



Expertise sur l'adéquation du site d'implantation des
éoliennes selon la norme DIBt 2012 pour le parc éolien de

Burmerange

Luxembourg

N° de rapport : I17-SE-2022-385



Expertise sur l'adéquation du site d'implantation des éoliennes selon la norme DIBt 2012 pour le
Parc éolien de Burmerange

Rapport no: I17-SE-2022-385

Mandataire: EMCA S.A.
11, Rue Principale
L-6557 Dickweiler

Entrepreneur: I17-Wind GmbH & Co. KG
29, rue Robert-Koch
D-25813 Husum

Tél. : 04841 - 87596 - 0
Courrier électronique:
mail@i17-wind.de
Internet: www.i17-wind.de

Date: 27 octobre 2022

Clause de non-responsabilité et droit d'auteur

La présente expertise a été réalisée de manière indépendante, impartiale et en toute bonne foi selon l'état actuel de la technique. Aucune garantie ne peut être donnée quant à l'exactitude des données mises à disposition par le client et le fabricant de l'installation qui n'ont pas été collectées ou déterminées par I17-Wind GmbH & Co. KG. Ces données sont considérées comme exactes.

L'auteur de la présente expertise sur l'aptitude des sites d'implantation d'éoliennes selon le DIBt 2012 est la société I17-Wind GmbH & Co. KG. Conformément au § 31 de la loi sur les droits d'auteur, le client obtient le droit d'utilisation simple qui ne peut être transféré qu'avec l'accord de l'auteur. Une mise à disposition pour un téléchargement illimité dans des médias électroniques n'est pas autorisée sans l'accord séparé de l'auteur.

N° de rapport : I17-SE-2022-375

Expertise sur l'aptitude des sites d'implantation d'éoliennes selon la norme DIBt 2012 dans le parc éolien de Burmerange

Accréditation

La société I17-Wind GmbH & Co. KG est accréditée selon la norme DIN EN ISO/IEC 17025:2018 par le Service d'accréditation allemand (DAkKS) pour les domaines suivants: "établissement de prévisions d'immissions sonores pour les installations éoliennes; établissement de prévisions d'immissions d'ombres portées pour les installations éoliennes ; vérification de l'adéquation du site d'implantation des installations éoliennes au moyen de calculs (expertise de turbulence)". Le numéro d'enregistrement du certificat est D-PL-21268-01-00. Il peut être demandé ou consulté dans la base de données des organismes accrédités de la DAkKS.

La société I17-Wind GmbH & Co. KG est membre du comité consultatif d'experts de l'association allemande WindEnergie (BWE) e.V.

Remarque sur les essais de type et les paramètres de l'installation de l'éolienne

Si, au moment de l'élaboration de l'expertise, l'homologation ou les essais individuels des éoliennes prévues n'étaient pas encore disponibles, la comparaison a été effectuée sur la base des valeurs de conception des éoliennes prévues transmises par le fabricant. Il est possible que les documents remis lors de la procédure d'autorisation concernant les valeurs de conception des éoliennes considérées ne correspondent pas aux documents cités dans la présente expertise. Les documents cités correspondent à l'état actuel au moment de la rédaction de l'expertise. En cas de documents divergents, la présente expertise conserve néanmoins sa validité si les valeurs de conception prises en compte dans l'expertise sont couvertes par les valeurs de conception soumises dans le cadre de la procédure d'autorisation. Dans ce qui suit, la notion d'essai individuel est toujours couverte par la notion d'essai de type, même si cela n'est pas explicitement mentionné.

Les modifications des paramètres de l'installation pris en compte, tels que la courbe c_t et la vitesse de rotation rapide λ , sont réservées au fabricant de l'installation et nécessitent un nouveau calcul et une nouvelle évaluation. En cas de modification des paramètres de l'installation par rapport à la situation au moment de l'élaboration de l'expertise, la présente expertise perd sa validité.

Numéro de révision	Date	Modification	Auteur
0	27.10.2022	Première édition	Clausen

Auteur:

M. Ed. Florian Clausen, expert en la matière
Husum, 27.10.2022

**Vérfifié:**

Ingénieur diplômé (FH) Christian Kebbel, Expert
Husum, 02.11.2022

**Validé**

M. Ed. Florian Clausen, expert en la matière
Husum, 02.11.2022



Ce document a été signé numériquement et son intégrité a été vérifiée. Le certificat correspondant peut être mis à disposition par I17-Wind GmbH & Co. KG sur demande.

Table des matières

1 Remarque préliminaire	6
1.1 Généralités	6
1.2 Preuves gérées	7
1.2.1 Démonstration de l'adéquation du site sur des sites topographiquement non complexes par	8
Comparaison des conditions de vent	8
1.2.2 Preuve de l'adéquation du site à des sites topographiquement complexes par comparaison	8
des conditions de vent	8
1.2.3 Procédure en cas de dépassement - Vérification par comparaison des charges	9
1.3 Remarques sur les directives utilisées.....	10
1.4 Qualité des données et des modèles utilisés.....	11
2 Définition des tâches et emplacement	12
2.1 Portée de l'expertise	12
2.2 Description du site	12
2.3 Conditions de vent de conception des éoliennes prévues.....	12
3 Comparaison des conditions de vent	16
3.1 Principes de base	16
3.2 Comparaison entre v_{ave} et v_{m50}	17
3.2.1 Comparaison de la vitesse moyenne du vent v_{ave}	17
3.2.2 Comparaison de la vitesse du vent sur 50 ans v_{m50}	17
3.3 Comparaison de l'intensité effective des turbulences I_{eff}	18
3.3.1 Conditions de vent de conception concernant l'intensité des turbulences.....	18
3.3.2 Détermination de l'intensité de la turbulence ambiante.....	20
3.3.3 Détermination de l'intensité effective des turbulences I_{eff}	22
3.4 Écoulement oblique δ	25
3.5 Exposant d'altitude α	27
3.6 Densité de l'air ρ	28
3.7 Intensité extrême des turbulences I_{ext}	29
4 Résumé.....	31
4.1 Nouvelles éoliennes prévues	31
5 Visite du site.....	31
Liste des abréviations et des symboles	32
Bibliographie	34
Annexe 1 / Conditions de vent transmises sur le site	36

Liste des figures

Figure 2.1: Configuration du parc éolien à étudier; cartes: [19.1, 19.2]	14
--	----

Liste des tableaux

Tableau 2.1: Configuration du parc éolien à étudier	13
Tableau 2.2: Conditions de vent de conception des nouvelles éoliennes prévues.....	13
Tableau 3.1: Conditions de vent sur le site WV 1/1 [22.1]	15
Tableau 3.2: Comparaison de la vitesse moyenne du vent v_{ave} à la hauteur du moyeu des éoliennes prévues	16
Tableau 3.3: Comparaison de la vitesse du vent sur 50 ans v_{m50} à la hauteur du moyeu de l'éolienne prévue	17
Tableau 3.4: Conditions de vent de conception dépendant des directives en ce qui concerne l'intensité des turbulences	18
Tableau 3.5: Critères de complexité et C_{CT} selon DIN EN IEC 61400-1:2019 [6]	20
Tableau 3.6: Intensité représentative des turbulences pour un site	21
Tableau 3.7: Intensités effectives de turbulence déterminées I_{eff}	24
Tableau 3.8 Moyenne du site du courant oblique δ_{NH} de la nouvelle éolienne prévue	25
Tableau 3.9 Moyenne du site de l'exposant d'altitude α_{NH} des nouvelles éoliennes prévues.....	26
Tableau 3.10: Densité moyenne de l'air du site ρ_{NH} des nouvelles éoliennes prévues	27
Tableau 3.11: Intensités de turbulences extrêmes déterminées $I_{ext, NH}$	28
Tableau 4.1: Résumé des résultats de l'étude WEA.....	29
Tableau A.1: Conditions de vent sur le site WV 2/1 [22.1]	35
Tableau A.2: Conditions de vent sur le site WV 3/1 [22.1]	35
Tableau A.3: Conditions de vent sur le site WV 4/1 [22.1]	36
Tableau A.4: Conditions de vent sur le site WV 5/1 [22.1]	36

1 Remarque préliminaire

1.1 Généralités

Au début de l'année 2013, l'Institut allemand des techniques de construction (DIBt) a publié la version d'octobre 2012 de la "*Directive pour les installations d'énergie éolienne - Actions et justificatifs de stabilité pour la tour et la fondation*" et a publié en mars 2015 une version corrigée [1.1], sur la base de laquelle la présente expertise a été réalisée.

En raison de l'absence de critères pour une valeur limite d'immissions pour les charges de turbulence accrues causées par les éoliennes voisines sur une éolienne, les critères d'aptitude du site en ce qui concerne l'intensité effective des turbulences peuvent être utilisés à titre de remplacement pour une prévision des immissions de turbulence dans le cadre d'une demande selon la loi fédérale sur la protection contre les immissions (BImSchG). Une réduction de la durée de vie et une usure

supplémentaire des éoliennes sont acceptables tant que l'adéquation du site reste garantie en ce qui concerne les valeurs de conception de l'intensité de turbulence ou en ce qui concerne les charges de conception. Ainsi, la présente expertise sur l'adéquation du site d'implantation des éoliennes constitue en outre un pronostic d'immissions de turbulences au sens de la BImSchG et peut être utilisée comme élément de la demande d'autorisation selon la BImSchG.

1.2 Preuves gérées

La directive DIBt 2012 [1.1] exige au chapitre 16 une méthode alternative et simplifiée pour prouver l'adéquation du site d'implantation des éoliennes, qui ne peut toutefois être utilisée que si les sites d'implantation des éoliennes prévues doivent être qualifiés de sites non complexes sur le plan topographique selon la norme DIN EN 61400-1:2011-08 [7]. En décembre 2019, la norme DIN EN IEC 61400-1:2019 [6] a été publiée, remplaçant la norme DIN EN 61400-1:2011-08 [7]. Conformément à la directive DIBt 2012 [1.1], l'édition appliquée de la norme DIN EN (IEC) 61400-1, selon [6] ou [7], doit être appliquée dans son intégralité, c'est pourquoi la détermination de la complexité topographique dans la présente expertise est également effectuée selon [6]. Si certains sites d'implantation d'éoliennes nouvellement planifiées doivent être considérés comme topographiquement complexes, la preuve simplifiée de l'adéquation du site selon [1.1] est complétée par les critères de la norme DIN EN IEC 61400-1:2019 [6], paragraphe 11.9. Les comparaisons des valeurs de conception pour les grandeurs à étudier avec les valeurs déterminées dans le cadre de cette expertise ne doivent être effectuées, selon la directive DIBt version octobre 2012, que pour les installations nouvellement planifiées [1.1]. Pour les installations existantes qui ont fait l'objet d'un essai de type selon la DIBt 1993 [3] ou la DIBt 2004 [2], la preuve de l'adéquation du site peut continuer à être apportée selon la procédure de la DIBt 2004 en cas de modification / d'extension du parc [1.1].

La directive DIBt 2012 [1.1] ne tient pas compte des possibilités suivantes, ou des configurations possibles, en ce qui concerne l'essai de type et la directive sur laquelle elle se base:

- i. L'installation prévue est basée sur un essai de type selon la directive DIBt 2004 [2].
- ii. Une ou plusieurs installations existantes à prendre en compte sont basées sur un essai de type selon la directive DIBt 2012 [1.1].

Pour ces deux cas décrits, qui ne sont pas couverts par la DIBt 2012 [1.1], les procédures suivantes sont appliquées en tant que quasi-standard conformément à [1.2]:

- i. Si une nouvelle installation planifiée est basée sur un essai de type selon DIBt 2004 [2], la preuve de l'adéquation du site est apportée sur la base de la procédure simplifiée selon DIBt 2012 [1.1], décrite au paragraphe 1.2.1. Cette preuve correspond aux exigences minimales de la directive DIN EN 61400-1:2004 [8], ou IEC 61400-1 ed.2 [4], qui sert de base à la preuve de l'adéquation au site de l'essai de type selon DIBt 2004 [2].
- ii. Étant donné que l'on peut supposer que les installations déjà autorisées ou existantes ont fait l'objet d'un examen de type selon DIBt 2012 [1.1] et que l'adéquation du site a été prouvée dans le cadre de leur procédure d'autorisation, seuls les paramètres influencés par les installations supplémentaires sont examinés et comparés aux valeurs de conception. Cela correspond uniquement à l'intensité effective des turbulences I_{eff} , qui peut être augmentée par un ajout.

Selon la norme DIN EN 1991-1-4/NA:2010-12 [9], l'examen des effets d'interférence ou des vibrations excitées par des tourbillons doit être effectué pour les structures cylindriques si leur distance entre elles est inférieure à la distance minimale définie dans [9]. Cet examen ne fait pas partie de la directive DIBt 2012 [1.1] et n'est donc pas effectué dans la présente expertise, mais doit être réalisé par un tiers expert indépendant ou un staticien d'essai.

1.2.1 Démonstration de l'adéquation du site sur des sites topographiquement non complexes par comparaison des conditions de vent

La preuve simplifiée de l'adéquation du site selon la directive DIBt version 2012 [1.1] exige les preuves suivantes des conditions de vent à la hauteur du moyeu de l'éolienne prévue:

- i. Comparaison de la vitesse moyenne du vent.
 - (1) la vitesse moyenne du vent sur le site est inférieure d'au moins 5 % à celle indiquée dans l'essai de type/l'essai individuel, ou
 - (2) la vitesse moyenne du vent est inférieure à celle indiquée dans l'essai de type/l'essai individuel et le paramètre de forme k de la fonction de Weibull est: $k \geq 2$.
- ii. Comparaison de l'intensité effective des turbulences selon DIN EN 61400-1:2011-08 [7] entre $0,2 v_{m50}(h)$ et $0,4 v_{m50}(h)$ avec la turbulence de conception selon NTM.
- iii. Comparaison de la vitesse du vent sur 50 ans.
 - (1) La zone de vent selon l'essai type/individuel couvre la zone de vent du site considéré conformément à la carte des zones de vent (les réglementations détaillées selon la norme DIN EN 1991-1-4, paragraphe 4.3.3, y compris NA [9] pour les terrains non plats, doivent être respectées le cas échéant), ou bien
 - (2) la vitesse du vent sur 50 ans $v_{m50}(h)$ selon l'essai de type/l'essai individuel couvre la vitesse du vent sur 50 ans sur le site (par exemple, preuve par une estimation du vent extrême).

1.2.2 Démonstration de l'adéquation du site sur des sites topographiquement complexes par comparaison des conditions de vent

S'il s'agit, selon le paragraphe 11.2 de la norme DIN EN IEC 61400-1:2019 [6], d'un site de catégorie L, M ou H, à qualifier de topographiquement complexe, et si l'éolienne à étudier est basée sur un essai de type selon DIBt 2012 [1.1], la preuve simplifiée de l'aptitude du site selon le paragraphe 1.2.1 est complétée par les preuves suivantes des conditions de vent à hauteur de moyeu de l'éolienne prévue, basées sur la norme DIN EN IEC 61400-1:2019 [6].

- i. La valeur moyenne pondérée par l'énergie du vent de toutes les directions du flux d'air oblique δ ne doit pas être supérieure ou inférieure à la valeur prescrite de $\pm 8^\circ$, ou à la valeur indiquée dans l'essai de type.
- ii. La valeur moyenne du site de l'exposant de hauteur α , pondérée en énergie sur toutes les directions et vitesses de vent, ne doit pas être supérieure ou inférieure à la valeur de $0,05 \leq \alpha \leq 0,25$, ou à la valeur indiquée dans l'essai de type.
- iii. La valeur moyenne sur site de la densité de l'air ρ ne doit pas dépasser la valeur de $1,225 \text{ kg/m}^3$ ou la valeur spécifiée dans l'essai de type pour toutes les vitesses de vent supérieures ou égales à la vitesse nominale v_r . Alternativement, une densité de l'air supérieure à la valeur de $1,225 \text{ kg/m}^3$ ou à la valeur indiquée dans l'essai de type peut être démontrée en respectant l'inégalité suivante:

$$\rho_{\text{conception}} \cdot v_{\text{ave}}^2, \text{conception} \geq \rho_{\text{site}} \cdot v_{\text{ave}}^2, \text{site}$$
- iv. La preuve doit être apportée que les valeurs de conception de l'ETM ne sont pas dépassées, même en tenant compte de la situation de sillage avec la turbulence de sillage la plus élevée au centre du sillage.

1.2.3 Procédure en cas de dépassement - Vérification par comparaison des charges

Si la vérification simplifiée des conditions de vent selon DIBt 2012 [1.1] du paragraphe 1.2.1 ne peut pas être effectuée, car les paramètres à vérifier, vitesse moyenne du vent v_{ave} ou intensité effective des turbulences I_{eff} , ne sont pas respectés, l'adéquation du site peut être prouvée par une comparaison de charge (comparaison des charges spécifiques au site avec les hypothèses de charge de l'essai de type) des charges de résistance en service. Dans ce cas, la preuve de l'adéquation du site de l'éolienne concernée doit être apportée sur la base d'une comparaison de charge des charges de résistance en service (DLC 1.2). Si la valeur de conception v_{m50} n'est pas respectée, l'adéquation du site peut être prouvée sur la base d'une comparaison de charge des charges extrêmes. Dans ce cas, la preuve de l'adéquation du site de l'éolienne concernée doit être apportée sur la base d'une comparaison de charge des charges extrêmes (DLC 1.1, DLC 1.3, DLC 6.1, et DLC 6.2).

Si la preuve des conditions de vent sur un site pouvant être qualifié de topographiquement complexe selon les sections 1.2.1 et 1.2.2 ne peut pas être apportée, car une ou plusieurs des valeurs à vérifier ne sont pas respectées, l'adéquation du site peut être effectuée conformément à la norme DIN EN IEC 61400-1:2019 [6] sur la base d'une comparaison de charge en tenant compte des conditions de vent spécifiques au site des sections 1.2.1 et 1.2.2. En conséquence, le démontrer l'adéquation du site de chaque éolienne sur la base d'une comparaison des charges de résistance en service (DLC 1.2) et/ou des charges extrêmes (DLC 1.1, DLC 1.3, DLC 6.1, et DLC 6.2).

Dans les deux cas, les charges de conception sur lesquelles se base l'essai de type sont comparées aux charges spécifiques au site, déterminées sur la base des conditions de vent spécifiques au site et issues de la présente expertise. S'il s'avère que les charges spécifiques au site ne dépassent pas ou respectent les charges de conception, l'adéquation du site est prouvée par la comparaison des charges. Si les charges de conception ne sont pas respectées, l'installation doit, le cas échéant, être exploitée avec une restriction d'exploitation sectorielle afin de réduire les charges jusqu'à ce qu'elles se situent dans les limites des charges de conception, ou l'adéquation du site ne peut pas être démontrée par une comparaison des charges.

Le calcul des charges spécifiques au site est généralement effectué par le fabricant de l'éolienne considérée. Le rapport correspondant au calcul de charge effectué est présenté à I17-Wind GmbH & Co. KG dans le cadre d'un accord de confidentialité. En outre, il est possible de déterminer les charges de résistance au fonctionnement et les charges extrêmes d'une éolienne sur la base d'un modèle d'installation générique et de les comparer aux charges de conception déterminées à l'aide du modèle d'installation générique identique. En règle générale, ces calculs ne sont pas effectués par le fabricant de l'installation, mais par un tiers expert indépendant. Les rapports sont vérifiés par I17-Wind GmbH & Co. KG afin de s'assurer que les données d'entrée ont été correctement reprises et appliquées. Le résultat d'un calcul de charge est supposé être correct. Aucune responsabilité n'est assumée quant à l'exactitude d'un calcul de charge, qu'il soit effectué par un fabricant d'installations ou par un tiers expert indépendant.

1.3 Remarques sur les directives utilisées

Les méthodes suivantes, différentes de la directive DIBt 2012 [1.1] et de la norme DIN EN IEC 61400-1:2019 [6], mais couvrant de manière conservative, ont été choisies pour la présente expertise sur l'adéquation des sites d'implantation des éoliennes:

- I. Conformément à la DIBt 2012 [1.1], la condition préalable à la vérification de l'adéquation du site est que l'éolienne ait fait l'objet d'un essai de type ou d'un essai individuel. Si ce n'est pas le cas, la comparaison est effectuée sur la base de valeurs de conception provisoires pour lesquelles l'essai de type est probablement visé. Ainsi, la présente expertise conserve sa validité dans le cas d'un essai de type ou d'un essai individuel couvrant les paramètres de conception pris pour base.
- II. On part du principe que chaque éolienne considérée dans l'expertise n'a pas encore dépassé la durée de vie de conception τ_{TP} sur laquelle se base son homologation.
- III. La comparaison de la valeur du site de la vitesse moyenne du vent à hauteur du moyeu v_{ave} avec la valeur de conception ne peut être effectuée selon [1.1] que si les valeurs de conception de l'éolienne à considérer présentent un paramètre de forme k de la distribution de Weibull de $k = 2.0$. Si les valeurs de conception des éoliennes à considérer présentent un paramètre de forme $k \neq 2.0$, la comparaison requise par [1.1] ne peut plus être effectuée. Dans ce cas, on choisit la méthode selon [6], qui exige une comparaison entre la fonction de densité de probabilité pdf_{NH} des vitesses de vent spécifiques au site et la fonction de densité de probabilité pdf_{TP} de l'essai de type dans une plage de $v_{ave} - 2v_{ave}$. De plus, la plage de $0.2v_{ref} - 0.4v_{ref}$ selon [7] est prise en compte et c'est toujours la plage couvrant de manière conservative qui sert de base à la comparaison. Dans la zone à étudier, la condition $pdf_{NH} \leq pdf_{TP}$ doit être remplie. Le calcul des fonctions de densité de probabilité pdf_{NH} et pdf_{TP} s'effectue conformément à [6] sur la base des valeurs moyennes du site A_{NH} et k_{NH} ou des valeurs de conception A_{TP} et k_{TP} des éoliennes à analyser.
- IV. Si la preuve de l'adéquation du site est apportée par la comparaison des conditions de vent selon les sections 1.2.1 et 1.2.2, la comparaison de l'intensité de turbulence effective spécifique au site et de la turbulence de conception selon la NTM doit être effectuée dans la plage comprise entre $0,2v_{m50}$ (h) et $0,4v_{m50}$ (h) [1.1]. Si l'éolienne à considérer ne présente pas de turbulence de conception selon la NTM, la comparaison s'effectue avec la turbulence de conception indiquée dans l'essai de type. Conformément à [6], la comparaison doit être effectuée dans la plage comprise entre v_{ave} et $2v_{ave}$. Si la preuve de l'adéquation du site est apportée par la comparaison des charges selon la section 1.2.3, le calcul de charge selon [1.1] doit être basé au moins sur les intensités de turbulence effectives spécifiques au site de v_{in} à $0,4v_{m50}$ (h) ou de v_{in} à v_{out} selon la DLC 1.2 selon [6]. Dans la présente expertise, les intensités de turbulence effectives spécifiques au site sont indiquées au moins dans la plage de vitesses de vent de 5 m/s à 25 m/s (ou v_{out} si $v_{out} < 25$ m/s), ce qui couvre les exigences décrites ci-dessus pour la preuve de l'adéquation du site par la comparaison des conditions de vent selon [1.1], [6] et également [7]. Si la preuve de l'adéquation du site est apportée par la comparaison des charges, les intensités de turbulence effectives spécifiques au site dans la plage de v_{in} à v_{out} sont en principe mises à la disposition du fabricant de l'installation. Si une éolienne à tester est soumise à un essai de type selon [2], la comparaison se fait avec la courbe de turbulence pour la catégorie de turbulence A selon [1.1], car cette courbe couvre la courbe à appliquer selon [2].

- V. En ce qui concerne l'intensité effective des turbulences I_{eff} , toutes les éoliennes situées dans un rayon de 10 fois le diamètre D du rotor de la ou des éoliennes prévues sont en principe prises en compte et justifiées. Ce critère couvre tous les critères selon [1.1], [6] et [7].
- VI. La valeur moyenne de la densité de l'air ρ , spécifique au site, est indiquée de manière couvrante pour toutes les vitesses de vent.
- VII. En ce qui concerne les conditions de vent de conception de l'ETM, les valeurs de la turbulence maximale sont indiquées au centre du sillage. Étant donné qu'un dépassement des conditions de vent de conception concernant l'ETM s'accompagne généralement d'un dépassement de l'intensité effective des turbulences, on peut partir du principe qu'un dépassement de l'intensité extrême des turbulences ne se produit que dans les cas où l'adéquation du site doit être prouvée par un calcul de charge du fabricant, ce qui se fait alors sur la base des valeurs indiquées pour la turbulence extrême. Pour cette raison, la comparaison des conditions de vent de conception de l'ETM avec les conditions du site n'est pas effectuée.
- VIII. En raison des programmes de calcul utilisés et de leur format de sortie des chiffres, les résultats présentés dans le présent rapport sont généralement accompagnés du signe de séparation décimale "point".
- IX. En raison des différences de terminologie et de désignation de grandeurs identiques dans les directives et les normes utilisées, le présent rapport choisit ou introduit en partie des termes et des désignations qui, dans la mesure du possible, présentent une similitude avec les termes et désignations respectifs dans les directives et les normes, afin de pouvoir les y associer. Cela n'affecte pas la mise en œuvre correcte des comparaisons exigées par les directives et les normes.

1.4 Qualité des données et des modèles utilisés

Tous les résultats et résultats intermédiaires obtenus dans le cadre de la présente expertise se basent d'une part sur les données transmises par le donneur d'ordre et d'autre part sur les résultats de calcul obtenus par I17-Wind GmbH & Co. KG. I17-Wind GmbH & Co. KG ne peut pas se prononcer sur les incertitudes des modèles de calcul sur lesquels le donneur d'ordre a basé les données d'entrée. Ces données d'entrée sont considérées comme exactes et représentatives pour le site en question.

Les paramètres de l'installation utilisés dans les calculs, le coefficient de cisaillement c_t et la vitesse de rotation rapide λ , sont en général fournis par le fabricant de l'installation. Ces valeurs sont considérées comme correctes. Les valeurs prises en compte correspondent à la situation au moment de l'élaboration de l'expertise. Des modifications sont réservées au fabricant de l'installation et nécessitent un nouveau calcul et une nouvelle évaluation. Pour les installations pour lesquelles aucune information n'est disponible, des paramètres d'installation génériques couvrant de manière conservatrice sont appliqués, mais aucune responsabilité n'est assumée quant à l'exactitude des valeurs déterminées.

Les hauteurs de moyeu des éoliennes prévues indiquées dans la présente expertise correspondent toujours à la documentation actuellement disponible. Lors de la phase de développement d'une éolienne, il est possible que de légères modifications soient apportées.

Modifications de la Hauteur du moyeu sans une modification à base à l'adresse conditions de vent de conception sont possibles, de sorte que la hauteur de moyeu considérée dans la présente expertise peut différer légèrement de la hauteur de moyeu indiquée dans les documents de demande. Il en va de même pour les hauteurs de moyeu des éoliennes existantes documentées dans les autorisations, qui peuvent également s'écarter légèrement des valeurs actuelles. En cas d'écart de la hauteur de

moyeu de ± 1 m maximum, la présente expertise reste entièrement valable si les conditions de vent de conception prises en compte dans l'expertise sont couvertes par les conditions de vent de conception soumises dans le cadre de la procédure d'autorisation.

Les résultats obtenus par I17-Wind GmbH & Co. KG sont basés sur différents modèles physiques simplifiés qui ne représentent qu'approximativement la réalité, mais qui doivent être considérés comme conservateurs. En outre, les calculs reposent en partie sur des hypothèses simplificatrices, qui doivent également être considérées comme conservatrices.

2 Définition des tâches et emplacement

2.1 Portée de l'expertise

Étant donné que dans le parc éolien prévu, aucun site d'installation d'une installation nouvellement planifiée et homologuée selon le DIBt 2012 ne peut être qualifié de site topographiquement complexe selon la norme DIN EN IEC 61400-1:2019 [6], la procédure simplifiée décrite au paragraphe 1.2.1 s'applique à toutes les éoliennes.

2.2 Description du site

Le client prévoit l'installation de cinq éoliennes de type Enercon E-175 EP5 / 6.000 kW sur une hauteur de moyeu de 162,5 m sur le site de Burmerange au Luxembourg.

La société I17-Wind GmbH & Co. KG a été chargée de réaliser une expertise sur l'adéquation du site d'implantation des éoliennes selon la directive DIBt 2012 [1.1] en tenant compte des éoliennes mentionnées dans le tableau 2.1 [21] et représentées dans la figure 2.1. En raison de la distance d'au moins 2,5 km par rapport à l'éolienne existante la plus proche, les éoliennes existantes n'ont pas été prises en compte dans la présente expertise. Le tableau 2.1 présente, outre les spécifications des éoliennes du site, les directives sur lesquelles se base l'évaluation du type ou, en l'absence d'informations, les directives supposées. Il indique également quel coefficient de ligne de Wöhler m et quel mode de fonctionnement ont été utilisés pour le calcul de l'intensité effective des turbulences I_{eff} . Les résultats de la section 3.3.3 tiennent compte des coefficients de Wöhler respectifs du tableau 2.1. Si aucune information sur le mode de fonctionnement n'est disponible dans les données d'entrée, le calcul est toujours effectué avec le mode de fonctionnement qui donne les résultats les plus conservateurs, ce qui correspond au mode de fonctionnement ouvert, sans réduction de puissance.

La colonne "Dans les 10 D" indique quelles sont les éoliennes situées dans un rayon de 10 D autour des éoliennes prévues. Pour ces éoliennes, une évaluation de la complexité topographique et de l'intensité effective des turbulences I_{eff} doit être effectuée conformément à [6] et [7].

Dans la présente expertise, toutes les désignations se réfèrent au numéro W interne et séquentiel. Si une grandeur est désignée par l'indice_{TP}, il s'agit de la valeur de conception de l'éolienne à considérer. Une désignation avec l'indice_{NH} indique la valeur spécifique au site de l'installation considérée.

Dans le schéma de parc éolien donné, la distance relative la plus faible s entre une nouvelle éolienne prévue et une autre éolienne est de 3,97, par rapport au plus grand diamètre de rotor D . Cela concerne les éoliennes W3 et W4.

2.3 Conditions de vent de conception des éoliennes prévues

Les conditions de vent de conception sont soit tirées de l'essai de type, soit transmises par le fabricant. Comme la comparaison des conditions de vent de conception, à l'exception de I_{eff} , avec les conditions spécifiques au site ne peut être effectuée que pour les éoliennes nouvellement planifiées, le tableau 2.2 ne présente que les conditions de vent de conception des éoliennes nouvellement planifiées.

N° de rapport : I17-SE-2022-375

Expertise sur l'adéquation du site d'implantation des éoliennes selon la norme DIBt 2012 dans le parc éolien de Burmerange

Tableau 2.1 : Configuration du parc éolien à étudier

W-Nr. interne	Nom du donneur d'ordre	Nouveau / existant	Dans les 10 D	Complexité topographique		UTM WGS84 Zone 32		Fabricant	Type d'éolienne	NH ¹ [m]	D [m]	Mode de fonctionnement	FEH [m]	P _N [kW]	Base de contrôle DIBt	TK	Durée de vie de conception τ _{TP} [a]	m _{max, TP} [-]	VC utilisée
				Complexe	Catégorie	X [m]	Y [m]												
W1	-	Nouveau	Oui	Non	-	306858	5485701	Enercon	E-175 EP5 / 6.000 kW	162.5	174.3	OM0s	0.0	6000	2012	A	25	10	WV 1/1
W2	-	Nouveau	Oui	Non	-	307362	5483966	Enercon	E-175 EP5 / 6.000 kW	162.5	174.3	OM0s	0.0	6000	2012	A	25	10	WV 2/1
W3	-	Nouveau	Oui	Non	-	306906	5482938	Enercon	E-175 EP5 / 6.000 kW	162.5	174.3	OM0s	0.0	6000	2012	A	25	10	WV 3/1
W4	-	Nouveau	Oui	Non	-	306528	5483517	Enercon	E-175 EP5 / 6.000 kW	162.5	174.3	OM0s	0.0	6000	2012	A	25	10	WV 4/1
W5	-	Nouveau	Oui	Non	-	304592	5486520	Enercon	E-175 EP5 / 6.000 kW	162.5	174.3	OM0s	0.0	6000	2012	A	25	10	WV 5/1

Tableau 2.2 : Conditions de vent de conception des nouvelles éoliennes prévues

W-Nr. interne	Base de contrôle	WZ	GK	v _{ave,TP} [m/s]	k _{TP} [-]	vm _{50,TP} [m/s]	TK	δ _{TP} [°]	τ _{TP} α [-]	τ _{TP} ρ [kg/m ³]	Durée de vie de conception τ _{TP} [a]	Source
W1 - W5	DIBt 2012	S	S	7.8	2.0	42.5	A	8.0	0.2	1.225	25	[24.1] [24.2]

¹ Voir chapitre 1.4, paragraphe 3

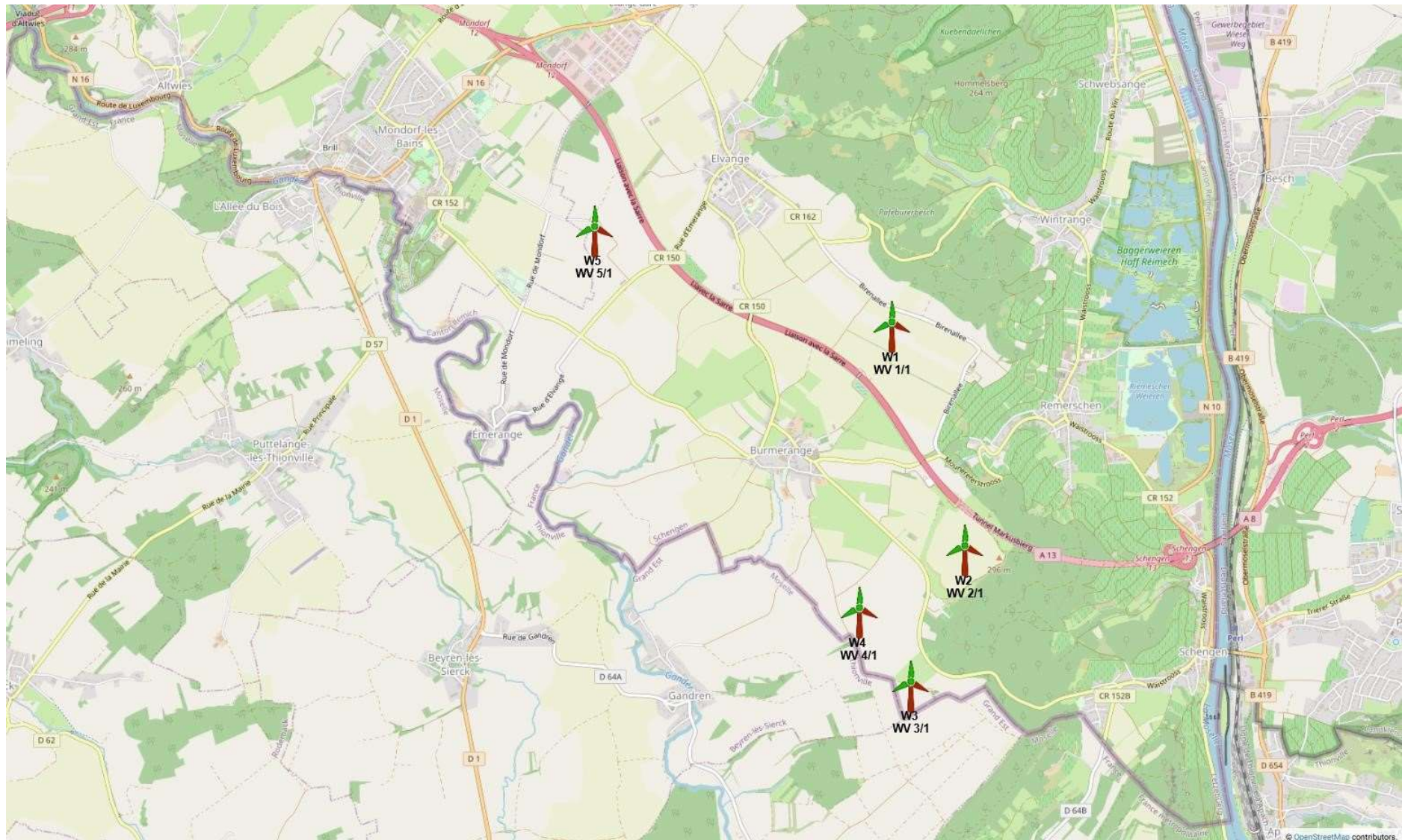


Figure 2.1: Configuration du parc éolien à étudier; cartes : [19.1, 19.2].

N° de rapport : I17-SE-2022-375

Expertise sur l'adéquation du site d'implantation des éoliennes selon DIBt 2012 dans le parc éolien de Burmerange Page **14** sur 36

3 Comparaison des conditions de vent

3.1 Principes de base

Le client a transmis des conditions de vent spécifiques au site, divisées en au moins 12 secteurs [22.1]. Ces données sont considérées comme exactes et représentatives du site.

Afin de déterminer les conditions de vent à hauteur de moyeu sur chaque site d'installation, les données de la distribution des vents [22.1] sont converties à toutes les hauteurs nécessaires, si celles-ci ne sont pas disponibles. La conversion s'effectue sur la base d'un profil de vent logarithmique et de l'exposant de hauteur α déterminé à l'emplacement de la distribution des vents. Lors de la conversion verticale, le paramètre de forme k est supposé invariant avec l'altitude et seul le paramètre d'échelle A est converti. Il n'y a pas de conversion horizontale de l'emplacement des données de vent vers l'emplacement de l'éolienne correspondante. Si plusieurs distributions de vent sont disponibles dans [22.1], elles sont attribuées aux éoliennes correspondantes. Le tableau 3.1 présente l'une des conditions de vent transmises dans [22.1] pour le site. Si plusieurs distributions de vent ont été prises comme base, elles sont indiquées dans l'annexe 1.

Tableau 3.1: Conditions de vent sur le site WV 1/1 [22.1]

UTM WGS84 Zone 32			A [m/s]	k [-]	p [%]	v _{ave} [m/s]
X [m]	Y [m]	h _{wv} [m]				
306858	5485701	165.0				
Secteur Direction du vent [°]						
N 0			5.0	1.96	4.4	-
NNO 30			6.5	2.32	15.3	-
ONO 60			6.1	2.34	7.1	-
O 90			6.1	2.33	3.8	-
OSO 120			5.5	1.80	2.6	-
SSO 150			5.7	1.83	2.7	-
S 180			7.3	2.39	9.6	-
2E SEMAINE DE GROSSESSE 210			8.4	2.21	23.5	-
WSW 240			9.3	2.38	15.9	-
W 270			7.5	1.87	8.9	-
WNW 300			6.1	2.08	3.7	-
NNW 330			4.8	1.95	2.4	-
Total			7.4	2.21	99.9	6.50

3.2 Comparaison v_{ave} et v_{m50}

3.2.1 Comparaison de la vitesse moyenne du vent v_{ave}

Si l'essai de type d'une éolienne à examiner conformément au point 1.2.1 est basé sur un paramètre de forme k avec $k = 2,0$, la comparaison des conditions de vent par rapport à la vitesse moyenne du vent v_{ave} à la hauteur du moyeu de chaque éolienne prévue doit être effectuée de telle sorte que:

- i. $v_{ave, NH} / v_{ave, TP} \leq 0,95$ ou
- ii. $v_{ave, NH} / v_{ave, TP} \leq 1.00$ et $k_{NH} \geq 2.00$

Si l'essai de type d'une éolienne à examiner conformément au paragraphe 1.2.1 est basé sur un paramètre de forme k avec $k \neq 2,0$, la comparaison des conditions de vent par rapport à la vitesse moyenne du vent v_{ave} de chaque éolienne prévue doit être effectuée comme suit:

- i. Comparaison de la fonction de densité de probabilité des vitesses de vent spécifiques au site pdf_{NH} avec la fonction de densité de probabilité de l'essai de type pdf_{TP} dans une plage de $v_{ave} - 2v_{ave}$ selon [6] ou $0.2v_{ref} - 0.4v_{ref}$ selon [7]. Dans la zone à examiner, la condition $pdf_{NH} \leq pdf_{TP}$ doit être remplie.

Le résultat du calcul de la vitesse moyenne du vent v_{ave} et des paramètres de forme k de la distribution de Weibull à la hauteur du moyeu de chaque nouvelle éolienne prévue est présenté dans le tableau 3.2 et comparé aux conditions de vent de conception de l'éolienne en question.

Tableau 3.2: Comparaison de la vitesse moyenne du vent v_{ave} à la hauteur du moyeu des éoliennes prévues

W-Nr. interne	$v_{ave, NH}$ [m/s]	$v_{ave, TP}$ [m/s]	k_{NH} [-]	k_{TP} [-]	Si $k_{TP} = 2$: $v_{ave, NH} / v_{ave, TP}$ [-]	Si $k_{TP} \neq 2$: $pdf_{NH} \leq pdf_{TP}$	Preuve possible (conformément au point 1.2.1)	Comparaison de charge nécessaire (conformément au point 1.2.3)
W1	6.48	7.80	2.21	2.00	0.83	-	Oui	Non
W2	6.44	7.80	2.18	2.00	0.83	-	Oui	Non
W3	6.49	7.80	2.20	2.00	0.83	-	Oui	Non
W4	6.33	7.80	2.20	2.00	0.81	-	Oui	Non
W5	6.15	7.80	2.20	2.00	0.79	-	Oui	Non

3.2.2 Comparaison de la vitesse du vent sur 50 ans v_{m50}

La comparaison de la vitesse du vent sur 50 ans $vm50_{NH}$ à la hauteur du moyeu de l'éolienne prévue avec la valeur de conception peut se faire de deux manières. Si l'éolienne doit être installée dans une zone de vent inférieure ou égale à la zone de vent sur laquelle se base l'essai de type, il suffit de prouver que la zone de vent selon l'essai de type couvre la zone de vent du site considéré [1.1]. Si ce n'est pas le cas, il faut prouver que la vitesse de vent de 50 ans $vm50_{TP}$ selon l'essai de type couvre la vitesse de vent de 50 ans à la hauteur du moyeu de l'éolienne prévue sur le site [1.1, 4, 5]. Pour ce faire, la vitesse du vent sur 50 ans $vm50_{NH}$ doit être déterminée sur le site à l'aide d'une méthode appropriée (p. ex. la méthode Gumbel [10]).

Selon DIBt 2012 [1.1], ou selon DIN EN 1991-1-4/NA:2010-12 avec DIN EN 1991-1-4:2010-12 [9], les sites à vérifier sont basés sur la zone de vent indiquée dans le tableau 3.3, conformément à [11], et sur

la catégorie de terrain, sur la base des informations obtenues lors de la visite du site et des données satellites utilisées [13]. Comme, selon [1.1], dans les zones de transition entre les catégories de terrain, les équations de la catégorie inférieure doivent toujours être appliquées, la comparaison est effectuée dans de tels cas sur la base des équations de la catégorie de terrain inférieure.

Le tableau 3.3 ci-dessous compare les conditions de vent de conception en ce qui concerne v_{m50} avec les conditions de vent spécifiques au site. Si les éoliennes prévues doivent être installées dans une zone de vent couverte par les conditions de vent de conception, l'adéquation du site en ce qui concerne v_{m50} est démontrée. Si le site n'est pas couvert par les conditions de vent de conception $v_{m50, TP}$ des éoliennes prévues, la preuve est apportée par une estimation des vents extrêmes spécifiques au site [22.2]. Les résultats de l'estimation des vents extrêmes spécifiques au site sont supposés être corrects et représentatifs du site. Si la preuve ne peut être apportée par aucune des deux méthodes, elle peut éventuellement l'être par une comparaison de charge des charges extrêmes selon la section 1.2.3.

Tableau 3.3: Comparaison de la vitesse du vent sur 50 ans v_{m50} à la hauteur du moyeu des éoliennes prévues

W-Nr. interne	WZ _{TP}	GK _{TP}	$v_{m50, TP}$ [m/s]	WZ _{NH}	GK _{NH}	$v_{m50, NH}$ [1.1] [m/s]	$v_{m50, NH}$ [22.2] [m/s]	Preuve possible (conformément au point 1.2.1)	Comparaison de charge nécessaire (conformément au point 1.2.3)
W1	S	S	42.50	2 ₋	2 ₋	-	36.30 ³	Oui	Non
W2	S	S	42.50	2 ₋	2 ₋	-	36.30 ²	Oui	Non
W3	S	S	42.50	2 ₋	2 ₋	-	36.30 ²	Oui	Non
W4	S	S	42.50	2 ₋	2 ₋	-	36.30 ²	Oui	Non
W5	S	S	42.50	2 ₋	2 ₋	-	36.30 ²	Oui	Non

3.3 Comparaison de l'intensité effective des turbulences I_{eff}

3.3.1 Conditions de vent de conception concernant l'intensité des turbulences

Pour l'intensité des turbulences à hauteur de moyeu d'une éolienne homologuée selon la norme DIBt 2012 [1.1], il existe cinq catégories de valeurs de conception dépendant de la vitesse du vent, qui sont mentionnées dans la norme DIN EN IEC 614001:2019 [6] et qui doivent servir de base à l'homologation. Pour les catégories de turbulence, on distingue les catégories prédéfinies A+, A, B, C et la catégorie S, qui peut être définie par le fabricant de l'éolienne.

Pour les éoliennes homologuées selon la norme DIBt 2004 [2], la vitesse du vent doit être prise en catégorie de turbulence A, définie dans la norme DIN EN 61400-1:2004 [8], comme condition de vent de dimensionnement en ce qui concerne l'intensité de la turbulence. Pour les éoliennes homologuées selon la norme DIBt 1993 [3], une intensité de turbulence moyenne effective constante I_{eff} doit être utilisée comme condition de vent de conception.

² Comme le site se trouve en dehors de l'Allemagne, la preuve ne peut être apportée que par [22.2].

³ L'évaluation des vents extrêmes a été réalisée pour une hauteur de moyeu de 175 m et couvre également de manière conservatrice la hauteur de moyeu de 162,5 m selon [22.2].

Le tableau 3.4 présente les différentes catégories de turbulences et leur évolution.

Tableau 3.4: Conditions de vent de conception dépendant des directives en ce qui concerne l'intensité des turbulences

v _{hub} [m/s]	DIBt 1993 [3]	DIBt 2004 [2]	DIBt 2012 [1.1] DIN EN IEC 61400-1:2019 [6]				
	Moyenne constante	NTM A [8] [-]	NTM A+ [6] [-]	NTM A [5, 6, 7] [-]	NTM B [5, 6, 7] [-]	NTM C [5, 6, 7] [-]	S [-]
2	-	0.570	0.639	0.568	0.497	0.426	-
3		0.420	0.471	0.419	0.366	0.314	-
4		0.345	0.387	0.344	0.301	0.258	-
5		0.300	0.337	0.299	0.262	0.224	-
6		0.270	0.303	0.269	0.236	0.202	-
7		0.249	0.279	0.248	0.217	0.186	-
8		0.233	0.261	0.232	0.203	0.174	-
9		0.220	0.247	0.220	0.192	0.165	-
10		0.210	0.236	0.210	0.183	0.157	-
11		0.202	0.227	0.201	0.176	0.151	-
12		0.195	0.219	0.195	0.170	0.146	-
13		0.189	0.213	0.189	0.165	0.142	-
14		0.184	0.207	0.184	0.161	0.138	-
15		0.180	0.202	0.180	0.157	0.135	-
16		0.176	0.198	0.176	0.154	0.132	-
17		0.173	0.194	0.173	0.151	0.130	-
18		0.170	0.191	0.170	0.149	0.127	-
19		0.167	0.188	0.167	0.146	0.125	-
20		0.165	0.185	0.165	0.144	0.124	-
21		0.163	0.183	0.163	0.142	0.122	-
22		0.161	0.181	0.161	0.141	0.121	-
23		0.159	0.179	0.159	0.139	0.119	-
24		0.158	0.177	0.157	0.138	0.118	-
25		0.156	0.175	0.156	0.136	0.117	-
26		0.155	0.174	0.154	0.135	0.116	-
27		0.153	0.172	0.153	0.134	0.115	-
28		0.152	0.171	0.152	0.133	0.114	-
29		0.151	0.170	0.151	0.132	0.113	-
30		0.150	0.169	0.150	0.131	0.112	-
Moyenne constante		0.200	-	-	-	-	-

La comparaison de la courbe de turbulence spécifique au site avec les valeurs de conception dépendant de la vitesse du vent se fait, pour les éoliennes dont le type a été testé selon la norme DIBt 2004 [2], sur la base des valeurs pour la catégorie de turbulence A selon [1.1, 5, 6, 7], car celles-ci couvrent également les valeurs selon [8].

3.3.2 Détermination de l'intensité de la turbulence ambiante

3.3.2.1 Base de données

Pour l'essentiel, la turbulence ambiante I_{amb} dépend des conditions de vent, de l'orographie et de la rugosité du terrain. Les conditions de vent de [22.1] ne contiennent aucune information sur l'intensité de la turbulence ambiante sur le site, celle-ci a donc été déterminée sur la base des informations disponibles sur l'occupation du sol [13] et la topographie [14] sur le site à hauteur du moyeu.

3.3.2.2 Procédure

L'intensité de la turbulence ambiante I_{amb} décrit en général la variation de la vitesse du vent autour de sa valeur moyenne dans un intervalle de temps de 600 s. Elle est calculée à partir de l'écart-type entre la vitesse du vent et la valeur moyenne. Elle doit être calculée comme le quotient de l'écart type σ de la vitesse du vent et de la vitesse moyenne correspondante v_{ave} dans un intervalle de 600 s [6, 7, 8]. Si l'on dispose de données de mesure du vent sur le site, on peut I_{amb} directement, resp. I_{char} en ajoutant 1 fois l'écart-type. écart-type de l'intensité de la turbulence ambiante σ_{σ} [4, 8] et I_{rep} en additionnant 1,28 fois l'écart-type de l'intensité de la turbulence ambiante σ_{σ} [6, 7] à I_{amb} . En déterminant le cisaillement du vent, il est possible d'extrapoler à la hauteur du moyeu l'intensité caractéristique ou représentative de la turbulence déterminée à la hauteur de la mesure. En l'absence de mesure, l'intensité de la turbulence ambiante doit être déterminée par calcul. Pour le calcul de I_{amb} , les informations relatives à l'occupation du sol de chaque site d'éolienne à étudier sont tirées du jeu de données CORINE [13] avec un rayon de 20 km autour du site. Les surfaces de différentes couvertures du sol contenues dans [13] sont converties en surfaces avec une longueur de rugosité z_0 selon les recommandations de l'Atlas éolien européen [12]. Tous les éléments de rugosité situés à l'intérieur d'un secteur sont finalement pondérés en fonction de la distance et de la taille et convertis en une valeur de rugosité représentative pour ce secteur. L'intensité de la turbulence ambiante à la hauteur du moyeu de l'éolienne concernée est calculée à partir des longueurs de rugosité présentes dans le secteur, à l'aide d'un profil dépendant de la longueur de rugosité z_0 .

Comme la directive de l'Institut allemand des techniques de construction DIBt 2012 [1.1] exige des valeurs de turbulence pour différentes vitesses de vent afin de déterminer l'adéquation du site en ce qui concerne les intensités de turbulence effectives, les valeurs déterminées pour la L'intensité de la turbulence ambiante est basée sur le NTM selon [6, 7]. La courbe de turbulence déterminée est soumise à un écart-type σ_{σ} dépendant de la vitesse du vent, qui suit également l'évolution du NTM [15], en s'appuyant sur la méthode développée par le Risø DTU National Laboratory dans le Windfarm Assessment Tool. Les valeurs de l'écart-type de l'intensité de la turbulence ambiante σ_{σ} sont choisies de telle sorte que la somme intensité de turbulence de référence selon NTM et 1 fois σ_{σ} donne la courbe de référence selon [6, 7].

L'intensité représentative des turbulences I_{rep} est déterminée selon la procédure décrite pour chaque éolienne à hauteur de moyeu à prendre en considération, dont le type/l'essai individuel a été vérifié selon DIBt 2012 [1.1], et sert de base aux calculs ultérieurs. Pour les installations dont les essais de type/individuels sont basés sur la directive DIBt 2004 [2] ou DIBt 1993 [3], l'intensité caractéristique des turbulences I_{char} est utilisée.

3.3.2.3 Étude de la complexité topographique des sites des installations

Le modèle d'altitude utilisé, issu du jeu de données SRTM [14], est disponible avec une résolution d'environ 30 m et est utilisé pour déterminer la complexité topographique des sites.

Les sites de toutes les installations à considérer sont examinés et évalués en fonction de la complexité topographique, sur la base des prescriptions de la norme DIN EN IEC 61400-1:2019 [6] en vigueur, car la complexité topographique peut provoquer une distorsion et donc un écart de la structure de turbulence par rapport aux conditions de vent de dimensionnement.

La complexité d'un site est représentée par la pente du terrain et les écarts de la topographie du terrain par rapport à un plan approché. Pour ce faire, au moins 37 plans de compensation sont créés selon les critères de [6] en utilisant la méthode des moindres carrés. La norme DIN EN IEC 61400-1:2019 [6] laisse la possibilité d'élargir le plan approché de $2 z_{hub}$ pour les secteurs circulaires de rayon $5 z_{hub}$ sous le vent par rapport à la position de l'éolienne à étudier. Cette extension est utilisée pour l'évaluation de la complexité dans la présente expertise. En fonction de la pente des plans approchés, de l'écart du modèle numérique de terrain [14] par rapport à celle-ci et de la part d'énergie éolienne provenant du secteur considéré, on peut calculer les indices *TSI* pour la pente du terrain et *TVI* pour l'écart du terrain. Si l'un des indices calculés dépasse les valeurs seuils indiquées dans le tableau 3.5, le site étudié doit être considéré comme topographiquement complexe, la valeur seuil dépassée à chaque fois déterminant la catégorie de complexité du terrain L, M ou H.

Selon [6], sur les sites topographiquement complexes, il faut augmenter la composante longitudinale de l'intensité de la turbulence ambiante en la multipliant par un paramètre de structure de la turbulence C_{CT} conformément au tableau 3.5.

Tableau 3.5: Critères de complexité et C_{CT} selon DIN EN IEC 61400-1:2019 [6]

Rayon de l'aire circulaire autour de l'éolienne [m]	Amplitude du secteur de l'approximation Plan de compensation [°]	Valeurs seuils (limite inférieure)					
		Indice de pente du terrain <i>STI</i> [°]			Indice de déviation du terrain <i>TVI</i> [%]		
		L	M	H	L	M	H
5 z_{hub}	360	10	15	20	2	4	6
5 z_{hub}							
10 z_{hub} 20 z_{hub}							
	30						
	Catégorie						
	L	M			H		
ccT	1.05	1.10			1.15		

Les résultats de l'évaluation de la complexité topographique des éoliennes à étudier sont présentés dans le tableau 2.1.

3.3.2.4 Intensité représentative des turbulences

Le tableau 3.6 présente les intensités de turbulence représentatives déterminées par secteur selon la méthode décrite au paragraphe 3.3.2.2, par rapport à une vitesse de vent de 15 m/s, pour une position d'installation.

Tableau 3.6: Intensité représentative des turbulences pour un site donné

Emplacement: W1	NH: 162,5 m	I_{rep} [-]
Secteur	Direction du vent [°]	
N	0	0.135
NNO	30	0.127
ONO	60	0.130
O	90	0.134
OSO	120	0.123
SSO	150	0.131
S	180	0.129
SSW	210	0.123
WSW	240	0.126
W	270	0.124
WNW	300	0.127
NNW	330	0.134

3.3.3 Détermination de l'intensité effective des turbulences I_{eff}

3.3.3.1 Principes de base

L'intensité effective des turbulences I_{eff} est définie comme l'intensité moyenne des turbulences qui, sur la durée de vie d'une éolienne, provoque la même fatigue des matériaux que les différentes turbulences régnant sur le site. L'indice de matériau qui intervient de manière déterminante dans le calcul de l'intensité effective des turbulences est le coefficient de ligne de Wöhler m . Dans la présente expertise, chaque éolienne à considérer est basée sur le coefficient de ligne de Wöhler spécifique à l'installation, qui représente la composante la moins structurale. Il s'agit en général des pales de rotor d'une éolienne, qui sont couvertes par des coefficients de Wöhler compris entre $m = 10$ pour les matériaux composites renforcés de fibres de verre et $m = 15$ pour les matériaux composites renforcés de fibres de carbone. Ainsi, tous les composants d'une éolienne sont pris en compte.

En principe, l'intensité effective de la turbulence I_{eff} au niveau d'une éolienne se compose de l'intensité de la turbulence ambiante et de l'intensité de la turbulence induite par le sillage d'autres éoliennes, ce que l'on appelle "l'effet de sillage". A cet égard, il convient de tenir compte de différentes prises en compte de l'écart-type de l'intensité de turbulence ambiante σ_σ , selon la directive sur laquelle on se base.

Le calcul de l'intensité de turbulence induite s'effectue selon les explications données dans [10], chapitre 2.4.4, si tous les paramètres de l'installation nécessaires à cet effet sont disponibles ou ont pu

être déterminés de manière à les couvrir de manière conservatrice. Dans le cas contraire, le calcul de l'intensité de turbulence induite s'effectue selon les explications de [16] et les annexes informatives de [6] et [7]. La procédure générale de détermination de l'intensité de turbulence effective I_{eff} s'effectue dans les deux cas conformément aux exigences de [6] et [7].

L'intensité de la turbulence induite est décrite dans [10] comme une fonction qui dépend des distances entre les éoliennes, de l'intensité de la turbulence ambiante et de paramètres spécifiques à l'installation. Ces paramètres sont d'une part le coefficient de poussée c_t , qui dépend de la vitesse du vent, et d'autre part le nombre de tours rapides λ , qui dépend de la vitesse du vent, de l'éolienne induisant des turbulences. Le modèle représente aussi bien le sillage complet que le sillage non complet derrière une éolienne. Les valeurs spécifiques à l'installation c_t et λ sont transmises par le fabricant de l'installation. Si ces valeurs ne sont pas disponibles pour une éolienne à considérer, elles sont déterminées, si possible, sur la base des paramètres de l'installation tels que la vitesse de rotation et le diamètre du rotor, ou remplacées par une courbe standard couvrant de manière conservatrice. La détermination de I_{eff} se base sur les conditions géométriques et les conditions de vent régnant sur le site. Comme [10] ne précise pas la zone d'influence des éoliennes entre elles, les zones d'influence totale (le rotor de l'éolienne est entièrement dans le sillage d'une autre éolienne) et partielle (le rotor de l'éolienne n'est que partiellement dans le sillage d'une autre éolienne) sont prises en compte dans le calcul de I_{eff} , ce qui constitue l'approche la plus conservatrice.

L'intensité des turbulences induites est décrite dans [16] comme une fonction qui dépend des distances s entre les éoliennes et du coefficient de poussée c_t qui dépend de la vitesse du vent. Les valeurs c_t spécifiques à l'installation sont transmises par le fabricant de l'installation. Si ces valeurs ne sont pas disponibles pour une éolienne à considérer, elles sont remplacées par une courbe standard couvrant de manière conservatrice. La détermination de I_{eff} se base sur les conditions géométriques et les conditions de vent régnant sur le site. Comme [16] donne une indication claire sur la zone d'influence des éoliennes entre elles, c'est précisément cette zone qui est prise en compte pour le calcul de I_{eff} .

La détermination de l'intensité des turbulences induites doit être effectuée tant qu'une éolienne se trouve à une distance s inférieure à $10 D$ de l'installation à considérer [6, 7, 8]. Si la distance s de toutes les éoliennes situées dans l'environnement est supérieure à $10 D$, par rapport à l'éolienne qui induit respectivement des turbulences, l'influence de cette dernière ne doit plus être prise en compte.

Aucune des directives et normes utilisées [1.1 - 8] ne définit, en ce qui concerne la distance s des éoliennes, de limites jusqu'auxquelles les résultats des intensités de turbulence effectives I_{eff} sont applicables ou résistants. Il en va de même pour les modèles de turbulence décrits dans [10] et [16]. Différentes études et élaborations ont montré que les modèles de turbulence fournissent des résultats conservateurs et peuvent être sollicités même pour des distances relatives s faibles, de l'ordre de $3 D \geq s \geq 2 D$. Ces résultats peuvent être utilisés aussi bien pour une comparaison des conditions de vent conformément au point 1.2.1 que pour une vérification conformément au point 1.2.3. Les résultats des intensités de turbulence effectives déterminées pour des distances s entre les éoliennes inférieures à $2.0 D$ ne devraient plus être utilisés pour un calcul de charge spécifique au site (voir section 1.2.3). Dans ces situations de suivi, un arrêt est nécessaire. Les distances s inférieures à $2.0 D$, associées à une grande différence de hauteur de moyeu des éoliennes considérées, constituent une exception. Dans une telle situation, les conditions géométriques peuvent faire en sorte que le sillage de l'éolienne induisant des turbulences s'écoule au-dessus ou en dessous de la surface du cercle rotor de l'éolienne influencée. Dans ce cas, il n'est pas nécessaire d'imposer des restrictions d'exploitation ou des arrêts.

Les valeurs déterminées pour I_{eff} sont comparées aux valeurs de conception qui ont servi de base à l'essai de type/individuel de l'installation considérée. Si les valeurs obtenues ne sont pas supérieures

aux valeurs de conception, l'adéquation du site est considérée comme prouvée en ce qui concerne l'intensité effective des turbulences. Si les valeurs sont supérieures aux valeurs de conception, l'adéquation du site en termes d'intensité effective des turbulences ne peut pas être prouvée par comparaison avec les valeurs de conception. Dans ce cas, la preuve de l'adéquation du site peut toutefois être apportée par un calcul de charge spécifique au site effectué par le fabricant de l'installation ou par un tiers indépendant.

3.3.3.2 Restrictions d'exploitation sectorielles (WSM) prises en compte

Lors du calcul de l'intensité effective des turbulences I_{eff} , il est possible de tenir compte des restrictions d'exploitation sectorielles (WSM) sur les éoliennes. Les restrictions d'exploitation peuvent résulter par exemple de distances s trop faibles ou faire partie de l'autorisation des éoliennes déjà existantes. En outre, une WSM peut être utilisée pour réduire l'influence d'une nouvelle éolienne prévue sur l'installation existante à prendre en compte, de telle sorte que l'éolienne prévue n'ait plus d'influence significative sur l'intensité effective des turbulences I_{eff} d'une installation existante ou pour empêcher le dépassement de l'intensité effective des turbulences I_{eff} sur cette dernière. Les restrictions d'exploitation mentionnées ci-après constituent toujours une exigence minimale dont la faisabilité technique n'a pas été vérifiée. Dans la mesure du possible, pour chaque MES appliquée à une éolienne ayant une influence, une MES alternative appliquée à l'éolienne influencée est indiquée. Il s'agit généralement d'une déconnexion de l'éolienne influencée, étant donné que les charges sur une éolienne déconnectée sont inférieures aux charges en régime de flux libre. Les alternatives indiquées constituent une proposition, mais ne sont pas prises en compte dans le calcul de l'intensité effective des turbulences I_{eff} . Si une alternative désignée doit être prise en compte, cela nécessite une nouvelle évaluation de l'intensité effective des turbulences I_{eff} .

Aucune restriction d'exploitation sectorielle n'a été prise en compte dans le calcul de l'intensité effective des turbulences I_{eff} .

3.3.3.3 Résultat

Le tableau 3.7 suivant présente les intensités de turbulence effectives déterminées pour les éoliennes prévues en fonction de la vitesse du vent. Les intensités de turbulence effectives déterminées selon la directive applicable sont comparées à la courbe de référence selon DIBt 2012 [1.1] ou à la courbe de référence de l'essai de type correspondant. Les dépassements sont indiqués en **gras italique**.

Tableau 3.7: Intensités de turbulence effectives déterminées I_{eff}

z_{hub}	W1	W2	W3	W4	W5	Référence Classe A
3	0.299	0.308	0.312	0.317	0.299	0.419
4	0.245	0.256	0.258	0.264	0.245	0.344
5	0.213	0.225	0.225	0.232	0.213	0.299
6	0.191	0.204	0.203	0.210	0.191	0.269
7	0.175	0.190	0.186	0.194	0.176	0.248
8	0.164	0.177	0.172	0.179	0.164	0.232
9	0.154	0.167	0.161	0.167	0.155	0.220
10	0.147	0.159	0.152	0.157	0.148	0.210
11	0.141	0.151	0.145	0.149	0.142	0.201
12	0.136	0.144	0.140	0.142	0.137	0.195
13	0.131	0.139	0.135	0.137	0.133	0.189
14	0.128	0.134	0.131	0.132	0.130	0.184
15	0.125	0.131	0.128	0.129	0.127	0.180
16	0.122	0.127	0.125	0.126	0.124	0.176
17	0.120	0.124	0.123	0.123	0.122	0.173
18	0.118	0.122	0.121	0.121	0.120	0.170
19	0.116	0.120	0.118	0.119	0.118	0.167
20	0.114	0.118	0.117	0.117	0.116	0.165

3.4 Écoulement oblique δ

Étant donné qu'aucun site d'installation d'une nouvelle installation planifiée et homologuée selon le DIBt 2012 n'est un site topographiquement complexe selon la norme DIN EN IEC 61400-1:2019 [6], il n'est pas nécessaire de procéder aux vérifications selon le paragraphe 1.2.2. L'indication des valeurs est purement informative et une comparaison avec les conditions de vent de conception n'est pas effectuée dans la présente expertise. Les valeurs peuvent toutefois servir de base à un calcul de charge éventuellement requis par le fabricant de l'installation.

La détermination du flux oblique δ_{NH} s'effectue conformément à [6] et correspond à l'inclinaison du plan approximatif d'un rayon de $5 z_{hub}$ devant l'éolienne et de $2 z_{hub}$ derrière l'éolienne par rapport à la ligne médiane horizontale du secteur considéré.

Le tableau 3.8 ci-dessous présente les résultats de l'écoulement oblique δ_{NH} déterminé.

N° de rapport : I17-SE-2022-375

Expertise sur l'adéquation du site d'implantation des éoliennes selon la norme DIBt 2012 dans le parc éolien de Burmerange

Tableau 3.8: Moyenne du site du courant oblique δ_{NH} des nouvelles éoliennes prévues

W-Nr. interne	δ_{NH} [°]
W1	1.4
W2	2.0
W3	1.3
W4	0.8
W5	0.1

Étant donné qu'aucun site d'installation d'une installation nouvellement planifiée et homologuée selon DIBt 2012 n'est 1:2019 [6] topographiquement complexe, il n'est pas nécessaire de fournir des preuves. Les valeurs sont indiquées à titre purement informatif et une comparaison avec les conditions de vent de conception n'a pas lieu dans la présente expertise. Les valeurs sont à la base d'un calcul de charge éventuellement nécessaire par le fabricant de l'installation.

3.5 Exposant d'altitude α

conforme à la norme DIN EN IEC 61400 selon le paragraphe 1.2.2

L'exposant d'altitude est déterminé conformément à la norme DIN EN IEC 61400-1:2019 [6] sur la base des rugosités déterminées sur le site. Les influences de la stabilité de l'atmosphère ne sont pas prises en compte. La détermination ne tient pas compte de l'influence de la topographie, qui peut être négligée pour les hauteurs de moyeu étudiées ici, tant qu'il n'y a pas d'arêtes de terrain abruptes ou de pentes raides à proximité immédiate de l'éolienne considérée. La valeur moyenne du site de l'exposant de hauteur α_{NH} , pondérée par l'énergie de toutes les directions de vent, doit être déterminée pour toutes les installations à considérer dans une zone allant de l'extrémité inférieure de la pale à l'extrémité supérieure de la pale.

Le tableau 3.9 suivant présente les résultats des moyennes de site de l'exposant d'altitude α_{NH} .

Tableau 3.9 Moyenne du site de l'exposant d'altitude α_{NH} des nouvelles éoliennes prévues

W-Nr. interne	α_{NH} [-]
W1	0.16
W2	0.16
W3	0.16
W4	0.16
W5	0.16

Étant donné qu'aucun site d'installation d'une installation nouvellement planifiée et homologuée selon DIBt 2012 n'est 1:2019 [6] topographiquement complexe, il n'est pas nécessaire de fournir des preuves. Les valeurs sont indiquées à titre purement informatif et une comparaison avec les conditions de vent de conception n'a pas lieu dans la présente expertise. Les valeurs sont à la base d'un calcul de charge éventuellement nécessaire par le fabricant de l'installation.

3.6 Densité de l'air ρ

conforme à la norme DIN EN IEC 61400 selon le paragraphe 1.2.2

Le calcul de la densité moyenne de l'air ρ_{NH} à la hauteur du moyeu de chaque éolienne est effectué conformément à la norme DIN ISO 2553 [17]. La base de données utilisée est la température moyenne à 2 m au-dessus du sol, disponible sur une grille de 1 km sur la période 1981 - 2010 [18] et convertie conformément à [17] à la hauteur de moyeu à analyser.

Le tableau 3.10 ci-dessous présente les résultats de la densité moyenne de l'air du site ρ_{NH} pour chaque éolienne à étudier.

Tableau 3.10: Densité moyenne de l'air du site ρ_{NH} des nouvelles éoliennes prévues

W-Nr. interne	ρ_{NH} [kg/m ³]
W1	1.231
W2	1.227
W3	1.229
W4	1.233
W5	1.237

Étant donné qu'aucun site d'installation d'une installation nouvellement planifiée et homologuée selon DIBt 2012 n'est 1:2019 [6] topographiquement complexe, il n'est pas nécessaire de fournir des preuves. Les valeurs sont indiquées à titre purement informatif et une comparaison avec les conditions de vent de conception n'a pas lieu dans la présente expertise. Les valeurs sont à la base d'un calcul de charge éventuellement nécessaire par le fabricant de l'installation.

3.7 Intensité extrême des turbulences I_{ext}

un appareil conforme à la norme
DIN EN IEC 61400 selon le
paragraphe 1.2.2

peuvent toutefois être
placés en ei.

L'intensité de la turbulence extrême est déterminée en considérant toutes les situations de sillage qui se produisent et représente le résultat avec la valeur la plus élevée, au centre de toutes les situations de sillage considérées. Si aucune situation de sillage n'est à prendre en compte, la valeur de l'intensité de turbulence représentative la plus élevée est indiquée. Conformément à [6], toutes les valeurs indiquées tiennent compte du paramètre de structure de turbulence à appliquer C_{CT} .

Le tableau 3.11 ci-dessous présente les intensités de turbulence extrêmes $I_{ext, NH}$ déterminées en fonction de la vitesse du vent.

Tableau 3.11: Intensités de turbulences extrêmes déterminées $I_{ext, NH}$

v_{hub}	W1	W2	W3	W4	W5
3	0.314	0.338	0.368	0.368	0.313
4	0.258	0.281	0.311	0.311	0.258
5	0.224	0.247	0.276	0.276	0.224
6	0.202	0.225	0.253	0.253	0.202
7	0.186	0.208	0.236	0.236	0.186

Étant donné qu'aucun site d'installation d'une installation nouvellement planifiée et homologuée selon DIBt 2012 n'est 1:2019 [6] topographiquement complexe, il n'est pas nécessaire de fournir des preuves. Les valeurs sont indiquées à titre purement informatif et une comparaison avec les conditions de vent de conception n'a pas lieu dans la présente expertise. Les valeurs sont à la base d'un calcul de charge éventuellement nécessaire par le fabricant de l'installation.

8	0.174	0.193	0.216	0.216	0.174
9	0.164	0.181	0.201	0.201	0.164
10	0.157	0.170	0.187	0.186	0.157
11	0.151	0.161	0.174	0.174	0.151
12	0.146	0.153	0.162	0.162	0.146
13	0.142	0.147	0.154	0.153	0.141
14	0.138	0.142	0.146	0.146	0.138
15	0.135	0.138	0.141	0.140	0.135
16	0.132	0.134	0.136	0.136	0.132
17	0.129	0.131	0.132	0.132	0.129
18	0.127	0.129	0.130	0.130	0.127
19	0.125	0.126	0.126	0.126	0.125
20	0.123	0.124	0.124	0.124	0.123

4 Résumé

4.1 Nouvelles éoliennes prévues

Les conditions d'implantation définies au paragraphe 1.2.1 ont été déterminées pour les nouvelles éoliennes prévues et comparées aux valeurs de conception. Cette comparaison a montré que

- i. W1 - W5 ne présentent pas de dépassement de la vitesse moyenne du vent $v_{hub, NH}$ par rapport à la vitesse du vent de dimensionnement $v_{hub, TP}$ (voir paragraphe 3.2.1),
- ii. W1 - W5 doivent être installées sur un site ne dépassant pas la valeur de conception de la vitesse de vent de 50 ans $vm50, TP$ (voir la section 3.2.2) et
- iii. W1 - W5 ne présentent pas de dépassement de l'intensité effective des turbulences I_{eff} par rapport aux valeurs de conception (voir paragraphe 3.3.3.3).

L'adéquation du site selon le DIBt 2012 [1.1] est prouvée pour les éoliennes W1 - W5 par la présente expertise.

Le tableau suivant résume les résultats obtenus pour démontrer l'adéquation du site d'implantation des éoliennes prévues.

Tableau 4.1 : Résumé des résultats des éoliennes prévues

W-Nr. interne	Fabricant	Type d'installation	NH [m]	FEH [m]	Aptitude du site prouvée selon le DIBt 2012
W1	Enercon	E-175 EP5 / 6.000 kW	162.5	0.0	Oui
W2	Enercon	E-175 EP5 / 6.000 kW	162.5	0.0	Oui
W3	Enercon	E-175 EP5 / 6.000 kW	162.5	0.0	Oui
W4	Enercon	E-175 EP5 / 6.000 kW	162.5	0.0	Oui
W5	Enercon	E-175 EP5 / 6.000 kW	162.5	0.0	Oui

5 Visite du site

Conformément à l'exigence de la directive DIBt version octobre 2012 [1.1] d'une visite du site, celle-ci a été effectuée le 29 juin 2022 par Oeko-Bureau s.à r.l. [23].

La visite du site sert à déterminer ou à comparer la nature du terrain avec les données satellites existantes sur la rugosité [13] et, le cas échéant, sur les courbes de niveau [14]. Les éventuelles structures individuelles pertinentes pour les turbulences ont été examinées et documentées. La documentation du site confirme les rugosités de base et les résultats relatifs à la complexité.

Liste des abréviations et des symboles

Abréviation	Signification
BImSchG	Loi fédérale sur la protection contre les immissions
DIBt	Institut allemand de la technique de construction
DIN	Institut allemand de normalisation
EN	Norme européenne
ETM	Modèle de turbulence extrême
ETRS89	Système européen de référence terrestre de 1989
GK	Gauss-Krüger, catégorie de terrain
H	Catégorie de complexité Forte
IEC	Commission électrotechnique internationale
L	Catégorie de complexité Faible
M	Catégorie de complexité Moyenne
NA	Annexe nationale
NTM	Modèle de turbulence normal
PEL	Charge pseudo-équivalente
pdf	Fonction de densité de probabilité
TK	Catégorie de turbulence, turbulence de conception
TP	Examen de type
UTM	Projection Mercator Transverse Universelle
WEA	Installation(s) d'énergie éolienne
WGS84	Système géodésique mondial (dernière révision en 2004)
WSM	Wind Sector Management, Restrictions d'exploitation par secteur
WV	Répartition du vent
WZ	Zone de vent

Symbole	Signification	Unité
A	Paramètres d'échelle de la distribution de Weibull	[m/s]
ccT	Paramètres de structure de la turbulence	[-]
c_t	Coefficient de cisaillement	[-]
D	Diamètre du rotor	[m]
FEH	Rehaussement des fondations	[m]
h_{wV}	Hauteur des conditions de vent / répartition du vent sur le sol	[m]
λ_{amb}	Intensité de la turbulence ambiante	[-]
i_C	Indice de complexité	[-]
i_{char}	Intensité caractéristique des turbulences	[-]
i_{ext}	Intensité extrême des turbulences	[-]

l_{ef}	Intensité effective des turbulences à hauteur de moyeu	[-]
l_{rep}	Intensité représentative des turbulences	[-]
k	Paramètres de forme de la distribution de Weibull	[-]
λ	Vitesse de rotation rapide	[-]
m	Coefficient de la ligne de Wöhler	[-]
NH	Hauteur du moyeu	[m]
p	Fréquence sectorielle	[%]
P_N	Puissance nominale	[kW]
s	Distance sans dimension entre les éoliennes, par rapport au diamètre du rotor le plus grand	[-]
Symbole	Signification	Unité
τ	Durée de vie	[a]
TSI	Indice de pente du terrain	[°]
TVI	Indice de déviation du terrain	[%]
v_{avE}	Moyenne annuelle de la vitesse du vent à hauteur de moyeu	[m/s]
v_{hub}	Vitesse du vent à hauteur de moyeu	[m/s]
v_{in}	Vitesse du vent d'enclenchement de l'éolienne	[m/s]
$vm50$	Moyenne sur 10 minutes de la vitesse du vent sur 50 ans à hauteur du moyeu	[m/s]
v_{cut}	Vitesse de coupure du vent de l'éolienne	[m/s]
v_r	Vitesse nominale du vent de l'éolienne	[m/s]
v_{ref}	Valeur de conception de la moyenne sur 10 minutes de la vitesse du vent sur 50 ans	[m/s]
X	Valeur à droite	[m]
Y	Valeur haute	[m]
z_0	Longueur de rugosité	[m]
z_{hub}	Hauteur de moyeu des éoliennes considérées	[m]
α	Exposant d'altitude	[-]
δ	Courant oblique	[°]
ρ	Étanche à l'air	[kg/m ³]
σ	Écart-type de la vitesse du vent	[m/s]
$\sigma\sigma$	écart-type de l'intensité des turbulences	[-]

Bibliographie

- [1.1] *Deutsches Institut für Bautechnik – DIBt -, Berlin; Referat I 8 Bautechnisches Prüfamt Grundlagen der Standsicherheit; Richtlinie für Windenergieanlagen – Einwirkungen und Standsicherheitsnachweise für Turm und Gründung; Fassung Oktober 2012 und korrigierte Fassung März 2015;*
- [1.2] *DKE Deutsche Kommission Elektrotechnik Elektronik Informationstechnik; DKE/AK 383.0.01/Untergruppe DIBt2012 an die PG „Windenergieanlagen“ des DIBt; Anwendung der DIBt 2012 zur Prüfung der Standorteignung, 30.01.2015;*
- [2] *Deutsches Institut für Bautechnik – DIBt -, Berlin; Richtlinie für Windenergieanlagen – Einwirkungen und Standsicherheitsnachweise für Turm und Gründung; Fassung März 2004; Schriften des Deutschen Instituts für Bautechnik Reihe B, Heft 8;*
- [3] *Deutsches Institut für Bautechnik – DIBt -, Berlin; Richtlinie für Windkraftanlagen – Einwirkungen und Standsicherheitsnachweise für Turm und Gründung; Fassung Juni 1993; 2. Überarbeitete Auflage 1995; Schriften des Deutschen Instituts für Bautechnik Reihe B, Heft 8;*
- [4] *International Electrotechnical Commission (IEC); IEC 61400-1 Edition 2.0 International Standard Wind turbine generator systems – Part 1: Safety requirements;*
- [5] *International Electrotechnical Commission (IEC); IEC 61400-1 Edition 3.0 International Standard Wind turbines – Part 1: Design requirement; Mit Implementierung von 61400-1/A1, Amendment 1, 2009;*
- [6] *Deutsches Institut für Normung e.V.; DIN EN IEC 61400-1:2019; Windenergieanlagen – Teil 1: Auslegungsanforderungen (IEC61400-1:2019; Deutsche Fassung EN IEC 61400-1:2019; Dezember 2019;*
- [7] *Deutsches Institut für Normung e.V.; DIN EN 61400-1:2011-08 Windenergieanlagen – Teil 1: Auslegungsanforderungen (IEC 61400-1:2005 + A1:2012); Deutsche Fassung EN 61400-1:2005 + A1:2010;*
- [8] *Deutsches Institut für Normung e.V.; DIN EN 61400-1:2004 Windenergieanlagen – Teil 1: Sicherheitsanforderungen (IEC 61400-1:1999); Deutsche Fassung EN 61400-1:2004;*
- [9] *Deutsches Institut für Normung e.V.; DIN EN 1991-1-4/NA:2010-12 mit DIN EN 1991-1-4:2010-12; Nationaler Anhang – Eurocode 1: Einwirkungen auf Tragwerke – Teil 1-4: Allgemeine Einwirkungen: Windlasten;*
- [10] *ECN Solar & Wind Energy, J.W.M. Dekker und J.T.G. Pierik [Hrsg.]: European Wind Turbine Standards II, Petten, (NLD), 1998;*
- [11] *Deutsches Institut für Bautechnik; Windzonen nach Verwaltungsgrenzen; Windzonen_nach_Verwaltungsgrenzen.xlsx; Stand 02.06.2022;*
- [12] *European Wind Atlas, Risø National Laboratory, Roskilde (DK), 1989 Troen, Ib; Petersen, Erik L.;*
- [13] *European Environment Agency; Corine Land Cover (CLC) 2018, Version 20 (final version); Veröffentlicht im Juni 2019;*

- [14] *U.S. Geological Survey Earth Resources Observation & Science Center (EROS); SRTM 1 Arc-Sec Global; Download am 02.12.2016;*
- [15] *Risø DTU National Laboratory for Sustainable Energy, Windfarm Assessment Tool Version 3.3.0.128;*
- [16] *Frandsen, Sten T. (2007): Turbulence and turbulence-generated structural loading in wind turbine clusters. Roskilde (DK);*
- [17] *Deutsches Institut für Normung e.V.; DIN ISO 2533; Normatmosphäre; Dezember 1979;*
- [18] *Deutscher Wetterdienst; DWD Climate Data Center (CDC), Vieljährige mittlere Raster der Lufttemperatur (2m) für Deutschland 1981-2010, Version v1.0.;*
- [19.1] *OpenStreetMap und Mitwirkende; SRTM | Kartendarstellung: OpenTopoMap (CC-BY-SA); Siehe auch: <https://creativecommons.org>;*
- [19.2] *Microsoft Corporation; © 2019 Digital Globe © CNES (2019) Distribution Airbus DS; Siehe auch: <https://www.microsoft.com/en-us/maps/product>;*
- [20] *Rodenhausen M., Moser W., Hülsmann C., Bergemann C., Könker M., McKenna R.; Prüfung der Standorteignung für Windenergieanlagen: Ein pragmatischer Ansatz; Ernst & Sohn Verlag für Architektur und technische Wissenschaften GmbH & Co. KG, Berlin. Bautechnik 93 (2016) Heft 10;*
- [21] *EMCA S.A.; E-Mail mit dem Betreff: "Vibration studies" vom 11.10.2022 und vom 09.09.2022;*
- [22.1] *UL International GmbH; DETERMINATION OF REFERENCE POINTS STATISTICS; UL-FRA-WP2214489628-01; 08.09.2022;*
- [22.2] *anemos Gesellschaft für Umweltmeteorologie mbH; Extremwindabschätzung auf Basis des anemos Windatlas für Deutschland am Standort Boernereng, 22-349-7022776-Rev.00-Ex-PP; 27.10.2022;*
- [23] *Oeko-Bureau s.à r.l.; Standortdokumentation für ein Gutachten zur Standorteignung nach DIBt 2012 für den Windpark Boernereng; I17-SV-2022-059; 17.10.2022;*
- [24.1] *ENERCON GmbH; Technisches Datenblatt General Design Conditions ENERCON Windenergieanlage E-175 EP5 / 6000 kW; Dokument ID: D02772001/0.1-de; 29.09.2022;*
- [24.2] *WRD Wobben Research and Development GmbH; E-Mail mit dem Betreff: "Introduction E-175 EP5" am 30.09.2022;*

Annexe 1 / Conditions de vent transmises sur le site

Tableau A.1: Conditions de vent sur le site WV 2/1 [22.1]

UTM WGS84 Zone 32			A [m/s]	k [-]	p [%]	V _{ave} [m/s]
X [m]	Y [m]	h _{wv} [m]				
307362	5483966	165.0				
Secteur Direction du vent [°]						
N 0			5.4	1.96	8.1	-
NNO 30			6.3	2.32	10.7	-
ONO 60			6.1	2.34	6.7	-
O 90			6.4	2.33	5.1	-
OSO 120			6.5	1.80	4.1	-
SSO 150			7.2	1.83	5.7	-
S 180			8.5	2.39	12.5	-
2E SEMAINE DE GROSSESSE 210			8.6	2.21	18.1	-
WSW 240			8.5	2.38	13.6	-
W 270			7.2	1.87	7.6	-
WNW 300			5.9	2.08	4.3	-
NNW 330			5.4	1.95	3.6	-
Total			7.3	2.18	100.1	6.50

Tableau A.2: Conditions de vent sur le site WV 3/1 [22.1]

UTM WGS84 Zone 32			A [m/s]	k [-]	p [%]	V _{ave} [m/s]
X [m]	Y [m]	h _{wv} [m]				
306906	5482938	165.0				
Secteur Direction du vent [°]						
N 0			4.8	1.96	3.5	-
NNO 30			6.5	2.32	12.3	-
ONO 60			6.5	2.34	9.2	-
O 90			6.9	2.33	6.4	-
OSO 120			6.6	1.80	4.2	-
SSO 150			6.8	1.83	5.3	-
S 180			8.1	2.39	11.6	-
2E SEMAINE DE GROSSESSE 210			8.5	2.21	16.6	-
WSW 240			8.8	2.38	15.2	-
W 270			7.4	1.87	8.1	-

WNW 300	5.8	2.08	4.9	-
NNW 330	4.9	1.95	2.7	-
Total	7.4	2.20	100.0	6.50

Tableau A.3: Conditions de vent sur le site WV 4/1 [22.1]

UTM WGS84 Zone 32			A [m/s]	k [-]	p [%]	v _{ave} [m/s]
X [m]	Y [m]	h _{wv} [m]				
306528	5483517	165.0				
Secteur Direction du vent [°]						
N 0			4.7	1.96	3.5	-
NNO 30			6.4	2.32	12.3	-
ONO 60			6.2	2.34	9.2	-
O 90			6.5	2.33	6.4	-
OSO 120			6.4	1.80	4.2	-
SSO 150			6.6	1.83	5.3	-
S 180			7.9	2.39	11.6	-
2E SEMAINE DE GROSSESSE 210			8.2	2.21	16.6	-
WSW 240			8.7	2.38	15.2	-
W 270			7.3	1.87	8.1	-
WNW 300			5.8	2.08	4.9	-
NNW 330			4.8	1.95	2.7	-
Total			7.2	2.20	100.0	6.40

Tableau A.4: Conditions de vent sur le site WV 5/1 [22.1]

UTM WGS84 Zone 32			A [m/s]	k [-]	p [%]	v _{ave} [m/s]
X [m]	Y [m]	h _{wv} [m]				
304592	5486520	165.0				
Secteur Direction du vent [°]						
N 0			5.2	1.96	4.9	-
NNO 30			6.3	2.32	14.1	-
ONO 60			6.1	2.34	6.5	-
O 90			5.7	2.33	4.6	-
OSO 120			5.4	1.80	2.8	-
SSO 150			6.3	1.83	4.8	-
S 180			7.7	2.39	11.6	-

2E SEMAINE DE GROSSESSE 210	8.1	2.21	19.0	-
WSW 240	8.3	2.38	14.4	-
W 270	7.0	1.87	9.3	-
WNW 300	5.5	2.08	5.1	-
NNW 330	5.2	1.95	2.9	-
Total	7.0	2.20	100.0	6.20