

5 à 7 de l'éolien

« Vent et productivité des parcs éoliens »

3 novembre 2016

Grandson

Programme de ce soir

17:00	Accueil	Canton de Vaud <i>Denis Rychner, chargé de communication</i>
17:05	Vitesse de vent et productivité des parcs éoliens	<i>Jean-Bernard Jeanneret, physicien</i>
17:20	Atlas des vents de la Suisse 2016	Meteotest <i>Saskia Bourgeois, responsable de la section énergie éolienne</i>
17:30	Production des parcs éoliens en Suisse et ailleurs	Suisse Eole <i>Lionel Perret, responsable de l'antenne romande de Suisse Eole</i>
17:45	Discussion	
Dès 18:30	Verre de l'amitié	

Vitesse de vent et productivité des parcs éoliens

J.B. Jeanneret

5 à 7 de l'Eolien, Grandson, 3 novembre 2016

Mesures de vent

Normes pour les Mesures de vent

MEASNET, EVALUATION OF SITE-SPECIFIC WIND CONDITIONS , Vers. 2016

Chap 7 : **La mesure anémométrique est donnée comme incontournable** et restreint l'application de mesures à distance (RSD) aux terrains simples (terrain plat avec rugosités homogènes).

Pour un terrain non-simple : **si au moins une mesure avec un mât** existe sur le site

Etat de Vaud : Directives cantonales pour l'installation d'éoliennes, 2013

La vitesse moyenne annualisée des vents ... doit être d'au moins 5 m/s pour chaque machine.

Il s'agit de démontrer le potentiel énergétique du projet **par une campagne complète conforme à la norme internationale Measnet** (Vers.2009) ...

3. La mesure de la vitesse du vent est effectuée avec des anémomètres à coupelles, **L'utilisation d'instruments de type SODAR, LIDAR , ... , à la place d'anémomètres, est tolérée pour autant que la vitesse moyenne annualisée des vents soit d'au moins 5,5 m/s pour chaque machine.**



Obtentions des Vitesses de vent

A.Méthode indiscutable (MEASNET) :

- mât de mesure à hauteur du rotor, anémomètres à plusieurs hauteurs
- mesure d'inclinaison du vent
- Etude topographique, taux de turbulence , etc ...

B.Mesures indirectes seules : SODAR, LIDAR, etc.

C. Usage de cartes de vent seulement

A est peu utilisée dans le canton de Vaud.

*Cette présentation mettra en regard **B avec C**
(tous deux discutables),
et avec A quand c'est possible*

Cartes de vent

Source : <http://wind-data.ch/windkarte/>

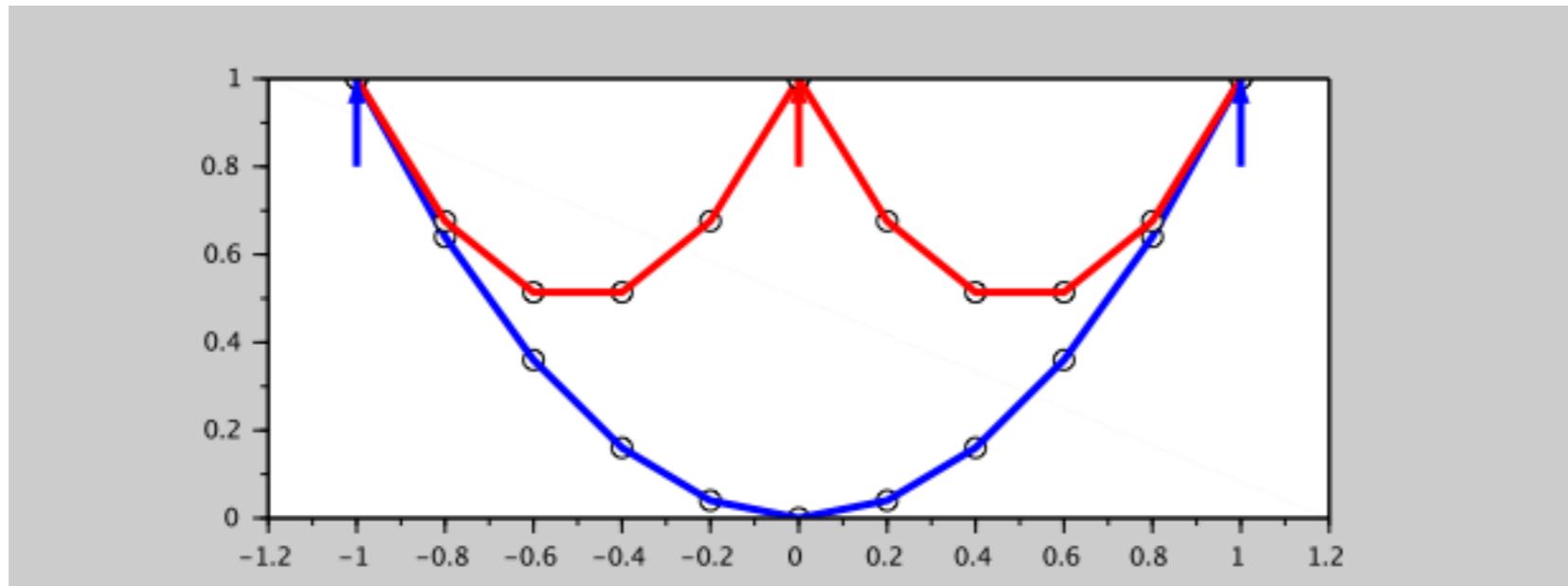
Site conjoint OFEN et SuisseEole, réalisé par Météotest

- Ancienne carte, 2004, plus bas : Wind-Data (WD)
- Nouvelle carte, 2016, plus bas, Wind-Atlas (WA)
 - Mis à part des différences de méthode, **WA a intégré certaines mesures de vent des promoteurs comme contraintes dans les simulations.** C'est un point important discuté ci-après.

Simulation numérique par éléments finis

Exemple simple :

- une chaîne suspendue à ses extrémités: le calcul donne la courbe bleue
- on ajoute un point de suspension au milieu: le calcul donne la courbe rouge



Les deux calculs sont corrects, mais correspondent à deux cas réels différents.

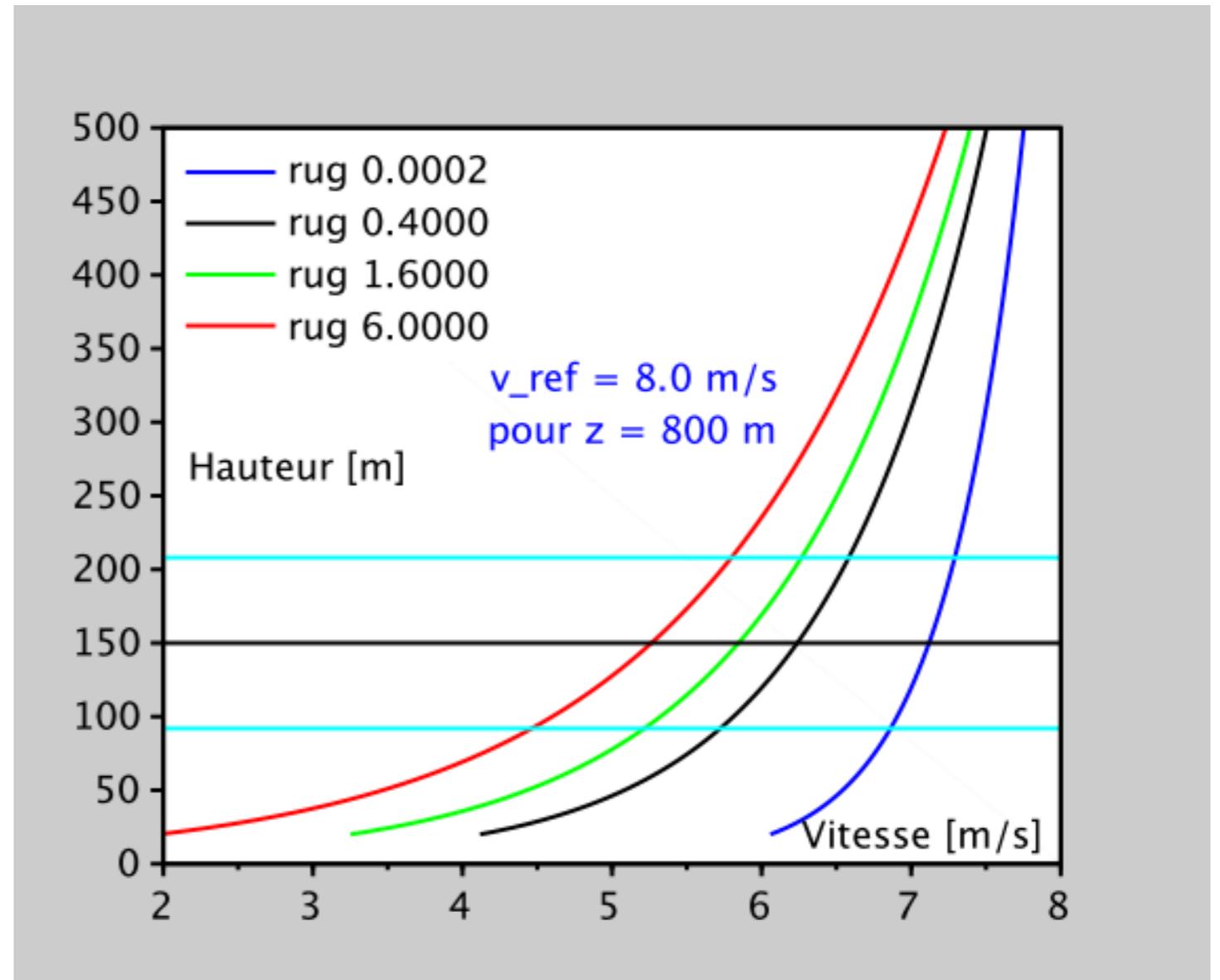
Pour la carte Wind-Atlas 2016: l'adjonction de contraintes à des points de mesures très discutables (voir plus bas) conduisent à des résultats régionaux très discutables.

Source : Meteotest

<http://wind-data.ch/tools/profile.php>

Long. rugosité z_0	Types de surfaces
0.0002 m	Eau: mers, lacs
0.03 m	Terrains agricoles découverts, sans haies, év. constructions éparpillées, collines peu profilées
0.1 m	Terrains agricoles, quelques bâtiments, haies de 8 m de hauteur distantes d'env. 500 m
0.4 m	Villages, petites villes, terrains agricoles, nombreuses haies, hauts arbres, forêts, terrains très accidentés
0.6 m	Grandes villes, hauts bâtiments
1.6 m	Grandes villes, hauts bâtiments et gratte-ciel

Rugosité du sol, hauteur au sol et vitesse du vent

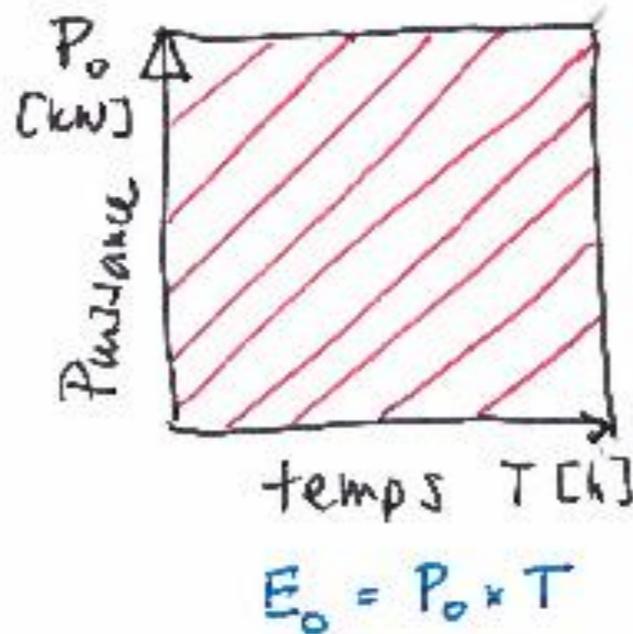


Pas de rugosités plus grandes que 1.6m sur terre ...

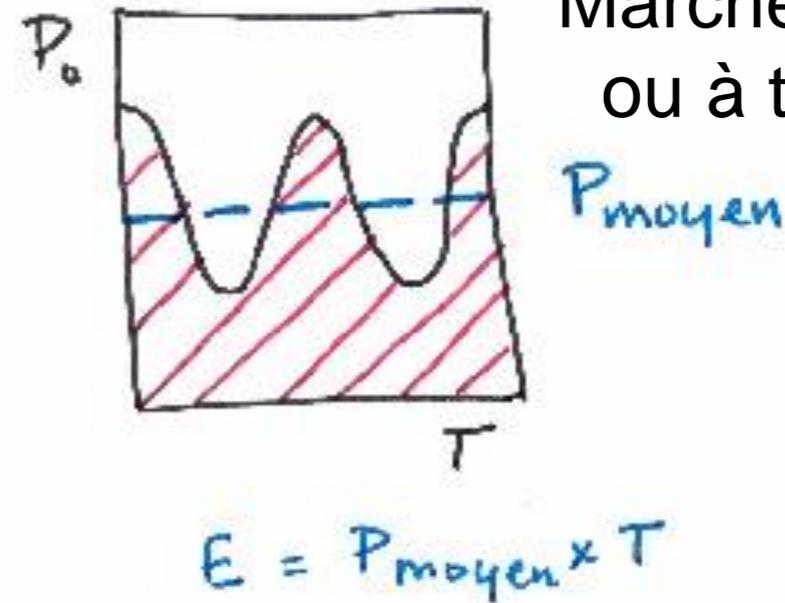
Calcul de productivité

Facteur de charge

Marche continue
à pleine
puissance



Marche intermittente
ou à temps partiel



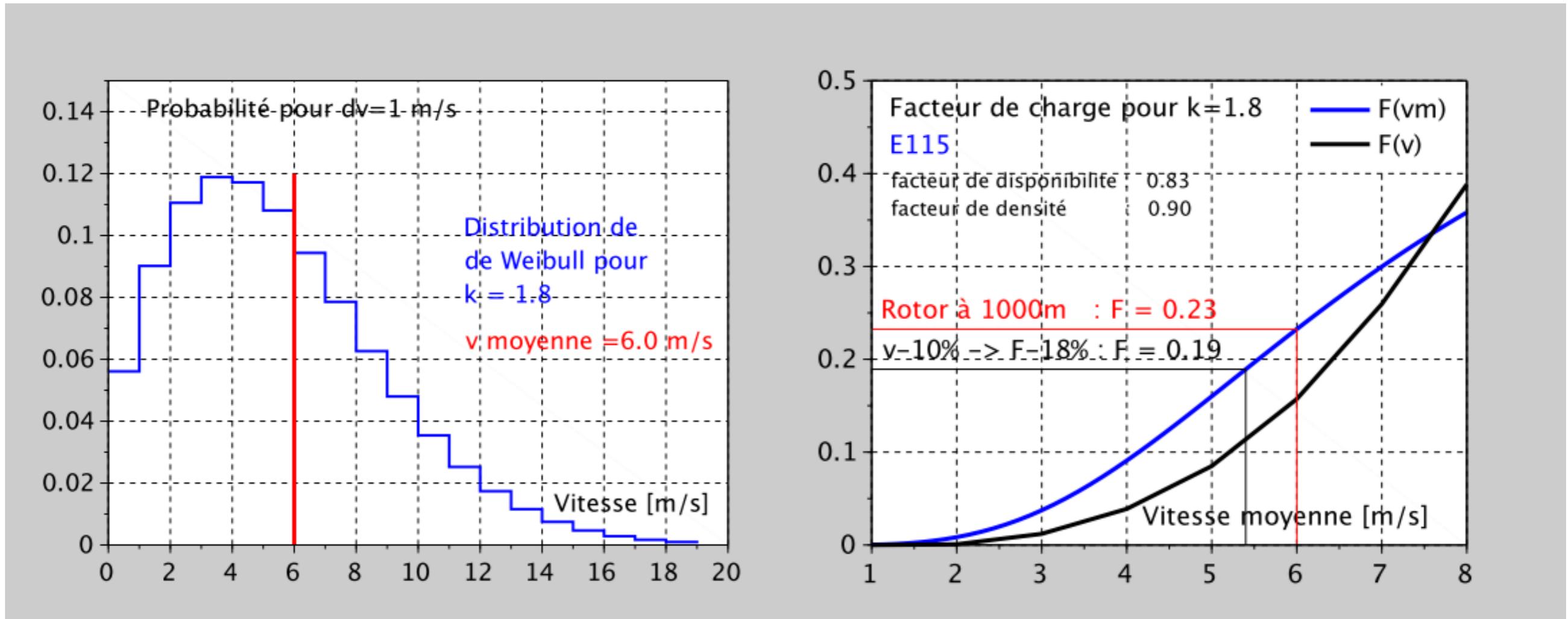
Facteur de charge : $F = P_{moyen}/P = E / E_0$,
ou en heures : $F_h = F \times T$ ($T = 1$ année = 8760 h)

Eolien suisse moyen actuel :

$F \approx 0.2 = 20\%$, ou $F_h = 1750$ h

C'est aussi à peu près le seuil de rentabilité

Calcul du Facteur de charge

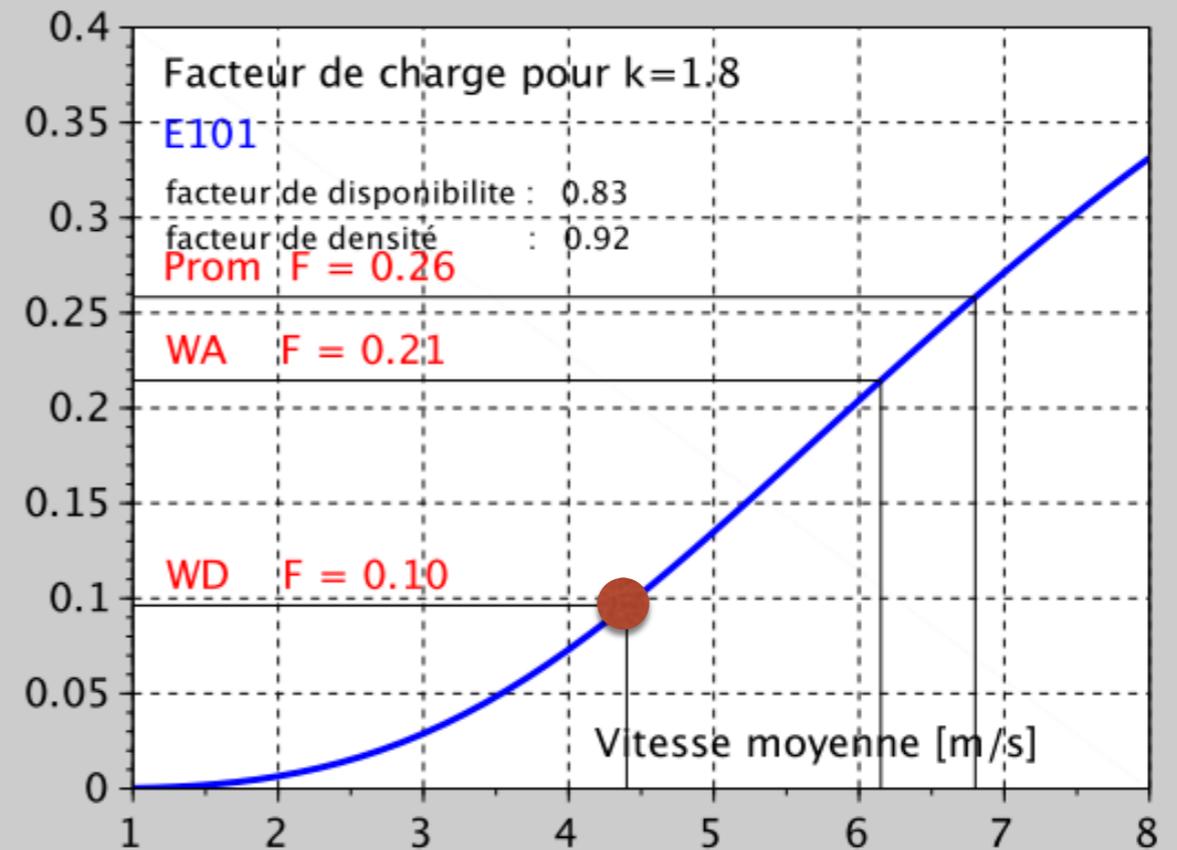
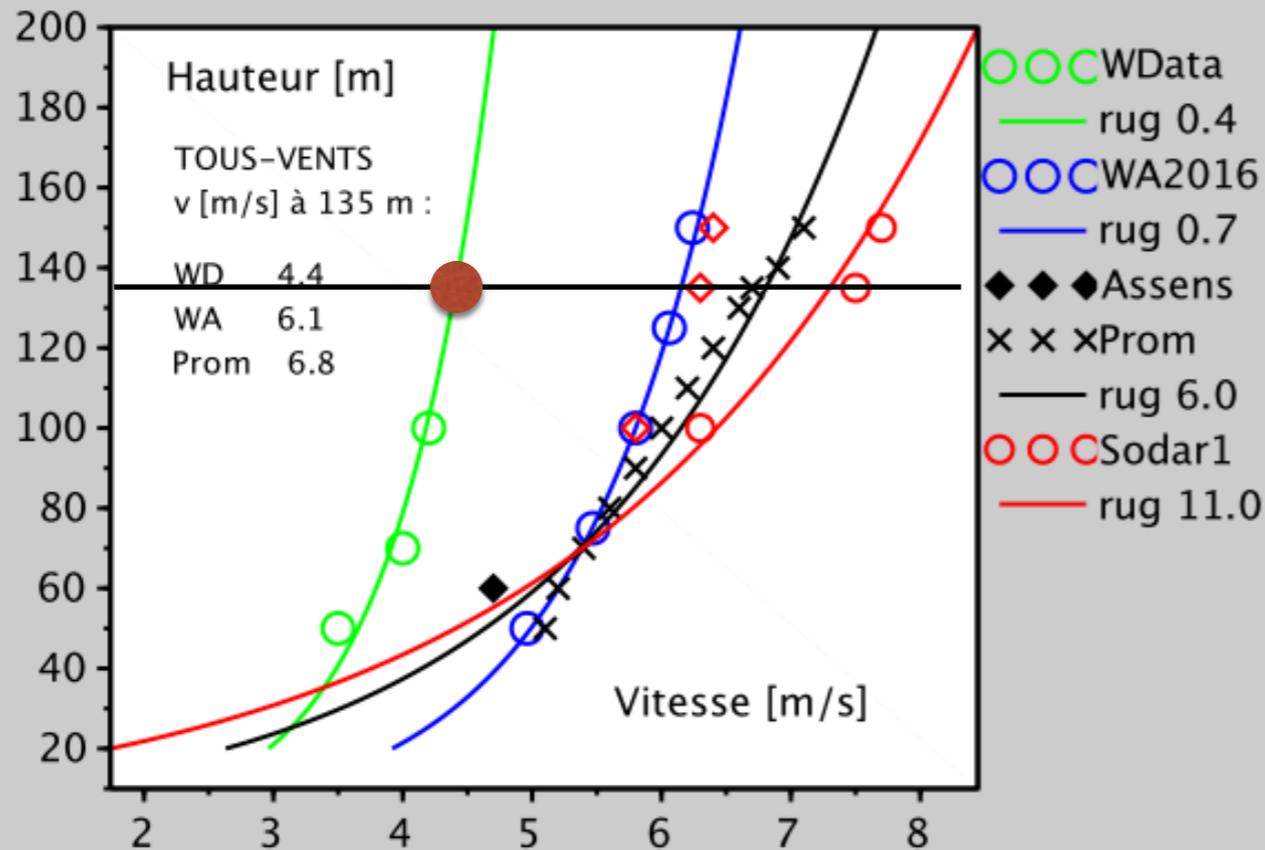


Le facteur de charge F est calculé avec la vitesse moyenne (v_m) pluriannuelle, en tenant compte de sa variabilité en fonction du temps (distribution de Weibull)

Une erreur de **10%** sur v_m implique une erreur sur F , et donc sur la productivité, de **18%**

Exemples de projets

TOUS-VENTS



Anémomètre d'Assens: 15 km du site

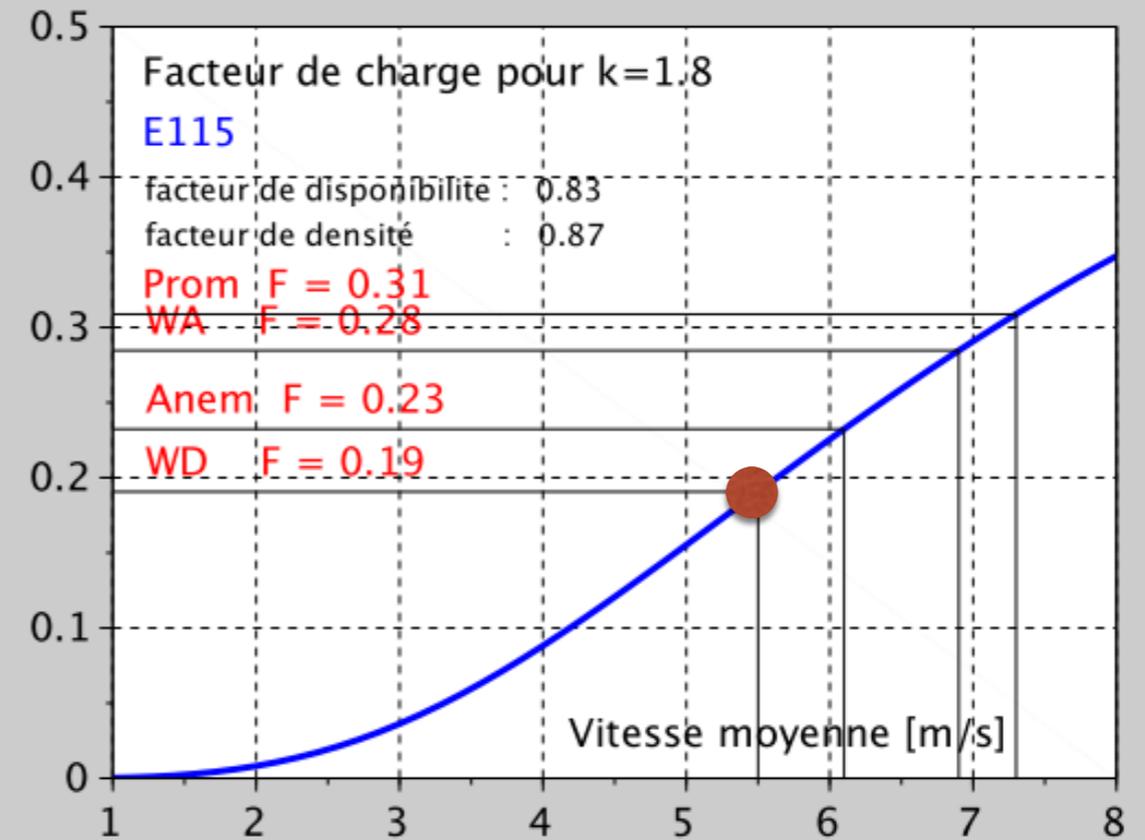
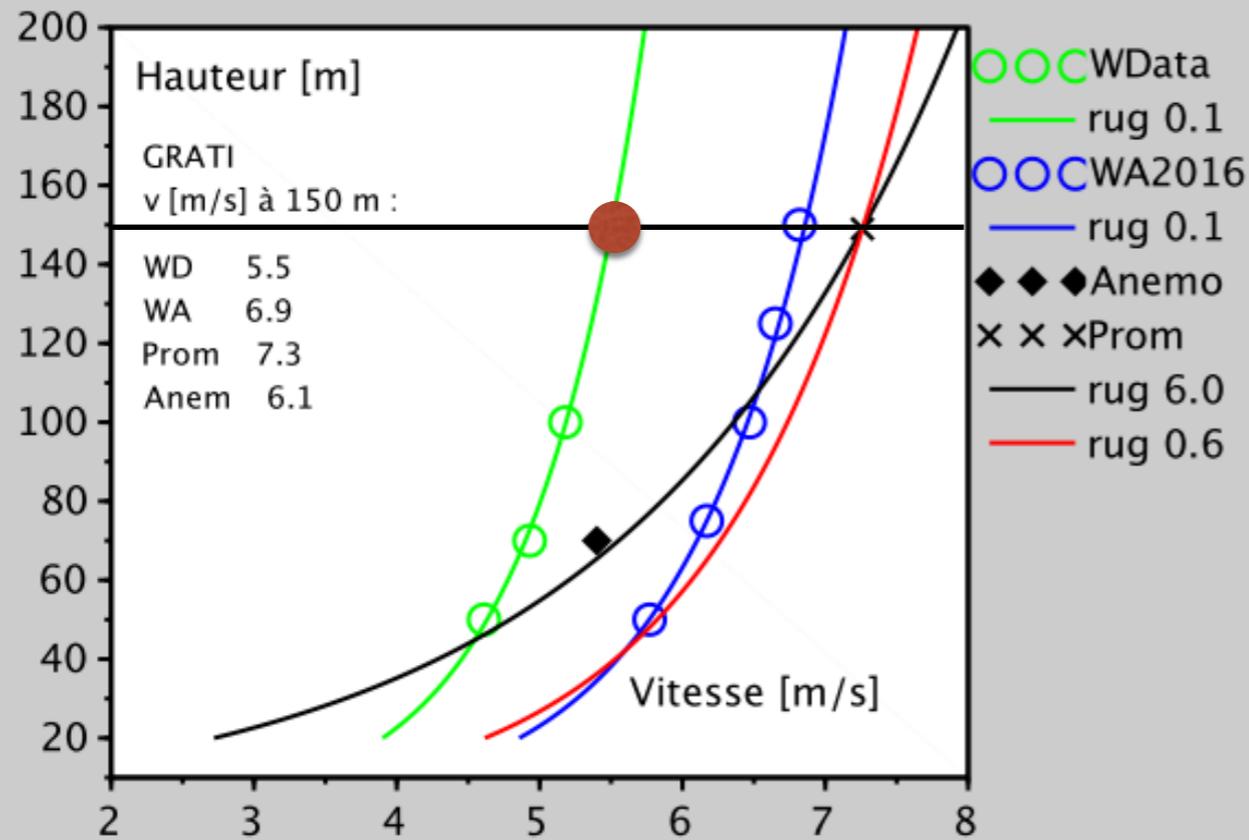
Les rugosités ajustées aux mesures SODAR ne sont pas raisonnables.

Si WD est correct : déficit financier majeur.

Le site internet du projet donne $F=0.31$

Entre $F = 0.10$ et 0.31 où est la valeur réelle ?

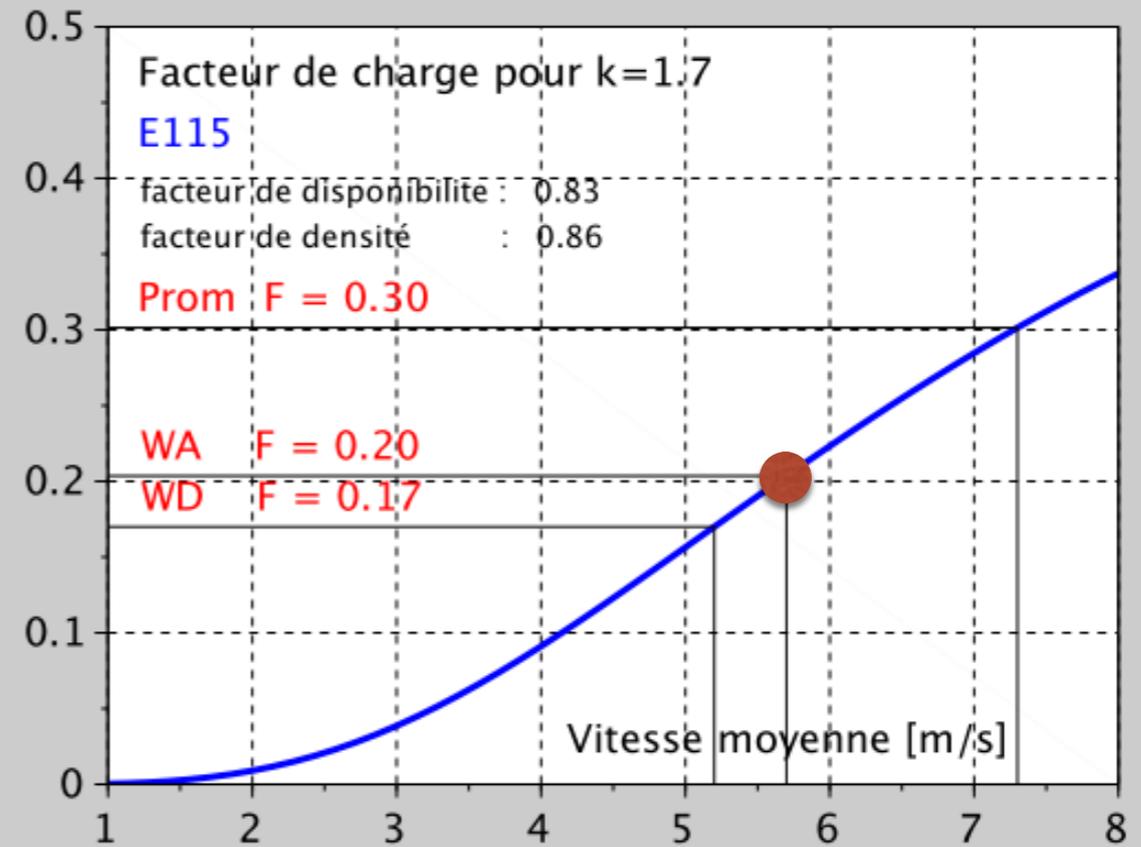
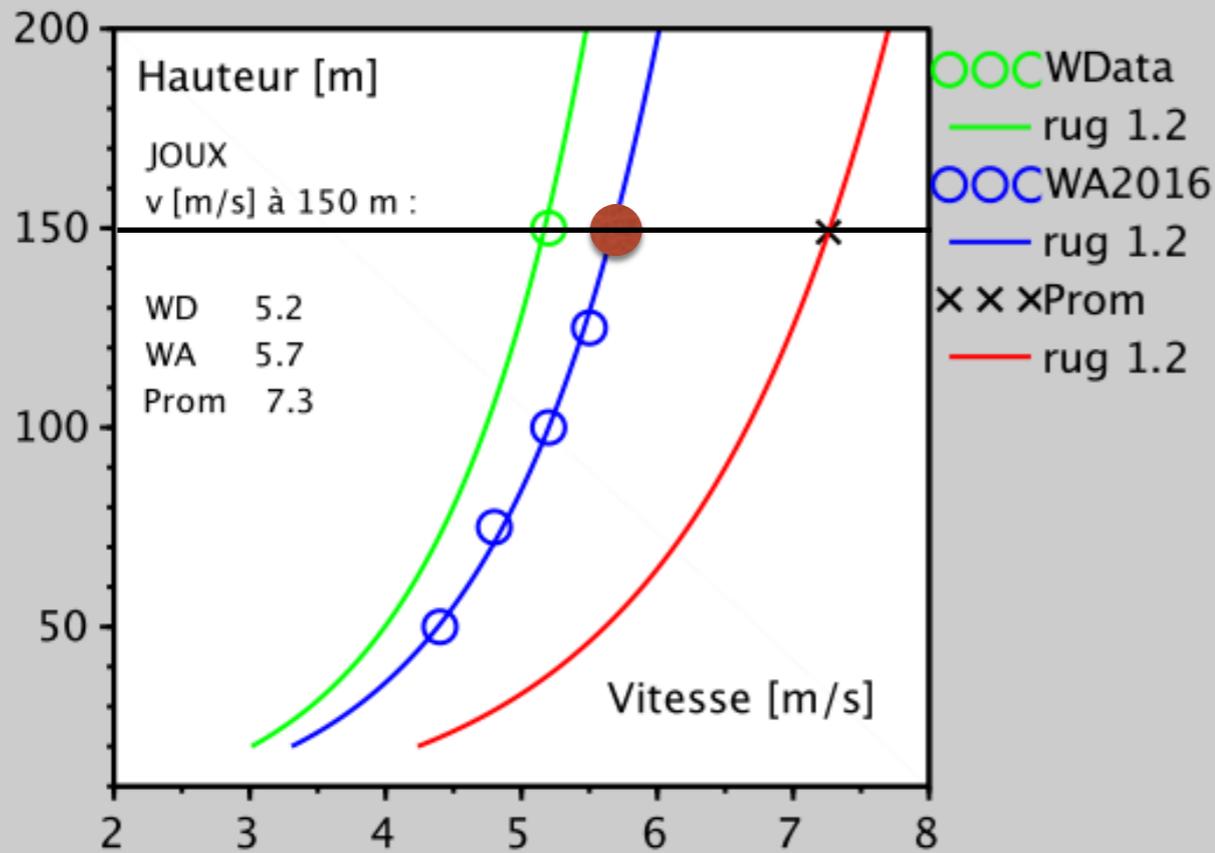
SUR GRATI



L'anémomètre semble avoir été oublié ...
il est plus proche de WD que de WA-2016 et de Prom

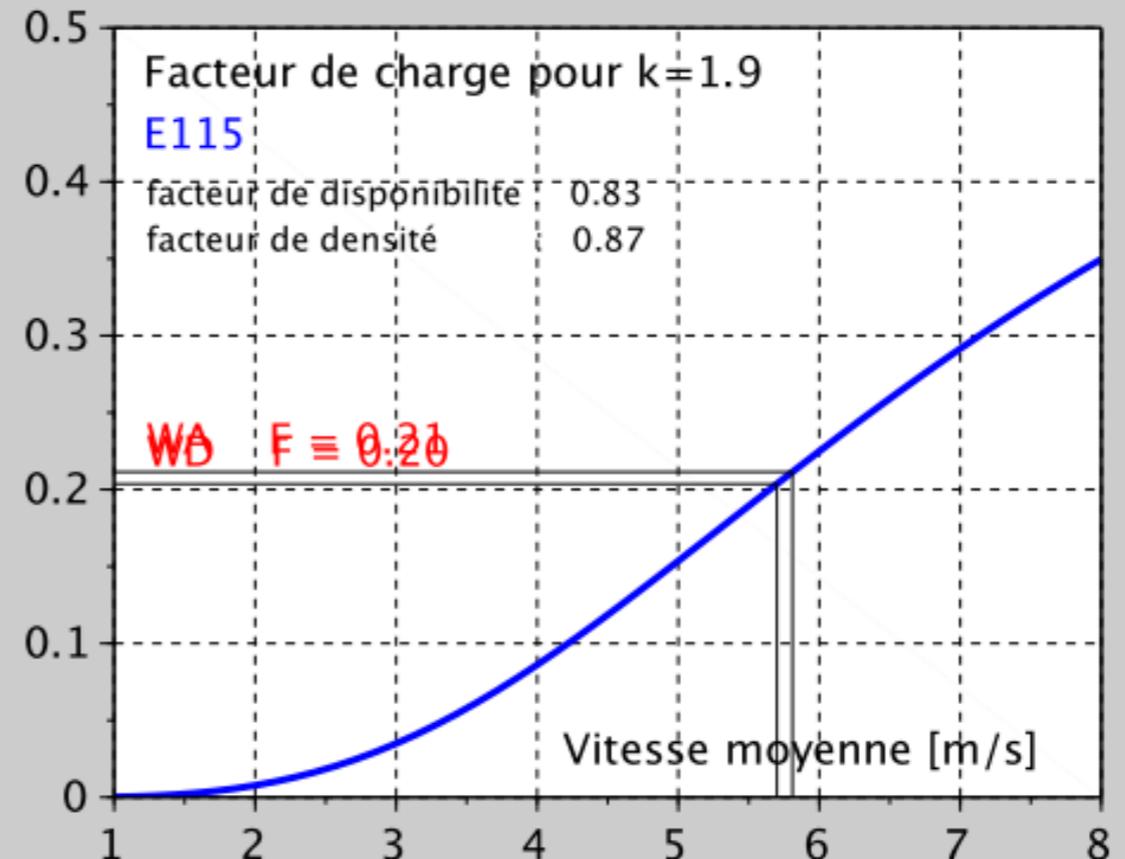
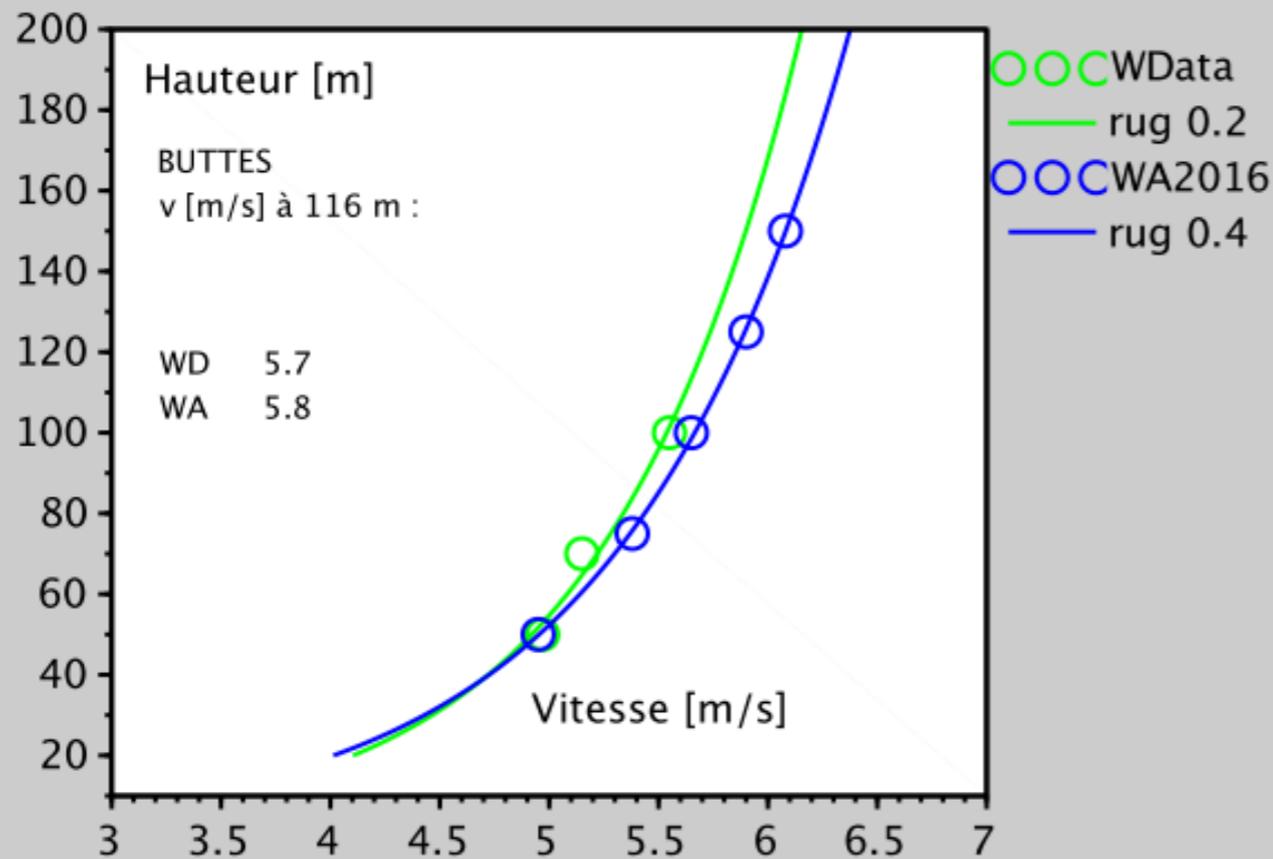
Rentabilité incertaine, d'autres facteurs n'apparaissent pas
(taux de turbulences élevé dans le relief du site).

EOL JOUX



WD et WA proches, Promoteurs bien au-delà ...
rentabilité financière non assurée pour $F=0.17$
 D'autres facteurs n'apparaissent pas
 (taux de turbulences élevé dans le relief du site)

MONTAGNE-de-BUTTES



Promoteurs : anémomètres hauts, > 1 année,
simulation à haute résolution (type WD) commandée à Meteotest
résultat pour E115 : $F = 0.20$
⇒ **accord remarquable Promoteurs, WD et WA**

Résumé de productivité et Conclusions

Productivités estimées

Estimation projets :

Données des projets, si existantes.

Sinon, extrapolation à partir de parc proches.

Estimation basse :

Cartes de vent Wind-Data (donne toujours la valeur la plus basse).

Si pas de données concrètes, estimation (basse) donnée par le projet

Production annuelle [GWh/an]	Total VD	Jorat / Gros de Vaud	Jura
Estimation basse	606	142	464
Estimation projets	945	359	586
Rapport	0.64	0.40	0.79

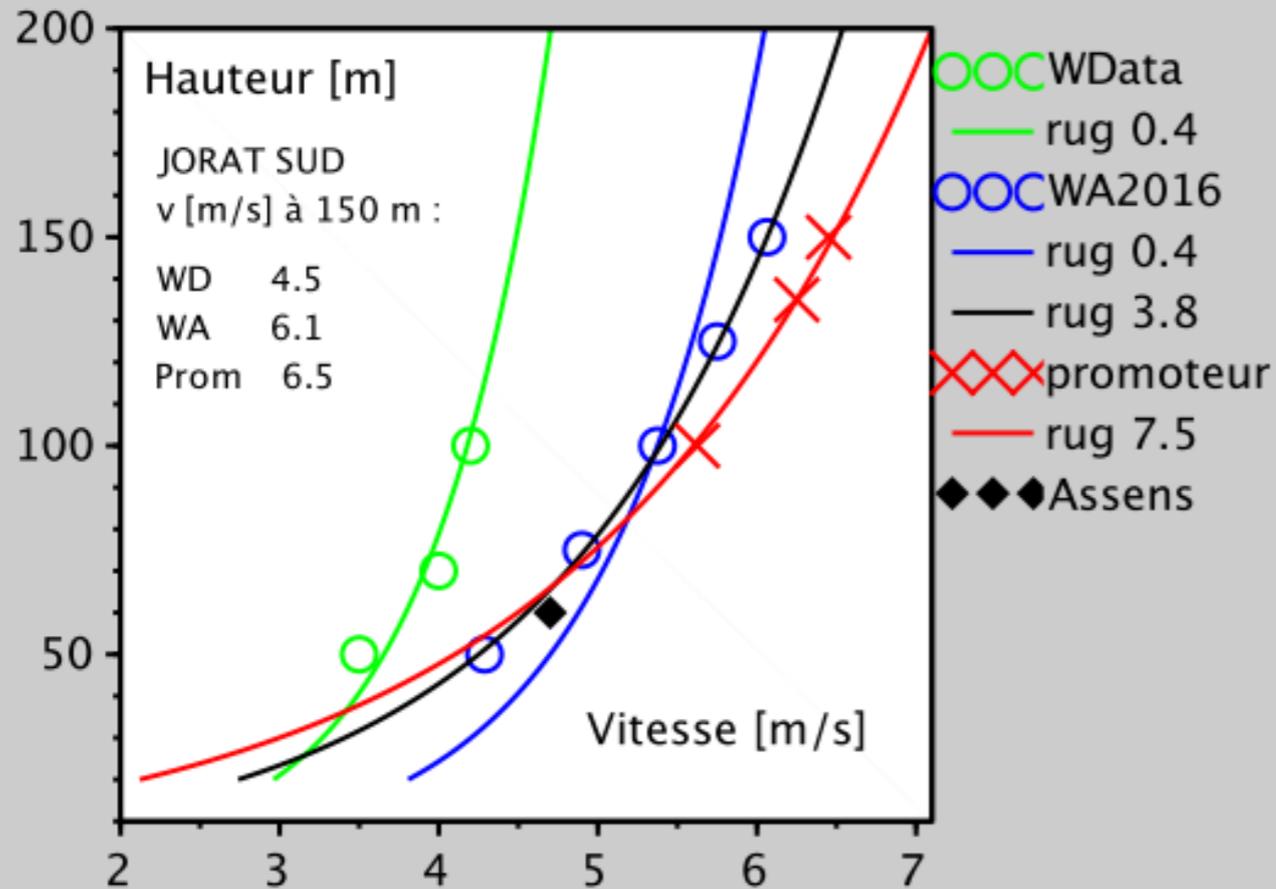
*Rem. Selon document conf. presse DTE 4.07.2016 : total Vaud = 1116 GWh/an.
Bottens et Chav.-s-Moudon abandonnés + données qui ont variés*

Conclusions

- Peu de projets ont fait usage d'anémomètres sur mâts selon les normes MEASNET. **Elles seules donnent des résultats sûrs.**
- Les mesures par SODAR seul (majoritaires) sont très discutables.
- Les estimations par CARTES DE VENTS (ce travail , donc) sont discutables. Mais elles donnent une valeur de productivité basse qui oblige à la prudence:
 - Total canton : **-36% avec les cartes WD.**
 - Jorat / Gros-de-Vaud : **-60% avec les cartes WD.**
 - Avec des effets négatifs non-considérés : moins de vent dans le futur (changement climatique), taux de turbulences élevés dans les reliefs (baisse de production + usure prématurée).
- **Les conséquences financières peuvent être considérables.**
- Les cartes Wind-Atlas 2016 ont intégrés des mesures SODAR. Elles sont très probablement trop optimistes dans certaines régions.
- **Des mesures anémomètres sur mâts semblent indispensables partout.**

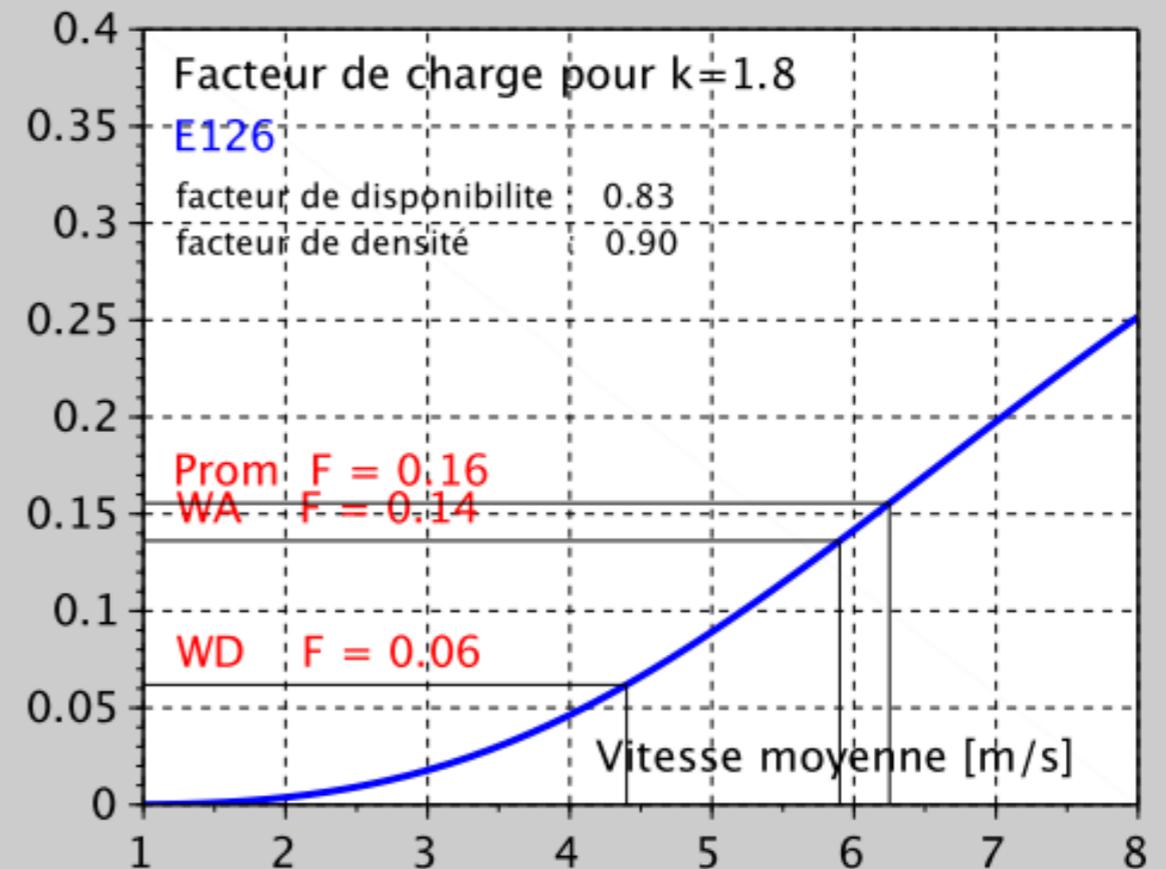
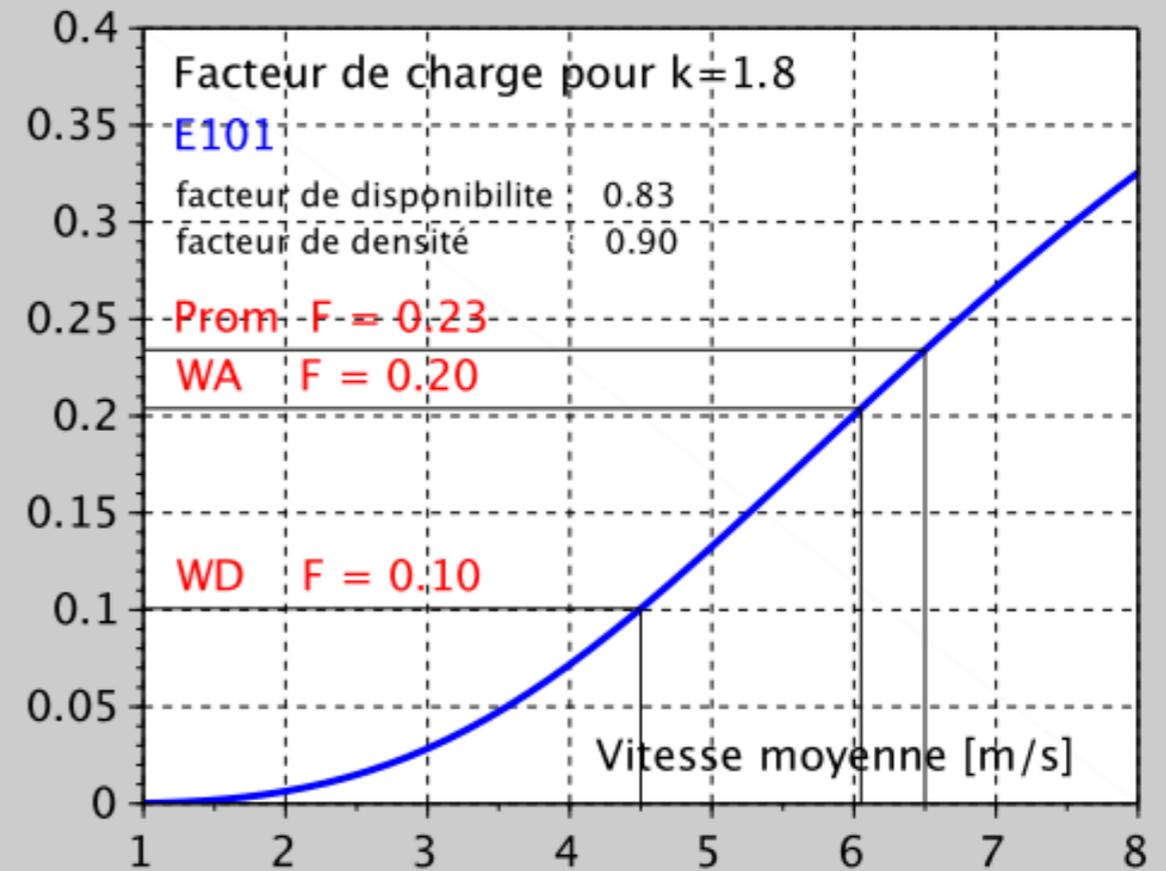
Matériel de réserve

JORAT-SUD



Anémotrète d'Assens: 9.5 km du site

2/3 de la production du site prévue avec E126, une machine faite pour des conditions extrêmes (P_{max} à 17 m/s) ...



Effets Additionnels

Fig.2: Vitesse de vent en moyenne annuelle

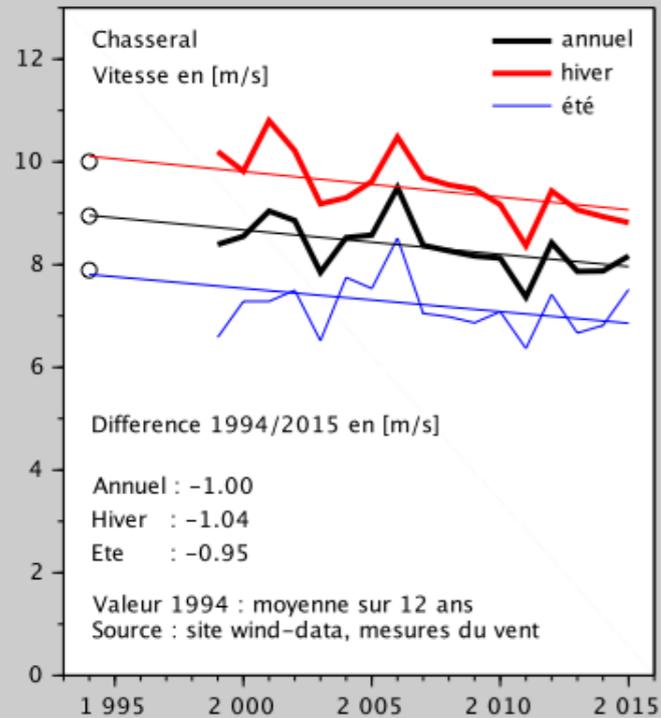
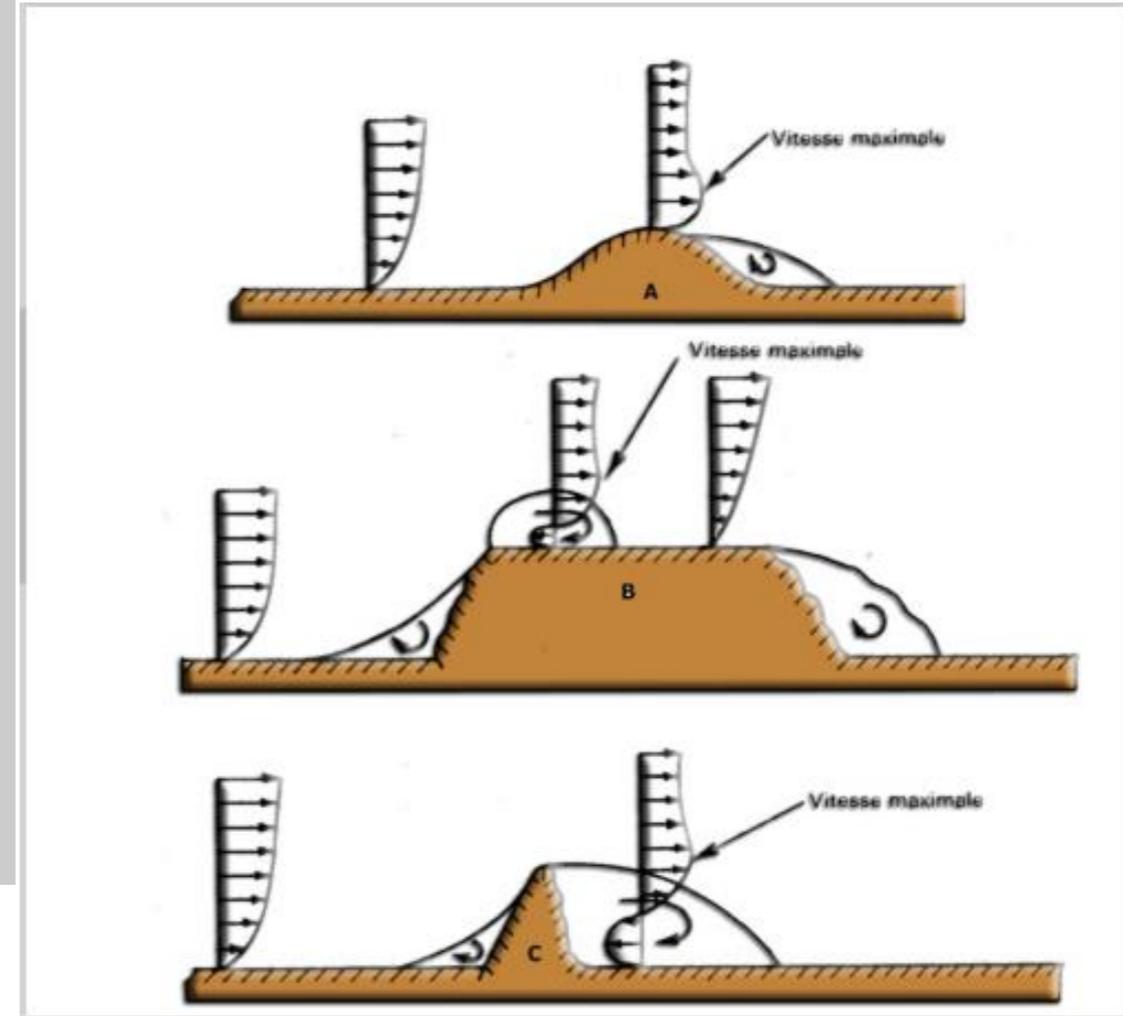
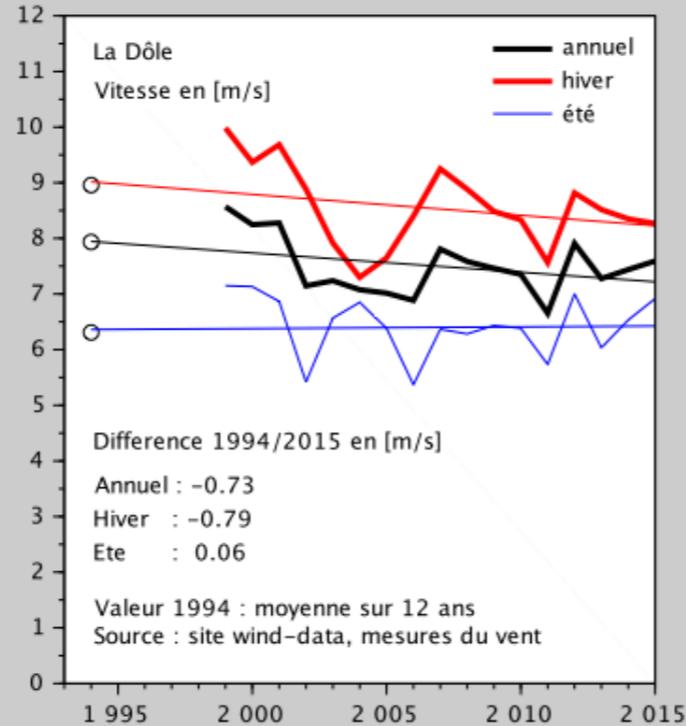


Fig.3: Vitesse de vent en moyenne annuelle



Selon les climatologues, la vitesse moyenne du vent va diminuer dans l'ouest de l'Europe continentale. Cet effet est déjà visible en Suisse :
-10% en 20 ans.

Donc -5% en moyenne en 20 ans.

Et -9% de production éolienne (dia nnn)
(très estimatif, demande un avis autorisé)

Relief compliqué :
turbulences, grosses différences de vitesse de vent haut/bas

Donc risque d'usure prématurée
-5% sur 20 ans ?

Comparaison de productions réelles avec calcul selon Wind-Atlas

Site	Production réelle [GWh]	Production selon WA [GWh]	Ecart Relatif
Peuchapatte	13500	10500	-22%
St-Brais	6300	6800	+ 8%
Martigny	5100	3750	-26%
Collonges	4700	1800	-62%
Charrat	6700	4300	-36%

Peuchapatte : trois machines sur une crête arrondie, avec un grand plateau de chaque côté. Très bonnes conditions pour de bonnes vitesses concentrées à faible hauteur, non-reproduites par la carte WA.

Les vents thermiques (Léman/ Valais central) du coude du Rhône semblent ne pas exister pour WA.

Ou alors, en régime de vent d'ouest, le flux artificiellement élevé vers le Jorat réduit la part vers le Valais

Table 1

Ste-Croix	0.18	0.18	22	22	22	22		
Sur-Grati	0.19	0.31	30	49				
Eol Joux	0.17	0.30	32	56				
Eol Jorat Sud	0.08	0.24	27	80	89	185	27	80
Mollendruz		0.28	79	90	79	90		
Bel Coster	0.19	0.29	46	70				
Grandsonnaz	0.20	0.25	96	120				
Provence	0.20	0.24	83	100				
Tous-Vents	0.10	0.31	19	57			19	57
Eol Jorat Nord	0.12	0.36	18	55	262	402	18	55
Essertines-s-Rolle	0.2	0.2	29	29				
Bavois	0.2	0.2	29	29	58	58	29	29
Bottens			0	0				
Grandevent	0.15	0.18	19	22				
Vaudair	0.16	0.41	25	65			25	65
Villars-le-Terroir	0.1	0.31	11	32			11	32
Vuarrens	0.1	0.31	13	41			13	41
Biere	0.15	0.15	28	28				
Chavannes-s-Moudon			0	0	96	188		
			606	945	606	945	142	359

Atlas des vents de la Suisse 2016

5 à 7 de l'éolien :
« Vent et productivité des parcs éoliens »

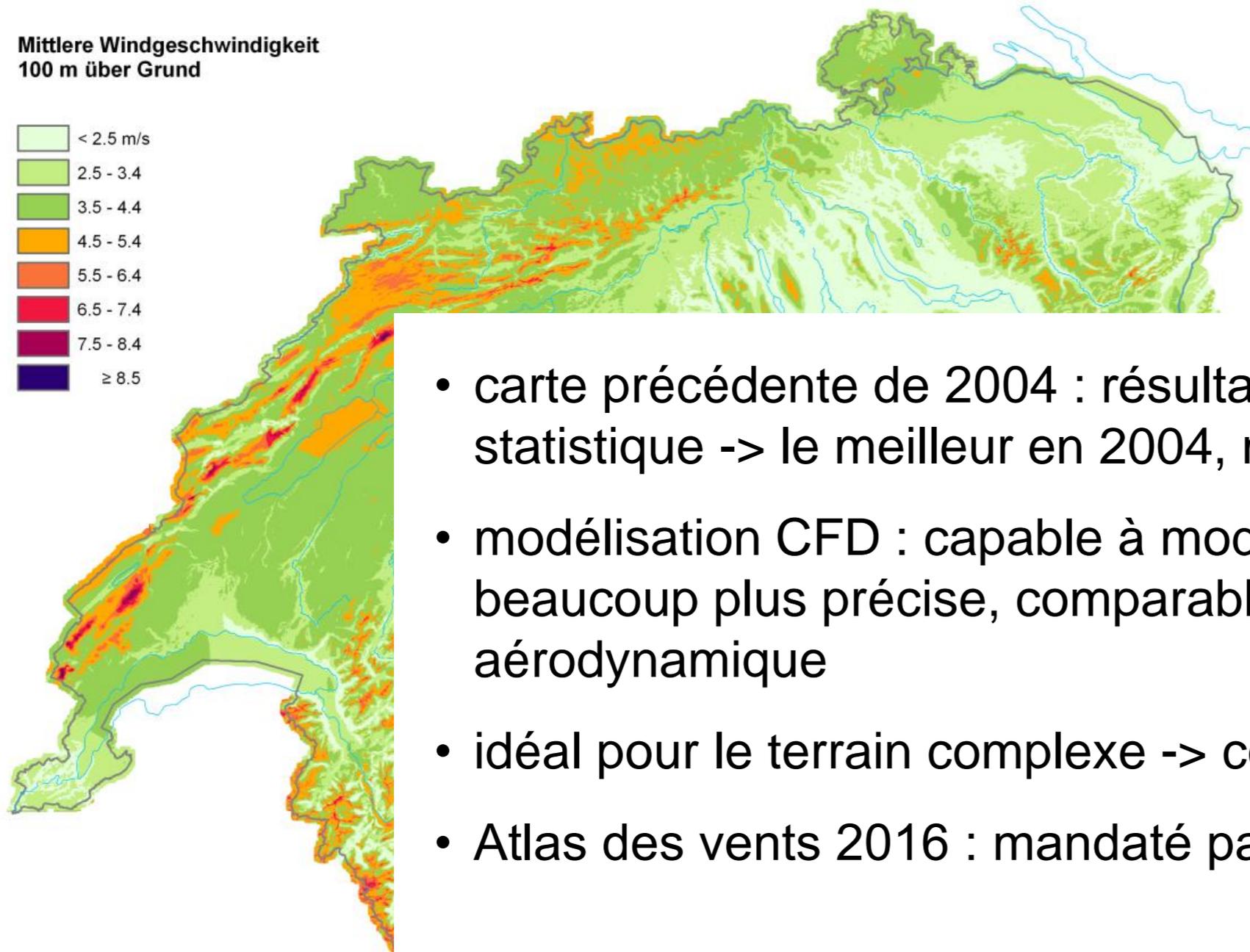
Dr. Saskia Bourgeois
Sara Koller



- Pourquoi un nouveau Atlas des vents de la Suisse?
- Données de base / modélisation CFD
- Résultats et informations sur:
<http://wind-data.ch/windkarte/index.php?lng=fr>
- Validations
- Cartes des vents pour l'Europe, exemples pour FR, GE, AUT

Pourquoi un nouveau Atlas des vents de la Suisse?

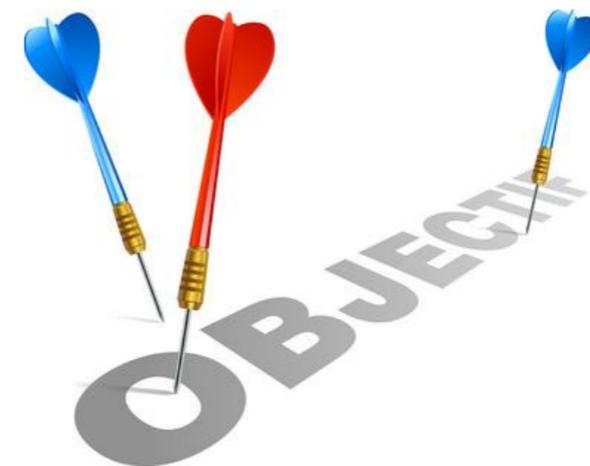
Mittlere Windgeschwindigkeit
100 m über Grund



- carte précédente de 2004 : résultat d'un calcul statistique -> le meilleur en 2004, mais plus en 2016
- modélisation CFD : capable à modéliser les vents beaucoup plus précise, comparable avec un tunnel aérodynamique
- idéal pour le terrain complexe -> comme en Suisse
- Atlas des vents 2016 : mandaté par l'OFEN

Objectif de l'Atlas des vents de la Suisse

- Outil informatif qui renseigne sur le potentiel des vents
- L'Atlas des vents ne remplace pas des mesures sur site
- L'Atlas des vents comporte des incertitudes au vu de la méthodologie
-> un modèle reste un modèle
- L'Atlas des vents comporte des incertitudes au vu de la "fiabilité" des données de base (mesures de vents)
- L'Atlas des vents peut être mis à jour avec des nouvelles/meilleures mesures de vents

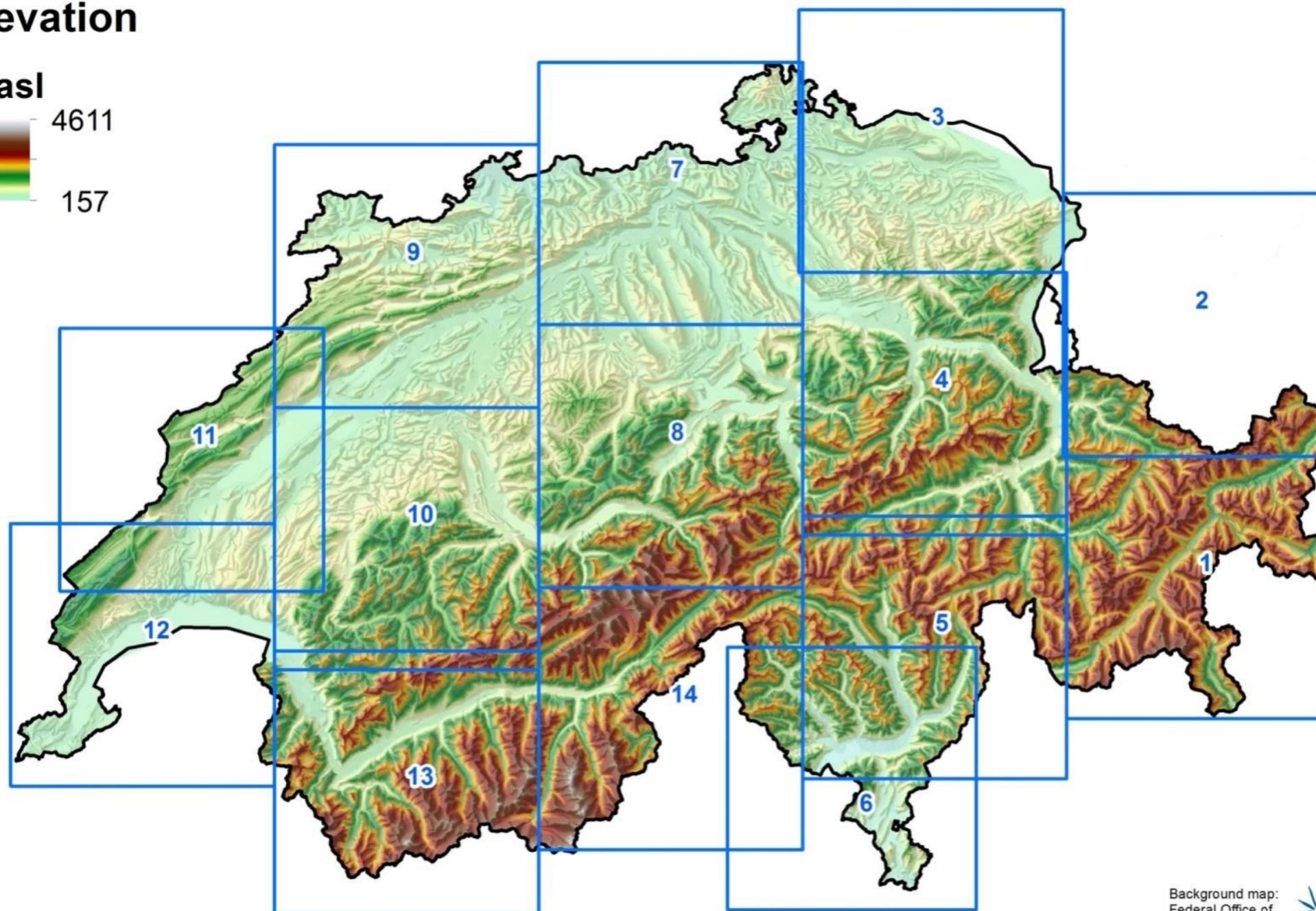
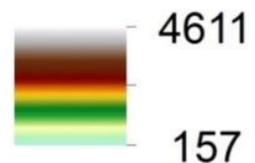


Données de base : modèle numérique de terrain



Elevation

m asl



0 20 40 80 Kilometers

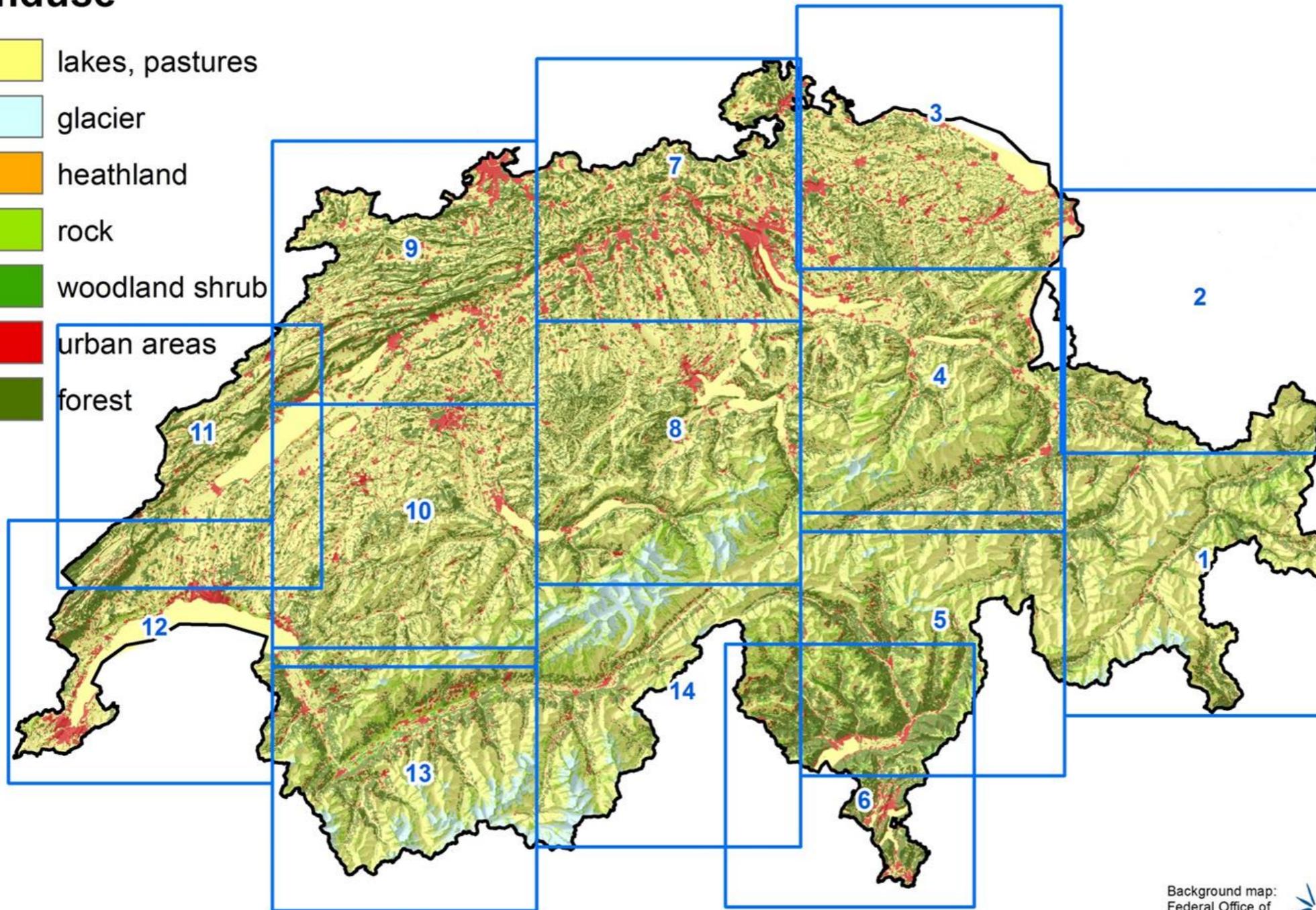
Background map:
Federal Office of
Topography
Bern, June 2015



Données de base : modèle de la rugosité du terrain

landuse

-  lakes, pastures
-  glacier
-  heathland
-  rock
-  woodland shrub
-  urban areas
-  forest



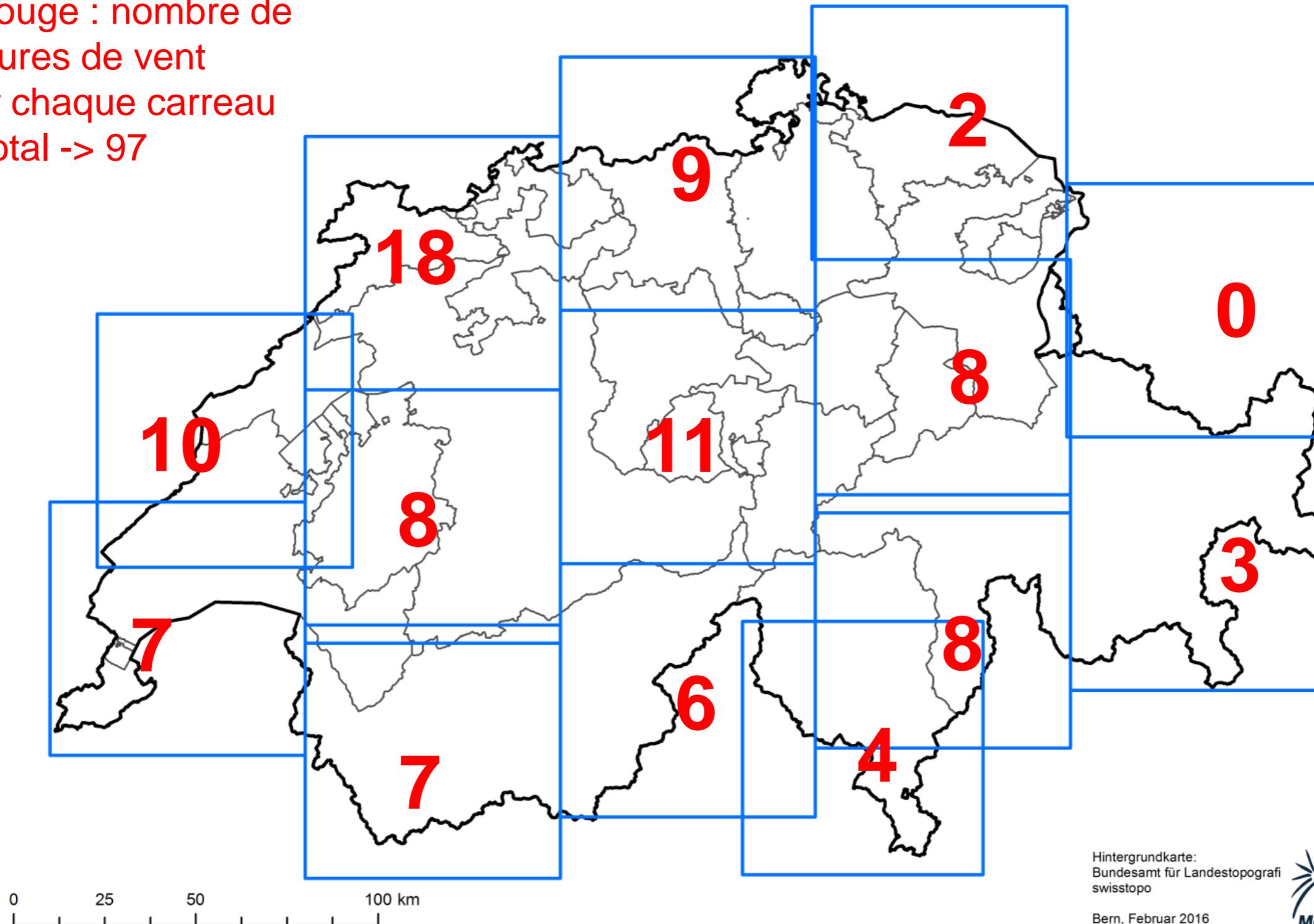
Background map:
Federal Office of
Topography

Bern, June 2015

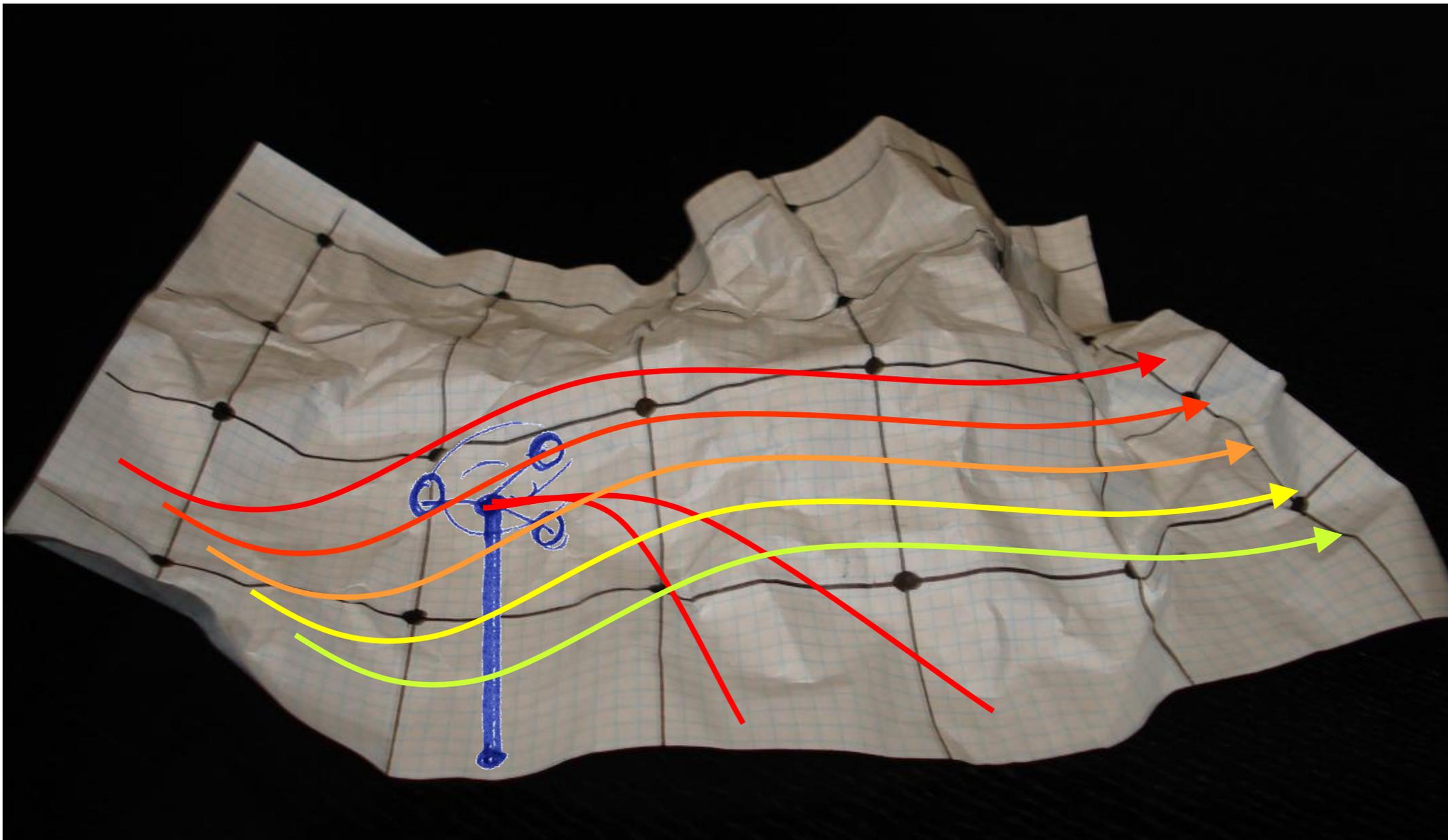


Données de base : mesures de vents

En rouge : nombre de
mesures de vent
pour chaque carreau
en total -> 97



Modélisation CFD

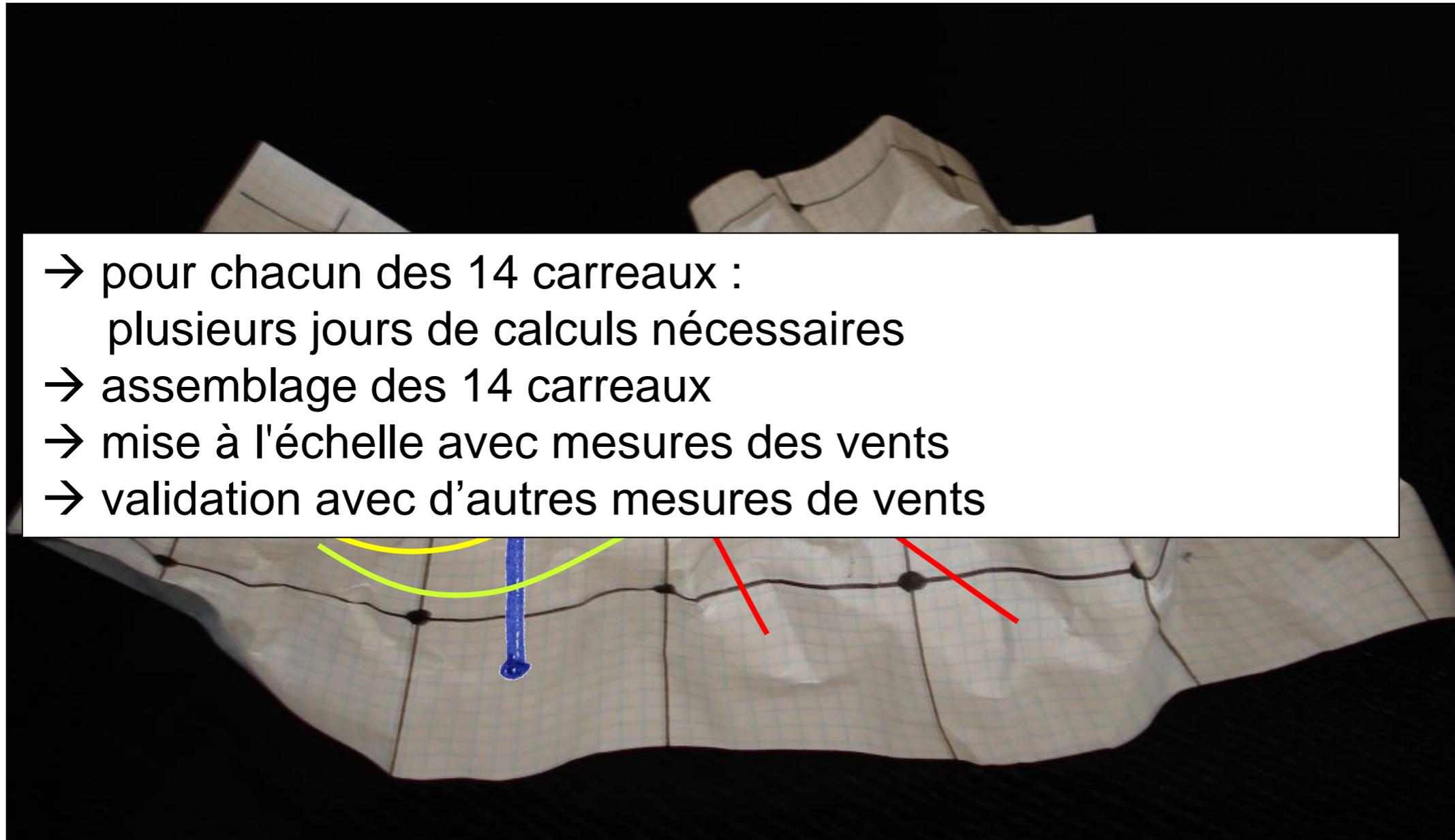


- CFD : Computational Fluid Dynamics
- tunnel virtuel aérodynamique
- bons résultats en terrain complexe

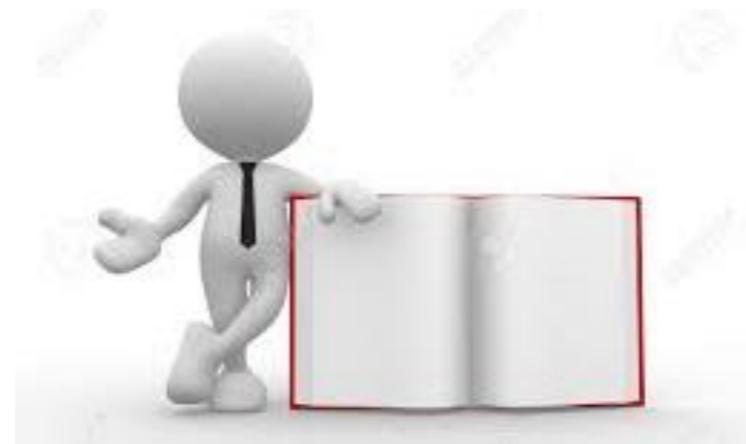
Modélisation CFD : cont.



- pour chacun des 14 carreaux :
plusieurs jours de calculs nécessaires
- assemblage des 14 carreaux
- mise à l'échelle avec mesures des vents
- validation avec d'autres mesures de vents



Résultats



L'Atlas des vents est disponible :

<http://wind-data.ch/windkarte/index.php?lng=fr>

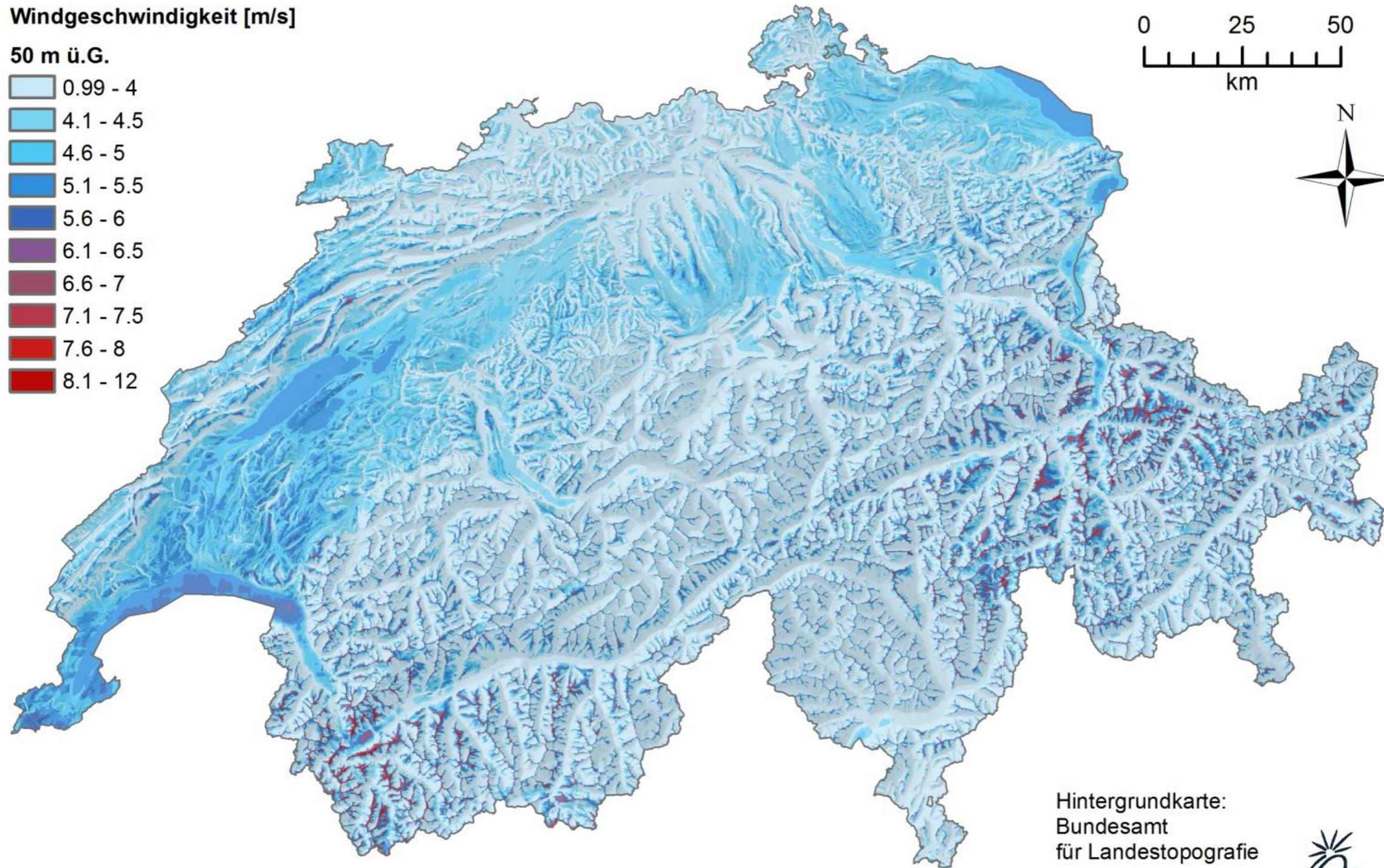
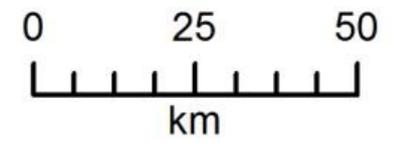
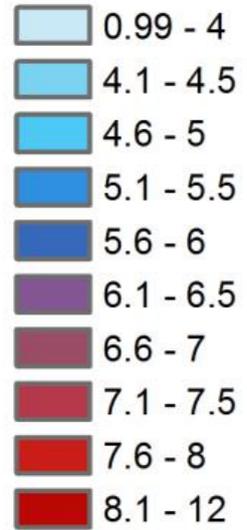
<https://map.geo.admin.ch/>

- L'Atlas des vents de la Suisse renseigne sur :
 - la moyenne annuelle modélisée de la vitesse et de la direction du vent
 - à cinq hauteurs différentes au-dessus du niveau du sol (50 m, 75 m, 100 m, 125 m et 150 m)
- Cliquer sur la carte pour afficher la rose des vents et la distribution de Weibull pour la cellule du maillage sélectionnée.

Résultats : 50 m

Windgeschwindigkeit [m/s]

50 m ü.G.



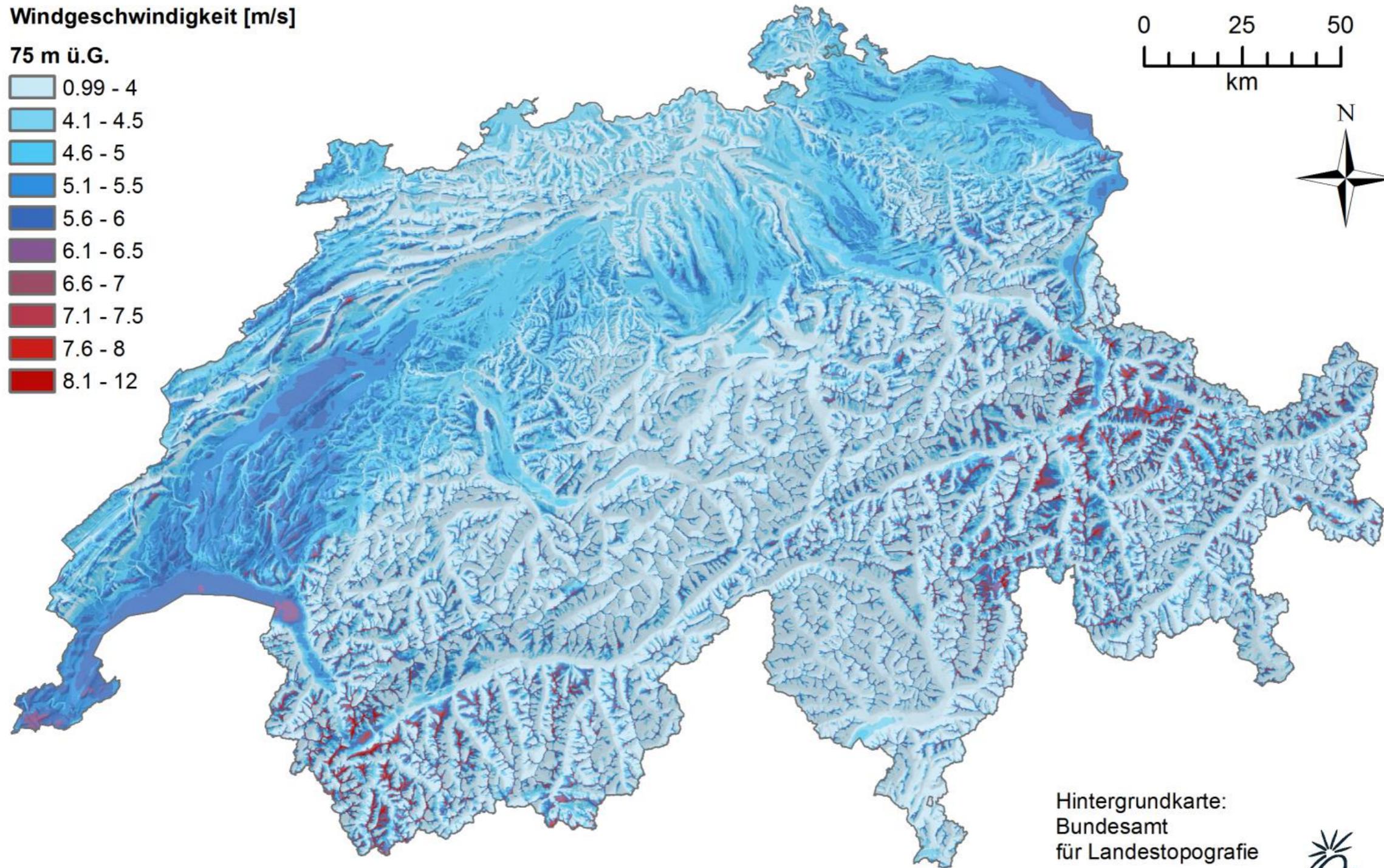
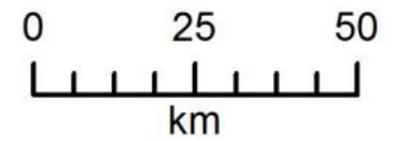
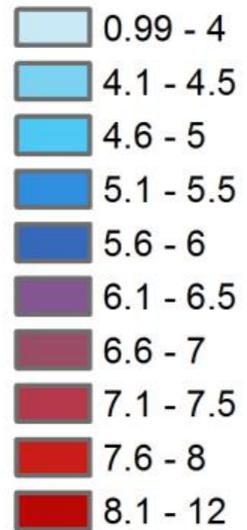
Hintergrundkarte:
Bundesamt
für Landestopografie

Bern, Februar 2016

Résultats : 75 m

Windgeschwindigkeit [m/s]

75 m ü.G.



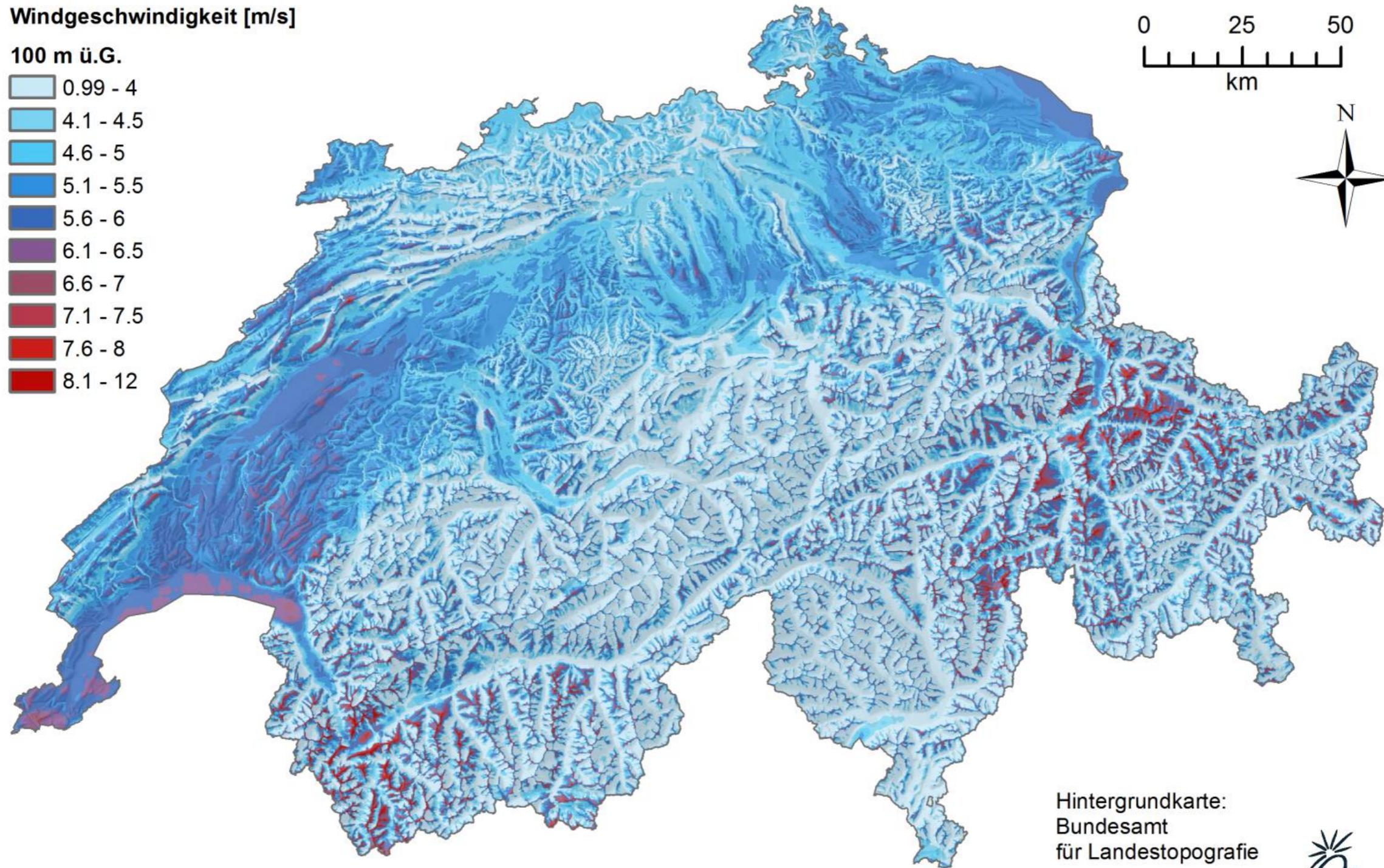
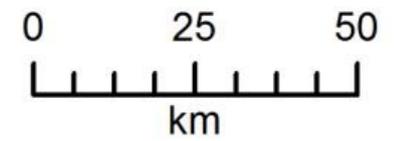
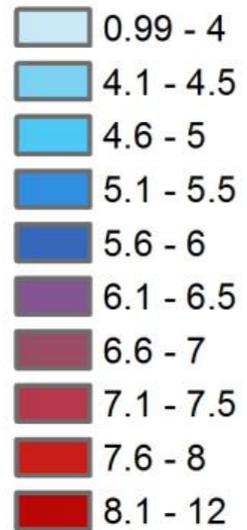
Hintergrundkarte:
Bundesamt
für Landestopografie

Bern, Februar 2016

Résultats : 100 m

Windgeschwindigkeit [m/s]

100 m ü.G.



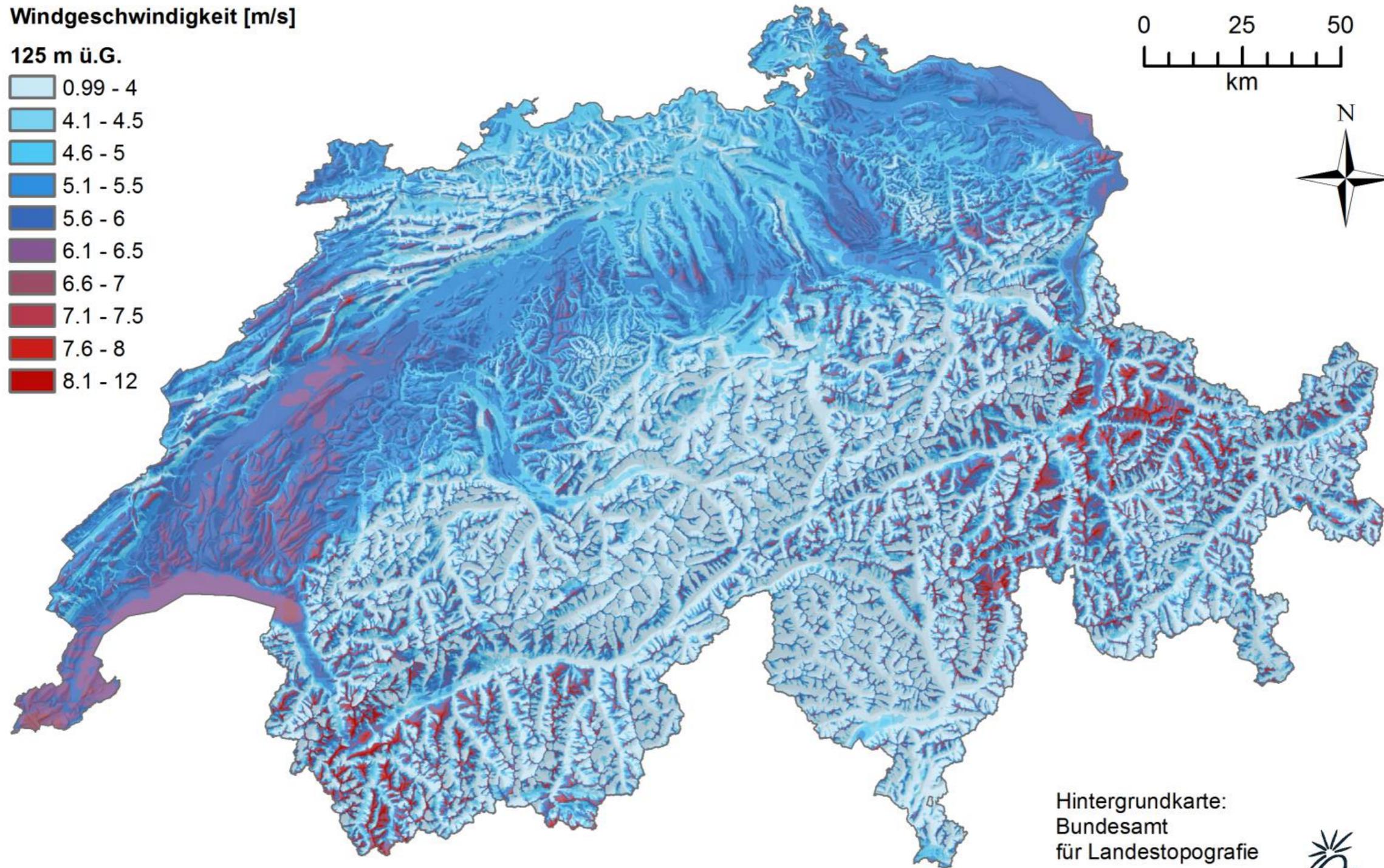
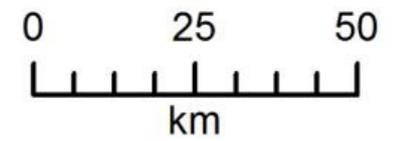
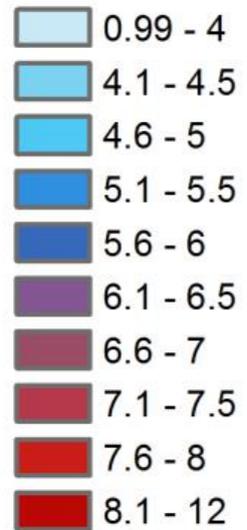
Hintergrundkarte:
Bundesamt
für Landestopografie

Bern, Februar 2016

Résultats : 125 m

Windgeschwindigkeit [m/s]

125 m ü.G.



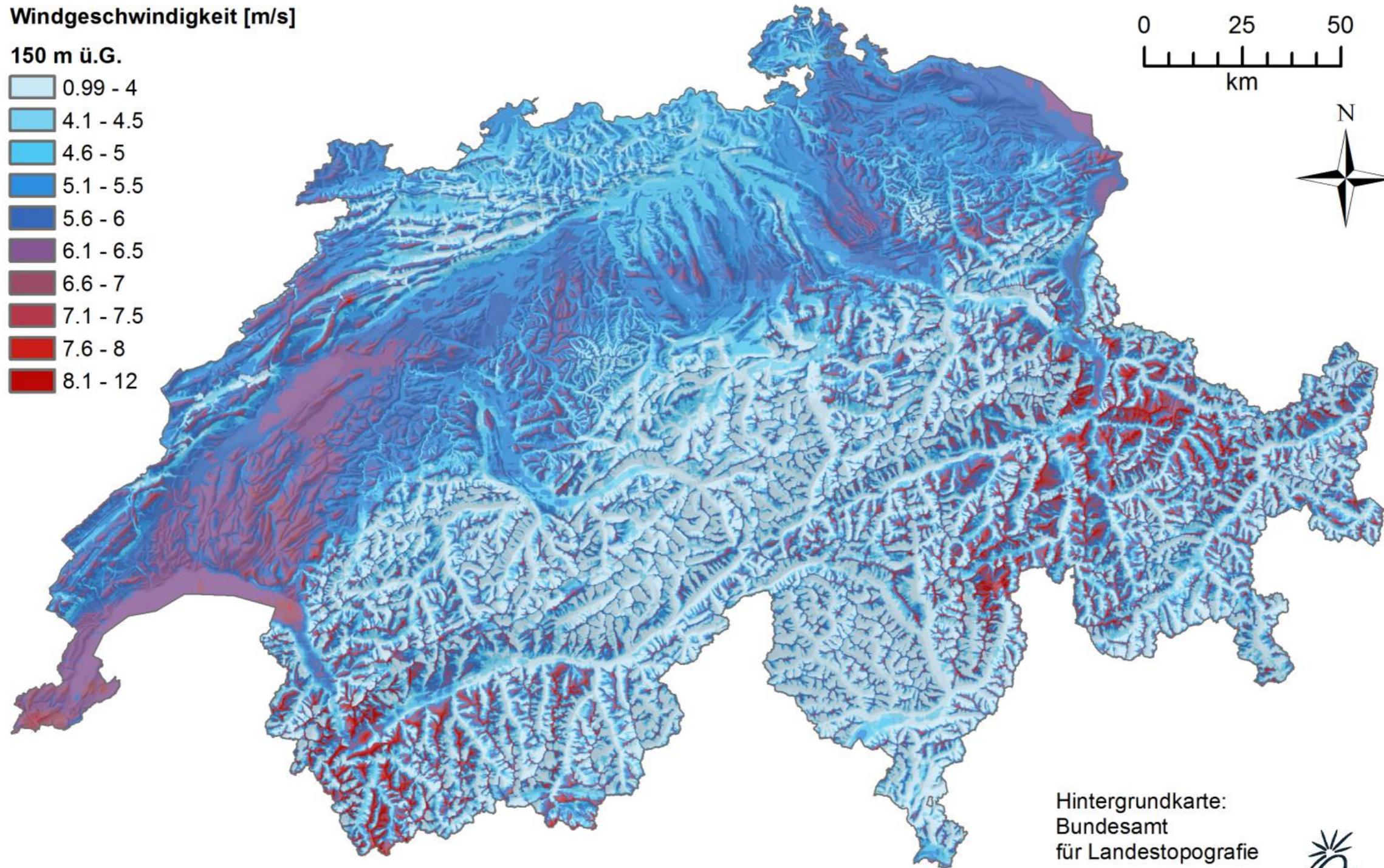
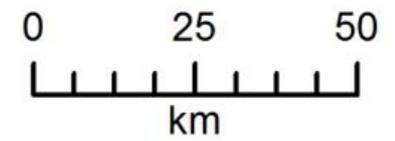
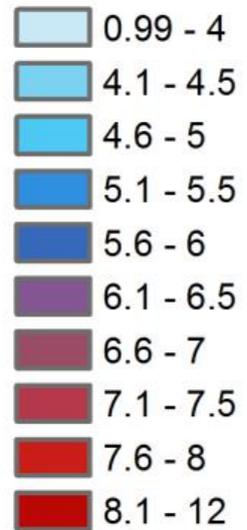
Hintergrundkarte:
Bundesamt
für Landestopografie

Bern, Februar 2016

Résultats : 150 m

Windgeschwindigkeit [m/s]

150 m ü.G.



Hintergrundkarte:
Bundesamt
für Landestopografie

Bern, Februar 2016

Validation



- Pour une validation, les résultats de la modélisation ont été comparé avec des mesures de vent qui n'ont pas été utilisées pour la modélisation.
- A partir de cela, les incertitudes pour des différentes régions ont été déterminées.

espace naturel / topographie	ordre de grandeur de l'incertitude
Jura	+/- 0.5 m/s
Le Plateau suisse	+/- 0.8 m/s
Préalpes	+/- 1.0 m/s
Alpes (vallée)	+/- 1.5 m/s
Alpes (montagne)	+/- 1.5 m/s

- (+) Beaucoup plus précis que la carte des vents de 2004
- (-) L'incertitude est toujours assez grande dans les régions avec peu de mesures de vent

...et nos voisins?



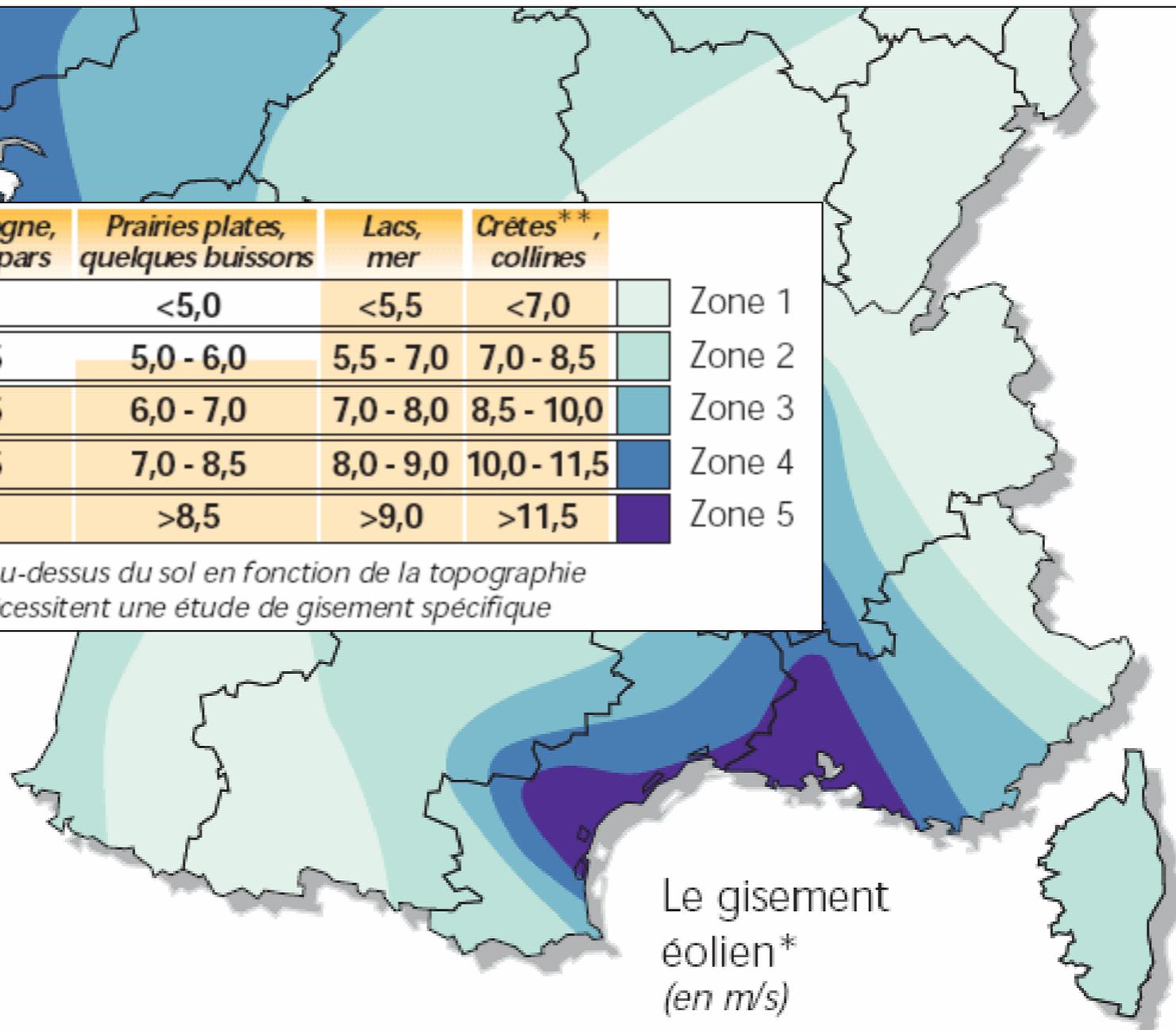
- seulement des cartes de vents très généralisées sont disponibles au public

France

* Vitesse du vent à 50 mètres au-dessus du sol en fonction de la topographie
 ** Les zones montagneuses nécessitent une étude de gisement spécifique

Bocage dense, bois, banlieue	Rase campagne, obstacles épars	Prairies plates, quelques buissons	Lacs, mer	Crêtes**, collines	
<3,5	<4,5	<5,0	<5,5	<7,0	Zone 1
3,5 - 4,5	4,5 - 5,5	5,0 - 6,0	5,5 - 7,0	7,0 - 8,5	Zone 2
4,5 - 5,0	5,5 - 6,5	6,0 - 7,0	7,0 - 8,0	8,5 - 10,0	Zone 3
5,0 - 6,0	6,5 - 7,5	7,0 - 8,5	8,0 - 9,0	10,0 - 11,5	Zone 4
>6,0	>7,5	>8,5	>9,0	>11,5	Zone 5

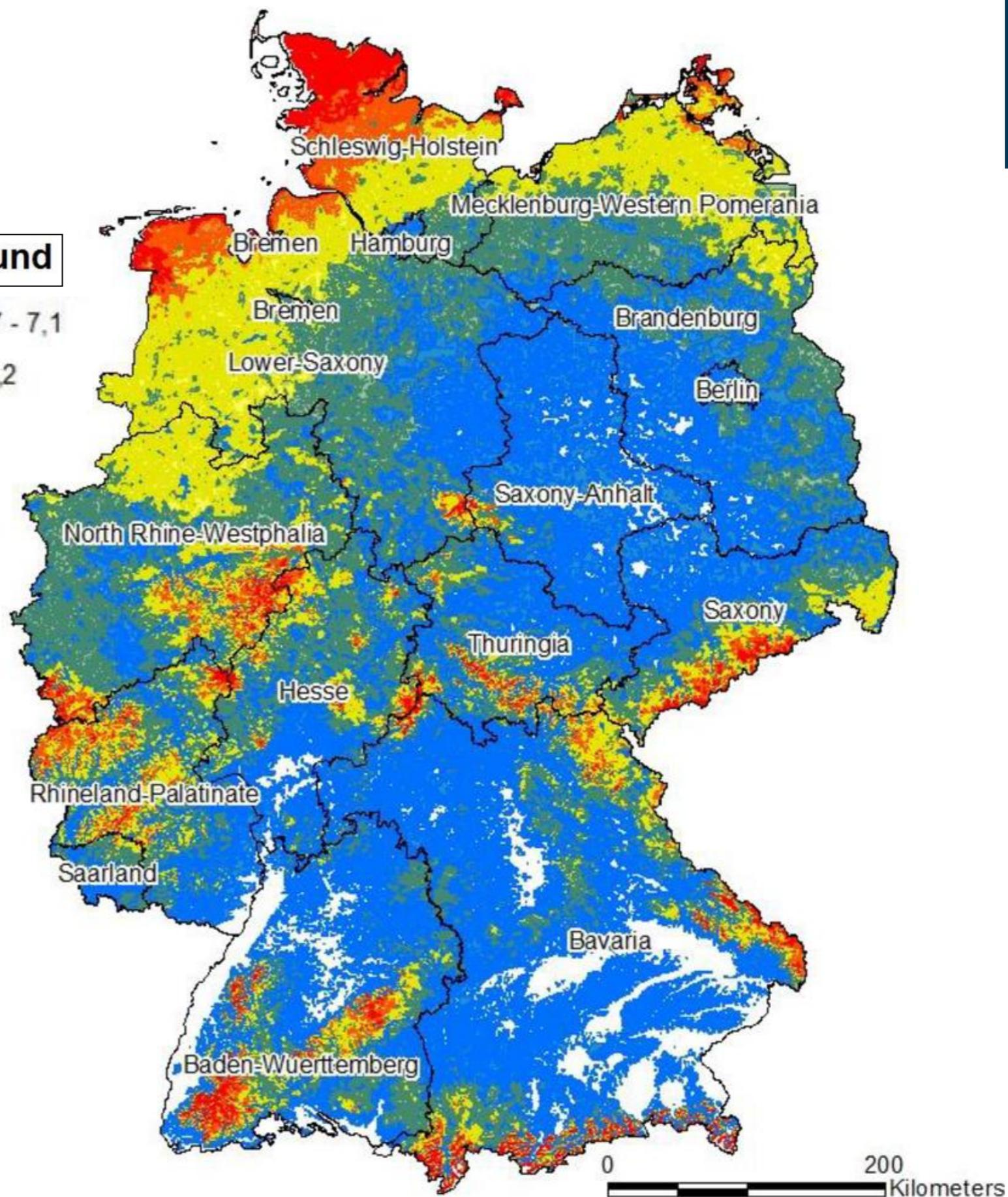
* Vitesse du vent à 50 mètres au-dessus du sol en fonction de la topographie
 ** Les zones montagneuses nécessitent une étude de gisement spécifique



Le gisement éolien*
 (en m/s)

Allemagne

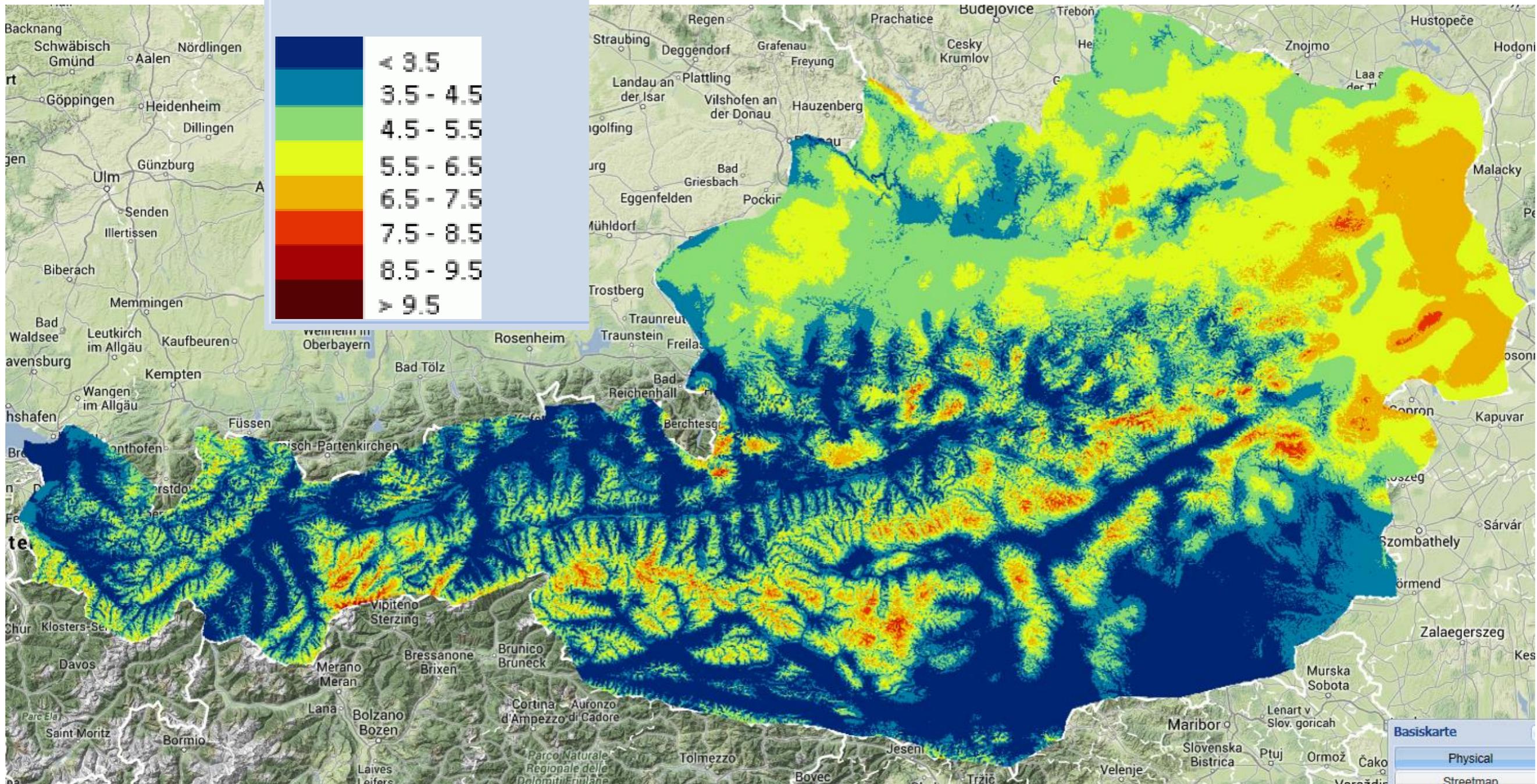
Mean Wind Speed in 100m above ground



Autriche



mittlere
Jahreswindgeschwindigkeit
in 100m ü.Grund [m/s]

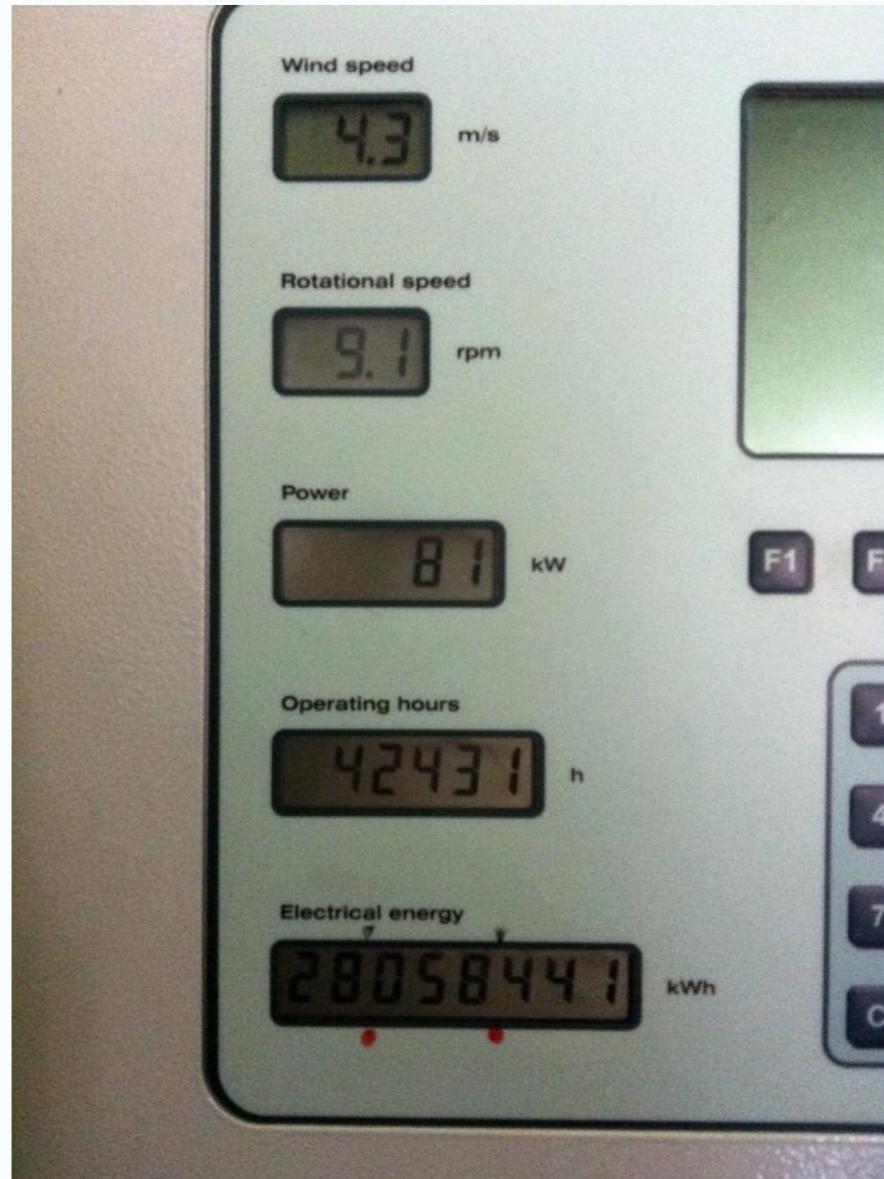


www.windatlas.at

Merci pour votre attention!

Saskia Bourgeois
www.meteotest.ch

Production de parcs éoliens en Suisse et ailleurs



Suisse Eole est partenaire de:

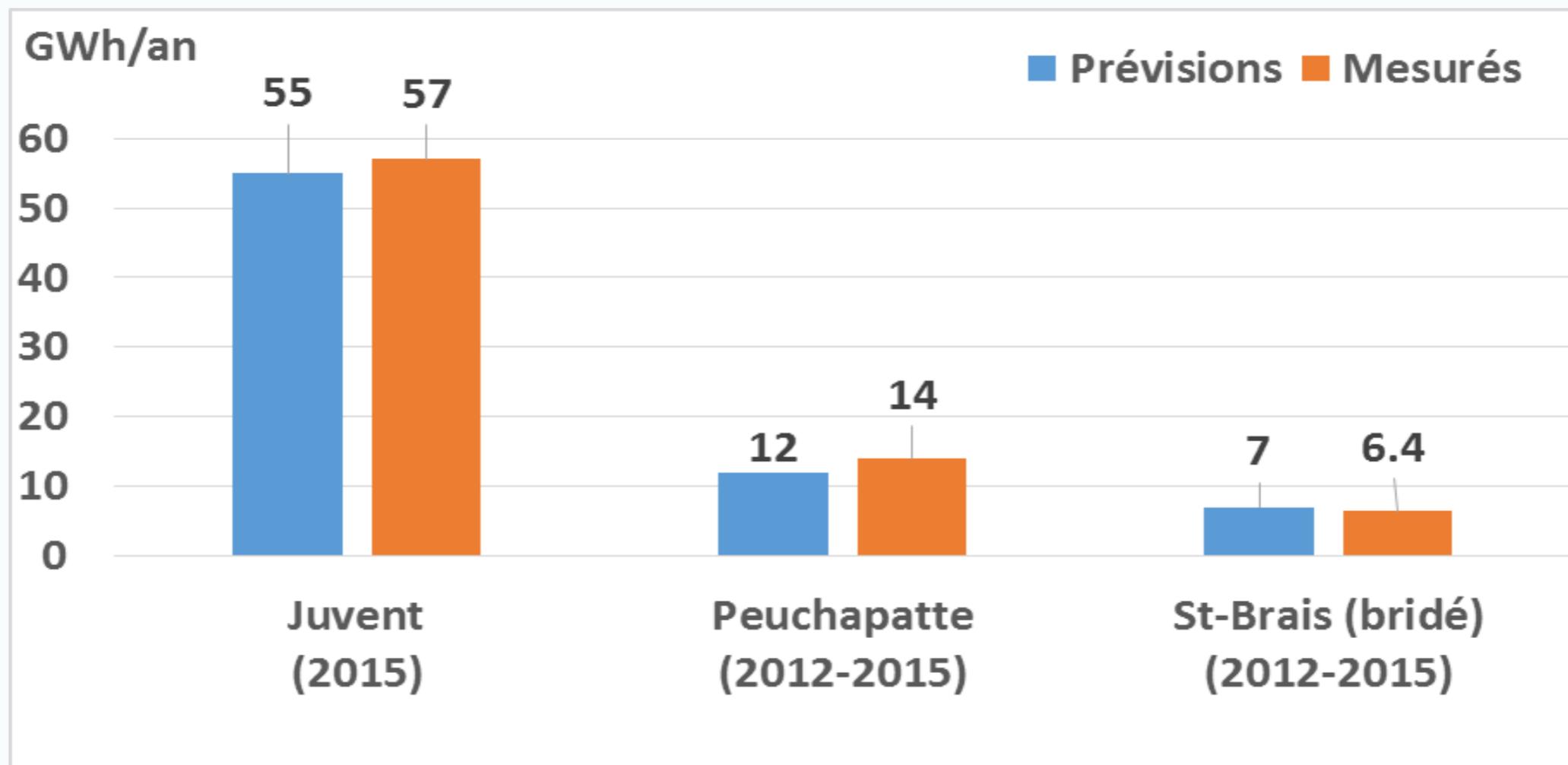


Sommaire

- ◆ État actuel Suisse et pays voisins
- ◆ Évolution
- ◆ Comparatif avec d'autres technologies
- ◆ Apports spécifiques de l'énergie éolienne

Production actuelle éolien CH

- ◆ Jura: Juvent et Peuchapatte dépassent les prévisions initiales



Sources données: wind-data.ch + communiqués ADEV, Alpiq & Valeole

Suisse Eole est partenaire de:





Une région comparable (D)

	Suisse	Rheinland-Pfalz (D)
Surface	41'285 km ²	19'853 km ²
Habitants	7.8 mio	4.0 mio
Fin 2015:		
- nb éoliennes	34	1'514
- électricité produite	108 GWh	5'560 GWh
- part de la consommation élec.	0.2%	17%
Objectif:	-> 2035:	-> 2030
- électricité produite	6'000 GWh	14'800 GWh
- part de la consommation élec.	10%	45%
(2011)		

Source données: wind-data.ch, fachagentur-windenergie.de & Fraunhofer

Suisse Eole est partenaire de:



Comparatif production actuelle pays

Données 2015	Suisse	Autriche	France	Allemagne	Espagne
Capacité éolienne totale installée [GW]	0.06	2.4	10.4	44.6	23.0
Électricité éolienne générée [TWh]	0.1	3.9	21.1	85.4	48.4
% de la consommation électrique nationale	0.2%	8.7%	4.1%	17.8%	20%
Productible équivalent [h]	1790	1618	2037	1915	2101

Sources: IG Windkraft, FEE, Fraunhofer, AEE, Observ'ER

Suisse Eole est partenaire de:



Evolution passée

Analyse des données de production du Mont Crosin (wind-data.ch)

Année	Production	Puissance	Productible équivalent
1998	2'490'000 kWh	2'460 kW	1012 h
2003	4'350'180 kWh	4'160 kW	1046 h
2006	9'176'106 kWh	7'660 kW	1198 h
2012	45'677'108 kWh	23'660 kW	1931 h
2015	56'951'099 kWh	29'660 kW	1950 h
Prév. 2017	70'000'000 kWh	37'200 kW	1881 h

L'évolution du productible des éoliennes est indéniable

Les dernières éoliennes du Mont-Crosin sont bien à des fonctionnements équivalents à 2000 heures pleines !

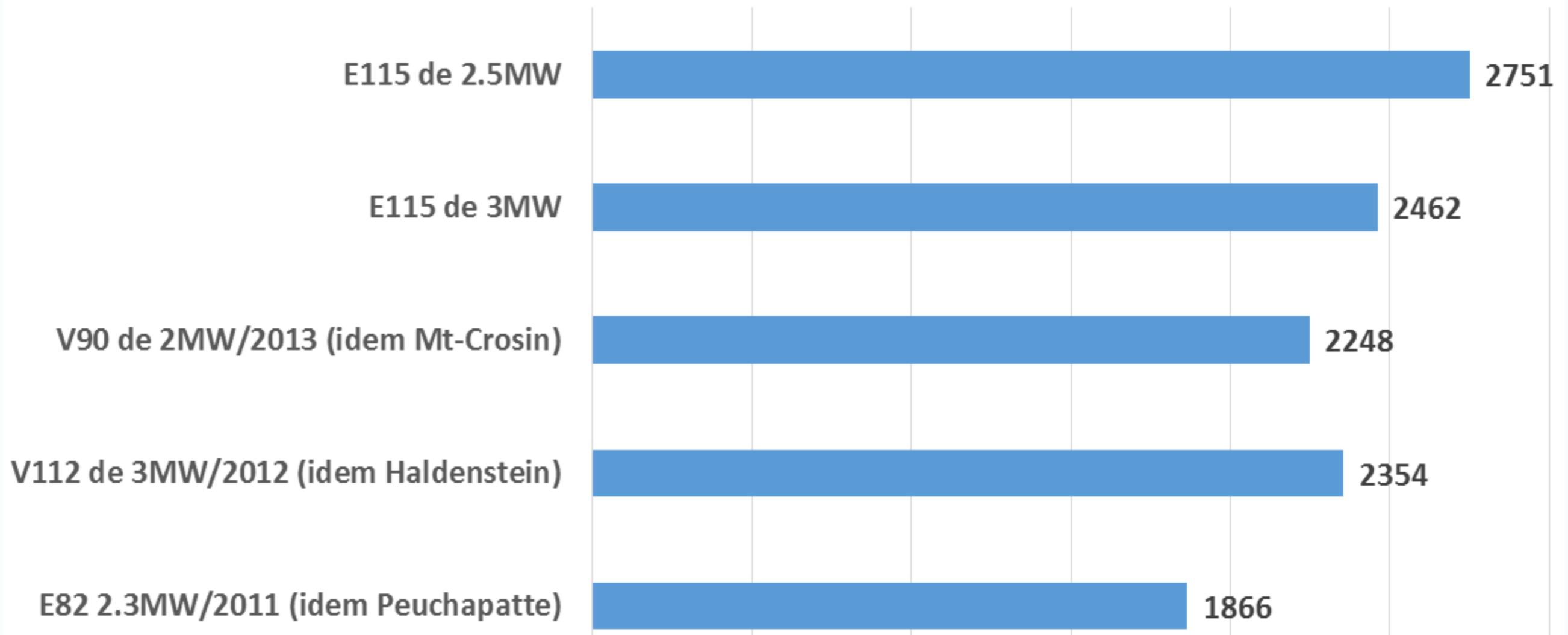
Suisse Eole est partenaire de:



Evolution actuelle

La nouvelle génération d'éoliennes optimisées pour l'onshore fait grimper le potentiel:

Nombre d'heures de plein rendement par type d'éolienne et par an, à 1000m, vent moy. 6m/s



Source: [calculateur wind-data.ch](http://calculateur.wind-data.ch)

Suisse Eole est partenaire de:



Comparatif avec autres technologies

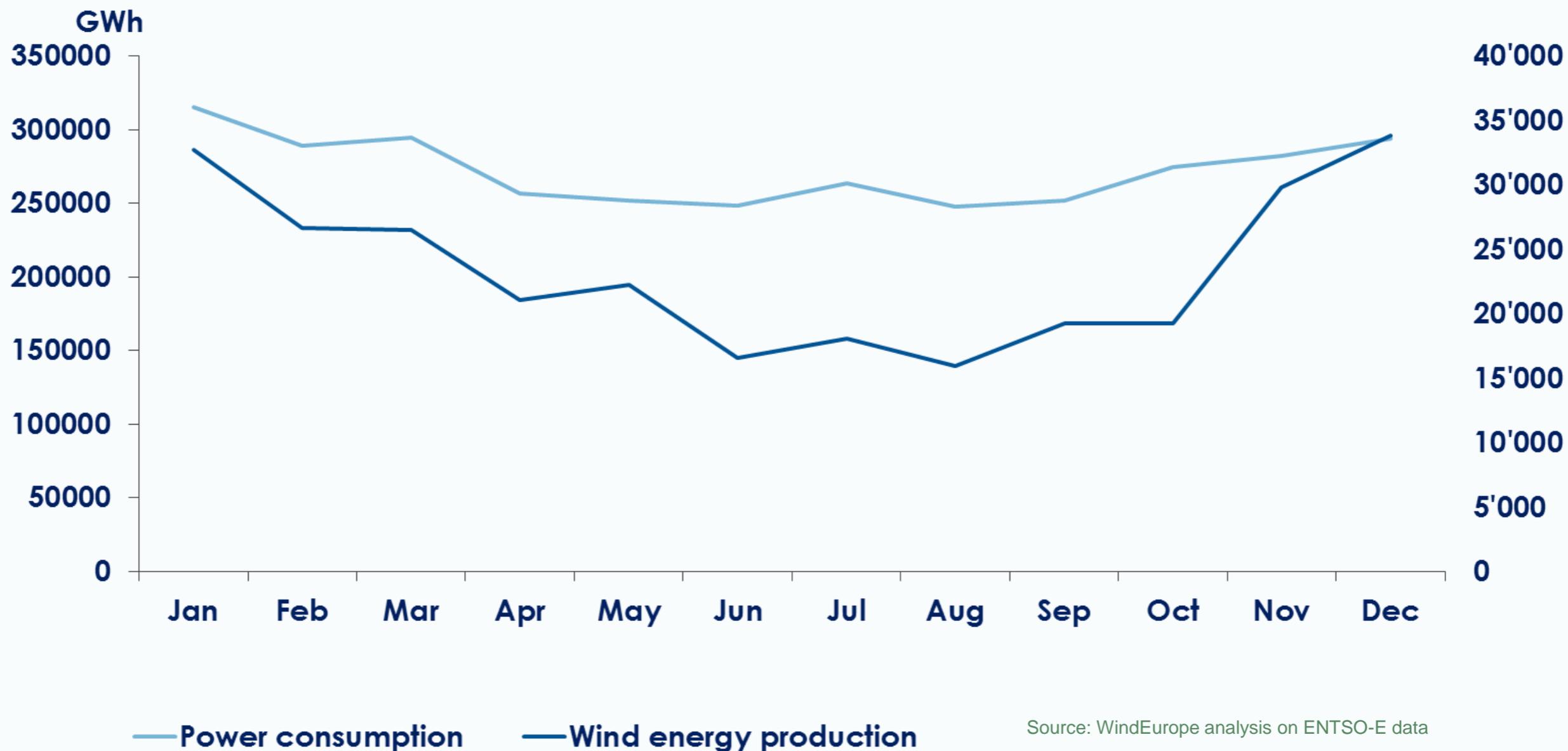
Technologie	Heures d'exploitation à pleine charge (h/a)
Centrale au fil de l'eau (grande/petite)	Environ 4400
Centrale à accumulation (pompage-turbinage)	Environ 2200
Biomasse	5000–7000 (majoritairement en hiver)
Photovoltaïque	Environ 950 (environ 1/3 en hiver)
Energie éolienne	1600–3000 environ 2/3 en hiver)
Géothermie	6500–8000
CCF	3000–4500 (environ 3/4 en hiver)
Centrale à gaz à cycle combiné	4000–8000
Nucléaire	Environ 8000

Source: AES 2012a

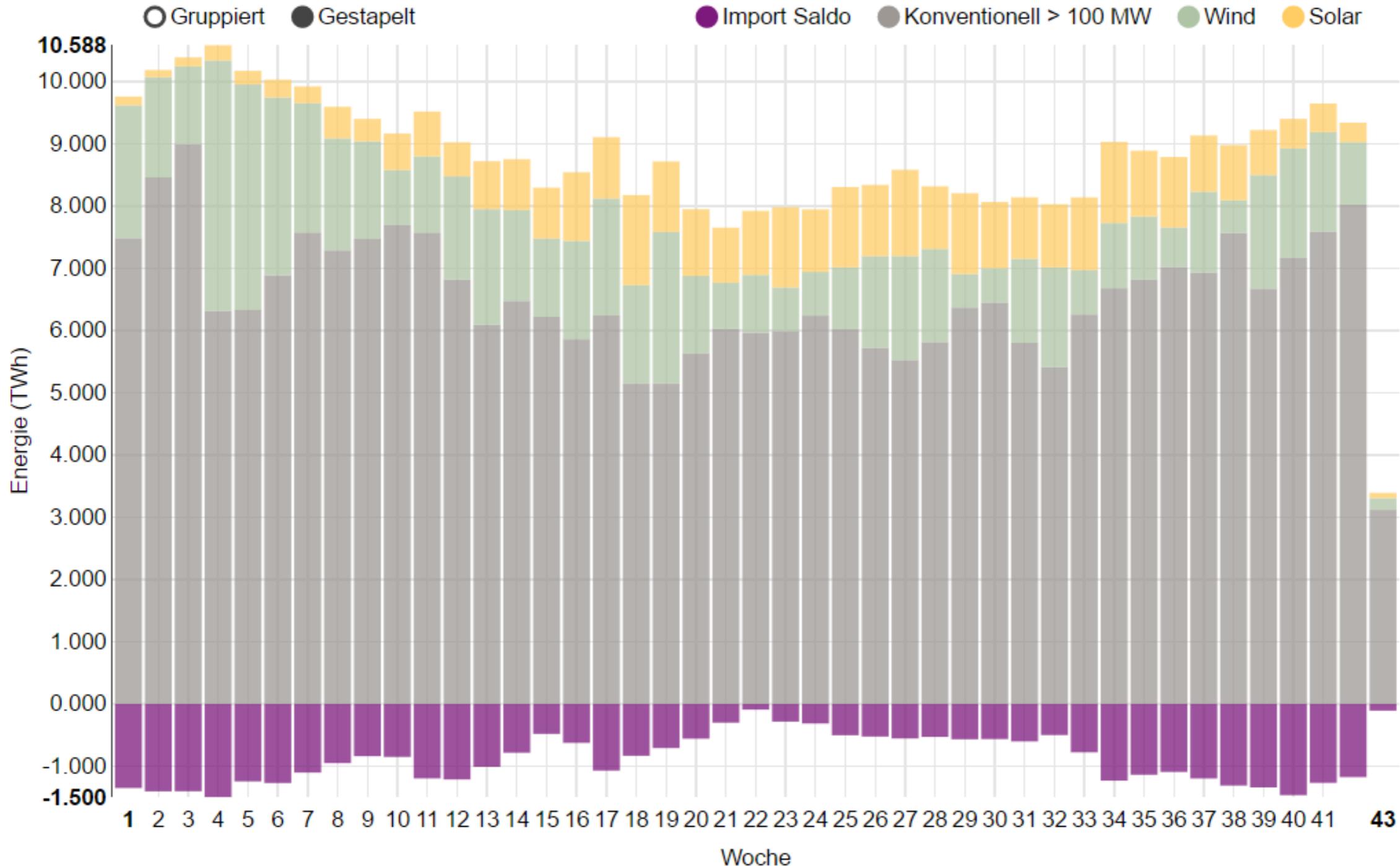
Suisse Eole est partenaire de:



Variation saisonnière production éolienne et consommation UE



Variation saisonnière production éolienne/solaire & consommation D



Source: energy-charts.de (Frauenhofer ISE)

est partenaire de:

L'éolien peut supporter la stabilité du réseau

Capacité technique

-  Disponible
-  Facile à implémenter
-  Difficile à implémenter

Normes d'utilisation

-  Définies
-  Mal définies
-  Pas définies

L'éolien a énormément de capacités, mais elles sont encore sous-utilisées

		Wind System Size			
		Wind Farm		Cluster	
		Tech. feat.	Rqmnts.	Tech. feat.	Rqmnts.
Frequency	FCR		 3		 8
	FRR		 3		 8
	RR		 3		 8
	FFR	 1	 4	 7	 9
	RM		 5		 9
Voltage	SSVC				 9
	FRCI	 2	 6		 9

Source: Projet européen REserviceS

Suisse Eole est partenaire de:

Le prochain 5 à 7 de l'éolien :

L'énergie éolienne et la santé

1^{er} semestre 2017

Pour plus d'infos...

Pour plus d'informations sur la Plateforme éolienne vaudoise
Pour obtenir la présentation de ce jour

www.vd.ch/plateforme-eolienne