

Parcs éoliens terrestres

Prévention à la conception

L'Institut national de recherche et de sécurité (INRS)

Dans le domaine de la prévention des risques professionnels, l'INRS est un organisme scientifique et technique qui travaille, au plan institutionnel, avec la Cnam, les Carsat, Cramif, CGSS et plus ponctuellement pour les services de l'État ainsi que pour tout autre organisme s'occupant de prévention des risques professionnels.

Il développe un ensemble de savoir-faire pluridisciplinaires qu'il met à la disposition de tous ceux qui, en entreprise, sont chargés de la prévention : chef d'entreprise, médecin du travail, instances représentatives du personnel, salariés. Face à la complexité des problèmes, l'Institut dispose de compétences scientifiques, techniques et médicales couvrant une très grande variété de disciplines, toutes au service de la maîtrise des risques professionnels.

Ainsi, l'INRS élabore et diffuse des documents intéressant l'hygiène et la sécurité du travail : publications (périodiques ou non), affiches, audiovisuels, sites Internet... Les publications de l'INRS sont diffusées par les Carsat. Pour les obtenir, adressez-vous au service Prévention de la caisse régionale ou de la caisse générale de votre circonscription, dont l'adresse est mentionnée en fin de brochure.

L'INRS est une association sans but lucratif (loi 1901) constituée sous l'égide de la Cnam et soumise au contrôle financier de l'État. Géré par un conseil d'administration constitué à parité d'un collègue représentant les employeurs et d'un collègue représentant les salariés, il est présidé alternativement par un représentant de chacun des deux collèges. Son financement est assuré en quasi-totalité par la Cnam sur le Fonds national de prévention des accidents du travail et des maladies professionnelles.

Les caisses d'assurance retraite et de la santé au travail (Carsat), la caisse régionale d'assurance maladie d'Île-de-France (Cramif) et les caisses générales de sécurité sociale (CGSS)

Les caisses d'assurance retraite et de la santé au travail, la caisse régionale d'assurance maladie d'Île-de-France et les caisses générales de sécurité sociale disposent, pour participer à la diminution des risques professionnels dans leur région, d'un service Prévention composé d'ingénieurs-conseils et de contrôleurs de sécurité. Spécifiquement formés aux disciplines de la prévention des risques professionnels et s'appuyant sur l'expérience quotidienne de l'entreprise, ils sont en mesure de conseiller et, sous certaines conditions, de soutenir les acteurs de l'entreprise (direction, médecin du travail, instances représentatives du personnel, etc.) dans la mise en œuvre des démarches et outils de prévention les mieux adaptés à chaque situation. Ils assurent la mise à disposition de tous les documents édités par l'INRS.

Toute représentation ou reproduction intégrale ou partielle faite sans le consentement de l'INRS, de l'auteur ou de ses ayants droit ou ayants cause, est illicite. Il en est de même pour la traduction, l'adaptation ou la transformation, l'arrangement ou la reproduction, par un art ou un procédé quelconque (article L. 122-4 du code de la propriété intellectuelle). La violation des droits d'auteur constitue une contrefaçon punie d'un emprisonnement de trois ans et d'une amende de 300 000 euros (article L. 335-2 et suivants du code de la propriété intellectuelle).

© INRS, 2020.

Graphisme : Béatrice-Anne Fournier

Crédit photos : Boralex (couverture et pages 10, 27, 29, 41, 44), INRS (pages 47, 52), Guillaume J. Plisson pour l'INRS (pages 49, 57) - Illustrations : Jean-André Deledda

Parcs éoliens terrestres

Prévention à la conception

Annie Chapouthier
Sandrine Hardy

Sur la base des travaux initiés par Jean-Louis Pomian



Ce document est rédigé avec la collaboration
de France énergie éolienne et du Syndicat des énergies renouvelables.

Les auteurs remercient les experts ayant relu le document (INRS, Carsat, IRSST),
ainsi que les entreprises nous ayant accueillies sur les parcs éoliens.



Table des matières

Avant-propos	5
Repères sur l'éolien	6
L'éolien en chiffres	6
Santé et sécurité dans la filière éolienne	7
1. Parc éolien : descriptif et déroulement du projet	8
1.1 Le projet éolien	8
1.1.1 Descriptif d'un parc éolien terrestre	8
1.1.2 Acteurs du secteur éolien	10
1.1.3 Cycle de vie d'un parc éolien	11
▶ Focus sur la réglementation ICPE	14
1.2 Construction du parc	16
1.2.1 Déroulement du chantier	16
1.2.2 Coordination en matière de sécurité et de protection de la santé (SPS)	17
1.2.3 Les particularités du secteur éolien	18
1.3 L'aérogénérateur	20
1.3.1 Descriptif d'un aérogénérateur	20
1.3.2 Fonctionnement d'un aérogénérateur	21
2. Conception du parc et prévention des risques professionnels	22
2.1 Prise en compte de la prévention des risques professionnels dans la phase de développement	22
2.1.1 Impact du développement du projet sur la santé et la sécurité	22
2.1.2 Approche pour intégrer la santé et la sécurité au développement du projet	22
2.2 Principaux points de vigilance en santé et sécurité pour la conception du parc	25
2.2.1 Caractéristiques et aménagement du site	25
2.2.2 Aménagement des aires de travail au pied des éoliennes	26
2.2.3 Conception du poste de livraison	28
2.2.4 Prise en compte des ambiances de travail	29
2.2.5 Prévention du risque électrique	30
2.2.6 Travail isolé	31
3. Conception des aérogénérateurs et collaboration développeur/turbinier	32
3.1 Échanges développeur/turbinier : levier pour la prévention des risques professionnels ..	32
3.1.1 Échanges développeur/turbinier et cahier des charges	32
3.1.2 Analyse des risques et intégration de la sécurité	35
▶ Focus sur la réglementation applicable aux aérogénérateurs	34
3.2 Situations de travail spécifiques à l'éolienne : risques et mesures de prévention	36
3.2.1 Accès à l'aérogénérateur et à ses différentes parties - évacuation	37
3.2.2 Ergonomie des espaces de travail	43
3.2.3 Ambiances de travail	45
3.2.4 Manutentions et élévations de charges	47
3.2.5 Risques physiques	48
3.2.6 Risques mécaniques	53
3.2.7 Commande et mise en sécurité de la machine	54
4. Préparation de la mise en exploitation	58



Avant-propos

La production éolienne d'électricité connaît depuis quelques années un développement sans précédent. Cet essor est l'effet de politiques internationales et nationales de développement des énergies renouvelables et de lutte contre les gaz à effet de serre. Alors que les installations de production conventionnelles utilisent pour l'essentiel différents combustibles qui émettent de nombreux déchets et gaz à effet de serre, la production éolienne repose sur une utilisation mécanique de la force du vent et produit de l'électricité sans combustible et donc sans émission de CO₂.

Cependant, une énergie « verte » et meilleure pour l'environnement ne signifie pas nécessairement meilleure pour la santé et la sécurité des travailleurs. L'impact du développement des parcs éoliens terrestres sur les travailleurs du secteur est encore peu connu.

Deux raisons principales peuvent expliquer cette méconnaissance : d'une part, le secteur éolien est un secteur jeune, il est encore difficile d'en définir précisément l'ensemble des acteurs, d'autre part, peu d'études ont été réalisées sur les conditions de travail et leur impact sur la santé et la sécurité des travailleurs de l'éolien.

Ce document a pour premier objectif de **faire connaître ce secteur** en décrivant le déroulement d'un projet de parc éolien terrestre et les acteurs qui y prennent part.

Le second objectif est **d'identifier les risques professionnels spécifiques** au secteur éolien sur lesquels il est possible d'agir dès la phase de conception du parc. Il s'agit ensuite de rappeler les préconisations générales en matière de santé et de sécurité telles qu'elles ressortent de la réglementation applicable au secteur et de proposer des mesures de prévention issues des bonnes pratiques observées chez les professionnels du secteur.

Le premier chapitre de cette brochure comprend la présentation d'un projet éolien et notamment le descriptif d'un parc, le déroulement du projet et le descriptif d'une éolienne. L'éolien étant un secteur relativement jeune, les termes employés peuvent différer d'une entreprise à l'autre. Ce chapitre est l'occasion de proposer un vocabulaire commun afin de faciliter les échanges entre les différents acteurs d'un projet.

Le second chapitre traite de la prévention des risques professionnels dans la phase de conception d'un parc éolien. Les développeurs de parcs éoliens terrestres y trouveront une méthode pour intégrer la prévention en amont du projet. Les points de vigilance en santé et sécurité au travail y sont présentés, ainsi que les moyens de prévention associés.

La troisième partie a pour objet la conception des éoliennes. Après un rappel de la réglementation, les risques spécifiques aux situations de travail dans l'éolienne sont décrits, ainsi que les moyens de les prévenir. Des développements particuliers sont également consacrés aux échanges entre le développeur et le turbinier, car leur collaboration est un levier essentiel pour la prévention.

La réglementation mentionnée dans le document est celle en vigueur au 1^{er} octobre 2019.

Cette publication traite des parcs éoliens terrestres et n'aborde pas la problématique de l'éolien en mer (*offshore*), encore peu développé en France. Elle ne traite pas non plus du « petit éolien » permettant de produire de l'électricité en autoconsommation pour un ménage, une PME ou une exploitation agricole (faible puissance : 0 à 100 kW). Enfin, les éoliennes destinées à être implantées sur les bâtiments (notamment en zones urbaines ou périurbaines) sont exclues de ce document.

Repères sur l'éolien

L'éolien en chiffres

Production et puissance installée

L'énergie éolienne offre, pour le système électrique français, un potentiel technique important et encore largement sous-exploité. La production électrique¹ du parc éolien terrestre français a atteint 26,1 TWh sur l'année 2018, soit 5,5 % de la production nette d'électricité. Dans ses travaux de prospectives énergétiques pour 2030, l'Ademe attribue à l'éolien terrestre une part de 22 % dans la production électrique nationale.

La puissance raccordée fin 2018 était de 15,1 GW, inégalement répartie sur le territoire français comme le montre la **figure 1**. Les projets en cours représentaient à cette date 11,5 GW en attente de raccordement. La Programmation Pluriannuelle de l'énergie fixe pour 2023 un objectif de puissance installée comprise entre 21,8 GW et 26 GW.

À l'échelle européenne, la France se place en 4^e position derrière l'Allemagne, l'Espagne et le Royaume-Uni pour la puissance installée (terre et mer).

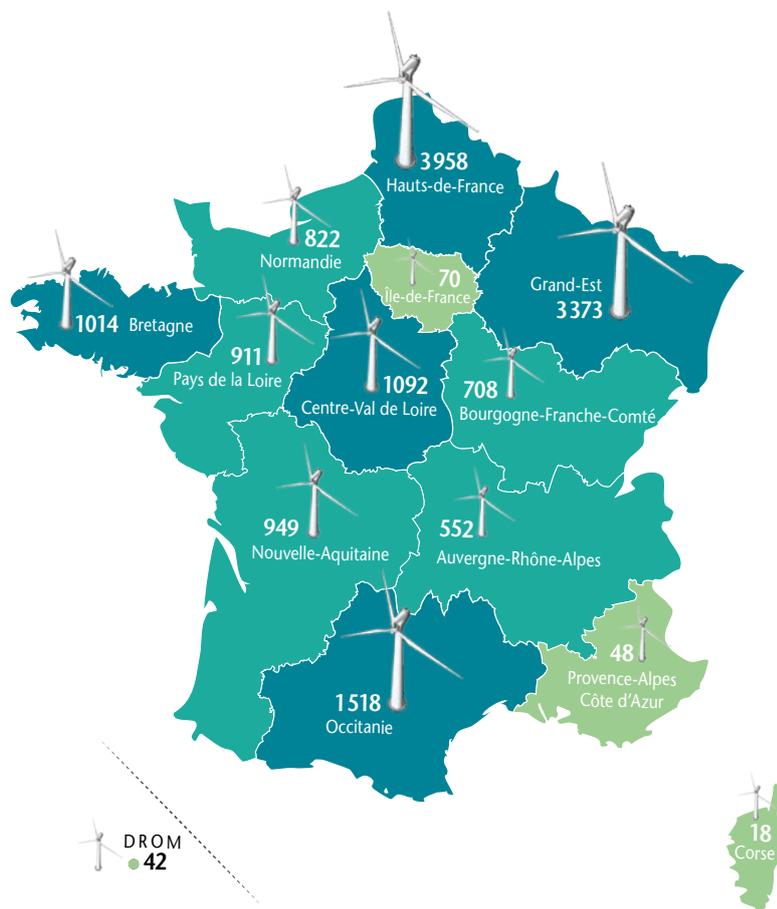


Figure 1 – Puissance éolienne raccordée (en MW) par région au 31 décembre 2018 (d'après les données du SDES).

Emploi et effectif salarié du secteur éolien

Selon France énergie éolienne², la filière française de l'éolien employait plus de 18 000 personnes en 2018. Ces emplois étaient diversifiés sur toutes les phases des projets : études, recherche et développement, fabrication des machines, des équipements et des composants, travaux d'installation des parcs, logistique, exploitation et maintenance. Au global, plus de 1 000 sociétés étaient actives dans ce secteur.

Les emplois liés à la construction et à l'exploitation des parcs sont en croissance continue. L'éolien offre par ailleurs des possibilités de diversification et de reconversion pour certains secteurs de l'industrie traditionnelle parmi lesquels la métallurgie, la chaudronnerie, la mécanique et la maintenance.

1 Source : Service de la donnée et des études statistiques du ministère de la Transition écologique et solidaire (SDES) - www.statistiques.developpement-durable.gouv.fr.

2 Source : Observatoire de l'éolien – Octobre 2019 – <http://fee.asso.fr/ressources/publications/>.

Santé et sécurité dans la filière éolienne

Accidentologie

Il n'existe actuellement aucune base de données officielle recensant l'accidentologie dans la filière éolienne française ou européenne. Le rapport de l'Agence européenne pour la sécurité et la santé au travail (EU-OSHA) sur la sécurité et la santé au travail dans le secteur de l'énergie éolienne³ identifie trois raisons principales pour expliquer ce manque d'informations :

- ▶ le parc d'éoliennes terrestres est relativement jeune ;
- ▶ la plupart des recherches sur les risques liés à l'implantation d'éoliennes portent sur la sécurité du public et non sur l'exposition des travailleurs ;
- ▶ les données opérationnelles sur les éoliennes sont tenues confidentielles par les fabricants ou par les organisations du secteur qui les collectent.

Par ailleurs, du fait de la diversité des activités et des secteurs impliqués dans cette filière éolienne, il n'existe pas de statistiques nationales consolidées par la Caisse nationale de l'assurance maladie (Cnam).

Toutefois, des données ont été collectées par des associations à partir d'articles de presse et de communiqués officiels. Certaines ont été reprises dans le rapport de l'Agence européenne mentionné plus haut. Ces statistiques ne sont pas représentatives en termes de nombre et de fréquence des accidents mais sont utiles pour dégager des tendances qualitatives en matière d'accidentologie :

- ▶ le nombre d'accidents survenus dans le secteur de l'énergie éolienne connaît une tendance à la hausse : plus les éoliennes sont nombreuses, plus le nombre d'accidents augmente ;
- ▶ la majorité des accidents mortels concerne des travailleurs des domaines de la construction ou de la maintenance.

L'EU-OSHA suggère aux acteurs de la filière d'améliorer les échanges sur les questions de santé et de sécurité entre acteurs de la filière mais également avec les autres industries, les professionnels de la santé au travail et le monde de la recherche.

Problématiques spécifiques au secteur éolien

On pourrait faire valoir a priori que les dangers présents sur un parc éolien ne diffèrent pas fondamentalement de ceux qui existent dans les autres industries (risques de chute de hauteur, risques liés aux manutentions manuelles, ...). Cependant, si l'on considère les conditions particulières dans lesquelles les risques surviennent (situation de travail isolé, conditions météorologiques particulières, parcs difficiles d'accès, exigüité de certaines parties de l'éolienne...), certaines mesures de prévention applicables dans les autres secteurs ne sont pas nécessairement pertinentes dans le secteur éolien.

De plus, la nature même des parcs éoliens évolue au fil du temps. On assiste d'une part à l'implantation d'éoliennes neuves plus hautes et plus puissantes, et d'autre part à l'allongement de la durée de vie des parcs. Les éoliennes vieillissantes sont rénovées pour en prolonger la durée de fonctionnement ou remplacées par de nouvelles éoliennes plus puissantes (*repowering*).

De plus en plus de personnes travaillant dans ce secteur, il apparaît dès lors nécessaire de se concentrer sur la prévention des risques professionnels dans ce secteur d'activité.

La santé et la sécurité des travailleurs de cette filière en plein développement économique deviennent une préoccupation majeure des principales organisations professionnelles concernées : France énergie éolienne (FEE) et le Syndicat des énergies renouvelables (SER).

³ EU-OSHA (European Agency for Safety and Health at Work), Occupational safety and health in the wind energy sector, E-facts 79, 2013. Téléchargeable sur <https://osha.europa.eu> (en anglais), 76 p.



1. Parc éolien : descriptif et déroulement du projet

La composition d'un parc éolien et les étapes jalonnant sa conception sont peu connues en dehors des personnes qui y sont directement associées.

Afin de faciliter la lecture de cette brochure, il nous a paru indispensable de rassembler, dans la première partie, les informations essentielles pour répondre aux interrogations suivantes :

- ▶ quels sont les éléments constitutifs d'un parc éolien ?
- ▶ quelles sont les étapes significatives du projet de conception ?
- ▶ quelles sont les parties prenantes au projet ?
- ▶ quelles sont les réglementations applicables à la conception du parc ?

Cette première partie indique les moments propices à l'intégration de la prévention des risques professionnels en amont de la construction du parc et les différents acteurs susceptibles d'y être associés. Elle permet également d'acquérir les termes principaux du vocabulaire en usage dans ce secteur d'activité.

1.1 Le projet éolien

1.1.1 Descriptif d'un parc éolien terrestre

La production d'électricité en exploitant le vent est réalisée au moyen d'éoliennes particulières appelées aérogénérateurs. Lorsque plusieurs éoliennes sont utilisées conjointement, on utilise les termes « centrale éolienne », « ferme éolienne » ou, plus fréquemment, « parc éolien ».

Un parc éolien est donc une centrale de production d'énergie électrique comprenant plusieurs aérogénérateurs ; il permet de produire de l'électricité, sans stockage, par l'exploitation de la force du vent. Le terme « terrestre » (ou *onshore*) est ajouté pour faire la distinction avec les parcs éoliens marins (ou *offshore*).

Un **parc éolien** est généralement installé sur plusieurs dizaines d'hectares, d'autant plus qu'une distance est à respecter entre éoliennes ; entre éoliennes et habitations. Cependant, ce n'est pas la superficie mais le nombre d'aérogénérateurs et la capacité de production qui définit la taille d'un parc éolien. Cette dernière se mesure en mégawatt (MW, unité de puissance).

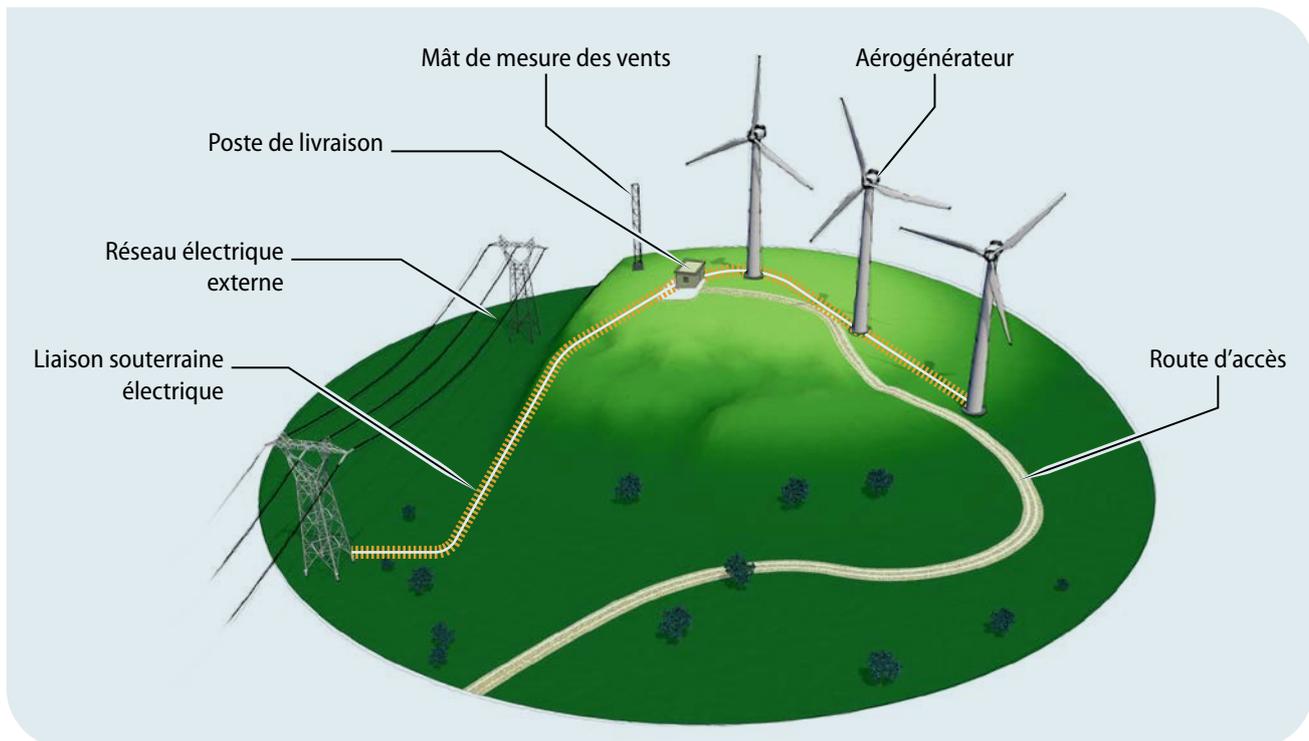


Figure 2 – Les composants d'un parc éolien terrestre

La [figure 2](#) présente un schéma typique de parc éolien. Un parc éolien comprend généralement :

- ▶ des aérogénérateurs, en nombre variable selon les parcs ;
- ▶ un ou plusieurs postes de livraison ;
- ▶ un mât de mesure des vents ;
- ▶ des voies d'accès et de desserte entre les éoliennes ;
- ▶ un réseau de câbles enterrés permettant les raccordements électriques.

Poste de livraison⁴

Il constitue la limite entre le réseau électrique interne au parc (privé) et le réseau de distribution ou de transport externe (souvent public). Il abrite le point de raccordement du parc éolien au réseau et est équipé de cellules de protection électrique et de dispositifs de comptage de l'énergie produite. Il peut s'agir d'un poste de livraison individuel, parfois appelé « sous-station HTA », placé au pied ou à l'intérieur d'une éolienne ou d'un poste de livraison commun à plusieurs éoliennes (pour les parcs plus conséquents). Le poste de livraison comprend alors généralement, en plus du local haute tension, un local technique affecté à la communication entre le parc et le centre de commande à distance. À cet effet, il abrite un système de contrôle et d'acquisition de données (système Scada, pour *Supervisory Control And Data Acquisition*), c'est-à-dire un ensemble de logiciels et de matériels destinés à la collecte de données en temps réel auprès de sites distants, en vue de contrôler les équipements et les conditions d'exploitation. Un **réseau électrique enterré** assure les liaisons vers les postes de livraisons ou entre éoliennes.

Mât de mesure des vents

Implanté avant la conception du parc éolien, il permet d'effectuer les mesures météorologiques essentielles au développement du projet éolien. Les données relatives aux vents sont collectées sur plusieurs mois (environ 12 mois) grâce aux instruments fixés au mât

⁴ Dans ce document, le réseau externe au parc n'est pas traité (lignes aériennes, câbles de transport et de distribution, poste source...). Lorsque le poste source est installé dans le périmètre du parc, les mesures de prévention le concernant sont similaires à celles mises en œuvre pour le poste de livraison.



(anémomètres, girouettes...). D'autres paramètres tels que la pression atmosphérique, le taux d'humidité, la température de l'air, les précipitations et la durée d'ensoleillement sont également relevés, ce qui permet de déterminer leur influence sur les conditions de vent.

Ces mesures peuvent être complétées par des mesures réalisées par un appareil laser appelé *Light detection and ranging* (LIDAR). Ces dispositifs sont autonomes et en général alimentés sur plusieurs semaines ou mois par groupes électrogènes ou par piles à combustible.

Voies d'accès

Les voies d'accès au site éolien et les pistes à l'intérieur du parc sont définies lors de la conception du parc éolien en intégrant notamment les dimensions et les préconisations des constructeurs d'éoliennes ainsi que les contraintes paysagères et environnementales. Très souvent, les chemins existants sont aménagés et de nouveaux tronçons sont créés sur les parcelles agricoles. Ces pistes, ainsi que les plateformes de levage, sont aménagées pour permettre aux véhicules et aux engins (grues...) d'accéder à chaque éolienne durant les opérations de construction du parc mais aussi durant sa phase d'exploitation (pour les opérations de maintenance).

1.1.2 Acteurs du secteur éolien

Différents acteurs peuvent être à l'initiative d'un parc éolien : société privée (on parle alors de projet industriel), un groupe de particuliers, d'agriculteurs ou une collectivité locale (projet citoyen), une collectivité associée à des capitaux privés (société d'économie mixte) ou une société privée avec la participation financière de la population (projet participatif). Ces acteurs ne sont pas toujours des professionnels du secteur éolien, ni de la conception de parcs.

Dans la réglementation relative à la coordination pour la sécurité et la protection de la santé sur les chantiers, le terme générique « **maître d'ouvrage** » désigne la personne morale ou physique pour laquelle le parc éolien est construit. C'est lui qui s'assure de la faisabilité du projet, détermine le site, définit le programme et en assure le financement. La dénomination « **propriétaire du parc** » est privilégiée par les professionnels du secteur pour le désigner, bien que ce terme soit plus restrictif.

Lorsque le maître d’ouvrage n’est pas un professionnel de la conception de parcs et qu’il n’a pas toutes les compétences nécessaires pour mener à bien ce type de projet, il s’appuie sur un **développeur éolien** (assistance à maîtrise d’ouvrage). Sa mission principale est de piloter les projets éoliens : il rédige le programme et les cahiers des charges, pilote les études nécessaires, et choisit les fabricants et les sociétés de génie civil. Il intervient dès l’origine du projet y compris durant la prospection et les études, et parfois jusqu’à la construction du parc.

Le concepteur et fabricant des aérogénérateurs est appelé « **turbinier** ». C’est avec le turbinier que le développeur de parc collabore pour préciser le cahier des charges. Très souvent, le turbinier assure aussi le montage de l’éolienne. Les termes « fabricant » ou « constructeur » sont également utilisés dans le document pour désigner le turbinier.

Une fois le parc construit, l’électricité est produite en vue d’être injectée sur le réseau. Le suivi et la surveillance de la production sont réalisés par **l’exploitant de parc éolien**. Pour les opérations de maintenance, l’exploitant peut faire appel à ses propres équipes, aux équipes du turbinier, ou aux équipes d’entreprises indépendantes, généralistes ou spécialisées (dans la maintenance d’éoliennes, de réseaux électriques ou de pales par exemple). Plus rarement, le turbinier inclut dans la vente de l’éolienne un contrat de service pour la durée de vie de l’éolienne.

Il est possible qu’une même entreprise remplisse différentes fonctions dans un projet éolien. Par exemple, le développeur d’un projet peut être également propriétaire du parc : il pilote la conception et la construction du parc afin de le revendre « clés en main » à un exploitant. Autre exemple, le propriétaire du parc n’est pas un professionnel de l’éolien et confie le projet à une entreprise qui assurera les fonctions de développeur et d’exploitant. Il est également possible qu’une entreprise du secteur éolien soit à la fois propriétaire du parc, développeur du projet et exploitant éolien.

1.1.3 Cycle de vie d’un parc éolien

Concevoir un parc éolien terrestre est un projet qui s’inscrit dans la durée : il s’écoule sept ans en moyenne entre la prospection foncière et la mise en service du parc. Ce délai s’explique en grande partie par la durée des démarches administratives, même si elle a tendance à diminuer. Un projet de conception de parc éolien terrestre intègre le cycle de vie du parc, à savoir les phases suivantes : prospection, études, autorisations et financement, construction, exploitation et démantèlement (voir figure 3).

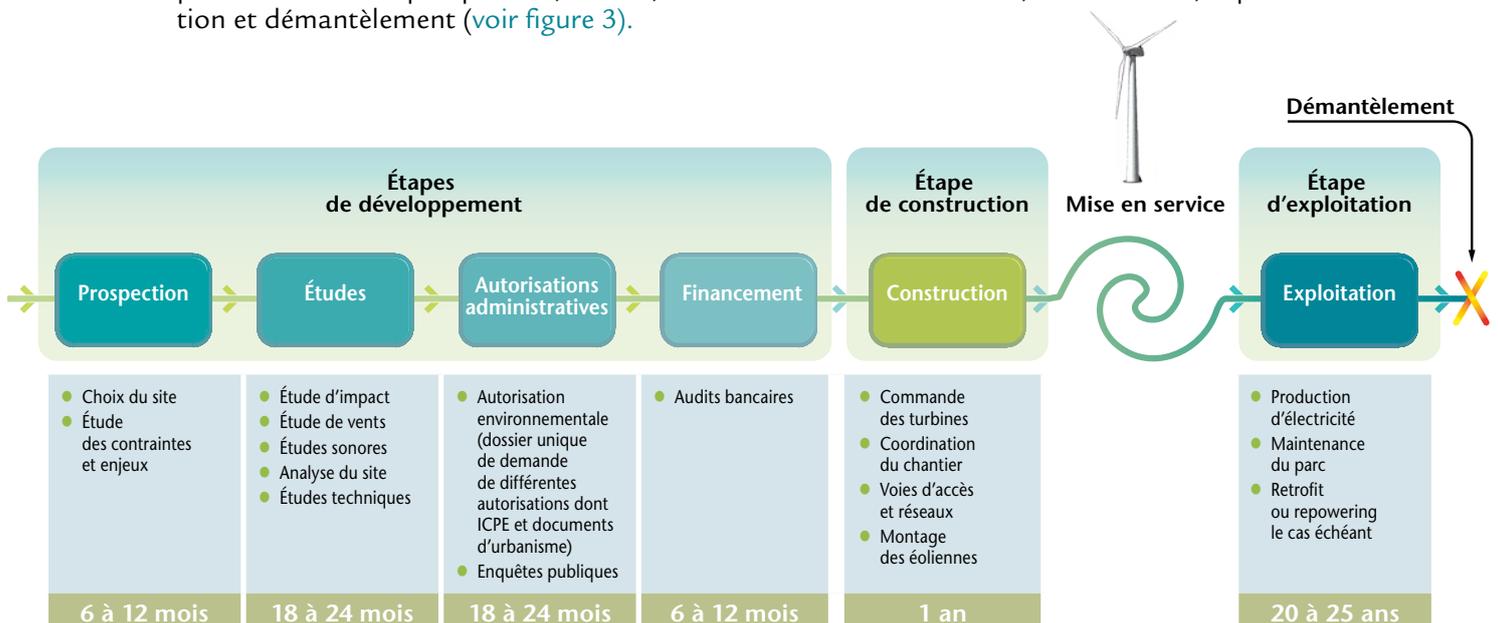


Figure 3 – Déroulement d’un projet éolien



Trois grandes étapes peuvent ainsi être identifiées : le développement, la construction et l'exploitation.

Développement

La première phase du développement est la **phase de prospection**. Elle est consacrée essentiellement au choix préliminaire du site d'implantation et à l'étude des contraintes et enjeux. En effet, même si le projet s'inscrit dans un schéma régional éolien⁵, d'autres paramètres déterminants doivent être examinés, par exemple le résultat d'analyses géographiques et topographiques, la distance aux habitations, le classement possible du site envisagé, les modalités de mise à disposition du foncier ou les possibilités de raccordement au réseau. La phase de prospection est généralement confiée à un développeur éolien (voir 1.1.2).

La **phase d'études** a pour but d'évaluer le potentiel de production d'énergie et les impacts sur l'environnement. Lors de cette phase, des études détaillées sont conduites parmi lesquelles :

- ▶ l'étude de vent avec implantation d'un ou plusieurs mâts de mesure,
- ▶ l'étude d'impact sur le paysage, la faune, l'archéologie, l'acoustique, les sites sensibles...
- ▶ l'analyse du site pour choisir les éoliennes et leur implantation,
- ▶ les études techniques sur l'accès au site et aux machines,
- ▶ les études de dangers...

Les phases de prospection et d'études sont coordonnées par le développeur de projet éolien, de même que l'ensemble des démarches administratives.

La **phase administrative** vise à constituer la demande d'autorisation soumise aux différents services de l'Etat. Il s'agit principalement de la démarche concernant l'obtention des différentes autorisations et notamment celle relative au respect de la réglementation au titre des installations classées pour la protection de l'environnement (ICPE). Le développeur intègre à ces dossiers les résultats des études pertinentes. Il se charge également des relations de concertation avec les collectivités locales et les citoyens et, le cas échéant, de la réalisation de l'enquête publique.

Cette phase dure généralement de 18 à 24 mois. Toutefois, depuis mars 2017, les démarches administratives sont simplifiées par la mise en place de l'autorisation environnementale⁶. Celle-ci permet une demande unique auprès d'une seule autorité incluant l'ensemble des démarches relatives au respect des différentes réglementations : autorisation ICPE, autorisation de défrichement, de raccordement, dispense de permis de construire⁷... Cette simplification administrative a pour objectif notamment de fluidifier et de raccourcir la phase administrative.

La **phase de financement** est essentiellement consacrée à des audits bancaires et réglementaires ayant pour but de statuer sur la solidité financière et juridique du projet. Pour la majorité des parcs, l'exploitant est tenu de constituer les garanties financières nécessaires au démantèlement du parc et à la remise en état du site.

Construction

Après obtention des autorisations et financements requis, la phase de construction peut commencer. Elle est initiée par la commande des réalisations sur site : aérogénérateurs, voiries, plateformes de levage, réseaux... La construction du parc à proprement parler débute 5 à 8 mois avant l'arrivée des aérogénérateurs sur le site.

⁵ Le schéma régional éolien indique les zones favorables au développement de l'éolien par commune et le potentiel éolien régional.

⁶ Art.L.181-1 2° et L.181-2 12° du Code de l'environnement.

⁷ Art.R.425-29-2 du Code de l'urbanisme : l'autorisation environnementale dispense de permis de construire les projets d'installation d'éoliennes soumises au régime d'autorisation ICPE.

Différentes étapes se succèdent durant le chantier :

- ▶ aménagement du site et de ses accès ;
- ▶ réalisation des fondations ;
- ▶ montage et levage de l'éolienne ;
- ▶ raccordement au réseau électrique.

L'aménagement du site et des accès, ainsi que les fondations sont réalisés, le plus souvent, par des entreprises locales de génie civil.

Le transport et le montage des éoliennes, les opérations de raccordement, de test et de mise en service sont réalisés conjointement par des sociétés spécialisées et par les équipes du turbinier (voir 1.1.2).

De nombreuses entreprises locales, nationales ou internationales, vont ainsi participer à la réalisation du parc et à l'installation des éoliennes ; la coordination du chantier et la gestion de la coactivité sont donc indispensables au bon déroulement de la construction.

Le parc peut être construit soit dans sa totalité, soit par tranches. Dans ce cas, une tranche (c'est-à-dire un groupe d'éoliennes) est mise en service, alors que la tranche suivante est encore en construction.

Exploitation

La phase d'exploitation est la phase de production d'électricité. Durant cette phase, l'exploitant (voir 1.1.2) assure le suivi des performances de production, la surveillance et la maintenance du site.

Le pilotage des éoliennes s'effectue à distance, depuis un centre de contrôle. Plusieurs centaines de paramètres sont collectées sur chaque éolienne. Les données sont envoyées au centre de contrôle où elles sont analysées de manière à optimiser la production. Ces données permettent également de programmer les opérations de maintenance des machines.

Les opérations de maintenance sont diverses : entretien du parc et des infrastructures routières, remplacement de composants mécaniques, hydrauliques ou électriques dans les aérogénérateurs ou les postes électriques, dépannage, campagnes de contrôle périodique... On distingue la maintenance préventive (programmée et s'effectuant selon des procédures préétablies) de la maintenance curative (aléatoire, par exemple en réaction à une alarme, à une panne ou à un arrêt machine via le Scada⁸).

Au terme de la période d'exploitation (qui dure entre 20 à 25 ans pour chaque éolienne), plusieurs cas sont possibles : soit la production est arrêtée et le parc démantelé, soit l'exploitation peut se poursuivre avec de nouvelles éoliennes (on parle alors de *repowering*).

Un phénomène de *revamping* ou *retrofit* d'éoliennes est également observé : les anciennes machines ne sont pas détruites mais rénovées et modifiées de façon à allonger leur durée de vie.

⁸ Scada (Supervisory Control And Data Acquisition) : système de contrôle et d'acquisition de données.

Focus sur la réglementation ICPE

L'installation d'un parc éolien en France est soumise à plusieurs réglementations : Code de l'environnement, Code de l'énergie, Code de l'urbanisme et Code forestier notamment.

À ces réglementations s'ajoutent les dispositions du Code du travail applicables aux entreprises pour la partie conception et exploitation des éoliennes.

Un focus est fait ici sur les dispositions prévues par le Code de l'environnement et plus particulièrement sur le régime juridique des installations classées pour la protection de l'environnement (ICPE)⁹.

Depuis 2011, les parcs éoliens terrestres relèvent de la rubrique n° 2980 de la nomenclature des installations classées. L'installation concernée par la démarche administrative comprend les aérogénérateurs, le poste de livraison et les raccordements.

Les parcs éoliens peuvent relever du régime juridique de déclaration ou du régime juridique d'autorisation (voir tableau 1)

Désignation de la rubrique n° 2980	Régime
Installation terrestre de production d'électricité à partir de l'énergie mécanique du vent et regroupant un ou plusieurs aérogénérateurs	
1. Comprenant au moins un aérogénérateur dont le mât a une hauteur supérieure ou égale à 50 m.....	Autorisation
2. Comprenant uniquement des aérogénérateurs dont le mât a une hauteur inférieure à 50 m et au moins un aérogénérateur dont le mât a une hauteur maximale supérieure ou égale à 12 m et pour une puissance totale installée :	
a) supérieure ou égale à 20 MW	Autorisation
b) inférieure à 20 MW	Déclaration

Tableau 1 : Régimes ICPE des parcs éoliens terrestres

Installations soumises au régime de déclaration

L'installation est soumise à **déclaration** lorsqu'elle remplit les trois conditions suivantes :

- ▶ le parc comprend uniquement des aérogénérateurs dont le mât a une hauteur inférieure à 50 m ;
- ▶ au moins un aérogénérateur a un mât de hauteur supérieure ou égale à 12 m ;
- ▶ et la puissance totale installée est inférieure à 20 MW.

L'arrêté du 26 août 2011 modifié (JO du 27 août 2011) relatif aux installations de production d'électricité utilisant l'énergie mécanique du vent au sein d'une installation soumise à **déclaration** au titre de la rubrique n° 2980 de la législation des installations classées pour la protection de l'environnement précise quelles sont les dispositions applicables à la conception et à l'exploitation des éoliennes.

Des dispositions issues de ce texte sont susceptibles d'avoir des conséquences sur les mesures de prévention prises dans le domaine de la santé et de la sécurité des travailleurs.

À ce titre, on peut citer notamment :

- ▶ L'implantation et l'aménagement des éoliennes (notamment accessibilité au site, conception des installations électriques, protection contre la foudre, conception de l'aérogénérateur...).

⁹ Cette brochure ne traite que des installations neuves. Les installations existantes sont concernées par des dispositions spécifiques des arrêtés du 26 août 2011.

- ▶ L'exploitation et l'entretien de l'éolienne (notamment surveillance de l'exploitation, contrôle de l'accès, propreté, consignes d'exploitation, mise en service de l'aérogénérateur, contrôle des installations, consignes de sécurité, système de détection, moyens de prévention et de lutte contre l'incendie, prévention de la chute de glace...).

Installations soumises au régime d'autorisation

L'installation est soumise à **autorisation** si elle comprend au moins un aérogénérateur dont le mât a une hauteur supérieure ou égale à 50 m ou si elle remplit les trois conditions suivantes :

- ▶ le parc comprend uniquement des aérogénérateurs dont le mât a une hauteur inférieure à 50 m ;
- ▶ au moins un aérogénérateur a un mât de hauteur supérieure ou égale à 12 m ;
- ▶ et la puissance totale installée est supérieure ou égale à 20 MW.

L'arrêté du 26 août 2011 modifié (J.O. du 27 août 2011) relatif aux installations de production d'électricité utilisant l'énergie mécanique du vent au sein d'une installation soumise à autorisation au titre de la rubrique n°2980 de la législation des installations classées pour la protection de l'environnement prévoit les dispositions constructives et celles d'exploitation applicables aux nouvelles installations.

Ces dispositions impactent la santé et la sécurité des travailleurs amenés à intervenir sur le parc et dans les aérogénérateurs.

À noter : Concernant les **dispositions constructives**, sont notamment visées les voies d'accès au site, la conception et la conformité de l'aérogénérateur, les installations intérieures et extérieures.

Les prescriptions applicables à **l'exploitation** concernent les points ci-dessous :

- ▶ l'accès des personnes étrangères ;
- ▶ la signalisation ;
- ▶ les vérifications périodiques ;
- ▶ la formation du personnel et les consignes de sécurité notamment en cas d'urgence ;
- ▶ le manuel d'entretien de l'installation, les registres ;
- ▶ les dispositifs d'alerte et les moyens de lutte contre l'incendie.

Étude de dangers

La demande d'autorisation d'une installation doit être accompagnée d'une étude de dangers. Celle-ci précise les risques (pour le voisinage, pour la santé, la sécurité, l'environnement...) auxquels l'installation peut exposer, directement ou indirectement en cas d'accident, que la cause soit interne ou externe à l'installation. Le contenu de l'étude de dangers doit être en relation avec l'importance des risques engendrés par l'installation. Elle définit et justifie les mesures propres à réduire la probabilité et les effets de ces accidents.

Notice hygiène et sécurité

Depuis la mise en place de l'autorisation environnementale en 2017, le contenu du dossier d'autorisation ne prévoit plus qu'une notice portant sur la conformité de l'installation projetée avec les prescriptions législatives et réglementaires relatives à l'hygiène et la sécurité du personnel soit fournie.



1.2 Construction du parc

La construction du parc éolien est l'aboutissement de la phase de développement. La sécurité sur le chantier va dépendre en grande partie de la qualité de la préparation du projet. En effet les décisions destinées à structurer contractuellement l'organisation générale de la construction et la réalisation du projet sont prises lors du développement. Le rôle du développeur est donc déterminant pour la prévention, notamment pour garantir la compatibilité entre les options techniques, les délais impartis et les exigences de santé et de sécurité.

Plusieurs acteurs vont intervenir en phase de construction. En plus des mesures de prévention mises en place par chaque entreprise à l'égard de ses salariés, des mesures doivent permettre de prévenir les risques issus de leur coactivité et de prévoir l'utilisation de moyens communs. Cette coordination doit être prévue en amont, lors du développement. À cet effet, le développeur désignera une personne en charge de la coordination, qui interviendra dès la phase de développement.

Le déroulement du chantier et ses acteurs sont décrits dans ce chapitre. Les règles générales de coordination en matière de sécurité et de protection de la santé sont ensuite rappelées avant de présenter les spécificités du secteur éolien.

1.2.1 Déroulement du chantier

Les phases du chantier

La construction du parc éolien se déroule en plusieurs étapes :

- ▶ aménagement du site et des accès (voiries et réseaux divers) ;
- ▶ construction des fondations des aérogénérateurs ;
- ▶ construction du ou des postes de livraison et du réseau électrique interne ;
- ▶ montage des éoliennes ;
- ▶ raccordement au réseau électrique (raccordement des aérogénérateurs au réseau intraparc et raccordement au réseau externe).

Le montage d'une éolienne est une opération relativement courte (une à deux semaines) mais complexe.

Les acteurs en phase de construction

La phase chantier se caractérise par la succession, avec des périodes de coactivité, de plusieurs équipes d'intervenants pour assurer les travaux de génie civil, la livraison des pièces constitutives des aérogénérateurs et du réseau électrique, le montage / grutage des segments des mâts, nacelles et pales...

Les acteurs de la phase chantier sont nombreux :

- ▶ le **maître d'ouvrage** et l'assistance à maîtrise d'ouvrage (souvent assurée par un développeur éolien) ;
- ▶ le **maître d'œuvre** chargé de la conception de l'ouvrage et la réalisation des travaux de construction pour le maître d'ouvrage, son client, et de contrôler leur exécution. Cette fonction est parfois réalisée directement par des équipes qui dépendent du turbinier.
- ▶ les **entreprises intervenantes** (et leurs sous-traitants) :
 - entreprises spécialisées dans le terrassement, le génie civil, et la fourniture de béton,
 - entreprises de transport exceptionnel,
 - entreprises de levage,
 - entreprises de montage (rattachées ou non au fabricant des éoliennes),
 - équipementiers qui fournissent les pièces des aérogénérateurs (fabricants de pales, de pièces de fonderie, de matériel électrique),
 - entreprises spécialisées dans le câblage électrique de mise en réseau, etc.

- ▶ le **coordonnateur sécurité et protection de la santé (CSPS)** : il est désigné par le maître d'ouvrage.

1.2.2 Coordination en matière de sécurité et de protection de la santé (SPS)

En application du Code du travail, la réglementation relative aux opérations de bâtiment et de génie civil impose au maître d'ouvrage de mettre en place une coordination de sécurité et de protection de la santé (SPS) et donc de désigner dès la phase de développement un coordonnateur SPS.

La coordination SPS vise, pour tout chantier de bâtiment ou de génie civil où interviennent plusieurs entrepreneurs ou travailleurs indépendants, à prévenir les risques issus de leur coactivité et à prévoir l'utilisation de moyens communs. Elle vient en complément des mesures de prévention mises en place par chaque entreprise à l'égard de ses salariés.

Le Code du travail précise les dispositions applicables à la coordination lors des opérations de bâtiment et de génie civil (articles L.4532-1 et suivants et R.4532-1 et suivants).

Pendant les phases de conception et de réalisation du projet, le maître d'ouvrage, le maître d'œuvre et le coordonnateur en matière de sécurité et de protection de la santé mettent en œuvre les principes généraux de prévention en vue :

- ▶ de permettre la planification de l'exécution des différents travaux ou phases de travail se déroulant simultanément ou successivement ;
- ▶ de prévoir la durée de ces phases ;
- ▶ de faciliter les interventions ultérieures sur l'ouvrage.

Coordonnateur SPS

Le maître d'ouvrage désigne un coordonnateur en matière de sécurité et de protection de la santé, dit « coordonnateur SPS », pour chacune des deux phases de conception et de réalisation ou pour l'ensemble de celles-ci. Le coordonnateur pour la phase de conception est désigné dès le début de la phase de développement du parc. Le coordonnateur pour la phase de construction, lorsqu'il est distinct de celui désigné pour la phase de conception, est désigné avant le lancement de la consultation des entreprises.

Les missions du coordonnateur SPS, ainsi que les conditions d'exécution et les compétences requises sont définies aux articles R.4532-11 et suivants du Code du travail. Le coordonnateur SPS a notamment en charge l'élaboration du plan général de coordination. Dans le cas spécifique de la conception des parcs éoliens, des compétences dans le domaine de l'électricité et du levage sont nécessaires.

Plan général de coordination (PGC)

Le plan général de coordination est réalisé par le coordonnateur durant la phase de conception sous la responsabilité du maître d'ouvrage. Le PGC est un document écrit. Il définit l'ensemble des mesures de prévention des risques découlant :

- ▶ de l'interférence entre les activités des différents intervenants sur le chantier,
- ou
- ▶ de la succession de celles-ci lorsqu'une intervention laisse subsister après son achèvement des risques pour les autres entreprises.

Le plan général de coordination (articles R.4532-42 et suivants du Code du travail) contient notamment :

- ▶ des renseignements d'ordre administratif ;
- ▶ les mesures d'organisation générale du chantier arrêtées par la maîtrise d'œuvre ;
- ▶ les mesures de coordination prises par le coordonnateur SPS concernant :

- les voies et réseaux divers (VRD) du chantier (voies de circulation, alimentation en eau et en électricité, évacuation d'eaux usées...),
- la mutualisation des moyens tels que installations d'accueil et d'hygiène (base-vie), zones de stockage, moyens de protection collective, installations électriques et d'éclairage du chantier, moyens de manutention ...
- l'organisation des secours.

Le PGC est un document évolutif à mettre à jour durant toute la durée des travaux.

Plan particulier de sécurité et de protection de la santé (PPSPS)

Chaque entreprise (y compris les entreprises sous-traitantes) établit avant le début des travaux un plan particulier de sécurité et de protection de la santé. Ce plan est communiqué au coordonnateur (articles R.4532-56 et suivants du Code du travail).

Le plan particulier de sécurité est adapté aux conditions spécifiques de l'intervention sur le chantier. Il tient compte des mesures de coordination générale décidées par le coordonnateur dans le PGC et précise notamment les dispositions prises en matière de secours et celles relatives aux installations de chantier.

Le PPSPS est mis à jour durant toute la période du chantier.

La réalisation du parc éolien doit faire l'objet d'une déclaration préalable par le maître d'ouvrage (article R.4532.2 du Code du travail).

Réalisation d'un dossier d'intervention ultérieure sur l'ouvrage (DIUO)

Au fur et à mesure du déroulement des phases de conception, d'étude et d'élaboration du projet puis de la réalisation de l'ouvrage, le maître d'ouvrage fait établir et compléter par le coordonnateur un dossier rassemblant toutes les données de nature à faciliter la prévention des risques professionnels lors d'interventions ultérieures (articles L.4532-16 et R.4532-95 et suivants du Code du travail). Ce document obligatoire est appelé dossier d'intervention ultérieure sur l'ouvrage (DIUO).

Concernant l'aérogénérateur, les prescriptions sur les interventions ultérieures figurent dans la notice d'instructions de l'éolienne : celle-ci doit comporter, entre autres, (extrait de l'annexe I à l'article R.4312-1 du Code du travail, point 1.7.4) :

- ▶ la description des opérations de réglage et d'entretien à effectuer par l'utilisateur, ainsi que les mesures de prévention à respecter ;
- ▶ les instructions conçues afin que le réglage et l'entretien puissent être effectués en toute sécurité, y compris les mesures de protection à prendre durant ces opérations ;
- ▶ les spécifications concernant les pièces de rechange à utiliser, lorsque cela a une incidence sur la santé et la sécurité des opérateurs.

1.2.3 Les particularités du secteur éolien

Mise en place d'une coordination SPS

La réglementation relative aux opérations de bâtiment et de génie civil en matière de coordination SPS est applicable au parc éolien.

L'application de cette réglementation dans le secteur éolien présente une particularité dans la mesure où la phase de conception aboutit au montage d'un aérogénérateur qualifié de « machine » par la réglementation et non pas à la conception d'un « ouvrage » (au sens de construction immobilière). En conséquence, le DIUO doit intégrer les prescriptions concernant les interventions prévisibles sur l'aérogénérateur qui figurent dans la notice d'instructions de la machine.

Par rapport à un chantier « classique » de bâtiment ou de génie civil, la spécificité de la coordination de chantier sur un parc éolien se manifeste principalement lors de la phase de montage de l'éolienne. Les phases de terrassement et de réalisation des fondations de l'éolienne exposent quant à elles à des risques similaires à ceux identifiés sur un chantier de construction d'un immeuble.

Contrôle technique au titre du Code de la construction et de l'habitation

En vertu de l'article R.111-38 6° du Code de la construction et de l'habitation, les opérations de construction d'éoliennes dont la hauteur du mât et de la nacelle au-dessus du sol est supérieure ou égale à 12 mètres sont soumises à contrôle technique par un contrôleur agréé par le ministère en charge de la construction. Ce contrôle technique obligatoire porte sur la solidité des ouvrages et la sécurité des personnes.

Montage de l'aérogénérateur

La phase de montage de l'aérogénérateur présente des spécificités liées à la configuration de la machine, au poids des éléments la composant, au dimensionnement des équipements de levage, aux contraintes climatiques (vent, neige...). La phase de montage requiert donc l'intervention d'équipes qualifiées et spécialisées dans ce type d'opération et d'entreprises de levage ayant une expérience confirmée.

Les opérations de levage des éléments devant être assemblés requièrent une attention particulière, du fait des dimensions des éoliennes (voir 1.3.1). À titre d'exemple, les ordres de grandeur des charges à soulever sont les suivants (selon les modèles d'aérogénérateur) :

- ▶ un mât de 100 mètres de haut pèse environ 250 tonnes (réparties en 3 à 6 sections) ;
- ▶ une pale mesure de 45 à plus de 75 mètres et peut atteindre 8 tonnes ;
- ▶ la nacelle pèse plusieurs dizaines de tonnes (20 à 80 tonnes) et mesure plus de 20 mètres de long ;
- ▶ la masse du rotor peut atteindre 40 tonnes ;
- ▶ les grues de levage utilisées peuvent avoir des capacités de 120 tonnes.

Le fabricant de l'aérogénérateur, comme tout fabricant de machine, doit fournir à l'acquéreur une notice d'instructions en français. Cette notice doit contenir « *les instructions de **montage, d'installation et de raccordement**, y compris les plans, les schémas, les moyens de fixation et la désignation du châssis ou de l'installation sur laquelle la machine est prévue pour être montée* » ainsi que « *les instructions permettant de faire en sorte que les opérations de transport, de manutention et de stockage soient effectuées en toute sécurité* » (extrait du point 1.7.4.2 des règles techniques de l'annexe mentionnée à l'article R.4312-1 du Code du travail - contenu de la notice d'instructions).

En particulier, pour les opérations de levage, un plan de levage sera remis au CSPS et au développeur faisant figurer notamment :

- ▶ le positionnement des camions et des grues ;
- ▶ la zone de stabilisation pour les appareils de levage et ses caractéristiques ;
- ▶ les rayons d'action avec la charge associée pour la grue considérée dans la configuration considérée ;
- ▶ les vitesses de vent limite de travail pour chaque charge en tenant compte de la masse et de la surface exposée au vent.

1.3 L'aérogénérateur

1.3.1 Descriptif d'un aérogénérateur

Les éoliennes sont des systèmes qui convertissent l'énergie cinétique du vent en une autre énergie. Parmi elles, celles qui produisent de l'énergie électrique sont appelées aérogénérateurs.

Il existe différents types d'aérogénérateur (à axe vertical ou horizontal, à une ou plusieurs pales de formes variables, synchrone ou asynchrone...).

Les aérogénérateurs utilisés dans les parcs éoliens industriels sont généralement des aérogénérateurs à trois pales et à axe horizontal, tels que ceux décrits dans ce paragraphe.

La réglementation ICPE donne la définition suivante de l'aérogénérateur : « *dispositif mécanique destiné à convertir l'énergie du vent en électricité, composé des principaux éléments suivants : un mât, une nacelle, un rotor comprenant les pales, ainsi que, le cas échéant, un transformateur* ». Ces éléments sont représentés sur la [figure 4](#).

Le **mât**, parfois appelé tour ou fût, est la structure (en métal ou en béton ou les deux) qui soutient la nacelle. D'une hauteur comprise entre 40 et 150 m, il assure, d'une part, l'ancrage et la stabilité de l'éolienne, et il permet, d'autre part, de placer le rotor à une hauteur suffisante pour être entraîné par un vent plus régulier et plus fort qu'au niveau du sol. Certains équipements ou composants électriques sont placés à l'intérieur du mât (par exemple transformateur électrique, baie de commande...).

La **nacelle** est constituée d'un bâti (en matériau composite) placé au sommet du mât et qui contient les éléments permettant de produire l'électricité (tels que la génératrice, le multiplicateur si nécessaire, le système d'orientation de la nacelle...). Au-dessus de la nacelle, se trouvent des équipements de mesure des conditions extérieures (girouette, anémomètre, capteurs de température...) et le balisage lumineux d'obstacle pour la navigation aérienne.

Le **rotor** est la partie tournante de l'éolienne. Il est constitué du moyeu, des pales et d'un axe principal. Le moyeu (« nez » de l'éolienne, également appelé *hub*) raccorde les pales à l'axe principal. Les **pales**, généralement au nombre de trois, sont en matériaux composites et mesurent de 15 mètres à plus de 75 mètres. Lorsque l'orientation des pales par rapport au moyeu est modifiable pendant le fonctionnement, l'aérogénérateur est dit « à pas variable ».

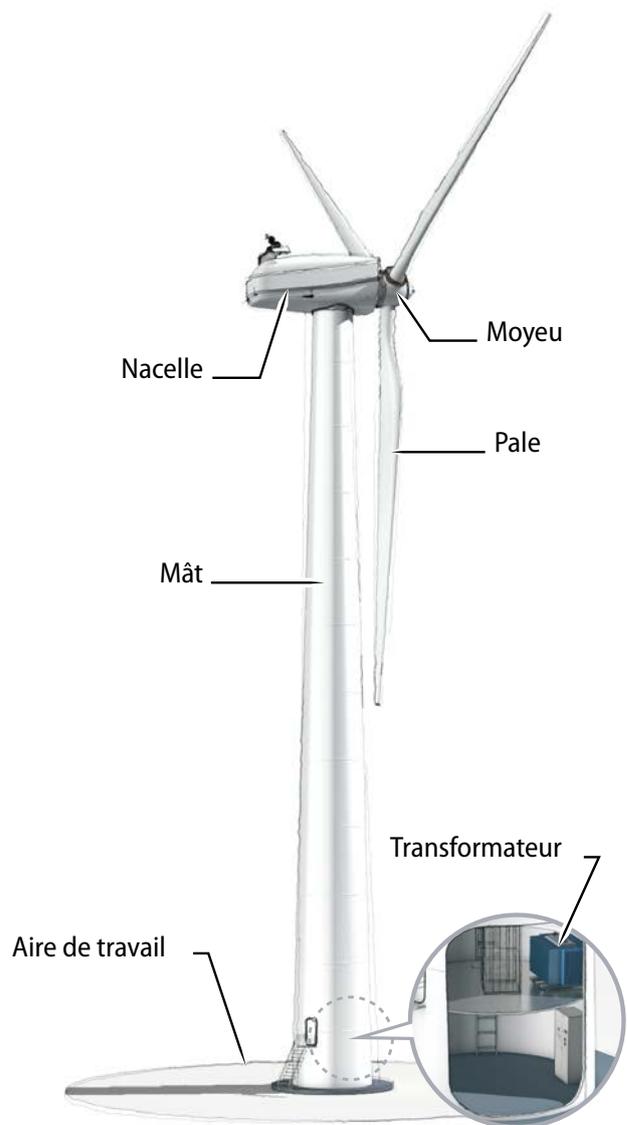


Figure 4 – L'aérogénérateur

Le **transformateur** permet de convertir le courant électrique produit en un courant qui pourra être injecté sur le réseau. Il peut être placé dans la nacelle ou au niveau du sol à l'intérieur ou à l'extérieur du mât.

L'aérogénérateur repose sur une **aire de travail** ou plateforme. Cette surface permet la mise en place des moyens de levage et le déplacement d'engins lourds lors du montage. Elle reste à demeure pour permettre le déplacement des véhicules et engins en phase d'exploitation.

1.3.2 Fonctionnement d'un aérogénérateur

Un aérogénérateur fonctionne sur le même principe qu'une dynamo : la rotation des pales exposées au vent fait tourner le rotor. Cette rotation permet à une génératrice de produire un courant électrique.

1. Pour une production optimale, la nacelle doit être orientée face au vent. À cet effet, la majorité des éoliennes sont équipées d'un dispositif de rotation, dit *yaw drives*, composé de plusieurs moteurs électriques, qui permet d'orienter l'axe du rotor en position favorable.
2. La rotation des pales entraîne la rotation du rotor de la génératrice, soit de façon directe (aérogénérateur à entraînement direct ou *gearless*), soit par l'intermédiaire d'un multiplicateur (qui joue le rôle de boîte de vitesse de l'éolienne).
3. La génératrice transforme l'énergie mécanique de rotation en énergie électrique.
4. Le courant électrique produit est ensuite transformé pour pouvoir être injecté dans le réseau.

Ce fonctionnement est fortement lié aux conditions de vent : la vitesse du vent doit être suffisamment élevée pour permettre la production d'électricité mais pas trop, pour ne pas dépasser la résistance ni les capacités mécaniques de l'éolienne. Les aérogénérateurs fonctionnent en général pour des vitesses de vent comprises entre 3 et 25 m/s (soit entre 10 et 90 km/h). Les éoliennes à pas variable font varier le pas des pales selon la vitesse du vent pour maximiser le rendement énergétique de l'éolienne. Lorsque le vent est trop fort, l'aérogénérateur se met à l'arrêt pour ne pas exposer l'équipement aux contraintes mécaniques élevées et aux dommages potentiels qui s'ensuivraient.

La plupart du temps, l'éolienne fonctionne de manière automatique et sans intervention humaine.

Le système Scada¹⁰ installé sur le parc permet de recueillir, pour chaque aérogénérateur, les informations relatives à la production (tension, intensité du courant produit, puissance, température, pression d'huile dans la boîte de vitesse etc.), aux conditions de vent (vitesse, direction), et aux conditions de fonctionnement (état des alarmes). Toutes ces informations sont ensuite envoyées dans un centre de commande à distance où elles sont traitées pour détecter les éventuelles intrusions ou pannes, connaître l'état de fonctionnement de chaque éolienne en temps réel et comparer les performances de chaque éolienne. L'exploitant du parc peut alors optimiser sa production. En couplant les informations recueillies avec les informations météorologiques, il peut également fournir des prévisions de production et prévoir les opérations de maintenance.

Lorsqu'un dysfonctionnement est détecté, une action à distance est réalisée depuis le centre de commande. Si celle-ci est inopérante, une alerte est alors envoyée à l'exploitant qui avertit les équipes du maintenancier situées à proximité du parc pour intervention (par exemple pour redémarrer le système de communication, acquitter un défaut ou effectuer un dépannage).

¹⁰ Scada (Supervisory Control And Data Acquisition) : système de contrôle et d'acquisition de données.



2. Conception du parc et prévention des risques professionnels

Quel que soit le secteur d'activité industrielle, la prévention des risques professionnels et plus largement l'amélioration des conditions de travail s'accompagnent généralement de gains de productivité, de qualité, de diminution des dysfonctionnements et de facilitation des opérations de maintenance.

L'intégration de ces enjeux en amont de la conception du parc éolien aura des retentissements importants perceptibles durant toute sa phase d'exploitation.

2.1 Prise en compte de la prévention des risques professionnels dans la phase de développement

2.1.1 Impact du développement du projet sur la santé et la sécurité

La qualité des réflexions menées lors du développement du projet éolien impactera l'ensemble du projet et particulièrement la santé et la sécurité des travailleurs amenés à travailler sur le parc en phase d'exploitation. L'activité de maintenance notamment peut présenter des risques importants pour les intervenants et éventuellement pour des tiers.

La prévention des risques doit être intégrée le plus en amont possible afin de :

- ▶ mener les réflexions « à froid », pour éviter la mise en place de mesures correctives dans l'urgence ;
- ▶ limiter les corrections ultérieures palliatives, souvent coûteuses et difficiles à mettre en œuvre ;
- ▶ envisager, pour chaque situation de travail, différents scénarios de risques et choisir le plus approprié ;
- ▶ mieux gérer l'enveloppe budgétaire globale : un éventuel surcoût de conception connu et anticipé a un impact moindre sur le budget global qu'une action corrective et imprévue.

2.1.2 Approche pour intégrer la santé et la sécurité au développement du projet

Actions à mener et acteurs

Pour être menée à bien, l'intégration de la prévention des risques professionnels lors de la conception du parc nécessite de :

- ▶ définir clairement les besoins et les fonctionnements attendus (sans dissocier les aspects de santé et sécurité au travail des objectifs techniques) ;
- ▶ s'appuyer sur la connaissance du travail réel ;
- ▶ prendre en compte certains points-clés incontournables précisés ci-après.

Ces actions requièrent une connaissance des activités et des contraintes réellement présentes sur le parc éolien. Or le propriétaire du parc n'est pas toujours un professionnel de l'éolien. En conséquence, il lui est conseillé de faire appel à un développeur éolien « de métier », qui connaît les activités réelles d'un parc et pourra utiliser le retour d'expérience sur des projets similaires.

Les opérations réalisées lors de l'exploitation du parc éolien sont souvent effectuées par des entreprises extérieures. Au fil des années, ces dernières ont acquis une réelle connaissance (théorique et pratique) des installations : il est indispensable de les associer au projet.

Ainsi, dans le cadre d'une approche globale des situations de travail, il est souhaitable que le maître d'ouvrage s'entoure d'un groupe de travail pluridisciplinaire constitué des représentants des différents acteurs (développeur, turbiniers, futurs exploitants du parc, futurs mainteneurs...).

Analyse des besoins du maître d'ouvrage

Même si l'objectif est toujours de produire de l'électricité, les besoins des propriétaires de parc ne sont pas tous les mêmes : un agriculteur, une collectivité locale, ou un investisseur financier n'auront pas les mêmes attentes vis-à-vis du projet. Par exemple, certains envisageront la rentabilité *stricto sensu*, d'autres souhaitent l'autonomie électrique à échelle locale, ou encore une alternative ou un complément aux énergies traditionnelles.

Ces différents profils de propriétaires conduisent à des besoins différents. L'analyse de ces besoins va guider la rédaction des cahiers des charges fonctionnels et techniques. C'est pourquoi il est indispensable de les exprimer.

L'analyse des besoins doit permettre de :

- ▶ définir les fonctionnements attendus du parc éolien : quelle est la production attendue ? Intervient-elle en complément d'une autre énergie ? Selon la localisation du site, quels sont les délais prévisibles de déplacement des équipes de maintenance ? Par quels réseaux la production sera-t-elle distribuée ?
- ▶ confronter les besoins exprimés aux contraintes réelles (organisationnelles, techniques, environnementales, climatiques, réglementaires, financières...)
- ▶ traduire les besoins exprimés en termes fonctionnels et de performance : localisation, nombre de machines, puissance, technologies utilisées...
- ▶ clarifier les attentes du propriétaire vis-à-vis des différents acteurs du projet (développeur, entreprises de génie civil, turbiniers etc.).

Une analyse des besoins réussie facilite la prise de décisions et permet de faire les bons choix : économiques, techniques, environnementaux...

La réflexion concernant la prévention des risques professionnels ne doit pas être dissociée de celle relative aux objectifs techniques attendus. En effet, les choix retenus pour atteindre les objectifs de production ont une influence sur la santé et la sécurité des intervenants en phase d'exploitation. Chaque situation de travail envisagée lors de l'analyse des besoins est à traiter de manière globale, en incluant les impératifs fonctionnels, techniques, ergonomiques et de sécurité.

Voici quelques **exemples de mesures de prévention intégrées** dès la conception du projet :

- ▶ repérage sur site : signalisation des aérogénérateurs et panneautage sur site ;
- ▶ prévision d'un élargissement des pistes au niveau des accès (en entrée et sortie de piste) afin de favoriser la visibilité (prévention du risque routier) ;

- ▶ mise en place de rampe d'accès et d'aires de stationnement pour les véhicules au pied de chaque machine afin de faciliter la manutention (les accès au pied de la machine peuvent difficilement être modifiés ultérieurement en raison des contraintes foncières) ;
- ▶ prévision des coûts de maintien en état des plateformes de levage au pied de l'éolienne afin d'éviter des travaux importants de génie civil pour des opérations de maintenance lourdes ;
- ▶ intégration de système de communication dans l'éolienne afin de pallier l'absence de réseau mobile ;
- ▶ installation d'élévateurs de personnes ou autres systèmes d'aide à la montée de personnes dans l'aérogénérateur (l'installation a posteriori d'un élévateur de personnes n'est pas envisageable techniquement).

Capitalisation de l'expérience

L'apport de connaissances sur les activités réelles est un élément essentiel à l'analyse des besoins. Cela permet de confronter les besoins exprimés par le maître d'ouvrage aux réalités du terrain et d'en déduire des spécifications concrètes. Il convient de placer les exploitants au cœur de la réflexion et d'analyser chaque situation de travail envisagée. S'appuyer sur des situations effectivement rencontrées et explorer plusieurs solutions enrichissent la réflexion.

La connaissance de l'existant (c'est-à-dire du fonctionnement de parcs éoliens similaires) permet de formuler des demandes réalistes dans les cahiers des charges. Le retour d'expérience permet de profiter des expériences passées, pour en retenir les aspects positifs tant sur le plan technique que méthodologique.

Voici quelques exemples illustrant **l'apport significatif du retour d'expérience** en phase de conception du parc éolien :

- ▶ il est utile de prévoir un dimensionnement suffisamment important de la plateforme au pied de l'éolienne afin :
 - de pouvoir accueillir les grues nécessaires y compris lors de l'exploitation,
 - de permettre aux camions de manœuvrer aisément lors de la livraison de composants de grande dimension (pales, éléments du fût, génératrice...)
- ▶ dans certaines situations, un enrochement ou des merlons de terre sont à prévoir autour de la plateforme afin de la protéger des passages de camions et des engins agricoles ;
- ▶ un remblaiement complet au droit des escaliers d'accès doit être réalisé pour éviter une hauteur de marche importante et ainsi faciliter l'accès à l'intérieur de l'éolienne ;
- ▶ certains équipements de protection en acier peuvent être remplacés par des équipements en aluminium afin de les alléger et de faciliter leur démontage ;
- ▶ des bacs de réception des câbles électriques d'élévateurs peuvent être conçus et installés pour éviter un enroulement ou un arrachement de ces câbles ;
- ▶ le remplacement des accumulateurs des balises aériennes (*flashlight*) installées sur le toit de la nacelle doit être envisagé dès la phase de conception ainsi que la déportation de l'électronique dans l'armoire de contrôle (au pied ou dans la nacelle de l'éolienne).

Formalisation des résultats de la réflexion

La prise en compte de la prévention des risques professionnels dans la conception du parc peut se matérialiser sous différentes formes et les pratiques diffèrent selon les développeurs : document spécifique d'analyse des risques a priori, intégration de l'analyse des risques au document d'analyse du besoin du maître d'ouvrage...

Les résultats des réflexions doivent se retrouver dans les différents documents qui jalonnent le projet. Par exemple, les besoins, exprimés en termes fonctionnels et de performance, les usages attendus, ainsi que les contraintes identifiées lors de l'analyse serviront de base à la rédaction des appels d'offres et des cahiers des charges transmis aux différents acteurs

(turbinières, entreprises de génie civil, entreprises d'électricité...). Ces cahiers des charges doivent inclure à la fois les exigences techniques et celles relatives à la santé et la sécurité.

2.2 Principaux points de vigilance en santé et sécurité pour la conception du parc

Toute solution technique mise en œuvre doit être analysée sous l'angle des conséquences qu'elle aura en matière de prévention des risques professionnels. Cependant, certains points-clés demandent une attention particulière et doivent impérativement faire l'objet d'une réflexion approfondie afin d'assurer la santé et la sécurité des travailleurs qui interviendront sur le parc. Il s'agit :

- ▶ du choix et de l'aménagement du site ;
- ▶ de l'aménagement des aires de travail au pied des éoliennes ;
- ▶ de la conception du poste de livraison ;
- ▶ des ambiances de travail ;
- ▶ du risque électrique ;
- ▶ de la conception et du choix des aérogénérateurs¹¹ ;
- ▶ du travail isolé.

Cette liste n'a pas vocation à être exhaustive. Elle permet toutefois de mettre l'accent sur certains points essentiels de la conception d'un parc éolien.

2.2.1 Caractéristiques et aménagement du site

Caractéristiques du site

Le choix du site dépend prioritairement de la carte des vents. Toutefois, les caractéristiques relatives à la situation géographique du site retenu sont susceptibles d'impacter la santé et la sécurité des futurs travailleurs. Les éléments suivants devront, dans la mesure du possible, être pris en considération pour faciliter les interventions en phase d'exploitation :

- ▶ la couverture du parc par les réseaux de téléphonie mobile : une bonne couverture facilite la communication et les conditions d'intervention des services de secours en cas de besoin (les procédures d'urgence sont à mettre en place en collaboration avec les services départementaux d'incendie et de secours) ;
- ▶ la possibilité d'implanter un centre technique ou une base de maintenance à proximité : cette proximité réduira l'exposition au risque routier en diminuant les distances à parcourir et contribuera à améliorer les conditions de travail (local chauffé ou climatisé pour procéder aux activités de *reporting* en phase d'exploitation, installations sanitaires, point d'accès à l'eau potable, stocks de matériels pour les activités de maintenance...).

Aménagement des accès au parc

La réglementation ICPE prévoit que le site dispose en permanence au minimum d'une voie carrossable. Généralement des chemins agricoles sont aménagés en pistes de desserte des éoliennes.

Les voies d'accès (voies publiques) et les pistes desservant les éoliennes à l'intérieur du parc éolien seront empruntées :

- ▶ durant les opérations de construction par les véhicules et engins de chantier,
- ▶ durant la phase d'exploitation du parc par les opérateurs de maintenance des éoliennes, les entreprises en charge de l'entretien de la voirie sur le site et les services d'incendie et de secours.

¹¹ La conception des aérogénérateurs est traitée en partie 3 de ce document.



En intégrant **les dimensions des véhicules** amenés à y circuler et celles de leur chargement, les contraintes liées au transport des éléments d'éoliennes et les conditions climatiques, l'analyse des risques orientera les choix concernant :

- ▶ le positionnement des éoliennes sur le parc ;
- ▶ le tracé des pistes d'accès aux éoliennes et leurs caractéristiques (largeur, pente, type de revêtement...), afin de faciliter ou d'éviter les croisements d'engins (instauration de sens uniques pour les véhicules à gros gabarit), d'éviter les risques de retournement de véhicules et d'enlèvement et de résister aux détériorations liés aux intempéries ;
- ▶ le plan de circulation sur l'ensemble du parc (sens de circulation, aire de retournement, zone de stationnement et de stockage, limitation de la vitesse, délimitation lors du chantier des zones de circulation des piétons, des véhicules légers et engins...).

Le réseau routier du parc ainsi créé devra ensuite faire l'objet d'une **signalisation adéquate** pour permettre les déplacements aisés et l'intervention rapide des secours sur le parc :

- ▶ repérage non équivoque apposé sur chaque éolienne, visible à distance ;
- ▶ création d'un plan d'ensemble présentant le plan de circulation du parc (avec indication des voies, des éoliennes, du ou des postes de livraison et de la base de maintenance sédentaire si elle est suffisamment proche) ;
- ▶ mise en place d'une signalisation et d'un balisage tout au long des routes (entrée, circulation intérieure, sortie).

Les caractéristiques des voies carrossables sont incluses dans le dossier de demande d'autorisation ICPE soumis aux services départementaux d'incendie et de secours (SDIS) pour avis. Ces routes doivent notamment permettre l'intervention éventuelle des sapeurs-pompiers et la circulation de leurs véhicules. Si les routes ne permettent pas la circulation en double sens, des aires de dégagement à intervalles réguliers doivent être prévues pour permettre le croisement des véhicules. Il est conseillé de consulter les SDIS car leurs recommandations de dimensionnement des accès sont susceptibles de varier. De plus, lors de la phase d'exploitation, il est possible de demander au SDIS le classement du parc éolien en établissement répertorié (Eta.Ré. ou Etare)¹². Plusieurs parcs peuvent être présents sur la même commune, l'identification du parc, le panneautage du site et la numérotation des éoliennes sont donc essentiels pour les services de secours en complément des coordonnées GPS.

Toutes les zones où des poids lourds (y compris PEMP – plateformes élévatrices mobiles de personnes - et grues) sont amenés à circuler ou stationner doivent être adaptées aux contraintes spécifiques en termes de roulage et de charge à l'essieu. La contrainte tient en particulier au poids et à la charge des véhicules de convoi exceptionnel utilisés pour le transport des pales, segments de mât, turbines, grue... En termes de dimensionnement, la chaussée doit être stabilisée, avec une surface la plus uniforme possible, le rayon de braquage doit être calculé pour permettre le passage des convois exceptionnels, soit, à titre d'exemple, une largeur de 4 m, une charge de 12 t par essieu et des courbes de 28 m de rayon. Les spécifications sont données par les turbiniers en fonction des dimensions des éléments à convoier. À noter : des zones de manœuvre doivent être prévues pour fermer les remorques extensibles ; certaines de ces zones seront ensuite requalifiées en aires de travail pour l'exploitation.

2.2.2 Aménagement des aires de travail au pied des éoliennes

L'analyse des risques liés à la conception des aires de travail au pied des éoliennes doit faire ressortir :

- ▶ les risques liés à la circulation des engins, des véhicules et des piétons ;
- ▶ les risques de chute lors des déplacements sur les aires de travail ;
- ▶ les risques liés aux manutentions sur ces aires.

¹² Un Etare est un établissement jugé sensible par les services d'incendie et de secours. Il fait l'objet d'un plan d'établissement répertorié (PER ou plan Etare) contenant les plans et dispositions opérationnelles spécifiques permettant aux sapeurs-pompiers d'organiser les secours. Le plan Etare est rédigé sur la base des informations transmises par l'exploitant du parc éolien.

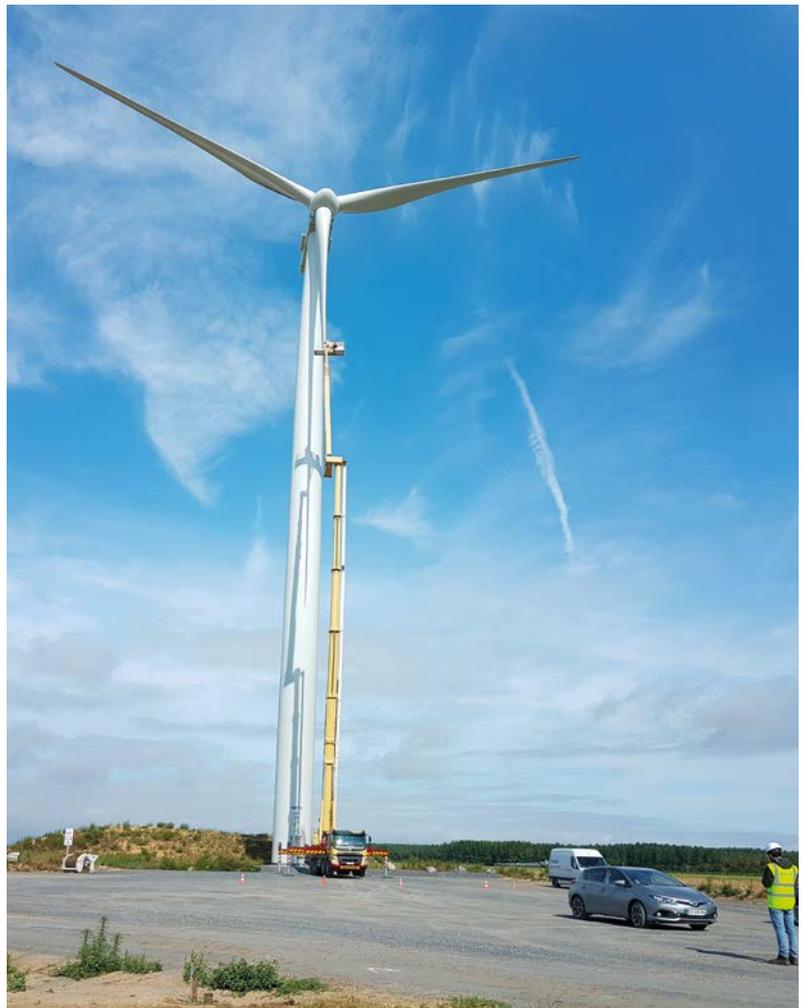
Déplacement des engins et véhicules

Certaines opérations réalisées sur les aires situées au pied des machines nécessitent l'utilisation d'engins ou de véhicules (véhicules utilitaires, camions citernes, grues, plateformes élévatrices...).

La conception des aires doit tenir compte des caractéristiques de ces engins pour permettre leur utilisation en sécurité. Pour cela :

- ▶ le dimensionnement des aires doit tenir compte des dimensions des véhicules et engins mais aussi des rayons de braquage et autres paramètres qui permettront les déplacements et manœuvres ;
- ▶ lors de la conception de la plateforme, il faut éviter de créer un dénivelé susceptible de générer des risques lors de la circulation. Si ce n'est techniquement pas possible, il convient de signaler le risque de chute et de mettre en place les dispositifs appropriés (blocs de béton ou autres obstacles) pour éviter la chute d'engins ;
- ▶ les calculs de génie civil, comme par exemple les calculs de résistance des plateformes de grutage, doivent être réalisés en utilisant les données recueillies lors de la conception des voies d'accès au site.

En phase de construction du parc, les essais de plaques pour les opérations de grutage font partie de la réception des travaux et peuvent être répétés si le levage intervient après une période climatique susceptible d'avoir affecté la structure du sol (pluies abondantes, gel et dégel...).



Chutes de plain-pied

Les accidents de plain-pied (glissades, trébuchements, chutes, faux-pas...) sont dus à la conjonction de plusieurs facteurs de risques (environnementaux, matériels, organisation du travail...). Il est important d'identifier ces facteurs afin de permettre, d'une part, les opérations de chargement et de déchargement nécessaires, et d'autre part, un accès sécurisé aux éoliennes et au poste de livraison. Le concepteur des aires de travail devra donc :

- ▶ prévoir un espace aménagé suffisant au pied des éoliennes et dans les postes de livraison ;
- ▶ éviter les obstacles et les marches inutiles ;
- ▶ prévoir des moyens d'accès aux aires de travail adaptés aux tâches à réaliser (rampes ou escalier d'accès) ;
- ▶ prévoir des protections collectives (garde-corps) autour des aires de travail lorsque cela est nécessaire ;
- ▶ choisir un revêtement de sol adapté et des matériaux en adéquation avec les conditions climatiques ;

- 
- ▶ prévoir un éclairage suffisant (de l'ordre de 75 lux¹³) de la zone de circulation, de préférence à l'aide d'un dispositif installé à demeure permettant l'éclairage lors des phases d'intervention.

Le concepteur des aires de travail trouvera des informations utiles dans la série de normes NF EN ISO 14122 traitant des moyens d'accès permanents aux machines. Ces documents s'appliquent aux moyens d'accès qui font partie intégrante d'une machine mais peuvent également servir de référence pour les moyens d'accès aux parties du bâtiment (par exemple plateformes de travail, passerelles, échelles) où la machine est installée, ce qui est le cas pour les aires de travail situées en pied d'éoliennes. On trouve dans ces normes des moyens permettant d'intégrer la prévention des risques lors de la conception des plateformes de travail et passerelles, mais aussi lors de la conception des escaliers, échelles à marches et garde-corps, ainsi que des échelles fixes.

Manutentions et postures contraignantes

La conception et l'aménagement des aires de travail doivent permettre de limiter les efforts physiques et de réduire les risques liés au port manuel de charges ainsi que les risques générés par l'approvisionnement en équipements de travail et produits nécessaires au fonctionnement et à la maintenance des éoliennes.

Le concepteur s'attachera à :

- ▶ prendre en compte les activités de manutention dès la conception du parc en prévoyant des zones dimensionnées et aménagées pour le déplacement des charges ;
- ▶ permettre l'utilisation d'aides techniques adaptées (hayons, diables, chariots, etc.) pour les manutentions de charges ;
- ▶ tenir compte de la position du palan : son installation à l'intérieur ou à l'extérieur du mât modifie de façon sensible l'organisation des manutentions ;
- ▶ réduire les distances de déplacement avec port de charges (par exemple en prévoyant le stationnement des véhicules au plus près des éoliennes lors des phases de chargement et déchargement).

De plus, le revêtement de l'aire de travail doit permettre la circulation en toute sécurité des piétons et l'utilisation des aides techniques à la manutention.

2.2.3 Conception du poste de livraison

Lorsque le parc dispose d'un poste de livraison commun à plusieurs aérogénérateurs, ce dernier abrite généralement deux locaux distincts : le poste de raccordement ou local « haute tension » qui assure le raccordement électrique du parc au réseau de distribution électrique et le local technique de communication.

Les équipements de raccordement électrique sont installés dans le local « haute tension » qui comprend différentes cellules assurant la livraison de l'électricité produite et son comptage, ainsi que les transformateurs et protections nécessaires au fonctionnement du parc. Le local « haute tension » doit respecter les normes de conception des installations électriques décrites ci-dessous.

Le local technique de communication permet de surveiller le fonctionnement des éoliennes, de collecter des données et de les envoyer au centre de commande distant. L'intérêt d'un tel système pour la prévention des risques professionnels est qu'il permet d'éviter certaines interventions sur site. Lors de la conception du local technique, il convient de prévoir des espaces de travail de taille suffisante, ainsi qu'un éclairage adapté (de l'ordre de 300 lux¹⁴). L'ergonomie des interfaces opérateurs est également un élément clé du dispositif. De plus,

¹³ La norme EN 12464-2 : « Lumière et éclairage — Éclairage des lieux de travail — Partie 2 : Lieux de travail extérieurs » donne l'état de l'art en matière d'éclairage des lieux de travail. Elle peut servir de référence pour l'éclairage des plateformes extérieures.

¹⁴ La norme EN 12464-1 : « Lumière et éclairage - Éclairage des lieux de travail - Partie 1 : Lieux de travail intérieurs » donne l'état de l'art en matière d'éclairage des lieux de travail. Elle peut toutefois être utilisée pour le poste de livraison.



lorsqu'une antenne de transmission des données vers le centre d'exploitation est utilisée, elle doit être conçue et implantée pour permettre sa maintenance en toute sécurité (notamment si elle est située en hauteur).

2.2.4 Prise en compte des ambiances de travail

Sur un parc éolien, certaines ambiances de travail (bruit, température, altitude...) sont susceptibles de porter atteinte à la santé et à la sécurité des travailleurs :

- ▶ atteintes auditives ;
- ▶ coups de chaleur ou hypothermie dus aux températures très chaudes ou très froides ;
- ▶ efforts rendus difficiles en altitude...

Ces environnements spécifiques de travail sont à prendre en compte lors de la conception du parc. Si le parc est situé en altitude, la mise en place des moyens de manutention mentionnés précédemment (voir en 2.2.2, « Manutentions et postures contraignantes ») permet de réduire les efforts physiques. Il est souhaitable de prévoir un local tempéré sur le parc ou à une distance raisonnable du parc pour permettre au personnel de se réhydrater ou de se réchauffer. L'aménagement d'une base vie sédentaire offrant toutes les commodités (point d'eau, cabinet d'aisance, local vestiaire, local chauffé ou climatisé...) permet de répondre à cette demande. Il peut s'agir d'une base-vie spécifique, du centre de maintenance, ou de tout autre local offrant des dispositions équivalentes (location d'un local dans une commune proche par exemple).

L'aérogénérateur fait également l'objet de dispositions constructives réglementaires relatives aux émissions sonores¹⁵ visant à la protection de la population.

L'exposition au bruit pour les travailleurs intervenant dans l'éolienne est traitée dans la partie 3 de ce document.

L'installation de dispositifs de contrôle et de commande à distance dès la conception du parc éolien (recueil de données, système d'identification des pannes...) contribue à réduire considérablement l'exposition à ces contraintes d'ambiance de travail.

¹⁵ Article 26 de l'arrêté de 26 août 2011 modifié ICPE.

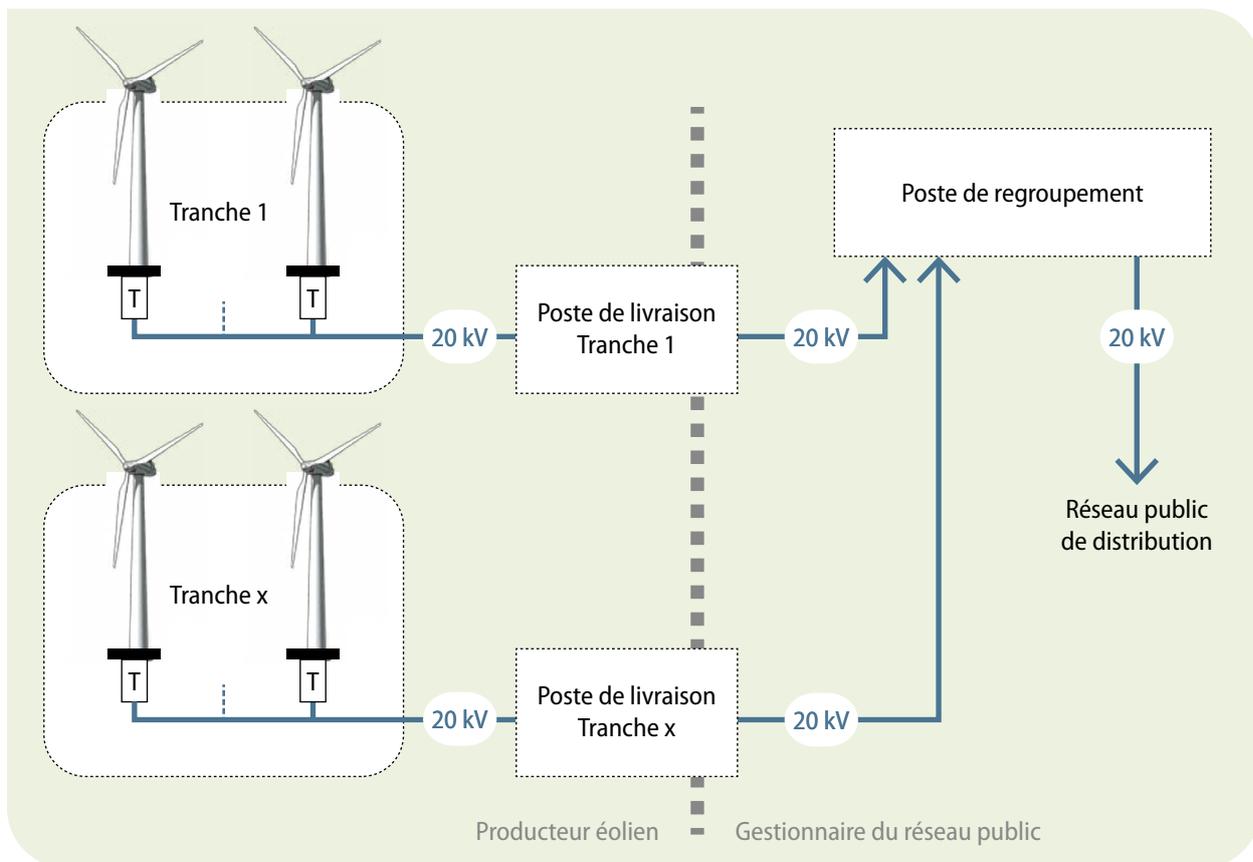


Figure 5 – Lien entre l'installation électrique du parc et le réseau externe

2.2.5 Prévention du risque électrique

Le risque électrique comprend le risque de contact, direct ou non, avec une pièce nue sous tension, le risque de court-circuit et le risque d'arc électrique. Ses conséquences peuvent être l'électrisation, l'électrocution, la brûlure, l'incendie...

L'installation électrique du parc éolien comprend l'installation électrique des aérogénérateurs, l'installation électrique reliant plusieurs aérogénérateurs au sein d'une même tranche et les postes de livraison (voir figure 5). Cette installation est ensuite raccordée au réseau externe de distribution d'électricité.

La prévention du risque électrique dépend de la conception des installations et de leur maintien en état. Les règles techniques de conception et de réalisation des installations figurent dans des normes d'installation. La réglementation ICPE indique ainsi que les installations électriques extérieures aux aérogénérateurs doivent être conformes aux normes suivantes :

- ▶ NF C15-100 relative aux installations à basse tension (jusqu'à 1000 V en courant alternatif et 1500 V en courant continu),
- ▶ NF C13-100 relative aux postes de livraison alimentés par un réseau public de distribution HTA (jusqu'à 33 kV),
- ▶ NF C13-200 relative aux installations électriques à haute tension (supérieure à 1000 V en courant alternatif et 1500 V en courant continu) – règles complémentaires pour les sites de production et les installations industrielles, tertiaires et agricoles.

Pour l'équipement électrique des aérogénérateurs et les risques liés aux champs électromagnétiques, voir en 3.2.5.

2.2.6 Travail isolé

La prise en compte de l'isolement des travailleurs concerne surtout la phase d'exploitation et repose essentiellement sur l'employeur. Mais une réflexion anticipée sur les situations de travail isolé durant la phase de conception est indispensable à la mise en œuvre de mesures de prévention appropriées, qu'elles soient d'ordre technique ou organisationnel.

Généralement, le travail isolé peut être qualifié comme la réalisation d'une tâche par une personne seule, dans un environnement de travail où elle ne peut être vue ou entendue directement par d'autres personnes et où la probabilité de visite est faible.

Dans le cadre des interventions sur un parc éolien et notamment pour les opérations de contrôle et de maintenance durant la phase d'exploitation du parc, les travailleurs interviennent en équipe à effectif très réduit (deux personnes le plus souvent). Cette situation ne répond pas strictement à la définition du travailleur isolé mais plutôt à celle d'un groupe de travailleurs isolé dans un parc éolien ; elle requiert la même démarche de prévention. De plus, la progression difficile dans l'éolienne accentue le sentiment d'isolement.

L'isolement en tant que tel d'un travailleur ou d'un groupe de travailleurs ne constitue pas en soi un risque. C'est la conjonction des risques présentés par la situation de travail (risque de chute de hauteur, risque d'électrocution...) et de l'isolement qui va constituer un facteur d'aggravation des dommages. Le travail isolé multiplie les contraintes et augmente la difficulté de secourir lorsqu'un incident ou un accident survient.

Parmi les mesures pouvant être mises en place, il est, dans la mesure du possible, souhaitable de **réduire le nombre de situations de travail isolé**. La mise en place de dispositifs de contrôle et de commande à distance (recueil de données, système d'identification des pannes...) permet de limiter le nombre d'interventions sur site.

Lorsque les interventions d'équipes à effectif réduit sont indispensables, d'autres mesures de prévention sont à mettre en œuvre. Celles-ci sont déterminées après analyse détaillée des situations de travail concernées. Par exemple, des procédures d'appel systématique à la salle de conduite en arrivant et en quittant le site peuvent être prévues.

Pour les parcs situés dans des zones où la réception téléphonique est défectueuse, un réseau complémentaire sera prévu dès la conception du parc éolien, par exemple en utilisant la VOIP¹⁶. Dans le cas d'un réseau de téléphonie fixe, des téléphones devront être installés dans les aérogénérateurs (en pied d'éolienne et dans la nacelle). Lors de l'exploitation, ces systèmes de communication pourront si besoin être complétés (par un système radio par exemple).

De plus, toutes les mesures visant à faciliter l'intervention des secours contribuent à limiter les conséquences du travail isolé. Ainsi, on veillera à assurer :

- ▶ une signalisation complète des accès aux éoliennes,
- ▶ un réseau d'accès clair et affiché dès l'entrée du site,
- ▶ une couverture du réseau de téléphonie de bonne qualité quelles que soient les conditions météorologiques.

L'exploitant ne pourra bénéficier de ces mesures que si elles ont été prévues et initiées lors de la phase de développement du parc.

¹⁶ VOIP (Voice over Internet Protocol) : technique qui permet de transmettre la voix et les flux multimédia sur des réseaux, en utilisant un protocole internet.



3. Conception des aérogénérateurs et collaboration développeur/turbinier

« Outils de production », les aérogénérateurs sont au cœur du projet éolien. L'exploitation et la rentabilité du parc reposent sur les éoliennes choisies lors de la conception, d'autant plus que ces machines ont une durée d'utilisation d'environ 20 ans.

Durant cette période, diverses personnes vont être amenées à travailler à l'intérieur ou à l'extérieur des éoliennes : techniciens de maintenance électrique et hydraulique, ajusteurs mécaniques, techniciens de maintenance des pales, personnes en charge des vérifications... La conception des aérogénérateurs est déterminante pour leur sécurité lors des interventions.

Cette troisième partie a pour objectif de montrer que la collaboration entre le développeur éolien et le turbinier est un réel levier pour la prévention des risques professionnels et contribue à intégrer la sécurité à la conception. Outre un rappel de la réglementation applicable aux éoliennes, les risques les plus spécifiques à ces machines sont décrits, ainsi que les mesures de prévention associées.

3.1 Échanges développeur/turbinier : levier pour la prévention des risques professionnels

Le développeur du projet éolien, bien qu'en charge de la conception du parc, n'a généralement pas la main sur la conception des éoliennes, qui est du ressort du fabricant. Il doit donc consulter les différents turbiniers (par un appel d'offres par exemple) et échanger avec eux pour acquérir les éoliennes qui répondent le mieux à ses besoins. Le document privilégié pour cela est le cahier des charges.

3.1.1 Échanges développeur/turbinier et cahier des charges

L'IRSST¹⁷ a publié une étude intitulée *Secteur éolien - Risques en santé et en sécurité au travail et stratégies de prévention*¹⁸. Il en ressort que les turbiniers, en leur qualité de fabricants, exercent un rôle majeur dans la définition des mesures de sécurité et de prévention. En plus de concevoir les machines, ils rédigent les documents techniques de travail et, de ce fait, influencent

¹⁷ Institut de recherche Robert-Sauvé en santé et en sécurité du travail (Québec).

¹⁸ Rapport R-820, IRSST, 2014 - www.irsst.qc.ca/publications-et-outils/publication/i/100751/n/secteur-eolien-r-820.

l'approche sécuritaire, la vision et la philosophie de prévention.

L'objectif, rappelé dans la réglementation relative aux machines en matière de santé et de sécurité, est que la machine puisse assurer sa fonction et être utilisée, réglée et entretenue sans exposer quiconque à un risque. L'intégration des conditions de travail doit être une préoccupation permanente du turbinière. Une étroite collaboration entre le développeur du parc et le turbinière est donc indispensable pour améliorer la prévention des risques liés aux aérogénérateurs.

Le premier lien entre le développeur et le turbinière a lieu lors de la consultation faite par le développeur et donc par le biais du cahier des charges. Très souvent, ce document n'est rédigé que dans le but de définir des exigences commerciales ou de production. Mais il doit avoir d'autres utilités : il servira pour la consultation des différents turbinières, puis comme support au dialogue entre le développeur et le turbinière retenu.

Qu'attend-on d'une éolienne ? De produire de l'électricité bien sûr, mais aussi de s'intégrer dans le paysage, d'être capable de résister aux conditions climatiques, de fonctionner en mode automatique avec commande à distance, d'être facilement maintenable... Toutes ces fonctions sont des exemples de besoins de l'utilisateur.

En matière de prévention des risques, il a été montré¹⁹ que, pour qu'une machine soit sûre, il est nécessaire (mais pas suffisant), qu'elle soit choisie en fonction des usages. Le choix des machines ne se limite pas à une simple comparaison de performances techniques ou de prix ! Il s'agit aussi de faire le meilleur choix pour permettre l'exploitation du parc en sécurité. C'est l'**analyse détaillée des besoins du futur exploitant** du parc qui permettra de définir les usages attendus et de rédiger le cahier des charges.

Pour réaliser cette analyse, le développeur pourra s'appuyer sur son vécu lors de projets similaires, sur le retour d'expérience d'exploitants en matière d'utilisation et de maintenance d'éoliennes, ainsi que sur l'historique des accidents et les données en sa possession en ce qui concerne la santé et la sécurité. Il est important d'être exhaustif dans la définition des fonctionnements attendus car, si une opération n'est pas prise en compte dans la conception d'une machine, l'opérateur sera obligé de s'adapter, de « faire avec », ou de trouver un moyen de travailler « quand même ». Sa sécurité ne sera alors pas prise en compte à la conception de la machine, il devra l'assurer seul.

Un **dialogue autour du cahier des charges** doit être instauré durant toute la phase de développement : le concepteur des éoliennes peut se faire préciser certains points, le maître d'ouvrage ou le développeur examiner les solutions techniques envisagées et les modes opératoires prévus. À ce stade, les exigences liées à la sécurité en phase d'exploitation doivent être anticipées : moyens d'accès, ambiances physiques de travail, charge physique, traitement cognitif de l'information... Les retours d'expérience viennent enrichir le cahier des charges : modification d'accès à un point d'intervention situé dans la nacelle de l'éolienne pour faciliter la

LE CAHIER DES CHARGES

Le document INRS ED 6231 *Réussir l'acquisition d'une machine ou d'un équipement de travail* propose une démarche et des conseils pour réussir le processus d'achat en intégrant la santé et la sécurité des utilisateurs, les exigences techniques de la future machine et les usages attendus. Ce guide constitue également une aide à la rédaction du cahier des charges de consultation des fournisseurs.

Il est recommandé que les exigences explicites et implicites de l'utilisateur soient exprimées sous forme de fonctions (fonctionnements attendus et contraintes). Elles doivent couvrir les phases de vie de l'éolienne allant du transport et de l'installation jusqu'au démantèlement.

Cette rédaction sous une forme fonctionnelle doit permettre de faire émerger des solutions pertinentes, efficaces et sûres. Toutefois, il ne s'agit pas pour le développeur d'imposer d'emblée une solution au turbinière, ce qui reviendrait à se positionner en concepteur et à en assumer les obligations.

De plus, il convient de caractériser chaque fonction par des critères vérifiables relatifs aux résultats et usages attendus. Ces critères permettront au développeur de faire son choix parmi les propositions des turbinières consultés.

19 Voir l'article de Bruno Daille-Lefèvre et Rémy Roignot : « Acquérir une machine : de l'importance du cahier des charges » publié au sein du dossier « De la conception au recyclage d'une machine, la sécurité avant tout », revue HST n° 245 de l'INRS – Téléchargeable sur www.hst.fr.



maintenance, déplacement de certains appareils de mesures, automatisation et commande à distance de certaines opérations, ajout de points d'ancrage... Sur l'ensemble de ces points, et parce qu'il connaît les machines, le développeur est force de proposition. Charge à lui d'en faire part au turbinier qui étudiera alors la faisabilité technique et concevra ou fera évoluer sa machine en conséquence.

Le dialogue permet au développeur de mieux comprendre les limites et les contraintes de conception. De son côté, le turbinier bénéficiera de l'expérience des exploitants ou des entreprises de maintenance : il pourra alors rendre ses machines plus sûres et attrayantes pour les acheteurs et en retirer un avantage vis-à-vis de ses concurrents.

Le cahier des charges évolue en fonction des échanges. Une fois que le choix du turbinier est arrêté, ce document, dans sa version définitive, doit être annexé à la commande pour le rendre contractuel.

3.1.2 Analyse des risques et intégration de la sécurité

La réglementation applicable à la conception des machines, combinée à celle relative à la conception des parcs éoliens, rappelle certaines obligations que doivent remplir les fabricants d'aérogénérateurs. Les règles techniques applicables aux machines (et donc aux éoliennes) vont dans le sens d'une intégration de la sécurité le plus en amont possible de la conception des aérogénérateurs afin de garantir un niveau de protection de la santé et de la sécurité maximal lors des interventions en phase exploitation et maintenance.

Le turbinier a notamment l'obligation de réaliser une évaluation des risques et de prendre en compte les résultats de cette évaluation pour concevoir sa machine. Le document d'évaluation des risques fait partie du dossier technique de la machine, exigé par la réglementation. Le fabricant doit le tenir à disposition des autorités nationales compétentes (notamment l'inspection du travail).

Focus sur la réglementation applicable aux aérogénérateurs

Les aérogénérateurs sont soumis à divers textes réglementaires. Les dispositions issues du Code de l'urbanisme et du Code de la construction portent respectivement sur le permis de construire et sur le contrôle technique obligatoire. Les dispositions issues du Code de l'environnement et du Code du travail sont présentées ci-après.

Code de l'environnement

Comme nous l'avons vu précédemment, les parcs éoliens terrestres sont soumis aux règles concernant les installations classées pour la protection de l'environnement (ICPE). L'objectif premier de ces textes est la protection de l'environnement ; toutefois, certaines de ces règles concernent la conception même des aérogénérateurs et touchent à la sécurité des personnes. En particulier, des dispositions constructives figurent dans les arrêtés du 26 août 2011²⁰ qui concernent les installations électriques à l'intérieur de l'aérogénérateur, la protection contre la foudre ou les systèmes de détection (incendie, survitesse, formation de glace).

²⁰ Arrêtés modifiés du 26 août 2011 relatifs aux installations de production d'électricité utilisant l'énergie mécanique du vent au sein d'une installation soumise à autorisation ou à déclaration au titre de la rubrique 2980 de la législation des installations classées pour la protection de l'environnement.

Code du travail

Outre les dispositions du Code de l'environnement, les dispositions du Code du travail relatives aux équipements de travail s'appliquent aux aérogénérateurs tant sur la partie conception²¹ que sur la partie utilisation.

Un aérogénérateur est en effet défini comme une machine²², à savoir un ensemble « composé de pièces ou d'organes liés entre eux dont au moins un est mobile et qui sont réunis de façon solidaire en vue d'une application définie ». Pour rappel, l'aérogénérateur comprend l'ensemble des éléments suivants : le mât, la nacelle, le rotor ainsi que, le cas échéant, le transformateur.

En conséquence les règles de mise sur le marché concernant les machines neuves s'appliquent et le fabricant a entre autres l'obligation de :

- ▶ veiller au respect des exigences essentielles de santé et de sécurité pertinentes ;
- ▶ constituer un dossier technique ;
- ▶ mettre à disposition la notice d'instructions ;
- ▶ rédiger et signer une déclaration CE de conformité ;
- ▶ et apposer le marquage CE sur l'équipement.

Les règles techniques (ou exigences essentielles de santé et de sécurité) à respecter lors de la conception d'une machine concernent notamment les points suivants :

- ▶ principes d'intégration de la sécurité ;
- ▶ ergonomie ;
- ▶ sécurité et fiabilité des systèmes de commande ;
- ▶ mesures de protection contre les risques mécaniques (arêtes et angles vifs, risques liés aux éléments mobiles, chute ou éjection d'objets, etc.).
- ▶ risques dus à d'autres dangers (risque électrique, températures extrêmes, incendie, explosion, bruit, vibrations, émissions de substances dangereuses, levage de charges et de personnes, chutes de hauteur, etc.) ;
- ▶ risques liés à la maintenance de la machine ;
- ▶ informations et avertissements sur la machine (marquage, signalisation de sécurité, notice d'instructions, etc.).

Normes

Il n'existe pas à ce jour de norme européenne harmonisée sur les aérogénérateurs. Il existe un certain nombre de normes disponibles auprès de l'Afnor qui traitent des aspects fonctionnels des aérogénérateurs mais aucune ne donne présomption de conformité à la directive Machines. Ces documents donnent cependant des informations utiles sur l'état de l'art concernant les éoliennes. Parmi ces normes, on peut citer la norme NF EN 50308²³ qui traite de la conception, du fonctionnement et de la maintenance. La série des normes NF EN 61400 spécifie les exigences de conception pour assurer l'intégrité technique des éoliennes ; en particulier, la norme NF EN 61400-1²⁴ est citée dans les arrêtés ICPE.

Bien qu'il n'existe pas de norme de type C sur les éoliennes (c'est-à-dire traitant des exigences de sécurité s'appliquant à cette catégorie de machines), les fabricants peuvent toutefois s'appuyer sur les normes de type A (norme fondamentale de sécurité) et de type B (normes traitant d'un aspect de la sécurité valable pour une large gamme de machines) harmonisées pour concevoir les aérogénérateurs dans le respect de la directive Machines. La liste des normes harmonisées donnant présomption de conformité à la directive est publiée régulièrement au journal officiel de l'Union Européenne et certaines de ces normes sont citées dans ce document.

21 La réglementation du Code du travail relative à la conception des machines est issue de la transposition de la directive Machines 2006/42/CE. Les règles techniques figurent à l'annexe mentionnée à l'article R.4312-1 du Code du travail.

22 Art. R.4311-4-1 du Code du travail, transposant l'article 2 a) de la directive 2006/42/CE.

23 NF EN 50308 : « Aérogénérateurs - Mesure de protection - Exigences pour la conception, le fonctionnement et la maintenance, octobre 2004 ».

24 NF EN 61400-1 (ou norme CEI 61400-1, 2005) : « Éoliennes - Partie 1 : exigences de conception », juin 2006.



Le turbinier n'a pas l'obligation de fournir ce document à l'acheteur. Cependant, le développeur a intérêt à exiger contractuellement le document d'évaluation des risques, car il fournit des informations sur les dangers que présente l'aérogénérateur et les mesures de prévention mises en place par le turbinier pour supprimer ou réduire les risques associés à ces dangers.

Ainsi que le rappelle la norme NF EN ISO 12100²⁵, les mesures de prévention des risques liés à une machine sont la combinaison des mesures appliquées par le concepteur (prévention intrinsèque, mise en place de protecteurs, gestion des modes de fonctionnement...) et par l'utilisateur (mesures organisationnelles, port d'équipements de protection individuelle...). Les mesures qui peuvent être intégrées dès la conception sont préférables à celles qui sont appliquées par l'utilisateur et elles se révèlent généralement plus efficaces.

Les risques résiduels qui subsistent malgré les mesures prises par le turbinier font l'objet d'une information dans la notice d'instructions, fournie obligatoirement avec l'aérogénérateur. Celle-ci précise également les instructions concernant les mesures de prévention à prendre par l'utilisateur.

3.2 Situations de travail spécifiques à l'éolienne : risques et mesures de prévention

Lorsque les opérateurs travaillent dans l'aérogénérateur, ils sont exposés à différents risques : espace exigu, travail isolé, postures et manutentions, risques physiques, risques mécaniques... Ces risques, lorsqu'ils sont spécifiques à l'éolien, et les mesures de prévention associées sont détaillés dans la suite du document.

De manière générale, une machine « est conçue, construite et équipée de façon à limiter les interventions des opérateurs. Si l'intervention d'un opérateur ne peut être évitée, la machine est conçue et construite pour que cette intervention puisse être effectuée facilement et en toute sécurité ». Cette exigence, issue du Code du travail²⁶, s'applique à la conception des éoliennes. En mode normal de production, le nombre d'interventions dans l'éolienne est réduit car le pilotage est effectué à distance depuis un centre d'exploitation et de commande²⁷. Cependant, les opérations de maintenance et de vérification requièrent une intervention humaine. Surviennent alors des problématiques telles que l'accès à la machine, l'ergonomie des espaces de travail, les risques physiques et mécaniques. En ce qui concerne ces problématiques, les aérogénérateurs doivent être traités différemment des autres machines.

En effet, la réglementation actuelle applicable à la conception des machines n'intègre pas complètement la complexité de l'aérogénérateur dans son ensemble (dimensions et hauteur de l'installation, envergure des pales, présence d'équipements de travail à l'intérieur de l'installation tels que élévateur, palan etc.). Une des particularités des aérogénérateurs est que les opérateurs sont amenés à y pénétrer pour réaliser certaines opérations en phase d'exploitation et de maintenance. Cette particularité, ajoutée aux dimensions peu communes des éoliennes, expose les opérateurs à des risques spécifiques qui doivent être pris en compte.

Les paragraphes qui suivent décrivent ces situations spécifiques de travail et proposent des mesures de prévention. Les éléments présentés peuvent servir de base à la discussion entre le turbinier et le maître d'ouvrage ou le développeur mais ne remplacent en aucun cas l'analyse des risques que doit mener le fabricant des machines.

25 NF EN ISO 12100 : « Sécurité des machines - Principes généraux de conception - Appréciation du risque et réduction du risque », Afnor, décembre 2010.

26 Extrait de l'annexe I mentionnée à l'article R.4312-1 du Code du travail.

27 Les activités de travail en centre d'exploitation et de commande ne sont pas traitées dans ce document. Des informations sur leur conception sont disponibles dans la série des normes NF EN ISO 11064 : « Conception ergonomique des centres de commande ».

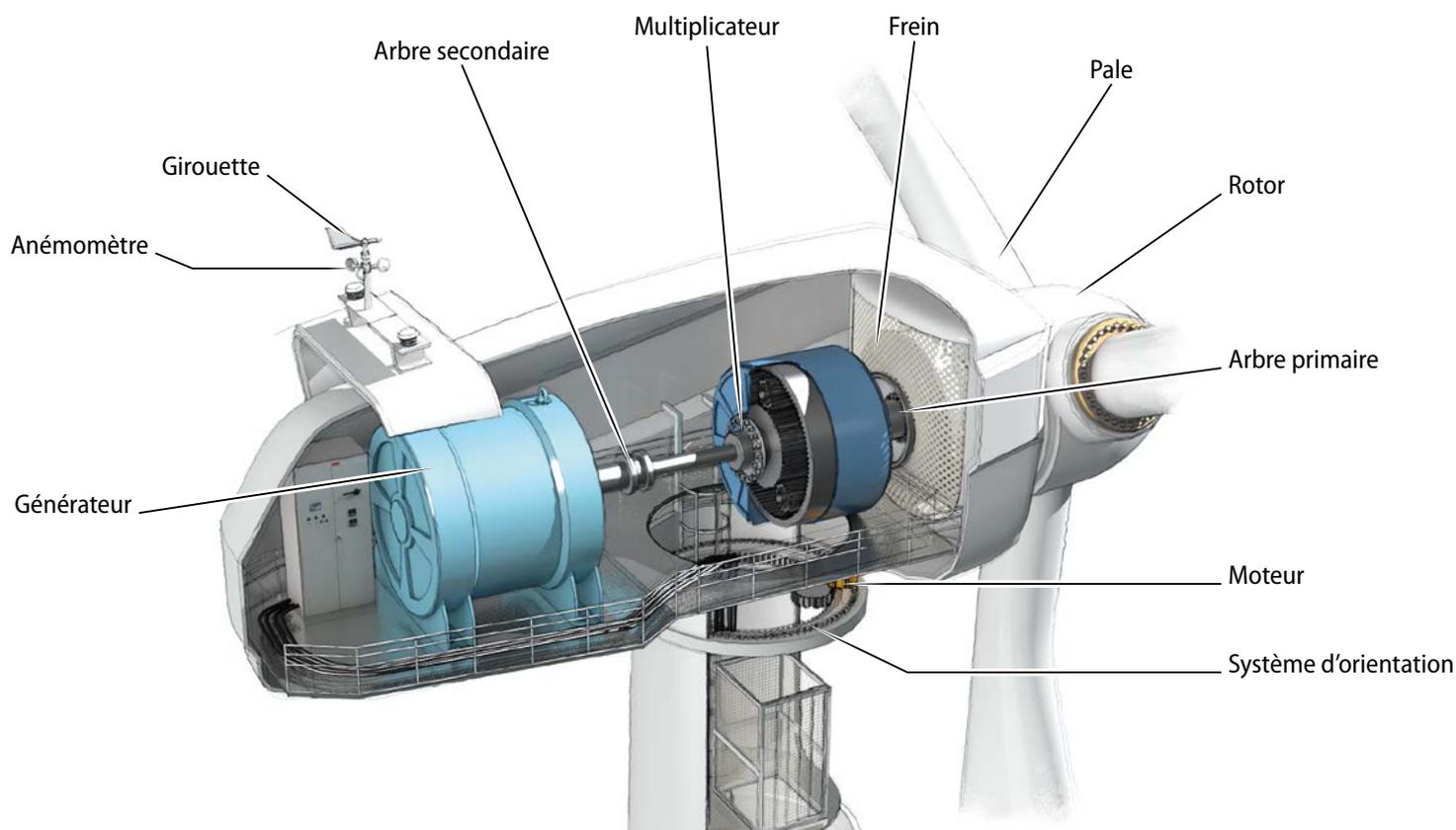


Figure 6 - Schéma d'une nacelle avec multiplicateur et de ses principaux composants

3.2.1 Accès à l'aérogénérateur et à ses différentes parties - évacuation

« La machine est conçue et construite de manière à permettre l'accès, en toute sécurité, à tous les emplacements où une intervention est nécessaire durant le fonctionnement, le réglage et l'entretien de la machine.²⁸ »

Des opérations de réglage et de maintenance de l'éolienne sont nécessaires en différents points de l'aérogénérateur²⁹ :

- ▶ la base de l'éolienne contient généralement le transformateur électrique, les armoires de contrôle-commande, les batteries de secours...
- ▶ l'accès au mât (intérieur et extérieur) est requis pour effectuer les opérations de contrôle exigées notamment par la réglementation ICPE, les opérations de nettoyage ou de maintenance ;
- ▶ l'accès dans la nacelle (voir figure 6) s'impose notamment pour les opérations de maintenance sur des composants tels que le multiplicateur, la génératrice, la couronne d'orientation, le transformateur s'il est situé en nacelle, etc. Le passage par la nacelle est également nécessaire pour atteindre d'autres composants de l'aérogénérateur, comme le rotor³⁰ ou les instruments de mesure du vent ;
- ▶ l'accès au moyeu est requis pour les interventions sur le système d'orientation des pales et sur les pales elles-mêmes (intérieur des pales) ;
- ▶ l'accès aux pales est nécessaire pour leur contrôle et leur entretien (intérieur et extérieur) ;
- ▶ enfin, les interventions sur les appareils de mesure du vent et certains équipements de sécurité ont lieu sur le dessus de la nacelle.

²⁸ Extrait de l'annexe I mentionnée à l'article R.4312-1 du Code du travail.

²⁹ Les opérations de maintenance citées ici et leur emplacement sont donnés à titre indicatif, ils dépendent du modèle d'éolienne considéré et des instructions de maintenance données par le turbinier.

³⁰ Le rotor est la partie tournante, constituée du moyeu et des pales.



Toutes ces interventions nécessitent un aménagement adapté des zones d'activités et de leurs moyens d'accès dès la conception afin de permettre le travail en sécurité.

Par ailleurs, les conditions climatiques (vitesses de vent ou présence d'orage) interdisant d'accéder à l'éolienne, à la nacelle ou au rotor doivent être indiquées dans la notice d'instructions et rappelées par un affichage dans la machine.

Moyens d'accès à l'éolienne

L'entrée dans l'éolienne se fait au moyen d'une porte d'accès. Les dimensions de la porte doivent permettre le passage de l'opérateur et du matériel nécessaire. La porte doit être facilement manœuvrable.

Afin de limiter les risques de chutes, il est préférable de prévoir un accès de plain-pied à la base de l'éolienne en positionnant la porte d'entrée au même niveau que l'aire de travail située devant l'éolienne ([voir aussi paragraphe 2.2.2 sur l'aménagement des aires de travail](#)). Si cela n'est pas possible, le moyen d'accès à la porte (généralement un escalier) doit respecter les préconisations de la norme NF EN ISO 14122-3 et être conçu pour résister aux conditions climatiques (gel, pluie...). Dans tous les cas, les matériaux constituant le moyen d'accès doivent être choisis pour minimiser les risques de chute, glissade et trébuchement.

Outre le fait de permettre l'accès à l'éolienne, **la porte d'entrée** permet également :

1. De sortir de l'éolienne.

« La machine est conçue, construite ou équipée de moyens empêchant qu'une personne y soit enfermée ou, si ce n'est pas possible, lui permettant de demander de l'aide.³¹ »

En fonctionnement normal, il doit donc être possible d'ouvrir la porte facilement depuis l'intérieur (déverrouillage manuel possible sans clé ni outil).

En cas d'incendie, ou d'intervention des secours, la porte doit permettre une évacuation rapide. Ses dimensions doivent donc être déterminées en conséquence (a minima hauteur de 2 m et largeur de 0,90 m). Il est souhaitable qu'un dispositif de type « barre anti-panique » soit installé. Ce dispositif permet de satisfaire à l'exigence d'ouverture depuis l'intérieur.

2. D'interdire l'accès aux tiers.

La réglementation ICPE exige de maintenir fermés à clef les accès à l'intérieur de chaque aérogénérateur afin d'empêcher les personnes non autorisées d'accéder aux équipements. Toutefois, les services de secours doivent pouvoir accéder à l'éolienne. À cet effet, leurs conditions d'accès doivent être définies au cas par cas avec l'exploitant du parc.

La porte d'accès doit donc être munie d'un dispositif de verrouillage par clé. Le dispositif de verrouillage, ainsi que la barre anti-panique ne doivent pas pouvoir être actionnés depuis l'extérieur.

Accès à la nacelle et à l'intérieur du mât

Les installations doivent permettre de limiter les contraintes physiologiques et les troubles musculo-squelettiques engendrés par les efforts physiques prolongés liés à l'ascension en machine. Un élévateur de personnes sera donc installé afin de limiter la fatigue des intervenants, et ainsi préserver leur concentration et leur vigilance pour les tâches à accomplir. Un tel équipement contribue naturellement aussi à réduire les temps d'intervention.

Actuellement, les élévateurs s'arrêtent en haut du mât et ne desservent pas toujours directement l'intérieur de la nacelle. De même, le niveau le plus bas n'est pas toujours desservi ([voir figure 7](#)). Une échelle fixe doit donc être installée sur toute la hauteur de l'éolienne, afin de permettre l'accès aux niveaux non desservis par l'élévateur (pied de mât et nacelle) et de pallier

³¹ Extrait de l'annexe I mentionnée à l'article R.4312-1 du Code du travail.

les éventuelles défaillances de l'élévateur. Cette échelle pourra servir également aux évacuations d'urgence.

Les contrôles périodiques ICPE (contrôle des brides de fixation, des brides de mât, contrôle visuel du mât) ainsi que les besoins ponctuels de nettoyage et de maintenance nécessitent d'accéder à l'intérieur et à l'extérieur du mât. Pour cela, chaque segment du fût doit être muni, en partie haute, de points de suspension permettant l'ancrage d'un dispositif d'accès approprié.

Élévateur de personnes

La mise en place d'un élévateur permet d'améliorer les conditions de travail en permettant aux travailleurs de descendre régulièrement pour, par exemple, accéder à un point d'eau, se réchauffer ou prendre leur repas. Outre ces préoccupations en matière d'hygiène et de santé au travail, la présence d'un élévateur a des répercussions sur l'organisation du travail³² notamment en matière de supervision et de préparation des interventions. Les opérateurs peuvent descendre plus souvent pour treuiller le matériel : celui-ci peut donc être monté en plusieurs fois, ce qui évite d'encombrer inutilement la nacelle. De plus, cela incite à descendre de la nacelle pour aller chercher du matériel plutôt que d'utiliser les « moyens du bord », en cas d'oubli d'un outil par exemple.

Un élévateur de personne installé dans une machine et destiné exclusivement à l'accès au poste de travail, y compris aux points d'entretien et d'inspection, n'est pas qualifié réglementairement d'ascenseur. Le turbinier doit prévoir un « élévateur spécial de charges et de personnes » ou *lift* conçu spécifiquement pour l'accès dans l'aérogénérateur.

L'élévateur doit assurer le transport vertical et la desserte des paliers sans générer de risques ni pour les occupants, ni pour les personnels se trouvant à proximité et sur les paliers, voire plus largement sur toute la zone de déplacement de la cabine. L'élévateur choisi doit permettre d'assurer le transport des personnes (équipement inclus), mais aussi des outils et matériels³³ en adéquation avec les tâches de maintenance et de dépannage prévues en nacelle. Il doit être dimensionné de façon à pouvoir transporter a minima 240 kg (ou deux personnes).

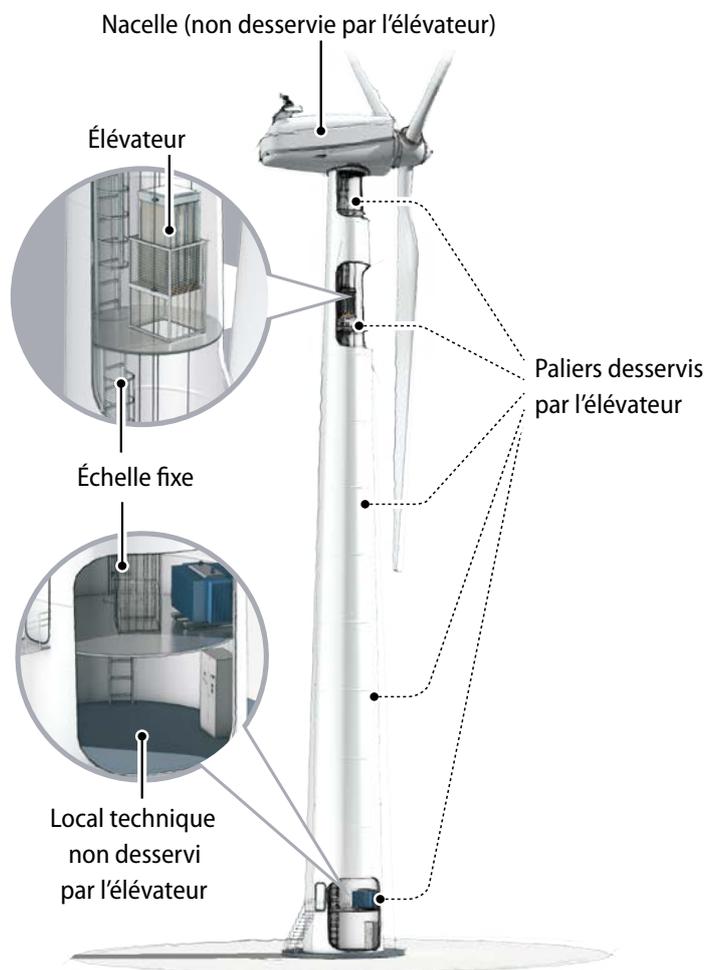


Figure 7 - Vue en coupe de l'éolienne et des accès en hauteur

³² Rapport R-820 IRSST, voir note 17.

³³ Voir aussi le paragraphe 3.2.4 sur les manutentions manuelles.



Concernant les règles techniques de conception, l'élévateur doit, en plus des exigences essentielles de santé et de sécurité de portée générale, respecter les exigences essentielles de santé et de sécurité complémentaires pour les machines présentant des dangers particuliers dus au levage de personnes qui concernent notamment :

- ▶ la résistance mécanique de l'habitacle ;
- ▶ le contrôle des sollicitations pour éviter les risques liés à la surcharge ;
- ▶ les organes de service (qu'ils soient dans l'habitacle ou sur les paliers) ;
- ▶ la prévention des risques dus aux déplacements de l'habitacle ;
- ▶ la prévention des risques de chute de personnes ou d'objets.

Le concepteur de l'élévateur doit également prévoir les moyens permettant aux secours d'intervenir, si besoin.

À noter : une norme sur la conception des élévateurs particuliers destinés au transport de personnes et de matériaux à l'intérieur des éoliennes est actuellement en cours de rédaction³⁴.

Échelle fixe

Une échelle fixe doit être installée pour accéder à l'ensemble des paliers (du niveau le plus bas jusqu'à la nacelle). Elle doit être munie, selon l'analyse des risques et la configuration du mât, d'une crinoline, d'un support d'assurage permettant d'utiliser un équipement de protection individuelle contre les chutes de hauteur (harnais et système d'arrêt de chute approprié), ou d'une combinaison des deux.

La norme NF EN ISO 14122-4 « Sécurité des machines - Moyens d'accès permanents aux machines - Partie 4 : échelles fixes » donne les exigences à respecter pour concevoir les échelles fixes (espacement entre barreaux, hauteurs de volées, dimensions des crinolines...), y compris les aires de départ et d'arrivée, les plateformes intermédiaires, les portillons et les trappes d'accès.

Points d'ancrage

Des points d'ancrages doivent être prévus pour la mise en place des dispositifs collectifs d'accès (pour l'accès à l'intérieur du mât notamment), mais aussi pour permettre aux opérateurs d'utiliser des équipements de protection individuelle (EPI) contre les chutes de hauteur.

L'emplacement des points d'ancrage doit être défini par le turbinier, en tenant compte de leur fonction (retenue, maintien au travail, arrêt de chute). Ils seront positionnés le plus haut possible afin de réduire le facteur de chute et le risque lié au tirant d'air³⁵.

Quelle que soit leur fonction (retenue, maintien au travail, arrêt de chute), il est recommandé que tous les dispositifs d'ancrage pour EPI soient conformes aux prescriptions pertinentes de la norme NF EN 795³⁶. Ils doivent être en nombre suffisant et clairement identifiés. Il faut pouvoir distinguer les points d'ancrage des points de levage. Il est possible d'utiliser des pictogrammes d'identification.

Accès aux équipements sur le toit de la nacelle

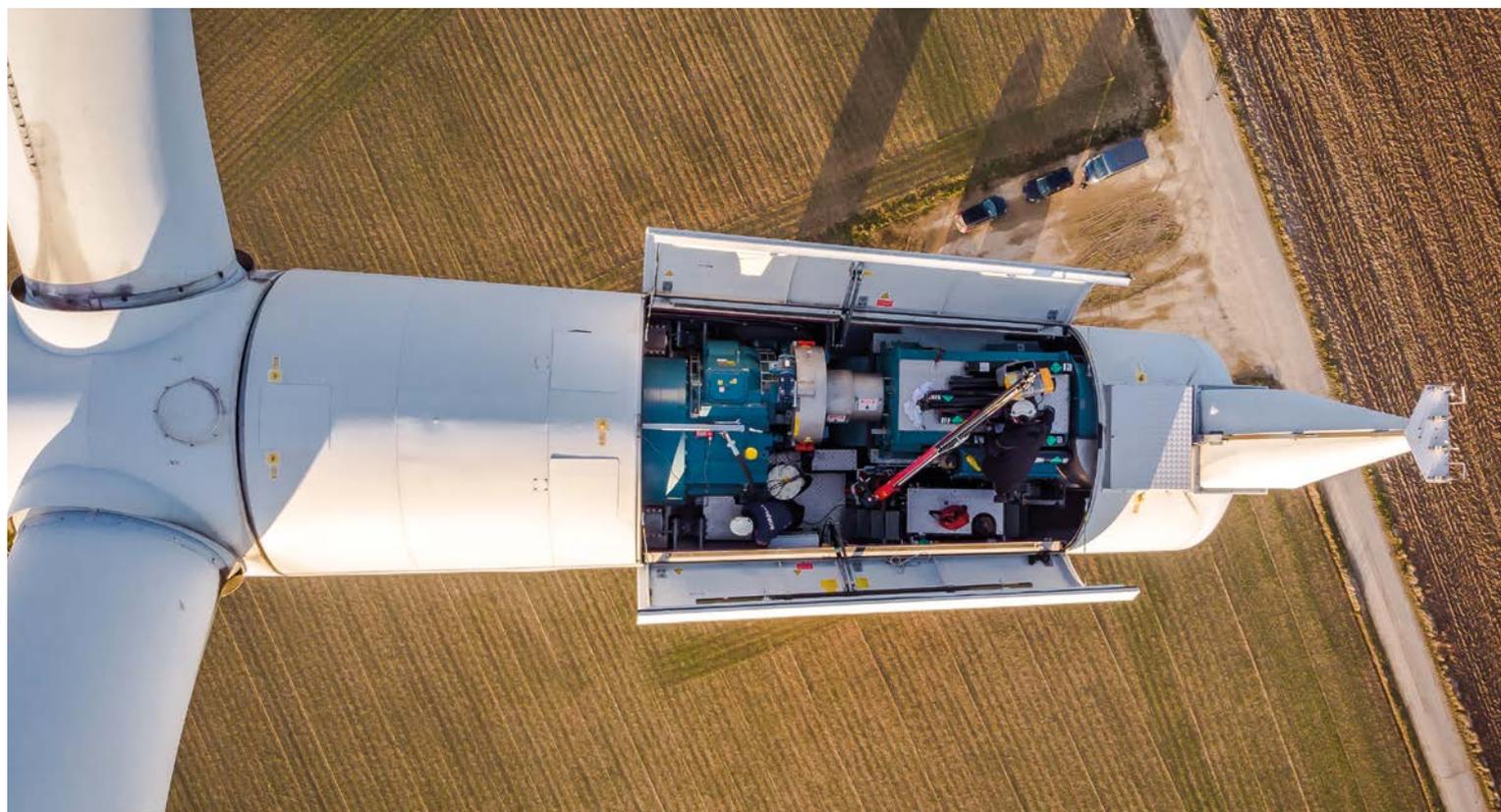
Sur le dessus de la nacelle se trouvent différents dispositifs tels que anémomètres, capteurs météorologiques, balisage lumineux d'obstacle (ou *flashlight*, imposé pour la navigation aérienne) qui doivent être entretenus et maintenus. La principale préoccupation lors de l'accès à ces équipements doit être la prévention du risque de chute de personne ou d'objet.

Afin de limiter le nombre de sorties, il convient que l'information sur l'état de fonctionnement de ces dispositifs soit rapportée sur une baie située à l'intérieur de l'aérogénérateur ou via le système de monitoring à distance. Cette mesure de conception, du ressort du turbinier,

³⁴ Projet de norme Pr EN 81-44 : « Safety rules for the construction and installation of lifts – Special lifts for the transport of persons and goods - Part 44 Service lifts for wind turbines ».

³⁵ Le tirant d'air est la distance nécessaire entre le point de chute et le sol pour éviter de heurter le sol en cas de chute.

³⁶ NF EN 795 : « Protection contre les chutes de hauteur - Dispositifs d'ancrage - Exigences et essais. »



pourra être complétée par des mesures organisationnelles de la part de l'exploitant telles que mise en place de gammes de maintenance préventive, voire d'une maintenance prédictive, afin de réduire encore le nombre de ces sorties.

Lorsque l'accès est requis, les **interventions au sommet de la nacelle doivent être sécurisées** :

- ▶ le nombre de trappes d'accès en toiture et leur positionnement doivent être définis de manière à réduire la distance parcourue en extérieur ;
- ▶ le revêtement de surface sur le cheminement extérieur du toit de la nacelle doit être antidérapant ;
- ▶ la protection collective contre les chutes doit être privilégiée à la protection individuelle : cela signifie qu'il est préférable de mettre en place une plateforme de travail avec garde-corps plutôt que de faire reposer la protection sur le port du harnais et l'ancrage. Si l'aérodynamisme requis lors du fonctionnement de l'aérogénérateur ne permet pas la pose de garde-corps à demeure, les possibilités de mise en place d'un garde-corps amovible ou rabattable doivent être étudiées ;
- ▶ la ligne de vie horizontale ou les points d'ancrages doivent être facilement accessibles depuis chaque trappe d'accès. La ligne de vie doit être disposée parallèlement au sens de déplacement ;
- ▶ les points d'ancrage dédiés aux dispositifs d'évacuation d'urgence (type « descenseur ») doivent être spécifiquement identifiés.

Accès par l'extérieur (mât et pales)

En plus de l'accès par l'intérieur de l'éolienne, il est généralement nécessaire de prévoir l'accès à l'extérieur du mât et des pales pour des opérations de nettoyage ou de contrôle visuel par exemple. Ces opérations exposent les travailleurs à un **risque de chute de hauteur**. Elles nécessitent la mise en place de dispositif de protection collective tel que plateforme élévatrice mobile de personnes ou plateforme suspendue. Dans le cas d'une plateforme suspendue, le



turbinière doit prévoir, dès la conception, les supports ou points de suspension spécifiques permettant son accrochage et tenir compte des coefficients d'épreuve pour leur dimensionnement. Les charges maximales admissibles doivent être indiquées de façon durable à proximité de chaque point de suspension et consignées dans la documentation technique.

De plus, le turbinière doit donner toutes les instructions permettant de réaliser ces opérations en sécurité. Il doit en particulier indiquer dans quelle position doivent être bloquées les pales (par consignation mécanique du rotor) avant de commencer l'installation de la plateforme suspendue.

En complément de ces dispositions, l'exploitant devra mettre en place les mesures organisationnelles pour limiter les risques de chute en appliquant les principes généraux de prévention. Il pourra ainsi envisager d'utiliser d'autres moyens de contrôle, tels que des drones par exemple.

Ce n'est que lorsqu'il y a impossibilité technique de mettre en œuvre des moyens de protection collectives que le recours à des moyens de protection individuelle doit être envisagé. En particulier, les travaux sur cordes ne peuvent être réalisés que dans certaines situations très spécifiques et limitées³⁷.

Évacuation

L'accès normal à l'éolienne est assuré par la **porte d'accès**. L'accès à cette porte doit rester dégagé en toutes circonstances pour permettre de sortir aisément et rapidement. Les équipements situés au même niveau que la porte ne doivent pas gêner la sortie. Si les équipements disposent de portes (cas des armoires électriques par exemple), ils doivent être positionnés de sorte que l'espace nécessaire à l'ouverture des portes n'empiète pas sur les espaces de circulation et les voies d'évacuation.

Outre la porte d'accès à l'éolienne, une **sortie alternative** doit être prévue pour les cas où l'accès normal serait rendu impraticable (incendie par exemple). Il s'agit souvent d'une trappe donnant sur l'extérieur depuis la nacelle. Cette issue doit être indiquée par une signalisation spécifique et figurer dans la notice d'instructions.

Afin de permettre l'évacuation de personnes par les secours, il doit être possible d'ouvrir cette trappe depuis l'intérieur, mais aussi depuis l'extérieur. Les dimensions de la trappe doivent être suffisantes pour l'évacuation à l'aide d'un brancard d'une personne blessée ou inanimée (a minima 0,9 m x 0,9 m, ces valeurs devant être augmentées selon la forme de l'ouverture et le type de déplacement vertical ou horizontal³⁸). Les dimensions et la masse des ouvrants de la trappe doivent permettre son ouverture par une personne seule.

Des **dispositifs d'évacuation** (par exemple dispositif de type « descenseur ») doivent être positionnés à demeure, au plus près de chaque trappe d'évacuation. Le turbinière doit prévoir un point d'ancrage par dispositif d'évacuation d'urgence, spécifiquement identifié. Le nombre maximal de personnes pouvant se trouver simultanément dans la nacelle doit être indiqué, il doit tenir compte des opérations à réaliser et des conditions de mise en œuvre de la procédure d'évacuation. La notice d'instructions attirera l'attention des exploitants sur la nécessité de prévoir des dispositifs supplémentaires d'évacuation (type et nombre).

Les moyens d'évacuation que le turbinière a prévus (points d'ancrage, emplacements des trappes, etc.) doivent être précisés dans la notice de l'éolienne, laquelle doit aussi souligner la nécessité de former et d'entraîner préalablement les salariés. Ces informations permettront à l'exploitant d'afficher les instructions pertinentes d'évacuation et de sauvetage en nacelle.

³⁷ Voir sur ce sujet le dossier web INRS : www.inrs.fr/risques/chutes-hauteur/travail-encorde-acces-positionnement-cordes.html.

³⁸ Voir norme NF EN 547-1 : « Sécurité des machines – Mesures du corps humain - Partie 1 : Principes de détermination des dimensions requises pour les ouvertures destinées au passage de l'ensemble du corps dans les machines. »

3.2.2 Ergonomie des espaces de travail

Si l'on se place du point de vue du concepteur de l'éolienne, le temps de présence du travailleur en nacelle est relativement faible pour une éolienne donnée (une centaine d'heures par an pour les opérations de maintenance ou de redémarrage de machine après arrêt).

Cependant, du point de vue de l'exploitant ou du mainteneur d'éoliennes, les techniciens de maintenance qualifiés et formés aux travaux en nacelle passent plusieurs mois par an en nacelle, même s'ils changent d'éolienne tous les jours. De fait, l'éolienne, et plus particulièrement la nacelle, constitue leur espace physique de travail et doit donc être pourvue des aménagements nécessaires au travail en sécurité.

Espaces de travail et de circulation

Selon l'étude menée au Québec³⁹, l'évolution des éoliennes a entraîné une amélioration des conditions de travail à l'intérieur des éoliennes, en particulier vis-à-vis du risque de chute : les nacelles des aérogénérateurs sont de plus en plus grandes et il est aujourd'hui possible d'y entrer, contrairement aux premières machines pour lesquelles le personnel de maintenance se trouvait à l'extérieur, sur une plateforme. Cependant il demeure que l'intérieur des nacelles est souvent exigu, avec des espaces de circulation étroits, des espaces de travail restreints et des planchers en matériaux divers et à niveaux multiples. Les mêmes observations pourraient être faites pour les éoliennes installées en Europe, alors même que la réglementation indique :

« Dans les conditions prévues d'utilisation, la gêne, la fatigue et les contraintes physiques et psychiques de l'opérateur sont réduites au minimum de manière à prendre en considération les principes ergonomiques consistant à :

- ▶ tenir compte de la variabilité des opérateurs en ce qui concerne leurs données morphologiques, leur force et leur résistance ;
- ▶ offrir assez d'espace pour les mouvements des différentes parties du corps de l'opérateur ;
- ▶ (...). »⁴⁰

Pour concevoir et aménager l'intérieur de l'éolienne, le fabricant doit considérer d'une part l'encombrement lié aux équipements indispensables (génératrice, multiplicateur, moteur pour la rotation, panoplie hydraulique, armoires électriques etc.) et d'autre part les tâches que les opérateurs ont à effectuer.

Il convient de privilégier les espaces de travail de plain-pied et d'éviter les planchers à niveaux multiples, en particulier dans la nacelle car les différences de niveau sont des facteurs de trébuchement. Les espaces entre les équipements doivent être suffisamment larges pour permettre aux opérateurs de circuler avec leur matériel et de réaliser les opérations de maintenance. Selon la norme NF EN ISO 14122-2, l'espace entre deux équipements doit mesurer au minimum 600 mm, et cette valeur doit être augmentée en fonction de l'espace requis par l'activité du travailleur (par exemple, si l'opérateur doit s'agenouiller pour travailler, l'espace libre doit être augmenté : la norme NF EN ISO 14738⁴¹ préconise alors 900 mm).

ERGONOMIE DES MACHINES

Le document INRS ED 6154 *Conception des machines et ergonomie* propose une démarche pour réussir l'intégration des exigences du travail lors de la conception d'une machine. Dix points-clés sont développés en précisant pour chacun quels sont les objectifs, comment les atteindre et quels sont les points de vigilance correspondants. Sont ainsi traités :

- ▶ l'organisation des espaces de travail ;
- ▶ les modes de fonctionnement ;
- ▶ la communication entre opérateurs ;
- ▶ les interactions homme-machine ;
- ▶ le dimensionnement des postes de travail ;
- ▶ les manutentions et efforts ;
- ▶ les accès ;
- ▶ les informations pour l'utilisation ;
- ▶ l'éclairage ;
- ▶ les nuisances générées par la machine.

Le turbinié y trouvera des pistes pour mieux intégrer les principes ergonomiques dans la conception de ses machines. Quant à l'exploitant, il pourra utiliser ce document lors des échanges avec le turbinié (voir 3.1).

³⁹ Rapport R-820 IRSST, voir note 17.

⁴⁰ Extrait de l'annexe I mentionnée à l'article R.4312-1 du Code du travail.

⁴¹ NF EN ISO 14738 : Sécurité des machines - Prescriptions anthropométriques relatives à la conception des postes de travail sur les machines.



De plus, pour leur éviter d'enjamber les équipements, des moyens facilitant le passage d'un côté à l'autre doivent être installés (saut-de-loup par exemple). Selon les endroits auxquels il est nécessaire d'accéder, des plateformes pourront être prévues. Des compromis devront être trouvés car ces équipements ne doivent pas constituer un encombrement supplémentaire, ni gêner les déplacements.

Pour l'aider dans sa réflexion sur l'aménagement intérieur des machines, le turbinier a à sa disposition plusieurs normes européennes harmonisées, parmi lesquelles les normes NF EN 614-2⁴² et NF EN 547-1⁴³. Il a également tout intérêt à s'appuyer sur le retour d'expérience des utilisateurs (exploitants ou mainteneurs d'éoliennes), qui peuvent proposer des solutions nouvelles.

Travail en nacelle

Comme nous l'avons indiqué en introduction, le travail en nacelle expose les opérateurs à différents risques. La prévention la plus efficace pour réduire ces risques est de limiter les montées en nacelle. Pour cela il convient, dans la mesure du possible, de placer certains équipements en pied d'éolienne plutôt qu'en nacelle (transformateur, batteries de secours, ...). Un report d'informations (vitesse du vent, état des capteurs) et de certaines commandes (pour la mise en marche et l'arrêt de certains mouvements) en bas du mât permet de ne pas monter et évite donc l'exposition aux risques liés au travail en nacelle. Ces organes ne se substituent pas aux organes de commande indispensables en nacelle (voir en 3.2.7, « Système de commande de l'éolienne »).

42 NF EN 614-2 Sécurité des machines - Principes ergonomiques de conception - Partie 2 : interactions entre la conception des machines et les tâches du travail.

43 NF EN 547-1 Sécurité des machines - Mesures du corps humain - Partie 1 : principes de détermination des dimensions requises pour les ouvertures destinées au passage de l'ensemble du corps dans les machines.

Le turbinier doit également prévoir l'utilisation d'un équipement de diagnostic et de localisation des pannes (système intégré, console à connecter, ...). Cet équipement doit pouvoir être utilisé en pied d'éolienne, pour éviter des ascensions inutiles.

Cas de l'accès au moyeu et à l'intérieur des pales

Les conditions d'accès au moyeu et aux pales doivent être précisées par le turbinier dans la notice, y compris les mesures relatives aux conditions climatiques. Cet accès ne doit se faire qu'en cas de nécessité et uniquement après consignation mécanique du rotor (voir en 3.2.7, « Sécurité des interventions »).

De plus, l'intérieur du moyeu et des pales constitue un espace confiné car il s'agit :

- ▶ d'un volume partiellement fermé,
- ▶ non destiné à être occupé de façon permanente par des personnes mais pouvant être occupé temporairement pour des opérations de maintenance,
- ▶ et au sein duquel l'atmosphère peut présenter des risques pour la santé des personnes.

Bien que les conditions d'intervention à l'intérieur des pales et l'évaluation des risques associés relèvent principalement de l'exploitant, il peut être utile d'aborder ce point avec le turbinier afin de lui permettre d'installer des équipements qui faciliteront ces interventions. On peut citer par exemple un endroit où placer et où raccorder un système de ventilation destiné à apporter un renouvellement d'air dans les pales si besoin, ou encore un point d'ancrage auquel s'attachera l'opérateur lors de l'intervention (pour faciliter son éventuelle évacuation par les secours).

3.2.3 Ambiances de travail

Ambiances thermiques

Au regard des contraintes physiques de certaines opérations, l'ambiance thermique dans laquelle elles sont effectuées peut amplifier les risques d'accidents du travail ou de maladies professionnelles. La température intérieure de la nacelle est liée à la température extérieure, au dégagement de chaleur du multiplicateur et de la génératrice et au rayonnement solaire auquel la nacelle est exposée. Elle dépend aussi du choix du matériau de l'enveloppe et de l'isolation.

Les ambiances thermiques froides sont dues aux conditions climatiques.

Pour les ambiances thermiques chaudes, deux causes naturelles sont identifiées :

- ▶ une température extérieure élevée et un rayonnement solaire important,
- ▶ le fait que l'air chaud dans le fût remonte et vient participer à l'élévation de température dans la nacelle.

À ces deux phénomènes naturels vient s'ajouter la source thermique que constitue la machine en elle-même (en particulier le multiplicateur et les équipements électriques).

Pour assurer le confort et la sécurité des intervenants, des mesures intégrées à la conception de l'aérogénérateur doivent être mises en œuvre pour ramener la température intérieure dans la plage acceptable, idéalement autour de 20°C.

À cet effet doivent être prévus :

- ▶ une isolation thermique efficace de l'enveloppe de la nacelle ;
- ▶ une protection thermique (encoffrement, isolation) des surfaces accessibles susceptibles d'être très chaudes ou très froides (cela permet également d'éviter les risques de brûlure liés au contact de ces surfaces) ;

- 
- ▶ une possibilité de ventiler la nacelle,
 - soit par circulation d'air naturelle en laissant des trappes extérieures ouvertes (attention dans ce cas à prévoir une protection contre les chutes),
 - soit par utilisation d'un dispositif d'extraction mécanique de l'air en partie haute associé à un orifice d'apport d'air (la mise en route de ce dispositif doit pouvoir être commandée depuis le pied de l'éolienne).

D'autres mesures peuvent venir compléter cette liste, en fonction des besoins : rideaux occultants sur les trappes vitrées, mise en place d'un chauffage d'appoint...

Autres ambiances physiques

Parmi les autres ambiances physiques auxquelles sont soumis les travailleurs de l'éolien, on peut citer l'éclairage, le bruit émis par la machine ou encore les vibrations.

Seuls l'éclairage et le bruit sont détaillés ici.

Éclairage

Les zones de circulation et de travail doivent être éclairées. L'objectif est de fournir aux intervenants un éclairage adapté aux exigences du travail (besoin de précision, contrôle d'aspect, maintenance, etc.)

Pour cela, le turbinier doit prévoir un éclairage ambiant (naturel et artificiel) dans l'éolienne. Il définit ensuite, pour chaque zone d'activité, le niveau d'éclairement requis (intensité, température de couleur), ce qui lui permet de choisir l'éclairage complémentaire à mettre en œuvre là où l'éclairage ambiant est insuffisant ou inadapté à l'activité.

Dans certaines zones telles que le rotor, l'éclairage complémentaire peut être fourni par des dispositifs d'appoint de type « éclairage de chantier ». Le turbinier devra alors prévoir, le cas échéant, les endroits où accrocher ces dispositifs et les moyens permettant de les raccorder au réseau électrique.

*« La machine est fournie avec un éclairage incorporé, **adapté aux opérations**, là où, malgré un éclairage ambiant ayant une intensité normale, l'absence d'un tel dispositif pourrait créer un risque.*

La machine est conçue et construite de façon qu'il n'y ait ni zone d'ombre gênante, ni éblouissement irritant, ni effet stroboscopique dangereux, sur les éléments mobiles, dû à l'éclairage.

Les parties intérieures qui doivent être inspectées et réglées fréquemment, ainsi que les zones d'entretien, sont munies de dispositifs d'éclairage appropriés. »⁴⁴

Compte-tenu des dimensions d'une éolienne, le turbinier doit également prévoir un éclairage de sécurité alimenté par une source centralisée ou constitué de BAES (blocs autonomes d'éclairage de sécurité), installé tant dans la nacelle qu'aux différents niveaux de l'éolienne, pour assurer au mieux les conditions d'évacuation.

Risques liés au bruit

L'exposition au bruit peut provoquer des troubles auditifs ; c'est aussi un facteur contribuant à la fatigue et au stress. Elle peut être à l'origine d'accidents liés, par exemple aux interférences dans les communications. Le niveau sonore émis par l'éolienne dépend principalement de la vitesse du vent. On trouve deux sources distinctes de bruit : les pales et la nacelle.

La nacelle produit un bruit d'origine mécanique dû aux équipements qu'elle comprend (génératrice, multiplicateur, systèmes de ventilation... - voir figure 6 en 3.2), tandis que les pales produisent un bruit d'origine aérodynamique dû, d'une part, au mouvement des pales dans l'air (bruit continu en extrémité de pale) et, d'autre part, au passage de la pale devant le mât (bruit périodique).

⁴⁴ Extrait de l'annexe I mentionnée à l'article R.4312-1 du Code du travail.

La prévention des risques liés au bruit repose essentiellement sur la mise à l'arrêt des pales et de la génératrice lors des interventions. Dans ce cas, le niveau sonore émis par l'éolienne est très faible. Subsistent cependant les bruits émis :

- ▶ par les équipements électriques. Les ventilations du transformateur, des convertisseurs ou de la génératrice, ainsi que les pompes de circulation d'huile ou refroidissement en particulier peuvent fonctionner longtemps après l'arrêt de l'éolienne par temps chaud ;
- ▶ par les interventions elles-mêmes. La commande de mouvements nécessaires à certains réglages ou l'utilisation d'équipements électroportatifs par exemple, sont source de bruit.

Pour rappel, « *la machine est conçue et construite de manière que les risques résultant de l'émission du bruit aérien soient réduits au niveau le plus bas, compte tenu du progrès technique et de la disponibilité de moyens permettant de réduire le bruit, notamment à la source* ». ⁴⁵

Enfin, la notice doit contenir « *les instructions relatives à l'installation et au montage destinées à diminuer le bruit et les vibrations* ». ⁴⁶

3.2.4 Manutentions et élévations de charges

Pour les interventions dans les éoliennes, il est nécessaire de monter du matériel en nacelle (notamment le matériel, l'outillage et les pièces de rechange utiles à la maintenance). Or les manutentions manuelles sont la cause de nombreux accidents du travail et maladies professionnelles [troubles musculo-squelettiques (TMS), troubles musculo-tendineux, dorsalgies...]. Les intervenants peuvent transporter certains équipements avec eux dans l'élévateur, mais cela présente plusieurs inconvénients dont le fait que l'élévateur ne dessert pas nécessairement tous les niveaux ; de nombreux allers-retours de l'opérateur sont alors nécessaires car la capacité de l'élévateur est limitée.

En conséquence, une aide à la manutention est indispensable compte-tenu des distances à parcourir entre le pied du mât et la nacelle. Il est donc conseillé aux développeurs éoliens de privilégier des machines équipées d'un moyen de manutention motorisé desservant la nacelle, ainsi que le proposent déjà systématiquement certains turbinié.

Parallèlement à cela, l'employeur des intervenants de maintenance doit, selon les prescriptions du Code du travail, éviter le recours à la manutention manuelle de charges pour les travailleurs et choisir des équipements de travail adaptés. Il est préférable pour l'exploitant que des solutions alternatives soient prévues dès la conception.

Le choix d'un moyen de manutention nécessite de déterminer au préalable les types d'objets à déplacer (masses, volumes, densité...) afin de retenir un appareil adapté aux charges manutentionnées. Le choix de l'implantation du moyen de manutention doit prendre en compte l'espace nécessaire au chargement et au déchargement des charges, en particulier dans la nacelle, où la place disponible est limitée.

L'appareil de levage le plus utilisé aujourd'hui pour monter des charges dans la nacelle est le palan électrique. Dans certains modèles d'éoliennes, ce palan est monté sur une potence pivotante pour sortir le palan de la nacelle et ainsi déplacer les charges à l'extérieur du mât. Un moyen de prévention du risque de chute des personnes doit être associé pour protéger l'opérateur lors de l'utilisation de ce palan extérieur.



45 - 46 Extrait de l'annexe I mentionnée à l'article R.4312-1 du Code du travail.



Dans d'autres modèles, un palan est installé de façon à lever les charges à l'intérieur du mât. Cela a l'avantage de ne plus exposer la charge au vent et aux conditions climatiques lors de la montée. Les inconvénients du palan intérieur sont que :

- ▶ le matériel doit d'abord être apporté manuellement à l'intérieur de l'éolienne, les accès à l'éolienne doivent donc être dimensionnés en conséquence ;
- ▶ le dernier passage entre le haut de mât et la nacelle s'effectue lui-aussi manuellement car l'orientation de la nacelle modifie les dimensions du passage.

Dans les deux cas, une attention particulière doit être portée au risque de chutes d'objets lors de la manutention. Les matériels (petit outillage par exemple) doivent être placés dans des sacs ou des contenants fermés, qui seront ensuite levés par le palan.

De plus l'exploitant devra évaluer les risques liés au balancement de la charge non guidée (balancement naturel, parfois amplifié par le vent) ainsi qu'à l'environnement (présence de lignes électriques à proximité, par exemple). Il devra également marquer ou matérialiser la zone de chargement et déchargement à l'aplomb du palan, donner les instructions de sécurité appropriées (notamment l'orientation requise de la nacelle, l'utilisation éventuelle de cordes de guidage, etc.) et le cas échéant, afficher les consignes nécessaires.

Lorsque la turbine est équipée d'un multiplicateur (boîte de vitesse), une grande quantité d'huile est nécessaire à son fonctionnement. À chaque vidange, de l'huile neuve doit être acheminée jusqu'à la nacelle et les huiles usagées doivent être évacuées.

Pour effectuer la vidange, le turbinier doit prévoir des moyens évitant les manutentions de bidons d'huile. Par exemple, le transport de l'huile peut s'effectuer par flexibles directement entre la multiplicatrice et le véhicule d'approvisionnement (ou d'évacuation pour les huiles usagées). Dans ce cas, doivent être prévus :

- ▶ un accès et une aire de stationnement pour le véhicule ;
- ▶ un point de raccordement des flexibles.

Le turbinier doit indiquer dans la notice les instructions pour effectuer cette opération en sécurité. Il doit également préciser les caractéristiques des pompes et canalisations flexibles à utiliser, en tenant compte notamment de la hauteur de l'éolienne.

3.2.5 Risques physiques

Risque électrique et rayonnements

Équipement électrique

L'électricité est omniprésente dans l'aérogénérateur : basse tension dans les armoires de commande (24 V, 48 V, ou 220 V) et en sortie de génératrice (souvent de l'ordre de 690 V) et haute tension en sortie de transformateur (20 000 V alternatif).

L'énergie électrique provient de plusieurs sources :

- ▶ la génératrice de l'éolienne, qui produit du courant continu (c.c.) ;
- ▶ le réseau de distribution qui délivre du courant alternatif (c.a.) provenant du réseau. L'éolienne est raccordée au réseau à double titre : pour pouvoir livrer sa production électrique, mais aussi pour alimenter les parties de l'éolienne qui consomment de l'électricité (éclairage, élévateur et moyens de manutentions, appareils de mesure du vent, armoires de commande...) ;
- ▶ les batteries qui alimentent les équipements secours.

Les opérateurs de maintenance doivent être vigilants à cette multiplicité des sources, car elle rend complexe la mise en sécurité de la machine. Le turbinier doit définir dans sa notice les instructions à respecter pour assurer la mise en sécurité des personnes lors des interventions.

De plus, la présence de courant continu nécessite des mesures de protection différentes de celles utilisées pour le courant alternatif. En effet, un courant continu est plus difficile à interrompre qu'un courant alternatif.

L'équipement électrique de l'aérogénérateur n'est pas soumis aux mêmes règles de conception que l'installation électrique du parc (voir figure 5 en 2.2.5) : il doit répondre aux **exigences de conception des machines**.

« Lorsque la machine est alimentée en énergie électrique, elle est conçue, construite et équipée de façon à prévenir, ou à pouvoir prévenir, tous les dangers d'origine électrique. »⁴⁷

Afin de répondre aux exigences de la directive Machines, le turbinier peut s'appuyer sur les normes harmonisées suivantes :

- ▶ NF EN 60204-1⁴⁸ qui s'applique à l'équipement électrique fonctionnant en basse tension (inférieure à 1 000 V en courant alternatif ou 1 500 V en courant continu) ;
- ▶ NF EN 60204-11⁴⁹ qui donne des prescriptions pour les équipements Haute Tension (tension supérieure à 1 000 V CA ou 1 500 V CC qui ne dépassent pas 36 kV.

Les prescriptions contenues dans ces deux normes ont pour but de protéger les personnes contre les chocs électriques (contacts directs ou indirects), mais aussi de protéger l'équipement électrique des surintensités (surcharges et courts-circuits) car ces dernières peuvent avoir des conséquences néfastes pour les personnes, tel que l'incendie par exemple.

Outre ces prescriptions, l'utilisation de matériel ayant un degré de protection IP2X (ou IPXXB) en basse tension permet d'éviter le contact direct avec des pièces nues sous tension. Il est conseillé d'utiliser ce type de matériel, y compris à l'intérieur des armoires électriques.



Câbles

Les câbles situés dans l'éolienne sont soumis à des contraintes différentes des câbles situés dans la plupart des machines en raison :

- ▶ des efforts de torsion présents sur certains câbles, en particulier lors de la rotation de la nacelle. Cette torsion peut par ailleurs engendrer un frottement entre câbles, avec pour conséquence une détérioration de l'isolant ;
- ▶ des efforts de traction présents dans les câbles qui courent le long du mât. Cette traction, due au poids du câble, provoque une déformation de son âme conductrice, qui peut aller jusqu'à diminuer de façon non négligeable sa section, en particulier en partie haute ;

47 Extrait de l'annexe I mentionnée à l'article R.4312-1 du Code du travail.

48 NF EN 60204-1 : « Sécurité des machines — Équipement électrique des machines — Partie 1: Règles générales. »

49 NF EN 60204-11 : « Sécurité des machines — Équipement électrique des machines — Partie 11: Prescriptions pour les équipements HT fonctionnant à des tensions supérieures à 1 000 V c.a. ou 1 500 V c.c. et ne dépassant pas 36 kV. »

- 
- ▶ des vibrations lorsque la génératrice est en fonctionnement. Ces vibrations peuvent endommager l'isolant des câbles par frottements.

Les risques liés à ces contraintes sont des risques de choc électrique ou de court-circuit si l'isolant des câbles est détérioré et des risques d'échauffement pouvant mener à l'incendie si le dimensionnement du câble est insuffisant. Le turbinier doit donc choisir les câbles, leur dimensionnement et leur mode de fixation de façon à se prémunir de ces risques.

Transformateur

L'électricité produite par la génératrice (généralement du courant continu sous une tension de 690 V) ne peut pas être injectée telle quelle sur le réseau (généralement en courant alternatif de tension 20 kV). Le courant continu est transformé en alternatif puis élevé en tension par un transformateur. Celui-ci peut être interne ou externe à l'aérogénérateur (dans ce dernier cas, les normes relatives aux installations électriques s'appliquent – voir 2.2.5).

Lorsque les choix de conception prévoient un transformateur situé à l'intérieur, il est souhaitable de le placer en pied d'éolienne plutôt qu'en nacelle, afin de réduire les vibrations susceptibles de desserrer les connexions. Cela permet également de faciliter l'accès lors des opérations de maintenance et des opérations de vérifications.

Le turbinier ne conçoit généralement pas les cellules haute tension, y compris la cellule de transformation : il les achète à un fournisseur spécialisé et les incorpore à l'éolienne. Le turbinier doit s'assurer que ces équipements répondent aux normes produits de l'IEC⁵⁰. Il doit également prévoir un emplacement pour les équipements de protection qui devront être mis à disposition en permanence à proximité des cellules (tabouret isolant, perche à corps etc.).

Champs électromagnétiques

Un champ électromagnétique est la combinaison d'un champ électrique et d'un champ magnétique :

- ▶ le champ électrique est lié à la tension, il se mesure en volt par mètre (V/m) et diminue fortement avec la distance. Les obstacles peuvent l'atténuer, surtout s'ils sont conducteurs ;
- ▶ le champ magnétique est lié au passage du courant, il se mesure en micro-tesla (μT). Il diminue rapidement avec la distance mais n'est pas efficacement atténué par les matériaux courants.

Dans un parc éolien, les champs électromagnétiques sont principalement émis par le poste de livraison, les transformateurs de chaque éolienne et les courants circulant dans les câbles. Pour le poste de livraison, le champ électrique est atténué par la présence des parois entourant le poste. Le transformateur est conçu de façon à concentrer le champ magnétique en son centre, les valeurs du champ magnétique sont donc faibles dès que l'on s'éloigne du transformateur.

Dans l'environnement des câbles souterrains, le champ électromagnétique est également faible :

- ▶ la valeur du champ électrique est nulle au-dessus d'une ligne souterraine, en raison de l'écran métallique entrant dans la constitution de la ligne ;
- ▶ la valeur du champ magnétique est d'environ $2,4\mu\text{T}$ au-dessus la ligne et tombe à $0,05\mu\text{T}$ à 15 m de la ligne. À titre de comparaison, un réfrigérateur émet environ $0,25\mu\text{T}$ et un sèche-cheveux environ $7\mu\text{T}$ ⁵¹.

L'exposition des salariés dans le parc est donc largement inférieure à ce que prévoit la réglementation ICPE pour les riverains : « L'installation est implantée de telle sorte que les habitations ne sont pas exposées à un champ magnétique émanant des aérogénérateurs supérieurs à $100\mu\text{T}$ à 50-60 Hz ». ⁵²

⁵⁰ IEC : commission électrotechnique internationale.

⁵¹ Source : RTE (Réseau de transport d'électricité).

⁵² Arrêté du 26 août 2011 modifié ICPE.

Pour évaluer l'exposition des travailleurs, il faut évaluer les émissions à l'intérieur de l'aérogénérateur. Autour du transformateur, le champ électromagnétique est très faible : de l'ordre de quelques dizaines de μT pour le champ magnétique et de quelques dizaines de V/m pour le champ électrique.

Autour des conducteurs, le champ électrique ne dépasse pas la centaine de V/m . Le champ magnétique, quant à lui, dépend de l'intensité et de la nature des courants (alternatifs ou continus) circulant dans les câbles, ainsi que du mode de pose des câbles.

La prévention des risques liés au champ magnétique repose sur la mise à l'arrêt de la génératrice lors des interventions. Dans ce cas, le champ magnétique émis par l'éolienne est très faible et l'exposition des travailleurs limitée.

« Les rayonnements indésirables de la machine sont éliminés ou réduits à des niveaux n'ayant pas d'effet néfaste sur les personnes. (...) »

Tout rayonnement non ionisant fonctionnel émis par la machine lors de son installation, de son fonctionnement et de son nettoyage est limité à des niveaux n'ayant pas d'effet néfaste sur les personnes. »⁵³

L'exposition des travailleurs aux champs électromagnétiques est soumise aux dispositions des articles R.4453-1 à R.4453-34⁵⁴ du Code du travail. Ces dispositions fixent des valeurs limite d'exposition et des valeurs déclenchant l'action. Cependant, plus le niveau d'émission de la machine est faible, plus il sera facile pour l'exploitant de respecter ces limites. C'est pourquoi le turbiniériste doit évaluer les champs électromagnétiques émis par l'éolienne et les réduire le plus possible. Il doit ensuite concevoir l'installation électrique pour que l'exposition des travailleurs amenés à pénétrer dans l'éolienne soit la plus faible possible. Le moyen de protection le plus efficace contre l'exposition aux rayonnements électromagnétiques étant l'éloignement, il convient que les chemins de câbles soient placés à distance des points d'intervention. De plus, le mode de pose des câbles doit être choisi pour minimiser le champ magnétique émis.

Risques d'incendie

L'incendie est un risque particulier dans une éolienne, notamment parce que l'évacuation n'est pas toujours aisée. Trois axes de lutte contre ce risque peuvent être identifiés :

- ▶ prévenir et détecter l'incendie ;
- ▶ évacuer et secourir ;
- ▶ limiter la propagation.

En complément des réglementations ici évoquées, les assureurs peuvent imposer contractuellement des mesures supplémentaires relatives à l'incendie en phase d'exploitation.

Prévention et détection des incendies

« La machine est conçue et construite de manière à éviter tout risque d'incendie ou de surchauffe provoqué par la machine elle-même ou par les gaz, liquides, poussières, vapeurs et autres substances produites ou utilisées par la machine. »⁵⁵

Le concepteur de l'aérogénérateur doit privilégier les matériaux incombustibles ou difficilement combustibles. La réglementation ICPE prévoit que l'intérieur de l'aérogénérateur doit être maintenu propre et que l'entreposage de matériaux combustibles ou inflammables est interdit à l'intérieur de l'éolienne. Des bacs de rétention d'huile ou de produits combustibles doivent être prévus, là où une fuite est raisonnablement prévisible.

⁵³ Extrait de l'annexe I mentionnée à l'article R.4312-1 du Code du travail.

⁵⁴ Articles issus de la transposition de la directive 2013/35/UE du Parlement européen et du Conseil du 26 juin 2013 concernant les prescriptions minimales de sécurité et de santé relatives à l'exposition des travailleurs aux risques dus aux agents physiques (champs électromagnétiques).

⁵⁵ Extrait de l'annexe I mentionnée à l'article R.4312-1 du Code du travail.

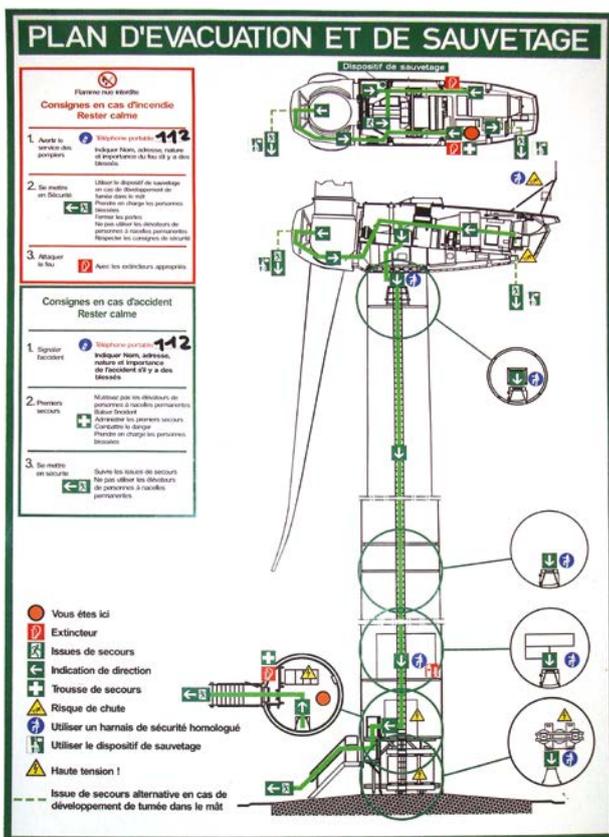
La conception de l'installation électrique dans le respect des règles techniques permet également de prévenir le risque d'incendie, car elle limite les échauffements et les courts-circuits qui constituent des sources d'inflammation.

Lorsque l'incendie ne peut être évité, il doit être détecté le plus en amont possible pour engager la protection des personnes très rapidement.

Selon la réglementation ICPE, chaque aérogénérateur doit être doté :

- ▶ d'un système de détection d'incendie qui permet d'alerter, à tout moment, l'exploitant ou un opérateur qu'il aura désigné ;
- ▶ d'un système d'alarme pour informer l'exploitant d'un fonctionnement anormal (ce système peut être couplé avec le précédent).

Faciliter l'évacuation et l'intervention des secours



L'évacuation des intervenants en cas d'incendie doit pouvoir être la plus rapide possible. Elle doit être pensée dès la conception de l'aérogénérateur, notamment lors de la conception des accès (voir 3.2.1) et du positionnement des extincteurs (voir paragraphe suivant). Une alarme sonore et visuelle, perceptible en tout point, est installée afin d'avertir les personnes présentes.

Une fois un incendie détecté, l'alarme sonore et visuelle doit être déclenchée et l'exploitant doit être en mesure d'alerter les services d'urgence compétents en moins de 15 minutes, délai exigé par la réglementation ICPE. L'alerte peut être donnée :

- ▶ de manière automatique par le système de détection incendie ;
- ▶ par l'exploitant ou son représentant, directement depuis le centre de contrôle ;
- ▶ par les opérateurs présents dans l'éolienne.

Dans ce dernier cas, un moyen de communication indépendant des réseaux du parc doit être mis à disposition (par exemple présence d'un relais ou amplificateur dans le véhicule de service). Cette mesure ne dispense pas de l'installation de téléphones VOIP installés à demeure en pied d'éolienne et en nacelle (voir préconisations en 2.2.6).

Limiter la propagation

Pour limiter la propagation et faciliter l'évacuation, la réglementation ICPE prévoit d'installer de façon visible et facilement accessible deux extincteurs : un au pied de l'éolienne, l'autre dans la nacelle. Le turbinier doit prévoir les emplacements adéquats. Il est également conseillé de placer un second extincteur en nacelle lorsque les quantités de combustible mis en œuvre sont importantes (cas des éoliennes équipées d'un multiplicateur ou d'une boîte de vitesse utilisant une grande quantité d'huile). Dans ce cas, les extincteurs en nacelle doivent être placés de part et d'autre de la turbine.

Le turbinier peut également envisager un dispositif d'extinction automatique, sous réserve de bien analyser l'agent extincteur à utiliser. En cas de présence de personne, une temporisation suffisante doit permettre l'évacuation avant le déclenchement du système, sauf si l'agent extincteur et sa mise en œuvre ne présentent aucun risque pour les personnes.

Risques liés à l'environnement

Formation de glace

Dans des conditions climatiques particulières de froid et d'humidité, notamment en altitude, les pales peuvent givrer. Leur rotation accélère alors la formation de blocs de glace, qui peuvent se détacher et être projetés, constituant de ce fait un risque pour les personnes se trouvant à proximité de l'éolienne (jusqu'à plusieurs dizaines de mètres autour du pied de l'aérogénérateur).

Pour éviter ou à défaut réduire la formation de glace, un revêtement limitant le givrage peut être utilisé sur les pales ou la nacelle, de même que des dispositifs de réchauffage.

De plus, pour les machines installées dans un département où la température peut être négative, la réglementation ICPE impose d'équiper chaque aérogénérateur d'un système permettant de détecter ou de déduire la formation de glace sur les pales. Lorsqu'une formation importante de glace est détectée, l'aérogénérateur doit être mis à l'arrêt dans un délai maximal d'une heure. La mise à l'arrêt peut être effectuée depuis le centre de commande, ou de manière automatique si le turbinier intègre cette fonction dans le système de commande de la machine.

La notice d'instructions de la machine doit décrire la méthodologie de mise en sécurité des intervenants dans ces conditions, ainsi que la procédure de redémarrage de l'aérogénérateur en cas d'arrêt automatique.

Foudre

« La machine nécessitant une protection contre les effets de la foudre pendant son utilisation est équipée d'un système permettant d'évacuer la charge électrique résultante à la terre. »⁵⁶

Souvent appelé « installation extérieure de protection contre la foudre », ce système permet de réaliser la protection contre les coups de foudre directs. Il permet de canaliser le courant de foudre par l'intermédiaire :

- ▶ d'un paratonnerre pour « capter » la foudre,
- ▶ d'un réseau d'équipotentialité des masses pour « transporter » les courants générés par la foudre,
- ▶ du réseau de prises de terre pour écouler les charges à la terre.

Afin de se protéger contre les surtensions atmosphériques, il peut être fait usage de parafoudres.

La norme IEC 61400-24 « Wind turbines - Part 24 : lightning protection » (en langue anglaise uniquement), spécifie les exigences pour la protection d'une éolienne contre les effets de la foudre. Elle est citée par la réglementation ICPE.

3.2.6 Risques mécaniques

Les risques mécaniques sont présents sur toutes les machines et les éoliennes ne font pas exception. Ces risques peuvent prendre différentes formes : risques liés aux éléments mobiles, risques liés aux arêtes vives et angles saillants, risques de perte de stabilité de l'aérogénérateur, risques de rupture en service, risques dus aux variations des conditions de fonctionnement, risques dus aux mouvements non commandés...

L'objectif ici n'est pas de détailler l'ensemble des risques mécaniques présents dans l'éolienne et leurs mesures de prévention, mais de mettre l'accent sur les points spécifiques aux aérogénérateurs et plus particulièrement ceux qui font l'objet de dispositions constructives de la part de la réglementation ICPE.

⁵⁶ Extrait de l'annexe I mentionnée à l'article R.4312-1 du Code du travail.



Stabilité et résistance de la machine

« Les différentes parties de la machine, ainsi que les liaisons entre elles sont conçues et construites pour résister aux contraintes auxquelles elles sont soumises pendant l'utilisation. »⁵⁷

La norme NF EN 61400-1 « Éoliennes – Partie 1 : Exigences de conception » donne des précisions sur les contraintes externes à prendre en compte dans la conception des éoliennes : il s'agit des paramètres liés à l'environnement, à l'électricité et au sol. En ce qui concerne la résistance aux conditions de vent (vitesse et turbulence), la norme définit trois classes d'éoliennes, permettant de couvrir la majorité des applications. Chaque éolienne doit être conçue afin de résister aux conditions de vent définies par la classe d'éolienne ayant été retenue.

Rappelons de plus que le Code de la construction et de l'habitation soumet la construction d'une éolienne de plus de 12 mètres à contrôle technique (voir 1.2.3).

La réglementation ICPE exige également que chaque aérogénérateur soit doté d'un système de détection d'entrée en survitesse. Cette détection doit avoir pour conséquence un arrêt automatique de la machine, en plus de l'alerte obligatoire de l'exploitant.

Risques liés aux éléments mobiles

En fonctionnement normal, l'absence de présence humaine dans l'éolienne limite fortement les risques mécaniques. Toutefois, le fait de pouvoir commander l'éolienne à distance impose de mettre en place des mesures permettant de s'assurer de l'absence de personnes à l'intérieur avant la mise en marche.

PRÉVENTION DES RISQUES LIÉS AUX ÉLÉMENTS MOBILES

La brochure INRS ED 6122 *Sécurité des équipements de travail – Prévention des risques mécaniques* a pour but de faciliter le choix de mesures de prévention contre les risques mécaniques. Elle traite de l'identification des phénomènes dangereux mécaniques, et présente des mesures pour supprimer ou réduire les risques associés. En plus des mesures de prévention intrinsèque, ce document présente les protecteurs et dispositifs de protection et propose une aide au choix entre ces différentes mesures.

Outre les mesures organisationnelles de gestion des accès, un moyen d'assurer la sécurité des personnes serait d'asservir le fonctionnement de la génératrice à la position de la trappe d'accès en nacelle (ou éventuellement à l'utilisation de l'élévateur ou encore à la trappe d'accès à l'échelle). Dans ce cas :

- ▶ l'ouverture de la trappe doit provoquer l'arrêt de la génératrice ;
- ▶ sa fermeture ne doit pas provoquer le redémarrage de la génératrice mais seulement l'autoriser ;
- ▶ le redémarrage ne doit être possible qu'après que l'opérateur se soit assuré de l'absence de personne dans la nacelle (réarmement manuel) ;
- ▶ les fonctions associées à cet asservissement sont des fonctions de sécurité et doivent à ce titre être fiables (voir en 3.2.7, « **Système de commande de l'éolienne** »).

Un tel asservissement permet également de limiter l'exposition des travailleurs au bruit (voir en 3.2.3, « **Autres ambiances physiques** ») et aux champs électromagnétiques (voir en 3.2.5, « **Risque électrique et rayonnements** »).

Lors des opérations de maintenance de la machine, des opérateurs sont susceptibles d'être exposés aux risques mécaniques. La priorité doit être donnée à la suppression de ces risques, c'est-à-dire que le turbinier doit faire en sorte que les interventions puissent être effectuées machine à l'arrêt⁵⁸. Si cela n'est pas possible, alors il doit mettre en place des mesures pour assurer la sécurité des intervenants :

- ▶ protecteurs fixes sur les éléments mobiles ;

⁵⁷ Extrait de l'annexe I mentionnée à l'article R.4312-1 du Code du travail.

⁵⁸ Voir également la brochure INRS ED 6038 : « Intervention sur un équipement de travail – Réflexions pour la sécurité lors des arrêts. »

- ▶ protecteurs mobiles verrouillés sur les éléments mobiles auxquels un accès fréquent est nécessaire ;
- ▶ modes de fonctionnement et de commande appropriés (voir paragraphe suivant) ;
- ▶ dispositifs d'alerte sur les conditions de fonctionnement.

Ces mesures impactent généralement la conception du système de commande ou les modalités de mise en sécurité des interventions.

3.2.7 Commande et mise en sécurité de la machine

Système de commande de l'éolienne

Modes de fonctionnement de l'éolienne

En fonctionnement normal automatique, la commande est effectuée à distance depuis le centre de contrôle. Toutefois, des organes de service doivent permettre de commander la machine en mode local. À cet effet, l'éolienne doit être munie d'un pupitre de commande placé en pied de mât. Les commandes nécessaires à certaines opérations de maintenance doivent également être déportées en des points donnés de la machine, y compris en nacelle (par exemple au moyen d'un pupitre mobile).

La multiplicité des postes de commande engendre des exigences en matière de sécurité :

1. Le système de commande doit être conçu de façon à ce que l'utilisation d'un poste de commande empêche l'utilisation des autres, sauf en ce qui concerne les arrêts et les arrêts d'urgence.
2. Depuis chaque poste de commande, l'opérateur doit pouvoir s'assurer qu'il n'y a personne dans les zones dangereuses.
3. Chaque poste de travail doit être muni d'un organe de service permettant d'arrêter tout ou partie des fonctions de la machine, en fonction des dangers existants.
4. Un sélecteur de mode de fonctionnement, verrouillable dans chaque position, doit être présent dans l'éolienne.
5. Les modes de commande « locaux » doivent être prioritaires sur le mode de commande « distant » et la commande en nacelle doit être prioritaire sur la commande en pied d'éolienne.
6. Le passage dans un mode local ne doit être possible qu'après arrêt de l'ensemble des mouvements.
7. Les organes de service situés en nacelle, sur un pupitre mobile par exemple, doivent nécessiter une action maintenue de l'opérateur et ne commander les mouvements que dans des conditions de sécurité accrue (à vitesse réduite, par à-coups, etc.). L'opérateur doit avoir la maîtrise des éléments sur lesquels il agit (voir en 3.2.7, « Sécurisation des interventions »).

Fonctions d'arrêt et de sécurité

L'aérogénérateur doit être pourvu de plusieurs fonctions d'arrêt :

- ▶ un arrêt normal, permettant l'arrêt complet, en toute sécurité de la machine ;
- ▶ des arrêts à chaque poste de travail permettant d'arrêter tout ou partie de la machine ;
- ▶ une fonction d'arrêt d'urgence prioritaire sur toutes les autres fonctions et permettant un arrêt rapide de l'aérogénérateur ;
- ▶ des fonctions d'arrêt suite au déclenchement de fonctions de protection telles que :
 - arrêt suite à une survitesse du rotor,
 - arrêt suite à la surcharge électrique ou défaillance du générateur,
 - arrêt suite à des vibrations excessives,
 - arrêt suite à une torsion anormale des câbles (après rotation de la nacelle).



Fiabilité du système de commande

Les fonctions d'arrêt et les fonctions de sécurité (asservissement de trappes, détection de la survitesse par exemple) doivent être fiables, c'est-à-dire qu'une défaillance du matériel ou du logiciel ne doit pas entraîner de situation dangereuse. À cet effet, le système de commande doit être conçu de façon à assurer, pour chaque fonction de sécurité, un niveau de performance (*performance level*, PL) selon la norme NF EN ISO 13849-1 ou un niveau d'intégrité (*safety integrity level*, SIL) selon la norme NF EN 62061 en adéquation avec le risque à couvrir⁵⁹.

Sécurisation des interventions

Consignation

« La machine est munie de dispositifs permettant de l'isoler de toutes les sources d'énergie. Ces dispositifs sont clairement identifiés. Ils sont verrouillables si la reconnexion risque de présenter un danger pour les personnes. Les dispositifs sont également verrouillables lorsque l'opérateur ne peut pas, de tous les emplacements auxquels il a accès, vérifier que l'alimentation en énergie est toujours coupée.

Après que l'alimentation a été coupée, toute énergie résiduelle ou stockée dans les circuits de la machine peut être évacuée normalement, sans risque pour les personnes. »⁶⁰

Un dispositif d'isolement global pour l'ensemble de l'éolienne peut être prévu, mais le turbinateur doit également prévoir des dispositifs permettant de séparer indépendamment certains équipements. Par exemple, il est souhaitable que l'élévateur dispose de son propre dispositif de séparation.

La présence de dispositifs de séparation est un prérequis indispensable à la mise en œuvre par l'exploitant des procédures de consignation. La consignation de l'aérogénérateur concerne tant la consignation électrique que la consignation mécanique. La consignation mécanique est d'autant plus importante que c'est la seule permettant un maintien à l'arrêt sûr du rotor, y compris en présence de vent. Quant à la consignation électrique, elle doit prendre toutes les sources d'énergie électrique. Par exemple, les éoliennes à pas variable ont une source d'énergie indépendante dans le moyeu (batteries ou accumulateurs hydrauliques) qu'il convient de prendre en compte dans les consignations.

Rappelons que la consignation est une démarche qui va bien au-delà de la simple condamnation des énergies. La brochure ED 6109 *Consignations et déconsignations* aide à établir une procédure de consignation adaptée.

Le rapport de l'IRSST⁶¹ consacre un chapitre aux résultats d'une étude exploratoire sur le « cadenassage en contexte éolien » (selon le terme en vigueur au Québec). Il rappelle que cette question est centrale dans le processus d'amélioration des conditions de travail et de la prévention des accidents en milieu éolien.

Mise en sécurité des interventions

Il est rarement possible de consigner totalement une éolienne pour les interventions. Le maintien en énergie de certains équipements est indispensable aux opérateurs, pour assurer par exemple le fonctionnement de l'élévateur, l'éclairage intérieur ou encore le report d'informations sur les écrans de contrôle.

Toutefois, l'arrêt de la production d'électricité est incontournable avant d'intervenir dans l'aérogénérateur. En effet, l'arrêt de la génératrice permet de protéger les intervenants contre les risques liés au bruit, aux vibrations, aux champs électromagnétiques et à certains éléments mobiles.

⁵⁹ Voir aussi la brochure ED 6310 *Sécurité des machines. Principes de conception des systèmes de commande*, INRS.

⁶⁰ Extrait de l'annexe I mentionnée à l'article R.4312-1 du Code du travail.

⁶¹ Rapport R820 IRSST, voir note n° 17.



Pour cela, un asservissement peut être prévu entre l'ouverture d'une trappe et la production d'électricité (voir en 3.2.6, « Risques liés aux éléments mobiles »). Il suffit pour cela d'équiper la trappe concernée d'un dispositif de verrouillage qui provoque l'arrêt de la production et la mise en drapeau des pales à son ouverture. Cette solution a l'avantage d'être automatique et est plus efficace qu'une procédure dont l'application dépendrait de l'opérateur. Ce dispositif de verrouillage pourrait également être utilisé pour informer systématiquement le centre de commande de l'ouverture de la trappe et donc de la présence d'au moins une personne dans l'éolienne.

En plus de l'arrêt de la génératrice, les interventions doivent être sécurisées, en particulier les interventions dans le rotor ou dans les pales.

« *Quand un élément d'une machine a été arrêté, toute dérive à partir de sa position d'arrêt, quelle qu'en soit la cause hormis l'action sur les organes de service, est empêchée sauf si elle ne présente pas de danger.* »⁶²

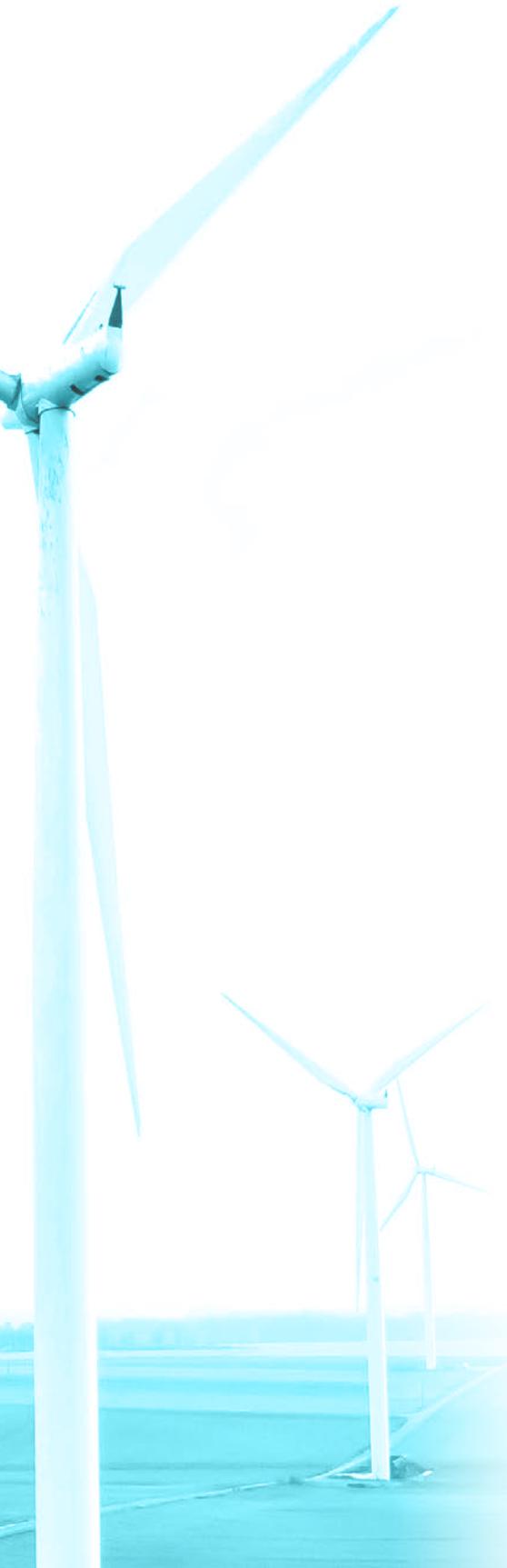
Avant de pouvoir entrer dans le rotor, il est nécessaire que celui-ci soit consigné mécaniquement et que la génératrice soit préalablement mise à l'arrêt. Cela suppose que le turbinier a bien prévu les dispositifs de consignation nécessaires tels que des dispositifs de bridage mécanique (blocage du rotor et calage des pales par exemple).

L'opérateur également doit disposer de toutes les informations nécessaires à sa sécurité (par exemple la vitesse du vent ou l'état du blocage du rotor).

⁶² Extrait de l'annexe I mentionnée à l'article R.4312-1 du Code du travail.



4. Préparation de la mise en exploitation



Comme nous l'avons vu dans les chapitres précédents, la phase de conception du parc et des aérogénérateurs permet d'appréhender les questions de santé et de sécurité des travailleurs et de prévoir les mesures de prévention à intégrer à la conception. La phase de construction du parc permettra de mettre en œuvre et d'installer l'ensemble de ces mesures.

L'exploitation du parc commence par une **phase transitoire de préparation** à la mise en service (parfois appelée *commissioning*) visant à s'assurer que le matériel et le personnel sont aptes à remplir leurs fonctions.

La **phase de réception du parc** a lieu en fin de chantier. La réception marque la fin du chantier et a pour but de s'assurer que le parc éolien tel que réalisé correspond bien aux demandes formulées dans les différents cahiers des charges. La phase de réception concerne à la fois les aérogénérateurs et le parc dans son ensemble. Le (ou les) maître(s) d'œuvre prépare la réception en vérifiant la conformité de la construction aux marchés et aux obligations techniques et réglementaires.

Pour que la réception se passe au mieux, il est important qu'une démarche de vérification et de validation ait été mise en place tout au long du projet. Cette démarche consiste à s'assurer que le parc éolien répond aux critères définis lors de la conception et ainsi, que les objectifs de prévention des risques professionnels et de production pourront être atteints. Elle requiert une contribution active des personnels pour vérifier le respect des différents cahiers des charges et confronter la conception du parc à l'usage qui va en être fait.

La réception intervient après la levée des réserves formulées lors du constat d'achèvement des travaux et une nécessaire période d'essais et de vérifications. Les notices d'instructions, les dossiers d'interventions ultérieures sur l'ouvrage (DIUO) sont remis à la réception. Il peut y avoir plusieurs réceptions simultanées ou successives des différents constituants du parc (bâtiments, aérogénérateurs, poste de livraison etc.).

D'un point de vue du régime juridique, le passage en **phase d'exploitation** du parc éolien marque la clôture de la phase de coordination SPS de chantier.

Pour les différents acteurs en présence, il convient à ce stade :

- ▶ de veiller à ce que l'articulation avec la démarche de prévention des risques professionnels lors de l'intervention d'entreprises extérieures soit efficace et opérationnelle ;
- ▶ d'identifier très précisément les actions permettant d'assurer le passage de la coordination santé/sécurité sur le chantier à la mise en œuvre des mesures de prévention durant l'exploitation du parc intégrant :
 - la prise en compte des risques propres à l'activité de l'exploitant du parc (suivi de production...),
 - la prise en compte des risques supplémentaires générés par l'intervention d'entreprises extérieures sollicitées par l'exploitant (opérations de maintenance préventive et curative sur les éoliennes, sur les installations du parc, entretien des voies d'accès, opérations de contrôle...).

À cet effet, les parties préciseront contractuellement quelles opérations marquent le début de la phase d'exploitation ; il pourra s'agir par exemple de la fin de la phase des tests de raccordement au réseau.

La phase d'exploitation du parc, c'est-à-dire la phase de production et de revente d'électricité est la plus longue. Chaque aérogénérateur a en effet une durée de vie d'environ 20 ans ou plus et fonctionne en moyenne 6 000 heures par an (chiffre variable en fonction des conditions de vent). Les activités en phase d'exploitation sont essentiellement des activités de pilotage des éoliennes, de maintenance et d'entretien du parc et de vérification des équipements et installations.

L'exploitant devra être en possession de l'ensemble des documents nécessaires à l'utilisation et à la maintenance des aérogénérateurs. C'est sur la base de ces instructions qu'il pourra appliquer les principes généraux de prévention, à commencer par l'évaluation des risques.

Durant la phase d'exploitation, les risques générés par l'interférence d'activités entre l'exploitant et les entreprises intervenantes seront pris en compte lors de l'élaboration des plans de prévention.

La brochure INRS ED 941 *Intervention d'entreprises extérieures – aide-mémoire pour la prévention des risques* a pour objectif d'accompagner les entreprises dans l'analyse commune des risques liés à la coactivité et dans la mise en place des mesures de prévention appropriées et formalisées dans les plans de prévention.

Compte tenu de l'importance de certains parcs éoliens (grand nombre de machines), la livraison des machines peut se faire par tranche. Le nombre de tranches dépend du rythme de construction du parc et des différentes autorisations de raccordement au réseau. Dans ce cas il conviendra également d'être vigilant sur l'identification du basculement en phase d'exploitation de façon à ce que les risques liés à la co-activité soient toujours pris en compte soit dans le cadre du PGC et des PPSPS, soit dans le cadre des plans de prévention.

Pour commander les brochures et les affiches de l'INRS,
adressez-vous au service Prévention de votre Carsat, Cramif ou CGSS.

Services Prévention des Carsat et de la Cramif

Carsat ALSACE-MOSELLE

(67 Bas-Rhin)
14, rue Adolphe-Seyboth
CS 10392
67010 Strasbourg cedex
tél. 03 88 14 33 00
fax 03 88 23 54 13
prevention.documentation@carsat-am.fr
www.carsat-alsacemoselle.fr

(57 Moselle)

3, place du Roi-George
BP 31062
57036 Metz cedex 1
tél. 03 87 66 86 22
fax 03 87 55 98 65
www.carsat-alsacemoselle.fr

(68 Haut-Rhin)

11, avenue De-Lattre-de-Tassigny
BP 70488
68018 Colmar cedex
tél. 03 69 45 10 12
fax 03 89 21 62 21
www.carsat-alsacemoselle.fr

Carsat AQUITAINE

(24 Dordogne, 33 Gironde,
40 Landes, 47 Lot-et-Garonne,
64 Pyrénées-Atlantiques)
80, avenue de la Jallère
33053 Bordeaux cedex
tél. 05 56 11 64 36
documentation.prevention@
carsat-aquitaine.fr
www.carsat-aquitaine.fr

Carsat AUVERGNE

(03 Allier, 15 Cantal,
43 Haute-Loire,
63 Puy-de-Dôme)
Espace Entreprises
Clermont République
63036 Clermont-Ferrand cedex 9
tél. 04 73 42 70 19
fax 04 73 42 70 15
offredoc@carsat-auvergne.fr
www.carsat-auvergne.fr

Carsat BOURGOGNE - FRANCHE-COMTÉ

(21 Côte-d'Or, 25 Doubs,
39 Jura, 58 Nièvre,
70 Haute-Saône,
71 Saône-et-Loire, 89 Yonne,
90 Territoire de Belfort)
46, rue Elsa-Triolet
21044 Dijon cedex
tél. 03 80 33 13 92
fax 03 80 33 19 62
documentation.prevention@carsat-bfc.fr
www.carsat-bfc.fr

Carsat BRETAGNE

(22 Côtes-d'Armor, 29 Finistère,
35 Ille-et-Vilaine, 56 Morbihan)
236, rue de Châteaugiron
35030 Rennes cedex 09
tél. 02 99 26 74 63
fax 02 99 26 70 48
drp.cdi@carsat-bretagne.fr
www.carsat-bretagne.fr

Carsat CENTRE - VAL DE LOIRE

(18 Cher, 28 Eure-et-Loir, 36 Indre,
37 Indre-et-Loire, 41 Loir-et-Cher, 45 Loiret)
36, rue Xaintrailles
CS44406
45044 Orléans cedex 1
tél. 02 38 79 70 21
prev@carsat-centre.fr
www.carsat-cvl.fr

Carsat CENTRE-OUEST

(16 Charente, 17 Charente-Maritime,
19 Corrèze, 23 Creuse, 79 Deux-Sèvres,
86 Vienne, 87 Haute-Vienne)
TSA 34809
87048 Limoges cedex
tél. 05 55 45 39 04
fax 05 55 45 71 45
cirp@carsat-centreouest.fr
www.carsat-centreouest.fr

Cram ÎLE-DE-FRANCE

(75 Paris, 77 Seine-et-Marne,
78 Yvelines, 91 Essonne,
92 Hauts-de-Seine, 93 Seine-Saint-Denis,
94 Val-de-Marne, 95 Val-d'Oise)
17-19, place de l'Argonne
75019 Paris
tél. 01 40 05 32 64
fax 01 40 05 38 84
prevdocinrs.cramif@assurance-maladie.fr
www.cramif.fr

Carsat LANGUEDOC-ROUSSILLON

(11 Aude, 30 Gard, 34 Hérault,
48 Lozère, 66 Pyrénées-Orientales)
29, cours Gambetta
34068 Montpellier cedex 2
tél. 04 67 12 95 55
fax 04 67 12 95 56
prevdoc@carsat-lr.fr
www.carsat-lr.fr

Carsat MIDI-PYRÉNÉES

(09 Ariège, 12 Aveyron, 31 Haute-Garonne,
32 Gers, 46 Lot, 65 Hautes-Pyrénées,
81 Tarn, 82 Tarn-et-Garonne)
2, rue Georges-Vivent
31065 Toulouse cedex 9
doc.prev@carsat-mp.fr
www.carsat-mp.fr

Carsat NORD-EST

(08 Ardennes, 10 Aube, 51 Marne,
52 Haute-Marne, 54 Meurthe-et-Moselle,
55 Meuse, 88 Vosges)
81 à 85, rue de Metz
54073 Nancy cedex
tél. 03 83 34 49 02
documentation.prevention@carsat-nordest.fr
www.carsat-nordest.fr

Carsat NORD-PICARDIE

(02 Aisne, 59 Nord, 60 Oise,
62 Pas-de-Calais, 80 Somme)
11, allée Vauban
59662 Villeneuve-d'Ascq cedex
tél. 03 20 05 60 28
fax 03 20 05 79 30
bedprevention@carsat-nordpicardie.fr
www.carsat-nordpicardie.fr

Carsat NORMANDIE

(14 Calvados, 27 Eure, 50 Manche,
61 Orne, 76 Seine-Maritime)
Avenue du Grand-Cours
CS 36028
76028 Rouen cedex 1
tél. 02 35 03 58 22
fax 02 35 03 60 76
prevention@carsat-normandie.fr
www.carsat-normandie.fr

Carsat PAYS DE LA LOIRE

(44 Loire-Atlantique, 49 Maine-et-Loire,
53 Mayenne, 72 Sarthe, 85 Vendée)
2, place de Bretagne
44932 Nantes cedex 9
tél. 02 51 72 84 08
fax 02 51 82 31 62
documentation.rp@carsat-pl.fr
www.carsat-pl.fr

Carsat RHÔNE-ALPES

(01 Ain, 07 Ardèche, 26 Drôme, 38 Isère,
42 Loire, 69 Rhône, 73 Savoie,
74 Haute-Savoie)
26, rue d'Aubigny
69436 Lyon cedex 3
tél. 04 72 91 97 92
fax 04 72 91 98 55
prevention.doc@carsat-ra.fr
www.carsat-ra.fr

Carsat SUD-EST

(04 Alpes-de-Haute-Provence,
05 Hautes-Alpes, 06 Alpes-Maritimes,
13 Bouches-du-Rhône, 2A Corse-du-Sud,
2B Haute-Corse, 83 Var, 84 Vaucluse)
35, rue George
13386 Marseille cedex 20
tél. 04 91 85 85 36
documentation.prevention@carsat-sudest.fr
www.carsat-sudest.fr

Services Prévention des CGSS

CGSS GUADELOUPE

Espace Amédée Fengarol, bât. H
Parc d'activités La Providence, ZAC de Dothémare
97139 Les Abymes
tél. 05 90 21 46 00 – fax 05 90 21 46 13
risquesprofessionnels@cgss-guadeloupe.fr
www.preventioncgss971.fr

CGSS GUYANE

CS 37015
97307 Cayenne cedex
tél. 05 94 29 83 04 – fax 05 94 29 83 01
prevention-rp@cgss-guyane.fr

CGSS LA RÉUNION

4, boulevard Doret, CS 53001
97741 Saint-Denis cedex 9
tél. 02 62 90 47 00 – fax 02 62 90 47 01
prevention@cgss.re
www.cgss-reunion.fr

CGSS MARTINIQUE

Quartier Place-d'Armes,
97210 Le Lamentin cedex 2
tél. 05 96 66 51 31 et 05 96 66 76 19 – fax 05 96 51 81 54
documentation.atmp@cgss-martinique.fr
www.cgss-martinique.fr

L'essor sans précédent des parcs éoliens terrestres pose la question de la prévention des risques professionnels lors de leur construction et de leur exploitation. Cette brochure présente les points de vigilance en santé et sécurité au travail à prendre en compte lors de la conception des parcs, ainsi que les moyens de prévention associés.

Les professionnels du secteur y trouveront des repères et des pistes pour enrichir leurs réflexions sur les situations de travail dans les parcs éoliens ainsi que des solutions de prévention issues de bonnes pratiques.

Les maîtres d'ouvrage non professionnels du secteur, y compris les collectivités territoriales ou les groupes de particuliers, y trouveront des éléments de connaissance de la filière et des informations sur les exigences à intégrer dans leur projet. Des illustrations détaillées permettent de comprendre les spécificités du déroulement d'un projet de ce type. Ce document constitue aussi un référentiel utile aux préventeurs : coordonnateurs de sécurité et de protection de la santé (CSPS), préventeurs du réseau prévention (Carsat, CGSS et Cramif), et autres acteurs tels que les Direccte et les services de santé au travail.



Institut national de recherche et de sécurité
pour la prévention des accidents du travail et des maladies professionnelles
65, boulevard Richard-Lenoir 75011 Paris • Tél. 01 40 44 30 00 • info@inrs.fr

Édition INRS ED 6346

1^{re} édition • février 2020 • 3 000 ex. • ISBN 978-2-7389-2534-3

▶ L'INRS est financé par la Sécurité sociale - Assurance maladie / Risques professionnels ◀

www.inrs.fr

YouTube

