



Rapport du 13 novembre 2018 (Ajout résumé et modification mise en page : 20 novembre 2019)

---

# Mesures de faisceaux hertziens avec éolienne en champ proche

Matthieu Ducret, Suisse Eole, 2018

---



Photographie Matthieu Ducret 2018



**Date :** 13 novembre 2018 (Ajout résumé et modification mise en page : 20 novembre 2019)

**Lieu :** Yverdon-les-Bains

**Prestataire de subventions :**

Confédération suisse, représentée par  
L'Office fédéral de l'énergie OFEN  
Programme pilote, de démonstration et Programme-phare  
CH-3003 Berne  
[www.ofen.admin.ch](http://www.ofen.admin.ch)

**Bénéficiaires de la subvention :**

Suisse Eole  
Crêt 108a, CH-2314 La Sagne  
[www.suisse-eole.ch](http://www.suisse-eole.ch)

Eole Jura SA  
c/o Alpiq Suisse SA  
Chemin de Mornex 10  
1003 Lausanne

Enercon GmbH  
Teerhof 59  
D-28199 Bremen

**Auteur :**

Matthieu Ducret, Suisse Eole, [matthieu.ducret@suisse-eole.ch](mailto:matthieu.ducret@suisse-eole.ch)

**Direction du programme de l'OFEN :** Yasmine Calisesi, [yasmine.calisesi@bfe.admin.ch](mailto:yasmine.calisesi@bfe.admin.ch)

**Suivi du projet pour l'OFEN :** Men Wirz, [Men.Wirz@bfe.admin.ch](mailto:Men.Wirz@bfe.admin.ch)

**Numéro du contrat de l'OFEN :** SI/501541-01

**Les auteurs sont seuls responsables du contenu et des conclusions de ce rapport.**

**Office fédéral de l'énergie OFEN**

Mühlestrasse 4, 3063 Ittigen, Adresse postale : 3003 Berne  
Tél. +41 58 462 56 11 · fax +41 58 463 25 00 · [contact@bfe.admin.ch](mailto:contact@bfe.admin.ch) · [www.ofen.admin.ch](http://www.ofen.admin.ch)



## Abstract

Radiocommunication systems are known to be potentially interfered by neighbouring wind turbines. As a precautionary measure, radio links (or microwave links) operators give negative notices and lodge objections to most advanced wind farm projects. Hence, conflicts have arisen on many wind energy development sites.

The feasibility of those wind energy projects is directly bound to the cohabitation possibilities between radio link systems and wind turbines. Cohabitation is the key to wind parks densification in high wind resources areas, excluded from today's planning in order to limit possible impacts on radio links networks. The project's purpose is to measure the order of magnitude of the real interferences in order to refine the assumptions of the risk assessment calculation tools, which aren't calibrated as of today, and therefore leave uncertainties which lead to those objections.

The main concern is the impact estimation in the so-called near field area of microwave links that totally differs from one stakeholder to another depending on the numerical tool that is used. Suisse Eole and the telecom operator, Swisscom, have been learning and solving encountered issues related to the very special testbed set-up in the Peuchapatte wind farm. Finally, the result is that the order of magnitude of the measured interference is closer to the calculation results which are in favour of wind energy, in this specific configuration.

With the newly known order of magnitude, new assumptions can be used. They will have to be confirmed and refined for different site configurations (because of terrain and WT model variability). Enriched by this experience, the author can propose new threads and future improvements for the cohabitation between wind energy and radiofrequency systems, as well as for some radar applications.



## Résumé

Les systèmes de radiocommunication sont potentiellement dérangés par la proximité avec les installations éoliennes. Par précaution, les propriétaires et les exploitants de faisceaux hertziens répondent par des préavis négatifs et des oppositions aux projets éoliens les plus avancés. Dès lors, les conflits entre faisceaux et éoliennes apparaissent aujourd'hui sur de nombreux sites en développement.

La faisabilité même de certains projets est liée à la possibilité de cohabitation entre faisceaux et éoliennes. Cette cohabitation pourrait amener à une densification des futurs sites en permettant d'utiliser des zones avec d'excellentes ressources de vents, aujourd'hui exclues des projets pour limiter d'éventuels impacts sur les faisceaux. L'objectif de ce projet est de mesurer l'ordre de grandeur de l'interférence réelle pour affiner les hypothèses des outils de calcul de risque, qui ne sont pas calibrés pour l'instant, et donc laissent planer l'incertitude, ce qui génère les objections des exploitants.

La préoccupation principale concerne les calculs de risque d'impact des éoliennes sur les faisceaux d'ondes dirigées dans la zone dite de champ proche, car les résultats divergent totalement entre les parties prenantes et selon leur outil de calcul respectif. Suisse Eole et l'opérateur de télécommunications, Swisscom, ont appris et résolu les problèmes et contraintes inhérents au banc de mesure spécifique du parc éolien du Peuchapatte. Finalement, le résultat est que l'ordre de grandeur mesuré se rapproche davantage, dans et pour cette configuration de site, des calculs les plus favorables à l'énergie éolienne.

Avec l'ordre de grandeur connu, de nouvelles hypothèses de calcul seront désormais utilisées et devront être confirmées et affinées sur d'autres types de sites (variabilité des terrains et modèles d'éoliennes). Fort de cette expérience, l'auteur peut proposer les pistes pour de futures améliorations et solutions sur la coexistence de l'éolien avec les systèmes radiofréquences et certaines applications radars.




## Partenaires et collaboration

Les partenaires de Suisse Eole  pour ce projet sont :

- Eole Jura SA (société détenue par )
- Enercon GmbH 
- TST SA<sup>1</sup>  (certaines ressources reprises par Priora FM SA)

Avec la collaboration technique de

- Swisscom Broadcast AG 

## Take-home messages

- Impact uniquement pour certaines géométries spécifiques (orientation vs. angle des pales), particulières à chaque site et modèle d'éolienne.
- Connaissances affinées et indications sur les potentielles solutions de coexistence
- Similarités avec les autres systèmes de communication ou de détection, tels que certains types de radars
- Recommandations pour tous les types de mesures avec des systèmes radiofréquences et des éoliennes

## Remerciements

Le responsable du projet, Matthieu Ducret, remercie :

- L'Office fédéral des communications OFCOM / UFCOM / BAKOM pour son soutien, ses remarques et son ouverture à trouver des solutions

---

<sup>1</sup> TST a cessé ses activités et une partie des ressources ont été reprises par Priora FM SA



- L'Office fédéral de l'énergie OFEN / UFE / BFE pour son soutien dans la recherche de solutions pour développer les énergies renouvelables
- La Direction générale de l'environnement (DGE) du canton de Vaud pour sa contribution au projet
- Eole Jura SA pour avoir mis à disposition son parc éolien du Peuchapatte
- Enercon GmbH pour son soutien technique à distance et sur site
- Swisscom Broadcast AG pour son travail et sa détermination



# Sommaire

<b>Abstract</b> .....	<b>3</b>
<b>Résumé</b> .....	<b>4</b>
Partenaires et collaboration.....	5
<b>Take-home messages</b> .....	<b>5</b>
<b>Remerciements</b> .....	<b>5</b>
<b>Sommaire</b> .....	<b>7</b>
<b>Contexte de départ</b> .....	<b>9</b>
<b>But du projet</b> .....	<b>10</b>
<b>Fondements, conditions-cadre</b> .....	<b>10</b>
Faisceau hertzien .....	10
Effet physique sur les ondes électromagnétiques.....	10
Zone de champ proche et définition .....	11
<b>Concept – description de l’installation</b> .....	<b>16</b>
Introduction .....	16
Sélection du site .....	16
Description de l’installation .....	20
Estimations - calculs théoriques de la configuration .....	28
1.1. Simulation ATDI de Swisscom Broadcast AG .....	29
1.2. Calculs de l’OFCOM .....	30
1.3. Comparaison .....	30
1.4. Formulaire pour les mesures et hypothèses complémentaires .....	30
<b>Procédure / méthodologie</b> .....	<b>32</b>
Prérequis : prévisions des effets .....	32
Contraintes mécaniques et de vitesses .....	34
Procédure initiale.....	35
<b>Mesures</b> .....	<b>36</b>
Installation - Hypothèse nécessaire pour la faisabilité des mesures .....	36
Déroulement des mesures – 1 <sup>ère</sup> journée.....	36
1.5. Contrainte météo.....	37
1.6. Contrainte agrégation sur la durée des indicateurs .....	38
1.7. Contrainte répétabilité des mesures .....	39
1.8. Contrainte illumination de l’antenne .....	41
1.9. Cas particulier : topologie, géométrie, structure, matériaux, .....	45
1.10. Humidité, neige, givre .....	45



Autre adaptation de procédure.....	45
1.11. Collecte des données.....	45
Déroulement des mesures – 2 <sup>ème</sup> journée .....	46
1.12. Contrainte de réinitialisation des paramètres.....	47
1.13. Théorie vérifiée sur la sensibilité des orientations et des angles de pales .....	47
<b>Résultats .....</b>	<b>48</b>
Comparaison des résultats déterminés depuis les mesures et les calculs.....	51
Robustesse des modulations basses (16-QAM) et des modulations plus élevées (1024-QAM) .....	51
<b>Perspectives, étapes ultérieures .....</b>	<b>53</b>
Programmation de blocage d'angles de pales .....	53
<b>Discussion .....</b>	<b>54</b>
Discussion et évaluation des résultats .....	54
Enseignements.....	54
<b>Conclusions .....</b>	<b>55</b>
Des risques à analyser et des idées de compromis.....	56
<b>Liste des abréviations.....</b>	<b>57</b>
<b>Annexe.....</b>	<b>57</b>
Annexe 1 : Changement des recommandations de l'OFCOM.....	58

## Contexte de départ

En dépit des objectifs énergétiques de la Confédération, les développeurs éoliens sont confrontés à diverses oppositions d'ordre économiques et environnementales. Parmi celles-ci, on retrouve les opérateurs téléphoniques, la télévision, les radios FM, la défense, les douanes et les polices en tant que propriétaires de faisceaux hertziens, ou faisceaux d'ondes dirigées. En effet, pour tous ces équipements de transmission, comme pour les éoliennes (futurs et existants), les environs des crêtes et les lignes de vue associées en font des lieux privilégiés et le conflit d'espace est fréquent.

Les faisceaux hertziens seraient, théoriquement, potentiellement impactés par l'installation d'éoliennes en « champ proche » (i.e. voisinage proche théorique). Dès lors, les propriétaires d'équipements de transmission répondent par des préavis négatifs et des oppositions aux projets éoliens les plus avancés. Des conflits potentiels entre faisceaux et éoliennes apparaissent aujourd'hui sur une majorité de sites en développement. Des oppositions ont même été faites sur des projets déposés et certains projets voient leur faisabilité dépendante du potentiel de cohabitation entre faisceaux hertziens et éoliennes. Une telle cohabitation pourrait ouvrir la possibilité de densifier des sites futurs (repowering) en permettant d'utiliser des zones avec d'excellentes ressources, mais qui sont aujourd'hui exclues au développement éolien de par leur éventuel impact sur les faisceaux. Le repowering disposant d'une meilleure acceptation populaire que la création d'un site nouveau, un potentiel certain pour atteindre les objectifs visés à long terme pour l'énergie éolienne pourrait être libéré. La figure suivante illustre les zones potentielles d'extension de parcs éoliens traversées par des lignes à faisceaux hertziens.

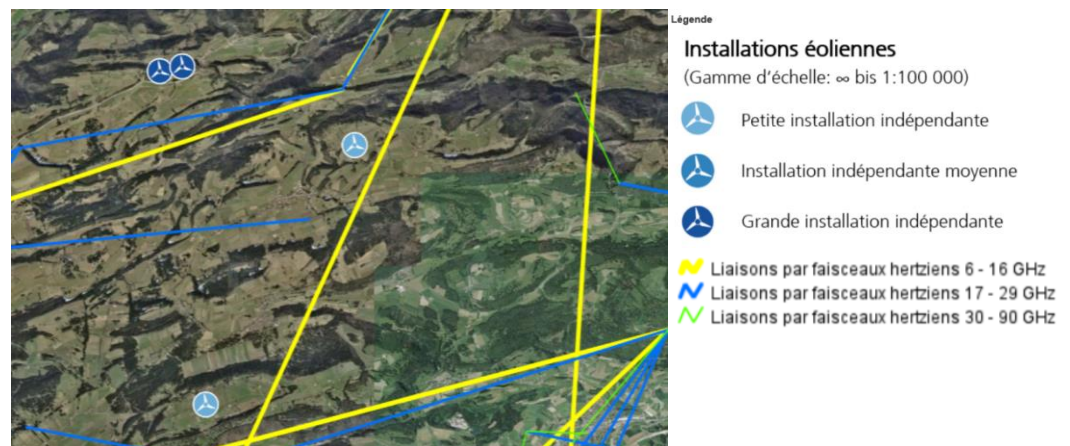


Figure 1- exemple indicatif : zones envisageables pour du repowering, mais non-retenues car traversées par des faisceaux hertziens source : [geo.admin.ch](http://geo.admin.ch)

Les simulations actuelles font appel à des modèles théoriques simplifiés se basant sur des paramètres d'entrées pessimistes (« worst case analysis »), ce qui permet de calculer avec un haut degré de confiance la probabilité de perturbations. Des mesures permettent d'affiner le modèle et de calculer plus près de la réalité les probabilités de perturbations<sup>2</sup>.

<sup>2</sup> L'OFCEM a changé ses recommandations pendant la période de l'étude. Ses recommandations sont devenues plus précises et plus adéquates



## But du projet

Le but principal de ce projet est de caractériser l'ordre de grandeur de l'impact réel (in-situ) d'éolienne (d'une dimension représentative : env. 150m) sur un faisceau hertzien à la fréquence la plus sensible en simulation en **champ proche**. Cette caractérisation de l'impact de l'éolienne est une première étape importante, car les estimations par calculs et simulations de l'OFCOM ou de Swisscom Broadcast AG donnent des ordres de grandeurs complètement divergents (entre 20 et 25 dB du rapport signal sur bruit/interférences). Il est impératif d'effectuer une première campagne de mesures afin d'affiner les connaissances et de déterminer quelles seront les pistes à investiguer pour l'élaboration de solutions de coexistence telles que, par exemple, la mutualisation d'infrastructure (utilisation du mât de l'éolienne comme source de duplication ou source des faisceaux). Les objectifs du présent projet sont :

- Déterminer l'ordre de grandeur réel des perturbations afin de calibrer les outils de simulation
- Affiner les connaissances et les contraintes liées
- Clarifier les opportunités pour la recherche de solutions de coexistence (mitigations)

## Fondements, conditions-cadre

### Faisceau hertzien

Extrait de la définition selon Wikipédia :

« *Un **faisceau hertzien** est un système de transmission de signaux - aujourd'hui principalement numériques - mono-directionnel ou bi-directionnel et généralement permanent, entre deux sites géographiques fixes. Il exploite le support d'ondes radioélectriques, par des fréquences porteuses allant de 1 GHz à 86 GHz<sup>1</sup> (gamme des micro-ondes), focalisées et concentrées grâce à des antennes directives.*

*Ces émissions sont notamment sensibles aux obstacles et masquages (relief, végétation, bâtiments...), aux précipitations, aux conditions de réfractivité de l'atmosphère, aux perturbations électromagnétiques et présentent une sensibilité assez forte aux phénomènes de réflexion (pour les signaux analogiques mais la modulation numérique peut, au moins en partie, compenser le taux d'erreur de transmission dû à ces nuisances). »*

### Effet physique sur les ondes électromagnétiques

Une partie des surfaces du mât et du rotor d'une éolienne peut influencer sur les ondes électromagnétiques en les déviant par réflexion, dispersion ou diffraction. Elle peut même provoquer un effet d'écran. Ce dernier effet ne fait pas partie de ce présent projet pilote, car ces effets sont déjà connus.

L'épaisseur de pénétration du rayonnement est propre aux matériaux utilisés. Se basant sur la littérature des réflecteurs passifs, l'OFCOM donne un ordre de grandeur d'une fraction de longueur d'onde ( $\frac{\lambda}{16}$ ) (Par exemple, à 13 GHz, cela correspondrait à environ 1.4 mm).

## Zone de champ proche et définition

Souvent l'acronyme anglais « NFZ » (Near Field Zone) pour la zone de champ proche est utilisé.

Dans la version du 20.12.2012 du site internet de l'OFCOM sur les zones d'influence des éoliennes sur les faisceaux hertziens<sup>3</sup>, les zones considérées dans le champ proche peuvent atteindre jusqu'à 700 mètres de rayon autour d'une antenne de transmission par faisceaux hertziens. Le volume projeté couvrirait une surface de plus de 1,5 millions de mètres carrés. Une éolienne dans cette zone<sup>4</sup>, délimitée par un trait vert dans la figure suivante, impacterait le bon fonctionnement de la transmission par ondes dirigées :

Aucune éolienne ne doit se trouver à proximité et au niveau d'une antenne de faisceaux hertziens ; cette exigence s'applique pour toutes les gammes de fréquences. La distance dépend de la fréquence utilisée par l'installation de radiocommunication et du diamètre maximum de l'antenne, par exemple 700 m avec 7 GHz ou 200 m avec 52 GHz (voir fig. suivante).

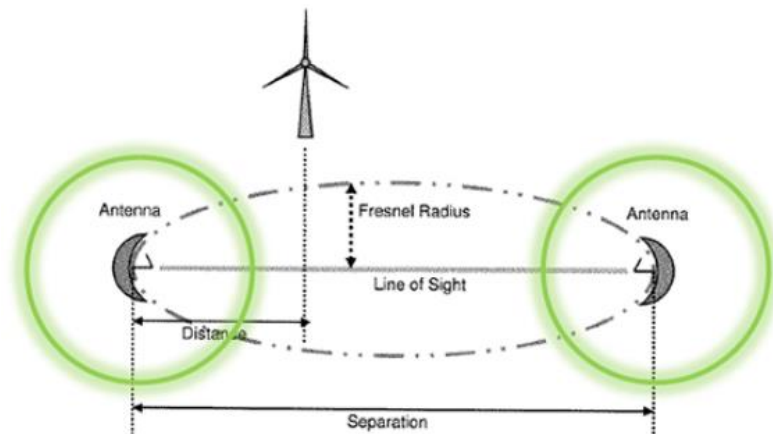


Figure 2: texte et illustration, extraits des archives de l'OFCOM

Une éolienne positionnée dans cette zone serait donc à exclure comme montré dans la modification de l'illustration, voir la figure suivante :

<sup>3</sup> <https://www.bakom.admin.ch/bakom/fr/page-daccueil/l-ofcom/informations-de-l-ofcom/ofcom-infomailing/ofcom-infomailing-32/influence-des-eoliennes-sur-les-faisceaux-hertziens.html> (au 20.12.2012)

<sup>4</sup> Effet perturbateur possible dans d'autres zones que celle autour de la ligne de vue

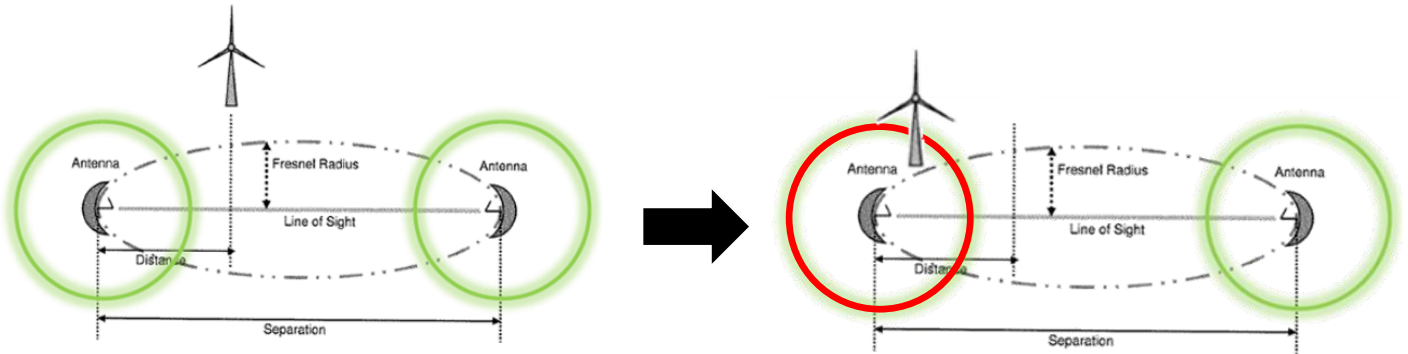


Figure 3 : modification illustration éolienne et NFZ

Avec la bonne collaboration de l'OFCOM, l'évolution des connaissances permet, dès à présent, de ne plus parler de zones d'exclusion mais d'utiliser des termes plus appropriés, voir annexe 1.

Dans ce voisinage appelé région du champ proche, il existe une accumulation d'énergie magnétique et électrique. La région de champ proche et de champ lointain est délimitée théoriquement par une distance à laquelle la différence de marche entre les trajets depuis le centre et le bord de l'élément rayonnant (dans notre cas : les antennes paraboliques) est suffisamment faible. Pour une différence faible, usuellement adoptée d'un seizième de longueur d'onde dans le milieu de propagation, supposé homogène, cette limite de distance est de :

$$r_0 = \frac{2 D^2}{\lambda}$$

Avec

*D*: largeur maximale élément rayonnant

*λ*: longueur d'onde (milieu de propagation homogène)

Le champ dans l'axe est en moyenne constant mais subit des oscillations, qui à cette limite équivaut à moins de 4 % pour un élément circulaire d'un diamètre d'une vingtaine de longueur d'onde. Un perturbateur en deçà de cette limite perturberait cette valeur et ne permettrait pas de bénéficier correctement de toute la puissance de l'élément rayonnant avec, en prime, des interférences. Toujours pour une ouverture circulaire, si cette distance limite était augmentée d'un facteur 10/3, alors l'oscillation du



champ dans l'axe passerait en-dessous de 0,5 % (toujours pour un diamètre de vingt longueurs d'onde).

Les recommandations de l'OFCOM de 2012 mentionnent une limite supérieure d'un facteur 10/3 incluant une zone de transition champ proche – champ lointain, selon la formule et l'extrait relatif, ci-dessous :

$$\frac{10}{3} r_0 = \frac{10}{3} \frac{D^2}{\lambda} = 10 D^2 * f [GHz]$$

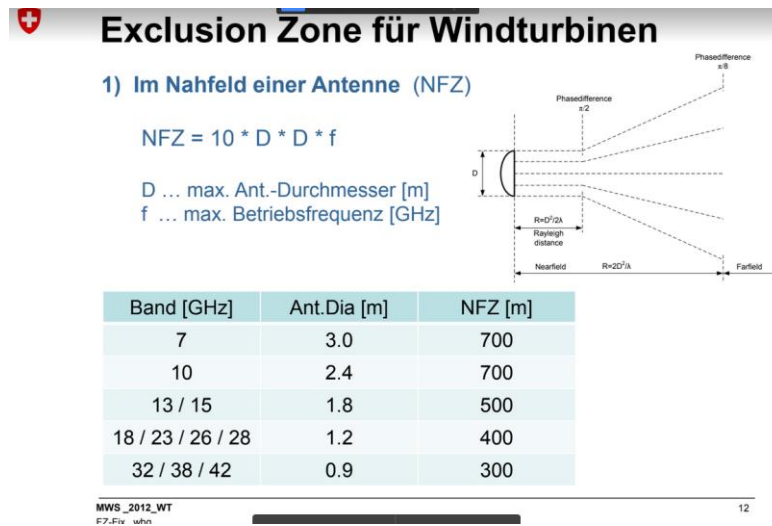


Figure 4: extrait de la présentation de l'OFCOM de 2012

Jusque-là, la plupart des opérateurs utilisent le tableau sans considérer le diamètre d'antenne. C'est-à-dire, qu'ils n'utilisent que la distance NFZ de la figure précédente en fonction de la fréquence (exemple 28 GHz donne 400 mètres de rayon). Avec les nouvelles antennes de classes supérieures, le diamètre des antennes installées a tendance à diminuer (exemple : à 13 GHz, les antennes font plutôt 0.6 m de diamètre, contre 1.8 m précédemment), cette distance NFZ devrait donc diminuer.

À titre d'exemple, pour un site proche d'un parc éolien de trois éoliennes et une NFZ de 500 mètres :



Figure 5 : NFZ de 500 mètres autour de l'antenne Point-de-Vue à Peuchapatte (exemple)

Pour ce même site, une NFZ de 700 mètres signifierait que deux éoliennes seraient touchées :



Figure 6 : NFZ de 700 mètres autour de l'antenne Point-de-Vue à Peuchapatte (exemple)



## Concept – description de l'installation

### Introduction

La configuration minimale pour des mesures consiste en deux mâts munis chacun d'émetteur-récepteur pour une transmission point-à-point, avec une éolienne à proximité (soit dans NFZ) d'un des deux mâts.

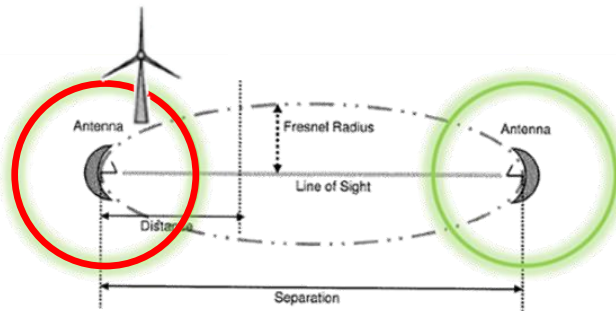


Figure 7 : Configuration "faisceau hertzien" et éolienne dans sa zone de champ proche

### Sélection du site

Avant de commencer la campagne de mesures, Swisscom Broadcast AG a analysé deux sites et l'OFCOM a analysé et proposé un troisième que Swisscom a aussitôt intégré. Ces sites ont été analysés afin de pouvoir déterminer le meilleur des candidats pour des mesures d'un faisceau hertzien à

proximité d'une éolienne. Ces « candidats » sont les sites de Peuchapatte, Trimmis à côté d'Haldens-  
tein, et Charrat.

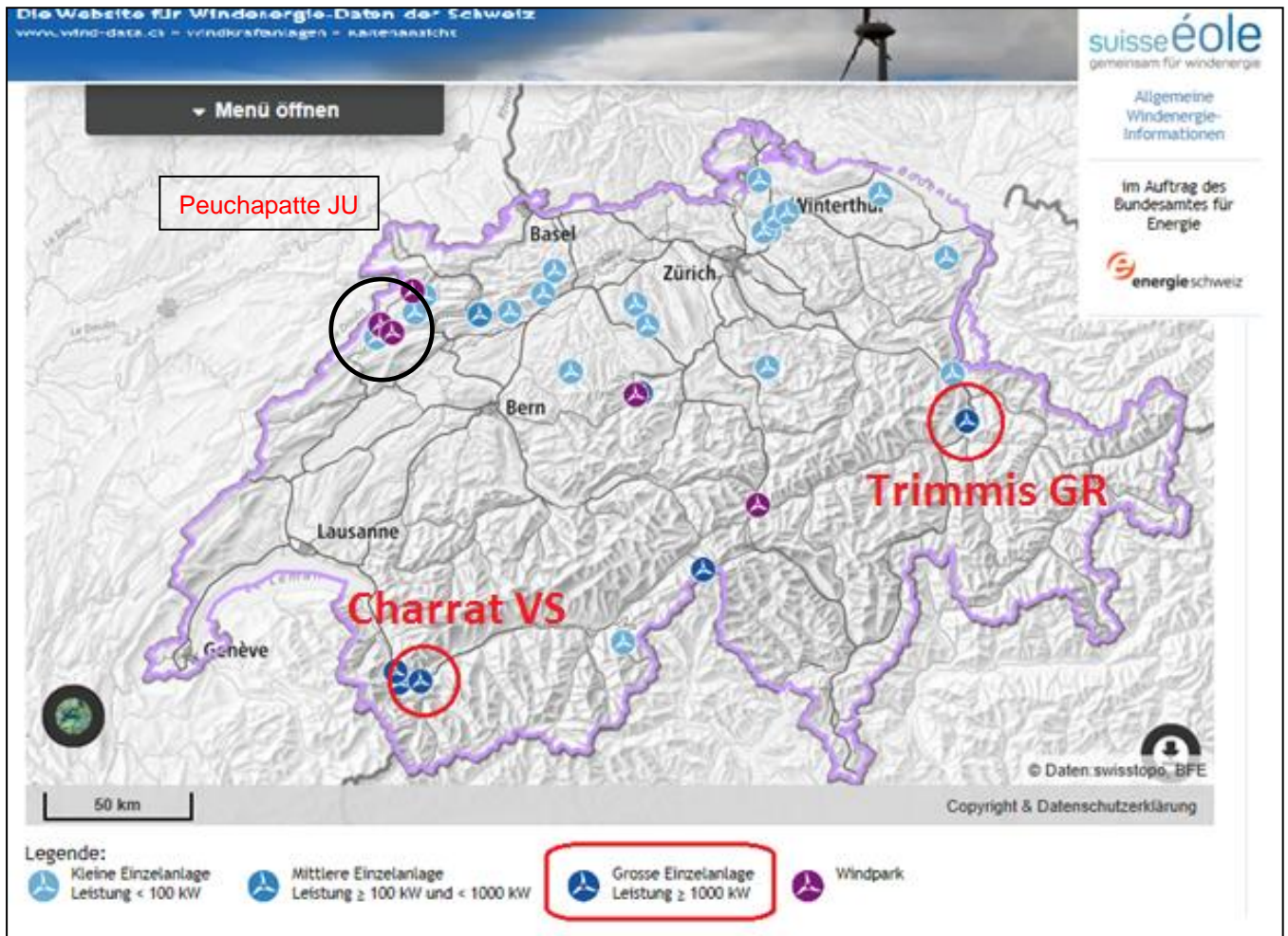


Figure 8: Candidats à la campagne de mesures, Source : Swisscom Broadcast AG

Le site retenu est celui de Peuchapatte, avec une éolienne située à environ 120 mètres d'une infrastructure utilisable. Les deux autres candidats ont été écartés pour des raisons d'infrastructures manquantes ou d'accès difficiles, notamment à cause d'horaires contraignants, de demandes d'accès à anticiper, ou de règles de sécurité contraignantes (par exemple pour une installation sur un pylône électrique). De plus, les simulations sur Trimmis et Charrats ne donnent pas d'influences notables. Ce qui signifie qu'il pourrait être difficile, théoriquement, de mesurer une réflexion. Les trois figures suivantes sont des extraits des évaluations effectuées par Swisscom.

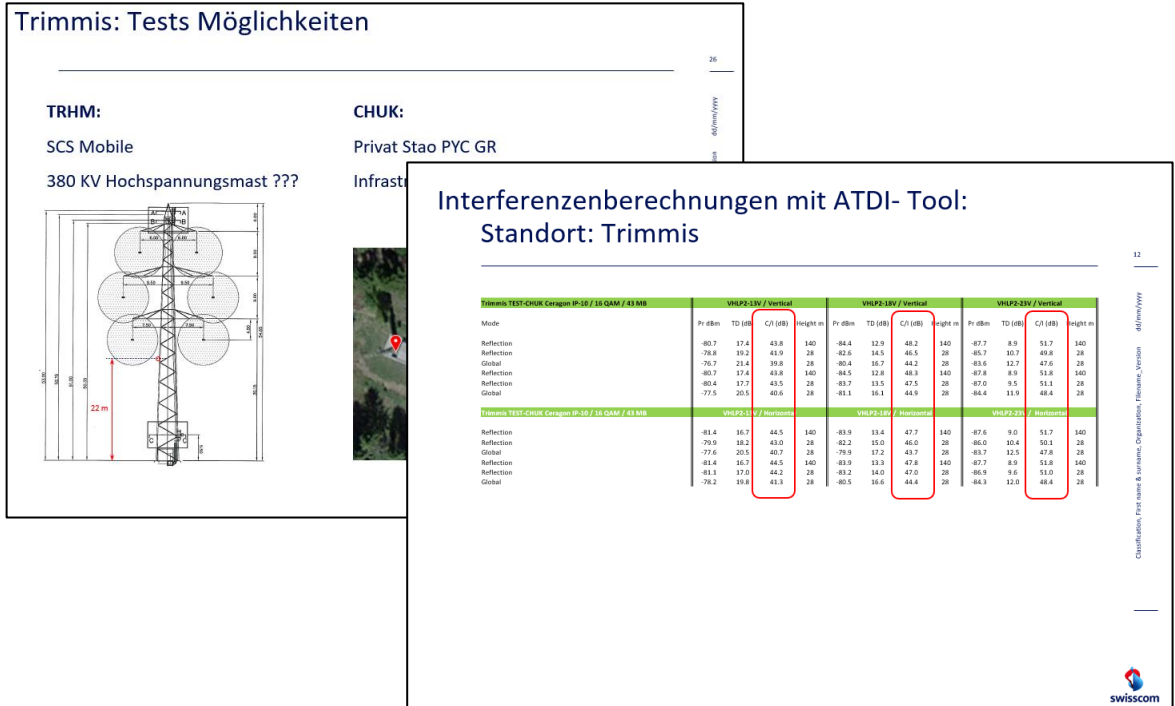


Figure 10: Extrait Evaluation Swisscom de Trimmis

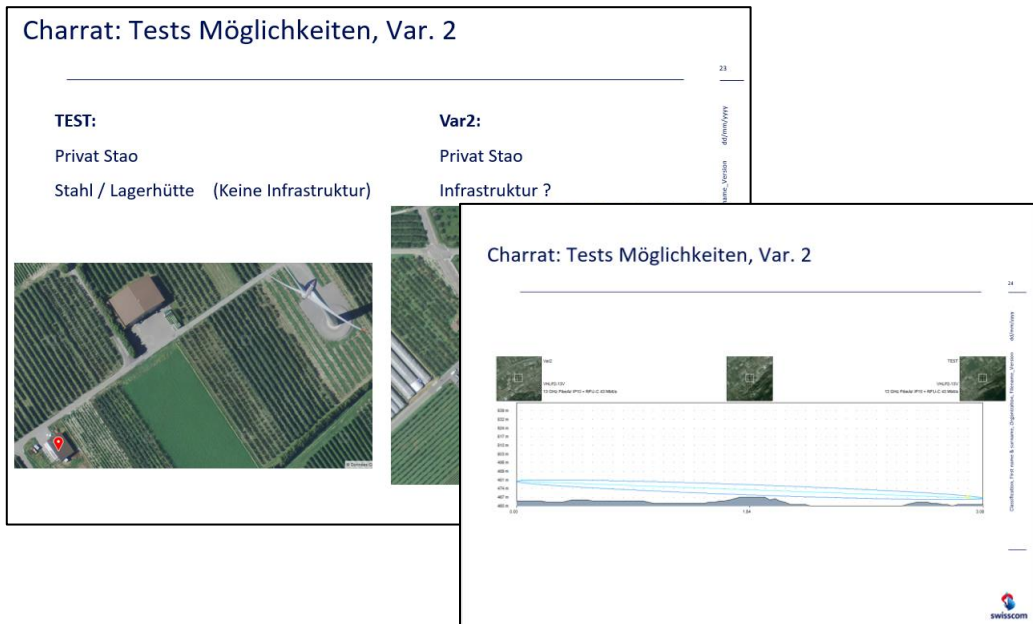


Figure 9: Extrait de l'évaluation de Charrat par Swisscom

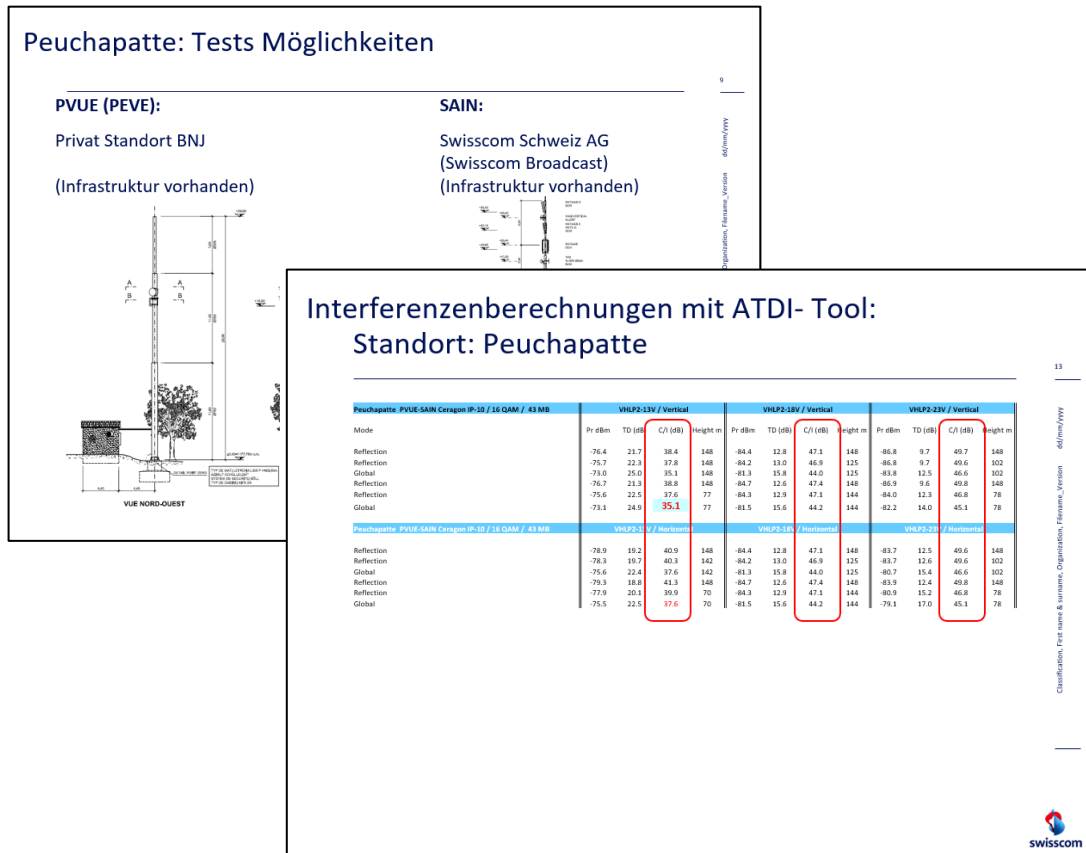


Figure 11: Extrait de l'évaluation de Peuchapatte par Swisscom

Selon Swisscom Broadcast, il est nécessaire de mesurer uniquement la fréquence la plus impactée, soit, dans le cas présent 13 GHz en polarisation horizontale.

Trois éoliennes se situent sur le site retenu de Peuchapatte. Parmi celles-ci, celle située le plus à l'Est (n°3) a été retenue pour l'étude. Elle est mise en évidence sur la carte de la figure suivante :

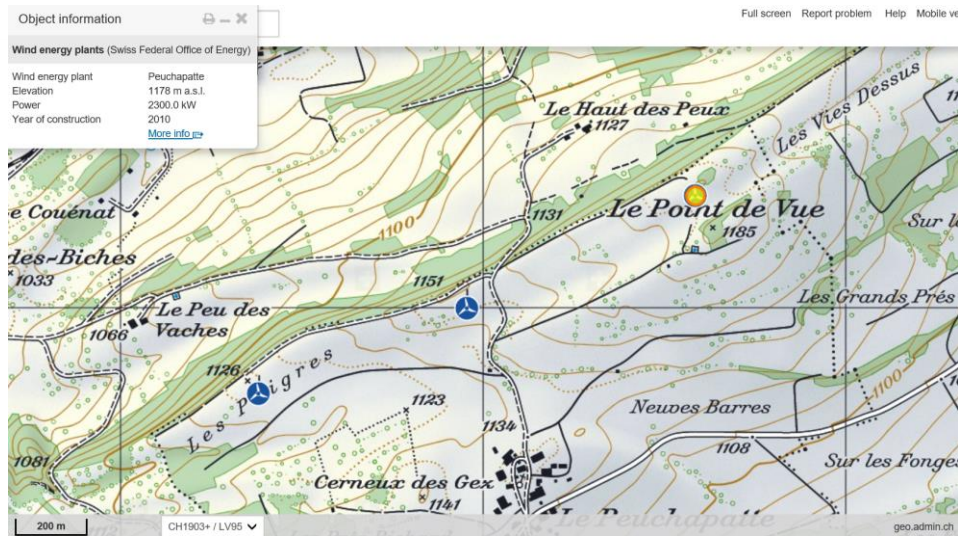


Figure 12: Plan Parc du Peuchapatte (JU), l'éolienne sélectionnée (en jaune) est située proche du site de Point-de-Vue

## Description de l'installation

Comme décrit schématiquement dans la figure suivante, une ligne de vue entre deux sites existants (avec mâts), de Saignelégier à Point-de-Vue, permet l'installation d'un nouveau faisceau hertzien à proximité de l'éolienne (Est) de Peuchapatte. L'éolienne est à 127 mètres du mât de Point-de-Vue. Afin de mesurer la réflexion, une antenne réceptrice pour la mesure est installée sur le mât de Point-de-Vue. Des données sur les niveaux de réceptions, de qualité et d'erreurs seront collectés depuis les systèmes à faisceaux hertziens.

Note : Initialement, les faisceaux hertziens prévus étaient de marque Ceragon. Swisscom Broadcast AG a, entre temps, changé le fournisseur et sélectionné NEC. Les conséquences sont qu'un indicateur de qualité « MSE » n'est plus disponible, cependant d'autres indicateurs de taux d'erreur existent et grâce aux capacités du système NEC sélectionné, il est possible d'atteindre des modulations supérieures (de 16QAM à 2048QAM).



Installation d'une liaison hertzienne et réalisation de mesures tests

- Schéma :

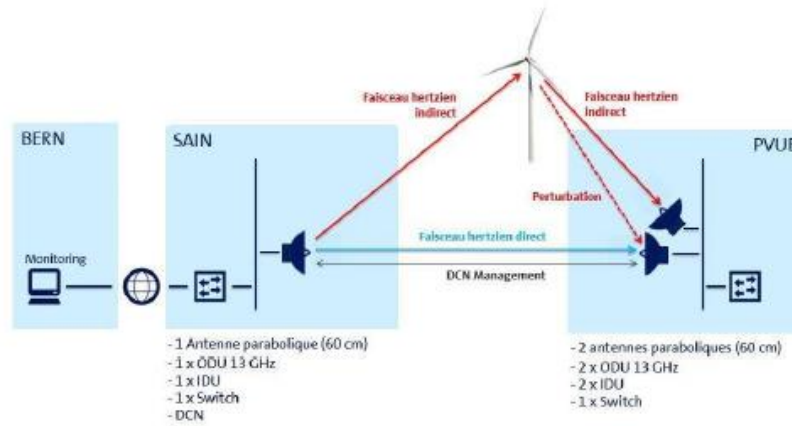


Figure 13: Schéma de principe de la communication



La situation géographique du nouveau lien principal installé : station de Point de Vue et contre-station de Saignelégier :

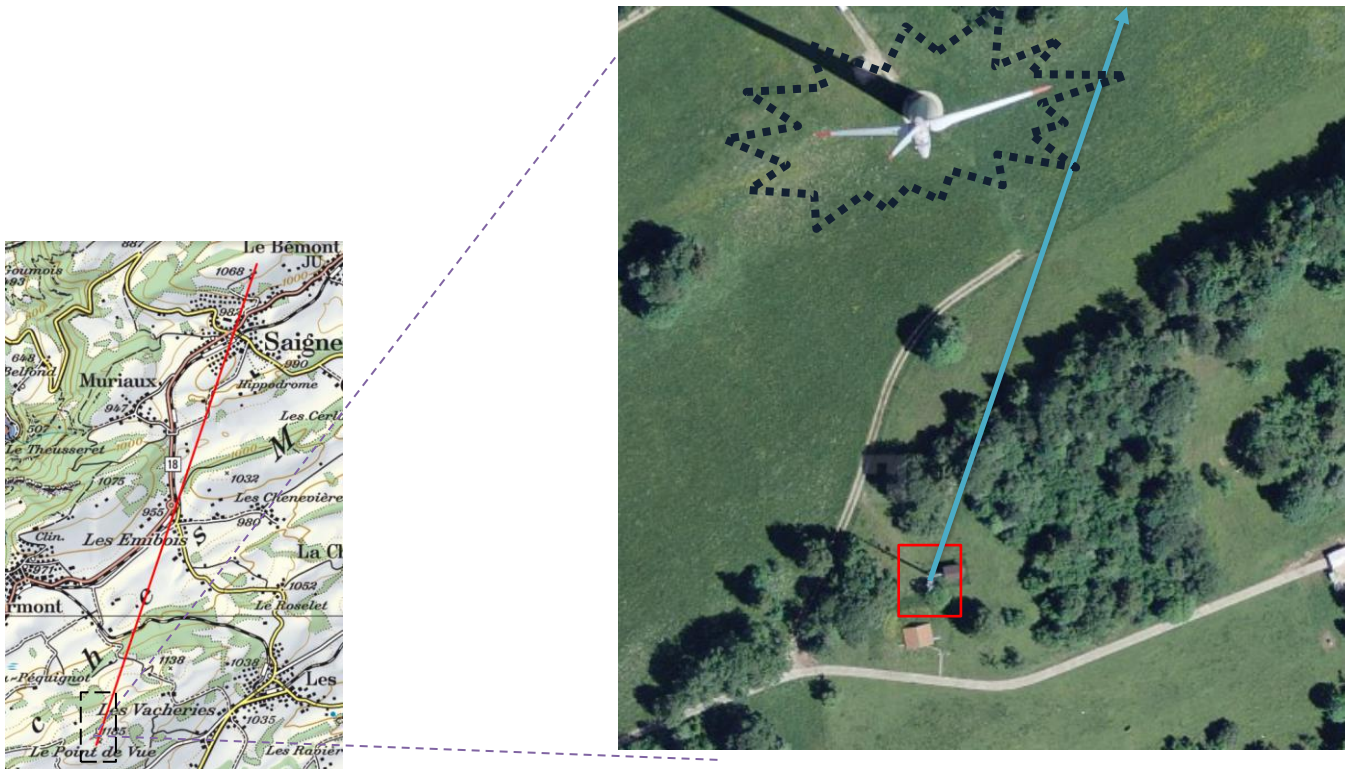


Figure 14 : Situation géographique du faisceau principal et de l'éolienne testée



Le lien en rouge dans la figure suivante symbolise la ligne directe entre les stations de Point-de-Vue et de Saignelégier. À chaque station un émetteur-récepteur a été installé et une boucle de transmission a été configurée sur la station finale :

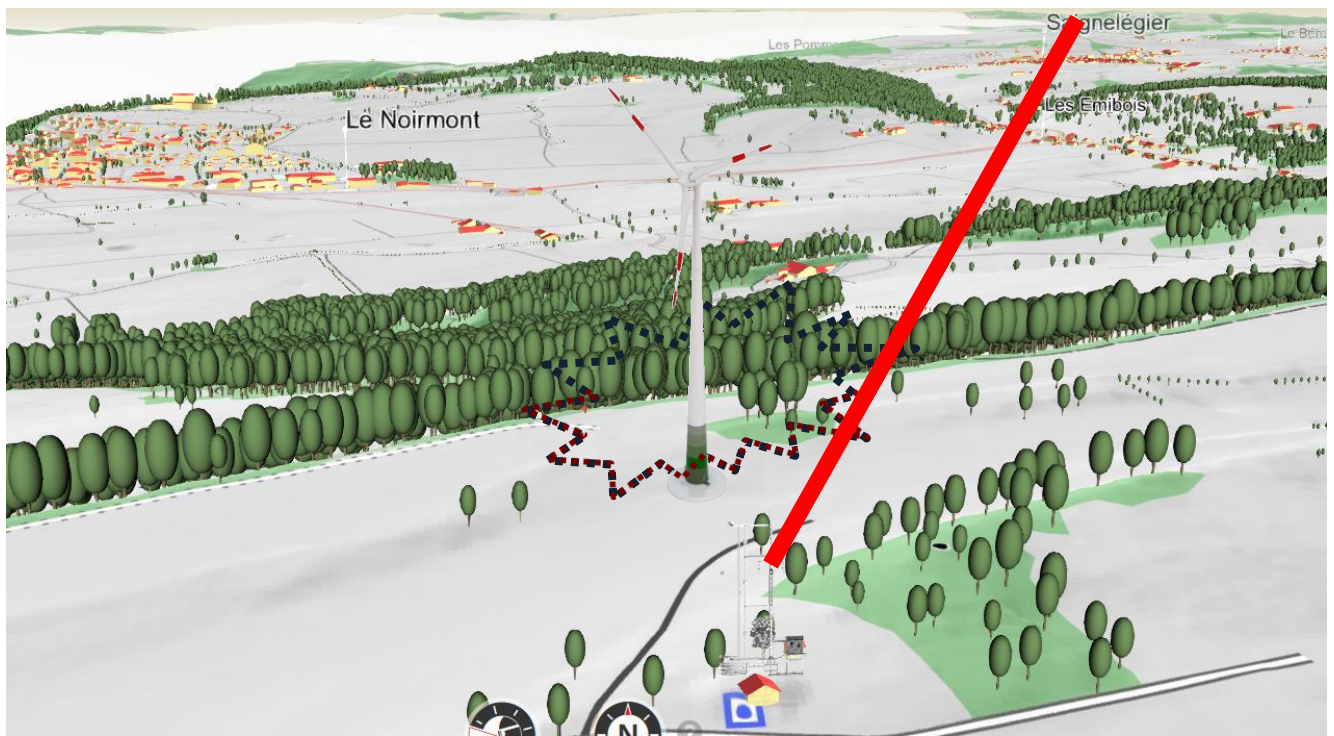


Figure 15: Situation depuis le site de Point de Vue vers Saignelégier



Des réflexions d'ondes électromagnétiques se font de manière générale sur toute la topographie ainsi que sur l'éolienne. Comme l'intérêt pour cette étude sont les perturbations occasionnées par l'éolienne, un récepteur permettant de capter les éventuelles perturbations a été installé sur le mât télécom.

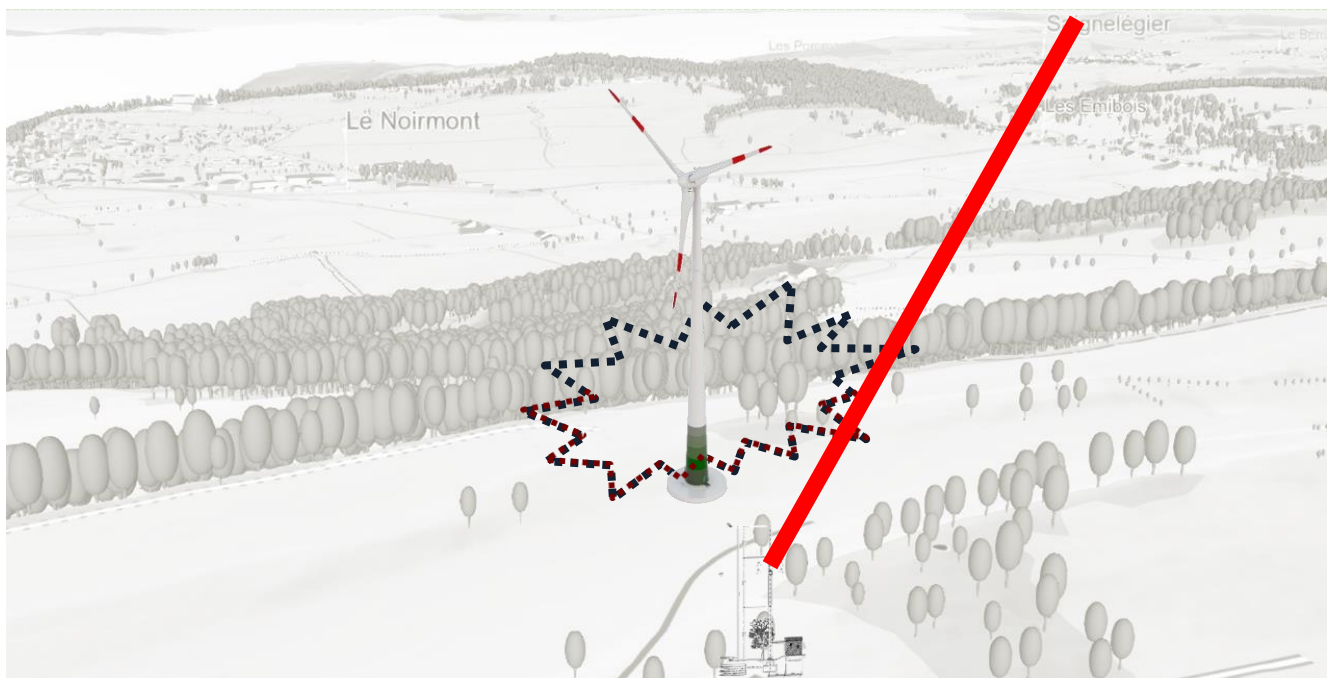


Figure 16: schéma - éventuelles réflexions des ondes sur l'éolienne

Il faut noter que les spécificités locales peuvent dans certains cas influencer les perturbations globales. La géométrie, les matériaux, l'humidité, les précipitations, les fréquences, la polarisation et les modèles d'éoliennes se retrouvent dans l'équation. En d'autres termes, chaque cas est particulier. Pour illustrer ces propos, la figure 17 montre que des terrains dégagés, ou au contraire avec de la végétation ou accidenté n'auront certainement pas les mêmes effets sur les ondes :



Figure 17: Effets de la particularité d'un site (sources free vector images, avec modifications)



Photographie Matthieu Ducret 2018

**Les mesures ne vont pas caractériser précisément les perturbations des éoliennes sur les systèmes à faisceaux hertziens, elles vont donner un ordre de grandeur qui va permettre d'affiner les connaissances et de calibrer les outils de calcul, ce qui est une première étape obligatoire.**

Les coordonnées CH1903 (m) de l'éolienne sont :

Nom	X	Y	Z
E-82	564586	228307	1178

- Enercon E-82, avec environ 2/3 du mât en béton, le reste en acier
- Sa hauteur en bout de pale est de 149 m
- La hauteur du moyeu 108 m
- Diamètre du rotor 82 m

Les coordonnées CH1903 (m) du faisceau hertzien principal, avec h, la hauteur de l'antenne sur son mât :

<b>SAIN</b>	X	566849	m
	Y	234966	m
	Z	1068	m
	h	35	m



<b>PVUE</b>	X	564589	m
	Y	228180	m
	Z	1175	m
	h	21	m

La hauteur de l'antenne de mesure sur le mât de Point de Vue : 12 m

Cette dernière ne peut pas être installée plus proche de l'antenne du faisceau principal pour des questions d'isolation. Dans la figure suivante, le mât télécom de Point de Vue.

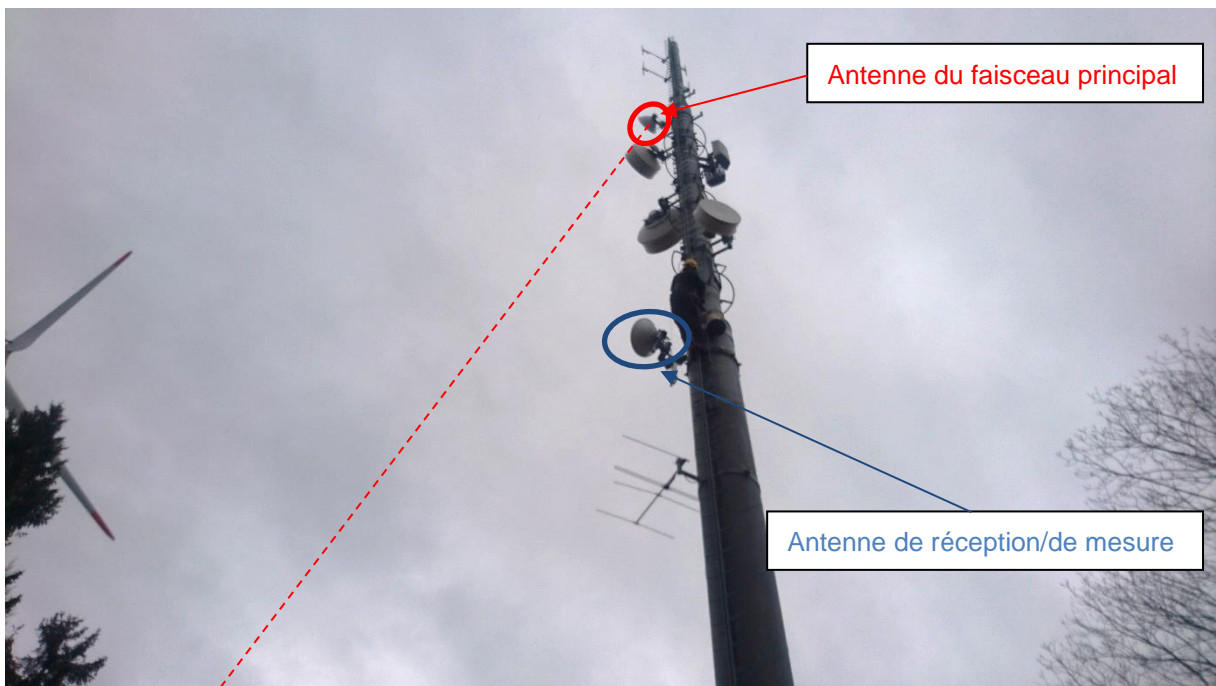


Figure 18: identification des antennes sur le mât télécom de Point de Vue



La concession du lien principal est donnée exceptionnellement sans ATPC par l'OFCOM :

**Descriptif de réseau FH, Concession No. 2201051 - Swisscom Broadcast AG ATPC = 0**

<b>Numéro de la liaison: 49998 /</b>		<b>SCSBC-AC4</b>	
G0001010 /			
<b>Station:</b>	Station A	Station B	
Code:	1PVUEP / PVUE	SAIN07 / SAIN07	
Nom:	PEUCHAPATTE P	SAIGNELEGIER LE HAUT BE-MONT	
Coordonnées CH X/Y:	564589 / 228180	566849 / 234966	
Longitude (WGS-84):	6° 58' 16.6" E	7° 00' 02.18" E	
Latitude (WGS-84):	47° 12' 13" N	47° 15' 53.15" N	
Altitude au-dessus de la mer:	1178 m	1068 m	
Canton / Pays:	JU / SUI	JU / SUI	
Distance:	7.15 km		
<b>Antenne:</b>			
Marque:	ANDREW	ANDREW	
Type / RPE Nr.:	VHLP2-13V / 7202A	VHLP2-13V / 7202A	
Diamètre:	0.6 m	0.6 m	
Gain :	36 dB	36 dB	
Angle d'ouverture:	2.70°	2.70°	
Hauteur au-dessus du sol:	21 m	35 m	
Polarisation:	H	H	
Azimut / Élévation:	18.03° / -0.77°	198.05° / 0.77°	
<b>Appareil:</b>			
Marque:	NEC		
Famille / Type:	iPasolink VR-EA/EV-IAG / iPasolink VR 13 GHz, 55 Mbit/s, 16-QAM, SP		
Code OFCOM :	NVEG13D14S		
Sytem class:	BAS		
Puissance d'émetteur nominale:	23.0 dBm		
kTBF / BER 10 <sup>-6</sup> :	-97.7 dBm / -83 dBm		
ATPC / ACM / XPIC:	Oui 0 dB / Oui / Non		
Tx réduction de puissance:	0 dB	0 dB	
Perte Tx / Rx:	Tx 0.5 dB / Rx 0.5 dB	Tx 0.5 dB / Rx 0.5 dB	
Puissance EIRP max.:	58.5 dBm	58.5 dBm	
Puissance au récepteur nom.:	-37.86 dBm	-38.05 dBm	



<b>Fréquences:</b>		
Parité:	H	L
Fréquence d'émission :	13 122.0000 MHz	12 856.0000 MHz
Fréquence de réception:	12 856.0000 MHz	13 122.0000 MHz
Code:	130_14M0_B/8H	
Classe d'émission:	FDD / Duplex	
Désignation fréquence:	14M0D7W--	
Capacité de transmission:	55 Mbit/s	
Date d'assignation:	28.06.2017	
Date d'annulation:	28.06.2017	
Remarques:	13 GHz Messstrecke für WT Reflexionen, darf zeitweise ohne ATPC betrieben werden. Keine Gebühren verrechnen!	

## Estimations - calculs théoriques de la configuration

Hypothèses de calcul :

- Fréquence porteuse = 13 GHz
- Gain d'antenne = 36 dBi
- Perte guide d'onde = 0.5 dB
- Étage d'amplification à 23 dBm pour l'émission, sans ATPC (Adaptive Transmission Power Control)
- Découplage de la polarisation dû à la géométrie pas pris en compte
- Système de coordonnées suisse CH1903
- Sur le choix des polarisations, vertical, horizontal ou les deux : Swisscom recommande d'utiliser la polarisation horizontale qui est la plus impactée

Pour interpréter un signal, il faut que celui-ci ne soit pas perturbé par les interférences. Un rapport utilisé en télécommunication est le rapport C/I, souvent en dB, il permet de connaître le rapport entre le niveau de puissance de la porteuse du signal utile et le niveau de puissance des interférences. Plus il est élevé, meilleure sera la qualité de transmission de l'information :

- Avec un C/I de 10 dB, la puissance du signal est 10 fois plus élevée que les interférences
- Avec un C/I de 20 dB, la puissance du signal est 100 fois plus élevée que les interférences
- Avec un C/I de 30 dB, la puissance du signal est 1000 fois plus élevée que les interférences

## 1.1. Simulation ATDI de Swisscom Broadcast AG

Le simulateur ATDI modélise le rotor par une sphère réfléchissante qui va, pour chaque angle des diagrammes de rayonnement des émetteurs/récepteurs, sommer les puissances réfléchies, et ceci pour des incréments de la hauteur minimale à la maximale. Une deuxième sphère modélise le mât de l'éolienne et ses réflexions sont sommées de la même manière du bas vers le haut du mât. L'outil ne tient pas compte de plan de masse (ground plane).

Swisscom a suivi les valeurs recommandées par le fournisseur du logiciel, et fixé la surface de chacune de ces sphères à 1'000'000 m<sup>2</sup>. La modélisation est illustrée dans la figure suivante.

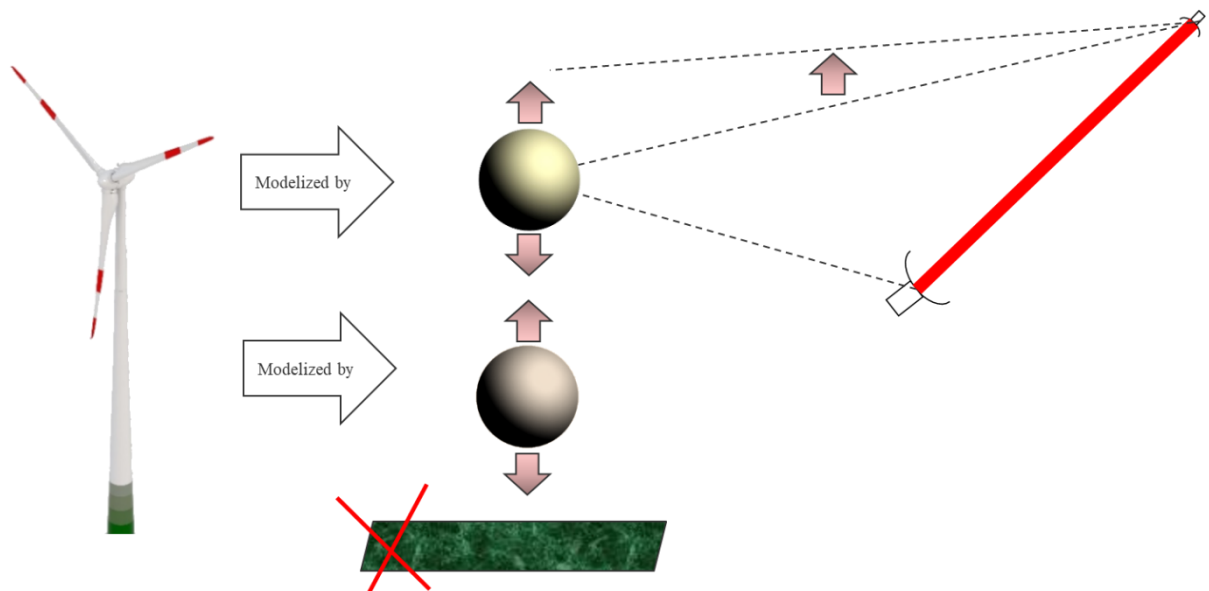


Figure 19: illustration du simulateur ATDI : éolienne et faisceau principal

La simulation du site de Peuchapatte donne une valeur de  $C/I = 41.1$  dB qui représente la différence entre le signal principal et les interférences. Swisscom note aussi le peu de contribution de la sphère modélisant le mât, celle du bas, et considère qu'elle peut être négligée.



## 1.2. Calculs de l'OFCOM

Les calculs de l'OFCOM se basent sur un réflecteur passif sans plan de masse (ground plane), schématisé dans la figure suivante. L'OFCOM a procédé au calcul et a obtenu une valeur de  $C/I = 14.9$  dB avec un réflecteur de  $80 \text{ m}^2$ .

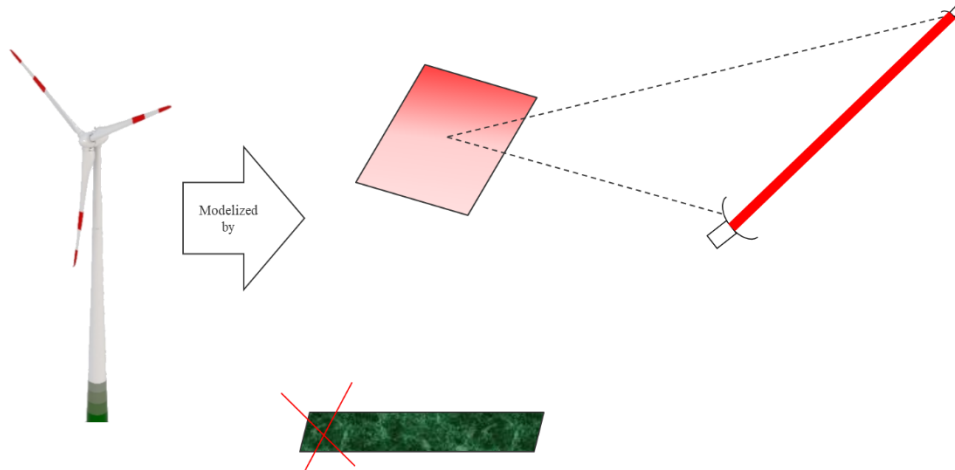


Figure 20 : Schéma - Modélisation de l'éolienne par un réflecteur à côté du faisceau principal

## 1.3. Comparaison

L'estimation de Swisscom Broadcast AG montre un impact de l'éolienne sur le faisceau hertzien beaucoup plus faible que l'estimation de l'OFCOM. La différence est d'environ 26 dB, soit un très haut facteur et une différence importante. Les estimations sont dans le tableau suivant.

Tableau 1 : Comparaison des résultats des outils de calcul

Estimation de Swisscom Broadcast	Estimation de l'OFCOM
$C/I : 41.1 \text{ dB}$	$C/I : 14.9 \text{ dB}$
Réflecteur équivalent serait de : $6-7 \text{ m}^2$	Réflecteur équivalent : $80 \text{ m}^2$

## 1.4. Formulaire pour les mesures et hypothèses complémentaires

Les hypothèses suivantes sont ajoutées aux précédentes :

- Les gains d'antennes sont supposés constants sur toute l'illumination dans le plan de l'éolienne (malgré les différences d'angles et de distances, qui ont des conséquences négligeables)



- Les hauteurs des antennes et la hauteur au niveau du moyeu de l'éolienne sont les hauteurs utilisées pour l'estimation des angles d'ouvertures, pour le calcul de réflecteur passif et pour les calculs des pertes
- La perte de réflexion due aux matériaux de l'éolienne est estimée à 10 % (une efficacité de 90% est raisonnable et conservatrice pour une éolienne, car même les réflecteurs d'antenne n'ont pas une efficacité de 100%)
- L'affaiblissement lié à l'humidité (env. 1 dB) est négligé car seul un ordre de grandeur est recherché
- L'antenne de mesure est supposée capter le niveau des interférences comme s'il était à la même hauteur que l'antenne du faisceau principal sur le mât de Point de Vue bien que les hauteurs soient séparées de 9 mètres.
- Le plan du rotor est supposé être celui qui occasionne le plus de réflexion, ainsi l'orientation théorique de l'éolienne la plus impactante devrait être de 99.445° (par rapport au 0° Nord)

Formules des pertes en espace libre (FSPL) et avec réflecteur :

$$FSPL = 92.442 + 20 \log_{10} d [km] + 20 \log_{10} f [GHz]$$

$$FSPL_{refl} = 141.985 + 20 \log_{10} s1 [km] + 20 \log_{10} s2 [km] - 20 \log_{10} A_{eff} [m^2] - 20 \log_{10} \eta [1]$$

Avec :

f : fréquence de la porteuse

d : longueur du lien à faisceau hertzien principal

s1, s2 : respectivement les distances entre les antennes du faisceau principal et l'éolienne

A<sub>eff</sub> : ouverture d'antenne ou surface équivalente

η : efficacité du réflecteur

Avec la puissance d'amplification de 23 dBm (ATPC=0 dB) de la contre-station de Saignelégier et les pertes des guides d'ondes, le niveau de la puissance reçue sur l'antenne de Point de Vue est établi :

$$\text{Budget direct} = -37.81 \text{ dBm}$$

Après quelques calculs, la relation entre l'ouverture (surface équivalente) et le budget indirect donne :

$$\text{Budget indirect} = -84.508 \text{ dB} + 20 \log_{10} A_{eff} [m^2]$$

Finalement les équations à retenir pour les mesures sont :

$$\Rightarrow 20 \log_{10} A_{eff} [m^2] = \text{Budget indirect} + 84.508$$

$$\circ A_{eff} [m^2] = 10^{\left(\frac{1}{20} \text{Budget indirect} + 84.508\right)}$$

$$\Rightarrow C/I = \text{Budget direct} - \text{Budget indirect} = 46.698 - 20 \log_{10} A_{eff} [m^2]$$



## Procédure / méthodologie

### Prérequis : prévisions des effets

Pour déterminer la meilleure procédure de mesures à adopter, il est important d'estimer les éventuels effets et de savoir où pointer l'antenne de mesure (figure ci-après).

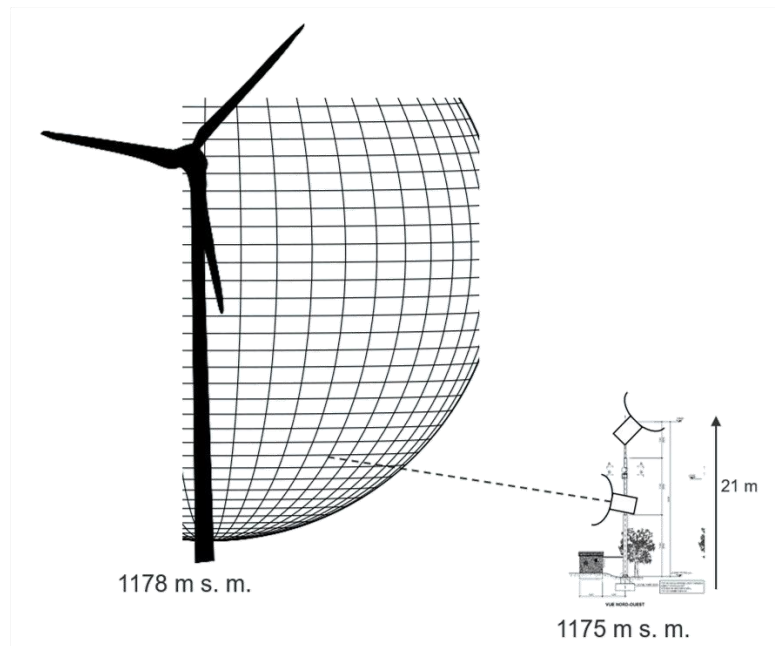


Figure 21: Où pointer l'antenne de mesure ?

La procédure doit permettre de capter au mieux les effets et les pics de réflexion de l'éolienne provenant de toutes les directions sur le mât de télécommunication. À titre d'exemple seulement, un diagramme de réflexion est illustré dans la figure suivante, où l'installation sur le mât du Point-de-Vue



doit pouvoir capter une bonne partie des réflexions en direction de celui-ci (ordre de grandeur recherché).

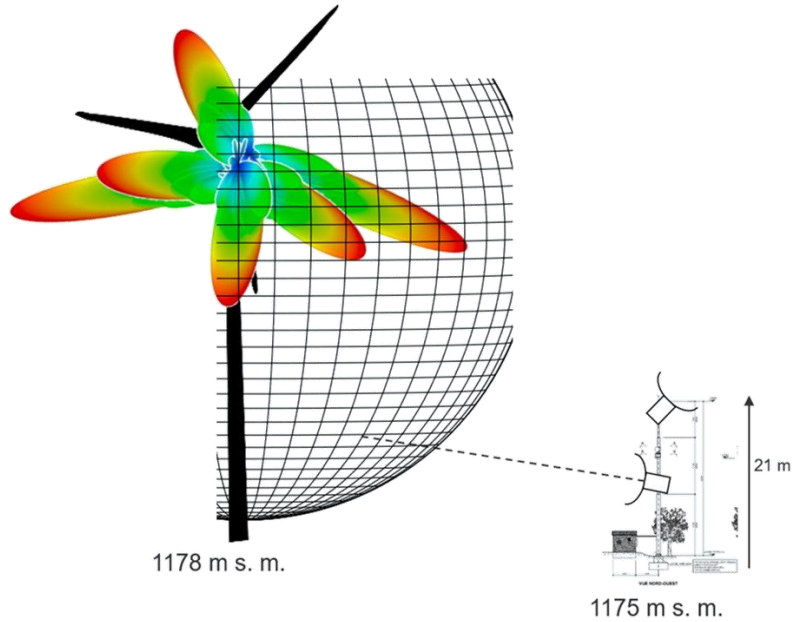


Figure 22: Quelle procédure pour capter les réflexions

Il est nécessaire de rappeler les degrés de liberté d'une éolienne : l'orientation de la nacelle, l'angle des pales et la position du rotor.

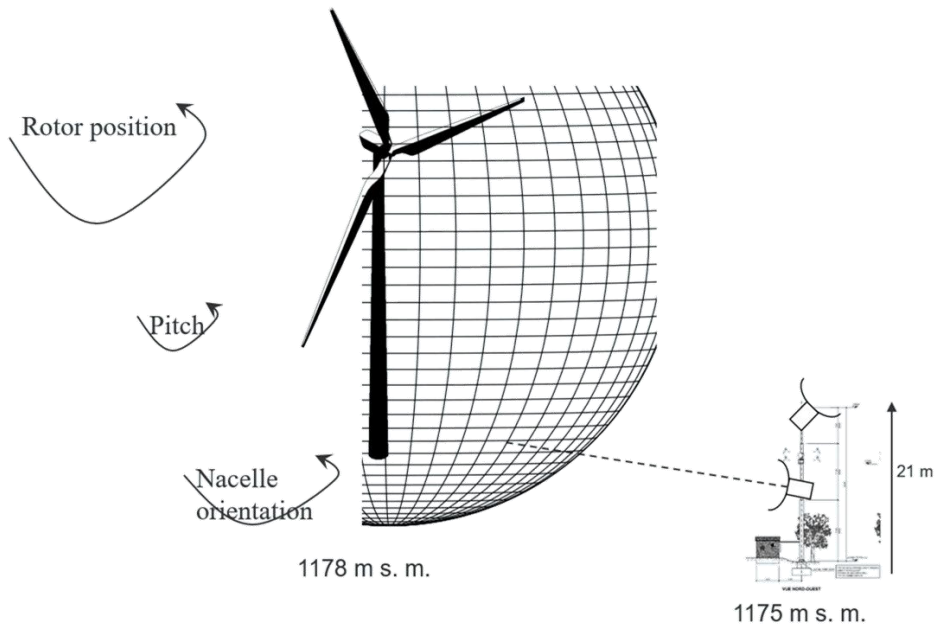


Figure 23: degrés de liberté de l'éolienne



Ces degrés de liberté vont influencer sur les réflexions envoyées sur le mât. Si par exemple, le rotor de l'éolienne tourne alors le diagramme de réflexion change (illustration, ci-dessous, à titre indicatif)

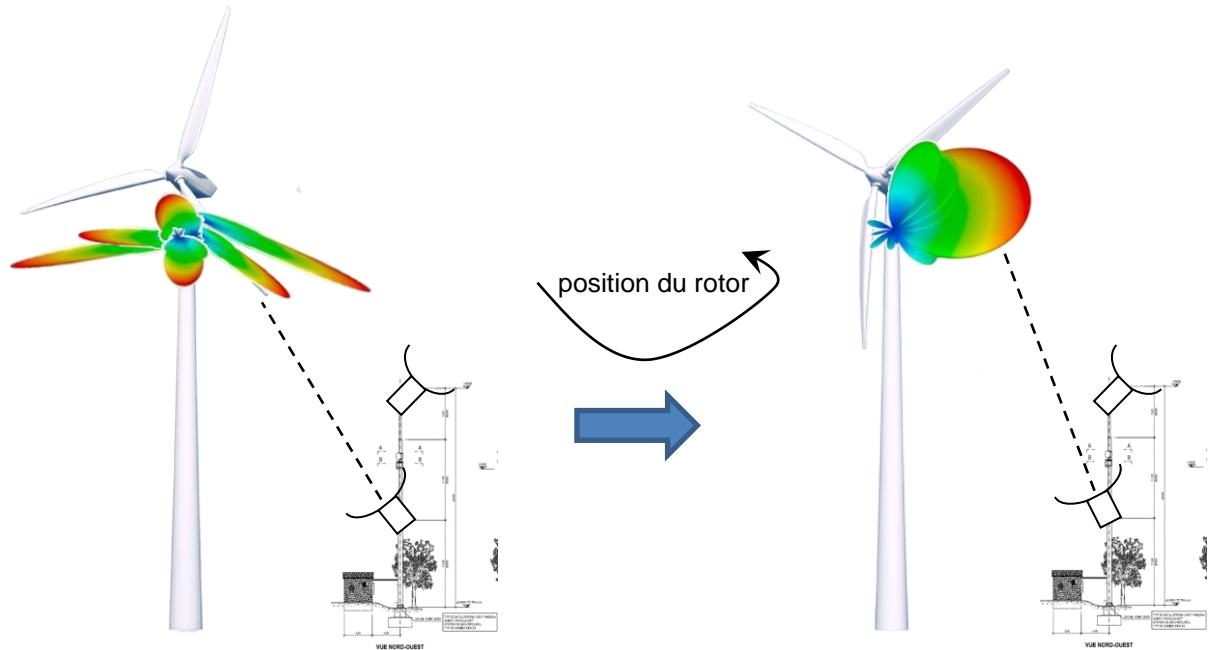


Figure 24: degrés de liberté des éoliennes et impacts sur son diagramme de réflexion

## Contraintes mécaniques et de vitesses

Après vérification, les capacités de l'éolienne disponible pour les mesures ne permettent pas une utilisation en mode moteur. Le seul moyen d'orienter le rotor dans une direction proche de la position désirée est d'utiliser le vent, puis le freinage (ou l'utilisation de boulons) afin de bloquer le rotor dans chacune des positions désirées.

Les recommandations d'utilisation du constructeur ne permettent de manipuler l'éolienne que dans une fourchette de vitesse de vent de 3 à 8 m/s.

Les équipes gérant les éoliennes et les faisceaux ont été amenées à discuter des capacités de l'éolienne en termes de position, rotation et la vitesse de manipulation de la machine afin d'effectuer les mesures sur un temps limité. Le but étant d'effectuer les mesures sur un maximum de positions possibles en un temps limité.

La solution retenue consiste en l'échange de données télémétriques de l'éolienne et des indicateurs du système de mesures des réflexions. Cela requiert une synchronisation et des agrégations d'indicateurs à la seconde au minimum. Cette solution permet d'effectuer les mesures en mode dynamique, en laissant tourner l'éolienne. Avant les mesures, l'agrégation minimale est vérifiée avec les techniciens des deux systèmes.



## Procédure initiale

Une stratégie de base a été adoptée (illustrée dans la figure, ci-dessous), tout en gardant à l'esprit les possibilités d'adaptation selon les premières expériences du premier jour de mesures sur site :

- Orientation de l'éolienne, si possible, proche de l'angle défini qui occasionnerait, à priori et en considérant le plan du rotor de l'éolienne comme la plus grande source de réflexions :  $\sim 99.4^\circ$
- Balayage vertical au mât de l'éolienne.

Les mesures ont été planifiées sur un jour sec et sur un jour de pluie.

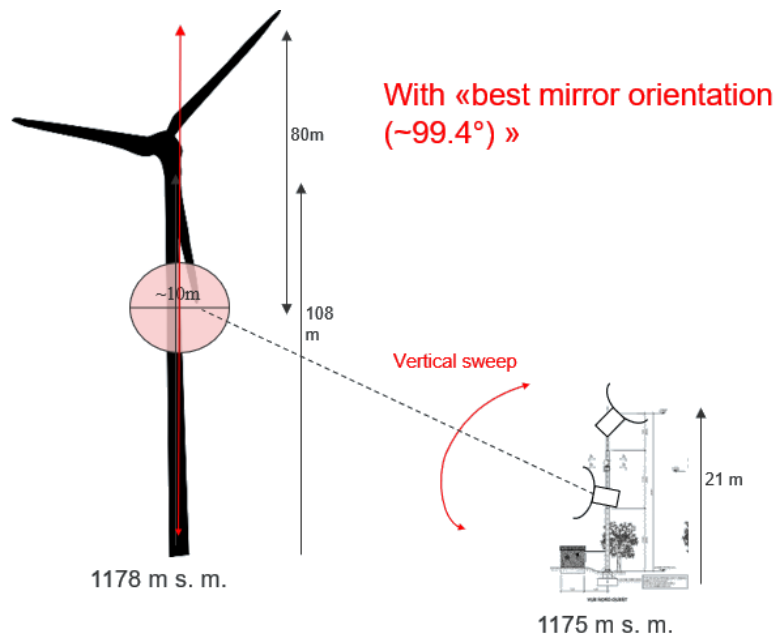


Figure 25: Base pour la procédure de mesures



## Mesures

Dès les débuts de la préparation de la campagne de mesures, il était prévu d'affiner la procédure de prise de mesures. La description des contraintes et des solutions pour adapter la procédure sont décrites dans les sections suivantes.

### Installation - Hypothèse nécessaire pour la faisabilité des mesures

Avant le début de la campagne de mesures et afin d'assurer que l'antenne de mesures capte uniquement la réflexion et non pas le faisceau direct, l'isolation par la végétation et la topographie locales est utilisée et les valeurs de réceptions vérifiées. Par hypothèse et afin de rendre la mesure possible, il est admis que l'ordre de grandeur de la réflexion captée par l'antenne de mesure, à 12 mètres de hauteur, est le même au niveau de l'antenne d'émission-réception du faisceau principal.

### Déroulement des mesures – 1<sup>ère</sup> journée

A la suite de l'installation du banc de mesures, une première journée de collecte des mesures a eu lieu le 10 avril 2018 à Peuchapatte. Cette première journée sur site a permis de déceler, avec difficulté, quelques pics de réflexion et a mis en avant les problématiques suivantes :

- Météo, voir § 1.5
- Agrégation sur la durée des indicateurs, voir § 1.6
- Effets des intempéries sur la procédure initiale, voir § 1.7
- Collecte de toutes les contributions de la réflexion des ondes sur l'éolienne dépendamment de l'illumination de l'antenne de mesure, voir § 1.8

La finesse de la mesure quant à la géométrie précise des pales et du rotor de l'éolienne est critique. En effet, un changement subtil de pointage et le pic est perdu. Un premier balayage du pointage de l'antenne de mesure le long du mât de l'éolienne (vertical), puis, arrivé au moyeu, le long d'une pale (horizontal, à 3h), a montré qu'il était possible mais difficile de capter des pics de réflexion, tant ce balayage doit être fin.

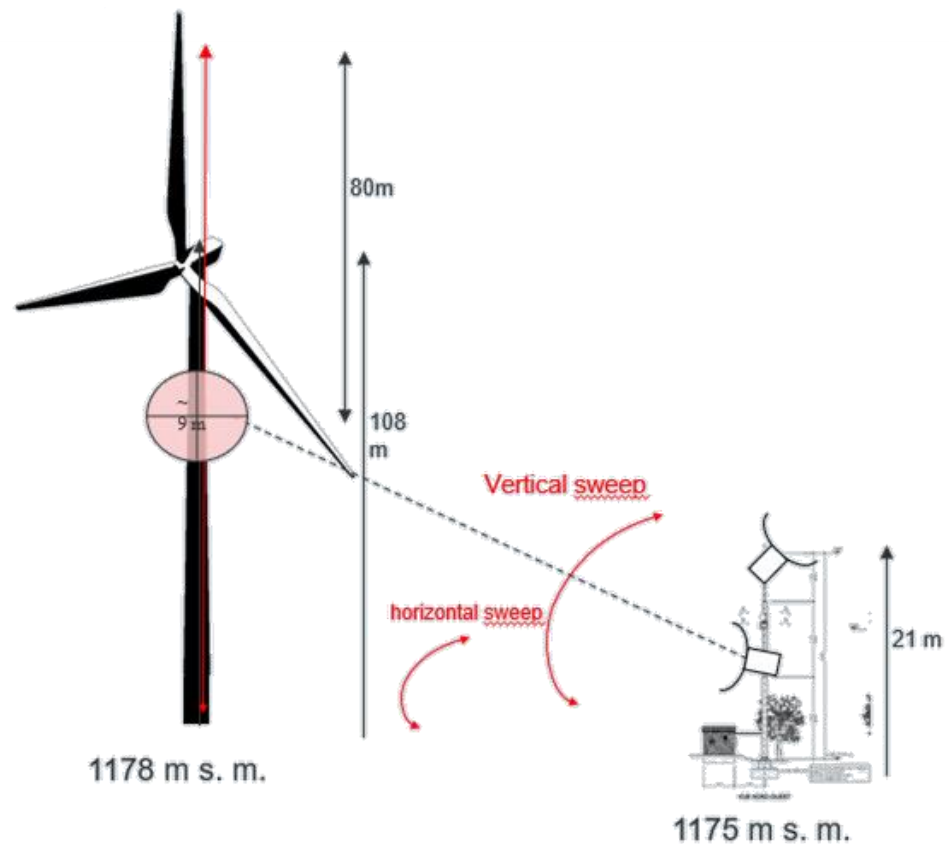


Figure 26: Procédure de mesure adaptée une première fois avec des balayages verticaux et horizontaux

Les discussions sur les résultats de la première journée de mesures débouchent sur les premiers constats (en partie prévisibles) sous 1.9 et 1.10 .

## 1.5. Contrainte météo

En prévision du premier jour de mesures, il est utile de rappeler que certains éléments comme le vent sont des paramètres qui ne peut pas être contrôlés. Il n'est, dès lors, pas certain, après avoir établi la procédure de base, de pouvoir garantir les mesures avec les orientations et angles souhaités à-priori.

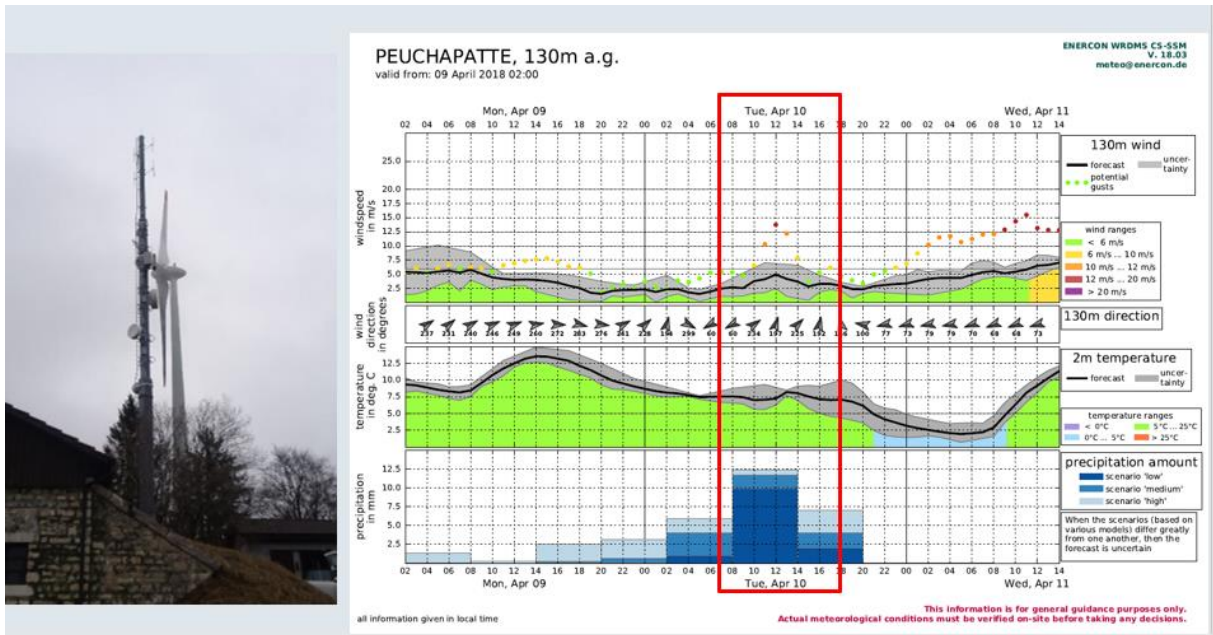


Figure 27: Extrait bulletin météo du site la veille du premier jour de mesures

La procédure de base a donc été adaptée ainsi :

- Les valeurs d'orientations doivent être incrémentées, autant que possible, de manière à permettre la rotation de l'éolienne par le vent et de chercher les maxima en fonction de la géométrie (position, angles, ...) de la machine

## 1.6. Contrainte agrégation sur la durée des indicateurs

L'agrégation des données n'a pas permis d'obtenir les niveaux de puissance réfléchi en temps réel :

- Agrégation des données de l'éolienne à la minute
- Agrégation à 15 minutes du système à faisceaux hertziens

Ainsi une modification de l'installation a été nécessaire avec l'utilisation d'un oscilloscope connecté, à l'interface dédiée à cet effet, sur l'unité extérieure « outdoor » de l'antenne de mesure. Ceci a permis d'observer les niveaux de puissance en temps réel avec toutefois une sensibilité moindre que via le système de gestion des indicateurs. Ce système n'est pas connecté au système de gestion à distance.

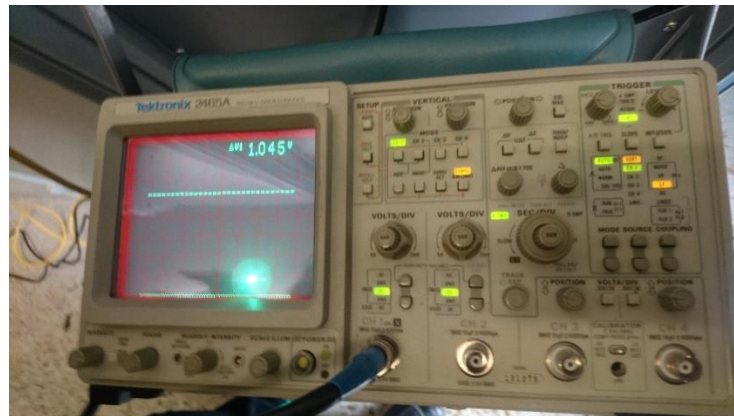


Figure 28: Oscilloscope installé

## 1.7. Contrainte répétabilité des mesures

Lors de la première journée de mesures, de la neige s'est mélangée à la pluie (pluie-neige en langage courant). Les quelques pics de réflexion trouvés en début de journée lors d'un épisode de légère pluie et de brume ont disparu. Deux phénomènes combinés peuvent être considérés pour l'expliquer :

- Dispersion dans le chemin indirect causant une atténuation de l'interférence captée par l'antenne de mesure
- Dépôt d'une couche mince inhomogène sur la structure de l'éolienne, différent de celui d'alors, ayant pour effet de changer les angles de réflexions.

Suite à cette activité, il a été impossible de retrouver des pics de réflexion malgré des essais à différentes orientations et angles des pales.



Figure 29 : changement de temps impactant les interférences



## 1.8. Contrainte illumination de l'antenne

L'illumination de l'antenne de mesure représente une petite surface projetée (proche d'un diamètre de 9 mètres), et si l'éolienne est considérée dans un plan, la surface projetée correspondrait à une ellipse (voir hypothèses prises précédemment), ainsi un balayage a été opéré selon les flèches rouges dans l'illustration ci-dessous :

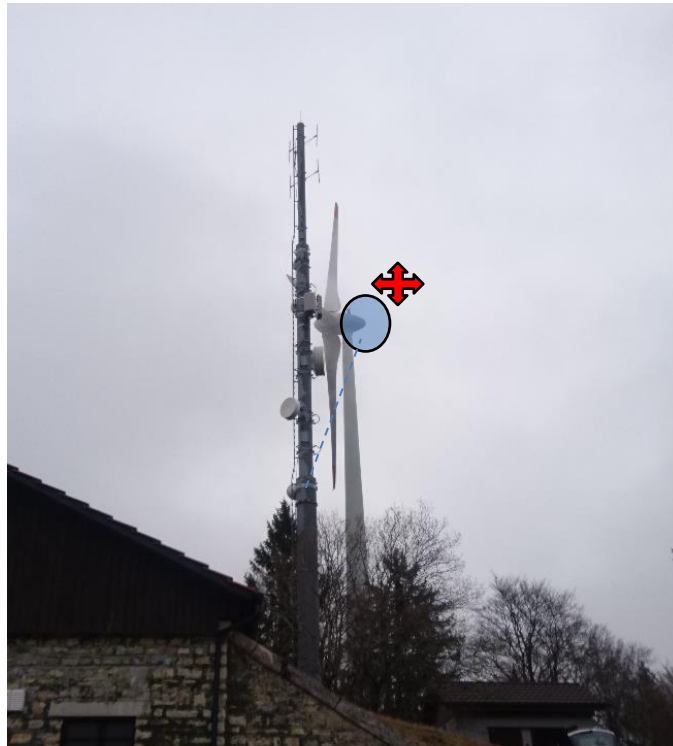


Figure 30: illumination fine avec antenne de mesure

Par conséquent, tous les effets de l'éolienne ne sont pas captés par l'antenne de mesure. Dans le cas idéal, il faudrait pouvoir capter toutes les réflexions de l'éolienne. La meilleure option pour solutionner cette problématique, dans un laps de temps restreint et avec les ressources disponibles (pas d'antenne cornet ni de réseau d'antennes, etc.), a été l'utilisation d'un lobe secondaire d'une seconde antenne de mesure identique à la première.

La nouvelle antenne de mesure a été installée quelques jours après les premières mesures.

Hauteur de la seconde antenne de mesure sur le mât de Point de Vue : 13 m



Figure 31 : nouvelle antenne de mesure

La difficulté réside dans les signaux qui peuvent être captés par d'autres lobes du diagramme de rayonnement de l'antenne. Afin de remédier à cette situation, l'orientation de cette nouvelle antenne de mesure a été un facteur clé pour atteindre un découplage suffisant. Dans le diagramme suivant, le rectangle vert délimite les angles pour lesquelles il ne faut pas recevoir de signal dans la bande des 13 GHz.

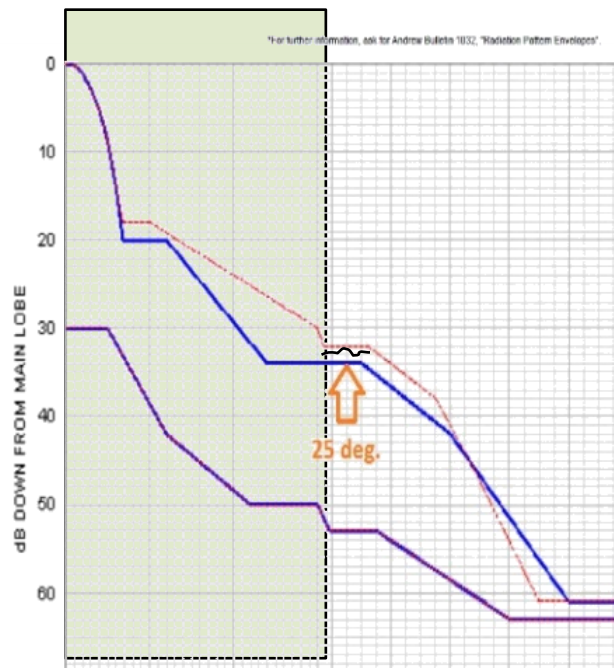


Figure 32 : enveloppe diagramme de rayonnement de l'antenne

Etant donné qu'un ordre de grandeur est recherché :

- **il est admis que le gain du lobe secondaire de l'antenne de mesure suit le gabarit - l'enveloppe du diagramme de rayonnement** (voir gabarit à 25° de la figure ci-avant)
- le découplage (l'isolation) de la nouvelle antenne de mesure est de 34 dB



Figure 33 : installation d'une deuxième antenne de mesure

Sur la photo de la figure précédente, la deuxième antenne de mesure est à environ 1 mètre au-dessus de la première. De manière indicative, l'illumination résultante correspondrait à l'illustration de la figure suivante avec une ellipse de petit axe de près de 92 mètres :

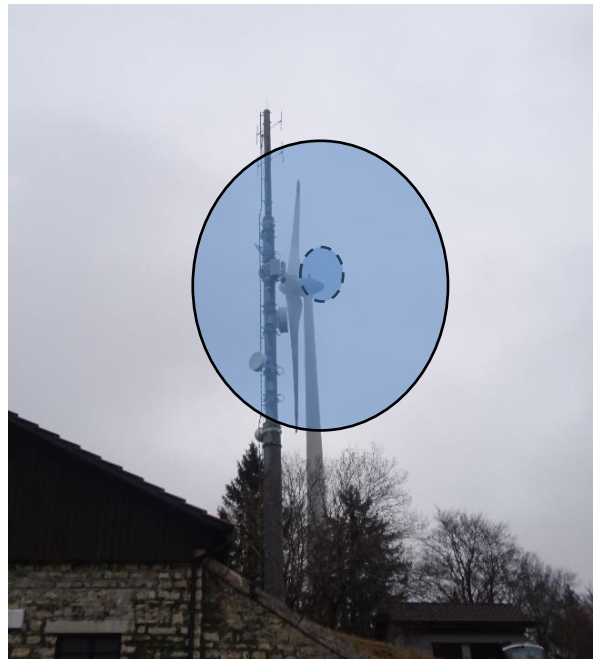


Figure 34 : Illumination avec l'ajout de la nouvelle antenne de mesure



## 1.9. Cas particulier : topologie, géométrie, structure, matériaux, ...

La configuration du site, avec sa topologie particulière, ne permet pas de généraliser les effets pour toutes les éoliennes et faisceaux hertziens en conflit. L'effet du terrain, de la manière dont le terrain garde l'humidité, de la température ou encore de l'enneigement a des conséquences sur la propagation des ondes électromagnétiques. Il en va de même du modèle de l'éolienne, avec sa géométrie et ses matériaux particuliers. Le but des mesures étant de donner une meilleure idée des effets en cherchant un ordre de grandeur de l'impact, la configuration particulière du banc de mesure n'est pas contraignante.

## 1.10. Humidité, neige, givre

Effectuer des mesures sur plusieurs jours a pour objectif d'avoir de l'humidité sur les pales et/ou le terrain. Avec la sensibilité des niveaux de réflexions, si un pic de réflexion est mesuré pour une géométrie donnée par temps sec, ce pic peut disparaître avec la pluie et la neige. Il a été observé pendant les mesures, dans des conditions de légères précipitations et de brouillard, la perte de tous les pics trouvés suite à des précipitations d'une chute de « pluie-neige » – une hypothèse a été formulée et testée quant à ces disparitions de pics, mais n'a pas pu être validée : ces pics seraient retrouvés avec de légères variations des pales et de l'orientation de la nacelle. Les précipitations atténuent, diffusent et réfléchissent le rayonnement. Ceci s'explique physiquement par la propagation à travers des couches inhomogène.

## Autre adaptation de procédure

Après la première journée de mesures sur site, une analyse des données télémétriques de l'éolienne et du système de gestion des indicateurs de l'antenne de mesures collectées à distance et son utilisation a été effectuée. La problématique et l'adaptation de la procédure qui en découle est décrite ci-dessous, voir 1.11.

## 1.11. Collecte des données

Les données de gestion des systèmes à faisceaux hertziens sont collectées à distance. Il en est de même pour les données télémétriques de l'éolienne. L'idée de récolter les données à distances et d'utiliser les indicateurs basés sur des protocoles du type NTP vise à synchroniser les mesures de faisceaux avec les données télémétriques afin d'obtenir un plus large panel de mesures et de géométries, dans différentes conditions météorologiques (orientations des pales, de l'éolienne, etc.). Néanmoins, après de nombreuses vérifications, et une mesure de la finesse des niveaux de réflexions par rapport à une géométrie bien précise (définie par les orientations des pales et l'orientation de la nacelle), il s'avère qu'à moins de bénéficier d'une agrégation sur la durée très courte des indicateurs, il n'est pas possible de mettre en rapport un indicateur du niveau de réflexion mesuré avec une géométrie précise de l'éolienne. En effet, il faudrait que l'agrégation des données des deux systèmes, éolien et à faisceaux hertziens, soit bien plus courte que le temps de régime stationnaire obtenu par le programme de régulation interne de l'éolienne pour la poursuite de l'orientation optimale en fonction des conditions de vents (voir figure suivante avec deux exemples de systèmes de contrôle et les temps nécessaires pour atteindre leur régime stationnaire respectifs). De manière empirique, il a été constaté, lors d'une autre visite sur le site, que le changement de l'orientation est parfois quasi-continu (de



l'ordre de quelques secondes). Plus les systèmes ont une agrégation courte de leurs données, plus les mesures et les données télémétriques seront corrélées, ce qui n'est pas confirmé dans le cas présent, car plusieurs variations de géométrie peuvent avoir lieu au cours des 15 minutes de la prise de mesures par le système de gestion des faisceaux hertziens.

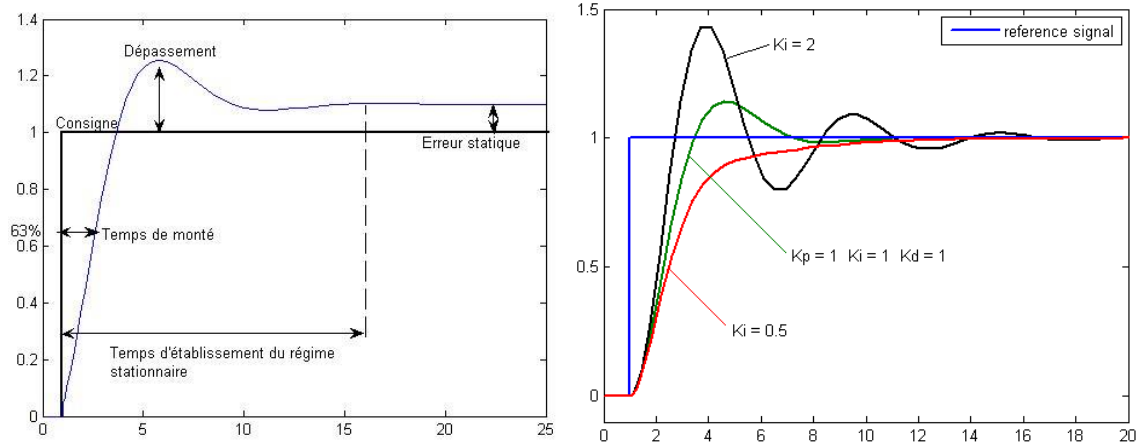


Figure 35 : « réponse à une consigne en échelon d'un système du premier ordre contrôlé par un PID » et «Change of response of second order system to a step input for varying Kp values. Prepared for use in PID controller article. », source : Wikipédia

La procédure de base a été donc adaptée ainsi :

- Monitorer à distance les mesures d'antennes et les données télémétriques afin de déduire des géométries impactantes (ou peu impactantes) pour l'antenne de mesure et surveiller les indicateurs du faisceau principal
- Vérifier les valeurs trouvées depuis le monitoring à distance et déterminer autant que possible à l'aide des données télémétriques de l'éolienne, les valeurs des niveaux de réception pour lesquelles les orientations de l'éolienne n'auraient pu ou pas changé dans des intervalles de 15 minutes. Et ceci pour plusieurs orientations qui permettent la vérification par mesures dépendamment des orientations des vents de la 2<sup>ème</sup> journée de mesures.

## Déroulement des mesures – 2<sup>ème</sup> journée

La deuxième journée de mesures sur site a consisté à effectuer des incréments des orientations et des angles de pales autour des géométries suspectée de générer des pics de réflexion collectée lors de la première journée de mesures, ainsi qu'à distance en avril et mai. Comme mentionné précédemment, ces géométries ont dû être déterminées malgré le peu de précision au niveau du temps (agrégation de 15 minutes) des données des systèmes à faisceaux hertziens.

Cette journée de mesures a eu lieu le 17 juillet 2018 et a permis de vérifier la théorie sur la sensibilité de la géométrie (angles des pales et de l'orientation de la nacelle) voir 1.13. Cette journée a surtout permis de traiter l'inquiétude de ne plus mesurer de niveau de puissance au-delà du niveau de bruit du système de mesures (la mesure avec le système relié à l'oscilloscope n'avait pas la sensibilité nécessaire, voir détail sous 1.6), voir 1.12.

## 1.12. Contrainte de réinitialisation des paramètres

Techniquement, lors de pannes d'électricité, les systèmes à faisceaux hertziens peuvent redémarrer, comme il a été observé après une journée sur site : l'ATPC a redémarré en mode automatique ce qui a occasionné une diminution de l'émission et donc l'impossibilité de retrouver des valeurs de réflexion hors du bruit du système de mesure. La perte de puissance a été d'env. 10 dB. La cause de panne d'électricité a été identifiée et corrigée après investigation dans l'historique du système. Les valeurs de niveau de puissance reçue pour la réflexion ont été du même ordre de grandeur avant et après la panne.

## 1.13. Théorie vérifiée sur la sensibilité des orientations et des angles de pales

Après une journée de mesures, Suisse Eole et Swisscom ont émis une hypothèse quant à la dépendance des pics de réflexion suivant une géométrie caractéristique de l'éolienne : Pour chaque orientation, il existerait un angle (pour les 3 pales) qui devrait permettre une réflexion maximale, et hors de ces angles spécifiques, à 1° près, la réflexion chute. Selon la figure ci-dessous, l'angle des pales C correspond à la mise en drapeau.

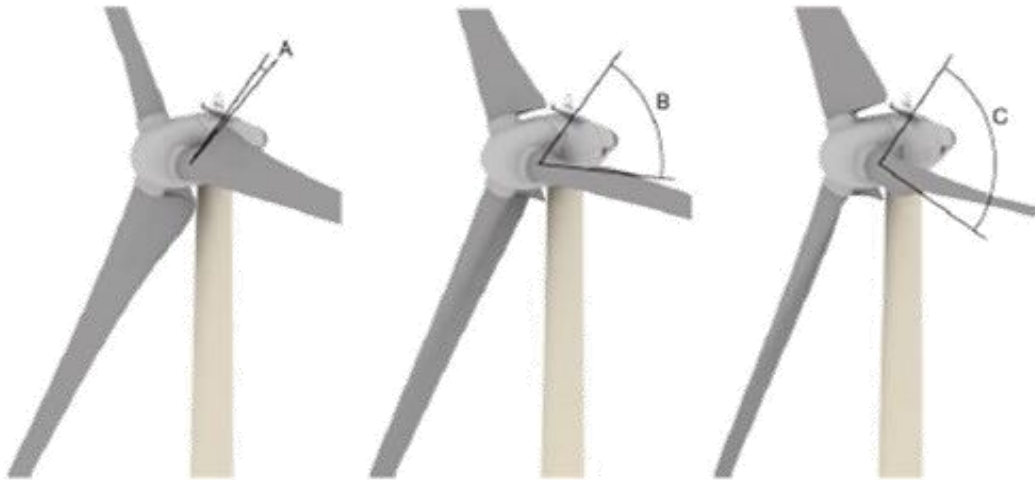


Figure 36: angle de pale, ou pitch (source Enercon)

À titre d'exemple uniquement :

- Orientation de l'éolienne 329°, réflexion importante entre 29.5 et 30.5° d'angle des 3 pales, à 29° ou 31°, cette réflexion n'est plus décelable

Cette théorie a été vérifiée au cours de la deuxième journée sur site de la campagne de mesures et offre des possibilités pour la recherche de solution de mitigation. Avec une caractérisation de ces angles spécifiques (du type couples critiques orientation-pitch ( $\phi_i; \theta_i$ )), propre à la configuration du site (voir hypothèses de bases), une programmation logicielle de l'éolienne pourrait offrir des perspectives pour certaines applications radars ou à faisceaux hertziens.



## Résultats

Par souci de clarté, seuls les résultats de mesures d'une première période sont montrés dans ce chapitre. Les mesures sur site et à distance de la période avril-mai sont similaires à celles qui sont collectées dès le mois de juin. Avec les mesures du niveau d'interférence, le rapport C/I est un bon indica-



Figure 37 : session de mesures de Juillet 2018 à Peuchapatte, le rotor de l'éolienne tourne pendant que l'équipe sur place collecte manuellement les mesures

teur pour déterminer la qualité du signal du lien. Les indicateurs d'erreur du type erreurs secondes, bit error rate affichent encore une valeur de '0', excepté lors des coupures de courant sur la station pendant les orages.

Des rapports signal-sur-interférences C/I sont conseillés par modulation afin de ne pas impacter la transmission. Ces valeurs par modulation sont reportées dans le tableau ci-dessous.

Modulation	C / I
16-QAM	$\geq 23$ dB
128-QAM	$\geq 33$ dB
1024-QAM	$\geq 42$ dB

Tableau 2 : niveaux C/I recommandés



Les mesures de la deuxième antenne ont permis de calculer les rapports C/I minimaux. Un extrait sur trois jours des indicateurs des niveaux de puissance maximaux reçus des deux antennes sont représentées dans le graphique suivant.

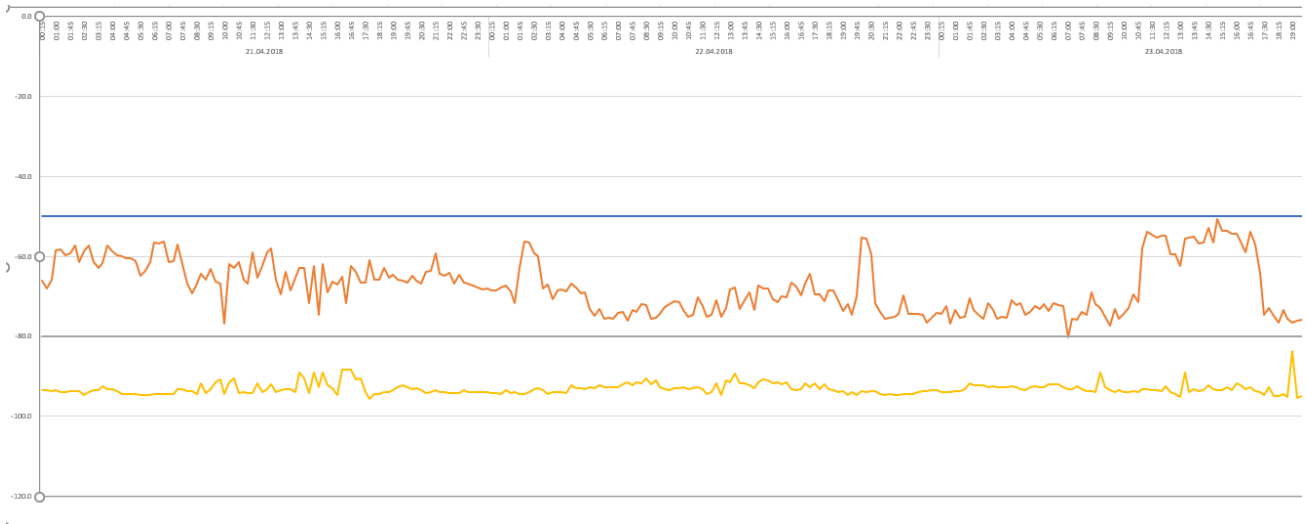


Figure 38 : Niveau 1ère (orange) et 2ème (jaune) antennes de mesures. Ligne grise= -80dBm ; Ligne bleue= -50dBm

Dans le graphique suivant, les valeurs des rapports C/I minimaux sont calculés d'après les mesures et les hypothèses précédemment exposées. Les seuils des niveaux C/I recommandés sont également indiqués

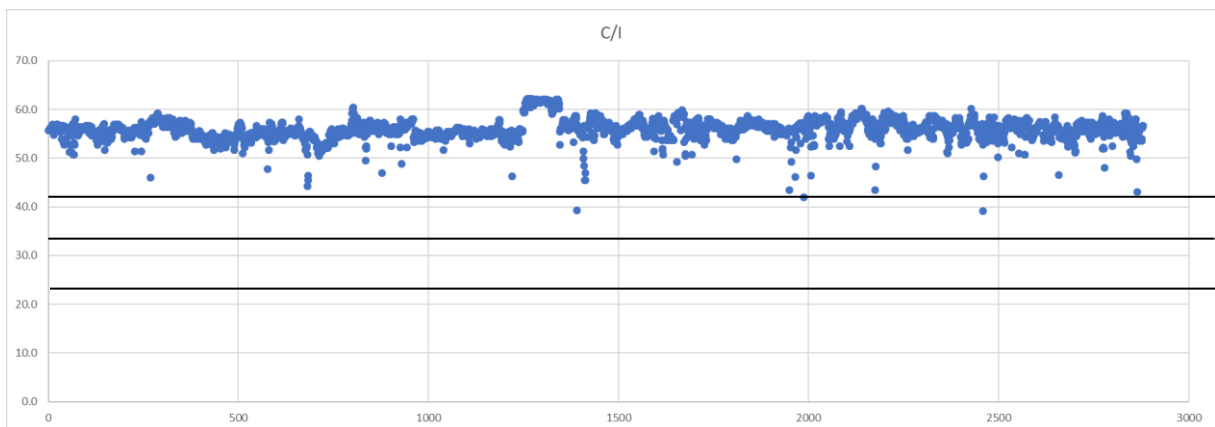


Figure 39 : Estimation C/I [dB] basés sur les indicateurs de niveau de puissance de la 2<sup>ème</sup> antenne de mesures (agrég. 15', numéro d'échantillon en abscisse) du 11 avril 2018 au 30 mai 2018, les valeurs mesurées de juin à août 2018 sont de mêmes niveaux



Des surfaces de réflexions minimales et maximales sont calculées :

Tableau 3 : Niveau de réception « Rx » et surface équivalente A<sub>eff</sub> de réflecteur. Résultats minimaux et maximaux ( $\eta=0.9$ )

Niveau réception 2 <sup>ème</sup> antenne de mesures, Rx  [dBm]	A <sub>eff</sub>  [dBm <sup>2</sup> ]	A <sub>eff</sub>  [m <sup>2</sup> ]	Surface réflecteur à une hauteur de moyeu  [m <sup>2</sup> ]
Min :	Min :	Min :	Min :
-99.9*	-7.7*	0.2*	~0.6*
Max :	Max :	Max :	Max :
<b>-76.8</b>	3.8	2.4	~6.9

\*Les valeurs minimales correspondent à la valeur de la sensibilité du récepteur, elles pourraient être inférieures, car le système n'est pas capable de mesurer des valeurs plus faibles. Même si aucune réflexion n'est captée, la valeur de niveau restera à -99.9 dBm.

Le minimum et maximum du rapport C/I de Peuchapatte :

Tableau 4 : C/I (par mesures à Peuchapatte)

C/I déduits des mesures [dB]
Min :
<b>39.0</b>
Max :
62.1*

\*Les valeurs minimales correspondent à la valeur de la sensibilité du récepteur, elles pourraient être en deçà car le système n'est pas capable de mesurer des valeurs inférieures. Même si aucune réflexion n'est captée, la valeur de niveau restera à -99.9 dBm.



## Comparaison des résultats déterminés depuis les mesures et les calculs

La valeur minimale du rapport C/I = **39.0** dB est un ordre de grandeur estimé à partir des mesures. L'ordre de grandeur est très proche des valeurs de simulation de l'outil de calcul de Swisscom pour le site de Peuchapatte :

Tableau 5 : Outil de simulation Swisscom - C/I et déduction de surfaces équivalentes

Outil Swisscom Broadcast AG (ATDI)	C/I [dB]	$A_{\text{eff}}$ [m <sup>2</sup> ]	Surface réflecteur déduite [m <sup>2</sup> ]
	Min :	Max :	Max :
	41.1	~2.4	6-7

L'outil de calcul de l'OFCOM donne des valeurs très éloignées :

Tableau 6 : Outil de calcul OFCOM - C/I et surface équivalente

Outil OFCOM	C/I [dB]	$A_{\text{eff}}$ [m <sup>2</sup> ]	Surface réflecteur à une hauteur de moyeu [m <sup>2</sup> ]
	Min :	Max :	Max :
	14.89 dB	27.7	80

Lors des plus fortes réflexions, le C/I est au plus bas. Ces réflexions proviennent d'angles des pales et d'orientations bien spécifiques dans les conditions du site de Peuchapatte.

(La première antenne de mesure est pointée dans la même direction que la deuxième antenne de mesure au cours du dernier jour sur site.)

## Robustesse des modulations basses (16-QAM) et des modulations plus élevées (1024-QAM)

Le lien principal en 16 QAM n'a pas été perturbé par les réflexions de l'éolienne pendant toute la durée de mise en service du lien. La modulation a été augmentée à 1024 QAM depuis le 17 juillet 2018 après la fin des mesures sur sites. Avec vérification à distance, aucun impact lié à l'éolienne n'a été détecté depuis que la modulation a été augmentées, les indicateurs d'erreurs demeurent à '0'. L'hy-



pothèse la plus plausible est que l'algorithme de correction d'erreurs, implémenté sur tous les systèmes à faisceaux hertziens digitaux actuels, maintient le faisceau principal en fonctionnement normal.



Figure 40: session de mesures, photographies depuis le mât de télécommunications par R. Gugelmann (OFCOM)



## Perspectives, étapes ultérieures

### Programmation de blocage d'angles de pales

Une piste de solution intéressante décrite précédemment dans ce document, est la minimalisation des réflexions par programmation des angles des pales à éviter par l'éolienne. Contrairement à ce qui existe actuellement sur le marché (ie. Blocage de secteur pour l'orientation de la nacelle (yaw)), ceci permettrait de toujours opérer sur toutes les orientations de 0 à 360°. À priori, cela devrait aussi minimiser les pertes par rapport à des blocages de secteurs entiers. Toutefois, pour de nouvelles éoliennes, une solution de migration adéquate est nécessaire.

Cette solution serait utilisable pour éliminer les interférences pour plusieurs applications comme :

- Radar de précision
- Radar de surveillance civil (ou il n'est pas nécessaire de « voir » juste derrière l'éolienne et selon les distances des opérations)
- Faisceaux hertziens
- Autres applications radio



Figure 41 : Image d'un radar - Wikipedia



Figure 42 : Image - WuF



## Discussion

### Discussion et évaluation des résultats

L'ordre de grandeur visé par cette étude a été déterminé. Il valide les hypothèses pour un type de simulation sur le site de Peuchapatte.

C'est un cas particulier qui doit être confirmé par d'autres études, afin notamment d'affiner l'intervalle de confiance des calculs, et par conséquent les tolérances sur les hypothèses de calculs.

Ce rapport ne décrit pas la façon avec laquelle les opérateurs traiteront les conflits.

### Enseignements

Lorsque de telles mesures sont effectuées, il est important d'avoir des indicateurs avec une agrégation sur la durée se rapprochant de la seconde. Ceci permet d'avoir une correspondance entre les mesures de réflexions et les données télémétriques de l'éolienne, et donc de collecter davantage d'informations précises. Par exemple, l'ajout d'un serveur sur lequel est installée une routine de collecte de données à la seconde serait une solution.

L'illumination d'antenne de mesures doit être adaptée au cas à analyser. Plus le site de mesure est proche de l'éolienne, plus l'illumination de l'antenne doit être importante. Les antennes de mesures doivent également être en adéquation avec la topographie et la grandeur de l'éolienne. Plusieurs types d'antenne sont à évaluer, comme par exemple les réseaux d'antennes, les cornets ou d'autres antennes imprimées.

Finalement, il y aurait de l'intérêt à mesurer les polarisations horizontale et verticale. Bien que Swisscom n'a pas observé de grand impact en simulation de cette dernière avant la campagne de mesures, la pratique a démontré que la géométrie des pales, et par conséquent tous les angles de réflexions des ondes incidentes apporteraient des indications intéressantes.



## Conclusions

Les résultats sont positifs puisque l'ordre de grandeur mesuré permet de confirmer les hypothèses de calcul utilisées par l'opérateur de faisceaux hertziens Swisscom Broadcast AG. Cela permet de calibrer les outils de calcul pour mieux estimer les interférences.

En conclusion et en tenant compte de toutes les hypothèses :

Les mesures ont été effectuées pour le cas particulier de Peuchapatte avec les paramètres suivants :

- Une éolienne de type Enercon E-82 (2/3 du mât en béton)
- Une antenne de télécommunication située à une distance d'un peu plus de 120 mètres,
- Une topographie peu accidentée classique de la région jurassienne
- Sur une période de plusieurs mois avec des météos diverses (pluie-neige-brouillard-sec, etc).

Il faut garder à l'esprit le cas particulier du site et de l'éolienne, cependant le but était avant tout de pouvoir déterminer un ordre de grandeur afin d'affiner les outils de calcul. Ce qui est fait. L'opérateur Swisscom Broadcast AG, opérant la plupart des faisceaux hertziens suisses, continuera d'observer le faisceau principal du site\* et de discuter avec les développeurs éoliens afin de trouver les meilleurs compromis tout en protégeant son modèle d'affaire et les contraintes inhérentes à son bon fonctionnement.

\* L'état de performance du faisceau principal sur Peuchapatte est encore régulièrement observé. Augmentée depuis la fin du mois de juillet 2018, la modulation de 1024QAM, plus sensible aux influences extérieures, n'a toujours pas signalé d'erreur liée aux interférences jusqu'à octobre 2018.

Il convient de préciser que les mesures n'ont pas concerné les phénomènes dans lesquels l'éolienne coupe la ligne de vue directe entre deux terminaux reliés par transmission par faisceau hertzien, connus sous les noms de phénomènes d'ombrage ou de masquage.

[Pour la branche éolienne :](#)

Certains outils de calcul donnent des résultats très différents. La branche éolienne est satisfaite que les mesures montrent que l'ordre de grandeur est plus proche du résultat davantage favorable à l'éolien.

Suisse Eole remercie Swisscom Broadcast AG pour avoir collaboré à ces mesures dans un but commun, à savoir déterminer l'ordre de grandeur des interférences.

Les propositions pour des étapes ultérieures sont discutés dans le chapitre relatif. Les propositions sont aussi possibles pour certaines applications radars.



## Des risques à analyser et des idées de compromis

Comme énumérées précédemment, plusieurs pistes peuvent être investiguées. Les risques doivent être analysés par les opérateurs, avec les questions sous-jacentes telles que :

Y a-t-il un niveau d'interférences importants ? L'algorithme de correction, actif dans tous les systèmes de faisceaux numériques modernes, peut-il être insensible aux éventuelles interférences des éoliennes ? La modulation, est-elle sensible aux perturbations ?

Une des pistes à creuser serait de programmer les éoliennes pour qu'elles n'utilisent pas certains angles d'inclinaison des pales propres à certaines orientations : comme il a été vérifié pendant les mesures, au degré près, une réflexion apparaît, puis disparaît. Empiriquement cette contrainte ne devrait pas occasionner de perte significative, mais reste à vérifier par les constructeurs d'éoliennes. Une difficulté peut apparaître dans le cas précis où l'opérateur doit garantir un service premium sur le faisceau hertzien. Dans ce cas précis, l'éolienne devra contenir un mode de blocage à des angles spécifiques déjà affinées dès l'installation. Cela signifie qu'une simulation précise des interférences sera nécessaire.



## Liste des abréviations

NFZ : Near Field Zone, terme anglais pour zone de champ proche

C/I : rapport de puissance entre la porteuse du signal et les interférences (ou bruit), ce rapport permet d'apprécier la qualité d'un signal reçu par rapport aux perturbations

16-QAM, 1024-QAM : modulations d'amplitude en quadrature

## Annexe

Voir la page suivante



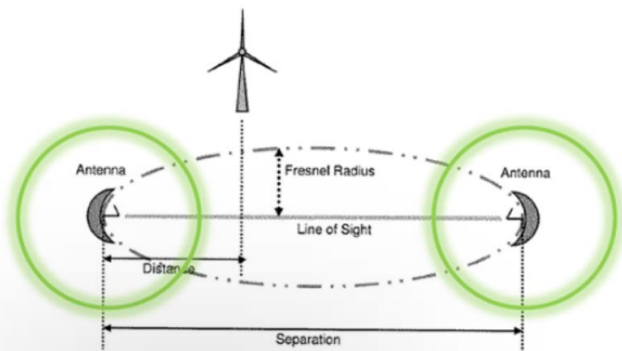
## Annexe 1 : Changement des recommandations de l'OFCOM

Les recommandations de l'OFCOM ont évolué depuis le début du projet. Voici les principales évolutions :

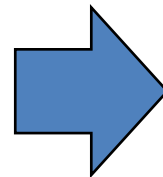
### Influence des éoliennes sur les faisceaux hertziens

Les recherches menées par l'OFCOM montrent que dans certaines conditions, les éoliennes peuvent perturber les faisceaux hertziens. Il est possible d'éviter ces interférences en recourant à des méthodes appropriées.

Gottfried Wirth, division Gestion des fréquences



Perturbations du faisceau hertzien à proximité de l'antenne (source: Pager Power / OFCOM)

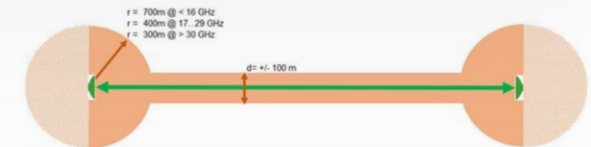


### Coexistence pacifique entre les éoliennes et les faisceaux hertziens

Les travaux de planification de nouvelles éoliennes doivent intégrer l'analyse des risques de perturbation de leur installation sur la transmission de signaux par liaison hertziennne. L'OFCOM examine et accompagne des projets de parcs éoliens pour évaluer leur influence potentielle sur les faisceaux hertziens. La tâche est complexe. Les explications de cet article donnent aux personnes en charge d'un projet des pistes pour faire une première estimation de risques potentiels de perturbations.

Rolf Gugelmann, Concessions et fréquences

### L'OFCOM soutient la planification d'éoliennes



Ausserhalb dieser Zone sollten nach aktuellem Kenntnisstand keine Beeinflussungen der Richtfunkstrecken durch Windturbinen auftreten.

- Zones d'évaluation pour les faisceaux hertziens en rapport avec les éoliennes
- (1) Si des éoliennes se trouvent dans les zones d'évaluation, le concessionnaire ou l'exploitant doit examiner plus précisément la coexistence des deux technologies.
  - (2) Si des éoliennes se trouvent derrière l'antenne, le concessionnaire ou l'exploitant doit examiner leurs effets; sur la base des connaissances actuelles, les faisceaux hertziens ne devraient pas être perturbés.
  - (3) Si des éoliennes se trouvent à l'extérieur des zones d'évaluation, les connaissances actuelles indiquent qu'elles ne perturbent pas les faisceaux hertziens.

**Exclusion Zone für Windturbinen**

1) Im Nahfeld einer Antenne (NFZ)