

Proposition de sujet de thèse :
Méthodes de Correction A-Posteriori
de Mesures d'Antennes par Ondelettes

Alexandre Chabory
alexandre.chabory@recherche.enac.fr
ENAC/TELECOM/EMA

14 janvier 2020

Table des matières

1	English version	2
1.1	Title	2
1.2	Supervision and founding	2
1.3	State-of-the-art	3
1.4	Recent works realized by CNES and ENAC	3
1.5	Objectives	4
1.6	Work Plan	4
1.7	Conditions for applying	4
1.8	References	5
2	Version française	7
2.1	Titre	7
2.2	Encadrement et financement	7
2.3	Contexte	7
2.4	État de l'art	8
2.5	Travaux récents réalisés par le CNES et l'ENAC	9
2.6	Objectifs	9
2.7	Organisation des Travaux	9
2.8	Conditions pour candidater	10
2.9	Références	10

1 English version

1.1 Title

A-posteriori Correction Methods for Antenna Measurements by Wavelets

1.2 Supervision and founding

- Doctoral school : GEET
- PhD supervisors :
 - Alexandre Chabory, Professor, ENAC
 - Romain Contreres, CNES, Antennas Service
 - Gwenn Le Fur, CNES, Antennas Service
- Envisaged lab. : ENAC Lab, TELECOM-EMA
- Lab director : Patrick Senac, patrick.senac@enac.fr
- Envisaged co-founder : DGA

In the domain of antennas, design and prototyping phases are always followed by a measurement phase, which goal is to reliably assess the reached performances with respect to the expected specifications. This generally consists in determining the radiation pattern both in co and cross polarizations in all the directions of space, possibly in the presence of the antenna carrier.

Such measurements are usually performed in an anechoic chamber (chamber with walls covered by absorbing materials). Two techniques are typically used to get rid of the far-field condition between the measurement probe and the antenna under test, which would yield impracticable chamber sizes :

- **Compact range systems** : the far-field condition is emulated by illuminating the antenna under test by a plane-wave. This plane-wave is obtained by positioning the antenna under test in the quiet zone of a large-size reflector.
- **Near-field range systems** : the near-field is measured (usually over a sphere). The radiation pattern is then obtained by means of a near-field to far-field transform.

Numerous research works are currently investigated to improve antenna measurements as exposed during the COMET workshop organized by CNES in January 2018 [1]. To prevent the congestion of such devices, the measurement times must notably be reduced. Besides, the level of accuracy must be optimal on a frequency-band as wide as possible.

The accuracy is limited by perturbations of various origins. Indeed, regardless of the measurement device, spurious reflections come from the walls (due the limited accuracy of the absorbers), the supports (metallic arms, ...) and other equipments in the chamber. Another perturbation source comes from defects in the positioning and orientation of the elements.

For a compact range system, additional perturbations are yielded by imperfections in the source that illuminates the reflector, and by the reflector itself (edge diffraction, shape defects, limited size). For a near-field range system, the accuracy is also limited by the presence of the measurement probe in the near-field of the antenna under test. Any defect in the probe and any coupling between the probe and the antenna degrade the accuracy.

1.3 State-of-the-art

To extend the capabilities of a given device, a solution consists in developing correction algorithms for post-processing. Such algorithms generally rely on one of the two following methods :

- **Time gating** : If the perturbations come from spurious reflections, they are delayed with respect to the direct signal. Thus, a time gating can remove them [2]. This technique, already used by CNES, can nevertheless only be used for sufficiently wide-band antennas and can only deal with perturbations which delay is long enough with respect to the direct path.
- **Deconvolution and denoising** : The measured signals in a given chamber correspond to the angular convolution of two terms in presence of an additive noise. The first term of the convolution is associated with the probe and measurement environment while the second one corresponds to the antenna under test. A deconvolution method can therefore allow to extract the answer of the antenna alone, *i.e.* as in free-space.

The proposed PhD thesis is in the framework of deconvolution and denoising. In the literature, this method is generally based on expansions of fields in terms of plane-waves or spherical harmonics [3]-[5]. Such solutions are not optimal because the defects are most of the time localized both in position and direction. This is for example the case with spurious reflections which generally come from an area of limited size in a specific direction. Plane waves and spherical harmonics do not have this characteristic of localization in position and direction of propagation.

A more efficient solution would be to use expansions in terms of elementary waves which possess this double localization property. Few of these waves would be associated with a defect. This would speed-up the correction and improve its accuracy. Such expansions already exist. They have been applied in other domains of electromagnetics. They come from the time-frequency analysis of signal processing.

Gabor expansions and more generally expansions in terms of Gaussian beams, allow to express a field as a sum of elementary beams [6]-[8]. They have recently been used to model quasi-optical systems [9] and atmospheric propagation [10]. Their interest relies notably on several analytical formulations to compute the fields at any point of space.

The other expansion method comes from the multiresolution analysis in wavelets. It has recently been used to model atmospheric propagation [11], [12]. If no simple analytical formulation exists for the propagation of wavelets, this expansion is characterized by a reduced computation time and by its ability to compress the information related to possible defects. This latter solution seems more suitable to remove perturbations on measurements because it combines a good localization with a reduced computation time. Besides, Wavelets are deconvolution and denoising tools that are used in numerous domains of engineering and physics [13], [14].

The expansion must also be consistent with a spherical geometry because antenna measurements are often realized in this type of coordinate system. Recent research works have been led to develop wavelet expansions specifically for spherical geometry [15], [16]. These methods have notably been used to analyze the cosmic microwave background [17].

1.4 Recent works realized by CNES and ENAC

ENAC has a significant experience in using expansions coming from the time-frequency analysis of signal processing. Indeed, ENAC has worked on Gaussian beams for various applications in antennas and propagation [8]-[10]. ENAC has also used wavelets to model propagation [11], [12]. Recent works have also been carried out by CNES and/or ENAC in the domain of post-processing for measurement corrections. CNES has firstly supervised two internships on correction methods

based on plane-waves [18] and spherical harmonics [19] expansions. Since the spherical-harmonics method was the most promising, a third internship and a third-year ENAC student project have been realized in collaboration with ENAC [20], [21].

Furthermore, in the framework of a CNES *étude métier* started in July 2018, ENAC has applied several wavelet methods to antenna radiations. The results of this study confirm that wavelets could constitute the basic elements of a new method to correct antenna measurements. Spherical wavelets notably seem to be the most promising.

1.5 Objectives

The objective of this PhD thesis will be to develop correction methods for antenna measurements based on wavelets. These methods will have to meet computation-time and accuracy requirements. The two most classical measurement configurations (compact and near-field ranges) will be studied.

At the end of the PhD, the developed tools should allow to use existing measurement means beyond their frequency capabilities and to reach a better level of accuracy. Performances will be tested on the measurement means of CNES.

1.6 Work Plan

The expected work plan is as follows :

1. Study of the State-of-the-art

- (a) Antenna measurements
- (b) Classical correction methods
- (c) Multiresolution analysis in wavelets

2. Programming of the classical correction methods

- (a) Selection of performance indicators
- (b) Comparisons of classical methods for all perturbation types

3. Correction method based on wavelets for compact range systems

- (a) Development
- (b) Numerical validations
- (c) Experimental validations

4. Correction method based on wavelets for near-field range systems

- (a) Development
- (b) Numerical validations
- (c) Experimental validations

5. Writing of the PhD thesis and defense

1.7 Conditions for applying

Applicants should have a Master of Science or Engineering degree with a specialization in electromagnetics and antennas. They should send a CV and cover letter to alexandre.chabory@enac.fr by February 15, 2020.

1.8 References

- [1] Séminaire COMET-CNES, “New Developments in Antenna Measurement”, jan. 2018.
- [2] Y.-T. HSIAO, Y.-Y. LIN, Y.-C. LU et H.-T. CHOU, “Applications of time-gating method to improve the measurement accuracy of antenna radiation inside an anechoic chamber”, in *Antennas and Propagation Society International Symposium*, 2003.
- [3] H. CUI, R. CALDEIRINHA et J. RICHTER, “A deconvolution method to remove distortion caused by antenna radiation pattern from measurement”, in *International Workshop on Antenna Technology*, 2010.
- [4] A. YAGHJIAN, “An overview of near-field antenna measurements”, *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, t. 34, n° 1, p. 30-45, 1986.
- [5] J. T. TOIVANEN, T. A. LAITINEN et P. VAINIKAINEN, “Modified test zone field compensation for small-antenna measurements”, *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, t. 58, n° 11, p. 3471-3479, 2010.
- [6] J. J. MACIEL et L. B. FELSEN, “Systematic study of fields due to extended apertures by Gaussian beam discretization”, *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, t. 37, n° 7, p. 884-892, 1989.
- [7] D. LUGARA, C. LETROU, A. SHLIVINSKI, E. HEYMAN et A. BOAG, “Frame-based Gaussian beam summation method : Theory and applications”, *Radio Science*, t. 38, n° 2, 2003.
- [8] A. CHABORY, J. SOKOLOFF et S. BOLIOLI, “Physically based expansion on conformal Gaussian beams for the radiation of curved aperture in dimension 2”, *IET Microwaves, Antennas & Propagation*, t. 2, n° 2, p. 152-157, 2008.
- [9] K. ELIS, A. CHABORY, J. SOKOLOFF et S. BOLIOLI, “A 2D Gaussian-beam based method for modeling the dichroic surfaces of quasi-optical systems”, *Journal of Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves*, t. 37, n° 8, p. 753-769, 2016.
- [10] C. A. L’HOUR, V. FABBRO, A. CHABORY et J. SOKOLOFF, “2D modeling of the atmospheric refraction based on Gaussian beams”, in *European Conference on Antennas and Propagation (EuCAP)*, Davos, Suisse, avr. 2016.
- [11] H. ZHOU, A. CHABORY et R. DOUVENOT, “A fast split-step wavelet algorithm for the simulation of long-range propagation”, *Submitted to the Journal of Computational Physics*, 2018.
- [12] H. ZHOU, “Modélisation de la propagation atmosphérique d’ondes électromagnétiques en 2D et 3D à partir de transformées de Fourier et en ondelettes”, thèse de doct., Université Paul Sabatier, 2018.
- [13] I. DAUBECHIES, *Ten lectures on wavelets*. Siam, 1992.
- [14] S. MALLAT, *A wavelet tour of signal processing*. Elsevier, 1999.
- [15] Y WIAUX, J. MCEWEN, P VANDERGHEYNST et O BLANC, “Exact reconstruction with directional wavelets on the sphere”, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, t. 388, n° 2, p. 770-788, 2008.
- [16] B. LEISTEDT, J. D. MCEWEN, P. VANDERGHEYNST et Y. WIAUX, “S2LET : A code to perform fast wavelet analysis on the sphere”, *Astronomy & Astrophysics*, t. 558, A128, 2013.

- [17] E MARTÍNEZ-GONZÁLEZ, J. E. GALLEGOS, F ARGÜESO, L CAYÓN et J. SANZ, “The performance of spherical wavelets to detect non-Gaussianity in the cosmic microwave background sky”, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, t. 336, n° 1, p. 22-32, 2002.
- [18] J. MILBRANDT, *Amélioration de la Précision de Mesure en Champ Lointain*, Rapport de stage ENAC, 2016.
- [19] A. MALCOK, *Méthode d’Amélioration de la Précision de Mesure d’Antennes*, Rapport de stage ENAC, 2017.
- [20] C. DIOP, *Méthodes d’Amélioration de la Précision de Mesures d’Antennes*, Rapport de stage ENSEEIHT, 2018.
- [21] A. BORNOT et A. CROSSETTO, *Correction de Mesures d’Antennes*, Rapport de Projet ENAC, 2019.

2 Version française

2.1 Titre

Méthodes de correction a-posteriori de mesures d'antennes par ondelettes

2.2 Encadrement et financement

- École doctorale : GEET
- Encadrants :
 - Alexandre Chabory, Professeur, ENAC
 - Romain Contreres, CNES, Service Antennes
 - Gwenn Le Fur, CNES, Service Antennes
- Laboratoire envisagé : ENAC Lab, TELECOM-EMA
- Directeur du laboratoire : Patrick Senac, patrick.senac@enac.fr
- Co-financement envisagé : DGA

2.3 Contexte

Dans le domaine des antennes, les phases de conception et de réalisation d'un prototype sont toujours suivies par une phase de mesures qui doit permettre d'évaluer avec fiabilité les performances atteintes par rapport aux spécifications attendues. Il s'agit généralement de déterminer le diagramme de rayonnement de l'antenne en polarisation principale et croisée dans toutes les directions de l'espace, éventuellement en présence du porteur de l'antenne.

Ces mesures sont généralement réalisées en chambre anéchoïque (chambre dont les parois sont recouvertes de matériaux absorbants). Deux techniques sont couramment utilisées pour s'affranchir de la condition de champ lointain entre sonde de mesure et antenne sous test qui engendrerait des dimensions de chambres irréalisables :

- **Base compacte** : la condition de champ lointain est émulée en éclairant l'antenne sous test par une onde plane qui est obtenue en se plaçant dans la zone tranquille d'un réflecteur de grande taille.
- **Base champ proche** : le champ proche est mesuré (généralement sur une sphère), le diagramme est ensuite obtenu au moyen d'une transformation champ proche/champ lointain.

De nombreux travaux sont actuellement en cours pour améliorer la mesure d'antennes comme en témoigne le séminaire COMET organisé par le CNES en janvier 2018 [1]. Pour éviter la congestion, les temps de mesure doivent notamment être réduits. De plus, le niveau de précision doit être optimal sur une bande passante d'utilisation la plus large possible.

Cette précision est limitée par des perturbations d'origines diverses. En effet, quel que soit le type de mesures, des réflexions parasites proviennent des parois (à cause de la qualité limitée des absorbants), des supports (bras métalliques, ...) et des équipements présents dans la chambre. Une autre source de perturbations provient de la précision du positionnement et de l'orientation des différents éléments. Pour une base compacte, à ces perturbations s'ajoutent les défauts de la source qui illumine le réflecteur et les défauts du réflecteur lui-même (diffraction des bords, défauts de forme, taille limitée). Pour une mesure champ proche, la précision est aussi limitée par la présence de la sonde de mesure dans le champ proche de l'antenne sous test. Tout défaut

sur la sonde de mesure et tout couplage entre les deux antennes détériorent la précision.

2.4 État de l'art

Afin d'étendre les capacités d'une chambre donnée, une solution consiste à développer des algorithmes de correction en post-traitement. Ces algorithmes reposent généralement sur une des deux méthodes suivantes :

- **Fenêtrage temporel** : Si les perturbations proviennent de réflexions parasites, elles sont retardées par rapport au signal direct, un fenêtrage temporel peut donc les supprimer [2]. Cette technique, déjà utilisée par le CNES, ne s'applique toutefois qu'à des antennes suffisamment large-bande et ne traite que des perturbations ayant un retard de propagation significatif par rapport au trajet direct.
- **Déconvolution et débruitage** : Les signaux mesurés dans une chambre donnée correspondent au produit de convolution angulaire entre deux termes en présence d'un bruit additif. Le premier terme de la convolution est associé à la sonde et à l'environnement de mesure tandis que le deuxième correspond à l'antenne sous test. Une méthode de déconvolution peut donc permettre d'extraire la réponse de l'antenne seule, c'est-à-dire comme en espace libre.

La thèse proposée ici s'inscrit dans le cadre de la déconvolution et du débruitage. Dans la littérature, cette méthode passe généralement par des décompositions en ondes planes ou en ondes sphériques [3]-[5]. Ces solutions ne sont pas optimales car les défauts sont la plupart du temps localisés à la fois en termes de position et de direction. C'est par exemple le cas pour les réflexions parasites qui proviennent généralement d'une zone de taille limitée située dans une direction particulière par rapport à l'antenne sous test. Ondes planes et ondes sphériques ne possèdent pas cette caractéristique de localisation position-direction de propagation.

Une solution plus efficace serait d'utiliser des décompositions en ondes élémentaires qui ont cette propriété de double localisation. À un défaut correspondraient alors peu de ces ondes, ce qui accélérerait la correction et améliorerait la précision. De telles décompositions existent déjà. Elles ont été appliquées dans d'autres domaines de l'électromagnétisme. Elles sont issues de l'analyse temps-fréquence du traitement du signal.

Les décompositions de Gabor et plus généralement les décompositions en faisceaux gaussiens permettent d'exprimer un champ comme somme de faisceaux élémentaires [6]-[8]. Elles ont récemment été utilisées pour modéliser les systèmes quasi-optiques [9] et la propagation atmosphérique [10]. Leur intérêt réside dans l'existence de plusieurs formulations analytiques simples permettant de calculer le champ en tout point de l'espace.

L'autre méthode de décomposition est issue de l'analyse multi-résolution en ondelettes. Elle a récemment été utilisée pour modéliser la propagation atmosphérique [11], [12]. S'il n'existe pas de formulation analytique simple pour les ondes issues de cette décomposition, elle se caractérise par un temps de calcul très réduit et par sa capacité à compresser l'information liée aux éventuels défauts. Cette dernière solution semble plus prometteuse pour l'élimination de perturbations sur des mesures car elle associe une bonne localisation des perturbations tout en maintenant un temps de calcul faible. De plus, les ondelettes sont des outils de déconvolution et de débruitage utilisés dans de nombreux domaines de l'ingénierie et de la physique [13], [14].

La décomposition doit également être adaptée à la géométrie sphérique car les mesures d'antennes sont souvent réalisées dans ce type de système de coordonnées. Des travaux récents ont permis de développer des bases d'ondelettes spécifiquement en géométrie sphérique [15], [16]. Ces méthodes ont notamment été utilisées pour analyser en astronomie le fond diffus cosmologique [17].

2.5 Travaux récents réalisés par le CNES et l'ENAC

L'ENAC a une expérience significative sur les décompositions issues de l'analyse temps-fréquence du traitement du signal. Elle a en effet travaillé sur les faisceaux gaussiens pour diverses applications en antennes et propagation [8]-[10]. Elle a également utilisé les ondelettes dans un modèle de propagation [11], [12].

Des travaux récents ont aussi été réalisés par le CNES et/ou l'ENAC sur la thématique de la correction de mesure en post-traitement. Le CNES a dans un premier temps encadré deux stages de fin d'études sur des méthodes de correction basées sur des décompositions en ondes planes [18] et en harmoniques sphériques [19]. La méthode basée sur les harmoniques sphériques étant la plus prometteuse, un troisième stage et un projet étudiant ENAC y ont été consacrés en collaboration avec L'ENAC [20], [21].

D'autre part, dans le cadre d'une étude métier CNES débutée en juillet 2018, l'ENAC a appliqué pour le CNES plusieurs méthodes d'ondelettes au rayonnement d'antennes. Les résultats de cette étude confirment que les ondelettes pourraient constituer une des briques de base d'une nouvelle méthode de correction de mesure. Les bases d'ondelettes en géométrie sphérique semblent à ce sujet particulièrement prometteuses.

2.6 Objectifs

L'objectif de cette thèse sera de développer des méthodes de correction de mesures d'antennes basées sur les décompositions en ondelettes. Ces méthodes devront répondre à des impératifs de temps de calcul et de précision. Les deux configurations de mesure les plus classiques (base champ proche et base compacte) seront étudiées.

À l'issue de la thèse, les outils développés devraient permettre d'utiliser des moyens de mesure au-delà de leurs capacités fréquentielles et d'atteindre des précisions de résultats de mesure accrues. Leurs performances seront testées sur les moyens de mesures existants au CNES.

2.7 Organisation des Travaux

Le planning de cette thèse sera le suivant :

1. Étude de l'état de l'art

- (a) Mesures d'antennes
- (b) Méthodes classiques de correction
- (c) Décompositions en ondelettes

2. Programmation des méthodes classiques de correction

- (a) Sélection d'indicateurs de performances
- (b) Comparaisons des méthodes classiques pour les différents types de perturbations

3. Méthode de correction en ondelettes pour base compacte

- (a) Développement
- (b) Validations numériques
- (c) Validations expérimentales

4. Méthode de correction en ondelettes pour base champ proche

- (a) Développement

- (b) Validations numériques
- (c) Validations expérimentales

5. Rédaction du manuscrit et soutenance

2.8 Conditions pour candidater

Les candidats devront avoir un Master ou un diplôme d'ingénieur avec une spécialisation en électromagnétisme et antennes. Ils devront envoyer un CV et une lettre de motivation à alexandre.chabory@enac.fr avant le 15 février 2020.

2.9 Références

- [1] Séminaire COMET-CNES, “New Developments in Antenna Measurement”, jan. 2018.
- [2] Y.-T. HSIAO, Y.-Y. LIN, Y.-C. LU et H.-T. CHOU, “Applications of time-gating method to improve the measurement accuracy of antenna radiation inside an anechoic chamber”, in *Antennas and Propagation Society International Symposium*, 2003.
- [3] H. CUI, R. CALDEIRINHA et J. RICHTER, “A deconvolution method to remove distortion caused by antenna radiation pattern from measurement”, in *International Workshop on Antenna Technology*, 2010.
- [4] A. YAGHJIAN, “An overview of near-field antenna measurements”, *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, t. 34, n° 1, p. 30-45, 1986.
- [5] J. T. TOIVANEN, T. A. LAITINEN et P. VAINIKAINEN, “Modified test zone field compensation for small-antenna measurements”, *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, t. 58, n° 11, p. 3471-3479, 2010.
- [6] J. J. MACIEL et L. B. FELSEN, “Systematic study of fields due to extended apertures by Gaussian beam discretization”, *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, t. 37, n° 7, p. 884-892, 1989.
- [7] D. LUGARA, C. LETROU, A. SHLIVINSKI, E. HEYMAN et A. BOAG, “Frame-based Gaussian beam summation method : Theory and applications”, *Radio Science*, t. 38, n° 2, 2003.
- [8] A. CHABORY, J. SOKOLOFF et S. BOLIOLI, “Physically based expansion on conformal Gaussian beams for the radiation of curved aperture in dimension 2”, *IET Microwaves, Antennas & Propagation*, t. 2, n° 2, p. 152-157, 2008.
- [9] K. ELIS, A. CHABORY, J. SOKOLOFF et S. BOLIOLI, “A 2D Gaussian-beam based method for modeling the dichroic surfaces of quasi-optical systems”, *Journal of Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves*, t. 37, n° 8, p. 753-769, 2016.
- [10] C. A. L'HOUC, V. FABBRO, A. CHABORY et J. SOKOLOFF, “2D modeling of the atmospheric refraction based on Gaussian beams”, in *European Conference on Antennas and Propagation (EuCAP)*, Davos, Suisse, avr. 2016.
- [11] H. ZHOU, A. CHABORY et R. DOUVENOT, “A fast split-step wavelet algorithm for the simulation of long-range propagation”, *Submitted to the Journal of Computational Physics*, 2018.
- [12] H. ZHOU, “Modélisation de la propagation atmosphérique d'ondes électromagnétiques en 2D et 3D à partir de transformées de Fourier et en ondelettes”, thèse de doct., Université Paul Sabatier, 2018.

- [13] I. DAUBECHIES, *Ten lectures on wavelets*. Siam, 1992.
- [14] S. MALLAT, *A wavelet tour of signal processing*. Elsevier, 1999.
- [15] Y WIAUX, J. MCEWEN, P VANDERGHEYNST et O BLANC, “Exact reconstruction with directional wavelets on the sphere”, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, t. 388, n° 2, p. 770-788, 2008.
- [16] B. LEISTEDT, J. D. MCEWEN, P. VANDERGHEYNST et Y. WIAUX, “S2LET : A code to perform fast wavelet analysis on the sphere”, *Astronomy & Astrophysics*, t. 558, A128, 2013.
- [17] E MARTÍNEZ-GONZÁLEZ, J. E. GALLEGOS, F ARGÜESO, L CAYÓN et J. SANZ, “The performance of spherical wavelets to detect non-Gaussianity in the cosmic microwave background sky”, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, t. 336, n° 1, p. 22-32, 2002.
- [18] J. MILBRANDT, *Amélioration de la Précision de Mesure en Champ Lointain*, Rapport de stage ENAC, 2016.
- [19] A. MALCOK, *Méthode d’Amélioration de la Précision de Mesure d’Antennes*, Rapport de stage ENAC, 2017.
- [20] C. DIOP, *Méthodes d’Amélioration de la Précision de Mesures d’Antennes*, Rapport de stage ENSEEIHT, 2018.
- [21] A. BORNOT et A. CROSSETTO, *Correction de Mesures d’Antennes*, Rapport de Projet ENAC, 2019.