

3 juin 2019

Analyse des potentiels éoliens pour
Atlasdesvents.ch
Moyenne annuelle modélisée de la
vitesse et de la direction du vent
Rapport sur l'actualisation de l'atlas
des vents de 2016



energie schweiz
Unser Engagement: unsere Zukunft.

Impressum

Date : 02.05.2019

Lieu : Berne

Mandant :

Office fédéral de l'énergie OFEN, 3003 Berne

Mandataire :

Meteotest AG, Fabrikstrasse 14, 3012 Berne

Auteurs :

Sara Koller, Meteotest

Tanja Humar, Meteotest

Numéro de contrat OFEN : SI/401394-01

La responsabilité quant au contenu et aux conclusions de ce rapport incombe exclusivement à ses auteurs.

Office fédéral de l'énergie OFEN

Mühlestrasse 4, CH-3063 Ittigen ; adresse postale : CH-3003 Berne

Tél. +41 58 462 56 11 · Fax +41 58 463 25 00 · contact@bfe.admin.ch · www.bfe.admin.ch

Résumé

L'Office fédéral de l'énergie (OFEN) a publié une première édition de l'atlas des vents de la Suisse en 2016. L'atlas des vents de la Suisse contient des cartes de la vitesse du vent à cinq hauteurs différentes : 50, 75, 100, 125 et 150 m au-dessus du niveau du sol. Ces cartes de la vitesse du vent se fondent sur une modélisation du vent à l'aide d'un logiciel Computational Fluid Dynamics (CFD) tenant compte de la topographie, de la rugosité du terrain et de mesures du vent.

Après la publication, des retours ont révélé par exemple que les vitesses du vent en Suisse orientale dans l'atlas des vents 2016 sont trop élevées par rapport aux mesures. L'OFEN a donc décidé de faire élaborer une nouvelle édition de l'atlas des vents de la Suisse intégrant des mesures du vent supplémentaires dans la modélisation.

Le présent rapport décrit les données de topographie et de rugosité qui ont servi de base pour la modélisation CFD avec une résolution horizontale de 100 m. Les champs de vent ont été calculés avec le modèle CFD WindSim. Des études de sensibilité aux différents paramètres ont été réalisées en vue d'une détermination optimale des conditions-cadres pour la modélisation.

396 mesures du vent ont été utilisées pour la version actuelle de l'atlas des vents, contre 97 pour la version 2016. La forte augmentation résulte de la prise en compte de stations de mesure de MétéoSuisse et IMIS près du sol. Les nouvelles données ont été préparées de façon méthodique comme pour l'atlas des vents de 2016, c.-à-d. épurées et corrigées pour représenter les conditions à long terme.

Les vitesses et directions du vent modélisées ont été validées à l'aide de données de mesure sélectionnées pour chaque espace naturel.

Les différences au niveau des résultats de la modélisation entre l'atlas des vents 2016 et l'atlas des vents 2019 sont démontrées et les motifs correspondants sont exposés en détail. Par ailleurs, une analyse quantifie le degré d'incertitude des vitesses du vent calculées en fonction des différents espaces naturels de la Suisse.

L'OFEN met l'atlas des vents 2019 à la disposition du public sur www.atlasdesvents.ch.



Table des matières

1	Utilisation et limites de l'atlas des vents	6
2	Données d'entrée topographiques pour la modélisation du vent	10
2.1	Données altimétriques	10
2.2	Rugosité du terrain	12
3	Calcul des champs de vent.....	14
3.1	Le modèle CFD WindSim.....	14
3.2	Études de sensibilité pour la détermination des conditions-cadres	14
3.3	Calcul des champs de vent	15
4	Statistiques de vent	17
4.1	Acquisition de données sur les vents.....	17
4.2	Rectification et comparaison des données sur les vents pendant de nombreuses années..	18
5	Cartes de vent	20
6	Intégration de l'atlas des vents de la Suisse dans l'infrastructure fédérale de données géographiques.....	23
7	Validation	24
7.1	Validation de la vitesse du vent	24
7.2	Validation de la direction du vent	25
8	L'atlas des vents 2019 contre l'atlas des vents 2016.....	28
8.1	Comparaison avec l'atlas des vents 2016	28
9	Incertitude.....	30

1 Utilisation et limites de l'atlas des vents

Pour interpréter correctement les résultats de l'atlas des vents, il est important de mettre en perspective l'atlas des vents par rapport aux expertises de vent qui sont effectuées pour la planification de parcs éoliens. La méthodologie, la précision, les limites et l'objectif de l'atlas des vents sont ici comparés à ceux des expertises de vent effectuées pour des sites particuliers.

Mesure du vent / carte des ressources éoliennes / atlas des vents

Le bon déroulement de mesures du vent pour la planification de parcs éoliens est clairement régi par des normes (CEI 61400-12-1, Directives techniques pour les installations éoliennes, partie 6 : Détermination du potentiel éolien et des rendements énergétiques). Pour planifier un parc éolien sur les reliefs complexes de la Suisse, il est absolument indispensable de mesurer le vent dans la zone du projet pendant une période d'au moins un an avec des capteurs haut de gamme calibrés Measnet et sur au moins les deux tiers de la hauteur du moyeu de la future éolienne (voir Measnet V2.0, 2016). Les mesures du vent doivent également être comparées aux stations météorologiques permanentes avoisinantes ou aux données de réanalyse sur plusieurs années. Les statistiques du vent corrigées à long terme reflètent des valeurs fiables au niveau du point de mesure.

Des modèles de vent sont utilisés pour extrapoler la mesure du vent sur le périmètre d'un parc éolien planifié. Une telle modélisation du vent permet d'obtenir une carte des ressources éoliennes. Une carte des ressources éoliennes permet de déterminer en détail les conditions de vent au niveau des emplacements des futures éoliennes, de calculer les rendements énergétiques et de déterminer la rentabilité. Les statistiques de vent à long terme servent de paramètre pour calibrer la modélisation. En règle générale, de telles modélisations sont calculées avec une résolution horizontale de 25 m afin de pouvoir reproduire le site du futur parc éolien aussi fidèlement que possible et la circulation du vent de manière réaliste. Sur des reliefs complexes, une mesure du vent peut être utilisée pour mettre à l'échelle un champ de vent sur un rayon maximal de deux à trois kilomètres autour de l'emplacement de la mesure, conformément à la norme CEI (CEI 61400-12-1 et CEI 61400-1). En d'autres termes : une carte des ressources éoliennes couvre une zone maximale de trois kilomètres autour du point de mesure du vent. En dehors de ce rayon, les incertitudes deviennent trop importantes pour permettre des calculs fiables du rendement énergétique.

Par opposition, le but d'un atlas des vents est de fournir une vue d'ensemble à grande échelle et aussi homogène que possible des conditions de vent sur l'ensemble d'une région ou d'un pays. Contrairement à une carte des ressources éoliennes effectuée pour la planification d'un parc éolien, on attache davantage d'attention dans un atlas des vents à la disponibilité homogène des informations à grande échelle qu'à une précision absolue au niveau d'un site particulier. L'atlas des vents est un outil approprié pour une évaluation approximative des conditions de vent et pour déterminer les sites où les vitesses de vent sont plus ou moins élevées dans une région donnée. Pour cette raison, les données d'un atlas des vents sont interprétées plutôt de manière relative et non absolue. L'objectif d'un atlas des vents est d'identifier les zones d'une région ou d'un pays qui présentent un potentiel en termes d'utilisation de l'énergie éolienne. Toutefois, si des valeurs exactes sont requises, par exemple pour calculer les rendements énergétiques pour un modèle économique, il est impératif d'effectuer des mesures, une analyse approfondie des données et une modélisation à haute résolution du vent. C'est absolument indispensable et ces résultats ont plus de valeur que ceux d'un atlas des vents.

Bilan : un atlas des vents ne convient pas au développement du site d'un parc éolien, les valeurs étant trop imprécises, pas assez fiables et les incertitudes trop importantes. Il est impératif d'effectuer une mesure du vent sur place. S'il existe une mesure du vent ou une carte des ressources éoliennes au niveau d'un site, la pondération de ces résultats doit dans tous les cas être supérieure aux résultats de l'atlas des vents. Les mesures



correspondant à la norme CEI font office de référence pour le site et ses environs. Elles ne doivent en aucun cas être remises en cause par d'éventuels écarts dans l'atlas des vents.

Une carte des ressources éoliennes pour la Suisse ?

La création d'un atlas des vents couvrant l'ensemble de la Suisse et répondant aux exigences décrites ci-dessus relatives à une carte des ressources éoliennes nécessiterait un réseau national de mesures du vent conformes aux normes en matière d'énergie éolienne et espacées de max. 6 km. Une telle densité de mesures de haute qualité n'existe ni en Suisse, ni ailleurs dans le monde. Dans l'atlas des vents 2019, 396 statistiques de vent au total ont été utilisées. Une grande partie de ces mesures ne répondent pas aux exigences ci-dessus concernant les cartes de ressources éoliennes. De nombreuses mesures ont été effectuées à une hauteur de 5 à 10 m au-dessus du niveau du sol et calculées par extrapolation aux hauteurs prises en compte dans l'atlas des vents (50 m, 75 m, 100 m, 125 m, 150 m). Les propriétés de l'atmosphère à 5 m sont très différentes de celles à 150 m au-dessus du niveau du sol.

Par ailleurs, la modélisation du vent pour l'ensemble de la Suisse devrait avoir une résolution de 25 m. L'atlas des vents de la Suisse 2019 a été calculé avec une résolution de 100 m, soit une résolution quatre fois plus grossière que pour une carte des ressources éoliennes. Le temps et les calculs nécessaires pour cette résolution étaient déjà considérables. L'investissement pour la modélisation d'un maillage avec une résolution de 25 m pour l'ensemble de la Suisse serait disproportionné et irréalisable.

Bilan : il est techniquement impossible de créer un atlas des vents qui couvrirait l'ensemble du territoire suisse avec une précision correspondante à celle d'une carte des ressources éoliennes d'un développeur de projet. La pondération du résultat d'une mesure du vent ou d'une carte des ressources éoliennes effectuées pour la planification d'un parc éolien doit dans tous les cas être nettement supérieure au résultat de l'atlas des vents.

Vents thermiques dans l'atlas des vents de la Suisse

Le modèle Computational Fluid Dynamics WindSim, utilisé pour modéliser l'atlas des vents 2016 et l'atlas des vents 2019, permet d'obtenir d'excellents résultats sur des reliefs complexes. WindSim ne simulant que des conditions moyennes et ne prenant pas en compte la dimension temporelle dans ce modèle, les systèmes de vent induits thermiquement ne peuvent cependant pas être pris en compte. WindSim ne permet par exemple pas de décrire correctement les conditions au niveau du coude du Rhône, de sorte que la représentation de cette région dans l'atlas des vents est faussée. En réalité, les régions comme le coude du Rhône comportent des statistiques du vent très particulières : soit il n'y a pratiquement pas de vent, soit le vent de vallée atteint une force considérable. La répartition de fréquence a deux maximums. En conséquence, des rendements élevés peuvent être obtenus à de tels endroits avec des vitesses de vent moyennes relativement faibles. Cet effet n'a pu être reproduit dans aucune des cartes et atlas des vents précédents.

Bilan : le modèle ne permet pas de reproduire les vents thermiques de manière réaliste. De plus, en raison de la distribution particulière des vitesses de vent aux endroits où les thermiques sont importants, le vent moyen ne permet pas de déterminer le rendement. Le résultat d'une mesure du vent sur site a dans tous les cas beaucoup plus de valeur que celui de l'atlas des vents.

Prise en compte de mesures effectuées à faible hauteur au-dessus du sol

Dans l'atlas des vents de la Suisse 2016, aucune mesure du vent près du sol (provenant par exemple de stations météorologiques) n'a été prise en compte. À cette époque, on pensait que l'erreur liée à l'extrapolation horizontale de mesures du vent élevées était inférieure à l'erreur liée à l'extrapolation verticale de mesures près du sol, bien que la distance d'extrapolation horizontale dépasse parfois 20 km. Une des conclusions des résultats de l'atlas des vents 2016 était que les

conditions de vent étaient souvent surestimées en ce qui concerne l'extrapolation horizontale. On a donc supposé que plus il y a de mesures prises en compte dans les calculs, plus le degré d'incertitude diminue. Par conséquent, l'atlas des vents 2019 comprend également des mesures près du sol, bien que celles-ci ne correspondent pas aux normes en matière d'énergie éolienne.

Cette hypothèse s'est avérée généralement correcte : en moyenne dans toute la Suisse, et en particulier dans les régions moins complexes, les mesures supplémentaires ont permis de réduire le degré d'incertitude. Sur des reliefs plus complexes, ce n'était pas le cas partout : au niveau de plusieurs sites dans le Jura, la validation a montré que les conditions sur les hauteurs du Jura ne sont pas correctement reflétées. La prise en compte de mesures près du sol effectuées par MétéoSuisse dans les vallées a ainsi engendré sur les hauteurs du Jura des valeurs relativement faibles dans l'atlas des vents. Dans le cas le plus extrême, l'écart entre la mesure et l'atlas des vents était de 2 m/s.

Bilan : l'augmentation du nombre de mesures du vent disponibles, y compris de stations météorologiques non conformes aux normes en matière d'énergie éolienne, ont accru la précision moyenne dans l'atlas des vents 2019 sur l'ensemble de la Suisse. Cette mesure a notamment permis une reproduction nettement plus réaliste des conditions de vent, en particulier dans des régions où l'atlas des vents 2016 affichait des valeurs beaucoup trop élevées. Sur des reliefs complexes, comme sur les hauteurs du Jura, on a toutefois constaté des écarts parfois importants par rapport aux mesures. En effet, la prise en compte de mesures de Meteosuisse effectuées à faible hauteur au-dessus du sol et dans les vallées, tend à générer une sous-estimation des conditions de vent sur les crêtes environnantes. Le résultat d'une expertise de site a donc dans tous les cas beaucoup plus de valeur que celui de l'atlas des vents.

Pertinence de l'atlas des vents aux points de mesure

Pour un calibrage homogène à grande échelle de l'atlas des vents, toutes les statistiques des vents dans un rayon de 50 km sont incluses en fonction de la distance pour chaque point du maillage de 100 x 100 m. Lorsque l'on consulte les vitesses du vent à l'emplacement et à la hauteur d'une mesure qui a été prise en compte dans l'atlas des vents, des écarts par rapport aux mesures peuvent survenir, malgré que la mesure ait été prise en compte pour le calibrage de l'atlas des vents. Ceci est dû au fait qu'une coordonnée est représentée par une cellule de 100 x 100 m et ne sera donc jamais influencée à 100% par une seule climatologie, mais que d'autres climatologies sont également prises en compte à raison d'un faible pourcentage.

À cela s'ajoute le fait que pas toutes les mesures de vent existantes ne sont reprises dans l'atlas des vents, mais qu'un certain nombre de mesures a été utilisé pour la validation de l'atlas des vents. Toutes les mesures mises à disposition étant soumises à un accord de confidentialité, il est impossible de les lister explicitement.

Bilan : en raison de la moyenne spatiale de la cellule de maillage modélisée et de l'influence des statistiques de vent environnantes, la valeur affichée au niveau d'un point de mesure dans l'atlas des vents peut différer de la valeur effectivement mesurée. Cela est dû à la nécessité d'une mise à l'échelle homogène des conditions de vent sur l'ensemble du territoire suisse. Le résultat d'une mesure du vent sur site a dans tous les cas beaucoup plus de valeur que celui de l'atlas des vents.

Incertainité de l'atlas des vents

La détermination des incertitudes de l'atlas des vents est décrite dans le rapport final. Il s'agit d'ordres de grandeur d'incertitudes : à certains endroits, les écarts peuvent être considérablement plus importants que les valeurs moyennes indiquées dans le rapport.

Il est impossible de fournir une indication exacte quant à l'incertitude étant donné que la Suisse présente un paysage hétérogène avec une topographie parfois extrêmement complexe, et que les



statistiques du vent présentent des différences de qualité et de hauteur au-dessus du niveau du sol ainsi qu'une répartition de densité inégale des points de mesure en fonction de l'espace naturel. Les meilleures statistiques de vent ayant été utilisées pour le calibrage de l'atlas des vents, les statistiques de vent d'une qualité appropriée étaient insuffisantes pour permettre une validation en profondeur. Par conséquent, seul un ordre de grandeur de l'incertitude a été mentionné, et ce uniquement aux plus basses hauteurs prises en compte dans l'atlas des vents. Pour les cartes à partir de 100 m au-dessus du niveau du sol, peu de mesures élevées étaient disponibles, de sorte que la priorité était de les utiliser dans l'atlas des vents et non pour la validation.

Bilan : les incertitudes calculées reposent sur une base de données relativement mince et reflètent un ordre de grandeur. Il s'agit d'incertitudes moyennes. À certains endroits, les écarts peuvent être considérablement supérieurs aux valeurs annoncées dans l'atlas des vents. Pour les sites avec des vitesses de vent élevées, l'incertitude doit être considérée comme ayant tendance à être supérieure à la valeur moyenne déterminée. Le résultat d'une mesure du vent sur site a dans tous les cas beaucoup plus de valeur que celui de l'atlas des vents.

2 Données d'entrée topographiques pour la modélisation du vent

2.1 Données altimétriques

Le modèle de terrain utilisé repose sur le modèle numérique de terrain MNT25¹ de l'Office fédéral de topographie swisstopo. Le modèle de terrain SRTM a été utilisé pour les régions situées hors de la Suisse et qui ne sont pas couvertes par le MNT25. SRTM est l'acronyme de Shuttle Radar Topography Mission. Enregistrées par radar depuis l'espace en février 2000, ces données de télédétection ont permis d'obtenir un modèle numérique de terrain cohérent sur l'ensemble de notre planète. Un set de données SRTM d'une résolution horizontale de 100 m a été utilisé dans le cadre de ce projet (source : CGIAR CSI²).

Afin d'élaborer un modèle cohérent à partir des deux modèles de terrain MNT25 et SRTM, les étapes suivantes ont été mises en œuvre :

La résolution horizontale de 25 m du MNT25 a été transposée dans une résolution de 100 m à l'aide de l'outil ArcGIS « Aggregate » et de la technique « Mean ». Une valeur moyenne a été constituée à partir de 16 cellules de 25x25 m et attribuée à la nouvelle cellule de 100x100 m.

Dans les régions périphériques présentant moins de 16 cellules de 25 m du MNT25, les cellules les plus à l'extérieur ont été tronquées. Le nouveau modèle de terrain sera appelé MNT100 (Illustration 2) dans ce qui suit.

Le MNT100 et le SRTM présentent des différences importantes, en particulier dans les vallées de montagne. En effet, le modèle de terrain SRTM est souvent très imprécis dans les zones à fortes pentes. Ces imprécisions engendrent des incohérences au niveau des transitions lors de l'assemblage des deux modèles de terrain. Pour lisser les transitions entre MNT100 et SRTM, une zone de transition plus large de 900 m a été définie le long de la frontière suisse (voir Illustration 1). Cette zone de transition a quant à elle été divisée en trois sous-zones. MNT100 et SRTM ont été pondérés pour chaque sous-zone en fonction des facteurs énumérés dans le Tableau 1. Une transition homogène de MNT100 à SRTM a ainsi été établie.

La zone de transition est située à l'extérieur de la frontière suisse et n'a qu'un impact marginal sur le champ de vent en Suisse. Une zone de transition brute aurait cependant engendré des problèmes numériques et des instabilités dans les calculs des champs de vent.

Tableau 1: Pondération des modèles de terrain dans la zone de transition entre MNT100 et SRTM.

	Zone intérieure	Zone de transition (900 m)			Zone extérieure
		Sous-zone I (300 m)	Sous-zone II (300 m)	Sous-zone III (300 m)	
MNT100	1	0,75	0,5	0,25	0
SRTM	0	0,25	0,5	0,75	1

¹ https://shop.swisstopo.admin.ch/fr/products/height_models/dhm25

² <https://cgiiarcsi.community/data/srtm-90m-digital-elevation-database-v4-1/>

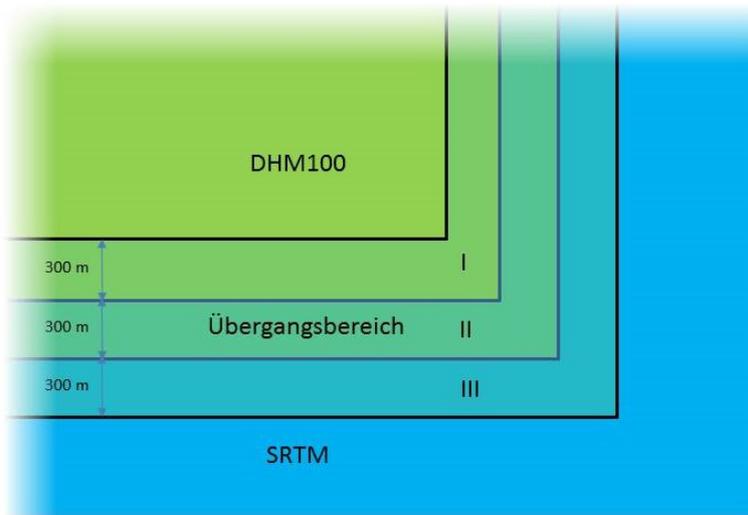


Illustration 1 : Zone de transition de MNT100 à SRTM.

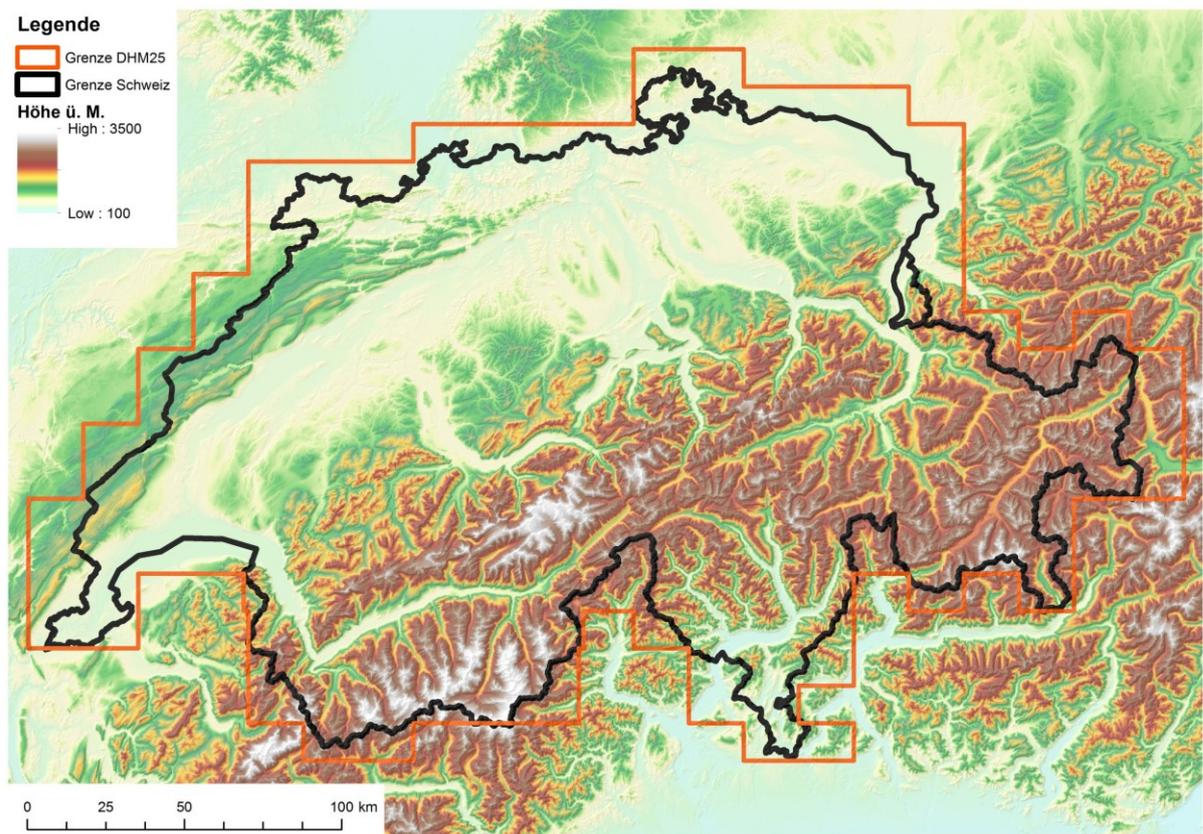


Illustration 2 : Modèle de terrain corrigé, composé des jeux de données MNT100 et SRTM.

2.2 Rugosité du terrain

Les données de rugosité en Suisse ont été définies à l'aide des surfaces primaires du jeu de données Vector25³ de l'Office fédéral de la topographie swisstopo. Vector25 est le modèle numérique du territoire de la Suisse et est mis à jour chaque année. Les données CORINE⁴ ont été utilisées pour les zones hors de la Suisse qui ne sont pas couvertes par le jeu de données Vector25. Le projet « CORINE Land Cover » (Coordination of Information on the Environment) fournit des données cohérentes et comparables sur la couverture du sol en Europe. La dernière mise à jour en date du jeu de données a eu lieu en 2012.

Tableau 2: Une sélection de classes Vector25, ainsi que la classe CORINE correspondante et la longueur de rugosité.

Vector25		CORINE		Longueur de rugosité [cm]
ID	Description	Classe	Description	
Z_Fels	Rocher	332	Roches nues	20
Z_Fluss	Rivière	511	Cours et voies d'eau	2
Z_Gebue	Buisson	324	Landes et broussailles	50
Z_Geroel	Pierrier	333	Espaces avec peu de végétation	2
Z_Glet	Glacier	335	Glaciers et neiges éternelles	5
Z_ObstAn	Verger	222	Vergers et petits fruits	50
Z_Reben	Vignes	221	Vignobles	20
Z_See	Lac	512	Plans d'eau	2
Z_Siedl	Zone d'habitation	112	Zones urbanisées	100
Z_SumGeb	Marais et buissons	322	Tourbières et pâturages naturels	10
Z_Sumpf	Marais	322	Tourbières et pâturages naturels	10
Z_SumWa	Marais en forêt	313	Forêts mélangées	150
Z_SumWaO	Marais en forêt clairsemée	312	Forêts de conifères	10
Z_Uebrig	Autre type de sol	231	Pelouses et pâturages naturels	2
Z_Wald	Forêt	313	Forêts mélangées	150
Z_WaldOf	Forêt clairsemée	312	Forêts de conifères	100

³ https://shop.swisstopo.admin.ch/fr/products/maps/digital_maps/vector

⁴ https://www.dlr.de/eoc/desktopdefault.aspx/tabid-11882/20871_read-48836

Une longueur de rugosité correspondant aux données CORINE (Tableau 2) a été affectée aux différentes classes du jeu de données Vector25. Plusieurs classes d'utilisation des sols CORINE, telles que la classe « Pelouses et pâturages naturels », ne sont pas présentes dans le jeu de données Vector25. Dans de tels cas, le modèle de répartition des deux jeux de données a été soigneusement comparé. De plus, des photographies aériennes ont été consultées à des fins de contrôle. Les analyses ont montré par exemple que la classe « Z_Uebrig » de Vector25 coïncide largement avec la classe « Pelouses et pâturages naturels » de CORINE. La longueur de rugosité correspondante (2 cm) a donc été attribuée à la classe « Z-Uebrig » de Vector25. Une classe CORINE correspondante a ainsi été affectée à chaque classe Vector25 afin de garantir un jeu de données cohérent.

Le jeu de données vectorielles sur l'utilisation des sols Vector25, complété par les DONNÉES CORINE, a été converti en fichier matriciel d'une résolution horizontale de 25 m. La résolution a ensuite été transposée à 100 m à l'aide de l'outil « Resample » d'ArcGIS en utilisant la technique « Majority ». Autrement dit, chaque cellule de 100 m se voit attribuer la longueur de rugosité qui est la plus présente sur les 16 cellules de 25 m qui lui correspondent. L'illustration 3 affiche le résultat des conversions, qui a servi de base pour calculer les champs de vent.

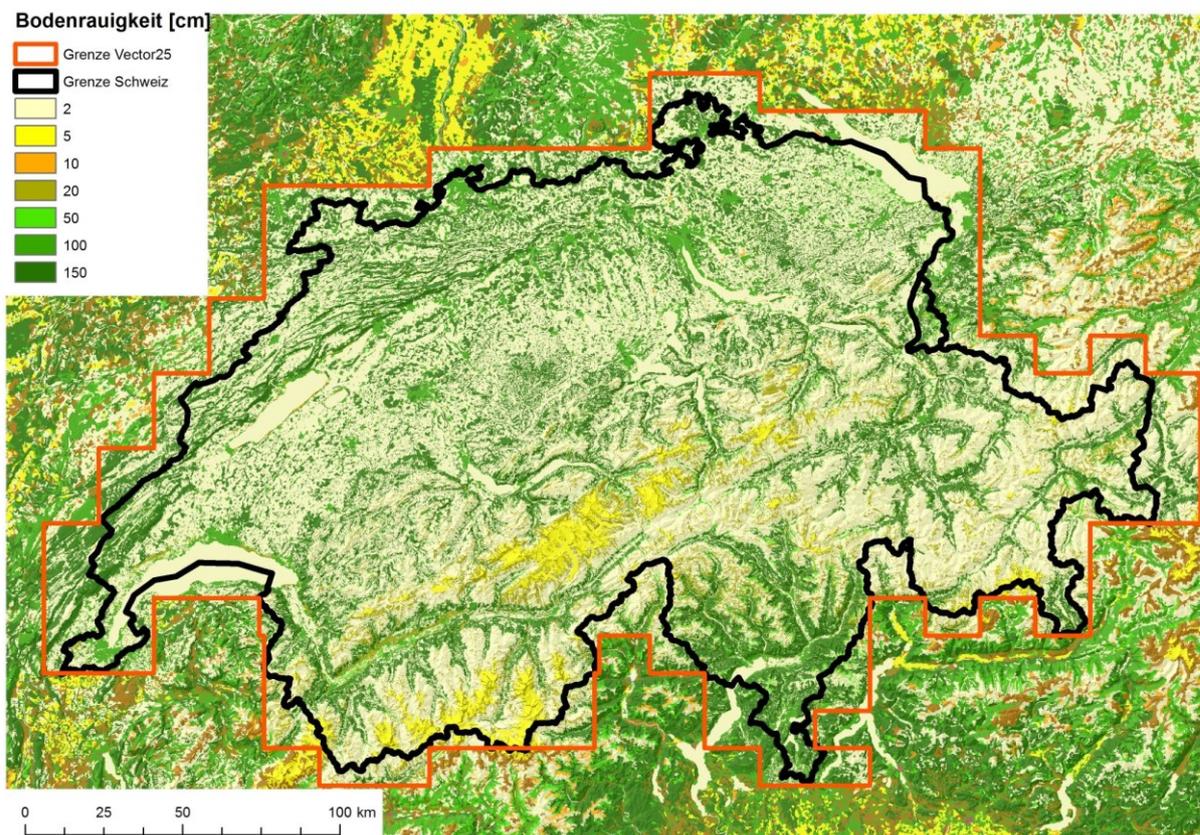


Illustration 3 : Modèle de rugosité du terrain composé des jeux de données Vector25 et CORINE Land Cover.

Dans deux régions, des divergences ont été constatées au niveau de la zone de transition des deux modèles d'utilisation des sols, entraînant des incohérences irréalistes. L'utilisation des sols a été vérifiée manuellement dans ces régions et une valeur réaliste pour l'utilisation des sols a été établie à partir de photographies aériennes.

3 Calcul des champs de vent

La modélisation de la circulation du vent sur des reliefs complexes est très exigeante. Des résultats réalistes ne peuvent être obtenus qu'en prenant en compte des phénomènes de courants tridimensionnels non linéaires, par ex. les courants de retour ou la formation de tourbillons.

3.1 Le modèle CFD WindSim

La description mathématique du courant en terrain complexe repose sur des équations différentielles non linéaires (moyenne de Reynolds). Les équations doivent être simplifiées pour pouvoir être résolues. Certains modèles (par ex. le modèle WAsP, couramment utilisé⁵) réduisent les équations à un système d'équation linéaire. Bien que ce dernier soit facile à résoudre, certains effets de courant importants ne sont pas pris en compte, de sorte que les modèles ne sont pas adaptés aux terrains complexes^{6,7}. Une alternative réside dans les modèles dits CFD (Computational Fluid Dynamics), qui utilisent des approches non linéaires pour décrire les conditions de courants. La solution des équations intervient de manière itérative dans ces modèles, autrement dit par des calculs répétés toujours plus précis. Les modèles CFD nécessitent donc beaucoup de calculs, mais permettent une description relativement précise des conditions de courants en terrain complexe.

Depuis 2003, Meteotest utilise le logiciel WindSim⁸, basé sur un modèle CFD. Meteotest était en contact étroit avec les développeurs de WindSim dès le début, ainsi que lors des calculs pour l'atlas des vents de la Suisse. Le modèle a été optimisé pour répondre aux besoins spécifiques d'un atlas des vents de la Suisse à grande échelle.

3.2 Études de sensibilité pour la détermination des conditions-cadres

Les conditions-cadres sont des paramètres importants pour une modélisation. Des études de sensibilité ont été réalisées à cet égard pour trois régions caractéristiques (Jura, Préalpes et Alpes), l'objectif étant de déterminer la solution numérique, le schéma de turbulences et le paramétrage des forêts reflétant le plus la réalité. Les études de sensibilité ont été réalisées pour des sites avec des mesures de vent de haute qualité. Cela a permis de comparer les valeurs calculées et mesurées. Le Tableau 3 montre les paramètres, issus des études de sensibilité, qui ont été utilisés pour la modélisation de l'ensemble de l'atlas des vents de la Suisse.

⁵ www.wasp.dk

⁶ par. ex. Moreno, P. ; Gravdahl, A. and Romero, M., 2003 : Wind flow over complex terrain : application of linear and CFD models. (http://www.windsim.com/documentation/papers_presentations/0306_ewec/ecotecnia.doc).

⁷ G. Gerdes, B. Schwenk & T. Pahlke, 1997 : Ergebnisse von WASP in mässig strukturiertem Gelände. Magazine DEWI, 11, p. 39-43, 1997.

⁸ www.windsim.com

Tableau 3: Paramètres et valeurs correspondantes intégrées en tant que conditions-cadres pour la modélisation CFD.

Paramètre	Valeur
Largeur du maillage horizontal [m]	100 x 100
Maillage vertical [m]	Variable
Nombre de cellules dans le maillage vertical	54
Hauteur du toit du modèle [m]	18 000
Stratification atmosphérique	Neutre
Hauteur de la couche limite planétaire [m]	500
Vitesse du vent au-dessus de la couche limite planétaire [m/s]	10
Paramétrage des turbulences	K-epsilon standard
Méthode de solution numérique	Méthode General Collocated Velocity (GCV)
Module forestier	désactivé
Lissage	désactivé

3.3 Calcul des champs de vent

Lors de la modélisation avec WindSim, des champs de vent tridimensionnels sont calculés pour différentes mailles. Un modèle de terrain et une rugosité du sol (voir les chapitres 2.1 et 2.2) constituent une condition préalable. Le maillage doit ensuite être défini au-dessus du modèle de terrain, permettant de sélectionner une résolution horizontale et verticale. Pour la résolution horizontale, un maillage régulier de 100 m de côté a été choisi. Pour la résolution verticale, un maillage « étiré » avec 54 cellules jusqu'au toit modèle a été utilisé. Autrement dit, les niveaux du modèle sont étroits près du sol et augmentent à chaque niveau en direction du toit. Les 150 premiers mètres au-dessus du niveau du sol comprennent sept niveaux (Tableau 4).

La modélisation est effectuée pour 12 secteurs différents de la direction du vent. Les résultats donnent donc pour chaque direction du vent et pour chaque point de la maille, le vecteur de vent moyen, la turbulence et le cisaillement du vent.

Tableau 4: Hauteur des sept niveaux les plus bas du modèle.

Niveaux verticaux	1	2	3	4	5	6	7
Hauteur au-dessus du niveau du sol [m]	9,4	28,1	46,9	65,6	84,4	103,1	121,9

Un modèle CFD ne permet pas de calculer d'un coup l'ensemble du territoire de la Suisse. La Suisse a donc été subdivisée en 14 régions dont les limites se chevauchent (Illustration 4). Les mêmes conditions-cadres de la modélisation ont été utilisées pour les 14 régions modélisées.

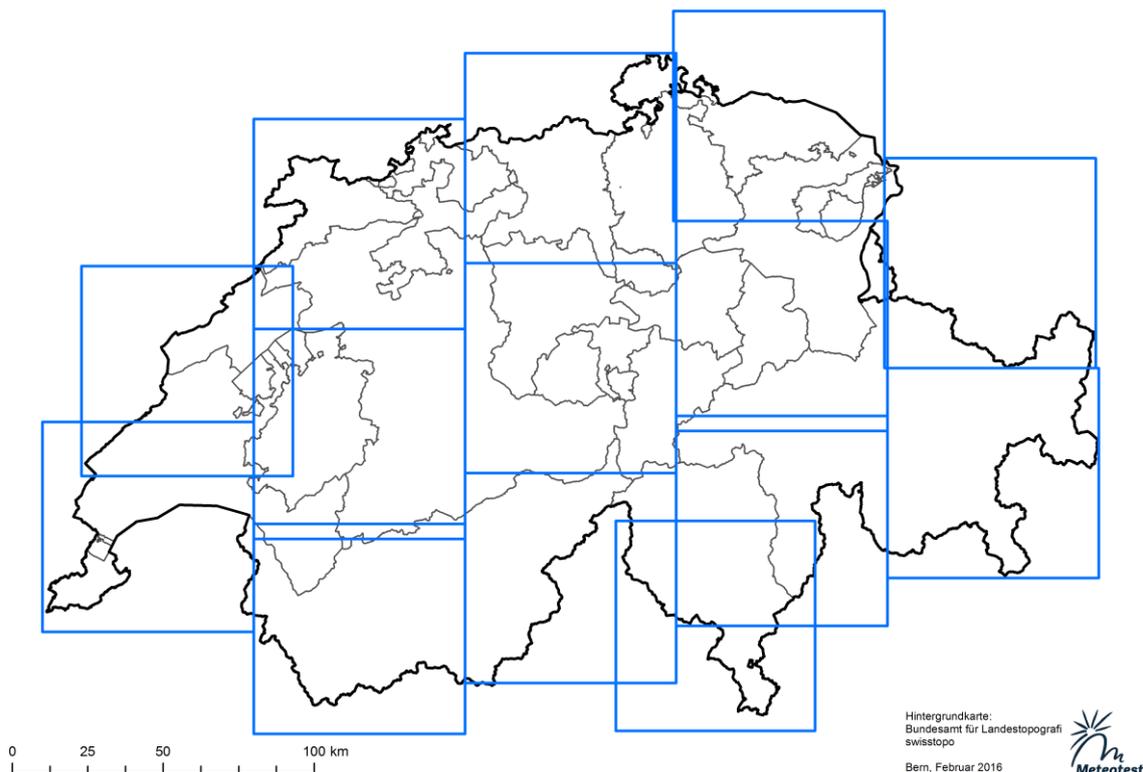


Illustration 4: Subdivision du territoire national suisse en 14 zones modèles.

Le calcul des champs de vent divergeait pour deux zones modèles en raison de la complexité du terrain. La solution a impliqué un lissage local préalable de la topographie dans les régions problématiques.

Une modélisation CFD fournit des champs de vent statiques sans évolution temporelle. Autrement dit, les phénomènes tels que les thermiques, qui ont un cycle journalier prononcé, ne peuvent pas être représentés.

Lors du calcul des champs de vent dans les différentes zones du modèle, il s'est avéré qu'en fonction de la complexité du terrain, l'impulsion diminuait fortement avec la distance au point d'afflux. Après consultation du fabricant du logiciel WindSim, les conditions-cadres au niveau du toit du modèle ont été adaptées de manière à obtenir une impulsion continue sous la forme d'un vent géostrophique, permettant ainsi un flux d'impulsion uniforme. Des différences sont néanmoins apparues au point d'afflux et de sortie. Ce défaut aurait pu être résolu avec des zones de modèle plus petites. Un nouveau calcul de la zone entière avec des quadrillages plus petits aurait pris beaucoup de temps ; il a donc fallu y renoncer.

Les quatorze zones du modèle ont été assemblées en interpolant individuellement les champs de vent pour les douze directions du vent.

Les effets périphériques des quadrillages interpolés sont en partie visibles (Illustration 5 à Illustration 9). Elles sont notamment plus visibles sur les cartes à partir de 100 m au-dessus du niveau du sol, les vitesses du vent plus élevées se situant dans un spectre de couleurs qui se détache nettement.

4 Statistiques de vent

Les champs de vent de la modélisation CFD correspondent au courant théorique en fonction de la topographie et de la rugosité. Ces informations doivent être calibrées afin de pouvoir représenter des conditions réalistes. Le calibrage des champs de vent est effectué sur la base de séries de mesures de vent.

4.1 Acquisition de données sur les vents

Des mesures de vent accessibles au public (par ex. SwissMetNet, IMIS et des réseaux de mesure d'offices cantonaux) ont été utilisées, ainsi que des mesures de vent résultant de projets éoliens. Les jeux de données déjà utilisés pour l'atlas des vents 2016 ont également été utilisés pour la mise à jour, à quelques exceptions près. Les acteurs suisses de l'éolien ont de nouveau été invités à fournir leurs nouvelles mesures de vent pour le calibrage de l'atlas des vents 2019. Les mesures de vent résultant de projets éoliens ont été mises à disposition avec l'aimable autorisation de nombreux développeurs de projets, ainsi que le consentement écrit de ces derniers. Il a cependant été convenu de garder confidentiels les sites des statistiques de vent utilisés.

396 mesures du vent corrigées à long terme ont été prises en compte dans le calcul de la version 2019 de l'atlas des vents de la Suisse. Le Tableau 5 indique le nombre de climatologies qui ont été mises à disposition pour l'élaboration de l'atlas des vents de la Suisse, par espace naturel, et pour la nouvelle et l'ancienne version de l'atlas des vents.

Un point faible de l'atlas des vents 2016 résidait dans la forte variation de la densité spatiale des climatologies. De nombreux projets éoliens étant situés dans l'Arc jurassien, la densité des mesures était très élevée dans cette région, contrairement au sud et à l'est de la Suisse. L'inclusion des données IMIS et SwissMetNet a permis de remédier à la répartition inégale pour un calibrage plus fiable, y compris dans la région extrêmement complexe des Alpes.

Tableau 5: Nombre de statistiques de vent par espace naturel ou emplacement pouvant être utilisé pour élaborer l'atlas des vents 2019.

Espace naturel	Nombre de climatologies 2019	Nombre de climatologies 2016
Jura	50	32
Plateau	64	15
Préalpes	17	7
Alpes	265	43

4.2 Nettoyage des données de mesure et corrections pour représenter les conditions à long terme

La qualité des statistiques de vent à long terme a une influence significative sur le calcul des ressources éoliennes. Par conséquent, il convient tout d'abord de vérifier si toutes les mesures sont pertinentes pour le calcul. L'atlas des vents 2016 a utilisé des mesures d'une durée minimale de six mois et d'une hauteur de mesure minimale de 20 m au-dessus du niveau du sol. Afin de pouvoir recourir à un nombre important de climatologies pour l'atlas des vents 2019, des mesures inférieures à 20 m de hauteur telles que les données IMIS, généralement recueillies à 5 m au-dessus du niveau du sol, ont également été incluses. Des tests ont montré que l'extrapolation des mesures de 5 m à 50 m au-dessus du niveau du sol sur un terrain relativement plat à l'aide du profil de vent logarithmique et d'une longueur de rugosité de 0,1 m donne de meilleurs résultats que si aucune climatologie n'était utilisée à cet endroit. Pour cette raison, les mesures prises à moins de 50 m de hauteur ont été extrapolées par défaut à 50 m.

La plupart des données de mesure sont des mesures du réseau SwissMetNet et IMIS sur une durée d'environ 10 ans. Les mesures effectuées à une hauteur importante proviennent de projets éoliens sur une durée d'au moins un an. Le Tableau 6 indique le nombre de mesures (climatologies) par hauteur de mesure qui ont été utilisées pour élaborer l'atlas des vents de la Suisse.

La couverture verticale des climatologies est bonne jusqu'à 100 m au-dessus du niveau du sol et devient plus pauvre au-delà de la barre des 100 m. Le modèle CFD extrapole la vitesse du vent de la climatologie d'entrée à la hauteur de mesure avec le profil de vent logarithmique au niveau des hauteurs de sortie de l'atlas des vents de la Suisse. Le profil de vent logarithmique s'agissant de l'hypothèse d'une stratification atmosphérique neutre, le cisaillement effectif du vent au point de mesure peut différer de la réalité.

Tableau 6: Nombre de statistiques de vent comparées sur plusieurs années, utilisées pour pondérer les champs de vent.

Hauteur de mesure	Nombre de climatologies
50 m	339
60 m	9
70 m	7
80 m	13
90 m	7
100 m	15
160 m	1
180 m	1
190 m	1
200 m	2
260 m	1



Les données de mesure obtenues ont été épurées et comparées sur plusieurs années. Une série complète de données d'une station météorologique permanente de MétéoSuisse a été utilisée en vue de l'évaluation à long terme sur une période d'au moins dix ans. Le coefficient de corrélation linéaire de Pearson a été calculé pour les mesures avec les données de 139 stations météorologiques permanentes de MétéoSuisse. Les données des stations présentant les meilleures corrélations ont été vérifiées afin de déterminer la proximité par rapport au point de mesure, la cohérence et l'exhaustivité du jeu de données.

Les climatologies épurées et comparées sur plusieurs années ont été intégrées dans le modèle au niveau du point de mesure et les données extrapolées verticalement et horizontalement dans le terrain conformément à la modélisation.

5 Cartes de vent

L'atlas des vents 2019 a été élaboré pour les cinq hauteurs suivantes : 50 m, 75 m, 100 m, 125 m et 150 m au-dessus du niveau du sol. Les illustrations suivantes (Illustration 5 à Illustration 9) présentent les cartes des moyennes annuelles modélisées de la vitesse du vent aux cinq hauteurs au-dessus du niveau du sol.

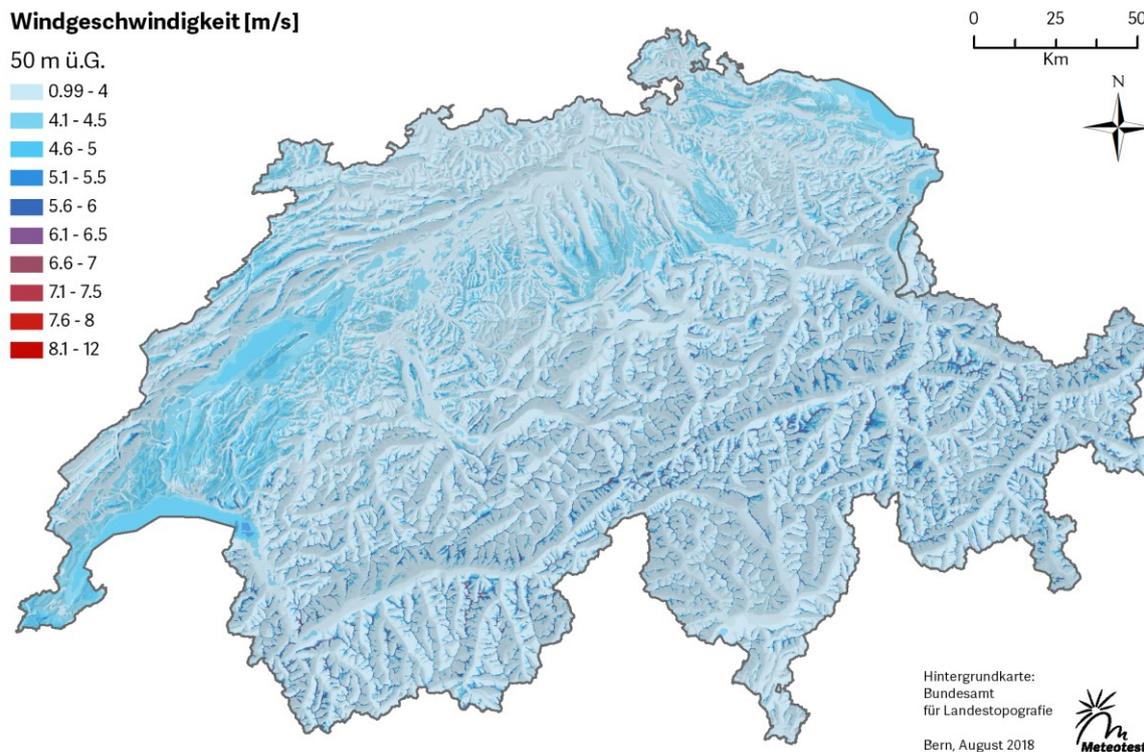


Illustration 5: Moyennes annuelles de la vitesse du vent modélisée à 50 m au-dessus du niveau du sol.

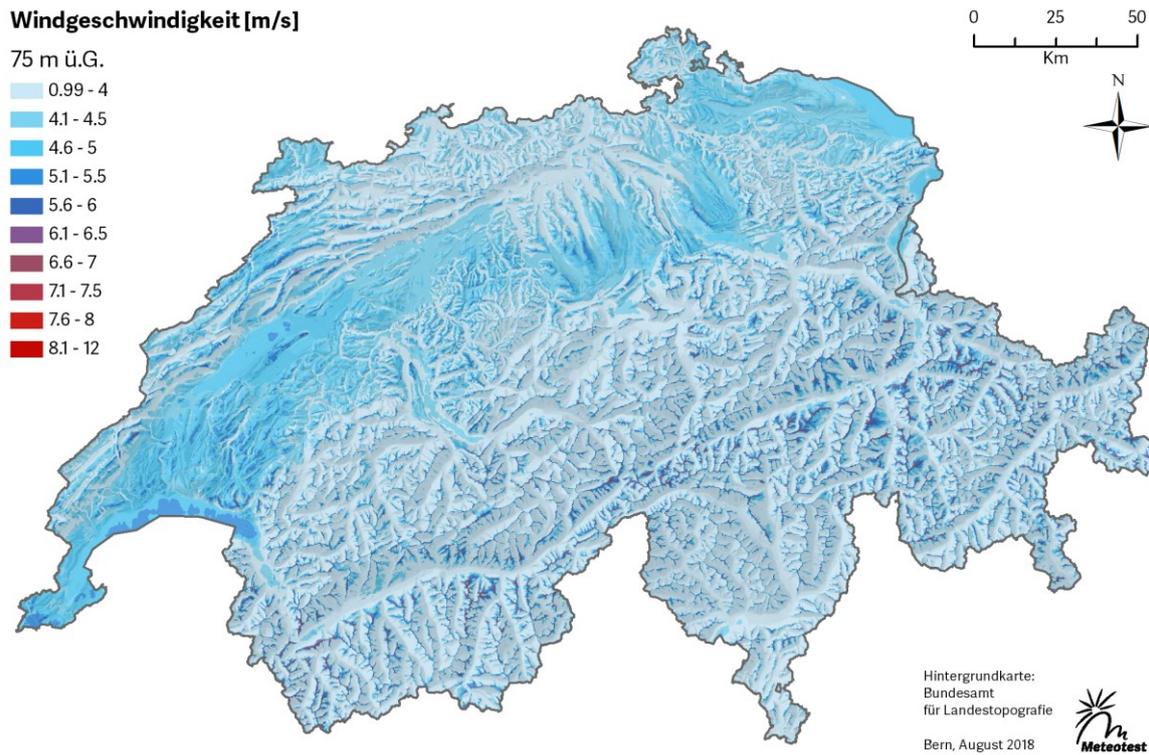


Illustration 6: Moyennes annuelles de la vitesse du vent modélisée à 75 m au-dessus du niveau du sol.

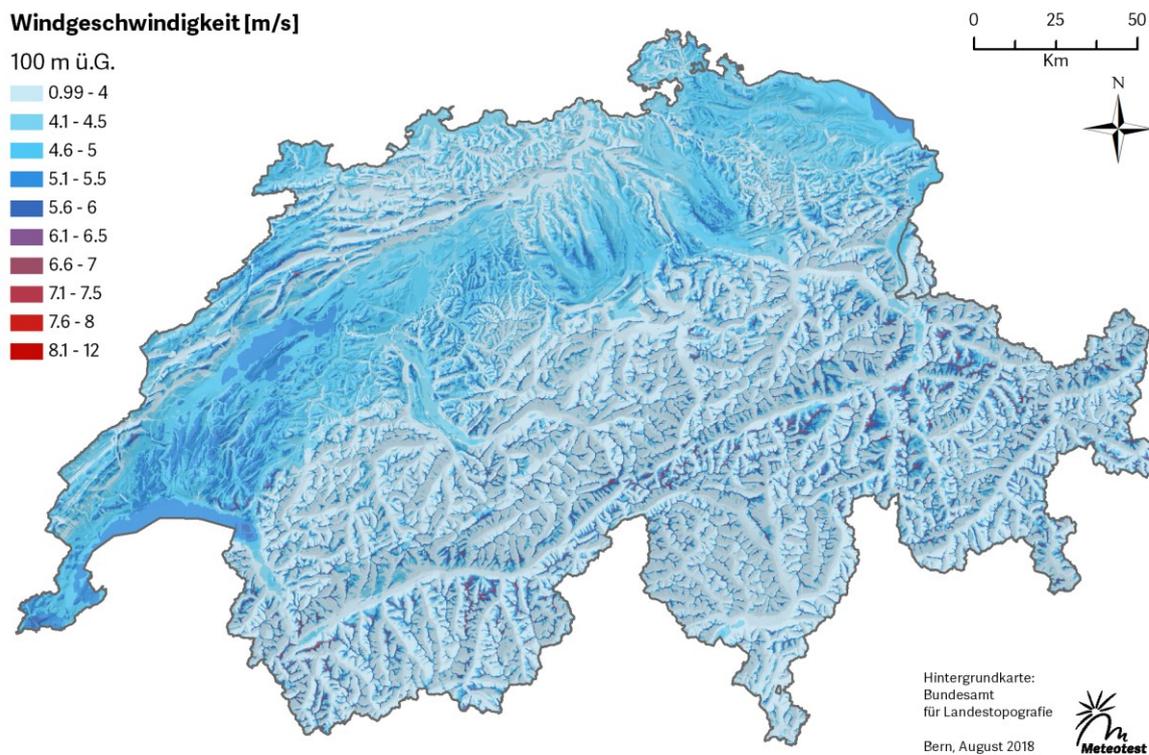


Illustration 7: Moyennes annuelles de la vitesse du vent modélisée à 100 m au-dessus du niveau du sol.

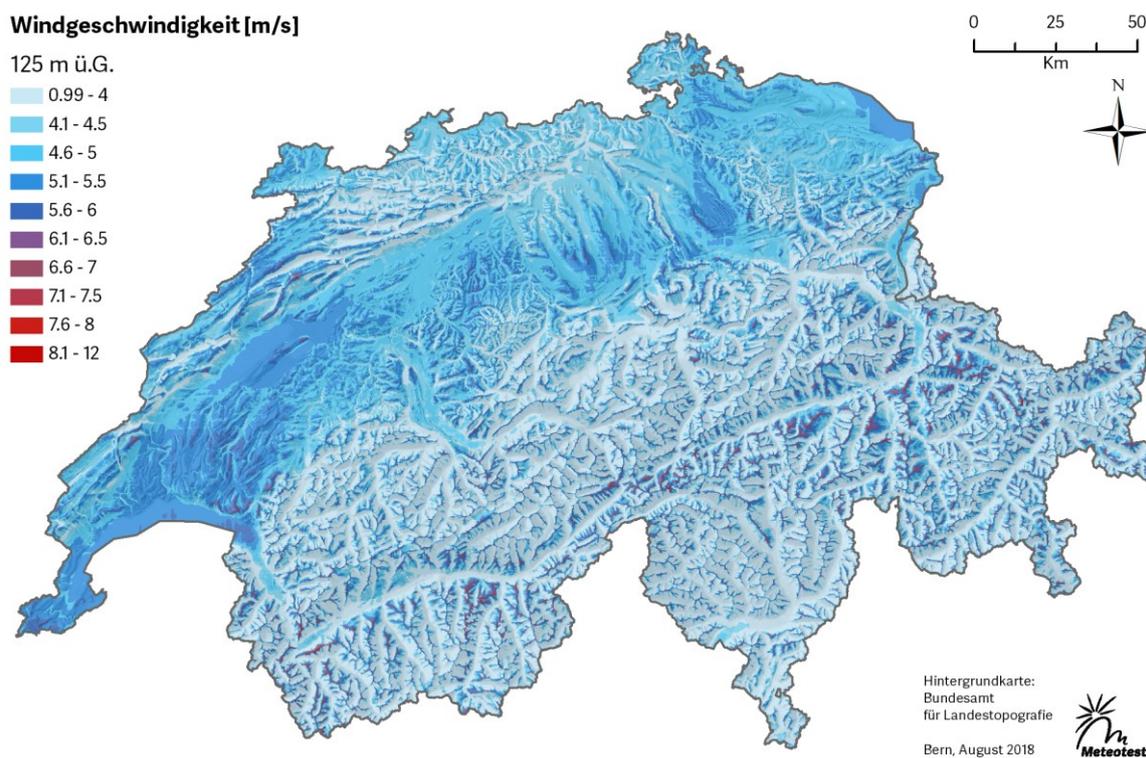


Illustration 8: Moyennes annuelles de la vitesse du vent modélisée à 125 m au-dessus du niveau du sol.

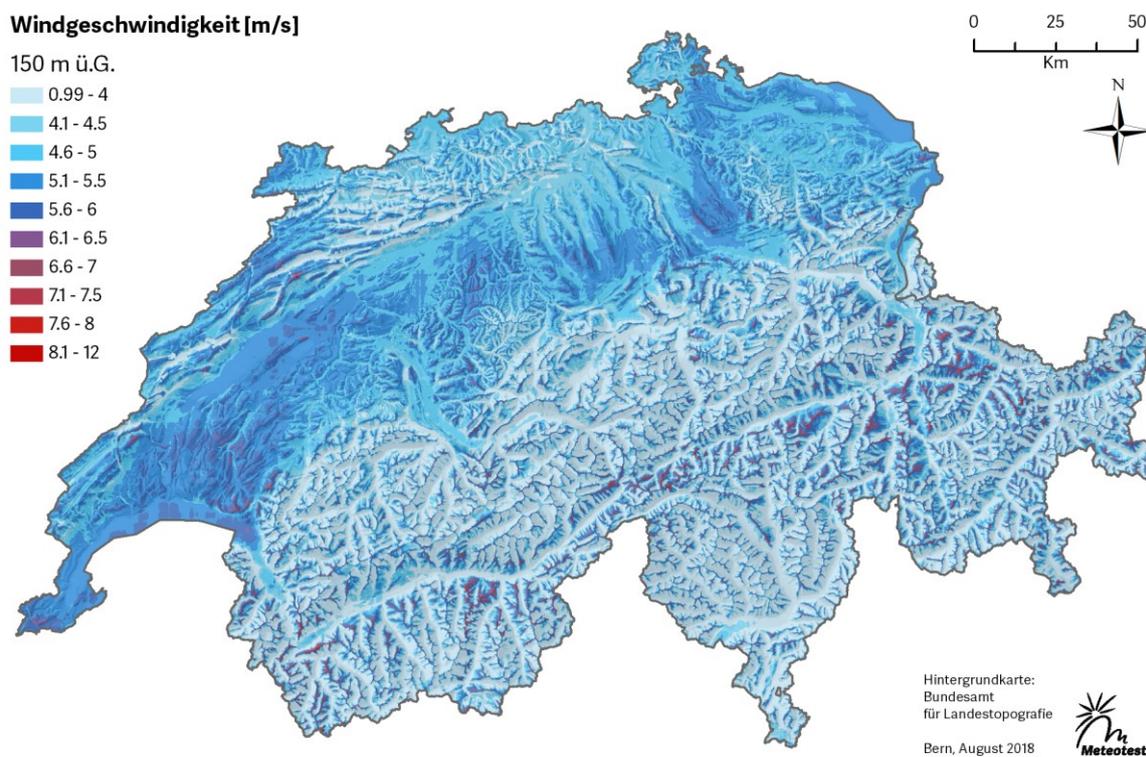


Illustration 9: Moyennes annuelles de la vitesse du vent modélisée à 150 m au-dessus du niveau du sol.



6 Intégration de l'atlas des vents de la Suisse dans l'infrastructure fédérale de données géographiques

L'atlas des vents de la Suisse sera intégré dans l'infrastructure fédérale de données géographiques IFDG. Chacune des cinq hauteurs (Illustration 5 à Illustration 9) est disponible en tant que couche de carte dans le visualiseur de cartes de la Confédération <http://map.geo.admin.ch>.

Les cartes contiennent pour chaque maillage de 100 m x 100 m les moyennes annuelles modélisées de la vitesse du vent et les paramètres de Weibull A et k. Par ailleurs, la vitesse moyenne du vent, la fréquence ainsi que les paramètres A et k de la distribution de Weibull sont affichés pour chaque secteur de 30° de la direction du vent sous forme de rose des vents et de tableau de données.

Le document suivant présente des informations détaillées sur le modèle de données géographiques :

Documentation sur le modèle de données géographiques

Atlas des vents de la Suisse : Moyenne annuelle modélisée de la vitesse et de la direction du vent version 1.0, 04.04.2016

Téléchargement : <https://www.bfe.admin.ch/bfe/fr/home/approvisionnement/statistiques-et-geodonnees/geoinformation.html>

7 Validation

Les mesures de la plus haute qualité, et couvrant le territoire de la Suisse aussi uniformément que possible, ont été utilisées pour l'atlas des vents de la Suisse. La validation des résultats a également été effectuée avec des mesures de haute qualité en cas de disponibilité suffisante de mesures dans la région. Dans le cas contraire, la validation a eu recours à des mesures de qualité moindre (périodes de mesure plus courtes, défaillances de capteurs, etc.). Le volume de données de l'atlas des vents de la Suisse nécessitant un processus de validation croisée particulièrement chronophage, les mesures au niveau des sites de validation n'ont été utilisées que pour la validation et n'ont pas été utilisées ultérieurement pour la pondération de la carte des vents.

Les résultats de WindSim ont été validés au niveau de 62 sites à une hauteur de 50 m à 100 m au-dessus du niveau du sol. À cette fin, les mesures ont été épurées et corrigées à long terme, comme lors de la préparation des climatologies pour l'élaboration de l'atlas des vents de la Suisse. Dans le Tableau 7, le nombre de points de validation a été répertorié et subdivisé par espace naturel pour l'ancienne version et la version actuelle de l'atlas des vents.

Tableau 7: Nombre de statistiques de vent par espace naturel qui ont pu être utilisées pour la validation de l'atlas des vents de la Suisse.

Espace naturel	Nombre de points de validation 2019	Nombre de points de validation 2016
Jura	8	8
Plateau	8	12
Préalpes	1	3
Alpes	45	11

7.1 Validation de la vitesse du vent

Dans l'atlas des vents 2019, la vitesse du vent affiche un écart minimal de 0,07 m/s et un écart maximal de 2,92 m/s entre le calcul WindSim et la valeur mesurée. L'écart moyen est de 0,67 m/s.

Conformément aux objectifs formulés par l'OFEN, le Tableau 8 présente les résultats de la validation pour chaque emplacement représentatif à titre d'exemple pour chaque espace naturel. Le Tableau 8 indique par ailleurs les différences absolues entre les vitesses de vent calculées et mesurées.

L'ampleur des différences reflète d'une part le degré de complexité du terrain, et d'autre part la disponibilité, la qualité et la hauteur des mesures. La haute densité des climatologies réduit les erreurs causées par la complexité du terrain. Les résultats dans la région des Alpes sont soumis à un plus haut degré d'incertitude, bien qu'un nombre relativement élevé de mesures aient été disponibles pour le calcul des ressources éoliennes. Une modélisation de champ de vent d'une résolution de 100 m x 100 m n'est comparable que de manière limitée à une mesure ponctuelle au niveau d'un mât de mesure, le terrain étant lissé lors de la modélisation des champs de vent.

Tableau 8: Écart absolu de la vitesse moyenne du vent (v_{mean}) entre les statistiques de vent sur plusieurs années et les ressources éoliennes calculées.

Espace naturel	v_{mean} mesuré	v_{mean} atlas des vents	Différence absolue
Jura	4,9 m/s	4,8 m/s	0,1 m/s
Plateau	4,1 m/s	3,8 m/s	0,3 m/s
Préalpes	5,5 m/s	5,6 m/s	0,1 m/s
Alpes	4,1 m/s	2,8 m/s	1,3 m/s

7.2 Validation de la direction du vent

La validation de la direction du vent est également illustrée par des mesures dans les quatre espaces naturels, Illustration 10 à Illustration 13. D'une manière générale, en ce qui concerne les roses des vents modélisées, la tendance penche en faveur d'une rose des vents plus répartie sur l'ensemble des secteurs. Les principales directions du vent sont cependant bien reproduites. Cela montre que WindSim parvient à représenter les conditions de courants.

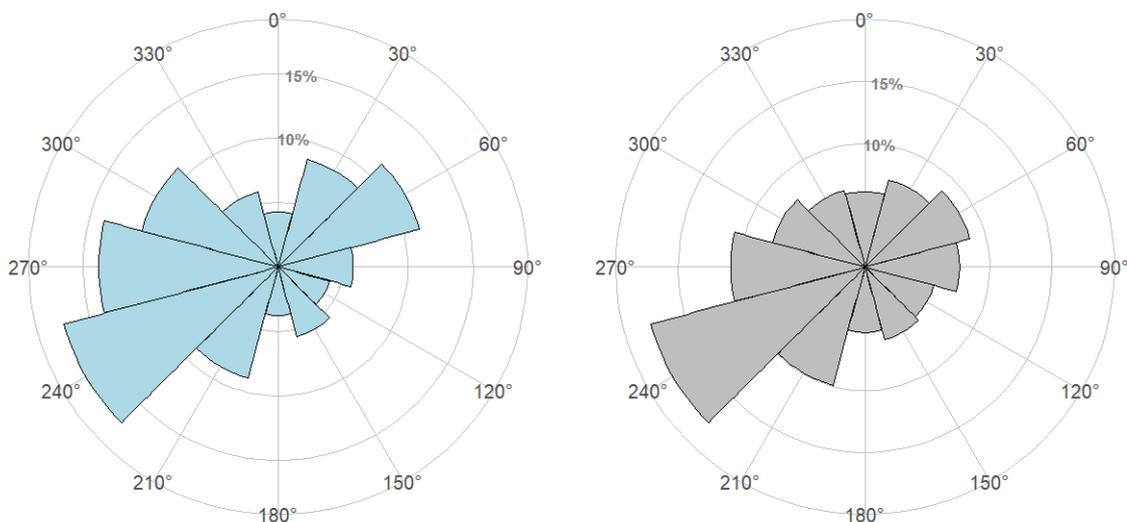


Illustration 10: Comparaison entre la rose des vents d'une mesure du vent (à gauche) et la rose des vents modélisée (à droite) dans le Jura.

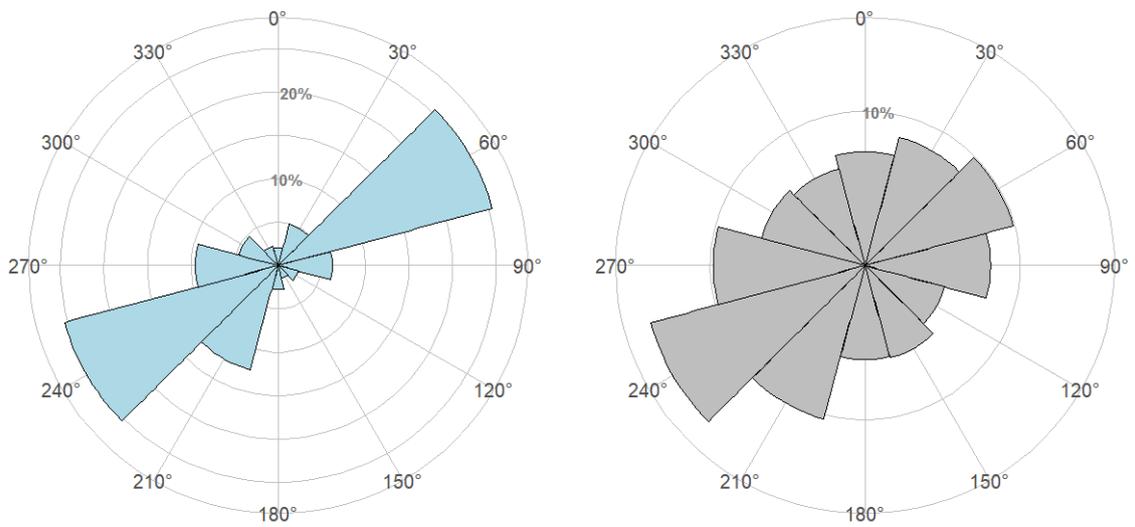


Illustration 11: Comparaison entre la rose des vents d'une mesure du vent (à gauche) et la rose des vents modélisée (à droite) sur le Plateau.

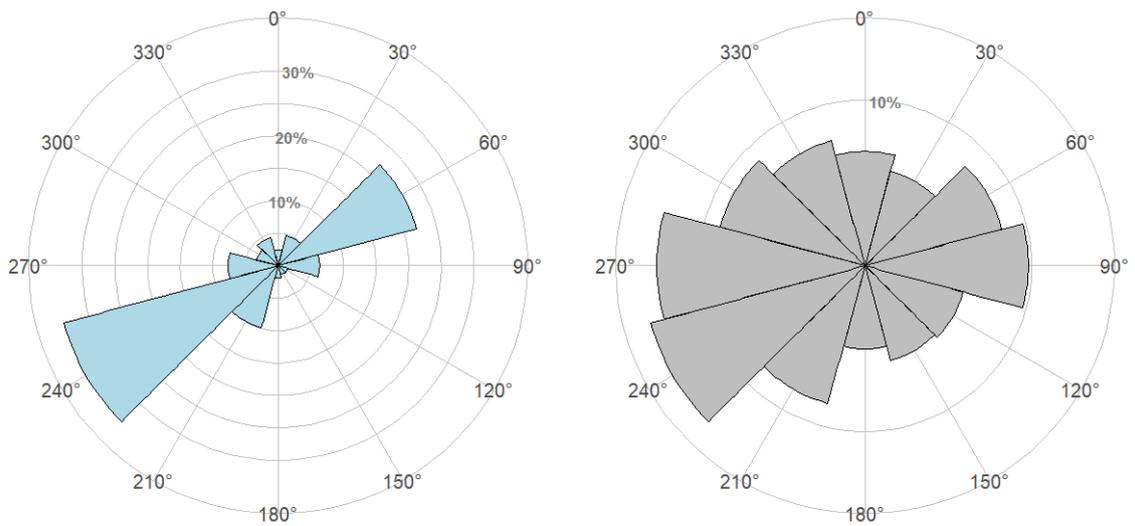


Illustration 12: Comparaison entre la rose des vents d'une mesure du vent (à gauche) et la rose des vents modélisée (à droite) dans les Préalpes.

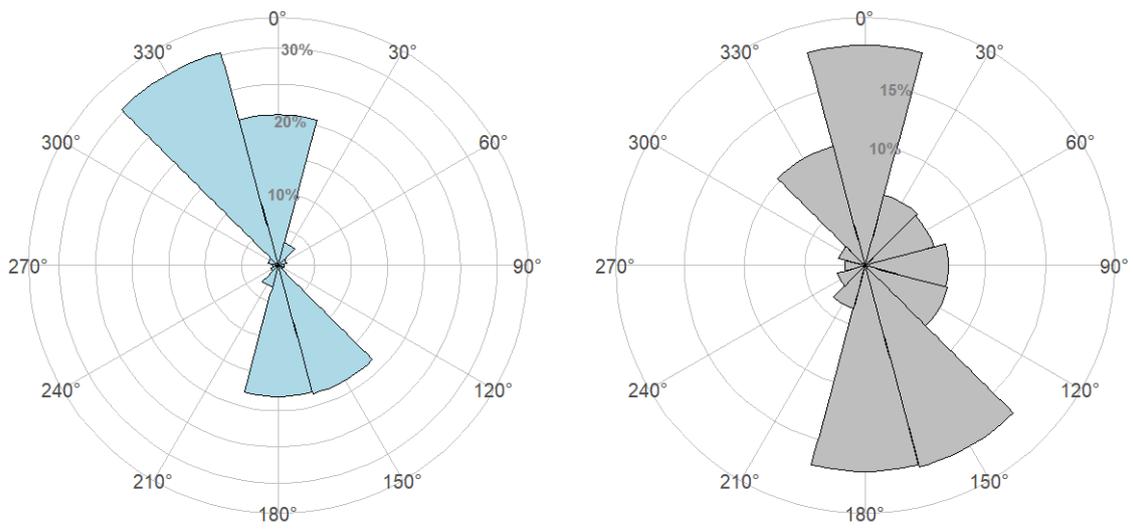


Illustration 13: Comparaison entre la rose des vents d'une mesure du vent (à gauche) et la rose des vents modélisée (à droite) dans les Alpes.

8 L'atlas des vents 2019 contre l'atlas des vents 2016

8.1 Comparaison avec l'atlas des vents 2016

Les champs de vent de l'atlas des vents 2016 ont servi de point de départ pour la mise à jour de l'atlas des vents. Les champs de vent de la modélisation CFD correspondent au courant théorique en fonction de la topographie et de la rugosité. La modélisation pour l'atlas des vents 2019 a utilisé la même méthodologie que pour la version 2016. Une différence majeure par rapport à l'atlas des vents 2016 réside dans le fait que l'atlas des vents 2019 a eu recours à quatre fois plus de climatologies pour le calibrage des champs de vent, garantissant ainsi un support grandement amélioré sur le plan spatial.

Dans le sud de la Suisse centrale et dans l'est du Valais, les vitesses de vent dans la version 2019 sont très similaires à celles de la version 2016.

Les vitesses de vent dans la version 2019 sont toutefois nettement inférieures à celles de la version 2016 dans les régions suivantes :

- Les cantons de Genève et de Vaud
- Certaines parties de Neuchâtel
- L'ouest du Valais
- Le Val Mesolcina dans le canton des Grisons
- La région du nord du canton des Grisons
- La partie sud du canton de Saint-Gall
- Le canton de Thurgovie

Dans les autres régions de la Suisse, les versions de 2019 et 2016 présentent des différences de 0 m/s à max. 0,5 m/s, la version de 2016 ayant plutôt surestimé les vitesses de vent.

En moyenne, les vitesses de vent dans le nouvel atlas des vents 2019 sont inférieures de 0,42 m/s (50 m) à 0,55 m/s (150 m) à celles de l'atlas des vents 2016. Les valeurs de l'atlas des vents 2019 sont nettement plus basses dans l'ouest et l'est de la Suisse. On savait que les valeurs de l'atlas des vents 2016 étaient trop élevées dans ces régions. L'illustration 14 montre une comparaison des deux cartes des vents pour la section au nord de Lausanne. Les vitesses de vent trop élevées de l'atlas des vents 2016 ont été revues à la baisse lors de l'actualisation. Pour des raisons de protection des données, aucune carte des différences n'est présentée ici.

Le chapitre 1 fournit des explications concernant l'utilisation de l'atlas des vents et ses limites.

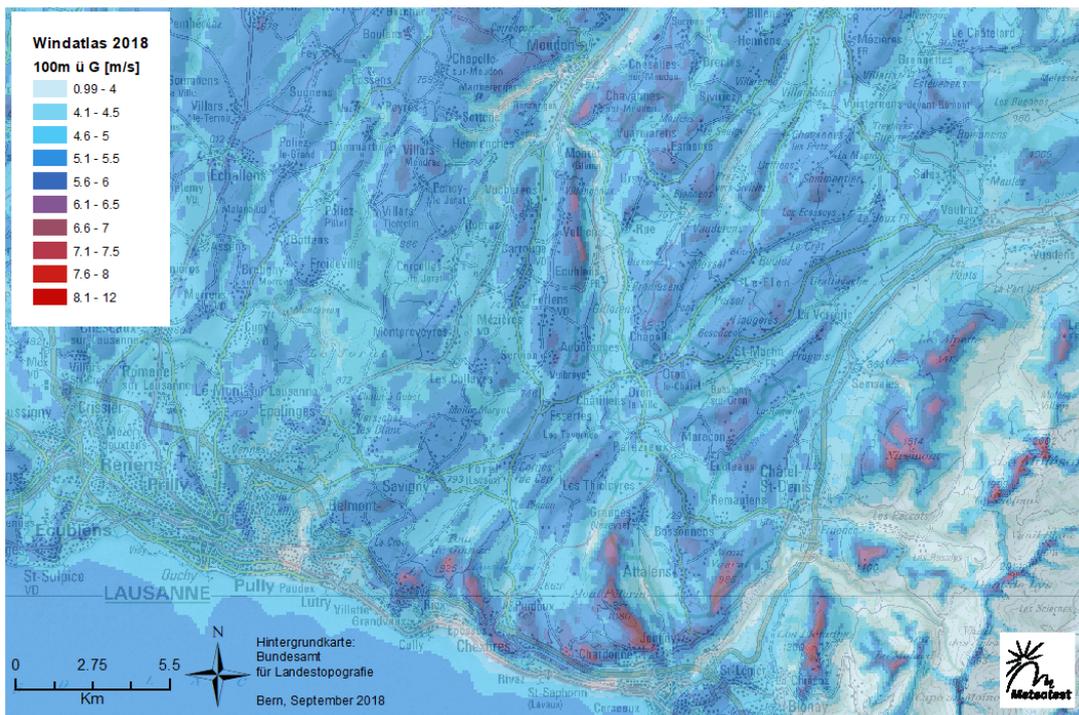
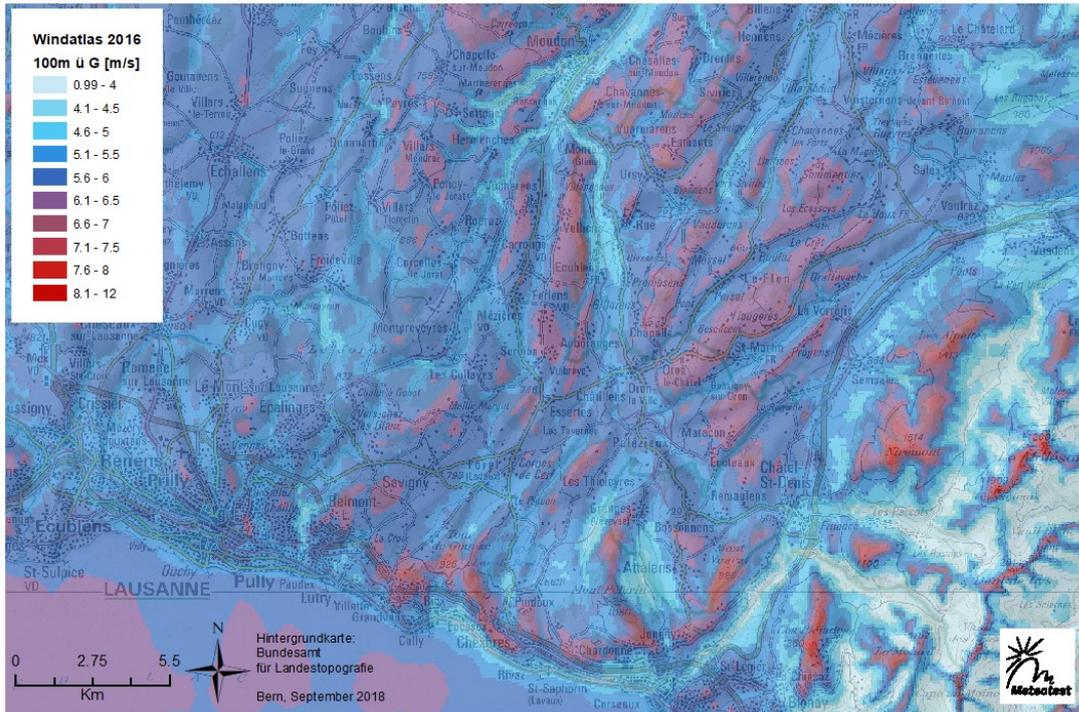


Illustration 14: Comparaison de l'atlas des vents 2016 (ci-dessus) et de l'atlas des vents 2019 (ci-dessous). La section montre les vitesses de vent à 100 m au-dessus du niveau du sol dans la région au nord-est de Lausanne.

9 Incertitude

L'atlas des vents de la Suisse est le résultat d'une modélisation. Les modèles sont en principe des images simplifiées de la réalité et sont donc sujets à des incertitudes. Par conséquent, les informations contenues dans l'atlas des vents de la Suisse doivent être comprises comme une estimation approximative des conditions de vent. L'atlas est très précis dans certaines régions tandis que dans d'autres, le nombre de mesures disponibles est nettement insuffisant pour valider la carte. En cas d'intérêt pour un développement de site, une mesure sur place est dans tous les cas essentielle.

En raison de la différence de complexité du terrain en Suisse et de la couverture inégale des climatologies utilisées, les données d'incertitude pour les différents espaces naturels sont présentées de manière différenciée.

L'ordre de grandeur des incertitudes est indiqué dans le Tableau 9. Les indications s'appliquent aux cartes à 50 m, 75 m et 100 m. Peu de mesures élevées sont disponibles pour la modélisation de cartes à plus de 100 m au-dessus du niveau du sol, la modélisation du vent y est donc moins bien fondée et la validation n'y est plus possible. Cela se traduit par une incertitude accrue des résultats. En raison des difficultés d'interpolation des zones du modèle dans le nord de la Suisse, il faut s'y attendre à des incertitudes accrues.

Tableau 9: Ordre de grandeur de l'incertitude en fonction de l'espace naturel.

Espace naturel	Ordre de grandeur de l'incertitude 2019	Ordre de grandeur de l'incertitude 2016
Jura	+/- 0,5 m/s	+/- 0,5 m/s
Plateau	+/- 0,7 m/s	+/- 0,8 m/s
Préalpes	+/- 0,5 m/s	+/- 1,0 m/s
Alpes	+/- 1,3 m/s	+/- 1,5 m/s

Remarque concernant les paramètres de Weibull A et k

L'indication de la vitesse moyenne du vent n'est pas suffisante pour décrire les ressources éoliennes d'un site, les fréquences des différentes classes de vitesse du vent étant déterminantes.

Une possibilité pour décrire la distribution de fréquence des classes de vitesse du vent réside dans la distribution de Weibull. Les deux paramètres A (facteur de calibrage, vitesse du vent caractéristique de la série temporelle) et k (paramètre de forme, décrit la forme de la distribution) permettent de se rapprocher de la distribution de fréquence des classes de vitesse du vent pour de nombreux sites.

Pour les sites dans lesquels des effets thermiques avec des cycles journaliers jouent un rôle, la distribution de Weibull ne peut pas être utilisée pour représenter la distribution de fréquence. Les vitesses de vent représentées dans l'atlas des vents pour chaque cellule matricielle de 100 m sont basées sur une modélisation du vent qui fournit une vitesse moyenne du vent et tente de se rapprocher de la distribution de fréquence à l'aide d'une distribution de Weibull. Afin de pouvoir représenter les effets des vents thermiques, une série temporelle devrait être disponible pour chaque cellule matricielle. Ceci n'est pas réalisable dans le cadre de l'atlas des vents de la Suisse.

Une certaine prudence s'impose donc lors de l'utilisation des paramètres de Weibull pour déterminer un rendement énergétique.