utopique) que tous ces intervenants soient assis autour de la table lors du démarrage des études ; les coûts seraient ainsi mieux contrôlés et les erreurs évitées.





Toute reproduction totale ou partielle de ce document
doit faire l'objet d'une autorisation préalable
du Responsable de la publication.

