

Directives environnementales, sanitaires et sécuritaires pour l'énergie éolienne

Introduction

Les Directives environnementales, sanitaires et sécuritaires (Directives EHS) sont des documents de références techniques qui présentent des exemples de bonnes pratiques internationales¹, de portée générale ou concernant une branche d'activité particulière. Lorsqu'un ou plusieurs États membres participent à un projet du Groupe de la Banque mondiale, les Directives EHS doivent être suivies conformément aux politiques et normes de ces pays. Les Directives EHS établies pour les différentes branches d'activité sont conçues pour être utilisées conjointement avec les **Directives EHS générales**, qui présentent des principes directeurs environnementaux, sanitaires et sécuritaires applicables dans tous les domaines. Les projets complexes peuvent exiger l'application de plusieurs directives couvrant des branches d'activité différentes. La liste complète de ces directives figure à l'adresse suivante :

<http://www.ifc.org/ifcext/sustainability.nsf/Content/EnvironmentalGuidelines>

Les Directives EHS indiquent les mesures et les niveaux de performances qui sont généralement considérés réalisables dans de nouvelles installations avec les technologies existantes à un coût raisonnable. L'application des Directives EHS dans

des installations existantes peut nécessiter la définition d'objectifs spécifiques et l'établissement d'un calendrier adapté pour atteindre ces objectifs. Le champ d'application des Directives EHS doit être fonction des aléas et des risques identifiés pour chaque projet sur la base des résultats d'une évaluation environnementale qui prend en compte des éléments spécifiques au projet, comme les conditions en vigueur dans le pays dans lequel le projet est réalisé, la capacité d'assimilation de l'environnement, et d'autres facteurs propres au projet. La mise en œuvre de recommandations techniques particulières doit être établie sur base de l'opinion professionnelle des personnes ayant les qualifications et l'expérience nécessaires. Si les seuils et normes stipulés dans les réglementations du pays d'accueil diffèrent de ceux indiqués dans les Directives EHS, les plus rigoureuses seront retenues pour les projets menés dans ce pays. Si des niveaux moins contraignants que ceux des Directives EHS peuvent être retenus pour des raisons particulières dans le contexte du projet, une justification détaillée pour chacune de ces alternatives doit être présentée dans le cadre de l'évaluation environnementale du site considéré. Cette justification devra montrer que les niveaux de performance proposés permettent de protéger la santé de la population humaine et l'environnement.

Champ d'application

Les **Directives EHS générales** pour l'énergie éolienne contiennent des informations sur les aspects environnementaux, sanitaires et sécuritaires liés à l'exploitation des éoliennes terrestres ou maritimes. L'annexe A comporte une description détaillée des activités de cette branche d'activité. Les questions

¹ C'est-à-dire les pratiques que l'on peut raisonnablement attendre de professionnels qualifiés et chevronnés faisant preuve de compétence professionnelle, de diligence, de prudence et de prévoyance dans le cadre de la poursuite d'activités du même type dans des circonstances identiques ou similaires partout dans le monde. Les circonstances que des professionnels qualifiés et chevronnés peuvent rencontrer lorsqu'ils évaluent toute la gamme des techniques de prévention de la pollution et de dépollution applicables dans le cadre d'un projet peuvent inclure, sans toutefois s'y limiter, divers degrés de dégradation environnementale et de capacité d'assimilation de l'environnement ainsi que différents niveaux de faisabilité financière et technique.

d'environnement, de santé et de sécurité que soulève l'exploitation des lignes électriques sont traitées séparément dans les Directives EHS sur le transport et la distribution d'électricité. Ce document se compose des sections ci-après :

Section 1.0 — Description et gestion des impacts propres aux activités considérées

Section 2.0 — Indicateurs de performance et suivi des résultats

Section 3.0 — Bibliographie

Annexe A — Description générale des activités

1.0 Description et gestion des impacts propres aux activités considérées

Cette section résume les questions d'ordre environnemental, sanitaire et sécuritaire qui peuvent se poser aux cours des phases d'exploitation, de construction et de remise en état des sites d'extraction de matériaux de construction, et elle présente des recommandations sur la manière de les gérer.

1.1 Environnement

Les travaux de construction des éoliennes comportent généralement les étapes suivantes : défrichage en vue de la préparation des sites et de l'aménagement des voies d'accès ; terrassement, dynamitage et comblement ; transport des équipements et des combustibles ; construction des fondations (terrassement et coulage du béton) ; déchargement et installation des équipements à l'aide de grues ; et mise en service des nouveaux équipements. Les activités de mise hors service peuvent donner lieu au retrait des infrastructures et à la remise en état du site.

Les travaux de construction et la mise hors service des installations soulèvent par ailleurs un certain nombre de problèmes d'ordre environnemental : émissions sonores et vibrations, érosion des sols, menaces pour la biodiversité, (modification des habitats et impacts sur les espèces sauvages,

notamment). Les installations de conversion de l'énergie éolienne étant le plus souvent situées dans des zones isolées, le transport des équipements et des matériaux de construction et la mise hors service des installations peuvent aussi présenter des difficultés d'ordre logistique. Les recommandations relatives à la gestion de ces questions environnementales, sanitaires et sécuritaires figurent à la section Construction et démantèlement des **Directives EHS générales**.

Les problèmes environnementaux liés aux projets éoliens ont trait aux aspects suivants :

- impacts visuels des éoliennes
- émissions sonores
- mortalité des espèces sauvages, blessures et perturbations causées aux animaux
- effet stroboscopique et réfléchissement des rayons solaires
- modification des habitats
- qualité de l'eau

Impacts visuels

Selon le site choisi et la perception que les populations locales ont des éoliennes, l'implantation d'une ferme éolienne peut avoir un impact sur les ressources paysagères. Les impacts visuels d'un projet éolien tiennent principalement aux éoliennes en elles-mêmes (couleur, hauteur, nombre, par exemple) et aux interactions entre les éoliennes et le caractère du paysage environnant.

Les mesures de prévention et de contrôle visant à limiter les impacts visuels des éoliennes consistent à ²:

- consulter les populations locales avant de sélectionner l'emplacement de la ferme éolienne et intégrer leurs observations à la conception du projet ;

² Gipe (1995).

- tenir compte du caractère du paysage lors du choix du site d'implantation de l'éolienne ;
- examiner les impacts visuels des éoliennes depuis tous les angles de vue avant de choisir leur site d'implantation définitif ;
- réduire au minimum la présence visuelle des structures auxiliaires aménagées sur le site, en évitant de clôturer la ferme éolienne, en limitant le nombre de voies de desserte, en enterrant les câbles électriques qui alimentent le site et en retirant toutes les éoliennes hors d'état de marche ;
- éviter les terrains trop pentus, appliquer des mesures de prévention de l'érosion et revégétaliser rapidement les zones défrichées, en ne plantant que des espèces autochtones ;
- veiller à l'uniformité de la taille et de la conception des éoliennes (sens de rotation, type d'éolienne et de mât, hauteur) ;
- peindre toutes les éoliennes de la même couleur, en choisissant une teinte proche de la couleur du ciel (gris pâle ou bleu pâle), tout en respectant les réglementations relatives à signalisation des obstacles constituant un danger pour la sécurité maritime et aérienne ;
- éviter d'apposer sur les éoliennes des lettres, logos, publicités ou autres motifs graphiques.

Bruit

Les éoliennes en exploitation émettent un bruit qui est le plus souvent d'origine mécanique (machines situées dans la nacelle) ou aérodynamique (mouvement de l'air autour des pales et du mât). Il peut s'agir d'un bruit basse fréquence, d'un bruit impulsif basse fréquence, d'un bruit tonal ou d'un bruit bande large continu. Ce bruit peut s'intensifier avec l'accroissement de la vitesse de rotation des pales. En conséquence, les éoliennes conçues pour tourner moins vite par vent fort produisent moins de bruit.

Les mesures de prévention et de contrôle des émissions sonores touchent pour l'essentiel aux normes de conception et d'ingénierie des éoliennes. À titre d'exemple, le bruit large bande est produit par la turbulence de l'air à l'arrière des pales et augmente avec la vitesse de rotation des pales. On peut donc l'atténuer en utilisant des éoliennes à vitesse variable ou des pales à plans inclinés afin de réduire la vitesse de rotation.

Pour réduire les nuisances sonores liées aux éoliennes, on recommandera également l'application des mesures de suivantes :

- planter les éoliennes sur des sites bien adaptés, en évitant les zones trop proches d'établissements sensibles au bruit (quartiers résidentiels, hôpitaux, écoles) ;
- respecter les normes nationales ou internationales de conception acoustique applicables aux éoliennes (Agence internationale de l'énergie, Commission électrotechnique internationale [CEI], American National Standards Institute, par exemple).

Mortalité des espèces sauvages, blessures et perturbations causées aux animaux

À terre

Il arrive que des oiseaux ou des chauves-souris heurtent les pales du rotor des éoliennes ou le mât, ce qui peut occasionner des blessures parfois fatales. La présence d'éoliennes peut aussi avoir des retombées indirectes, et entraîner notamment une évolution du nombre et du type d'espèces-proies résultant de la modification des habitats sur le site d'implantation de la ferme éolienne, ou une évolution du nombre et du type de perchoirs et de sites de nidification, laquelle peut être liée à une modification des habitats naturels ou au fait que les oiseaux utilisent les éoliennes.³

³ NWCC (1999).

L'impact des éoliennes sur les populations d'oiseaux et de chauves-souris est fonction de l'ampleur du projet et d'autres facteurs comme la conception technique des installations (dimension du mât, conception de l'éolienne, par exemple), l'éclairage et l'agencement de la ferme éolienne. En outre, les caractéristiques du site peuvent aussi influencer sur l'impact des éoliennes sur la faune sauvage : caractéristiques physiques et paysagères du site (proximité des habitats où se concentrent les oiseaux, les chauves-souris ou leurs proies, par exemple), nombre d'oiseaux et de chauves-souris traversant le site, comportements à risque des oiseaux (vols à haute altitude) et des chauves-souris (voies migratoires) et considérations météorologiques.

Les mesures de prévention et de contrôle relatives aux impacts des éoliennes sur la faune sauvage se présentent comme suit :

- sélectionner les sites d'implantation des éoliennes en tenant compte des voies migratoires connues ou des zones dans lesquelles les oiseaux et les chauves-souris se concentrent en grands nombres : zones humides, périmètres protégés, zones de relais des espèces migratrices, colonies, sites d'hibernation des chauves-souris, gîtes, crêtes, vallées et rives des cours d'eau ;
- configurer les éoliennes de manière à éviter la mortalité aviaire (par exemple en groupant les éoliennes au lieu de les espacer ou en les orientant de manière à ce qu'elles soient alignées parallèlement au sens de déplacement des oiseaux) ;
- prendre des mesures adaptées de gestion des eaux de pluie pour éviter la formation, au pied des éoliennes, de petites mares d'eau susceptibles d'attirer les oiseaux et les chauves-souris, qui pourraient alors venir se nourrir ou nicher à proximité de la ferme éolienne.

En mer

Il y a peu de risques que le bruit produit par les éoliennes maritimes éloigne les poissons et mammifères marins. En revanche, les travaux d'installation ou de démantèlement des éoliennes et des câbles immergés peuvent entraîner le déplacement temporaire des poissons, des mammifères marins, des tortues de mer et des oiseaux. Ces déplacements peuvent être la conséquence directe des perturbations auditives, visuelles ou vibratoires liées à la présence des éoliennes ou la conséquence indirecte de l'augmentation de la quantité de sédiments dans la colonne d'eau résultant de la perturbation du fonds marin.

Les mesures visant à réduire ces impacts sont fonction des caractéristiques des habitats naturels de espèces concernées et consistent notamment à :

- mettre en place des procédures de « démarrage en douceur » pour le battage des pieux, afin d'éviter d'exposer les poissons, les mammifères marins et les tortues de mer à des niveaux de bruits nocifs et de leur permettre de quitter la zone ;
- utiliser la technique consistant à creuser les tranchées d'enfouissement des câbles sous-marins au jet hydraulique, considérée comme la moins dommageable à l'environnement au regard de méthodes plus classiques ;
- opter pour des fondations de type monopile, qui perturbent moins le fonds marin que d'autres types de fondations.⁴

Comme dans le cas des éoliennes terrestres, la présence d'éoliennes maritimes peut être un facteur de mortalité aviaire, les oiseaux de mer étant susceptibles de heurter les pales des éoliennes. Les mesures de prévention et de contrôle à prendre pour réduire ce risque se présentent comme suit :

⁴ CWA (2004).

- choisir un site bien adapté afin d'éviter les zones très fréquentées par les oiseaux, et notamment les voies de migration ;
- faire en sorte que la hauteur du mât des éoliennes soit inférieure à l'altitude à laquelle volent généralement les oiseaux migrateurs ;
- respecter une distance suffisante entre les pales du rotor et la surface, afin d'éviter que les pales ne heurtent l'eau et ne perturbent les oiseaux évoluant à proximité de la surface ;
- utiliser des pales à rotation lente, qui sont plus visibles.⁵

Effet stroboscopique et réfléchissement des rayons solaires

Lorsque le soleil passe derrière l'éolienne, la rotation des pales entraîne une interruption périodique de la lumière du soleil, appelée « effet stroboscopique ». Ce phénomène peut poser problème lorsque les éoliennes sont situées à proximité de zones résidentielles, et peut être plus un moins perturbant selon l'orientation des zones d'habitation par rapport aux éoliennes.

Le réfléchissement du soleil sur les pales ou le mât peut avoir des effets particulièrement gênants pour les populations des environs lorsque les pales sont orientées de telle manière qu'elles renvoient les rayons solaires vers les zones résidentielles. Il s'agit toutefois d'un phénomène transitoire qui ne concerne que les éoliennes neuves et disparaît au bout de quelques mois, une fois que les pales sont encrassées et ne réfléchissent plus la lumière du soleil.

Les mesures recommandées pour prévenir et réduire les nuisances liées à ces phénomènes consistent à :

- définir l'emplacement et l'orientation des éoliennes de manière à éviter les zones résidentielles situées dans les

bandes étroites qui s'étendent généralement au sud-ouest et au sud-est des éoliennes, et dans lesquelles la fréquence des reflets du soleil sur les pales est plus élevée. Les logiciels de modélisation en vente dans le commerce permettent de localiser les zones concernées. On peut ensuite choisir l'emplacement le mieux adapté pour l'installation des éoliennes ;

- peindre le mât des éoliennes avec un revêtement non réfléchissant afin d'éviter qu'il ne renvoie les rayons solaires.

Modification des habitats

À terre

Le risque de modification des habitats terrestres lié à la construction et à l'exploitation des éoliennes terrestres est limité, compte tenu de leur faible empreinte écologique. Comme indiqué précédemment, les mesures à prendre pour prévenir ou réduire ces impacts sont présentées dans les **Directives EHS générales**. La construction des routes d'accès aux sites isolés sur lesquels doivent être installées des fermes éoliennes peut en revanche entraîner des risques accrus de modification des habitats terrestres. Les **Directives EHS générales** contiennent des recommandations supplémentaires sur la prévention et la maîtrise des impacts de la construction et de l'exploitation des infrastructures routières.

En mer

La pose des fondations des éoliennes maritimes peut entraîner la disparition des habitats marins, en raison des travaux de creusement des fonds marins. Il peut en résulter, selon l'emplacement de l'éolienne, une interruption du cycle de vie de certaines espèces (ponte, grossissement, par exemple) et la disparition des habitats des espèces ciblées par les pêcheries commerciales et les adeptes de la pêche de loisir, bien que ce risque soit limité, compte tenu de la faible empreinte des

⁵ CWA (2004).

installations éoliennes.⁶ Par contre, la partie immergée du mât et les fondations peuvent constituer un nouveau substrat (habitat artificiel) que certaines espèces marines viendront coloniser. Les fondations de l'éolienne peuvent aussi constituer un nouvel habitat pour les poissons et d'autres biotes.⁷

On peut éviter ou réduire les impacts négatifs potentiels des projets éoliens sur les habitats naturels en installant les éoliennes sur des sites bien adaptés, à l'écart des zones écologiquement vulnérables.

Qualité de l'eau

À terre

L'installation des fondations des éoliennes et des câbles enterrés et la construction des routes d'accès peuvent aggraver l'érosion des sols et la sédimentation des eaux de surfaces. Les mesures visant à prévenir et à lutter contre l'érosion et la sédimentation sont exposées dans les **Directives EHS générales** et les **Directives EHS pour les routes**.

En mer

La pose des fondations des éoliennes et des câbles sous-marins peut perturber le fonds marin et accroître temporairement les quantités de sédiments en suspension dans la colonne d'eau. Ce phénomène entraîne une détérioration de la qualité de l'eau et peut avoir des effets néfastes sur les espèces marines ciblées par les pêcheries commerciales et les personnes pratiquant la pêche de loisir.

Les mesures de prévention et de contrôle recommandées en matière de qualité de l'eau portent sur les aspects suivants :

- sélectionner les sites d'implantation des éoliennes en tenant compte des interférences potentielles entre, d'une

⁶ CWA (2004).

⁷ Les études ont montré que les structures artificielles immergées pouvaient contribuer à réduire les taux de mortalité des poissons, accroître la disponibilité alimentaire et servir d'abris (Bombace 1997).

part, les composantes structurelles du projet et, d'autre part les pêcheries commerciales, les adeptes de la pêche de loisir et les habitats marins ;

- planifier l'installation des composantes structurelles du projet en tenant compte des étapes les plus sensibles du cycle de vie des espèces ;
- utiliser, lorsque les circonstances le permettent, des rideaux anti-turbidité pour contenir la vase due aux travaux de construction sous-marins.

1.2 Hygiène et sécurité au travail

Les risques en matière d'hygiène et de sécurité au travail associés à la construction, à l'exploitation et à la mise hors service des éoliennes terrestres et maritimes sont généralement semblables à ceux que présentent la plupart des grands projets industriels et infrastructurels. Il peut s'agir notamment de risques physiques liés au travail en hauteur, dans des espaces confinés et avec des équipements rotatifs, ainsi qu'à la chute d'objets. Les mesures de prévention et de lutte contre les risques physiques, chimiques, biologiques et radiologiques sont exposées dans les **Directives EHS générales**.

Les sources des risques liés à l'hygiène et à la sécurité au travail qui sont propres aux installations d'énergie éoliennes sont principalement les suivantes^{8,9} :

- Travail en hauteur
- Travail au-dessus de l'eau

Travail en hauteur

Le personnel peut être amené à travailler en hauteur, notamment pour assembler les éléments du mât pendant les

⁸ On peut se procurer auprès de la British Wind Energy Association (BWEA) la série complète des directives sur les procédures de sécurité au travail applicables pendant les phases de construction, d'exploitation et d'entretien des éoliennes en mer (2005).

⁹ On peut se procurer auprès de la British Wind Energy Association (BWEA) la série complète des directives sur les procédures de sécurité au travail applicables pendant les phases de construction, d'exploitation et d'entretien des éoliennes en mer (2005).

travaux de construction et assurer l'entretien courant des éoliennes en exploitation. Les mesures préconisées pour prévenir et réduire les risques liés au travail en hauteur consistent à :

- tester l'intégrité de la structure avant d'entreprendre les travaux ;
- mettre en œuvre un programme de protection contre la chute qui comprend notamment la formation aux techniques d'ascension et l'application des mesures de protection contre la chute ; l'inspection, l'entretien et le remplacement du matériel de protection contre la chute ; et le sauvetage des ouvriers dont la chute a été interrompue ;
- établir les critères d'utilisation des dispositifs de protection intégrale contre la chute (en général lorsque le travailleur intervient à plus de 2 m au-dessus de la plate-forme de travail, cette hauteur pouvant cependant être portée à 7 m, selon l'activité). Le système de protection contre la chute doit être adapté à la structure du mât et aux mouvements nécessaires, notamment l'ascension, la descente et le déplacement d'un point à un autre ;
- Installer des accessoires fixes sur des éléments du mât pour faciliter l'utilisation des systèmes de protection contre la chute ;
- mettre en place, à l'intention des travailleurs, un bon système de dispositifs de positionnement. Les connecteurs des systèmes de positionnement doivent être compatibles avec les éléments du mât auxquels ils sont fixés,
- s'assurer que les équipements de levage ont été vérifiés et correctement entretenus, et que les opérateurs des appareils de levage ont suivi une formation adaptée ;
- utiliser des ceintures de sécurité en nylon doublé d'au moins millimètres (5/8 de pouce) ou en tout autre matériau de résistance équivalente. Les ceintures de sécurité en corde doivent être remplacées avant de présenter des signes de vieillissement ou d'usure des fibres ;

- prévoir le port d'une deuxième courroie de sécurité (de réserve) par les travailleurs qui manient des outils électriques en hauteur ;
- enlever les panneaux et autres obstacles des poteaux ou des structures avant d'entreprendre les travaux ;
- utiliser un sac à outils agréé pour faire monter ou descendre les outils ou le matériel utilisés par les ouvriers travaillant sur les structures en hauteur ;
- éviter d'effectuer les travaux d'installation et d'entretien lorsque les conditions météorologiques sont mauvaises, et en particulier lorsqu'il y a un risque de foudre ;

Travail au-dessus de l'eau

Les mesures de prévention et de contrôle applicables au travail au-dessus de l'eau sont les mêmes que celles décrites ci-dessus à la section « Travail en hauteur », auxquelles s'ajoutent les mesures suivantes :

- réaliser avant travaux une évaluation et un plan de gestion des risques liés à l'état de la mer, au vent et aux conditions météorologiques ;
- utiliser des équipements de flottaison agréés (gilets de sauvetage, lignes flottantes, bouées de sauvetage) pour les travaux effectués au-dessus ou à proximité d'un plan d'eau présentant un risque de noyade ;
- poster les ouvriers de manière à leur éviter tout contact avec le brouillard salin et les vagues ;
- déployer un nombre approprié de bateaux et recruter des pilotes et des secouristes qualifiés.

1.3 Santé et sécurité de la population

S'agissant des communautés, les risques en matière d'hygiène et de sécurité au travail qui découlent de la construction, de l'exploitation et de la mise hors service des éoliennes terrestres et maritimes sont généralement semblables à ceux que présentent la plupart des grands projets industriels et infrastructurels. Ils peuvent notamment toucher à la sûreté structurelle des infrastructures du projet, à la sécurité des personnes et à la prévention de l'incendie, à l'accès du public et aux situations d'urgence. La gestion de ces risques est traitée dans les **Directives EHS générales**.

Les risques que les installations éoliennes présentent pour la santé et la sécurité des communautés tiennent aux aspects suivants :

- sécurité de la navigation aérienne et maritime
- chutes de pales ou de morceaux de glace
- interférences et rayonnement électromagnétiques
- accès du public

Sécurité de la navigation aérienne et maritime¹⁰

Les pales des éoliennes peuvent mesurer plus de 100 mètres, de la base à l'extrémité supérieure. Les fermes éoliennes situées à proximité des aéroports ou de couloirs aériens connus peuvent menacer la sécurité des aéronefs, dans la mesure où elles présentent un risque de collision et peuvent contraindre les pilotes à modifier leur trajectoire. De même, si elles sont situées près de ports ou de voies de navigation maritime connues, les éoliennes maritimes peuvent menacer la sécurité des navires, dans la mesure où elles présentent un risque de collision et peuvent entraîner des modifications du trafic maritime.

¹⁰ Des directives internationales sur la signalisation maritime sont disponibles auprès de l'Association internationale de signalisation maritime (IALA, 2004). (2004). Pour des exemples de signalisation et d'aides à la navigation aérienne, voir la Civil Aviation Safety Authority (CASA, 2004).

Les mesures recommandées pour prévenir et limiter ces risques portent sur les aspects suivants :

- consulter les autorités chargées de la réglementation du trafic aérien et maritime avant d'installer les éoliennes, conformément aux réglementations relatives à la sécurité aérienne et maritime ;
- éviter si possible d'installer les fermes éoliennes à proximité d'aéroports ou de ports ou à l'intérieur de voies de navigation ou de couloirs aériens connus ;
- baliser les éoliennes et installer des signalisations anticollision sur les mâts et les pales.

Chute de pale ou de morceaux de glace

Les pannes des pales du rotor et l'accumulation de glace sur l'éolienne peuvent entraîner la chute d'une pale ou de morceaux de glace¹¹. Ce phénomène peut présenter un danger pour la sécurité publique, bien que le risque de chute de glace n'existe que dans les climats froids, et que le risque global d'un décrochage des pales soit extrêmement faible.¹²

Les stratégies de gestion des chutes de pale visent à :

- établir un périmètre de sécurité et concevoir/implanter les éoliennes de sorte qu'aucun bâtiment ou zone habitée ne se trouve sur la trajectoire potentielle des pales en cas de chute. Il n'est pas nécessaire que le périmètre de sécurité soit supérieur à 300 mètres, bien que cette distance puisse varier en fonction de la taille, de la forme, du poids et de la vitesse du rotor, ainsi que de la hauteur de l'éolienne ;^{13,14}

¹¹ Le risque d'être touché par des pièces d'éoliennes ou par des fragments de glace dans un rayon de 210 mètres est de 1:10 000 000. (Taylor et Rand, 1991)

¹² Les données disponibles indiquent que, dans la plupart des cas, les fragments de glace qui se détachent des éoliennes ont une masse estimée comprise entre 0,1 et 1 kg et sont retrouvés à une distance comprise entre 15 et 100 mètres de l'éolienne. (Morganet al. 1998)

¹³ Pour plus d'informations sur les distances de sécurité à respecter, voir Larwood (2005).

¹⁴ Taylor et Rand (1991).

- équiper les éoliennes de capteurs de vibrations capables d'enregistrer le moindre déséquilibre dans les pales du rotor et d'arrêter l'éolienne si nécessaire ;
- entretenir régulièrement les éoliennes ;
- installer des panneaux d'avertissement pour prévenir le public des risques de chute.

Les stratégies de gestion des chutes de morceaux de glace reposent sur les mesures suivantes :¹⁵

- faire tourner les éoliennes au ralenti pendant les périodes de formation de glace ;
- installer des panneaux d'avertissement à au moins 150 mètres des éoliennes, et dans toutes les directions ;
- équiper les éoliennes de dispositifs de chauffage et de capteurs de glace ;
- utiliser des aciers résistants au froid pour le mât de l'éolienne ;
- utiliser des lubrifiants synthétiques adaptés aux basses températures ;
- utiliser des pales noires recouvertes de fluoroéthane ;
- chauffer si possible toute la surface des pales ou, à défaut, utiliser un système de chauffage de pointe d'au moins 30 cm de large.

Interférences et rayonnement électromagnétiques

Les éoliennes peuvent être à l'origine d'interférences électromagnétiques susceptibles de perturber le fonctionnement des radars de contrôle aérien et des systèmes de télécommunications (micro-ondes, télévision, radio, par exemple). Ces interférences peuvent avoir trois causes principales : les effets de champ proche ; la diffraction ; la réflexion ou la diffusion.^{16,17} La nature des impacts potentiels de

ces phénomènes est principalement fonction de l'emplacement de l'éolienne par rapport à l'émetteur et au récepteur, des caractéristiques des pales du rotor, des caractéristiques du récepteur fréquentiel de signaux et de la manière dont les ondes radio se propagent dans l'atmosphère locale.¹⁸

Radars de contrôle aérien

Les fermes éoliennes situées à proximité d'un aéroport peuvent perturber le fonctionnement des radars de contrôle aérien en causant des distorsions des signaux, ce qui peut entraîner la disparition des signaux ou l'apparition, sur l'écran radar, de signaux erronés. Ces problèmes sont dus au fait que le mât et les composantes du rotor réfléchissent les signaux radars, ainsi qu'au découpage du signal radar.¹⁹

Les mesures visant à prévenir et à limiter les perturbations des systèmes radars induites par les éoliennes consistent à :

- privilégier des équipements éoliens dont les composantes sont conçues de manière à réduire au minimum les interférences avec les signaux radars (forme et matériaux de fabrication de la nacelle, par exemple) et utiliser des matériaux absorbant les ondes radars (pales fabriquées en époxy ou en polyester renforcé avec des fibres de verre, par exemple) afin d'éviter toute perturbation électrique ;

¹⁷ On entend par « effet de champ proche » la capacité d'une éolienne à créer des interférences dues aux champs électromagnétiques induits par le générateur et par les composants de commutation. Il y a diffraction lorsque l'éolienne reflète et absorbe un signal de télécommunications. Enfin, il y a réflexion ou diffusion lorsqu'une éolienne obstrue ou réfléchit un signal envoyé par un émetteur vers un récepteur.

¹⁸ Sengupta et Senior (1983).

¹⁹ Réflexion du mât : les mâts en métal peuvent renvoyer vers le radar une part importante du signal transmis, réduisant ainsi la capacité du radar à détecter la présence d'un aéronef à proximité de l'éolienne. Réflexion des composantes du rotor : les pales en rotation peuvent provoquer des « flashes » à savoir un fort signal radar réfléchi par la pale. Ce risque est cependant très faible et le phénomène éphémère. Les composantes en rotation situées à l'intérieur de la nacelle (arbres de transmission et générateurs, notamment) peuvent aussi induire des interférences susceptibles de perturber les radars. Découpage du signal radar : la rotation des pales peut entraîner une modulation (découpage) du signal radar derrière les pales. En effet, les pales obscurcissent de manière intermittente l'écho radar émis par les objets situés derrière elles. (AWEA, 2004a).

¹⁵ Laakso *et al.* (2003).

¹⁶ Bacon (2002).

- modifier au besoin la conception des fermes éoliennes, y compris en ce qui concerne l'agencement géométrique et l'emplacement des éoliennes, ainsi que le tracé des couloirs de navigation aérienne ;
- modifier au besoin la conception du système radar (déplacement des radars, suppression de la couverture radar ou utilisation d'autres systèmes radars dans la zone touchée par les interférences).²⁰

Systemes de télécommunications

Les mesures de prévention et de contrôle recommandées pour limiter les perturbations des systèmes de télécommunications dues aux éoliennes consistent à :

- modifier l'emplacement des éoliennes afin d'éviter toute interférence physique directe avec les systèmes de communication point à point ;
- installer une antenne directionnelle ;²¹
- modifier l'antenne existante ;
- installer un amplificateur pour amplifier le signal.²²

Télévision

Les mesures recommandées pour prévenir et limiter les perturbations des transmissions de télévision dues aux éoliennes visent à :

- installer l'éolienne à distance de la portée optique de l'antenne émettrice ;
- équiper l'éolienne de pales non métalliques ;
- si des interférences sont détectées en cours d'exploitation :
 - installer une antenne de meilleure qualité ou une antenne directionnelle ;
 - diriger l'antenne vers un autre émetteur de télévision ;

- installer un amplificateur ;
- déplacer l'antenne ;
- si les perturbations se font sentir dans une région étendue, envisager la construction d'une nouvelle station relai.²³

Accès du public

L'accès du public aux éoliennes ou à la sous-station de transformation peut poser un certain nombre de problèmes de sécurité (il peut arriver, par exemple que des personnes non autorisées tentent de grimper au sommet de l'éolienne).

Les mesures de prévention et de contrôle visant à encadrer l'accès du public aux installations éoliennes consistent à :

- installer des barrières sur les voies d'accès au site ;
- clôturer la ferme éolienne ou les éoliennes afin d'empêcher le public de s'en approcher ;
- fermer l'accès aux échelles d'accès aux mâts ;
- installer des panneaux d'information sur les risques encourus et sur les services à contacter en cas d'urgence.

2.0 Indicateurs de performance et suivi des résultats

2.1 Environnement

Directives pour les émissions et les effluents

En règle générale, les installations éoliennes en exploitation ne génèrent pas d'émissions polluantes ou d'effluents. Les valeurs indiquées pour les émissions et les effluents industriels dans cette branche d'activité correspondent aux bonnes pratiques internationales en ce domaine, telles qu'exprimées par les normes pertinentes des pays qui ont des cadres réglementaires agréés. Les émissions atmosphériques, les rejets d'eaux usées et les déchets solides liés aux phases de construction et

²⁰ AWEA (2004a).

²¹ AWEA (2004b).

²² URS (2004).

²³ AWEA (2004b).

de démantèlement sont examinées dans les **Directives EHS générales**.

Directives relatives aux émissions sonores

Le bruit généré par les éoliennes ne doit pas excéder les niveaux indiqués dans les **Directives EHS générales**. Il ne doit pas non plus entraîner une augmentation de l'intensité du bruit de fond supérieure à 3 dB à l'emplacement du récepteur le plus proche.

Le bruit produit par les fermes éoliennes tend cependant à s'intensifier avec la vitesse du vent, tout comme le bruit de fond, qui s'accroît sous l'effet de la friction de l'air sur le relief. L'accroissement de la vitesse du vent peut aussi masquer le bruit émis par les éoliennes. Par ailleurs, la vitesse et le sens du vent peuvent influencer sur la direction et la distance de propagation du bruit. Tous ces facteurs doivent donc être pris en compte dans l'application des valeurs de référence relatives au bruit émis par les éoliennes, de même que dans l'évaluation des niveaux de bruit de fond.

Il convient également de tenir compte des émissions sonores liées aux caractéristiques du bruit impulsif ou tonal (sons associés à une fréquence particulière et semblables à des notes de musique) émis par certaines fermes éoliennes en fonction de leur configuration.²⁴

Suivi des impacts environnementaux

Des programmes de suivi des impacts environnementaux dans cette branche d'activité doivent être mis en place de manière à couvrir toutes les activités qui peuvent avoir des impacts environnementaux importants dans des conditions d'exploitation normales ou dans des conditions anormales. Les activités de suivi des impacts environnementaux doivent être basées sur

des indicateurs directs ou indirects d'émissions, d'effluents, et d'utilisation des ressources applicables au projet considéré.

Le suivi des collisions entre des éoliennes et des oiseaux ou des chauves-souris consiste le plus souvent à recenser les cadavres retrouvés à proximité des éoliennes – carcasses entières, restes partiels, plumes.²⁵

Il convient par ailleurs d'assurer le suivi, dans le temps et dans l'espace, de l'environnement marin à proximité des éoliennes maritimes afin de recueillir des données sur les organismes benthiques, les mammifères et les poissons, et plus particulièrement sur : l'endofaune (sédiments et communautés); les habitats des substrats rocheux; les poissons; les populations de lançons (indicateurs biologiques de l'évolution des caractéristiques sédimentaires); la faune aviaire; et les mammifères marins (phoques et marsouins).

Les activités de suivi doivent être suffisamment fréquentes pour fournir des données représentatives sur les paramètres considérés. Elles doivent être menées par des personnes ayant reçu la formation nécessaire à cet effet, suivant des procédures de suivi et de tenue des statistiques et utilisant des instruments bien calibrés et entretenus. Les données produites par les activités de suivi doivent être analysées et examinées à intervalles réguliers et comparées aux normes d'exploitation afin de permettre l'adoption de toute mesure corrective nécessaire. De plus amples informations sur les méthodes d'échantillonnage et d'analyse des émissions et des effluents applicables figurent dans les **Directives EHS générales**.

²⁴ Dans certains pays, une « pénalité » de 5 dB (A) est attribuée et doit être soustraite des valeurs limites définies.

²⁵ Voir Brett Lane & Assoc. (2005) pour de plus amples informations sur le suivi des collisions avec des oiseaux et des chauves-souris. On trouvera des informations supplémentaires à ce sujet auprès des services canadiens de l'environnement (Environnement Canada, 2005).

2.2 Hygiène et sécurité au travail

Directives sur l'hygiène et la sécurité au travail

Les résultats obtenus dans le domaine de l'hygiène et de la sécurité au travail doivent être évalués par rapport aux valeurs limites d'exposition professionnelle publiées à l'échelle internationale, comme les directives sur les valeurs limites d'exposition (TLV®) et les indices d'exposition à des agents biologiques (BEIs®) publiés par American Conference of Governmental Industrial Hygienists (ACGIH)²⁶, *Pocket Guide to Chemical Hazards* publié par United States National Institute for Occupational Health and Safety (NIOSH)²⁷, les valeurs plafonds autorisées (PEL) publiées par Occupational Safety and Health Administration of the United States (OSHA)²⁸, les valeurs limites d'exposition professionnelle de caractère indicatif publiées par les États membres de l'Union européenne²⁹, ou d'autres sources similaires

Fréquence des accidents mortels et non mortels

Il faut s'efforcer de ramener à zéro le nombre d'accidents du travail dont peuvent être victimes les travailleurs (employés et sous-traitants) dans le cadre d'un projet, en particulier les accidents qui peuvent entraîner des jours de travail perdus, des lésions d'une gravité plus ou moins grande, ou qui peuvent être mortels. Il est possible de comparer les chiffres enregistrés pour les installations des projets à ceux d'installations de pays développés opérant dans la même branche d'activité présentés dans des publications statistiques (par exemple US Bureau of Labor Statistics et UK Health and Safety Executive³⁰).

²⁶ Consulter: <http://www.acgih.org/TLV/> et <http://www.acgih.org/store/>

²⁷ Consulter: <http://www.cdc.gov/niosh/npg/>

²⁸ Consulter :

http://www.osha.gov/pls/oshaweb/owadisp.show_document?p_table=STANDARDS&p_id=9992

²⁹ Consulter:

http://europe.osha.eu.int/good_practice/risks/ds/oel/

³⁰ Consulter:

Suivi de l'hygiène et de la sécurité au travail

Il est nécessaire d'assurer le suivi des risques professionnels posés par les conditions de travail dans le cadre du projet considéré. ces activités doivent être conçues et poursuivies par des professionnels agréés³¹ dans le contexte d'un programme de suivi de l'hygiène et de la sécurité au travail. Les installations doivent par ailleurs tenir un registre des accidents du travail, des maladies, des événements dangereux et autres incidents. De plus amples informations sur les programmes de suivi de l'hygiène et de la sécurité au travail sont données dans les **Directives EHS générales**.

<http://www.bls.gov/iif/> and <http://www.hse.gov.uk/statistics/index.htm>

³¹ Les professionnels agréés peuvent être des hygiénistes industriels diplômés, des hygiénistes du travail diplômés, des professionnels de la sécurité brevetés ou tout titulaire de qualifications équivalentes.

3.0 Bibliographie et sources d'informations supplémentaires

- AWEA (Australian Wind Energy Association). 2002. Best Practice Guidelines for Implementation of Wind Energy Projects in Australia. AWEA (Australian Wind Energy Association). 2004a. Wind Farm Safety in Australia. Fact Sheet.
- AWEA (Australian Wind Energy Association). 2004b. The Electromagnetic Compatibility and Electromagnetic Field Implications for Wind Farms in Australia. Fact Sheet.
- AWEA (Australian Wind Energy Association). 2004c. Wind Farm Siting Issues in Australia. Fact Sheet.
- Bombace, G. 1997. Protection of Biological Habitats by Artificial Reefs. In A.C. (ed) European.
- Brett Lane & Assoc. 2005. Interim Standards for Assessing Risks to Birds from Wind Farms in Australia. Australian Wind Energy Association.
- BWEA (British Wind Energy Association). 1994. Best Practice Guidelines for Wind Energy Development.
- BWEA (British Wind Energy Association). 2005a. Guidelines for Health and Safety in the Wind Energy Industry.
- BWEA (British Wind Energy Association). 2005b. BWEA Briefing Sheet: Wind Éolienne Technology.
- BWEA (British Wind Energy Association). 2005c. BWEA Briefing Sheet: Offshore Wind.
- BWEA (British Wind Energy Association). 2005d. BWEA Briefing Sheet: Wind Power and Intermittency: The Facts.
- CASA (Civil Aviation Safety Authority). 2004. Obstacle Lighting and Marking of Wind Farms AC 139-18(0).
- Contra Costa County (California). 1996. Municipal Code (Wind Energy Conversion Systems) Article 88-3 Section 612.
- CWA (Cape Wind Associates, LLC). 2004. Cape Wind Energy Project Draft Environmental Impact Statement.
- Elsam Engineering A/S. 2005. Elsam Offshore Wind Éoliennes—Horns Rev Annual Status Report for the Environmental Monitoring Program January 1–December 2004.
- Environment Canada. 2005. Wind Éoliennes and Birds—A Guidance Document for Environmental Assessment, Final Draft. Canadian Wildlife Service.
- Erikson, W.P., et al. 2001. Avian Collision with Wind Éolienne: A Summary of Existing Studies and Comparisons to Other Sources of Avian Collision Mortality in the U.S. A National Wind Coordinating Committee Resource Document. Western Ecosystems Technology, Inc.
- European Wind Energy Association. European Best Practice Guidelines for Wind Energy Development.
- Gardner, P., A. Garrad, P. Jamieson, H. Snodin, G. Nicholls, et A. Tindal. 2003. Wind Energy—The Facts. Volume 1 Technology. European Wind Energy Association (EWEA).
- Gipe, P.B. 1995. Wind Energy Comes of Age. New York: John Wiley and Sons Ltd.
- IALA (International Association of Marine Aids to Navigation and Lighthouse Authorities). 2004. IALA Recommendation O-117 on the Marking of Offshore Windfarms Edition 2.
- Irish Wind Energy Association. Wind Energy Development Best Practice Guidelines.
- Laakso, T., H. Hottinen, G. Ronsten, L. Tallhaug, R. Horbaly, I. Baring-Gould, A. Lacroix, E. Peltola, and B. Tammelin. 2003. State-of-the-art of Wind Energy in Cold Climates.
- Larwood, S. 2005. Permitting Setbacks for Wind Éoliennes in California and Blade Throw Hazard. Prepared for California Wind Energy Collaborative. Report Number CWEC-2005-01.
- Lowther, S. 2000. The European Perspective: Some Lessons from Case Studies. Proc. National Avian-Wind Power Planning Meeting III, San Diego, CA, Mai 1998. National Wind Coordinating Committee, Washington.
- Morgan, C., E. Bossanyi, and H. Seifert. 1998. Assessment of Safety Risks Arising from Wind Éolienne Icing. Proceeding of the International Conference, Wind Energy Production in Cold Climate, BOREAS IV, held at Hetta, Finland, March 31–April 2, 1998. Publié par Finnish Meteorological Institute.
- Natural Resources Canada. 2003. Environmental Impact Statement Guidelines for Screenings of Inland Wind Farms under the Canadian Environmental Assessment Act.
- NWCC (National Wind Coordinating Committee). 1999. Methods for Studying Energy/Bird Interactions. A Guidance Document.
- NWCC (National Wind Coordinating Committee) Siting Committee. 2002. Permitting of Wind Energy Facilities. A Handbook.
- Ontario, Ministry of the Environment. 2004. Interpretation for Applying MOE Technical Publication to Wind Turbine Generators.
- Sengupta, D. and T. Senior. 1983. Large Wind Éolienne Siting Handbook: Television Interference Assessment, Final Subcontract Report.
- State of Wisconsin. 2003. Draft Model Wind Ordinance for Wisconsin.
- Taylor, D. and M. Rand. 1991. How to Plan the Nuisance out of Wind Energy. Town and Country Planning 60(5): 152-155.
- UK Department of Trade and Industry. 1997. Report ETSU-R-97, The Assessment and Rating of Noise from Wind Farms.
- URS (URS Australia Pty. Ltd.). 2004. Woodlawn Wind Farm Environmental Impact Statement.
- Westerberg, H. 1999. Impact Studies of Sea-based Windpower in Sweden. Technische Eingriffe in Marine Lebensraume.
- Winkelman, J.E. 1995. Bird/wind Éolienne Investigations in Europe. Proc. of National Avian-Wind Planning Meeting, Denver, CO, July 1994.

Annexe A — Description générale des activités

Les projets de conversion de l'énergie éolienne ont pour objet de transformer le vent en énergie électrique. Leur nombre n'a cessé d'augmenter ces 20 dernières années, et l'énergie renouvelable d'origine éolienne ne cesse de gagner en importance. Les éoliennes peuvent être implantées en mer ou à terre. La présence de ressources éoliennes importantes est un facteur primordial dans le choix des sites d'implantation des fermes éoliennes. On procède ensuite à une évaluation de ces ressources afin d'en déterminer les caractéristiques avant de sélectionner le site d'implantation du projet, de concevoir les installations et de construire la ferme éolienne. Parmi les autres facteurs pris en considération, figurent également les coûts de construction, le raccordement aux lignes électriques, les conditions environnementales, les questions foncières et l'attitude des populations locales à l'égard du projet.

Comme c'est le cas dans d'autres secteurs industriels, le cycle de vie des projets de conversion de l'énergie éolienne se décline en plusieurs étapes : évaluation des ressources éoliennes, construction, exploitation, entretien et la mise hors service. Les travaux de construction portent sur l'aménagement ou l'amélioration des voies d'accès au site retenu, la préparation du site, le transport des différents éléments des éoliennes et l'installation des équipements de production d'énergie éolienne (anémomètre, aérogénérateur, transformateurs, sous-stations, entre autres exemples). Les activités de mise hors service sont fonction de l'utilisation qui doit être faite du site après l'achèvement du projet. Elles consistent généralement à démanteler les infrastructures (éolienne, sous-station, routes) et à remettre le site en état (revégétalisation, par exemple, dans le cas des fermes éoliennes terrestres). La section ci-après décrit les activités le plus fréquemment associées à la construction et l'exploitation d'installations terrestres ou maritimes de conversion de l'énergie éolienne. Les caractéristiques

particulières des projets éoliens en mer font l'objet d'une sous-section distincte à la fin du présent document.

Installations et activités communes aux fermes éoliennes terrestres et maritimes

En règle générale, les éoliennes font face au vent, tandis que la nacelle et le mât sont installés à l'arrière. Elles sont disposées de telle manière qu'aucune éolienne ne puisse gêner la capture du vent par une autre éolienne. Dans le cas des projets éoliens de grande envergure, les éoliennes sont généralement alignées sur un axe perpendiculaire au sens du vent dominant ou le long des crêtes de montagne, de manière à tirer parti des vents les plus forts. S'agissant de l'espacement des éoliennes, les principaux facteurs pris en considération tiennent à la vitesse et la turbulence des vents. La règle empirique observée en la matière consiste à respecter une distance équivalant à cinq à sept fois le diamètre du rotor pour les éoliennes situées sous le vent. La superficie globale des projets éoliens est donc fonction du nombre d'éoliennes prévues. Cela étant, la superficie du site aménagé (à savoir la superficie nécessaire à l'implantation des éoliennes et des voies d'accès) est très largement inférieure à la superficie totale du projet. À titre d'exemple, les fermes éoliennes de type classique qui regroupent en moyenne une vingtaine d'éoliennes s'étendent généralement sur 1 km², mais 1 % seulement de cette superficie est effectivement utilisé.³²

Les fermes éoliennes regroupent les éléments structurels suivant : aérogénérateurs ; transformateurs ; câbles collecteurs souterrains assurant le transport de l'électricité entre les éoliennes, les sous-stations et les lignes électriques aériennes raccordées à un réseau existant ; et routes d'accès (figure A-2). Les éoliennes sont espacées de manière à optimiser leur potentiel énergétique, tout en réduisant au minimum la

³² AWEA 2004c.

superficie occupée. La distance entre les éoliennes est principalement fonction de la vitesse et de la turbulence des vents. Elle est généralement équivalente à trois à cinq fois le diamètre du rotor pour les éoliennes alignées perpendiculairement à la direction du vent dominant, et de cinq à sept fois le diamètre du rotor pour celles alignées dans la direction du vent dominant³³. Dans certains pays, l'espacement minimal recommandé est de 200 mètres, l'objectif étant de ne pas entraver les déplacements des oiseaux entre les éoliennes.³⁴ Si la distance entre les éoliennes alignées dans le sens d'un vent fréquent n'est que d'environ cinq fois le diamètre du rotor, on peut s'attendre à des déperditions importantes en raison de l'effet de sillage.³⁵

L'aérogénérateur est la composante essentielle des projets éoliens. Il permet de capturer l'énergie du vent et de la transformer en électricité. Le modèle le plus courant est de type tripale à commande passive et à vitesse constante orienté au vent. Il existe aussi des aérogénérateurs de conception similaire, mais à pas variable ou à commande active. La capacité nominale (taille) des aérogénérateurs n'a cessé d'augmenter, passant de 50 kW en 1980 à 5 MW en 2003. En 2005, la capacité moyenne des éoliennes terrestres étaient de 2 MW.³⁶ Cet accroissement de la capacité de production des éoliennes a conduit à une augmentation du diamètre des rotors et de la taille des mâts.

L'éolienne est constituée de fondations, d'un mât, d'une nacelle, d'un rotor à pales, d'un moyeu de rotor et d'un système d'éclairage (figure A-1). Le mât est fixé par des boulons aux fondations, qui sont constituées, dans le cas des éoliennes terrestres, d'une épaisse dalle de béton armé mesurant de 12 à

15 mètres de long et de large, et de deux à trois mètres de profondeur.³⁷

Le mât permet de surélever le rotor à une hauteur suffisante pour qu'il puisse être entraîné par des vents plus forts qu'au niveau du sol. Le mât est constitué d'un cylindre de forme conique généralement fabriqué en acier qui peut mesurer entre 25 et plus de 100 mètres de haut. Le mât est généralement peint en gris clair et peut-être couvert par endroit de marquages de couleurs différentes pour la sécurité aérienne ou maritime (dans le cas des éoliennes maritimes), conformément à aux réglementations nationales applicables.

La plupart des pales de rotor sont fabriquées dans une résine faite de polyester et de fibre de verre, en thermoplastique ou en résine époxy (aujourd'hui, on utilise le plus fréquemment de la résine à base d'époxy). La fibre de carbone entre de plus en plus souvent dans la fabrication de la structure composite des pales. Ces matériaux sont hautement résistants, légers et très souples. Le diamètre du rotor a augmenté au cours des 40 dernières années, passant de 24 mètres en 1960 à 114 mètres en 2003.³⁸ La quasi-totalité des rotors fabriqués aujourd'hui sont équipés de pales tournant dans le sens des aiguilles d'une montre lorsqu'on fait face au moyeu du rotor.³⁹ Le diamètre des rotors des éoliennes terrestres est généralement compris entre 60 et 80 mètres.

³³ AWEA 2004c.

³⁴ EC 2005.

³⁵ Gardner *et al.* 2003.

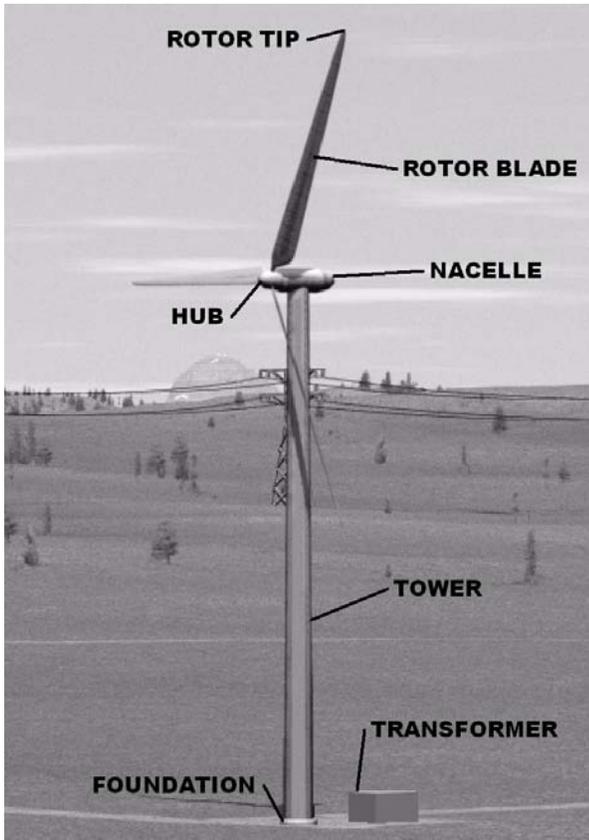
³⁶ Gardner *et al.* 2003.

³⁷ AWEA 2004d.

³⁸ Gardner *et al.* 2003.

³⁹ AWEA 2004d.

Figure A-1. Principales composantes structurelles d'une éolienne



Nacelle

Moyeu

Mât

Fondations

Transformateur

Pointe du rotor

Pale

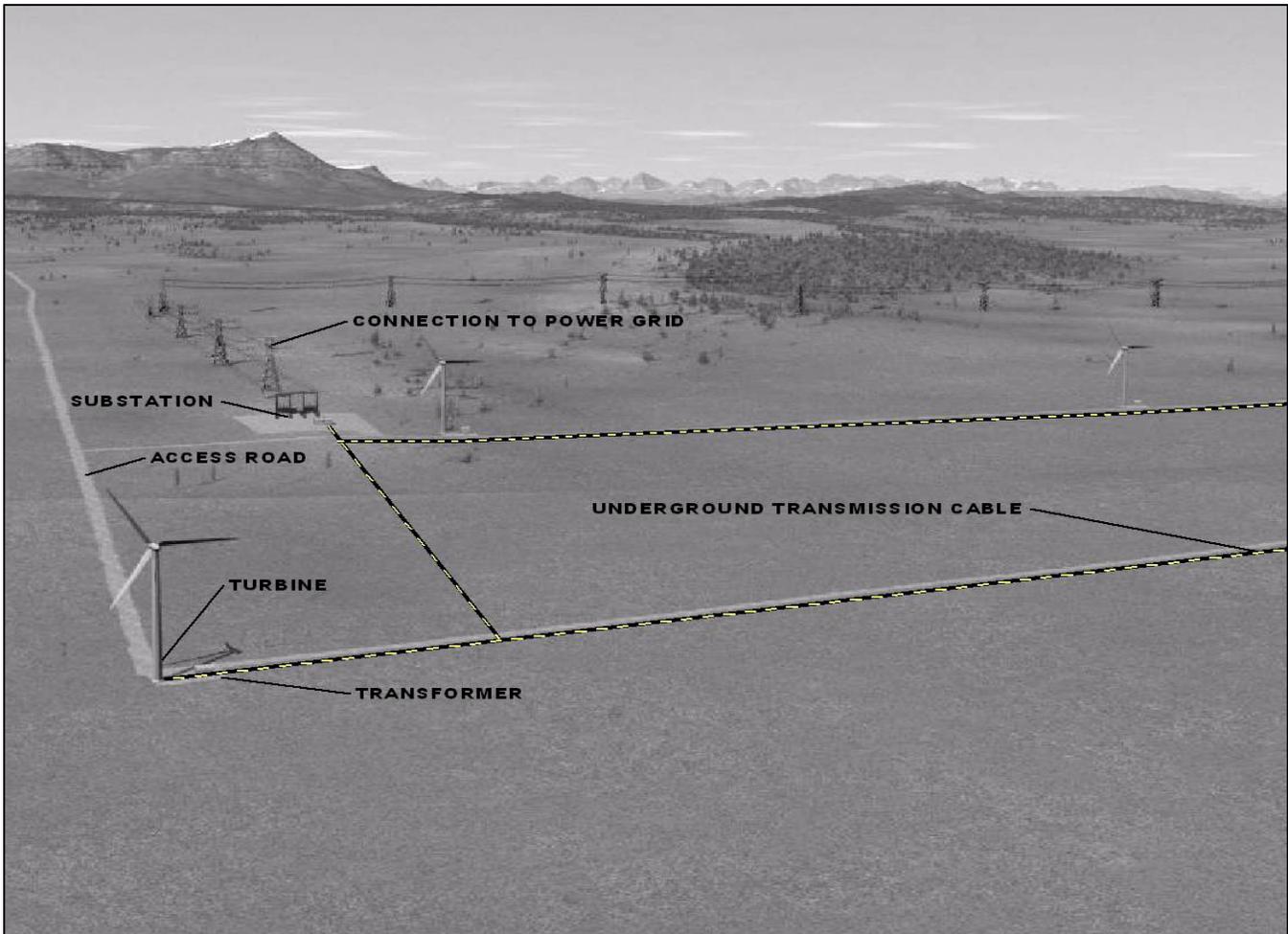


Figure A-2. Principales composantes d'une ferme éolienne terrestre

Raccordement au réseau
Sous-station
Routes d'accès
Éolienne
Transformateur
Câble de transmission souterrain

L'installation d'une éolienne terrestre passe généralement par les étapes suivantes : préparation des fondations ; assemblage du mât ; hissage du moyeu, du rotor et de la nacelle ; et assemblage du rotor.⁴⁰

Les pales du rotor se mettent à tourner à mesure que la vitesse du vent augmente. La rotation des pales entraîne le générateur

situé à l'intérieur de la nacelle, ce qui permet de convertir une partie de l'énergie éolienne en électricité. La plupart des éoliennes commencent à produire de l'électricité dès que la vitesse du vent atteint environ trois à quatre m/seconde (soit 10,8 à 14,4 km/heure). La capacité de production maximale est atteinte à des vitesses d'environ 15 mètres/seconde (54 km/heure). L'éolienne est automatiquement arrêtée lorsque le vent atteint une vitesse de l'ordre de 25 mètres/seconde (90

⁴⁰ Gardner *et al.* 2003.

km/heure), afin d'éviter qu'elle ne soit endommagée par des vents trop violents.⁴¹ La vitesse maximale de la pointe de la pale est d'environ 89 mètres/seconde, soit 320 km/heure.⁴² Par vent fort, trois systèmes permettent de limiter la puissance du rotor : la commande passive, la commande à pas variable et la commande active. Dans les aérogénérateurs à commande passive, la conception aérodynamique du rotor fait que la puissance de rotor est régulée directement par les pales. Lorsque le vent souffle à des vitesses élevées, les pales à commande passive s'arrêtent de tourner dès que la puissance du rotor atteint une limite prédéterminée qui est fonction de la conception aérodynamique des pales. Le pas variable est un système mécanique qui agit sur l'inclinaison des pales en les faisant pivoter jusqu'à 90 ° autour de leur axe afin d'optimiser la capture du vent. Une fois la limite de puissance atteinte, l'inclinaison des pales est modifiée de manière à évacuer l'énergie produite par le rotor. Le système à commande active est une combinaison des deux précédents systèmes : les pales sont conçues de la même manière que celles à commande passive, mais leur inclinaison peut également être modifiée selon le principe du pas variable. Jusque dans les années 1990, on a privilégié la régulation à commande passive. Aujourd'hui, on lui préfère la commande à pas variable et la commande active, qui sont désormais les deux méthodes les plus couramment utilisées pour limiter la puissance du rotor des éoliennes de grande taille.⁴³

En règle générale, une éolienne peut produire de l'électricité pendant 70 à 85 % du temps⁴⁴. La quantité d'énergie dans le vent est proportionnelle au cube de la vitesse du vent. En d'autres termes, en doublant la vitesse du vent, on multiplie par huit l'énergie du vent. Cela étant, l'énergie produite par l'éolienne n'augmente pas dans les mêmes proportions ; elle est

plutôt de l'ordre du carré de la vitesse du vent. L'électricité produite par une éolienne est généralement de 700 volts, et ne peut donc pas être transportée en l'état.⁴⁵ C'est pourquoi, chaque éolienne doit être équipée d'un transformateur qui permet d'ajuster le voltage de l'électricité, de sorte qu'elle puisse ensuite être distribuée. L'énergie est transportée jusqu'à une sous-station située à proximité qui reçoit toute l'énergie produite par les éoliennes de la ferme éolienne. La connexion entre le transformateur de l'éolienne et la sous-station et entre la sous-station et le réseau électrique s'effectue par le biais de câbles enterrés ou aériens. Dans certains cas les transformateurs des éoliennes sont connectés individuellement à la sous-station, dans d'autres, les éoliennes sont reliées les unes aux autres, puis connectées à la sous-station. Tout dépend de la configuration de la ferme éolienne.

Les éoliennes sont conçues pour durer environ 20 ans, mais, dans la pratique, elles peuvent avoir une durée de vie beaucoup plus importante si elles sont installées sur des sites de faible turbulence. Les pales du rotor sont conçues selon des critères si rigoureux qu'elles sont rarement remplacées, même lorsqu'elles ont atteint la limite de leur durée de vie nominale. En revanche, certaines expériences récentes ont montré que les boîtes de vitesses doivent parfois être remplacées avant d'avoir atteint leur durée de vie théorique. En règle générale, l'exploitation d'une ferme éolienne ne requiert pas la présence permanente de personnel sur le site.

Les éoliennes en exploitation font l'objet de travaux d'entretien courants pendant toute leur durée de vie, à raison d'environ 40 heures par an⁴⁶ (entretien du rotor, lubrification des pièces, révision complète du générateur et, au besoin, entretien des composants électriques).

⁴¹ BWEA 2005b.

⁴² NZWEA 2005.

⁴³ AWEA 2004d.

⁴⁴ BWEA 2005d

⁴⁵ BWEA 2005b.

⁴⁶ Gardner *et al.* 2003.

En règle générale, l'exploitation et l'entretien des éoliennes ne génèrent pas d'émissions polluantes ou d'effluents. Les effluents liquides et les autres déchets résultant des travaux d'entretien ne sont généralement pas stockés sur place et sont éliminés conformément aux réglementations régionales et nationales/pratiques optimales de gestion.

Installations propres aux éoliennes maritimes

Les composantes structurelles et le mode d'exploitation des éoliennes maritimes sont semblables à ceux des fermes terrestres. Les principales différences tiennent à la taille des éoliennes, à la hauteur des mâts et au diamètre des pales du rotor. En général, les éoliennes maritimes mesurent à la pointe des pales entre 100 et 120 mètres, le mât entre 60 et 80 mètres de haut, et les pales du rotor entre 30 et 40 mètres de long.⁴⁷ Le plus souvent l'électricité produite par les éoliennes maritimes est transportée jusqu'au transformateur, et du transformateur jusqu'à la sous-station située à terre par le biais de câbles immergés et enterrés (figure A-3).

Les composantes structurelles des éoliennes maritimes (mâts, par exemple) sont semblables à celles des éoliennes et terrestres. On utilise cependant des méthodes différentes pour adapter la structure de l'éolienne à l'environnement marin : les parties métalliques sont revêtues d'un enduit de protection contre la corrosion ; les nacelles sont étanches ; les fondations et les mâts sont conçus de manière à résister à la force des vents, des vagues, des courants et des marées et sont adaptés aux interactions avec le fonds marin (voir figure A-2); et des plates-formes spéciales sont aménagées pour permettre l'accès des équipes chargées de l'entretien des installations.

Les fermes éoliennes maritimes sont généralement installées dans des zones de moins de 30 mètres de profondeur. La distance qui sépare les éoliennes de la terre est fonction de la nature du projet, des caractéristiques du site d'implantation (et

des fonds marins, notamment) et des contraintes rencontrées (questions environnementales liées à la dimension esthétique des éoliennes, par exemple).

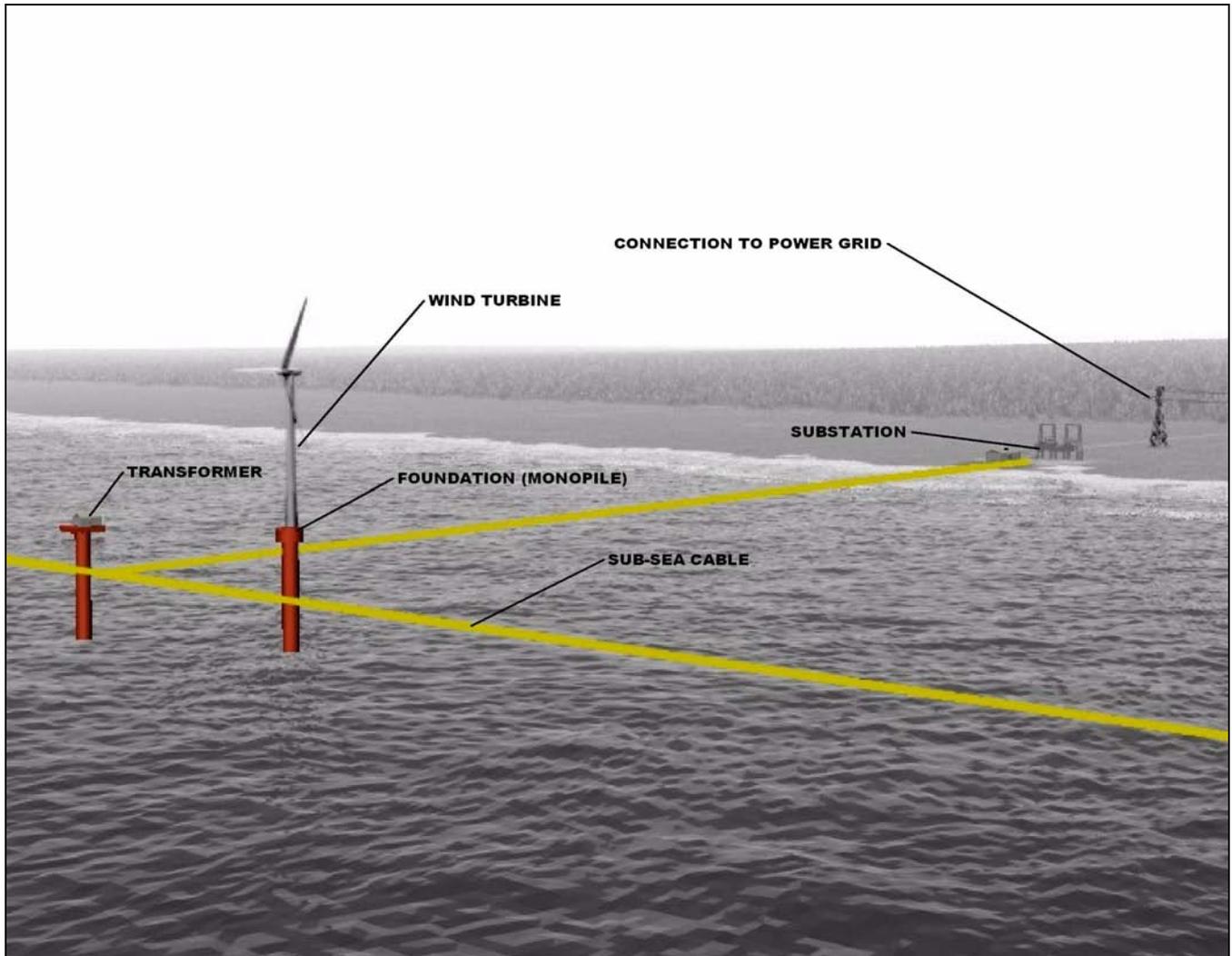
La construction des éoliennes maritimes se déroule en plusieurs étapes : pose des fondations ; transport par voie maritime des composantes de l'éolienne ; montage du mât ; hissage de la nacelle et du rotor au sommet du mât ; assemblage du rotor et de la nacelle.

Les fondations des éoliennes maritimes et les applications connexes peuvent être de différentes natures :

- fondation monopile - pour la plupart des conditions, et de préférence en eau peu profondes, sur des substrats meubles peu profonds ;
- structure tripode : pour la plupart des conditions, de préférence sur des substrats meuble peu profonds ; également adaptée à des profondeurs supérieures à 30 mètres ;
- caisson de gravité en béton : adapté à presque tous les types de sédiments ;
- caisson de gravité en acier : adapté à presque tous les types de sédiments, et à de plus grandes profondeurs que les fondations en béton ;
- caisson monosuction : fonds sableux, argiles meubles ;
- caisson à suctions multiples : fonds sableux, argiles meubles ; adapté à de plus grandes profondeurs que le caisson monosuction ;
- Fondations flottantes – pour des profondeurs supérieures à 100 mètres.

⁴⁷ BWEA 2005c.

Figure A-3 Principales composantes d'une ferme éolienne maritime



Raccordement au réseau électrique
Éolienne
Transformateur
Fondations (monopile)
Sous-station
Câble sous-marin enterré