

Rapport final du Novembre 2005

Sécurité des éoliennes en Suisse

Normes et recommandations

Rapport principal

Élaboré par
Reto Rigassi
Suisse Eole
Wattwerkstrasse 1, 4416 Bubendorf

Mandant:

Office fédéral de l'énergie, 3003 Berne

Mandataire:

Suisse Eole, 4416 Bubendorf

Auteurs:

Reto Rigassi, Dr. EICHER+PAULI AG, 4410 Liestal

Robert Horbaty, ENCO AG, 4416 Bubendorf

Bruno Brühwiler, Euro Risk Limited, 8022 Zürich

Auteurs de prise de position ou de contribution:

Nous tenons à remercier spécialement les institutions et personnes suivantes, qui, par leur contribution ou leur prise de position, ont concouru la réalisation de ce manuel:

Juvent SA, M. Jakob Vollenweider

Planair SA, M. Martin Kernen

La Mobilière Suisse Société d'assurances

L'Institut de Sécurité

Senn Transport AG

Weisskopf + Partners, M. Thomas Weisskopf

Traduction:

Adequa SA, M. Alain Meyrat

Table des matières

Remarque préliminaire.....	5
1. Résumé.....	6
2. Introduction.....	7
2.1 Conditions générales.....	7
2.2 Objectifs.....	8
3. Systématique et structure du document	9
4. Gestion des risques	11
4.1 Bases normatives.....	11
4.2 L'appréciation des risques.....	12
5. Sécurité d'exploitation.....	19
5.1 Eventail des dangers	19
5.2 Technique éprouvée.....	19
5.3 Classification des éoliennes	20
5.4 Conditions relatives à la mise en service	20
5.5 Transport et montage	22
5.6 Raccordement au réseau électrique	23
5.7 Protection contre la foudre	23
5.8 Protection contre le feu	24
5.9 Formation et jets de glace	24
5.10 Déprédatations volontaires.....	26
5.11 Entretien et pièces de rechange.....	27
5.12 Santé financière des fabricants	27
6. Sécurité économique	28
6.1 Définition.....	28
6.2 Principaux facteurs	28
6.3 Marche à suivre dans la conception du projet.....	30
6.4 Prévisions de production d'électricité	31
6.5 Coûts d'investissement.....	40
6.6 Durée d'utilisation / Durée d'amortissement.....	42
6.7 Produit de la vente d'électricité.....	43
6.8 Coûts d'exploitation	44
7. Sécurité de planification.....	48
7.1 Conditions générales de la planification.....	48
7.2 Marche à suivre	48
7.3 Aspects particuliers	49
7.4 Concept d'énergie éolienne pour la Suisse	51
8. Assurance des éoliennes	52
8.1 Généralités	52
8.2 Assurances contractées par le fabricant.....	52
8.3 Assurances contractées par le concepteur	55

8.4 Assurances contractées par l'exploitant.....	55
9. Littérature.....	58
10. Annexes.....	59
A.1 Check-list "dangers"	60
A.2 Appréciation des risques (formulaire).....	66
A.3 Marge d'erreur de la statistique du vent à long terme	70

Remarque préliminaire

Les recommandations et standard de ce manuel sur la sécurité des éoliennes sont à comprendre comme une aide à la mise en pratique du Concept d'énergie éolienne pour la Suisse. Elles concernent en priorité les parcs éoliens (projets comptant trois éoliennes ou plus) et contribuent à minimiser les éventuels risques de planification, de réalisation et d'exploitation. Pour des projets de moindre importance, ces recommandations peuvent donner d'intéressantes indications. Il faut dans tous les cas évaluer si ces recommandations sont en proportion avec le projet.

Le présent travail établit une liste de tous les dangers et risques notables d'un projet éolien et présente des mesures pour les minimiser. Cela ne signifie en aucun cas que, pour un projet spécifique, tous les dangers et risques soient pertinents. Il s'agit bien plus d'identifier les risques les plus importants afin de les traiter avec sérieux.



1. Résumé

Situation

Le présent ouvrage a pour but de passer en revue les principaux aspects de la sécurité des éoliennes et de recommander des mesures visant à réduire les risques.

Il s'adresse en priorité aux maîtres d'ouvrage et aux exploitants d'éoliennes ainsi qu'aux concepteurs. Les recommandations énoncées dans ce document devraient également aider les autorités, les investisseurs et les assureurs à apprécier les projets.

Les thèmes suivants sont abordés:

Gestion des risques

Avant d'examiner les différents domaines en détail, les auteurs exposent les bases de la gestion des risques et montrent comment appliquer celle-ci dans la pratique sans entraîner de dépenses exagérées.

Sécurité d'exploitation

Ce domaine comprend les dangers pouvant occasionner des dommages aux personnes, à l'environnement, aux installations et / ou aux intérêts économiques ou qui peuvent contrarier leurs objectifs.

Sécurité économique

Des incertitudes dans les calculs ou une prise en compte insuffisante de certains paramètres dans la conception peuvent empêcher une éolienne d'atteindre le résultat d'exploitation attendu.

Sécurité de planification

De par leur impact sonore et visuel ainsi qu'en raison des ombres mouvantes, les éoliennes ont incontestablement une influence sur l'environnement. Ces aspects doivent être pris en compte lors de la conception afin d'optimiser la sécurité de celle-ci et d'assurer la délivrance d'un permis de construire.

Assurances

Diverses assurances sont prises par le fabricant et par l'exploitant pour couvrir une éolienne.

Check-list

Les recommandations pour les différents domaines sont résumées dans une check-list, qui est fournie dans un document séparé.

L'annexe A.1 du présent document présente la liste détaillée des dangers.

2. Introduction

A la fin 2003, la capacité totale des éoliennes installées dans le monde atteignait quelque 41 000 MW. Ce chiffre est susceptible d'augmenter considérablement ces prochaines années, vu le fort taux de croissance du secteur et grâce au soutien des politiques énergétiques de nombreux pays. Le vent devient peu à peu une source d'énergie importante. Renouvelable et disponible en grandes quantités, il peut apporter une contribution essentielle à la réduction des émissions de CO₂ qui détériorent le climat.

La Suisse aussi s'est engagée politiquement à promouvoir l'énergie éolienne, dans le cadre de ses possibilités. Il importe pour cela de savoir sur quels éléments reposent la sécurité et la rentabilité de l'exploitation des éoliennes.

2.1 Conditions générales

Depuis le milieu des années 90, le secteur de l'énergie éolienne a édicté un certain nombre de directives relatives à la conception des installations et de guides pour l'aménagement du territoire:

- **Eoliennes et protection du paysage**

Cette étude publiée en 1996 met l'accent sur les estimations du potentiel de l'énergie éolienne en tenant compte des exigences de la protection des paysages.

- **Planification d'installations éoliennes**

Le guide "Bases pour une stratégie de l'utilisation de l'énergie éolienne", publié en mai 1999, expose les conditions techniques de l'exploitation des éoliennes et donne des informations sur les différentes étapes de la planification dans chaque canton.

- **La prise en compte de l'énergie éolienne dans les plans directeurs et les plans d'affectation**

Guide de l'utilisation des instruments de l'aménagement du territoire à l'intention des aménagistes cantonaux, des concepteurs de projets et des autorités chargées de délivrer les permis de construire (2001).

- **Rechtliches Regime der Windenergie in der Schweiz (Bases légales de l'énergie éolienne en Suisse)**

Etude des conditions légales de l'exploitation de l'énergie éolienne en Suisse (2002).

- **Concept d'énergie éolienne pour la Suisse**

Bases pour la localisation de parcs d'éoliens prenant en considération les exigences de la protection de la nature et des paysages (août 2004).

En revanche, des lacunes subsistent, en matière de documentation, dans plusieurs domaines:

- **Directives à l'intention des autorités compétentes pour l'octroi des permis de construire**

Bref passage en revue des conditions à respecter dans le cadre d'une procédure d'autorisation de construire: distances par rapport aux routes et aux maisons d'habitation, danger de chute de glaçons, certification de l'installation, projection d'ombre, émissions sonores, etc.

▪ Documentation pour les fabricants

Les fabricants acceptent de plus en plus souvent de fournir des garanties de production et de maintenance. Ils doivent cependant respecter les conditions relatives à la construction et à l'exploitation d'installations éoliennes en Suisse.

▪ Analyses de risques pour les assurances

Il est plus simple d'assurer des installations éoliennes si les risques sont identifiés et réduits dans la mesure du possible.

▪ Financement

Les banques ont également besoin de directives claires pour évaluer les projets.

▪ Critères de certification harmonisés

Les critères de certification du label écologique "naturemade" sont toujours axés sur l'étude de 1996; ils offriraient une possibilité d'influencer l'évolution des divers projets.

2.2 Objectifs

Le présent document fait un tour d'horizon des principaux aspects de la sécurité des installations éoliennes en Suisse et expose les mesures permettant de réduire les risques pour l'homme et l'environnement, mais aussi les risques financiers. Il s'adresse en priorité aux maîtres d'ouvrage et aux exploitants d'éoliennes ainsi qu'aux concepteurs.

Les recommandations faites dans cet ouvrage ont également pour but d'aider les autorités, les investisseurs et les assureurs à apprécier les projets.

Les fabricants d'éoliennes y trouveront en outre les normes et prescriptions en vigueur en Suisse.

Le présent document poursuit les objectifs suivants:

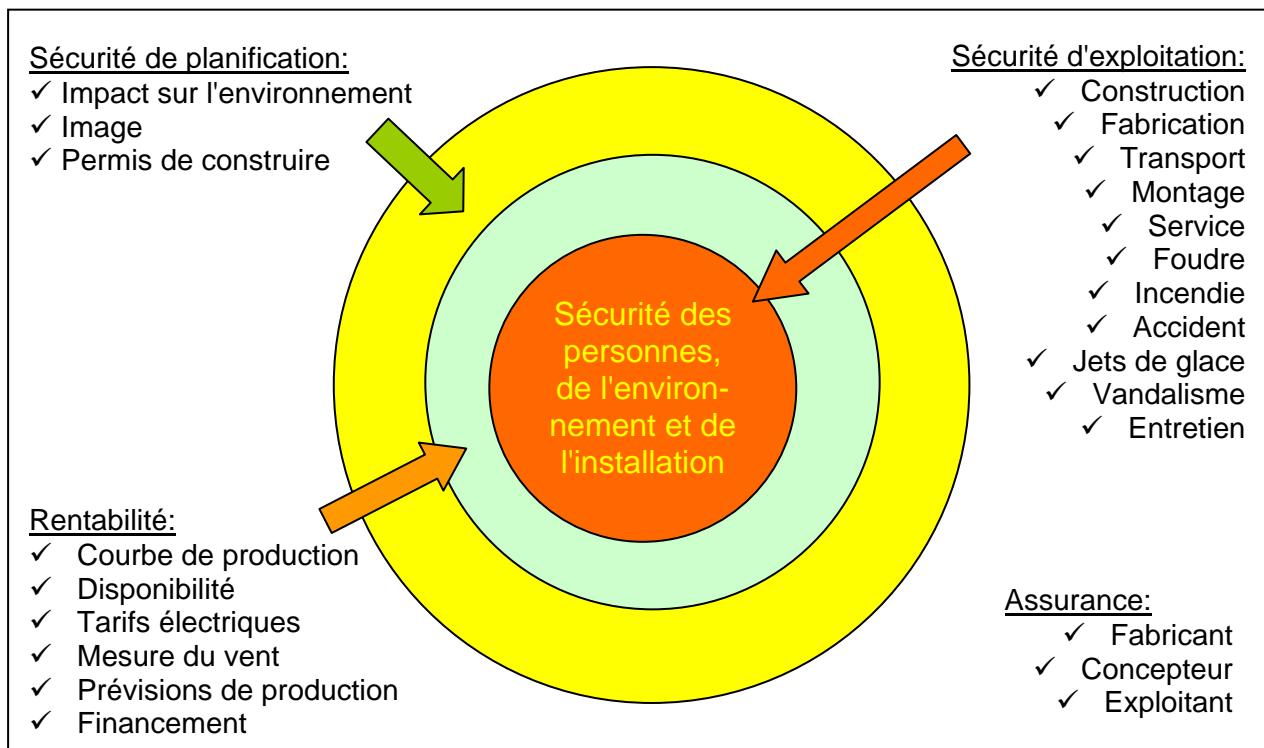
- garantir aux investisseurs et aux exploitants une gestion sûre et rentable des installations éoliennes;
- aider les concepteurs, les exploitants et les autorités à développer, installer et mettre en service les éoliennes;
- assurer la sécurité des personnes en contact avec les éoliennes (y compris le personnel de maintenance et d'exploitation);
- garantir la santé et la sécurité des personnes séjournant, de manière permanente ou provisoire, à proximité immédiate d'éoliennes;
- assurer la meilleure disponibilité possible des installations en prévenant les dégâts matériels et les interruptions d'exploitation, même dans des conditions extrêmes.

Cet ouvrage doit contribuer à réduire les risques:

Toute personne désireuse de concevoir et de mettre en service une installation éolienne devrait procéder à une estimation complète des risques mettant en évidence les aspects critiques de la conception, de la procédure d'autorisation, de la construction et de l'exploitation. Le présent document indique comment s'y prendre. La gestion des risques contribue à promouvoir les éoliennes comme sources d'énergie renouvelable.

3. Systématique et structure du document

La sécurité des éoliennes est un thème présentant de multiples facettes. Cet ouvrage a été conçu de manière systématique afin de traiter les principaux aspects.



Sur la base de cette systématique, le présent document est subdivisé de la manière suivante:

Gestion des risques:

Ce chapitre expose les fondements de la gestion des risques et décrit la manière de procéder, avant d'énumérer les domaines dans lesquels les questions de sécurité doivent être prises en compte.

Sécurité d'exploitation:

Ce domaine recouvre les risques d'événements dommageables pour les personnes, l'environnement et l'installation ainsi que les risques pour les intérêts économiques et l'exploitation.

Les risques pour l'homme et l'environnement peuvent découler d'une sécurité insuffisante de l'installation. Ils peuvent provoquer des accidents dans l'installation même ou aux abords de celle-ci ou occasionner une chute de rentabilité.

Les dommages à l'installation elle-même peuvent être occasionnés par des événements subits comme la foudre, un incendie ou une catastrophe naturelle dont l'ampleur n'aura pas été prise en considération lors de la conception ou dont la combinaison n'avait pas été prévue, faute de précédents connus ou par manque d'anticipation. Les dégâts matériels peuvent aussi provenir de défauts de construction ou de fabrication ou encore d'erreurs de montage ou de manipulation.

Par ailleurs, la sécurité économique d'un projet peut être menacée par une disponibilité insuffisante de l'installation, par des contrats trop aléatoires pour la vente de l'électricité produite ou encore par un mauvais calcul des coûts de maintenance et d'entretien.

Sécurité économique:

Ce domaine concerne les risques liés au calcul ou à certains éléments insuffisamment pris en compte lors de la conception et qui pourraient peser sur le résultat d'exploitation d'une installation.

La sous-estimation des coûts d'une installation est un risque connu dans les technologies exigeant d'importants investissements. Les prévisions de rendement des éoliennes posent des exigences particulières. Le rendement d'une exploitation dépendant de la vitesse du vent, de petites erreurs d'appréciation peuvent avoir pour conséquence d'importantes pertes de revenu. Il importe donc tout particulièrement de bien mesurer la puissance du vent et d'utiliser une méthode d'approximation éprouvée pour estimer le rendement à long terme d'un type d'installation donné à un emplacement donné.

Sécurité de la conception:

Les éoliennes produisent des émissions sonores et des ombres mouvantes et modifient le paysage. Ces aspects doivent être pris en considération lors de l'élaboration des plans afin d'assurer une sécurité de conception optimale et d'obtenir un permis de construire.

Assurances

Les assurances couvrant les éoliennes doivent être contractées par le fabricant, par le concepteur de l'installation et par l'exploitant. Il s'agit en général des assurances suivantes: montage, transport, choses, arrêt d'exploitation, machines, arrêt d'exploitation des machines et responsabilité civile d'entreprise.

4. Gestion des risques

Le présent chapitre décrit le traitement des risques dans le cadre d'un système de management. L'implémentation d'un tel système implique par nature des frais et s'adresse donc en priorité aux grands projets (parcs éoliens) ou aux projets comportant des risques spécifiques. Les autres projets peuvent travailler directement avec la check-list des dangers. Les principes cardinaux de la maîtrise des risques (chap. 4.2.8) sont à prendre en compte.

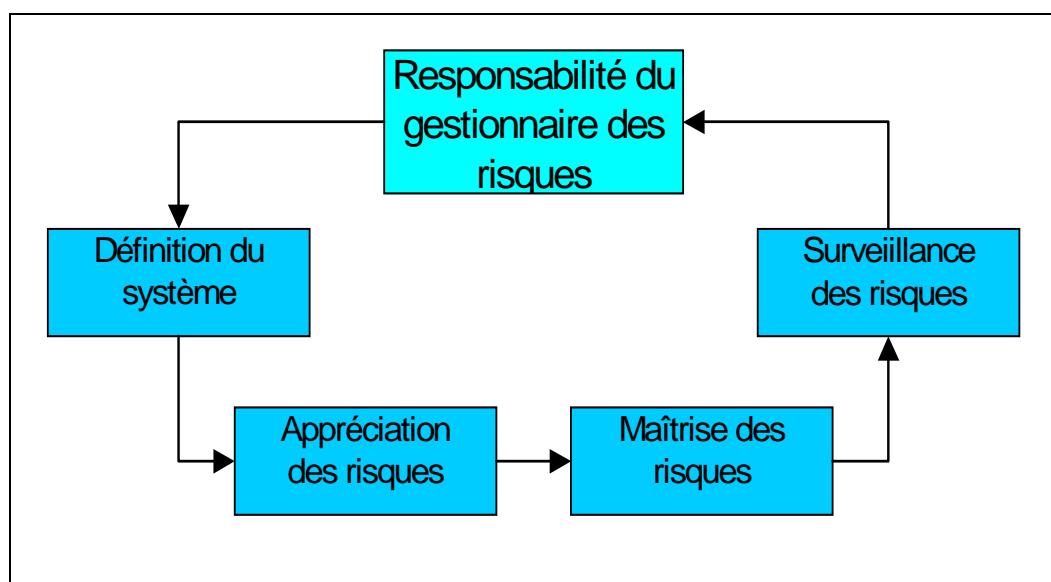
4.1 Bases normatives

En effectuant une évaluation suffisamment tôt, les concepteurs, les exploitants, les autorités, les assureurs et les investisseurs peuvent prendre connaissance des risques inhérents à une installation éolienne et ainsi déterminer les mesures à prendre pour les prévenir ou les atténuer.

- La norme EN 1050: 1996 Sécurité des machines – Principes pour l'appréciation du risque (également ISO 14121) permet d'anticiper les risques lors de l'évaluation.

Il existe d'autres dispositifs réglementaires pour la gestion des risques: ISO/IEC 50051:1999 (ISO Guide 51:1999) 'Safety aspects – Guidelines for their inclusion in standards' et ISO/IEC Guide 73:2002 'Risk Management – Vocabulary – Guidelines for use in standards'. La norme 49000:2004 de l'Institut autrichien de normalisation, publiée récemment (en allemand) sous le titre "Risikomanagement für Organisationen und Systeme"¹ se fonde sur ces règlementations. Cette base normative donne un cadre général à la gestion des risques et s'applique parfaitement à l'appréciation des risques dans le domaine des éoliennes.

La norme considère la gestion des risques comme une tâche de direction. Le gestionnaire de risques est responsable des chances et des risques d'un projet. La gestion des risques se divise en quatre étapes: la définition du système, l'appréciation des risques (identification et analyse), leur maîtrise et leur surveillance.



¹ Il s'agit d'une base normative élaborée par des groupes de travail de l'Institut autrichien de normalisation (ON) et de la Swiss Association for Quality (SAQ). Elle bénéficie de l'adhésion de nombreux représentants de l'industrie et des assurances.

4.2 L'appréciation des risques

Il convient d'évaluer individuellement les risques d'un projet d'installation éolienne pour que celui-ci puisse déboucher sur une exploitation sûre et rentable. L'appréciation des risques ne consiste pas à rechercher le plus de risques possibles mais à en localiser les principaux et à accorder toute l'attention nécessaire aux moyens de les éviter ou de les atténuer.

4.2.1 Objectifs de l'appréciation des risques

Les objectifs de l'appréciation des risques dépendent des intérêts en présence. Le concepteur, les autorités, l'exploitant, l'assureur et les investisseurs ont tous les leurs, chacun assumant ses propres responsabilités. Ces réalités apparaissent dans l'appréciation des risques.

Gestionnaire du risque	Intérêts et responsabilités
Concepteur	Conditions favorables, accès, viabilisation, procédure d'autorisation rapide, choix de machines fonctionnelles, contrats de livraison à long terme, financement assuré
Autorités	Respect de l'environnement, protection du paysage, respect des objectifs politiques (énergies renouvelables), respect des lois, sécurité juridique
Exploitant	Sécurité de l'exploitation, prévention des dommages aux personnes, rendement et productivité, faibles coûts d'entretien, longue durée de vie
Assureur	Absence de dommages dus aux événements assurés
Investisseur	Disponibilité élevée, garanties du concepteur concernant les calculs de vitesse du vent, garanties du fabricant concernant les performances de l'installation, évolution favorable à long terme du prix de l'électricité, rentabilité de l'installation, stabilité des taux d'intérêt sur le capital externe et intérêts suffisants sur le capital investi

4.2.2 Définition du système

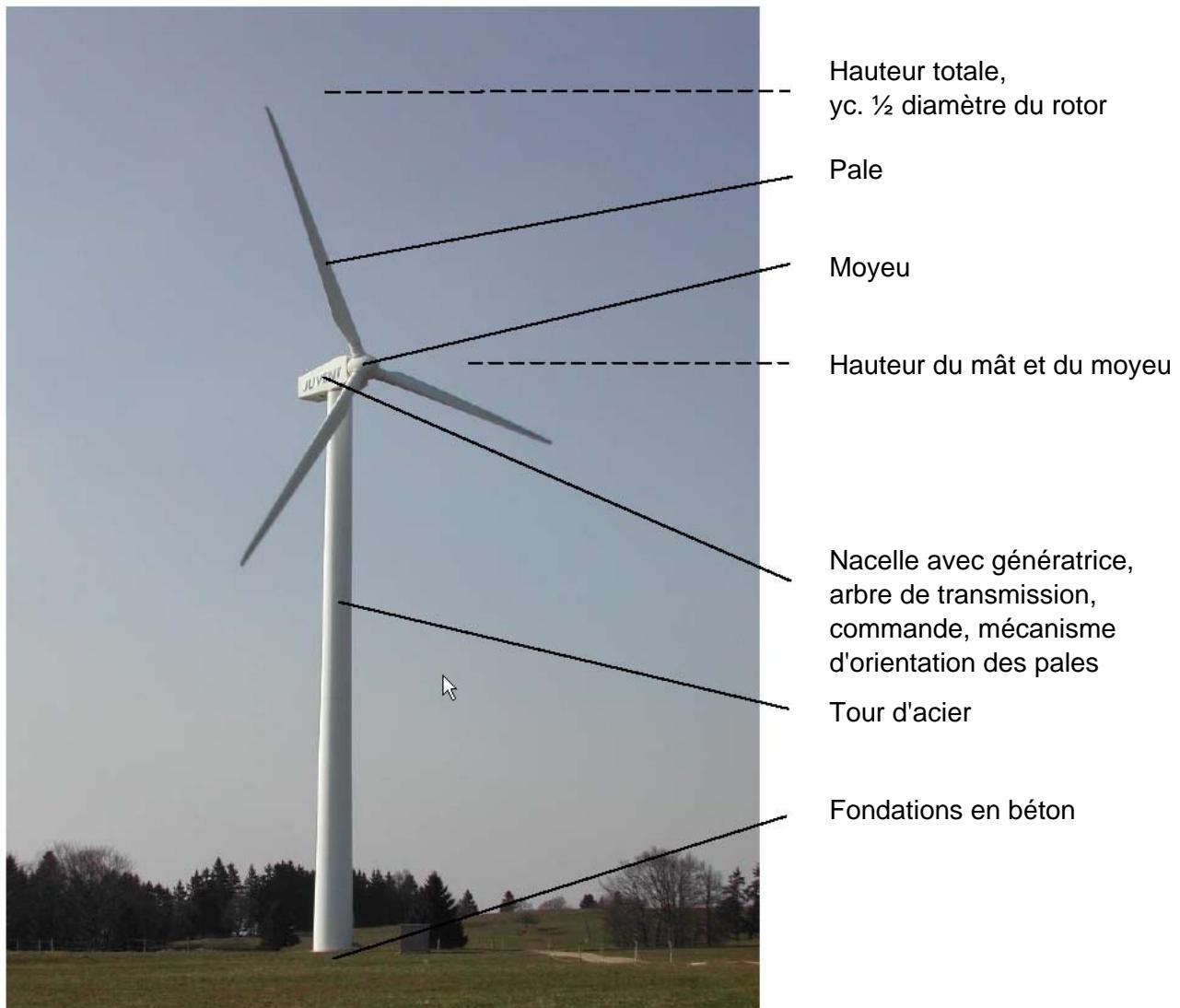
La définition et la délimitation du système déterminent l'objet de l'appréciation des risques. Elle concerne les aspects suivants:

Phases d'un projet

- cahier des charges, design et construction
- fabrication du prototype et de la présérie, qualification du fournisseur
- mesure du vent, choix de l'emplacement et procédure d'autorisation
- commercialisation, financement et vente de l'installation
- fabrication en série et gestion de la qualité
- transport, montage et raccordement
- mise en service, tests, réception

- exploitation normale et entretien
- maintien de la valeur (investissement de remplacement)
- démantèlement, remise en état du site

Composants



- Fondations:
 - éolienne
 - transformateur
- Armature / Ancrages:
 - tiges d'armatures / vis d'ancrage
 - cadre d'armature / d'ancrage
 - ancrages spéciaux

- Mat:
 - structure
 - câblage
 - échelle
 - ascenseur
- Nacelle:
 - structure porteuse
 - multiplicateur
 - génératrice électrique
 - mécanisme d'orientation des pales
 - trappe de visite
- Rotor:
 - moyeu
 - pales
- Electrotechnique:
 - convertisseur
 - transformateur
 - connexion au réseau
 - protection contre la foudre
- Electronique:
 - commande
 - surveillance
 - transmission des données
 - système d'acquisition de données
 - parasurtenseur
- Infrastructure:
 - route d'accès
 - câblage
 - connexion au réseau

4.2.3 Eventail des dangers

L'éventail des dangers doit être le plus large possible afin de représenter une vue d'ensemble des risques. Trois aspects figurent au premier plan:

- la sécurité de la conception (environnement, écologie);
- la sécurité économique (rentabilité);
- la sécurité d'exploitation (prévention des dommages).

Enumération des dangers potentiels

Les dangers sont définis comme des risques potentiels. Le meilleur moyen de déterminer les risques inhérents à une installation éolienne et à sa mise en service consiste à établir une liste de tous les dangers pouvant être liés à un tel projet, en se fondant sur les expériences faites en la matière. On trouvera une liste complète des dangers inhérents aux éoliennes à l'annexe 1.

Avant d'utiliser la liste des dangers, on s'assurera que toutes les éventualités et tous les facteurs particuliers représentant des risques potentiels pour le projet en question ont bien été pris en compte.

Les dangers pertinents pour un projet concret sont identifiés et décrits comme des risques, évalués en fonction de leur probabilité et de leur ampleur et représentés sur le tableau des risques.

4.2.4 Grille d'évaluation

Pour procéder à l'appréciation des risques, on établira une grille comprenant leur probabilité et leur ampleur possible. En général, cette grille comporte cinq catégories.

Catégories de probabilité:

fréquente	p. ex. 50 %	0,5
possible	p. ex. 20 %	0,2
rare	p. ex. 5 %	0,05
très rare	p. ex. 2 %	0,02
invraisemblable	p. ex. 1 %	0,01

Les probabilités expriment dans quelle mesure on peut s'attendre à ce qu'un risque se concrétise pendant la durée de vie d'une installation.

Les catégories d'ampleur sont déterminées en fonction du projet, p. ex.:

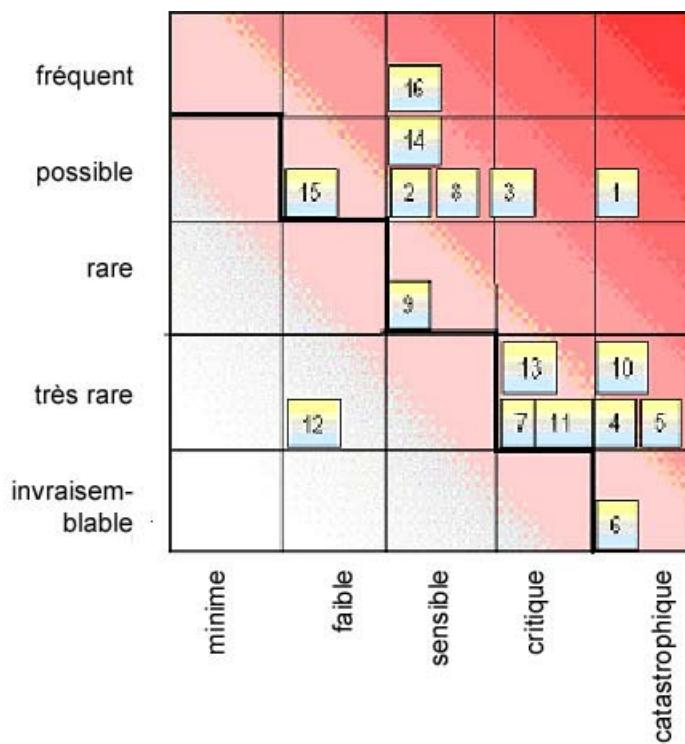
minime	mise en danger	10 000 fr.
faible	blessure légère	30 000 fr.
sensible	blessure grave	100 000 fr.
critique	invalidité	300 000 fr.
catastrophique	décès	1 000 000 fr.

Lors de l'appréciation des risques, on veillera toujours à faire la distinction entre les dommages aux personnes et les dommages matériels (= pertes potentielles, chutes de rendement). Ces deux valeurs ne doivent pas être mises sur un pied d'égalité mais, au contraire, être saisies individuellement².

² Pour des raisons éthiques et parce que les dommages corporels et matériels sont juridiquement traités différemment.

4.2.5 Le profil des risques, situation initiale

Une fois les préparatifs de l'appréciation des risques effectués, les principaux risques inhérents au projet en question peuvent être recensés, décrits, évalués et inscrits au tableau des risques. Dans l'illustration ci-dessous, qui donne un exemple de tableau des risques pour une installation éolienne, les 15 plus grands risques sont numérotés de 1 à 15.



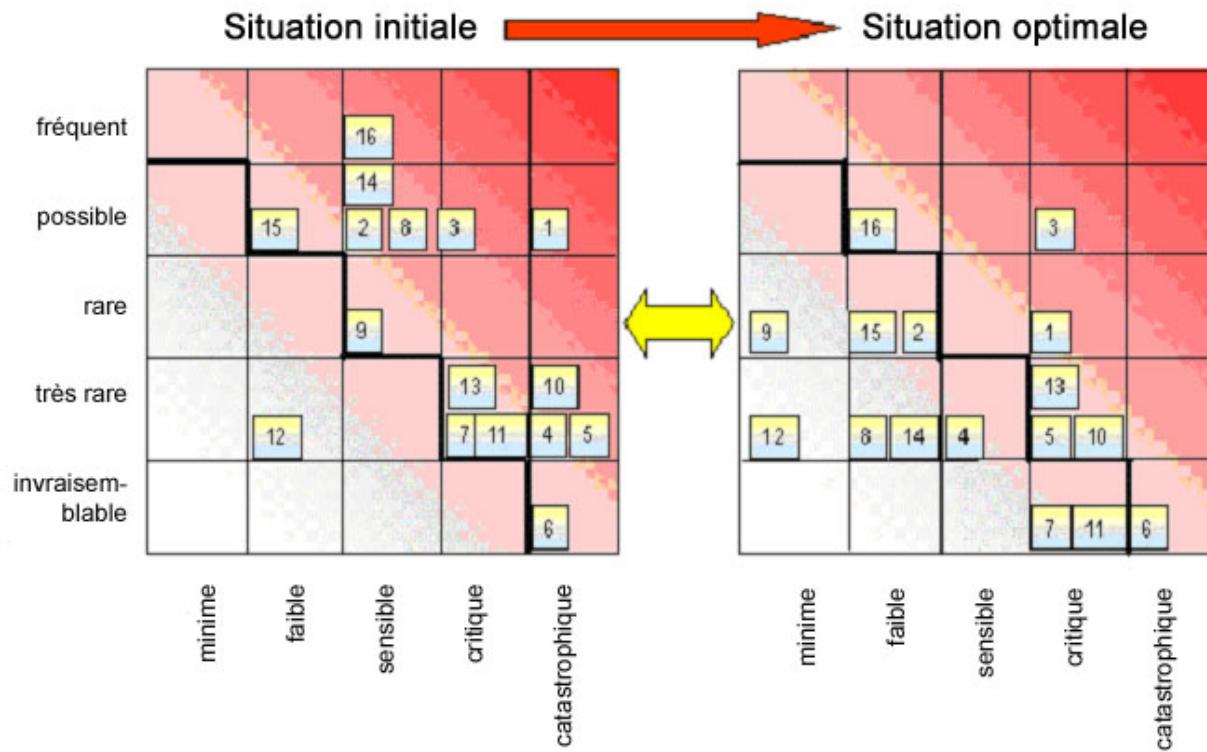
Les plus grands risques (fréquent / catastrophique) figurent en haut à droite du tableau et les plus faibles (invraisemblable / minime) en bas à gauche. Chaque chiffre est attribué à un risque déterminé: p. ex., le chiffre 1 pourrait correspondre au risque de faillite du fabricant de l'installation (possible, perte pouvant atteindre 1 million de fr.).

La ligne en gras représente la limite de tolérance en matière de risque. Elle marque la séparation entre les grands risques et les risques moins importants.

4.2.6 Le profil des risques, situation optimisée

Lorsque le tableau des risques est établi pour la situation réelle, il convient de se demander, pour chaque risque, dans quelle mesure il est possible de réduire sa probabilité et/ou son ampleur, surtout si la limite de tolérance est dépassée. Les solutions et les mesures concrètes doivent être définies avec les délais, les responsabilités et les coûts. Une réestimation de la probabilité et de l'ampleur débouche sur un tableau des risques en situation optimale qui permet de représenter les risques résiduels que comporte encore un projet d'éolienne après la mise en œuvre des mesures prévues.

Dans l'exemple ci-dessous, il a été possible de réduire le risque 1 grâce à une garantie bancaire en faveur de l'exploitant de l'installation.



4.2.7 Mise en œuvre et surveillance des mesures

Pour que la gestion des risques déploie ses effets, les mesures prévues afin de prévenir et d'atténuer les risques doivent être véritablement mises en œuvre. Dans le cas d'un projet d'installation éolienne, cette tâche incombe en général au responsable du projet ou à la direction de l'exploitation.

Une appréciation professionnelle des risques permet de mettre en évidence les points sensibles d'un projet ainsi que les mesures propres à atténuer ces risques. Elle améliore la confiance accordée au projet et aide les parties en présence à prendre des décisions. En outre, les assureurs et les investisseurs accordent une grande importance au contrôle des risques et à la transparence en la matière.

4.2.8 Principes cardinaux de la maîtrise des risques

Lors de la définition de la sécurité des systèmes techniques, le constructeur de l'installation éolienne, mais aussi le concepteur, l'autorité chargée de délivrer le permis de construire et l'exploitant doivent connaître et appliquer les principes reconnus en la matière. Une éolienne est installée dans un environnement spécifique, ce qui implique des dangers spécifiques qui jouent un rôle important dans la conception, l'autorisation et l'exploitation.

Le principe cardinal de la maîtrise des risques reconnus dans le domaine des éoliennes est tiré de la directive européenne relative aux machines³. Il s'agit d'un modèle à trois niveaux dont le contenu est le suivant:

³ Directive 98/37/CE du 22 juin 1998 du Parlement et du Conseil européen concernant le rapprochement des législations des Etats membres relatives aux machines, annexe I: Exigences essentielles de sécurité et de santé relatives à la conception et à la construction des machines et des composants de sécurité, 1.1.2. Principes d'intégration de la sécurité.

Principes d'intégration de la sécurité

- a) Les machines doivent par construction être aptes à assurer leur fonction, à être réglées et entretenues sans que les personnes soient exposées à un risque lorsque ces opérations sont effectuées dans les conditions prévues par le fabricant. Les mesures prises doivent avoir pour objectif de supprimer les risques d'accidents durant la durée d'existence prévisible de la machine, y compris les phases de montage et de démontage, même dans le cas où les risques d'accidents résultent de situations anormales prévisibles.
- b) En choisissant les solutions les plus adéquates, le fabricant doit appliquer les principes suivants, dans l'ordre indiqué:
 - éliminer ou réduire les risques dans toute la mesure du possible (intégration de la sécurité à la conception et à la construction de la machine);
 - prendre les mesures de protection nécessaires vis-à-vis des risques ne pouvant être éliminés;
 - informer les utilisateurs des risques résiduels dus à l'efficacité incomplète des mesures de protection adoptées, indiquer si une formation particulière est requise et signaler s'il est nécessaire de prévoir un équipement de protection individuelle.

En résumé, le modèle à trois niveaux signifie que:

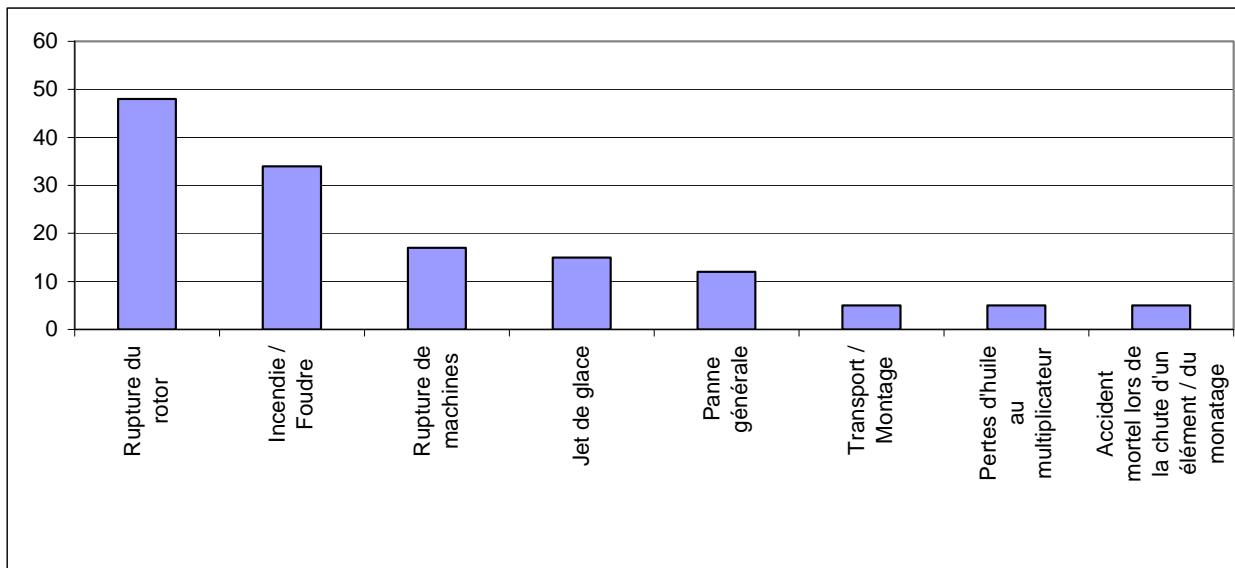
- 1) tous les moyens courants doivent être utilisés pour éliminer ou réduire les risques;
- 2) les dangers subsistants doivent être combattus par des mesures de protection;
- 3) les risques résiduels doivent être réduits par des instructions, des avertissements, une formation spéciale, etc.

On trouvera, à l'annexe A.2 du présent document, un formulaire d'appréciation individuelle des risques.

5. Sécurité d'exploitation

5.1 Eventail des dangers

Les informations sur les dangers potentiels des installations éoliennes abondent. On trouve par exemple, sur l'Internet, quelque 140 accidents recensés à partir d'articles de presse, de 1997 à aujourd'hui. Même si ces données ont été recueillies de manière empirique, on peut en tirer des enseignements intéressants sur certains types d'accidents.



En outre, les milieux spécialisés ont eu connaissance de faits qui n'entrent pas dans la statistique citée plus haut: ces dernières années, on a enregistré plusieurs défauts de série sur des mécanismes d'éoliennes. Des centaines de mécanismes ont dû être remplacés par des pièces neuves. La plupart des cas étaient couverts par la garantie du fabricant.

Les assureurs disposent aussi de données relatives aux dommages. Certains d'entre eux en ont tiré des recommandations concernant la prévention des dommages et la conception des systèmes⁴.

Dans l'intérêt d'une exploitation sûre et rentable des installations éoliennes, on peut faire les recommandations suivantes:

5.2 Technique éprouvée

La bonne marche d'une éolienne ou d'un parc éolien exige une installation éprouvée et techniquement au point. Sur des marchés en forte croissance, le danger existe que des fournisseurs veuillent faire rapidement leur place en proposant des produits de qualité douteuse. Or des éléments mal conçus ou présentant des lacunes (faulty design) peuvent occasionner des dommages en série affectant toute une génération de produits, ce qui peut se révéler catastrophique pour l'entreprise concernée, notamment à cause des réclamations des exploitants.

⁴ GDV - Gesamtverband der Deutschen Versicherungswirtschaft e.V. (Hrsg.): Erneuerbare Energien, Gesamtbericht über den technologischen Entwicklungsstand und das technische Gefährdungspotential, mars 2003.

Les fabricants d'éoliennes doivent donc tester suffisamment leurs produits. Le processus de développement doit inclure la construction de prototypes, des tests suffisants effectués sur ceux-ci, le reengineering et la construction d'une présérie soumise à une nouvelle batterie de tests. C'est seulement après que l'on peut démarrer la construction d'éoliennes en grande série, les mettre sur le marché et les installer.

5.3 Classification des éoliennes

La norme CEI 64100-1 définit quatre classes d'éoliennes, en rapport avec les conditions météorologiques. Les principaux critères de classification sont la vitesse du vent en moyenne annuelle, la tempête cinquantenaire et l'intensité de turbulence. La détermination de ces valeurs revêt donc une importance particulière.

Normalement, les fabricants proposent des installations satisfaisant aux conditions extérieures correspondant à une de ces classes. Pour les emplacements exposés à des conditions extrêmes, la norme CEI 64100-1 a prévu des exigences spéciales. Elle définit pour cela une classe S relative aux conditions extérieures particulières. On entend par "emplacement connaissant des conditions extrêmes" les installations situées en haute mer mais aussi celles qui sont implantées sur des terrains de nature particulièrement complexe qui sortent du cadre des conditions normales.

Pour définir l'implantation aux emplacements situés sur un terrain de nature complexe, les constructeurs doivent également connaître les composantes verticales du vent. Des mesures complémentaires au moyen d'un anémomètre à ultrasons ou d'un SODAR peuvent s'avérer nécessaires.

Il convient également, dans ce contexte, de tenir compte du risque de gel. A ce sujet, voir le chap. 5.9 et [IEA, 2003].

5.4 Conditions relatives à la mise en service

Pour qu'une installation éolienne puisse être mise en service, elle doit satisfaire aux exigences légales en matière de sécurité et de protection de la santé qui s'appliquent aux produits et aux systèmes techniques. Ces exigences se fondent, dans le cadre de la nouvelle politique de l'UE, sur la directive concernant les machines⁵. Les directives de l'UE sont reprises dans les législations nationales des Etats membres et ont ainsi force de loi. Parallèlement à cela, les exigences en matière de sécurité et de protection de la santé relatives aux produits concernés sont spécifiées dans des normes européennes harmonisées qui sont également reprises par les normes nationales des Etats membres.

Les produits et les installations satisfaisant aux exigences de sécurité de la nouvelle politique de l'UE, notamment de la directive relative aux machines, ou des lois suisses correspondantes doivent être soumises à la procédure de conformité et arboreront normalement le signe distinctif CE. L'évaluation de la conformité se fait sur trois niveaux:

- pour les machines "normales", une auto-évaluation accompagnée de la mise à disposition de la documentation exigée;

⁵ Directive 98/37/CE du 22 juin 1998 du Parlement et du Conseil européen concernant le rapprochement des législations des Etats membres relatives aux machines.

- pour certains types de machines expressément spécifiés et pour les pièces de sécurité pour lesquelles il existe des normes harmonisées, la documentation technique sera transmise simultanément à l'organe chargé d'évaluer la conformité, lequel pourra ensuite vérifier si les normes ont été prises en considération. Un test type peut être effectué sur une base volontaire;
- en cas de défaut ou de non-respect des normes, l'organe chargé d'évaluer la conformité procèdera systématiquement à des tests.

Les éoliennes sont considérées comme des machines "normales" pour lesquelles une déclaration volontaire du fabricant suffit. Cette déclaration doit s'appuyer sur la documentation technique mise à disposition par le fabricant.

En Suisse, la directive sur les machines est appliquée dans le cadre de la loi fédérale sur la sécurité d'installations et d'appareils électriques (LSIT) et l'ordonnance sur la sécurité d'installations et d'appareils électriques (OSIT). Selon l'art. 4b LSIT, "celui (en l'occurrence, l'exploitant d'une éolienne) qui met en circulation une installation ou un appareil technique doit être en mesure d'apporter la preuve qu'ils sont conformes aux exigences essentielles de sécurité et de santé". ("La personne qui met en circulation des machines doit veiller à ce qu'une déclaration de conformité visée à l'annexe 2 de la présente ordonnance soit jointe au produit"; art. 7, al. 2, OSIT).

La déclaration de conformité doit contenir les éléments suivants, conformément à l'annexe 2 de l'OSIT, pour autant que le fabricant puisse l'établir lui-même:

1. le nom et l'adresse du fabricant ou de son représentant établi en Suisse;
2. la description du produit;
3. toutes les dispositions pertinentes auxquelles répond le produit;
4. le nom et la fonction du signataire ayant reçu pouvoir pour engager le fabricant ou son représentant établi en Suisse.

L'annexe 3 de l'OSIT énumère les exigences spéciales relatives au dossier technique des machines (en l'occurrence les éoliennes):

La personne (en l'occurrence l'exploitant de l'éolienne) qui met en circulation des machines doit pouvoir faire en sorte que les documents suivants, correspondant au degré de complexité de la machine, soient disponibles dans un délai raisonnable:

- a) un plan d'ensemble de la machine ainsi que des plans des circuits de commande;
- b) des plans détaillés et complets, accompagnés éventuellement des notes de calcul, résultats d'essais, etc., permettant la vérification de la conformité de la machine aux exigences essentielles de sécurité et de santé;
- c) une liste des exigences essentielles, des normes et des autres spécifications techniques qui ont été utilisées lors de la conception de la machine;
- d) une description des solutions adoptées pour prévenir les risques présentés par la machine;
- e) si elle déclare la conformité à une norme visée à l'art. 4a de la loi qui le prévoit, tout rapport technique donnant les résultats des essais effectués à son choix soit par elle-même soit par un organisme compétent en la matière;
- f) un exemplaire de la notice d'instructions de la machine;
- g) dans le cas de fabrication en série, une liste des mesures prises dans l'entreprise du fabricant pour maintenir la conformité des machines aux dispositions de la présente ordonnance;

- h) des plans détaillés et autres renseignements précis concernant les sous-ensembles utilisés pour la fabrication des machines si leur connaissance est indispensable ou nécessaire à la vérification de la conformité aux exigences essentielles de sécurité.

Les éoliennes dans lesquelles est installé un ascenseur pour le transport de personnes (destiné au personnel de montage et d'exploitation) doivent également satisfaire aux exigences de la directive européenne⁶ sur les ascenseurs, dans la mesure où cela apparaît judicieux. Une directive européenne relative à ce type d'ascenseurs est en cours d'élaboration (Règles de sécurité pour la construction et l'installation des élévateurs - Elévateurs particuliers destinés au transport des personnes et des matériaux - Partie 43 : élévateurs à usage spécifique pour les appareils de levage à charge suspendue).

5.5 Transport et montage

Le montage des éoliennes exige une définition claire des rôles et des responsabilités des parties en présence, en particulier lorsque l'emplacement est situé sur un terrain accidenté. Les principaux composants de l'installation (nacelle, pales, tour) sont généralement livrés en convois spéciaux par un ou plusieurs fabricants. Afin d'éviter des problèmes lors de l'assemblage et de garantir la sécurité des opérations, le transport et le montage seront confiés à des spécialistes munis de véhicules et de grues appropriés. La livraison, le transport et le montage doivent être soigneusement coordonnés. Les parties en présence doivent en étudier ensemble la faisabilité et régler tous les détails au moyen d'un plan de déroulement. Ils tiendront compte des points suivants:

- Le trajet choisi pour le transport des éléments les plus longs (pales) doit éviter les virages trop serrés. Il faut souvent aménager des routes et les remettre ensuite en état.
- Les ponts situés sur l'itinéraire doivent supporter le poids des plus lourds éléments (nacelle), soit 40 tonnes ou plus (véhicule compris).
- On tiendra compte également des passages sous voie et des hauteurs maximales en fonction du plus grand diamètre (base de la tour).
- Dans les montées, un véhicule tracteur supplémentaire peut s'avérer indispensable, ainsi qu'un véhicule pour pousser le chargement, le cas échéant.
- Les fabricants des pays nordiques ne disposent souvent pas de véhicules de transport adaptés aux conditions topographiques suisses, d'où la nécessité d'un transbordement.
- On prêtera une attention particulière aux riverains, passants et autres usagers de la route (écoliers, cyclistes). Ceux-ci devront être informés avant le passage du convoi, à moins que la police ne barre les routes pendant le transport.
- Le montage d'une éolienne est un événement couvert par la presse locale. Les journalistes et les curieux devront être avertis des dangers et, le cas échéant, pris en charge sur le site.
- L'aire de montage doit être assez vaste pour permettre la mise en œuvre d'une grue auxiliaire, en plus de la grue principale. Dans les grandes installations, deux grues sont nécessaires pour soulever la nacelle.
- Le montage ne peut avoir lieu que par des conditions atmosphériques favorables. Les forts vents et les précipitations rendent les opérations difficiles voire impossibles.

⁶ Directive 95/16/CE du 29 juin 1995 du Parlement et du Conseil européen concernant le rapprochement des législations des Etats membres relatives aux ascenseurs.

- Les pales risquent particulièrement d'être endommagées par de mauvaises manipulations durant le transport ou lors du montage au moyen de la grue. On veillera donc à respecter scrupuleusement les instructions du fabricant concernant le transport et la manipulation des composants.
- Le fabricant des composants fournira également des dispositifs de transport et de remorquage appropriés qui lui seront retournés après le montage.

On trouvera des indications concernant les assurances pour le transport et le montage aux chiffres 8.2.1 et 8.2.2.

5.6 Raccordement au réseau électrique

Les éoliennes et le réseau électrique s'influencent mutuellement, ce qui peut engendrer des problèmes d'exploitation du réseau ou des éoliennes elles-mêmes et conduire, dans certains cas, à des situations dangereuses. Le raccordement au réseau électrique est à considérer avec l'exploitant du réseau. Il faut prendre en compte les points suivants:

- Conditions de raccordement sur le réseau (puissance maximale raccordable, puissance réactive soutirable maximale, systèmes de protection du réseau, etc.).
- Le comportement de l'installation lors de courts-circuits dans le réseau, de coupure et de surtension ainsi que l'augmentation ou la diminution de la fréquence du réseau. Il faut également considérer que l'exploitation de l'installation influence localement la tension dans le réseau.

5.7 Protection contre la foudre

Les éoliennes sont exposées à la foudre. En cas de dommages, les pales dépourvues de protection sont souvent complètement détruites. De nos jours, cependant, les nouvelles éoliennes sont équipées de paratonnerres de série⁷. On peut également protéger efficacement les installations électriques et électroniques au moyen de parasurtenseurs appropriés.

Des capteurs de foudre sont installés sur la nacelle, le moyeu et les extrémités des pales. Ils sont reliés par câble à la structure en acier et devient ainsi la foudre jusqu'au sol.

On veillera également à protéger le multiplicateur, le générateur, l'arbre, la transmission ainsi que la totalité des installations électriques et électroniques contre la surtension. Si certains composants sont installés dans les fondations ou au pied du mât, ils devront également être intégrés à la protection contre la foudre. L'ensemble du système doit donc aussi être muni d'une protection interne.

Malgré les systèmes de protection installés, il convient de prendre d'autres mesures pour prévenir les risques dus à la foudre:

- On veillera à interdire la présence de personnes dans une installation éolienne pendant un orage.
- Malgré le dispositif de protection, une éolienne peut être touchée et partiellement endommagée par la foudre. En raison du risque de chute d'éléments du rotor, il est dangereux de stationner à proximité d'une éolienne pendant un orage.

⁷ Voir: GDV - Gesamtverband der Deutschen Versicherungswirtschaft e.V. (éd.): Erneuerbare Energien, Gesamtbericht über den technologischen Entwicklungsstand und das technische Gefährdungspotential, mars 2003, pp. III-17.

- Si le rotor d'une éolienne n'est pas protégé contre la foudre, on attendra au moins une heure après un orage avant de s'en approcher. Les pales peuvent encore être chargées d'électricité et se décharger à l'approche d'une personne.

Le personnel d'exploitation et les passants doivent être avertis des dangers par des panneaux d'information.

5.8 Protection contre le feu

La plupart des éoliennes ne disposent pas d'un dispositif d'extinction standard dans la nacelle. Lors d'incendies, les sapeurs-pompiers sont souvent obligés d'attendre que le feu s'éteigne de lui-même, ce qui implique une destruction complète de l'installation.

Les éoliennes les plus exposées au risque d'incendie sont celles où la rotation de l'hélice est transmise par le multiplicateur à un générateur à grande vitesse. L'huile du mécanisme ou le générateur peuvent surchauffer et s'enflammer. En revanche, le danger d'incendie est moindre dans les éoliennes sans multiplicateur, car la vitesse de rotation plus basse ne risque guère de faire surchauffer le générateur. Les incendies peuvent également être causés par la foudre, des vibrations, un court-circuit ou un mauvais entretien.

L'installation d'un dispositif d'extinction automatique doit être étudié, de préférence à gaz ou à eau pulvérisée. De tels dispositifs permettent de protéger l'intérieur de la nacelle ainsi que les installations électriques du pied du mât.

Pour se déclencher à temps, le dispositif d'extinction doit être relié à une alarme automatique située dans la nacelle, qui fonctionnera seulement en cas d'incendie réel. Par conséquent, cette alarme ne doit pas dépendre d'un unique capteur car cela pourrait occasionner de fausses alertes.

En cas de déclenchement de l'alarme, l'exploitant et les sapeurs-pompiers doivent être alertés.

Si le dispositif d'extinction est mis en marche, l'éolienne doit être arrêtée aussitôt. Elle devra ensuite subir un contrôle technique complet et ne pourra être remise en service qu'après que l'on aura constaté son bon état de fonctionnement. Avant le contrôle, on s'assurera de l'absence de gaz résiduels pouvant mettre le personnel en danger.

Tous les matériaux utilisés pour la construction de l'éolienne devraient être ignifugés ou, à tout le moins, difficilement inflammables.

Un bon entretien préventif permet d'éliminer de nombreuses causes d'incendies potentiels.

5.9 Formation et jets de glace

5.9.1 Généralités⁸

Les éoliennes sont parfois soumises à des conditions atmosphériques extrêmes et aux influences directes de celles-ci. Dans les régions froides comme à haute altitude, les problèmes de la formation et des jets de glace se posent.

Le givrage des éoliennes ou des instruments de mesure peut se manifester de deux manières problématiques:

⁸ Durstewitz, M.: Windenergie in kalten Klimaregionen, in Erneuerbare Energien, 12/2003 S. 34 ff.

- Le givre apparaît lorsque ces objets sont soumis à des températures inférieures à 0 °C et sont en contact avec des gouttes d'eau provenant du brouillard ou des nuages.
- La formation de verglas est due à un front chaud rencontrant de l'air froid à proximité du sol. En cas de pluie, les gouttes d'eau traversant les masses d'air atteignent des températures inférieures au point de congélation mais sans se congeler pour autant. Lorsqu'elles touchent des objets dont la température est également inférieure à 0°C, il se forme une couche de givre. Ce phénomène est appelé pluie givrante.

5.9.2 Perturbations dues au givrage des appareils de mesure

Les appareils de mesure, comme les anémomètres et les girouettes, servent à contrôler les éoliennes. Givrés, ils peuvent fournir de fausses indications, ce qui risque d'entraver le fonctionnement des installations et, ainsi, réduire leur productivité et leur disponibilité.

5.9.3 Givrage des rotors

D'épais dépôts de glace peuvent également se former sur les pales des rotors, représentant des charges statiques et dynamiques pouvant induire des surcharges mécaniques ou des pannes. Les propriétés aérodynamiques des pales sont alors considérablement déteriorées. La présence de quantités de glace inégalement réparties sur les pales provoque de fortes vibrations nécessitant l'arrêt d'urgence de l'éolienne.

5.9.4 Jets de glace

On a constaté à maintes reprises des jets de glace par des éoliennes. Il convient par conséquent de prendre en considération le risque de formation et de jet de glace tant dans la conception que dans le contrôle, le choix de l'emplacement, l'autorisation et l'exploitation. Quand bien même aucun accident grave n'a été déploré à ce jour, il importe de ne pas sous-estimer les dangers représentés par les jets de glace.

On tiendra compte tout particulièrement des risques qu'implique la proximité de routes, de remontées mécaniques, de pistes de ski, etc. En outre, il ne faut pas négliger le fait que les éoliennes, encore peu nombreuses en Suisse, attirent des visiteurs.

Il convient de prendre des précautions plus ou moins importantes en fonction des mesures de construction visant à empêcher la formation de dépôts de glace et la probabilité que des personnes pénètrent dans la zone dangereuse.

Le premier périmètre de sécurité correspond à une éolienne à l'arrêt. On tiendra compte du fait que des morceaux de glace peuvent être projetés de côté par le vent. La formule suivante permet d'estimer approximativement leur portée:

$$d = v \frac{(D / 2 + H)}{15}$$

d = portée maximale en m

v = vitesse du vent à la hauteur du moyeu en m/s

D = diamètre du rotor en m

H = hauteur du moyeu en m

Le second périmètre de sécurité correspond à une éolienne en marche. La formule suivante permet d'estimer la portée maximale des jets de glace:

$$d = 1.5 \times (D + H)$$

d = portée maximale en m

D = diamètre du rotor en m

H = hauteur du moyeu en m

Au stade de la première approximation, chacun des deux périmètres de sécurité consiste en une circonference dont l'éolienne constitue le centre. Un examen plus minutieux est recommandé pour les emplacements problématiques. Les risques peuvent être quantifiés et le périmètre de sécurité déterminé plus précisément si l'on tient compte de la fréquence de la formation de glace, de la vitesse et de la direction du vent ainsi que du nombre de personnes se trouvant dans la zone dangereuse (cf. [DEWI, 2003]).

Les dangers potentiels peuvent et doivent être ramenés au niveau d'un risque résiduel supportable grâce à une gestion des risques adaptée à la situation. L'exploitant de l'éolienne doit s'assurer des points suivants:

- Le danger de givrage des instruments de mesure et des rotors doit être estimé de manière fiable et corrigé si possible par des mesures techniques (chauffage).
- Si l'on ne peut pas empêcher le givrage (p. ex. s'il est impossible de chauffer le rotor), l'éolienne doit être arrêtée en cas de formation de givre, pour autant que des personnes puissent se trouver dans la zone de portée.
- Des morceaux de glace peuvent tomber des pales au dégel. Il est par conséquent dangereux de se trouver à proximité de l'éolienne à ce moment-là. Les passants doivent être avertis à une distance suffisante de l'installation et ne doivent pas s'en approcher davantage. Pour poser les panneaux d'avertissement, on tiendra compte du fait que lorsque les conditions météorologiques sont favorables à la formation de dépôts de glace, la visibilité est souvent mauvaise et peut être limitée à 20 mètres.
- Les rotors doivent être débarrassés de leurs dépôts de glace avant la remise en service de l'éolienne.

5.10 Déprédatations volontaires

Même si elles sont rares, des déprédatations volontaires d'éoliennes peuvent tout de même survenir. La plupart du temps, il s'agit de coups tirés avec des armes à feu contre les pales. Celles-ci sont alors endommagées et doivent être remplacées. Il est recommandé d'inclure ce risque dans la couverture d'assurance.

5.11 Entretien et pièces de rechange

L'exploitation d'éoliennes exige une surveillance professionnelle des installations et un entretien effectué avec compétence.

Le manuel d'entretien, qui fait partie de la documentation remise par le fabricant, doit comporter des prescriptions et des instructions permettant au personnel d'exploitation d'exécuter correctement les travaux d'entretien. L'installation doit également disposer d'équipements de protection pour le personnel d'entretien.

Des systèmes de surveillance permettent de vérifier l'état des principaux composants et les conditions d'exploitation de l'installation, par exemple:

- la vitesse de rotation des pales;
- les vibrations des rotors, des paliers principaux, du multiplicateur, du générateur, du châssis et du mât;
- la température et la pression de l'huile, la température du générateur;
- la température extérieure (gel).

La surveillance de l'exploitation permet d'identifier et de corriger des points faibles, de planifier les réparations indispensables dans des délais favorables et d'effectuer celles-ci durant les périodes de faible vent. En outre, les composants nécessaires peuvent être commandés à temps. Cette manière de procéder contribue à améliorer la disponibilité et la durée de vie de l'installation.

5.12 Santé financière des fabricants

Ces dernières années, quelques fabricants d'éoliennes ou de composants ont fait faillite. Suite à cela, des installations ont dû être arrêtées faute de maintenance. Comme elles ne pouvaient plus être amorties, les investisseurs ont enregistré des pertes. Il faut donc également tenir compte du fait que seuls des fabricants en bonne santé financière sont à même de garantir valablement la courbe de rendement, le fonctionnement et la maintenance d'une installation, et de mettre ainsi l'exploitant et les investisseurs à l'abri de pertes.

6. Sécurité économique

6.1 Définition

On entend par sécurité économique la fiabilité avec laquelle on peut prévoir le résultat de l'exploitation d'une installation éolienne.

La sécurité économique n'indique donc pas la rentabilité d'un projet mais plutôt les chances des promoteurs de voir ledit projet répondre à leurs attentes.

Elle joue surtout un rôle important lorsqu'il s'agit de décider de la réalisation du projet. Le chapitre ci-après doit également être compris dans ce sens. Bien entendu, la sécurité économique peut également jouer un rôle ultérieurement, par exemple pour évaluer une participation à une installation éolienne existante, mais cet aspect n'est pas développé dans le présent document.

6.2 Principaux facteurs

La sécurité économique d'un projet est d'autant plus grande que les principaux facteurs influençant ses résultats peuvent être prévus de manière fiable. Ces facteurs sont les suivants:

- les coûts d'investissement;
- les coûts d'exploitation;
- le résultat d'exploitation prévu, compte tenu
 - de la vitesse du vent⁹ et
 - du rendement de l'installation (courbe de rendement);
- les revenus tirés de la production d'électricité.

Le graphique ci-après montre l'influence des facteurs en question sur la rentabilité d'une installation modèle. La rentabilité de l'exemple est évaluée d'après la valeur du capital définie par la norme SIA 480/1.

⁹ Il ne s'agit pas en l'occurrence de la vitesse moyenne du vent mais de la courbe de fréquence des vents permettant de déterminer le résultat d'exploitation. Cette courbe est déterminée en général d'après la distribution de Weibull.

Les valeurs suivantes ont été définies:

Puissance installée	3 éoliennes de 1300 kW
Investissement: - éoliennes seules - total	5,5 millions de fr. (1400 fr./kW) 7,8 millions de fr. (2000 fr./kW)
Durée de vie	20 ans
Coûts d'exploitation: de la 1 ^{ère} à la 10 ^e année de la 11 ^e à la 20 ^e année	4,8 % du coût de l'installation 6,6 % du coût de l'installation ¹⁰
Vitesse du vent	5 m/s
Production d'électricité	4680 MWh/a (1200 heures d'exploitation à plein régime par an)
Taux d'intérêt sur le capital	5 %
Prix de vente de l'électricité	25 ct./kWh

La valeur du capital est la somme de toutes les dépenses et recettes futures (valeurs numéraires) pendant la période considérée, décomptées au moment de référence. Dans l'exemple présent, cette période correspond aux 20 ans de durée de vie de l'exploitation. Une valeur négative signifie un bénéfice, alors qu'une valeur négative indique une perte.

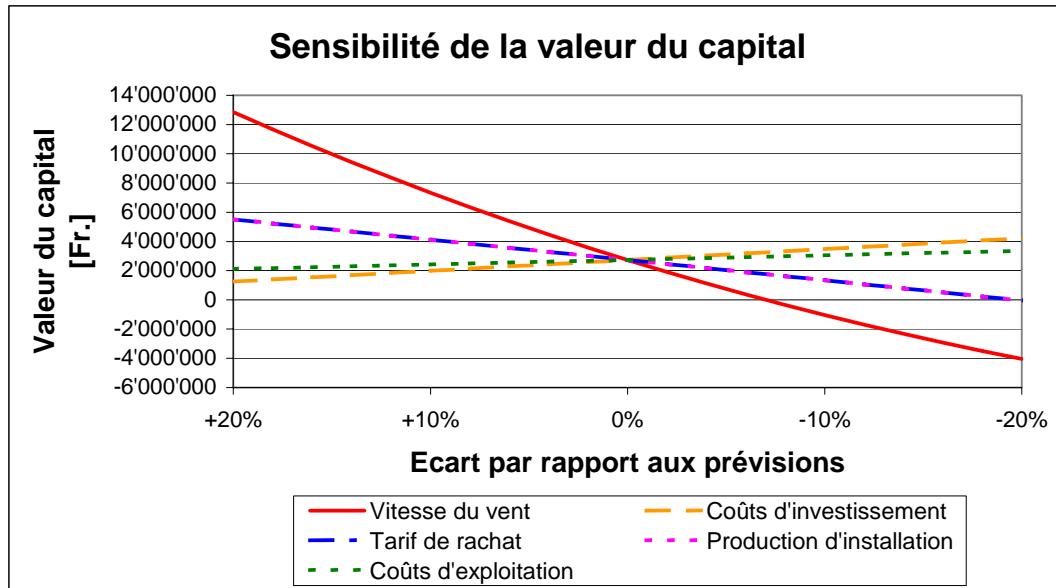


Figure 1 Sensibilité de la valeur du capital

Si la productivité de l'installation est inférieure de 20 % aux prévisions, il en résulte une valeur du capital de 0 franc.

¹⁰ Y compris les pièces de rechange.

Le graphique montre bien que la vitesse du vent est l'élément qui a de loin la plus grande influence sur la valeur du capital.

Pour interpréter les courbes, il faut tenir compte du fait que, dans la pratique, chacun des facteurs a sa propre marge d'erreur. S'il est possible que le résultat s'écarte de $\pm 20\%$ par rapport aux recettes attendues, les coûts d'investissement réels sont généralement bien plus proches des prévisions.

6.3 Marche à suivre dans la conception du projet

Pour qu'un projet éolien bénéficie de la plus grande sécurité économique possible, il est recommandé de procéder comme suit:

6.3.1 Recettes prévues

La marge d'erreur relative aux prévisions de recettes peut être assez grande, suivant le genre de projet, les données prises en compte au départ et la méthode de calcul (jusqu'à plus de 30 %).

Par conséquent, il est très important, pour la sécurité économique d'un projet, de

- ramener la marge d'erreur à un niveau acceptable au moyen de procédés et de méthodes appropriés, et de
- prendre en compte une marge d'erreur résiduelle dans l'appréciation de la rentabilité du projet.

On admet souvent une incertitude forfaitaire de 10 %, intégrée aux calculs de rentabilité au titre de marge de sécurité. En outre, on commande parfois deux expertises indépendantes concernant le vent. Mais ces précautions ne suffisent pas pour autant à assurer la sécurité économique d'un projet.

Il est donc recommandé:

- d'évaluer la marge d'incertitude, et
- d'appliquer les principes de la gestion des risques.

Le chapitre suivant décrit une manière d'effectuer des prévisions de recettes crédibles en se fondant sur l'analyse des incertitudes et sur les principes de la gestion des risques.

6.3.2 Autres facteurs

On accordera en outre une attention particulière aux coûts d'investissement et au tarif de rachat de l'électricité produite. Il est parfois possible de limiter considérablement les risques grâce à des contrats conclus au bon moment.

Les coûts d'exploitation représentent en règle générale un risque restreint. Il convient d'être spécialement attentif aux coûts d'entretien des principaux composants de l'installation durant la seconde décennie de sa durée de vie présumée.

6.4 Prévisions de production d'électricité

6.4.1 Marche à suivre

Pour obtenir une estimation crédible de la production électrique, il est indispensable d'établir une statistique précise et à long terme des vents à la hauteur du moyeu de l'éolienne, dans le cadre d'une expertise. On procèdera de différentes manières suivant les conditions topographiques et le nombre d'éoliennes prévu, mais toujours en combinant mesures et calculs. La prévision des recettes sera calculée sur la base de la statistique des vents à long terme.

Seule une analyse préalable de l'emplacement permet de définir la méthode appropriée pour établir les prévisions. Celle-ci doit concilier l'économie des moyens et la précision des résultats tout en permettant de se prononcer le plus rapidement possible.

Mesures anémométriques

L'expertise devra impérativement se fonder sur des mesures de la vitesse et de la direction du vent effectuées sur place pendant au moins un an au moyen d'appareils fixés sur un mât. La topographie de la Suisse est trop accidentée pour que l'on se contente d'approximations à partir de mesures effectuées à d'autres endroits que l'emplacement prévu. Les résultats d'une telle approche sont trop imprécis.

Les mesures devraient être effectuées le plus haut possible au-dessus du sol. L'idéal serait de placer les appareils à la hauteur du moyeu de l'éolienne, mais cette solution s'avère la plupart du temps inapplicable pour des raisons de coûts. Les mesures effectuées à 10 m du sol, comme c'est par exemple le cas des stations météorologiques fixes, sont souvent trop influencées par les accidents topographiques et par des obstacles comme les arbres ou les bâtiments. Il est difficile de quantifier cette influence pour chaque cas, ce qui induit une marge d'erreur trop importante pour l'extrapolation des mesures à la hauteur du moyeu.

Les mesures sont souvent effectuées à des hauteurs différentes afin de disposer d'informations permettant d'établir un profil vertical de la vitesse du vent.

Lors de mesures anémométriques, on tiendra compte des points suivants (voir aussi [IEA 1999]):

- On utilisera des anémomètres appropriés et étalonnés¹¹.
- Les mesures sont effectuées à intervalles de 2 secondes; les valeurs moyennes sur 10 minutes sont conservées¹².
- Les capteurs doivent être montés exactement à la verticale et ne doivent pas subir l'influence des haubans.
- Les bras soutenant les instruments doivent avoir une longueur équivalant à au moins 7 fois le diamètre du mât afin de réduire l'influence de celui-ci.
- Les bras doivent être montés de manière que le mât n'interfère pas dans la direction principale du vent.
- L'orientation des capteurs de direction du vent doit être soigneusement vérifiée.
- Les mesures suivantes doivent éviter ou réduire la perte de données:

¹¹ On trouvera une description d'une procédure standard de calibrage des anémomètres à coupelles dans measnet 1997.

¹² D'autres données sont nécessaires pour l'implantation des éoliennes, notamment les valeurs maximales (pointes de rafales à intervalle de 2 sec.) et l'écart type.

- protection efficace contre la foudre;
- alimentation électrique suffisante et assurée;
- utilisation de capteurs résistants au froid ou pouvant être chauffés, surtout à haute altitude¹³;
- contrôle régulier des données de manière à garantir un temps de réaction rapide (p. ex. surveillance des mesures par GSM);
- capteurs redondants.

Mesures au SODAR

Une mesure complémentaire par un SODAR peut apporter un complément décisif à une expertise s'il s'avère impossible de faire une extrapolation suffisamment précise des conditions de vent régnant à la hauteur du moyeu sur la base des mesures effectuées sur le mât.

Le SODAR ("sound detecting and ranging") est un appareil effectuant des mesures au sol sans contact, sur la base des ondes sonores. Les ondes sonores émises sont renvoyées par les inhomogénéités de l'atmosphère. La direction et la vitesse du vent entre 20 et 150 m/sol sont déduites en mesurant l'effet Doppler des ondes réfléchies.

Grâce aux mesures SODAR, on établit les profils verticaux standardisés du vent en fonction de sa direction et de sa vitesse. Les mesures effectuées sur le mât à la hauteur du moyeu sont ensuite extrapolées sur cette base.

Pour effectuer des mesures au SODAR, il faut réunir les conditions suivantes:

- faible bruit environnant;
- pas d'obstacles élevés à proximité immédiate;
- alimentation stable en électricité;
- mesures sur une période assez longue pour couvrir tous les régimes de vent significatifs (en général un mois);
- épuration et évaluation soigneuse des données: les mesures au SODAR contiennent beaucoup de fausses valeurs (dues au bruit et à des conditions atmosphériques particulières) qui doivent être filtrées.

Calcul d'une statistique du vent à long terme

Les mesures prélevées à partir du mât ne couvrent généralement qu'un laps de temps de 1 à 2 ans, trop court pour être pertinent sur le plan climatologique. Elles doivent donc être adaptées aux conditions de vent à long terme par corrélation. Elles sont ensuite comparées aux mesures fournies par différentes stations météorologiques permanentes, prenant si possible en considération la vitesse et la direction du vent. Les fonctions de correction sont définies sur la base des mesures des stations qui présentent la meilleure corrélation avec le site mesuré.

¹³ A ce sujet, voir également International Energy Agency (IEA), R&D Wind Annex XIX "Windenergy in cold climates" <http://arcticwind.vtt.fi/>

Lors de l'établissement de la statistique du vent à long terme, il convient de tenir compte des aspects suivants:

- une bonne corrélation entre les mesures effectuées à partir du mât et les mesures de référence (coefficients de corrélation d'au moins 0,7, si possible 0,8, en moyenne journalière);
- prise en compte des lacunes dans les mesures effectuées à partir du mât et les mesures de référence;
- recours à des procédés de corrélation adéquats pour définir les fonctions de correction;
- vérification de la consistance des mesures de référence: un changement de station de mesure et d'instruments ou de programme de mesures génère des données inconstantes qui sont inadéquates;
- période de référence suffisamment longue (au moins 10 ans, si possible 20).

Transfert de la statistique du vent à la hauteur du moyeu de l'éolienne

Sur les terrains plats et dépourvus d'obstacles, le profil vertical de la vitesse du vent suit à peu près une courbe exponentielle. Si l'éolienne projetée doit être installée sur un tel terrain et à l'emplacement du mât de mesure ou à un emplacement analogue situé à proximité immédiate, la statistique du vent peut être extrapolée à la hauteur du moyeu par une fonction exponentielle, à condition que la vitesse du vent soit mesurée à différentes hauteurs. Ces mesures permettent de calculer le profil du vent (en fonction de sa direction, suivant les cas) comme une fonction exponentielle selon la formule suivante:

$$\frac{v_2}{v_1} = \left(\frac{z_2}{z_1} \right)^\alpha \quad \text{avec} \quad \alpha = \frac{\log \frac{v_2}{v_1}}{\log \frac{z_2}{z_1}}$$

z: hauteur [m]

v: vitesse du vent [m/s]

Ce procédé d'extrapolation ne s'applique pas aux autres types de terrains. Dans ce cas, le profil du vent peut être défini sur la base de mesures au SODAR (v. plus haut) ou par une extrapolation sur la base d'un modèle.

Le modèle WAsP¹⁴ s'est imposé comme standard dans l'industrie, mais il a été conçu pour des terrains côtiers plats et s'applique mal aux topographies complexes. Si l'indice RIX¹⁵ est de 0 % pour l'emplacement prévu, celui-ci se prête donc au calcul au moyen de WAsP. Une modélisation au moyen de WAsP peut être envisagée tant que l'indice RIX est inférieur à 30 %, mais il faudra compter avec une marge d'erreur plus élevée [Pedersen, 1997].

¹⁴ Voir www.wasp.dk

¹⁵ L'indice RIX est un coefficient dépendant de l'aspérité du terrain. Dans le cas précis, il désigne la proportion du terrain dont la déclivité est supérieure à 0,3 ou 20%.

Pour les terrains complexes, on recourra de préférence au modèle CFD (Computational Fluid Dynamics). Citons à titre d'exemple le simulateur WindSim¹⁶, développé pour l'énergie éolienne et disponible sous forme de logiciel.

Lors de l'extrapolation ou de la modélisation, on tiendra compte des aspects suivants:

- choix d'un procédé ou d'un modèle adapté à l'emplacement;
- exactitude des données de base à haute résolution pour la modélisation (modèle de terrain, carte des aspérités);
- définition de conditions appropriées.

Calcul de la production d'énergie

Pour la prévision de la production d'énergie, la statistique du vent à long terme calculée à la hauteur du moyeu de l'éolienne est liée à la courbe de rendement spécifique fournie par le fabricant, compte tenu de la densité de l'air.

La teneur en énergie des masses d'air en mouvement est proportionnelle à la densité de l'air, laquelle dépend de la température, de la pression et de l'humidité. Pour prévoir la production d'énergie, il faut calculer la densité moyenne de l'air à l'emplacement de l'éolienne. La Suisse dispose pour cela d'un réseau de mesures météorologiques suffisamment dense pour que l'on puisse renoncer à effectuer des mesures à partir d'un mât.

Pour les parcs éoliens, il faut prendre en considération les perturbations mutuelles des éoliennes. On appliquera en principe le modèle du parc éolien de Risø¹⁷, disponible sous forme de logiciel, comme WAsP ou WindPRO.

Les pertes de transformation et de ligne sont à prendre en compte jusqu'au compteur faisant foi pour la facturation de l'énergie injectée dans le réseau. La consommation d'électricité des appareils auxiliaires des éoliennes est comptabilisée dans les coûts d'exploitation.

Disponibilité des éoliennes

Au résultat de production d'électricité obtenu, on déduira la perte de production correspondant au manque attendu de disponibilité de l'installation.

Disponibilité technique

La disponibilité technique d'une éolienne dépend des périodes d'inactivité dues aux dommages et à la maintenance.

Grâce aux progrès techniques très rapides effectués ces dernières années, il n'est plus permis de nier la très haute disponibilité des éoliennes modernes. Un programme de mesure et d'évaluation réalisé en Allemagne a fourni des données solides concernant les anciennes installations [Hahn, 2003]. Les éoliennes observées dans le cadre de ce programme, accusant une durée d'exploitation de 8 à 13 ans, ont montré une disponibilité de 98 %.

Cela signifie qu'une éolienne est à l'arrêt en moyenne une semaine par année pour cause de maintenance ou de réparation. Les installations d'une puissance supérieure à 1 MW ont subi des

¹⁶ Voir www.windsim.com

¹⁷ Voir aussi <http://www.risoe.dk/vea/projects/nimo/wasp8.htm#parkmodel.htm>

dommages à plus de trois reprises par an durant les premières années, le nombre total de dommages baissant avec les années d'exploitation. Les dommages affectent le plus souvent les installations électriques et électroniques, ce qui implique des arrêts relativement brefs. Sur les sites difficiles d'accès, des dommages légers peuvent occasionner des interruptions d'exploitation plus longues; il faut donc compter avec une disponibilité moindre.

Arrêts dus au givre

En cas de formation de dépôts de glace sur les pales du rotor, un arrêt de l'exploitation s'impose généralement de manière à éviter d'endommager l'installation ou pour prévenir le danger de jets de glace (voir également chap. 5.9).

En Suisse, on n'est pratiquement nulle part à l'abri d'arrêts d'exploitation dus au givre, si l'on ne prend pas de mesures spéciales pour en empêcher la formation (p. ex. le chauffage des pales). Le graphique ci-dessous montre la fréquence des heures pendant lesquelles règnent des conditions favorables au givrage au nord des Alpes [Cattin, 2004].

A partir de 800 m d'altitude, une étude sur le terrain s'impose afin de déterminer plus précisément les risques d'arrêt dû au givre, car ceux-ci dépendent en grande partie de l'exposition du site. Lorsque les pales du rotor sont chauffées, ces données sont employées pour déterminer les pertes ou les coûts induits par le chauffage. Les périodes à risque de givre peuvent être déterminées par une mesure de la température et de l'humidité relative.

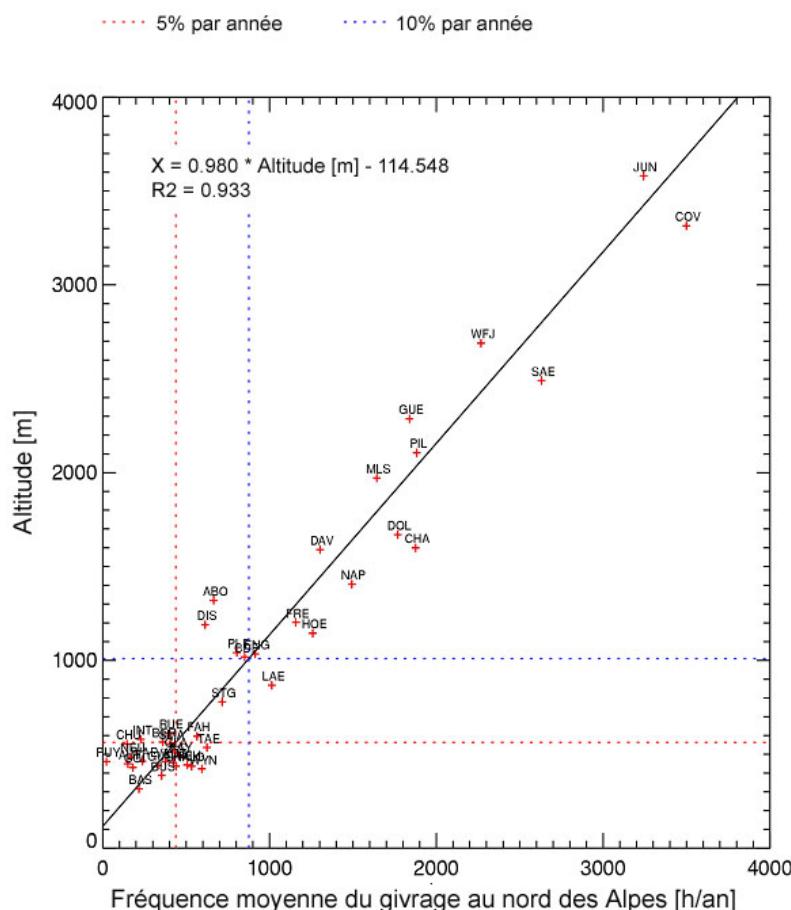


Figure 2 La fréquence moyenne du givrage aux stations de MétéoSuisse au nord des Alpes en fonction de l'altitude, pour les années 1999 à 2003. La ligne rouge indique une fréquence de 5 % par an (438 h/an), la ligne bleue une fréquence de 10 % par an (876 h/an).

6.4.2 Marge d'erreur sur la prévision de production

La recherche de la marge d'erreur des prévisions de production implique l'identification et la quantification de ses différentes composantes. Les principales d'entre elles sont énumérées dans les paragraphes suivants. Pour quantifier la marge d'incertitude de chaque composante, on utilise soit des procédés statistiques, soit des valeurs empiriques tirées d'études.

Les marges d'erreur indiquées ici doivent être considérées comme des écarts par rapport à la norme.

Marge d'erreur des mesures sur le terrain

L'optimisation en tous points des mesures et de la préparation des données permet de limiter l'incertitude des mesures effectuées sur le terrain essentiellement à la marge d'erreur admise lors de l'étalonnage de l'anémomètre, soit en général 1 à 2 % pour ce qui concerne la vitesse du vent.

La marge d'erreur correspondante concernant la production d'énergie peut être déterminée grâce à la courbe de rendement de l'éolienne, en ajoutant dans un premier temps la marge d'erreur à la statistique du vent (best case). Ce résultat est comparé avec le même calcul en soustrayant cette fois la marge d'erreur aux mesures du vent (worst case). La marge d'erreur relative (en pourcent) sur la production d'électricité peut ainsi être recalculée.

Marge d'erreur de la statistique du vent à long terme

Il existe un moyen d'estimer cette marge d'erreur à partir de valeurs empiriques et de résultats d'études, mais cette méthode n'est pas satisfaisante car elle ne tient pas compte des spécificités des mesures utilisées. Il est donc préférable de calculer la marge d'erreur au moyen de procédés statistiques.

On trouvera une possibilité de calculer cette marge d'erreur en annexe A.3.

La marge d'erreur déterminée pour la vitesse du vent doit être intégrée à la marge d'erreur relative à la prévision de la production d'électricité, comme pour la mesure sur le terrain.

Extrapolation/Modélisation

La marge d'erreur d'une extrapolation effectuée au moyen des profils verticaux des vents calculés sur la base de mesures au SODAR ou par approximation à l'aide d'une fonction exponentielle, correspond à la marge d'erreur moyenne des profils, laquelle peut être calculée statistiquement pour chaque profil.

La marge d'erreur d'une modélisation peut se diviser en deux composantes:

- les imprécisions lors de la saisie numérique des données (modèle de terrain, carte des aspérités, obstacles);
- l'imprécision de la méthode de modélisation.

Dans la pratique, il est souvent impossible de séparer ces deux composantes. On ne peut guère les quantifier par une méthode simple car on doit généralement se fier à des données fournies sur papier et tirées d'études de validation.

Dans [Pedersen, 1997], on obtient une marge d'erreur de 5 % pour les deux composantes dans le cadre d'une modélisation basée sur WAsP concernant la production, si l'indice RIX est de 0 %.

Si RIX est supérieur à 0 %, la marge d'erreur de la méthode de modélisation sera plus importante; p. ex., pour un indice RIX de 3 %, on obtient une marge d'erreur de 8 % pour la méthode de modélisation.

Une marge d'erreur de 5 % (sur la prévision de production électrique) paraît également réaliste en règle générale pour les modélisations CFD. Pour les modélisations relatives à des terrains complexes, il est cependant recommandé de vérifier ponctuellement les résultats au moyen de mesures effectuées sur un mât à un autre emplacement de la zone modèle ou au moyen de mesures au SODAR.

Courbe de rendement de l'éolienne

Le procédé généralement reconnu pour calculer la courbe caractéristique de rendement est décrit dans CEI 61400-12. Il subsiste cependant toujours une certaine marge d'erreur due aux conditions réelles sur le terrain et aux tolérances de la fabrication en série, même lorsque la norme est observée. Pour une courbe caractéristique de rendement calculée d'après CEI 61400-12, la marge d'erreur devrait se situer entre 6 et 8 % [Strack, 2002]. La marge d'erreur peut être sensiblement abaissée si l'on s'accorde sur un rendement garanti avec le fabricant (voir chap. 6.4.4).

Marge d'erreur des prévisions de disponibilité de l'éolienne

Si la disponibilité d'une installation est garantie par le fabricant et si des versements compensatoires ou des rabais sont fixés pour les cas d'indisponibilité couverts par la garantie (voir chap. 6.4.4), on peut admettre une marge d'erreur très basse (1 %). On peut également recommander de prendre une assurance pertes d'exploitation (voir chap. 6). Faute de telles mesures, il convient de considérer une marge d'erreur plus importante.

La marge d'erreur des prévisions relatives aux pertes d'exploitation dues au givrage peut être estimée sur la base des statistiques climatiques. Toutefois, on ne peut pas faire de prévisions concernant des phénomènes comme le changement climatique à l'échelle mondiale, qui ne peuvent par conséquent pas être pris en compte.

Marge d'erreur générale sur la prévision de production électrique

Les composantes de la marge d'erreur énumérées plus haut sont indépendantes au stade de la première approximation. La marge d'erreur générale s_{tot} peut être représentée comme la racine de la somme des carrés des différentes marges d'erreur s_i :

$$s_{tot} = \sqrt{\sum s_i^2}$$

Avec des prévisions de haute qualité, on doit viser une marge d'erreur générale d'env. 10 % en rapport avec la vitesse du vent, même dans des conditions topographiques difficiles. La marge d'erreur générale sur la production électrique atteint 20 %, courbe de rendement de l'éolienne incluse. En Allemagne, dans des conditions topographiques favorables, on vise une marge d'erreur générale inférieure à 10 % des recettes.

6.4.3 Gestion des risques

Appréciation des risques

Par approximation, on peut considérer que la probabilité d'atteindre une production énergétique donnée est normalement distribuée. La prévision de production E_{P50} correspond au résultat le plus probable et la marge d'erreur générale s_{tot} à la marge de fluctuation du résultat attendu autour du résultat le plus probable, dans le sens d'un écart type.

La production peut être donnée sous la forme d'une fonction de sa probabilité de demeurer au-dessous des objectifs. Si on tolère p. ex. un risque de 10 % de ne pas atteindre les objectifs de production (autrement dit, on est sûr à 90 % de les atteindre ou de les dépasser), la production E_{P10} peut se calculer comme suit:

$$E_{P10} = E_{P50} - 1.282 \cdot s_{tot}$$

La réduction de la production d'énergie nécessaire pour atteindre le niveau exigé de sécurité de conception peut ainsi être déterminé. La production correspondante est calculée comme suit en fonction d'une tolérance de risque plus ou moins grande:

Risque tolérable	Production
5 %	$E_{P5} = E_{P50} - 1.645 \cdot s_{tot}$
10 %	$E_{P10} = E_{P50} - 1.282 \cdot s_{tot}$
15 %	$E_{P15} = E_{P50} - 1.036 \cdot s_{tot}$
20 %	$E_{P20} = E_{P50} - 0.842 \cdot s_{tot}$
25 %	$E_{P25} = E_{P50} - 0.674 \cdot s_{tot}$
30 %	$E_{P30} = E_{P50} - 0.524 \cdot s_{tot}$

Le procédé peut être représenté graphiquement de la manière suivante:

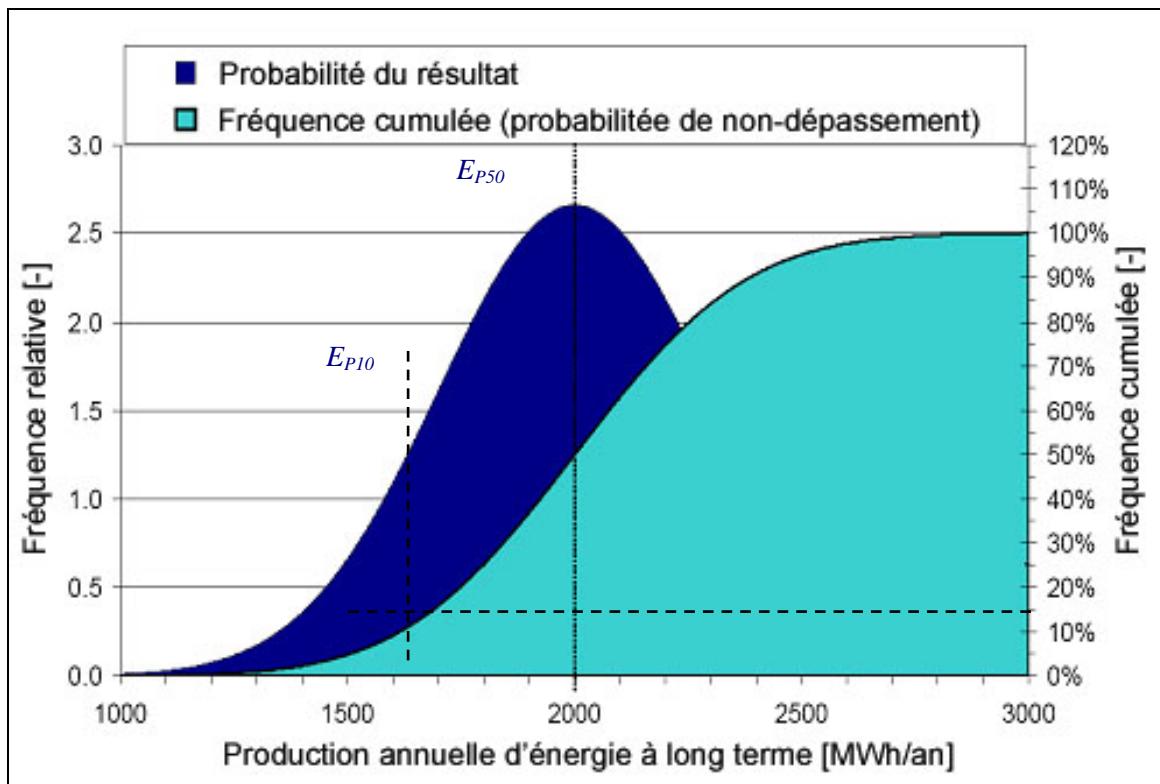


Figure 3 Présentation de la prévision de production en fonction de sa probabilité d'être inférieure aux objectifs fixés (tiré de [Strack, 2002]).

Mesures de réduction des risques

Si les prévisions de production sont telles qu'il s'avère impossible d'harmoniser la production nécessaire et le risque tolérable dans un projet donné, on vérifiera alors dans quelle mesure on peut réduire la marge d'erreur.

On peut notamment procéder des deux manières suivantes:

- prendre des mesures supplémentaires dans le cadre de la prévision de production (p. ex. effectuer des mesures au SODAR afin de déterminer plus précisément la vitesse du vent à la hauteur du moyeu ou réaliser une modélisation exacte du vent pour établir la prévision de production d'un parc éolien);
- convenir d'une garantie de performance avec le fabricant (voir chapitre suivant).

6.4.4 Garantie de performance

En ce qui concerne la performance de l'éolienne (disponibilité et courbe de rendement), la marge d'incertitude peut être sensiblement réduite grâce à une garantie du fabricant. Il importe de s'accorder sur cette garantie déjà au stade de l'établissement du contrat de vente et d'y fixer également l'ensemble des conditions générales. Cela concerne notamment les points suivants:

- Comment décide-t-on si il convient d'effectuer des mesures ultérieures?
- Comment les mesures ultérieures de la courbe de rendement et de la disponibilité sont-elles effectuées?

- Quels délais accorder au fabricant pour améliorer son produit si celui-ci ne respecte pas les objectifs fixés?
- Qui supporte les frais des mesures ultérieures? Quelle institution indépendante reconnue par les deux parties faut-il désigner?
- Comment prendre en considération la marge d'erreur des mesures ultérieures?

La fixation dans le contrat de vente du montant de la compensation accordée si la garantie devait être mise en œuvre doit bien entendu être discuté avec le fabricant. En ce qui concerne la courbe caractéristique de rendement, on peut p. ex. se mettre d'accord sur la distribution probable des vents à la hauteur du moyeu sur plusieurs années. La distribution des vents et la courbe de rendement garantie permettent de déterminer une production annuelle d'énergie A. La distribution des vents et la courbe de rendement mesurée permettent également de déterminer une production annuelle d'énergie B. Si la différence entre A et B est supérieure à $x\%$ (valeur à négocier), le fabricant devra effectuer un versement compensatoire ou réduire le prix de vente. Il convient de déterminer si la tolérance x prend en compte la marge d'erreur des mesures ultérieures de manière qu'on puisse reprendre la courbe caractéristique mesurée sans autre correction pour calculer la production annuelle d'énergie B.

Pour les mesures ultérieures de la courbe de rendement, on utilisera en premier lieu l'anémomètre de la nacelle, pour des raisons de coût. Les mesures de la courbe de rendement d'après CEI 61400-12 au moyen d'un mât de mesure à la hauteur du moyeu ou d'un SODAR coûteront nettement plus cher.

L'anémomètre de la nacelle étant influencé par l'écoulement du vent autour des pales et de la nacelle, sa mesure doit être corrigée. Un institut indépendant peut effectuer cette correction et la transmettre au fabricant en enregistrant simultanément les mesures de l'anémomètre de la nacelle et la vitesse du vent s'écoulant sans perturbation à la hauteur du moyeu au moyen d'un mât de mesure, lors de la mesure de la courbe de rendement de l'éolienne à un autre emplacement. La correction peut ensuite être reportée sur d'autres installations du même type si un certain nombre de conditions sont remplies. On veillera notamment à continuer de saisir la température et la pression de l'air et à recalibrer ultérieurement toute la chaîne de mesures. Ce procédé n'étant fixé par aucune norme (CEI ou AIE), il ne reste qu'à régler tous les détails dans le contrat de vente, le cas échéant, par une mesure ultérieure.

Pour d'autres informations à ce sujet, voir [Klug, 1999].

6.5 Coûts d'investissement

6.5.1 Généralités

Comme dans tous les projets de construction, les coûts d'investissement relatifs aux éoliennes sont grevés d'incertitudes. Cependant, le fait que la majeure partie de l'investissement porte sur les coûts de l'installation, donc sur un seul fournisseur, simplifie considérablement la prise en compte de ces incertitudes.

Afin d'optimiser la sécurité économique d'un projet éolien, on veillera à déterminer les coûts de construction avec une précision suffisante. La manière de procéder ainsi que la précision de la détermination des coûts dans le cadre de l'étude de faisabilité, de l'avant-projet ou du projet défi-

natif doivent être convenus avec le maître d'œuvre¹⁸. Avant de décider de la réalisation de l'installation, on visera en général une marge d'erreur de $\pm 10\%$.

6.5.2 Eolienne

Comme il a déjà été mentionné plus haut, l'éolienne elle-même (tour, nacelle, pales, commande, etc.) représente une grande partie de l'investissement total (60 à 80 % en général). Aux emplacements bien exposés bénéficiant de conditions simples, cette part est plus proche de la limite supérieure. En revanche, elle peut descendre en dessous de 60 % à un emplacement d'accès peu aisé et soumis à des conditions difficiles.

Il convient par conséquent d'accorder une attention particulière aux coûts d'installation, en demandant déjà très tôt une ou plusieurs offres de référence. On prendra garde à spécifier suffisamment les demandes de prix: quelle classe d'éolienne est-elle requise à l'emplacement prévu? Les coûts de transport et de montage doivent-ils être inclus? Le fabricant doit-il garantir la courbe de rendement et/ou la disponibilité? Quelles sont les exigences spéciales (p. ex. le chauffage des pales)?

6.5.3 Fondations

Les fondations représentent en général environ 5 % des coûts globaux [DEWI, 2002]. Cependant, le coût réel dépend en grande partie des caractéristiques du sous-sol. Un sondage géologique doit permettre de déterminer, dans le cadre d'une étude du sol, si les fondations peuvent être posées en surface (radier), ancrées directement dans la roche ou si des pieux sont nécessaires. On s'accordera avec le fabricant pour choisir le type et la structure définitifs des fondations. Sur les sites difficiles d'accès, il convient de ne pas négliger les frais de transport dans l'estimation du coût des fondations.

6.5.4 Accès

Les coûts pour l'accès peuvent varier considérablement et peuvent même compromettre la construction d'une installation sur un site qui paraîtrait sinon adéquat. L'accès est donc un critère cardinal pour le choix du site. Il n'existe pas de valeurs indicatives générales pour les coûts pour l'accès. On peut toutefois mentionner le fait que, selon les analyses systématiques des coûts de projets européens, la part moyenne des coûts pour les accès se monte à 5 % au maximum [DEWI, 2002; EWEA, 2003].

Même sur les sites bien équipés, il faut encore généralement adapter provisoirement ou définitivement les voies d'accès au transport des éléments de l'éolienne, voire les construire (surtout les derniers mètres). Le transport des éléments de l'éolienne ainsi que les travaux pour les accès doivent être examinés avec précision lors de l'étude de faisabilité (voir chap. 5.5).

¹⁸ A ce sujet, voir la norme SIA 108 "Prestations"

6.5.5 Raccordement au réseau

Les coûts de raccordement comprennent le raccordement de l'éolienne au réseau électrique (gén. à moyenne tension) et, si nécessaire, le renforcement de celui-ci.

Les mêmes règles que pour les accès s'appliquent ici. Là aussi, les coûts peuvent varier considérablement d'un site à l'autre, de sorte qu'il n'existe pas non plus de valeurs indicatives générales. Selon les analyses systématiques de projets européens, la part moyenne des coûts de connexion se monte à environ 10 % du total [DEWI, 2002; EWEA, 2003] mais elle peut atteindre 20 % lorsque les conditions de raccordement sont difficiles.

Le renforcement du réseau à moyenne tension existant coûte relativement cher car les éoliennes se situent généralement à l'extrémité de ses ramifications, où les capacités de transport sont faibles. Dans tous les cas, le raccordement requiert l'autorisation du propriétaire du réseau électrique concerné. Les frais découlent essentiellement des prescriptions du distributeur d'électricité concernant le point de raccordement ainsi que les conditions et les coûts de raccordement. Il est par conséquent indispensable de prendre contact assez tôt avec le distributeur concerné, si possible dès l'étude de faisabilité.

6.5.6 Planification

Dans les projets européens, les coûts de planification se montent en moyenne à 3 % du total [DEWI, 2002; EWEA, 2003].

Il convient par ailleurs de tenir compte du fait que ces coûts dépendent largement du site. Sur un terrain complexe, il faut s'attendre à ce que les études relatives à la qualité des vents génèrent des frais importants (p. ex. pour des mesures au SODAR). Les questions liées aux ombres mouvantes, aux émissions sonores et à la protection de la nature et du paysage dépendent également de l'emplacement. Afin de pouvoir estimer les coûts de conception avec la plus grande précision possible, il convient de déterminer rapidement l'ampleur des études à mener avec les autorités. En Suisse, les démarches à entreprendre pour obtenir un permis de construire engendrent des frais nettement plus importants que dans les pays voisins.

6.5.7 Autres frais

Sous cette rubrique figurent les coûts des mesures générales de compensation, les panneaux d'information, les installations de commande de l'exploitation, les installations nécessaires au chantier, les frais annexes de construction et les imprévus, pour autant que ces coûts ne soient pas imputés à l'une des rubriques susmentionnées.

6.6 Durée d'utilisation / Durée d'amortissement

Les frais annuels relatifs au paiement des intérêts et à l'amortissement dépendent non seulement du montant de l'investissement mais aussi de la durée d'amortissement.

En règle générale, l'investissement est amorti pendant la durée d'utilisation de l'installation. Autrement dit, la durée de l'amortissement coïncide avec la durée d'utilisation. Dans le cas d'une éolienne, cette dernière est en principe limitée par la durée de vie de l'installation. D'après la norme CEI 61400-1, les éoliennes des classes I à III ont une durée de vie d'au moins 20 ans. Celles de la classe S, qui sont notamment implantées sur des sites complexes, peuvent avoir une durée de vie plus courte, mais aussi plus longue. On tiendra compte en outre du fait qu'il est diffi-

cile d'estimer les coûts de la maintenance, de l'entretien et, surtout, des pièces de rechange vers la fin de la durée de vie, faute d'expérience en la matière. Même si, au chap. **Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.**, on table sur des dépenses plus importantes pour les pièces de rechange après la 10^e année d'exploitation, le remplacement ou le démontage d'une installation peut s'avérer judicieux avant le terme de la durée de vie. Il est par conséquent recommandé, faute d'informations plus précises pour une installation donnée, de fixer la durée d'amortissement à 15 ans.

6.7 Produit de la vente d'électricité

6.7.1 Généralités

Le produit de la vente d'électricité dépend de la quantité produite et du montant de la rémunération (tarif de rachat). La rétribution règle à la fois la vente de l'électricité physiquement produite et la plus-value écologique par rapport à une production d'électricité conventionnelle.

La vente de l'électricité (qualité écologique) et de l'électricité physique dépend essentiellement de la législation et des structures du marché. Au vu des tendances qui se dessinent dans les deux domaines (ouverture du marché), l'évolution du débat actuellement en cours sur le projet de loi sur le marché de l'électricité jouera un rôle clé.

Les considérations qui suivent reflètent l'état actuel des choses et se limitent essentiellement aux évolutions visibles ou prévisibles.

6.7.2 Rétribution de la livraison d'électricité

Selon l'article 7 de la loi sur l'énergie, les entreprises chargées de l'approvisionnement énergétique de la collectivité sont tenues de reprendre les surplus d'énergie produits à partir d'énergies renouvelables par des producteurs indépendants.

La rétribution doit être réglée entre les parties mais le prix d'achat moyen doit être d'au moins 15 ct./kWh. A l'avenir, la situation pourrait évoluer de la manière suivante:

- La rétribution de 15 ct./kWh est en vigueur jusqu'au 30 juin 2008. Par la suite, ce prix pourra être modifié. Une baisse du tarif minimum est donc en principe possible à partir de la mi-2008. Une telle évolution est cependant peu probable étant donné que "les tarifs de reprise se fondent sur les prix applicables à l'énergie équivalente fournie par les nouvelles installations de production sises en Suisse".
- Le débat actuel sur le projet de loi sur le marché de l'électricité porte notamment sur une rétribution en fonction des coûts. Une telle solution augmenterait sensiblement le taux de rétribution pour les nouvelles éoliennes, d'où une amélioration fondamentale des conditions économiques. Mais il est encore trop tôt pour dire si cette possibilité se concrétisera.

Les distributeurs d'électricité doivent ainsi supporter des surcoûts dus à la différence entre le prix d'achat garanti de 15 ct./kWh et les prix du marché. La révision de l'ordonnance sur l'énergie, décidée le 10 décembre 2004 par le Conseil fédéral, a créé un nouveau mécanisme de financement de ces surcoûts. Aujourd'hui déjà, le consommateur final contribue au paiement de ces surcoûts dans un ordre de grandeur de 0,05 ct./kWh en moyenne. Jusqu'alors, les distributeurs et les consommateurs finaux devaient payer des prix disproportionnés aux producteurs indépendants dans les régions où les tarifs sont plus élevés que la moyenne. Le nouveau mécanisme de financement a introduit une solidarité vis-à-vis des surcoûts en les répartissant équita-

blement entre tous les consommateurs finaux. Ainsi, les producteurs devraient aussi être assurés de toucher effectivement le tarif de rachat garanti de 15 ct./kWh, lequel a parfois été contesté par le passé.

Grâce au tarif de rachat, et même si celui-ci est relevé à 15 ct./kWh par la loi sur l'énergie, les producteurs indépendants sont assurés ne pas être discriminés sur un marché encore soumis au monopole. La plus-value écologique, comme celle qu'offrent les éoliennes par rapport à la production d'électricité conventionnelle, peut ainsi être traitée à part.

6.7.3 Rétribution de la plus-value écologique

La plus-value écologique peut être vendue aussi bien par l'entreprise qui l'achète physiquement que par un autre distributeur d'électricité ou un autre fournisseur de courant vert. Ceux-ci commercialisent généralement cette plus-value auprès de leurs clients sous la forme de produits écologiques.

La plus-value écologique est souvent vendue en même temps que l'électricité physique au distributeur régional. On fixe ensuite généralement un tarif de réinjection qui prend en compte les deux composantes.

Si le marché s'ouvre, l'électricité physique et la plus-value écologique peuvent être livrées ensemble à n'importe quel distributeur. A noter que, dans ce cas, il faut acquitter du timbre du transport. Il est donc peu probable que l'ouverture du marché améliore considérablement les conditions économiques pour les énergies renouvelables.

6.7.4 Contrats de livraison

La rétribution de l'électricité injectée et de la plus-value écologique est réglée par contrat. Si l'électricité et la plus-value écologique sont livrées à des entreprises différentes, il faut établir deux contrats.

Le contenu du contrat de livraison peut avoir une influence décisive sur la sécurité économique d'un projet éolien. Les points suivants sont d'une importance capitale:

- les prix, y c. le régime des adaptations ultérieures;
- la durée du contrat;
- la garantie d'achat;
- la résiliation et les motifs de celle-ci.

6.8 Coûts d'exploitation

6.8.1 Généralités

Les coûts d'exploitation comportent en général les rubriques suivantes: maintenance et entretien, bien-fonds (loyer le cas échéant), assurances, gestion, achats d'électricité, divers. Les coûts d'exploitation sont généralement exprimés en pourcentage de l'investissement.

Le graphique ci-dessous illustre les résultats d'une enquête réalisée auprès des exploitants d'éoliennes allemands [DEWI, 2002]. Il reflète, sur un laps de temps de six ans, l'état actuel des connaissances en matière de grandes installations.

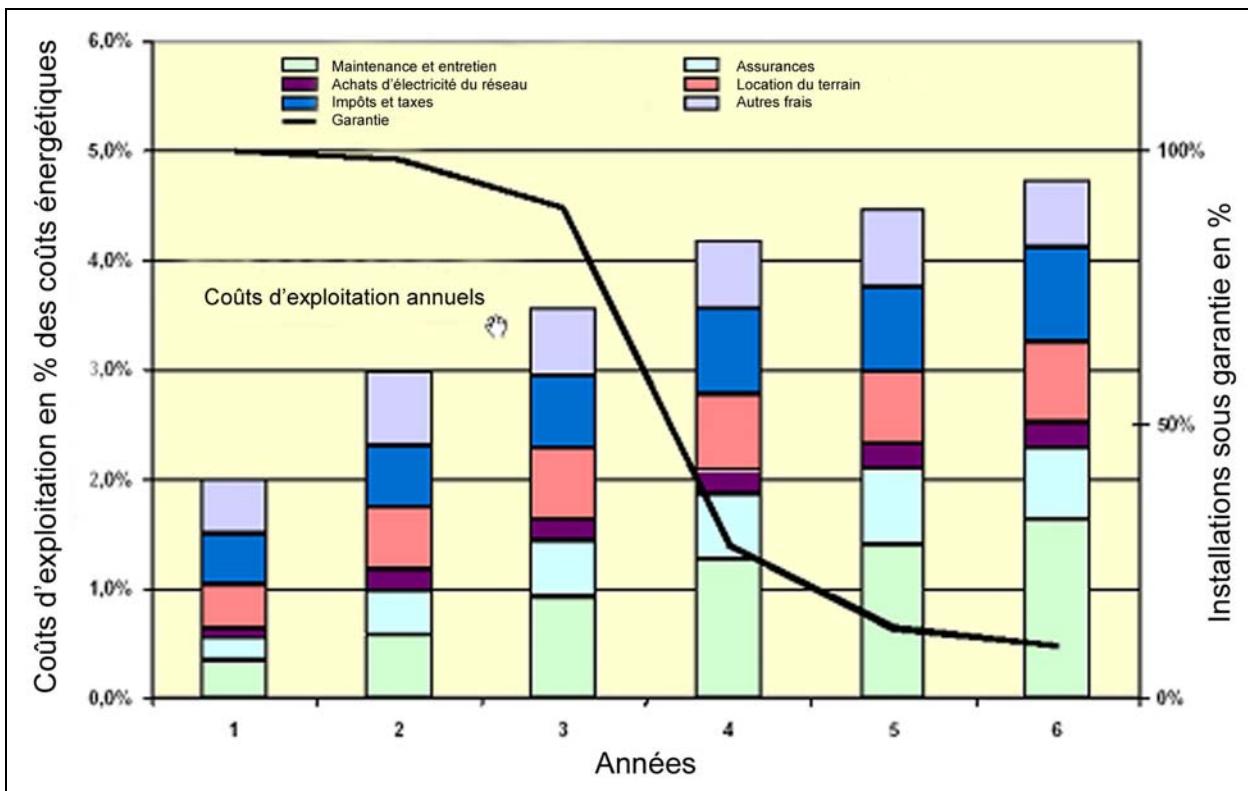


Figure 4 Les coûts d'exploitation annuels des éoliennes de 1997 à 2001, répartis par année d'exploitation. On notera que les coûts de maintenance et d'entretien sont influencés dès la deuxième année d'exploitation par l'échéance des garanties [DEWI 2002].

Selon diverses études allemandes, les coûts d'exploitation sont souvent sous-estimés [BWE, 2002; Landwirtschaftskammer Schleswig-Holstein, 2004], notamment les coûts de maintenance et d'entretien dans la seconde moitié de la durée de vie attendue.

La maintenance et l'entretien, la gestion et le loyer représentent les deux tiers des coûts d'exploitation [DEWI, 2002]. Il faut donc considérer ces points de plus près pour pouvoir chiffrer ces coûts avec une précision suffisante (voir les paragraphes suivants).

Sur la base d'une étude des coûts actuels de l'énergie éolienne en Allemagne [DEWI, 2002], on évalue la part des coûts d'exploitation à 4,8 % en moyenne des coûts globaux d'une éolienne pendant les dix premières années et à 6,6 % pendant les dix suivantes. Durant la seconde moitié de la durée de vie attendue (20 ans), il faut en effet compter avec des réparations plus importantes et avec le remplacement de certains composants.

6.8.2 Maintenance et entretien

Les coûts de maintenance et d'entretien peuvent être fixés, durant la première moitié de la durée de vie d'une éolienne, grâce à un contrat de maintenance totale, proposé par la majorité des fabricants. Pour évaluer une offre, on examinera les aspects suivants:

- L'exhaustivité

Le contrat de maintenance totale doit être le plus complet possible et comprendre également

les frais de matériel, l'évaluation des données, les assurances supplémentaires nécessaires, etc. Il faut également se couvrir contre le risque d'insolvabilité du fabricant.

- La durée

L'utilité d'un contrat de maintenance totale dépend principalement de sa durée. Les premières années, les dommages éventuels tombent sous la garantie du fabricant. Les dommages importants et le remplacement de certains composants ne devraient pas survenir pendant les dix premières années d'exploitation. Les contrats de maintenance totale sont donc d'autant plus judicieux, pour l'exploitant, que leur durée est longue. Toutefois, les fabricants ne proposent généralement pas de contrats de plus de douze ans.

- Contrôle général avant l'expiration du contrat

Un contrôle général de l'installation par un spécialiste indépendant devrait être prévu quelques mois avant l'expiration du contrat. Si c'est l'exploitant qui est responsable de l'entretien, les défauts éventuels devraient être corrigés avant la date butoir, afin que l'état général de l'installation corresponde à son âge.

Il est particulièrement difficile de chiffrer les coûts de la maintenance et de l'entretien, y compris les pièces de rechange, à partir de la 10^e année d'exploitation, faute d'expérience en la matière. Une chose est certaine: de plus en plus de composants importants devront vraisemblablement être remplacés ou révisés complètement pendant la seconde partie d'une durée de vie estimée à 20 ans.

Le graphique ci-après illustre les résultats d'une enquête réalisée dans le cadre d'une étude sur les coûts actuels de l'énergie éolienne en Allemagne [DEWI, 2002]:

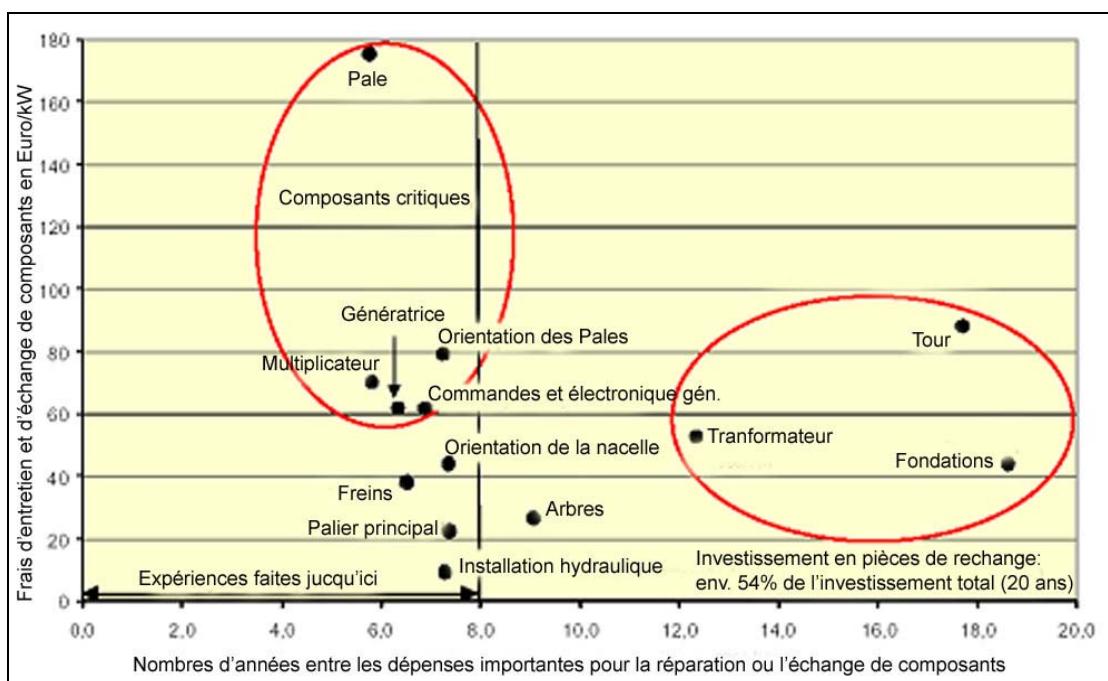


Figure 5 Estimation de la durée de vie des installations et du coût des pièces de rechange [DEWI, 2002]

A partir des chiffres ci-dessus, on obtient les taux suivants pour les pièces de rechange:

- de la 1^{ère} à la 10^e année d'exploitation: 1,8 % des coûts annuels
- de la 11^e à la 20^e année d'exploitation: 3,6 % des coûts annuels

Ces valeurs peuvent être employées comme indice pour estimer les coûts d'exploitation à long terme. Il faut donc considérer que, dans la seconde moitié de la durée de vie, les coûts d'exploitation seront de 1,8 % supérieurs à ceux de la première moitié.

6.8.3 Loyer et frais de gestion

Le loyer et les frais de gestion sont en principe réglés par contrat. Leur montant dépend des réalités locales et, le cas échéant, de l'engagement privé de l'exploitant. Concernant les baux et les contrats de servitude, voir également [Meteotest, 1999].

En Allemagne, le loyer et les frais de gestion représentent chacun, en moyenne, env. 20 % du total des coûts d'exploitation [DEWI, 2002].

6.8.4 Autres frais

Il convient également de tenir compte des frais suivants: assurances, électricité, constitution de réserves pour le démantèlement de l'installation, mesures de compensation éventuelles et frais divers.

7. Sécurité de planification

La construction d'une éolienne sur un site donné est déterminée par les conditions techniques et météorologiques, mais aussi par l'acceptation de la population. Il va de soi qu'il n'y a pas de sécurité de planification sans une étude de faisabilité exhaustive¹⁹. La procédure d'étude de faisabilité technique est décrite en détail dans le manuel "Planification d'installations éoliennes" [Meteotest, 1999]; nous ne l'abordons pas ici. Les paragraphes suivants sont consacrés exclusivement à la question de l'acceptation d'un projet.

7.1 Conditions générales de la planification

De par leur production d'énergie propre, sans émissions de CO₂ ni de déchets et à l'opposé, leur impact visuel et sonore ainsi que les ombres mouvantes qu'elles induisent, les éoliennes ont incontestablement une influence sur l'environnement. Cette influence peut être jugée de manière très différente. L'expérience montre que les éoliennes et parcs éoliens suisses sont considérés très positivement par la population. En général, leur construction n'est pas prévue par les plans d'aménagement cantonaux et communaux. Il existe donc de nombreuses voies de recours permettant de faire traîner, voire capoter un projet.

Dans le cadre de la procédure d'autorisation de construire, la LAT²⁰ ne prévoit ni autorisation exceptionnelle au sens de l'art. 24, ni modification du plan d'affectation au sens de l'art. 22. Le critère décisif pour obtenir une autorisation exceptionnelle ou une modification du plan d'affectation est qu'aucun intérêt prépondérant ne s'oppose au projet et que la pesée des intérêts en présence soit favorable à celui-ci. Les intérêts en question sont avant tout ceux de la protection des paysages, du patrimoine, de la nature et de l'environnement.

Il convient de tenir compte de ces aspects dans la conception de l'installation afin d'assurer une sécurité optimale au projet et d'obtenir un permis de construire. Il s'agit également de corriger le plus vite possible un projet ayant de faibles chances de se réaliser ou d'y renoncer avant qu'il engendre des frais inutiles.

7.2 Marche à suivre

La marche à suivre pour donner à un projet le maximum de chances de voir le jour dépend d'un grand nombre de facteurs liés au site. Il y a là des aspects objectifs, comme la visibilité, mais aussi subjectifs, comme l'impact visuel de l'éolienne sur le paysage. Il n'est pas possible de faire des recommandations applicables à n'importe quel projet. Les points suivants doivent être considérés davantage comme des suggestions concernant la meilleure manière de mener à bien un projet d'éolienne.

¹⁹ Cela concerne en particulier les documents de planification destinés à l'Inspection fédérale des installations à courant fort (voir aussi www.esti.ch).

²⁰ Loi sur l'aménagement du territoire

7.2.1 Prise de contact préalable et dialogue

En engageant assez tôt le dialogue avec les représentants des intérêts locaux (autorités, protection de la nature, tourisme, etc.), on peut identifier rapidement les obstacles potentiels. Des études détaillées peuvent s'avérer indispensables pour régler certaines questions, comme celle des oiseaux migrateurs par exemple. Suivant les cas, il peut être utile d'organiser une rencontre entre l'entreprise ou l'institution mandatée et les opposants potentiels afin de discuter de l'ampleur des travaux.

Les questions de procédure doivent également être préalablement réglées avec les autorités locales et cantonales.

7.2.2 Permis de construire pour les mâts de mesure

En Suisse, les inévitables mesures du vent absorbent une partie non négligeable des coûts de planification. Même la pose du mât nécessaire aux mesures fait l'objet d'un permis de construire, ce qui prend en général six mois à un an. Il est par conséquent recommandé de mener la discussion publique avant ou pendant la procédure de permis de construire du mât.

Lors d'une procédure d'autorisation de construire au sens de l'art. 24 de la loi sur l'aménagement du territoire (réservée aux constructions isolées), la commune, le canton et la population peuvent être informés parallèlement au dépôt de la demande de permis pour l'installation d'un mât de mesure. Si une opposition se manifeste déjà à ce stade, cela permet d'ouvrir la discussion.

Si le site est régi par un plan d'affectation (art. 22 LAT), il est indiqué de mener conjointement les procédures d'autorisation pour l'installation du mât de mesure et de participation.

Si des résistances apparaissent au cours de ces procédures, le projet peut être modifié à temps.

A ce sujet, voir également [Metron, 2001].

7.2.3 Communication active

De nombreuses personnes et institutions sont concernées, directement ou indirectement, par la construction d'une éolienne: le concepteur, les investisseurs, le propriétaire du terrain, la population locale et ses autorités, le canton, la Confédération, les distributeurs d'électricité ainsi que les représentants des intérêts économiques locaux, de la branche touristique, de la protection de la nature et des paysages et des consommateurs d'énergie.

Il est donc nécessaire de tenir les principaux documents à disposition des milieux intéressés à tous les niveaux du projet et d'informer activement sur le projet et ses retombées. Une stratégie de communication active et sincère peut contribuer dans une large mesure à désamorcer les éventuelles craintes, voire à les prévenir.

7.3 Aspects particuliers

Lors de la conception d'une éolienne, de nombreux aspects peuvent se révéler importants pour un site donné. Ils sont traités dans le guide "Planification d'installations éoliennes" [Meteotest, 1999], dont les paragraphes suivants sont un simple complément.

7.3.1 Impact sur le paysage

L'impact des éoliennes sur le paysage est sans doute l'un des effets les plus contestés de l'utilisation du vent comme source d'énergie. Les réactions suscitées par les éoliennes vont de l'enthousiasme au rejet, mais une nette majorité des personnes interrogées a une appréciation positive, selon un sondage réalisé pour le compte de l'Office fédéral de l'énergie [OFEN, 2003]. Il convient de relever que le taux d'acceptation est particulièrement élevé à proximité immédiate des éoliennes existantes. En revanche, les projets suscitent bien souvent des craintes quant à leurs effets sur le paysage.

Dans ce contexte, il est important d'ouvrir un débat le plus objectif possible sur la question de l'impact sur le paysage. On pourra notamment recourir aux moyens suivants:

- Photomontages

Le débat public sur les sites prévus peut être influencé, aussi bien négativement que positivement, par des photomontages. Des images manipulées dans un but précis peuvent fortement souligner l'impact visuel d'une installation éolienne. Il convient donc, dans l'intérêt des projets, de réaliser le plus vite possible des photomontages réalistes. Pour ce faire, la taille de l'éolienne, la représentation du paysage (lieu de la prise de vue, point de vue du photographe, météo, etc.) et le site doivent être choisis judicieusement. Le mouvement des pales devrait être représenté (p. ex. par un cercle) car il renforce l'impact visuel de l'éolienne.

- Visite d'installations

La visite d'une installation existante est sans doute le meilleur moyen de se faire une idée réaliste de l'impact visuel (et év. acoustique) d'une éolienne. Pour des raisons de temps, ces visites s'adressent en premier lieu aux représentants des autorités et des organisations.

- Analyse de la visibilité

Il peut être utile de savoir de quels points spécifiques (village, etc.) un parc éolien peut être visible. En particulier pour des projets dans un terrain complexe, une analyse de la visibilité peut être effectuée à l'aide d'un modèle numérique de terrain qui montre d'où les éoliennes peuvent être vues et d'où elles se trouvent masquées. Un zonage peut servir à l'analyse de l'impact esthétique, qui s'atténue à mesure que l'on s'éloigne de l'installation.

7.3.2 Ombres mouvantes

Les éoliennes peuvent occasionner une perturbation visuelle de l'environnement, en raison de la réflexion de la lumière par les pales du rotor en mouvement (ombres mouvantes).

Grâce à leurs propriétés réflexives, les pales des éoliennes modernes occasionnent nettement moins de perturbations dues à la réflexion de la lumière.

Les ombres mouvantes apparaissent lorsque le soleil brille suffisamment derrière l'éolienne pour projeter son ombre, comme pour n'importe quelle construction, mais à condition que les pales soient en mouvement. Plusieurs jugements prononcés par des tribunaux allemands confirment que les ombres mouvantes peuvent avoir un caractère de nuisance [Landesumweltamt Nordrhein-Westfalen, 2002]. En Suisse, il n'existe pas à ce jour de jurisprudence. Par précaution, on peut se fonder sur la jurisprudence allemande lors de la conception d'une installation, quand bien même les jugements prononcés sont bien sûr sans effet dans notre pays. On peut résumer cette jurisprudence comme suit [voir également Landesumweltamt Nordrhein-Westfalen, 2002]:

Les nuisances causées par les ombres mouvantes dépendent surtout de sa durée sur les différents lieux d'immission. Cet effet doit donc être limité efficacement sur les lieux d'habitation et de

travail qui doivent être protégés. En Allemagne, on recommande de limiter les ombres mouvantes à 30 heures par année et 30 minutes par jour. Pour déterminer la durée maximale, on admet que le soleil brille tous les jours de l'année (ciel constamment bleu) et que l'éolienne est en exploitation continue, donc que la surface balayée par les pales se trouve en permanence à la verticale du rayonnement direct du soleil. Dans la réalité, ces conditions ne sont réunies que durant env. 25 % de la journée. Par conséquent, une durée maximale de 30 heures par an correspond à une durée réelle d'environ 8 heures par an.

Afin de respecter les valeurs indiquées, il faut ou bien choisir le site de l'éolienne en fonction de ces données, ou bien la munir d'un dispositif de déclenchement automatique qui l'arrête lorsque les conditions critiques (ensoleillement, vent) sont réunies.

La durée des ombres mouvantes diminue sensiblement à mesure que l'on s'éloigne de l'installation, mais si on le considère d'un point de vue purement géométrique, il porte presque à l'infini au lever et au coucher du soleil. A ce sujet, il faut tenir compte du fait qu'en cas de très faible ensoleillement, le rapport entre l'intensité du rayonnement direct et celle du rayonnement diffus ne suffit pas à produire une ombre distincte en raison de la diffusion atmosphérique. En outre, plus on s'éloigne et plus la surface couverte par le passage des pales est petite [DEWI, 1998].

7.4 Concept d'énergie éolienne pour la Suisse

A la demande des organisations de protection du paysage, les offices fédéraux de l'environnement, des forêts et du paysage (OFEFP), du développement territorial (ARE) et de l'énergie (OFEN) ont esquissé les grandes lignes du développement de l'énergie éolienne en Suisse dans un document intitulé "Concept d'énergie éolienne pour la Suisse".

Ce document énumère les conditions générales de la conception et de la construction de parcs éoliens en appliquant le principe de la concentration des installations sur des sites adéquats. Les critères présidant au choix de ces derniers sont notamment les conditions du vent, la densité de l'habitat et l'impact sur la nature et le paysage (pas d'éoliennes dans les forêts ou les zones protégées). Les cantons et les communes peuvent utiliser ce document comme base de planification.

Le "concept" établit une liste de sites prioritaires (accueillant de 3 à 13 éoliennes au maximum) ainsi que des critères pour leur choix. Ces critères peuvent s'appliquer à la recherche d'autres sites (y c. pour une seule éolienne).

Le Concept d'énergie éolienne pour la Suisse n'est pas une "conception" au sens de l'art. 13 de la loi fédérale sur l'aménagement du territoire. Les sites adéquats doivent donc également être examinés à l'échelon cantonal et communal. Il est par ailleurs indispensable de se rendre sur place pour évaluer l'impact du projet sur le paysage.

8. Assurance des éoliennes

8.1 Généralités

On peut s'assurer contre de nombreux risques, en particulier lorsque la sécurité des personnes, de l'environnement et de l'installation est en jeu. De cette manière, les parties en présence, notamment le fabricant et l'exploitant, peuvent se prémunir contre les dommages financiers découlant des risques inhérents à l'installation.

Les conditions et les primes d'assurances dépendent de la gestion des risques assurée en amont par le fabricant et l'exploitant. Plus cette gestion réduit les risques, plus la couverture d'assurance sera complète et avantageuse. Cette tendance ne va guère changer ces prochaines années.

Les assurances pour les éoliennes sont prises par les fabricants ou par les exploitants. Les fabricants assurent généralement le produit (responsabilité du fait du produit) ainsi que le transport, le montage et les essais de fonctionnement jusqu'à la réception de l'installation, opérations dont ils sont en principe responsables. La responsabilité passe ensuite à l'exploitant ou à la société d'exploitation, qui doit alors contracter les assurances nécessaires.

Il existe un grand nombre d'assurances, qui sont détaillées dans les paragraphes suivants. Elles peuvent être réunies dans des contrats types, ce qui permet d'éviter des doublons. Les combinaisons possibles sont multiples.

La couverture d'assurance dépend des particularités nationales. Les indications ci-après se réfèrent aux pratiques ayant cours en Suisse.

8.2 Assurances contractées par le fabricant

Le fabricant développe, produit, livre, monte et entretient l'éolienne. En général, certains composants, comme le rotor, proviennent d'un autre fournisseur. La plupart des composants sont livrés directement sur le lieu du montage et sont assemblés sur place.

8.2.1 Assurance transport

Les dispositions légales déterminent quelle partie doit supporter les risques et, le cas échéant, prendre une assurance transport. Ce n'est en général que lors de la réception de l'ensemble de l'installation que l'exploitant devient le dépositaire des risques et des profits. Des dérogations fixées par contrat sont toujours possibles.

En principe, le fabricant de l'éolienne ou le fournisseur des principaux composants confie le transport et le montage à une entreprise spécialisée disposant de l'équipement et de l'expérience nécessaires. C'est souvent le fabricant ou le fournisseur qui prend l'assurance transport. Les rapports avec l'entreprise de transport découlent du contrat de livraison passé entre les parties, usuellement l'acheteur et le vendeur. Les transporteurs ont fréquemment une assurance responsabilité civile spécifique. Cependant, la partie qui doit supporter le risque ne devrait pas se reposer uniquement sur cette assurance mais prendre elle-même une assurance transport couvrant les marchandises concernées.

Une assurance transport commence en général au moment du chargement de la marchandise et prend fin au déchargement. Elle couvre également l'éventuel entreposage de la marchandise en cours de route. S'il y a une assurance montage, c'est en principe celle-ci qui prend en charge le

risque de perte ou de dommages sur le lieu du montage. Lors de la conclusion de telles assurances, il est recommandé de consulter un spécialiste, notamment pour coordonner l'assurance transport et l'assurance montage.

La plupart des assurances transport couvrent tous les risques, soit la perte et les dommages aux biens assurés. Mais même une assurance tous risques n'offre pas une protection absolue contre la totalité des dommages. Ainsi, en sont exclus ceux qui sont dus à l'humidité et à la température, à un état inapproprié au transport, à un emballage inadéquat ou insuffisant ainsi qu'à certains problèmes politiques ou sociaux. Bien entendu, les moyens de transport doivent être munis des autorisations légales, notamment en ce qui concerne les itinéraires spéciaux.

8.2.2 Assurance des travaux en cours / assurance montage

Les éoliennes sont fixées et montées sur des fondations. Une fois que celles-ci sont terminées, le montage peut commencer. Cette partie des travaux incombe en général au fabricant des principaux composants (tour, nacelle, générateur) qui joue le rôle d'entreprise générale et confie ensuite des mandats précis à des firmes spécialisées.

Il est recommandé de prendre une assurance montage pour couvrir l'aménagement des fondations ainsi que le montage de l'éolienne. Cette assurance commence et se termine aux dates convenues sur la police ou, au plus tard, au moment de la remise du chantier au maître de l'ouvrage. Ce dernier peut être le fabricant, le concepteur ou le futur exploitant.

L'assurance montage couvre les dommages, destructions ou pertes subits et imprévus survenus pendant le montage et la mise en service et affectant les objets assurés. Ne sont pas couverts les dommages découlant d'influences prévisibles, l'usure ainsi que les dépenses engagées pour corriger des défauts, les modifications et les améliorations ainsi que les dommages purement pécuniaires comme les manquements dans les prestations, les pénalités contractuelles, etc.

Il convient de vérifier de cas en cas si l'assurance montage inclut les dommages dus au feu et aux éléments naturels (inondations, glissements de terrain, etc.). Il est de toute façon recommandé de disposer d'une telle protection déjà pendant la construction des fondations et le montage (que ce soit dans le cadre de l'assurance montage ou de l'assurance immobilière).

Il n'est pas nécessaire de prendre une assurance séparée pour les travaux en cours car les risques liés à ceux-ci sont inclus dans l'assurance montage.

8.2.3 Assurance responsabilité civile du maître de l'ouvrage

Cette assurance ne doit être conclue que si des ouvrages *tiers* se trouvant sur des *parcelles tierces* sont menacés par la construction de l'éolienne, par exemple en cas de chute de celle-ci sur une route, sur une voie ferrée ou même sur un bâtiment. L'assurance responsabilité civile du maître de l'ouvrage ne court que pendant la durée de la construction et du montage. Elle expire au moment de la reprise de l'installation par l'assurance responsabilité civile de l'exploitant.

8.2.4 Responsabilité civile du fabricant en cas de défaillance du produit

Pendant son fonctionnement, une éolienne peut occasionner des dommages aux personnes, aux choses et aux animaux, par exemple en cas de jets de glace ou de chute d'une pale, etc. Si cela se produit, il convient de déterminer si ce dommage a été causé par l'exploitation de l'éolienne (v. chiffre 545) ou, le cas échéant, par la faute du fabricant. Dans ce dernier cas, il peut y avoir une responsabilité civile prévue par la loi. Le fabricant de l'éolienne doit satisfaire aux exigences léga-

les, faute de quoi il devra répondre des dommages causés. Il peut s'assurer contre de telles exigences en prenant une assurance responsabilité du fait du produit. Celle-ci ne doit pas être confondue avec l'assurance responsabilité civile de l'exploitant (v. chiffre 8.4.5).

Le tableau ci-dessous montre les domaines couverts et les domaines exclus par l'assurance responsabilité du fait du produit:

Couvert	Exclu
Responsabilité civile en cas de dommages aux personnes et aux choses ainsi que pour leurs conséquences (dommages pécuniaires, p. ex. perte de gains d'une personne blessée)	Dommages purement pécuniaires ne découlant pas de dommages aux personnes ou aux choses (p. ex. diminution du rendement de la parcelle dû à la surface prise par les mâts et les chemins)
Responsabilité civile inscrite dans la loi et/ou dans la jurisprudence (p. ex. selon la loi sur la responsabilité du fait des produits ou le code des obligations)	Responsabilité civile, lorsque celle-ci, selon un contrat conclu entre les parties, va au-delà des dispositions légales (p. ex. obligation de remplacement en cas de rendement insuffisant, pénalités conventionnelles, etc.)
Protection contre des prétentions infondées, p. ex. lorsque le dommage est couvert mais que les dommages intérêts réclamés sont exagérés	Protection contre des prétentions infondées lorsque les dommages n'est pas couvert (p. ex. les risques impossibles à assurer)
Dommages affectant des tierces personnes ou leur propriété	Dommages touchant le preneur d'assurance, p. ex. des dommages matériels à l'installation elle-même (lorsque le responsable civil est en même temps le propriétaire de la chose endommagée)

Pour les éoliennes, la responsabilité au sens de la loi sur la responsabilité du fait des produits (LRFP) est surtout importante dans les cas de dommages aux personnes (les dommages matériels relèvent avant tout du CO). Elle est limitée à trois ans après la découverte du défaut, mais au plus tard dix ans après la mise en service de l'installation. La durée de vie d'une éolienne dépasse ainsi largement la durée de la responsabilité du fabricant au sens de la LRFP. Trois ans après la découverte du défaut et dix ans après la mise en service de l'installation, l'exploitant ne peut plus se retourner contre le fabricant ou son assurance responsabilité du fait du produit et se retrouve seul responsable du dommage. Son assurance responsabilité civile d'entreprise prend alors en charge la protection contre les dommages ou verse l'indemnité (voir ch. 8.4.5).

8.2.5 Garantie du fabricant, garanties bancaires

Les obligations de garanties contractuelles du fabricant ou du maître d'œuvre ne doivent pas être confondues avec l'assurance responsabilité civile. Une telle garantie est une prestation convenue entre le fabricant et le maître de l'ouvrage, découlant souvent d'exigences minimales prévues par la loi. Les autres garanties se réfèrent souvent aux données relatives aux performances de l'installation, notamment la courbe de rendement et, le cas échéant, les données relatives à la disponibilité et au temps d'intervention lors d'arrêts de l'exploitation suite à des défaillances techniques.

Lorsque l'on passe commande d'une éolienne, il est recommandé d'exiger une telle garantie de la part du fabricant. On réclame aussi souvent une garantie bancaire permettant de réparer les dommages si le fabricant n'est plus en mesure de fournir les prestations qui lui incombent par contrat. Cependant, ces garanties (ou cautions) portent généralement sur des montants limités (p. ex. au maximum la somme du mandat, etc.). Les demandes de réparation des dommages dépassant les obligations de garantie ne sont plus l'objet des garanties/cautions mais des assurances responsabilité civile professionnelle et d'entreprise (voir à ce sujet la délimitation entre couverture et exclusion aux chiffres 7.3 et 7.4.5).

Les principales garanties bancaires ou d'assurance sont:

- la garantie de paiement (Advanced payment bond);
- la garantie de performance (Performance Bond);
- la garantie d'entretien (Maintenance Bond).

8.3 Assurances contractées par le concepteur

Les assureurs proposent souvent aux ingénieurs et architectes une couverture responsabilité civile spéciale pour leurs travaux de conception. Cette assurance couvre non seulement les dommages aux personnes et aux choses mais également, moyennant un supplément, les dommages purement pécuniaires découlant d'erreurs ou de défauts de conception.

Dans la conception d'éoliennes, l'assurance responsabilité civile professionnelle est particulièrement utile en ce qui concerne les résultats des mesures du vent et les paramètres de rendement que l'on emploie pour calculer le potentiel de production d'énergie. Il est toutefois difficile, dans la pratique, d'obtenir une protection suffisante. Les sommes couvrant les dommages purement pécuniaires en cas de rendement insuffisant dû à une erreur de conception de l'architecte ou de l'ingénieur sont toujours limitées.

8.4 Assurances contractées par l'exploitant

8.4.1 Assurance choses

Les éoliennes sont particulièrement exposées aux dangers couverts par l'assurance choses. Ces dangers sont principalement dus aux trois événements suivants:

Incendie: bien que les éoliennes soient composées de matériaux apparemment non inflammables, l'expérience a montré qu'elles pouvaient être totalement détruites par des incendies apparemment mineurs. Les lubrifiants (huiles, graisses) et le matériel isolant pour les installations électriques sont particulièrement inflammables.

Foudre: malgré les dispositifs de protection, la foudre peut détruire les rotors et endommager des pièces. En outre, la foudre provoque souvent des incendies.

Tempête: l'assurance choses définit une tempête comme un vent d'une vitesse d'au moins 75 km/h (20,8 m/s), qui arrache des arbres ou des toits de bâtiments aux environs de l'objet assuré. Les éoliennes résistent sans problème à une telle vitesse de vent. Si les tempêtes (à partir de 75 km/h) occasionnent des dommages aux éoliennes, il serait judicieux de se couvrir par le biais de l'assurance incendie.

En Suisse, la couverture de base en cas d'incendie couvre en général les sinistres suivants:

- dégâts dus à des fumées accidentnelles et subites;
- explosion et implosion;
- chute d'aéronefs ou de pièces d'aéronefs;
- autres dangers naturels: crues, inondations, grêle, avalanches, poids de la neige, chute de rochers, jets de pierres et glissements de terrain.

Sur demande, une assurance choses peut également couvrir d'autres dangers:

- vol avec effraction;
- dégâts d'eau (infiltration d'eau et autres fluides s'écoulant de conduites, dégâts du gel sur les conduites d'eau, etc.);
- vandalisme.

8.4.2 Assurance perte d'exploitation

L'assurance perte d'exploitation indemnise l'exploitant de l'éolienne en cas d'arrêt de la production (et pour les surcoûts occasionnés par le maintien de la production) suite à un dommage matériel assuré (voir plus haut). Dans un parc éolien comprenant plusieurs installations de même type, le coût d'un arrêt de la production peut facilement être chiffré grâce à la moyenne arithmétique de la production totale. Pour une installation à une seule éolienne, l'exploitant doit fournir un chiffre crédible. Le tarif de rachat de l'électricité en ct./kWh étant connu, il est facile de chiffrer les dommages occasionnés par l'arrêt de l'exploitation.

Le montant des dommages occasionnés par l'arrêt de l'exploitation dépend principalement du temps nécessité pour la remise en service. Si le fabricant dispose des composants requis et si ceux-ci peuvent être rapidement livrés et montés, les dommages se réduiront d'autant. L'accessibilité de l'installation ainsi que la disponibilité des moyens de transport jouent également un rôle.

8.4.3 Assurances machines

L'assurance machines permet de couvrir la totalité des composants d'une éolienne, y compris ses fondations. Elle est surtout prévue en cas de dommages électriques et mécaniques causés à la transmission ou par une surcharge. Sont couverts les dommages ou destructions subits et imprévus dus à des risques techniques comme les défauts de matériaux, les surcharges, les courts-circuits, les surintensités ou les surtensions, les pannes des installations de mesure, de commande et de sécurité ainsi que les dommages dus au gel et au givre. Des actes humains comme les erreurs de manipulation, la négligence et le sabotage sont également couverts.

Ne sont pas couverts les dommages dus à des défauts connus provenant d'erreurs de construction, de pannes récurrentes, une usure précoce ou due à l'exploitation, ainsi que les dommages tombant sous la responsabilité du fabricant ou du vendeur (garantie).

8.4.4 Assurance perte d'exploitation machines

Si un dommage est assuré par l'assurance machines, l'assurance perte d'exploitation machines prend en charge la perte d'exploitation correspondante. L'indemnité est calculée de la même manière que pour l'assurance perte d'exploitation.

8.4.5 Assurance responsabilité civile d'entreprise

L'assurance responsabilité civile d'entreprise de l'exploitant d'une éolienne intervient lors de dommages occasionnés à des tiers par l'exploitation de l'installation ou par l'activité de personnes dont l'exploitant est responsable. Il doit cependant s'agir de dommages à des personnes ou à des choses occasionnant des dommages pécuniaires. Par exemple, une blessure occasionnée au conducteur d'un véhicule par un glaçon projeté par le rotor constitue un cas typique de responsabilité civile. De tels cas sont couverts par l'assurance responsabilité civile d'entreprise, tout comme les accidents d'exploitation (dommages subis par des employés ou des visiteurs), et dans une mesure limitée, les dommages à l'environnement. La couverture de base s'applique également aux installations appartenant à l'entreprise (p. ex. lignes électriques, transformateurs, etc.). Certaines prestations supplémentaires peuvent être intégrées à l'assurance moyennant une augmentation de prime (p. ex. protection juridique en cas de procédure pénale).

Il ne faut pas oublier que, si l'assurance responsabilité d'entreprise prend en charge les dommages, des poursuites pénales pour homicide par négligence ou lésions corporelles par négligence peuvent néanmoins être engagées contre le fabricant, le concepteur ou l'exploitant.

9. Littérature

Bundesverband Windenergie (BWE), Ahmeln Peter, 'Mit einer grünen Anlage schwarze Zahlen schreiben', 2002

DEWI, Klug Helmut, 'Gewährleistungsfragen in Kaufverträgen von Windenergieanlagen', 1999, erschienen in Zeitschrift 'Erneuerbare Energien 02/99'

DEWI, Neumann Thomas, 'Studie zur aktuellen Kostensituation 2002 der Windenergienutzung in Deutschland', im Auftrag des Bundesverbandes Windenergie (BWE), 2002

DEWI, Osten Tjado, et al., 'Schattenwurf von Windenergieanlagen: Wird die Geräuschabstrahlung der MW-Anlagen in den Schatten gestellt?', 1998

DEWI, Seifert Henry, et al., 'Risk analysis of ice throw from wind turbines', 2003

DEWI, Strack Martin, 'Analyse der Unsicherheiten bei der Ertragsberechnung von Windparks', 2002

European Windenergy Association (EWEA), Morthorst Erik, 'Wind energy -the facts, Volume 2 Costs and Prices', 2003

International Energy Agency (IEA), Expert Group Study on Recommended Practices for Wind Turbine Testing and Evaluation, 11. Wind Speed Measurement and Use of Cup Anemometry, 1999

International Energy Agency (IEA), T. Laakso et. al., 'State-of-the-art of wind energy in cold climate', 2003

ISET Uni Kassel, Hahn Berthold, 'Zuverlässigkeit, Wartung und Betriebskosten von Windkraftanlagen', 2003

Landesumweltamt Nordrhein-Westfalen, 'Sachinformation optische Immissionen von Windenergieanlagen', 2002

Landwirtschaftskammer Schleswig-Holstein, 'Windenergie XV - Praxisergebnisse 2003', 2004

MEASNET: Measurement Procedure Cup Anemometer Calibrations, 1997

METEOTEST, Cattin René, 'Häufigkeit von Vereisung und Extremtemperaturen in der Schweiz', 2004.

METEOTEST, Kunz Stefan et. al., 'Planification d'installations d'éoliennes', 1999.

METRON, Henz Hans-Rudolf et.al., 'La prise en compte de l'énergie éolienne dans les plans directeurs et les plans d'affectation', 2001

Neue Energie, 'Vollwartungskonzepte - Hängematte mit Fallstricken', Sept. 2003

Pedersen E.L. et al, 'Influence of topographical input data on the accuracy of wind flow modelling in complex terrain', 1997

10. Annexes

Liste des annexes

A.1 Check-list "dangers"	60
A.2 Appréciation des risques (formulaire).....	66
A.3 Marge d'erreur de la statistique du vent à long terme	70

A 1 Annexe 1

A.1 Check-list "dangers"

Sécurité d'exploitation (chap. 5)

Technique éprouvée (chap.5.2)

- Les principaux composants de l'éolienne sont fournis par des fabricants disposant d'une expérience suffisante dans les technologies utilisées.
- Les nouveaux fabricants de composants importants ont effectué des tests suffisants sur un prototype et une présérie.
- Les fabricants maîtrisent les nouvelles technologies mises en œuvre (électronique, génération et transformation électrique, etc.).
- Le fabricant des principaux composants dispose d'une assurance défauts de construction (Faulty Design) ou d'une base financière suffisamment saine pour pouvoir fournir lui-même des garanties.

Classification des éoliennes (chap. 5.3)

- L'implantation des éoliennes se fait conformément à la norme CEI 64100-1, en fonction des conditions extérieures du site.
- En outre, il est tenu compte, le cas échéant, des exigences spéciales relatives au givrage.

Conditions de la mise en service (chap.5.4)

- Le fabricant de l'éolienne est en mesure de prouver que l'éolienne est conforme aux normes de sécurité et de santé (certificat de conformité)
- Le fabricant peut fournir, dans un délai de deux semaines, tous les documents techniques nécessaires.

Transport et montage (chap. 5.5)

- Les spécialistes mandatés pour le transport et le montage peuvent faire état de l'expérience nécessaire. Ils s'assurent ensemble de la faisabilité du transport et du montage et établissent un planning comportant tous les détails nécessaires.
- L'itinéraire choisi ne comporte pas de virages trop serrés.
- Les ponts situés sur l'itinéraire supportent le poids du convoi.
- Les passages sous-voie et les limites de hauteur (ponts, lignes électriques) permettent le passage des pièces les plus grandes.
- Les véhicules tracteurs sont adaptés à la charge et aux montées et les déclivités du parcours.

- Les véhicules de transport ont une garde au sol suffisante.
- La place sur chantier est suffisante (y compris pour les pistes de chantier)
- La place de montage est adaptée et assez vaste (montage du rotor, de la grue principale, éventuellement d'une grue supplémentaire, camions-grues, etc.).
- Les riverains, les passants et les autres usagers de la route sont informés.
- Les journalistes et les curieux sont avertis et pris en charge.
- Les conditions atmosphériques permettent le montage des éléments lourds (le vent, la pluie, la neige et le gel rendent les travaux difficiles).
- Les dispositifs de transport et d'amarrage sont retournés après le montage.

Raccordement au réseau électrique (chap. 5.6)

- Le raccordement au réseau électrique est à analyser avec l'exploitant du réseau. Il faut prendre en compte les points suivants:
- Conditions de raccordement sur le réseau (puissance maximale raccordable, puissance réactive soutirable maximale, systèmes de protection du réseau, etc.). Le comportement de l'installation lors de courts-circuits dans le réseau, de coupure et de surtension ainsi que l'augmentation ou la diminution de la fréquence du réseau.

Protection contre la foudre (chap.5.7)

- Des récepteurs sont installés sur la nacelle, le moyeu et les pales. Ils sont reliés par câble à la structure en acier et dévient ainsi la foudre vers le sol.
- Le multiplicateur, la génératrice, l'arbre, la transmission, les installations électriques et électroniques sont protégés contre la surtension.
- Les composants des fondations et de la base du mât sont incorporés au dispositif de protection contre la foudre.
- Pendant un orage, il est interdit de pénétrer dans l'éolienne. Les personnes autorisées sont informées.
- Il est dangereux de stationner à proximité d'une éolienne pendant un orage (risque de chute de pièces). Les passants (agriculteurs, promeneurs, skieurs) sont avertis.
- Dans les éoliennes qui ne sont pas protégées contre la foudre, les personnes se trouvant à proximité de l'installation doivent être informées par des panneaux du fait que le danger d'une décharge incontrôlée subsiste jusqu'à une heure après la fin d'un orage.

Protection anti-incendie (chap.5.8)

- Les matériaux utilisés doivent être ignifugés ou difficilement inflammables.
- Il doit être interdit de pénétrer dans une éolienne en feu. Il est également dangereux de s'en approcher à cause du risque de chute de pièces.
- L'installation d'un dispositif d'extinction automatique au gaz ou à l'eau doit être étudié, en particulier pour les éoliennes équipées d'un multiplicateur.

- Le dispositif d'extinction doit être déclenché par plusieurs capteurs afin d'éviter les fausses alertes.
- En cas de déclenchement du dispositif d'extinction, les sapeurs-pompiers et l'exploitant doivent être alertés.
- Après le déclenchement du dispositif d'extinction, l'installation doit être arrêtée. Elle ne sera remise en service qu'après un contrôle approfondi.
- Faute de mesures de protection, les gaz d'extinction peuvent mettre en danger la santé du personnel chargé du contrôle.

Jets de glace (chap. 5.9)

- Le danger de givrage du rotor peut être réduit par des mesures de construction (chauffage).
- Le givrage du rotor doit être signalé par des appareils de mesure ou de surveillance. Ceux-ci doivent aussi être protégés du givrage.
- Si l'on ne peut pas éviter le givrage, l'installation doit être arrêtée pour autant que des personnes se trouvent dans le périmètre dangereux (à portée des jets de glace).
- Au dégel, il est dangereux de s'approcher de l'éolienne en raison de la chute de glaçons pouvant tomber des éléments givrés. Une information doit être faite à ce sujet.

Entretien et pièces de rechange (chap.5.11)

- Des systèmes de surveillance de l'état de l'éolienne communiquent les vibrations et les températures d'exploitation inhabituelles.
- Les défauts constatés à temps peuvent être réparés lorsqu'il y a peu de vent.
- Les fabricants tiennent à disposition un nombre suffisant de pièces de rechange pendant toute la durée de vie de l'installation afin de permettre des réparations rapides.

Santé financière du fabricant (chap.5.12)

- Les bases financières du fabricant des principaux composants sont connues et saines.
- Selon la situation financière du fabricant, on peut supposer que celui-ci est à même d'apporter des garanties et dispose d'un stock suffisant de pièces de rechange.
- Le fabricant ou sa banque peuvent fournir une garantie de rendement, de paiement ou d'entretien.

Sécurité économique (chap.6)

Prévisions de production (chap.6.4)

- Dans le cadre de la gestion des risques,
- la marge d'erreur globale des prévisions de production découlant des marges d'erreur des différents domaines est calculée;

- le risque découlant de la marge d'erreur globale des prévisions de production est évalué;
- les mesures nécessaires sont prises si le risque est supérieur au seuil de tolérance.
- La vitesse et la direction du vent sont mesurées sur place pendant au moins un an.
- Les mesures anémométriques sont effectuées conformément aux recommandations de l'AIE (voir chap. 6.4.1 et [IEA, 1999]), le plus haut possible au-dessus du sol (jusqu'à la hauteur du moyeu).
- Si le terrain est accidenté, on effectuera des mesures au SODAR ou une modélisation afin de déterminer le profil vertical du vent.
- Pour établir la statistique du vent à long terme, on utilisera une mesure de référence avec une bonne corrélation (coefficient de corrélation > 0,7) et une fonction de correction adéquate.
- La courbe de rendement appliquée correspond au min- à la norme CEI 61400-12.
- Dans les parcs éoliens, on tient compte de la perturbation mutuelle des éoliennes.
- Les pertes de transformation et de ligne sont à prendre en compte jusqu'au compteur faisant foi pour la facturation de l'énergie injectée dans le réseau. La consommation d'électricité des appareils auxiliaires des éoliennes est comptabilisée dans les coûts d'exploitation.
- Les dommages, les travaux de maintenance et les pannes dues au givrage sont pris en considération dans le calcul de la disponibilité des éoliennes.
- On conclura une garantie de rendement ou de disponibilité avec le fabricant si le risque découlant de la marge d'erreur globale de la prévision de production l'exige. Cette garantie est établie avec le contrat d'achat et règle toutes les modalités importantes.

Coûts d'investissement (chap.6.5)

- On se renseignera assez tôt sur les coûts de l'éolienne auprès du fabricant afin de s'entendre avec lui. Les demandes de prix et les accords devront être énoncés de manière suffisamment précise.
- Le type de fondations sera déterminé sur la base d'un sondage et en accord avec le fabricant.
- On se renseignera suffisamment tôt sur les mesures et les coûts de viabilisation.
- On se renseignera auprès du distributeur d'électricité sur les coûts et les mesures de raccordement.

Produit de la vente d'électricité (chap. 6.7)

- La rétribution de l'électricité livrée et de la plus-value écologique est réglée dans les contrats de livraison. Les négociations doivent être entreprises suffisamment tôt.

Coûts d'exploitation (chap.6.8)

- Les coûts de maintenance et d'entretien sont calculés avec précision (y c. matériel, évaluation des données, assurances supplémentaires nécessaires, etc.). Il est recommandé de conclure un contrat de maintenance totale de longue durée (10 ans).
- Pour la deuxième partie de la durée de vie de l'installation, il faut compter avec des investissements plus importants en pièces de recharge.

- Les coûts d'exploitations prennent en compte l'énergie électrique achetée pour les appareils auxiliaires (y compris l'éventuel chauffage des pales).

Sécurité de planification²¹ (chap.7)

Marche à suivre (chap.7.2)

- Le dialogue avec les représentants des intérêts locaux est ouvert assez tôt. Les points critiques (p. ex. les oiseaux migrateurs) sont examinés si nécessaire en tenant compte des demandes des milieux intéressés.
- Il est recommandé d'ouvrir la discussion publique avant ou parallèlement à la demande de permis de construire pour le mât de mesure.
- Il est recommandé de communiquer activement sur les principaux aspects du projet. Les documents importants sont mis à la disposition des milieux intéressés.

Aspects particuliers (chap.7.3)

- Les discussions sur l'impact visuel seront alimentées par des photomontages et des analyses de visibilité, év. par la visite d'installations existantes.
- On prendra en considération les ombres mouvantes et les émissions sonores de l'éolienne sur d'éventuels lieu de travail ou d'habitation situés à proximité.

Assurances (chap.8)

Assurances contractées par le fabricant (chap.8.2)

- Le fabricant des principaux composants dispose des assurances transport et montage exigées.
- Une assurance responsabilité civile maître d'œuvre couvre les dommages éventuels aux objets et aux parcelles de tiers pendant la construction de l'éolienne.

Assurances contractées par le concepteur (chap.8.3)

- Le concepteur peut avoir à répondre d'erreurs de conception (mesures du vent). Il peut prendre une assurance responsabilité civile professionnelle contre les dommages pécuniaires.

Assurances contractées par l'exploitant (chap. 8.4)

- L'exploitant dispose d'une assurance choses couvrant l'incendie, les dommages dus aux éléments, la foudre et les tempêtes.

²¹ Dans cette section, ne seront traités que les aspects de l'acceptation. Les aspects concernant la faisabilité technique sont traités dans le manuel « Planification d'installations éoliennes [Meteotest, 1999].

- L'exploitant dispose d'une assurance pertes d'exploitation couvrant une interruption de la production suite à des dégâts matériels.
- L'exploitant dispose d'une assurance machines courant les dommages aux machines même s'ils sont dus à une mauvaise manipulation.
- L'exploitant dispose d'une assurance perte d'exploitation machines couvrant une interruption d'exploitation suite à des dommages aux machines.
- L'exploitant dispose d'une assurance responsabilité civile d'entreprise couvrant les dommages aux personnes et aux choses, y compris les dommages pécuniaires aux tiers (passants, riverains).

A.2 Appréciation des risques (formulaire)

Projet.....

Organisation (concepteur, exploitant)	
Descriptif du projet	
Buts de l'appréciation:	
Gestionnaire des risques (auteur de l'appréciation)	
Preneur de risque concepteur (responsable, exploitant)	
Etendue de l'analyse de risques (risques inclus, exclus)	
Etat de l'appréciation des risques:	
En cours depuis.....	Approuvé le
Par.....	Par

Définitions

Fréquence, probabilité (W)

Fréquent	une fois en	ans	%
Possible	une fois en	ans	%
Rare	une fois en	ans	%
Très rare	une fois en	ans	%
Invraisemblable	une fois en	ans	%

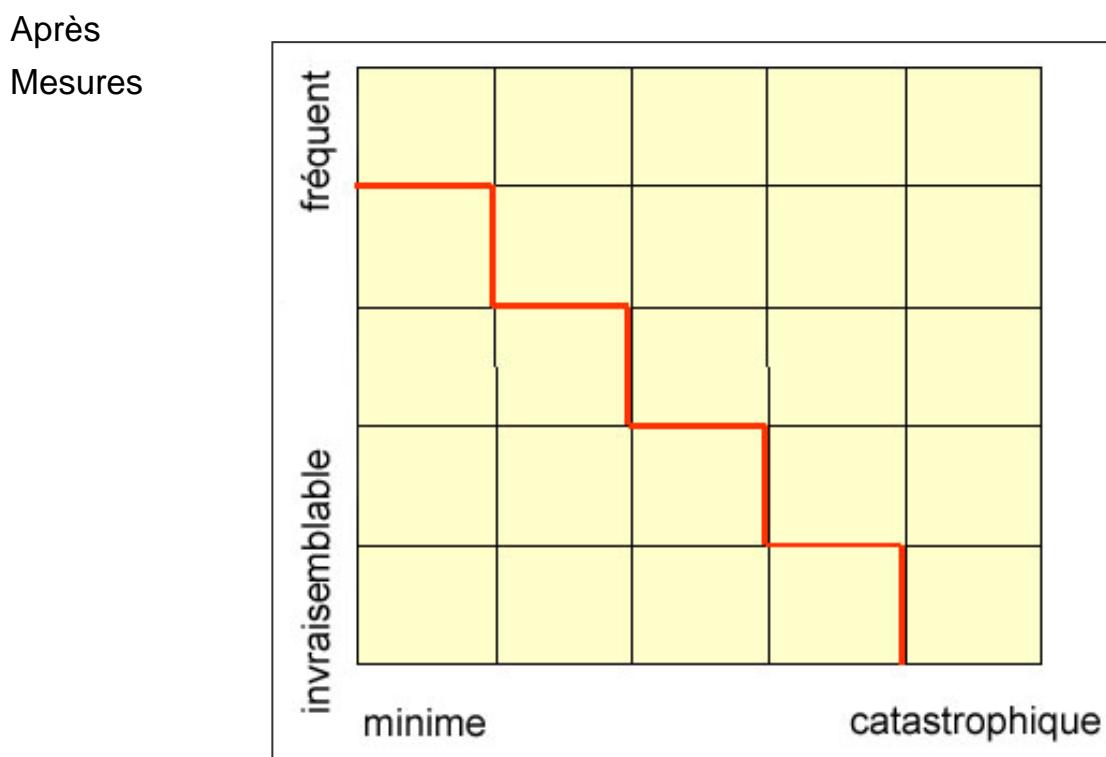
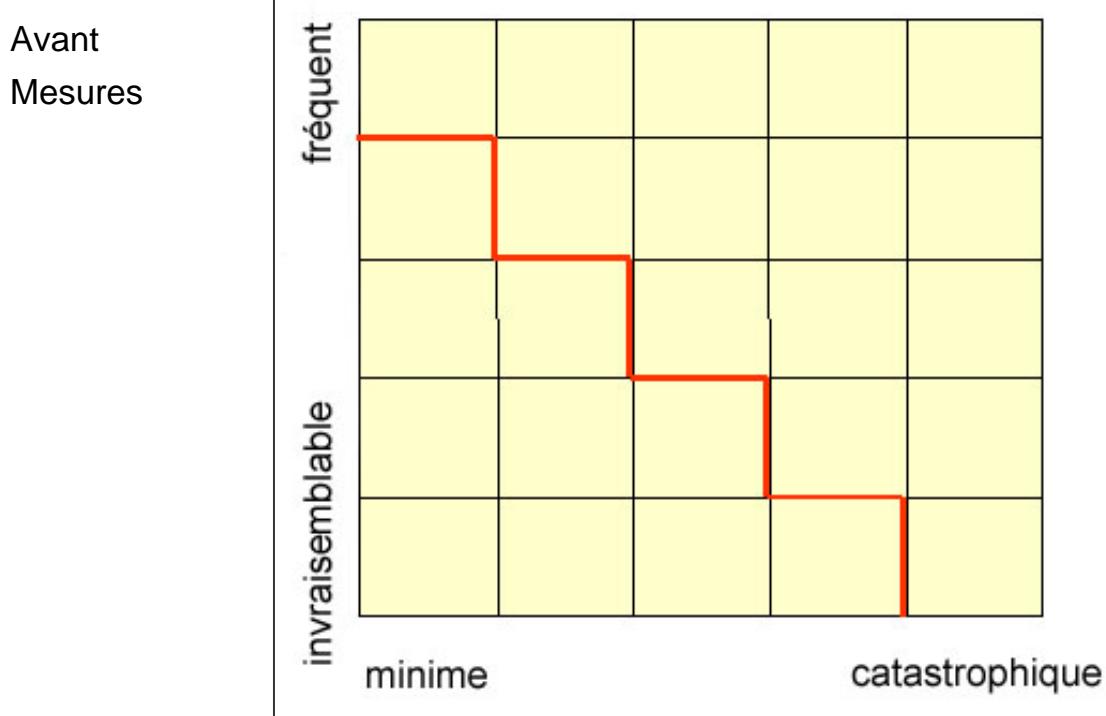
Conséquences (A)

Insignifiantes	CHF / blessure légère
Faibles	CHF / blessure grave
Sensibles	CHF / séjour à l'hôpital
Graves	CHF / invalidité
Catastrophiques	CHF / décès

Aperçu des risques et de leur estimation

N°	Scénario	W	A	W	A
1					
2					
3					
4					
5					
6					
7					
8					
9					
10					
11					
12					
13					
14					
15					

Tableau des risques



Résumé et conséquences

Date Signature

A.3 Marge d'erreur de la statistique du vent à long terme

Procédé statistique

Traitement: Beat Schaffner, Meteotest

1. Introduction

L'estimation du potentiel à long terme pour un site donné est l'un des aspects centraux d'une expertise des vents. Cette expertise se fondant sur des mesures effectuées sur une période relativement courte (de quelques mois à un an, en général), la détermination de la marge d'erreur de l'estimation à long terme constitue l'un des éléments fondamentaux de la prévision de production d'un parc éolien.

On peut certes estimer cette marge d'erreur sur la base de valeurs empiriques et de résultats tirés d'études, mais cette méthode n'est pas satisfaisante car elle ne tient pas compte des données spécifiques des mesures utilisées. Nous proposons donc une méthode de calcul de la marge d'erreur fondée exclusivement sur la statistique.

2. Concept

La figure 1 montre l'évolution de la marge d'erreur d'une prévision à long terme sur un site de mesure en fonction de la durée des mesures.

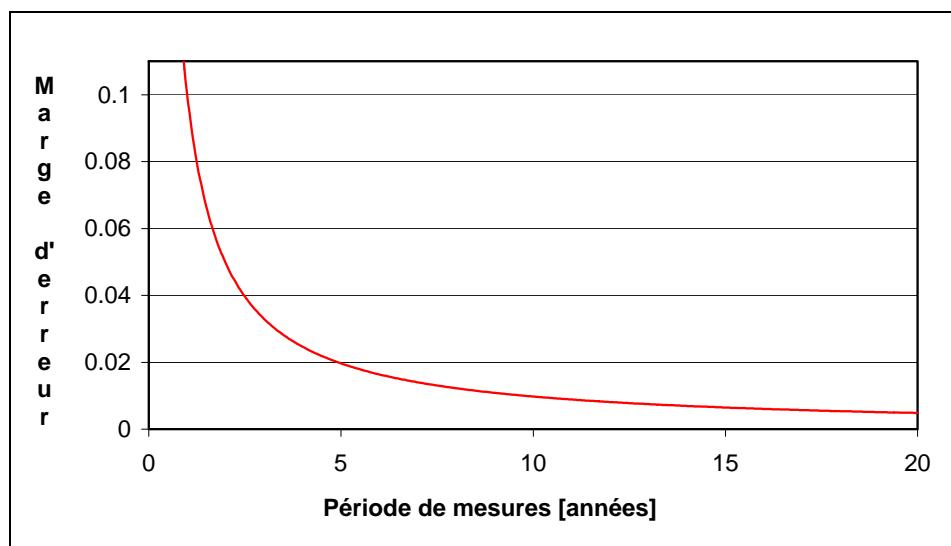


Figure 1 : Marge d'erreur d'une valeur moyenne à long terme en fonction de la durée de la période de mesures.

Nous admettons que nous disposons de mesures de référence consistantes réalisées sur 20 ans à proximité du site étudié. Le potentiel à long terme des vents du site des mesures de référence peut être déterminé avec une certaine marge d'erreur. Si la station choisie pour effectuer les mesures sur une courte période se trouve à proximité immédiate du site des mesures de référence, nous nous attendrons à une corrélation très élevée avec un coefficient de corrélation r d'à peu près 1 entre les deux séries de mesures. En cas de corrélation parfaite (coefficient de corrélation $r = 1$), les mesures à court terme peuvent être parfaitement complétées, peu de temps après leur début, par une régression avec les valeurs de la même période mesurées sur 20 ans. En raison de la corrélation parfaite, cette proposition à long terme est grevée de la même marge d'erreur que la mesure de référence.

Si nous admettons que l'estimation à long terme d'une brève série de mesures à l'aide de mesures de référence ayant une bonne corrélation améliore la marge d'erreur de la prévision à long terme, alors la marge d'erreur de cette estimation se situera toujours dans l'espace compris entre les deux courbes représentées sur la figure 2. La proximité entre la marge d'erreur que nous obtenons et celle des mesures de référence dépend de la corrélation entre les deux séries de mesures.

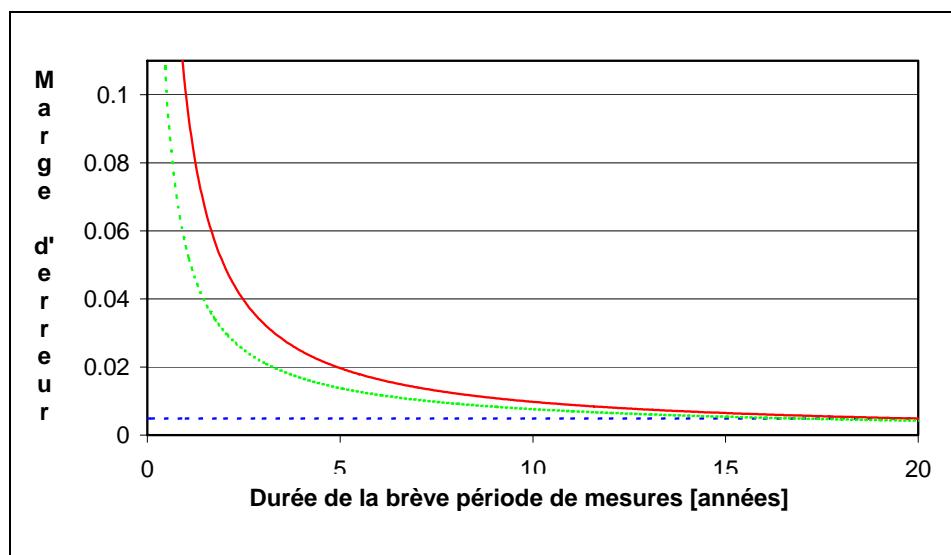


Figure 2 : Marge d'erreur de la prévision à long terme: rouge, sans corrélation; bleu (et pointillé), corrélation parfaite; vert, coefficient de corrélation entre 0 et 1.

3. Calcul de la marge d'erreur

La marge d'erreur de la prévision à long terme u_{tot} peut donc s'exprimer ainsi:

$$u_{tot} = (u_{kurz} - u_{lang}) f(r) + u_{lang}$$

avec les paramètres suivants:

u_{bref} : marge d'erreur de la brève période de mesures

u_{long} : marge d'erreur de la mesure de référence

r : coefficient de corrélation

$f(r)$: fonction du coefficient de détermination; chiffre l'influence de l'ajustement à long terme sur la marge d'erreur de la proposition à long terme. Si $r=1$, $f(r)=0$.

Dans les paragraphes suivants, nous proposons une méthode de calcul des différents termes de la formule. Nous considérons toujours la marge d'erreur comme un écartement empirique standard. Si l'on part d'une variable aléatoire en forme de courbe de Gauss, la marge d'erreur u_{tot} qui en résulte couvre un intervalle de confiance de 68%.

3.1 Calcul de u_{bref}

Le site des mesures de référence et celui des mesures effectuées sur une brève période se trouvent en général dans des zones aux conditions climatiques analogues, où les vents sont distribués d'une manière comparable à terme (faute de quoi on n'obtiendra pas de bonne corrélation entre les deux séries de données).

On peut donc procéder comme suit pour déterminer la marge d'erreur de la brève série de mesures, en se reportant aux mesures de référence: la marge d'erreur de la brève série de mesures correspond à l'écartement empirique standard d'un certain nombre de périodes (statistiquement pertinentes) de même durée des mesures de référence.

Dans la pratique, on prend n (p. ex. 20) périodes des mesures de référence d'une durée égale à celle de la brève série de mesures, ce qui permet de déterminer l'écartement empirique standard d'après la formule suivante:

$$u_{kurz} = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (u_i - \bar{u})^2}$$

avec les paramètres:

n : nombre de périodes

u_i : valeur moyenne de la période i

\bar{u} : valeur moyenne de la mesure de référence

3.2 Calcul de u_{long}

La marge d'erreur des mesures de référence correspond à celle de la valeur moyenne des mêmes mesures et se calcule comme suit:

$$u_{lang} = \frac{s_{lang}}{\sqrt{m}}$$

avec les paramètres:

s_{long} : écart standard empirique par rapport à la valeur moyenne annuelle de la mesure de référence

m : nombre d'années couvert par la mesure de référence

s_{long} se calcule comme suit:

$$s_{lang} = \sqrt{\frac{1}{m-1} \sum_{i=1}^m (v_i - \bar{v})^2}$$

avec les paramètres:

m : nombre d'années

v_i : valeur moyenne de l'année i

v : valeur moyenne de la mesure de référence

3.3 Estimation de $f(r)$

$f(r)$ chiffre l'influence de l'ajustement à long terme sur la marge d'erreur de la proposition à long terme. $f(r)$ se situe entre 0 et 1 et dépend de la corrélation entre la brève série de mesures et les mesures de référence. Pour déterminer ce rapport, nous avons déterminé, sur la base de données de 54 stations météorologiques françaises (valeurs moyennes quotidiennes 1994–2002), comment le coefficient de corrélation de Pearson r de la corrélation entre les deux séries de mesures influençait l'exactitude de la proposition à long terme. Nous avons déterminé des valeurs moyennes corrigées à long terme pour toutes les stations sur la base de données enregistrées sur une année. Ces valeurs ont été comparées avec les valeurs moyennes effectivement mesurées à long terme dans les stations correspondantes. La figure 3 illustre le résultat de la recherche.

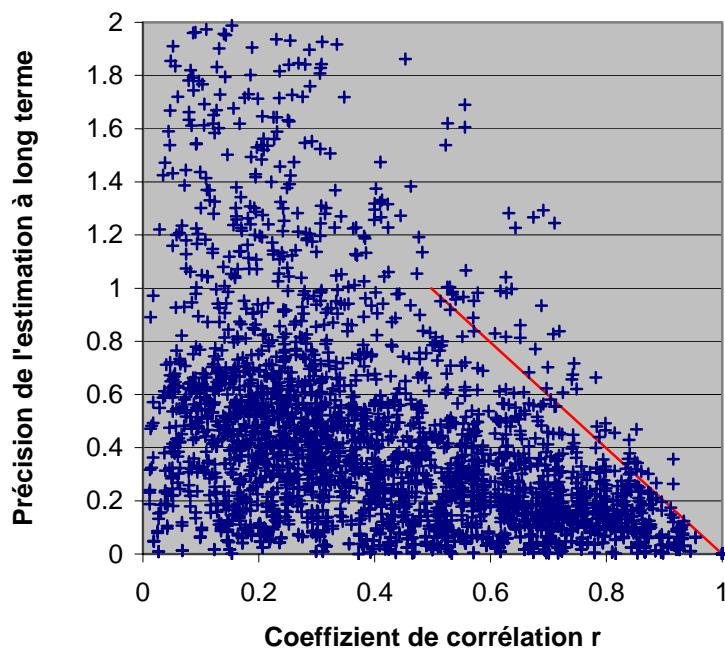


Figure 3 : Résultat de la recherche effectuée sur 54 stations météorologiques françaises.

On constatera que l'exactitude de l'estimation à long terme n'est pas très bien corrélée avec le coefficient de corrélation r . On peut cependant dégager une tendance claire: à partir d'un coefficient de corrélation pertinent de 0,5, moins de 1% des points se situent au-dessus de la ligne rouge. On peut donc en déduire avec une certitude très élevée que l'exactitude des résultats de l'estimation à long terme augmente au moins selon la fonction suivante avec le coefficient de corrélation de Pearson:

$$f(r) = -2r + 2$$

