

Observatoire des Ondes, une réponse au débat sociétal *EMF observatory, an answer to the societal debate*

Philippe Pinel¹, Pascal Tajan², Yannick Poiré³, Lamine Ourak⁴

^{1,2,3,4} Exem SAS, ¹pinel@exem.fr, ²tajan@exem.fr, ³poire@exem.fr, ⁴ourak@exem.fr

Mots clés (key words) : sonde large bande, suivi de l'exposition, champ électrique, capteurs communicants (broadband probe, exposure monitoring, E-field, communicating sensors)

Résumé

Cet article a pour but de présenter le projet « Observatoire des Ondes » et sa solution technique. Le projet « OdO » vise la transparence de l'information du grand public. C'est un accompagnement du débat sociétal sur l'exposition aux champs électromagnétiques (radio, TV, téléphonie mobile 4G/5G...). Pour ce faire, la solution technique consiste à déployer sur le territoire des capteurs de champs électriques large bande (80 MHz – 6 GHz) afin de relever les niveaux d'exposition aux champs électromagnétiques.

Abstract

The purpose of this article is to present the « Observatoire des Ondes » project (EMF observatory project) and its technical solution. The « OdO » project aims at transparency and the access right to information of the general public. It is a support of the societal debate on exposure to electromagnetic fields (radio, TV, mobile broadcast...). To achieve this, the technical solution consists in deploying on overall territory broadband E-field probes (80 MHz – 6 GHz) in order to monitor levels of electromagnetic fields exposure.

1 Contexte du projet & Objectifs

Dans le contexte de transformation digitale très rapide de notre société, l'Observatoire des Ondes offre un outil impartial et fiable pour éclairer le débat sociétal qui oppose les enjeux de développement économique aux préoccupations environnementales et de santé publique. Il a pour vocation d'accompagner les collectivités pour leur permettre d'apporter des réponses aux questions du grand public sur leur exposition aux ondes électromagnétiques.

L'Observatoire des Ondes est un projet de R&D conçu et développé par Exem. Il est basé sur le déploiement d'un réseau de capteurs communicants qui rendent les données accessibles en temps réel. Ce projet s'intègre dans l'écosystème Smart City en proposant une solution innovante de consultation des niveaux de champs électromagnétiques dans les villes.

2 Vue d'ensemble du système

2.1 Méthodologie de déploiement :

Le déploiement de réseau est précédé par une étude de l'environnement électromagnétique afin de définir les sites et les adresses retenues pour l'implantation des capteurs. Un repérage préalable est réalisé grâce aux « street views » sur internet puis une validation sur place permet de confirmer la pertinence en termes d'accessibilité, de niveaux mesurés, de non-masquage par l'environnement.

Pour cette étude, plusieurs facteurs sont pris en compte : l'intérêt technique pour lequel nous étudions les spécificités du réseau radioélectrique (point d'exposition maximal, azimut de l'antenne...), l'intérêt démographique qui consiste à évaluer avec vous les lieux publics fréquentés par des populations sensibles (écoles, crèches, hôpitaux...) ou à fortes affluences et enfin l'intérêt symbolique que peuvent représenter les lieux représentatifs d'une ville.



Les capteurs sont placés entre 3.5m et 4.5m de hauteur et préférentiellement sur les candélabres. Cette hauteur correspond à un compromis entre : une limitation à leur accessibilité par le public, un éloignement des sources de perturbations proches (comme l'éclairage lui-même), une facilité d'installation et une hauteur toutefois limitée pour permettre une bonne représentativité de l'exposition au niveau du sol.

L'expertise préalable au déploiement dans un quartier est notamment nécessaire afin de vérifier la disponibilité et l'accès au mobilier urbain. Les mâts d'éclairage public représentent des postes idéaux car formant un maillage urbain propice. Cependant, certaines zones (notamment dans les centres villes ou dans des quartiers historiques) peuvent manquer de mobilier pour installer nos capteurs. Dans ce cas de figure, l'utilisation d'autres mobiliers comme les mâts de caméra ou les feux signalétiques peut être envisagée.

Le temps d'installation d'un capteur (première installation) varie en moyenne entre 10 et 30 minutes selon l'accessibilité du site. L'installation est faite par des techniciens spécialisés et selon le plan de déploiement convenu avec les autorités locales.

2.2 Infrastructure Sigfox globale :

La connectivité des capteurs est assurée par le réseau IoT de Sigfox. Les deux raisons principales de ce choix sont : la faible consommation énergétique et l'excellente couverture qu'offre le réseau (notamment en zone urbaine). La consultation des niveaux est faite sur une plateforme internet dédiée (www.observatoiredesondes.com).

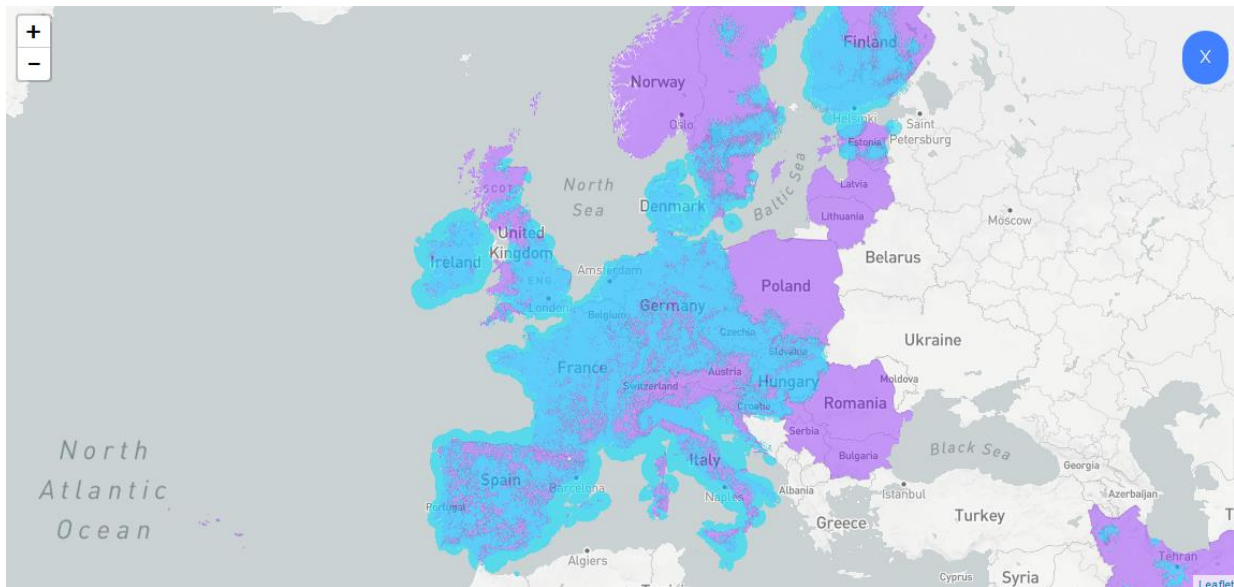


Figure 1 : Couverture Sigfox – Europe de l'ouest (source : <https://www.sigfox.com/en/coverage>)

Sur cette figure, nous pouvons constater la couverture en France en utilisant l'infrastructure Sigfox. Les zones urbanisées sont couvertes (couleur bleue). A l'usage, nous n'avons jamais eu de problématique de couverture même en plaçant nos capteurs en *indoor* et dans des situations très défavorables (sous-sol par exemple). Cependant, pour les usages à l'intérieur des bâtiments et en cas de mauvaise couverture, des solutions de routeurs spécifiques Sigfox permettent d'utiliser le réseau WiFi ou Ethernet pour assurer la connectivité des capteurs.

2.3 Présentation de résultats :

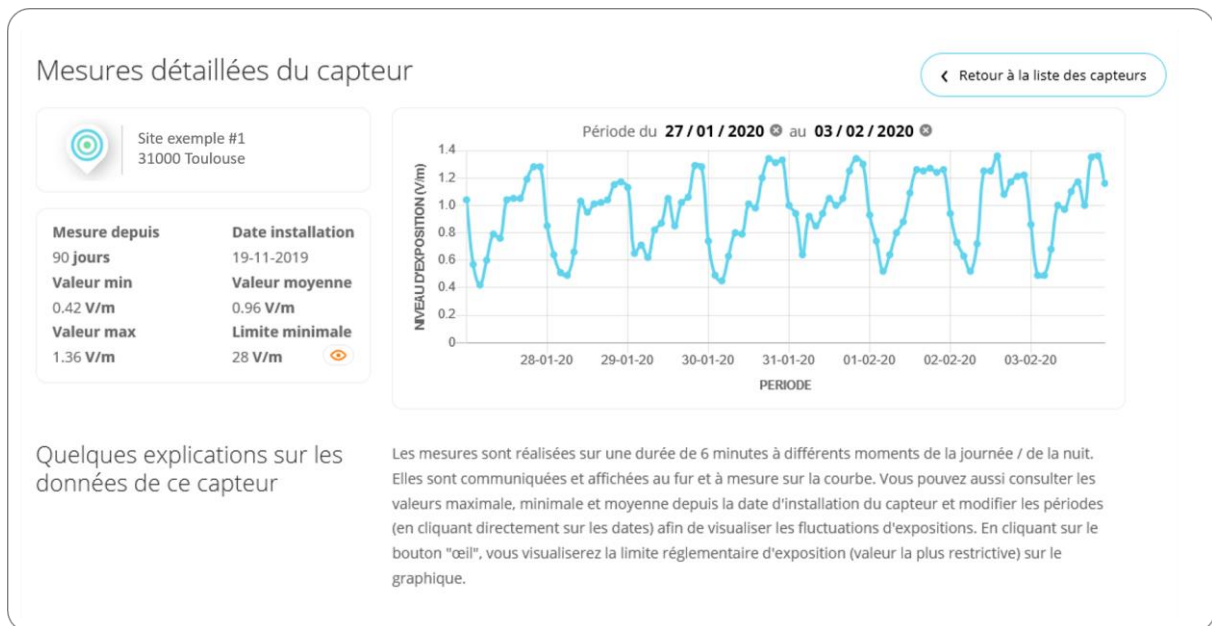


Figure 2 : Capture d'écran site internet de consultation des mesures (www.observatoiredesondes.com)

Sur la Figure 2, un exemple de mesures vous est présenté. Il s'agit d'un capteur placé à une hauteur de 3,7 m du sol sur une candélabre. Nous pouvons constater la répétabilité des cycles jour et nuit. Le niveau de champ électrique suit les activités humaines : les creux sont très généralement constatés entre 2h et 6h du matin, ce qui correspond à la plus faible période d'activité humaine.

3 Description du capteur

3.1 Caractéristiques

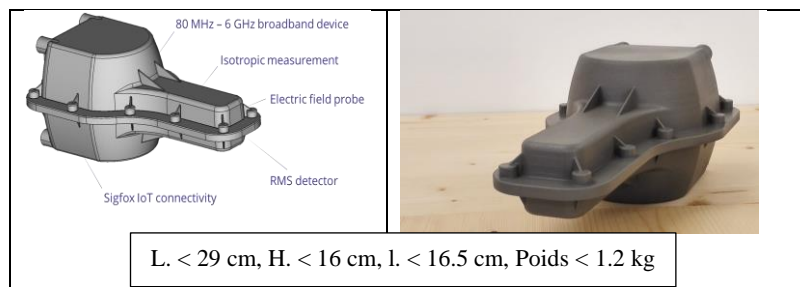


Figure 3 : Présentation des capteurs (CAO 3D à gauche, photo à droite)

Le capteur d'EXEM est composé de trois sondes basées sur une technologie de diode [1]. Chaque sonde mesure une composante spatiale du champ électrique (X, Y, Z). Les trois sondes sont reliées au système d'acquisition via des lignes hautes résistivités [2][3] (cf. Figure 7 : Chaîne analogique) permettant d'assurer une haute performance du système de mesures, une bonne immunité aux rayonnements électromagnétiques indésirables et de garantir une bonne platitude en fréquence sur toute la bande de fréquences (< 1.5 dB entre 900 MHz et 3 GHz ; < 3 dB en dessous de 900 MHz et au-dessus de 3 GHz) [4].

Une optimisation de la distance entre la carte d'acquisition et le trièdre de sonde permet au dispositif à la fois de ne pas mesurer l'activité propre de notre électronique et de garder une distance suffisante par rapport au mobilier urbain (pour être en environnement « libre »).

Les chaînes d'alimentations des sondes sont optimisées pour atteindre une autonomie minimale de 3 ans à l'aide de piles Lithium (pour 10 à 15 mesures par jour de 6 min chacune).

Avec l'aide de la société SAFT Batteries, selon leurs données [5] et leurs modèles de calculs, une étude spécifique a été réalisée afin de sélectionner les piles en prenant en compte un profil thermique spécifique « pire cas ». En effet, notre boîtier (IP66) pouvant être considéré comme « adiabatique », la température peut augmenter significativement en cas d'exposition au soleil.

3.2 Architecture et fonctionnement du capteur

Le système d'acquisition du capteur est équipé d'un module IoT assurant la communication des données de mesure via le réseau Sigfox. Le tout piloté par un microcontrôleur sur lequel s'articule les différentes fonctionnalités du capteur. Le microcontrôleur embarqué est chargé du pilotage du système de mesure tri-axe, du système de gestion de l'énergie, du module de mise en veille et de réveil du capteur, d'un capteur de température et d'humidité et finalement du module IoT Sigfox. L'architecture globale du capteur ainsi que celle de la chaîne analogique sont illustrées par les figures 6 et 7.

Le design et les dimensions du capteur sont présentées sur la Figure 3. La conception du dipôle et le choix de la diode permettent de mesurer le champ électrique entre 0,3 V/m et 61 V/m [6]. La sonde mesure le champ électrique dans la bande de fréquence comprise entre 80 MHz et 6 GHz.

L'algorithme de fonctionnement est le suivant (cf. Figure 4) :

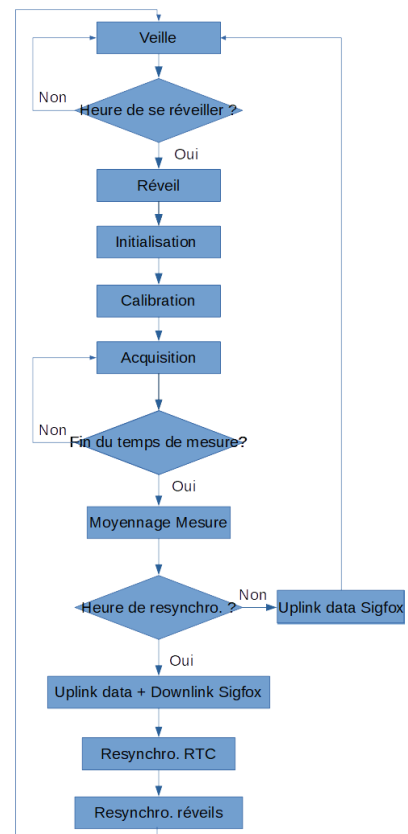


Figure 4 : Algorithme de fonctionnement

La mesure isotropique est réalisée par commutation du système d'acquisition sur les trois axes de la sonde. Le changement d'axe se fait en 100 ns via un multiplexeur après une acquisition de 120 ms. Ainsi, l'acquisition tri-axe est opérée en 360 ms (cf. Figure 5 : chronogramme de l'acquisition par axe).

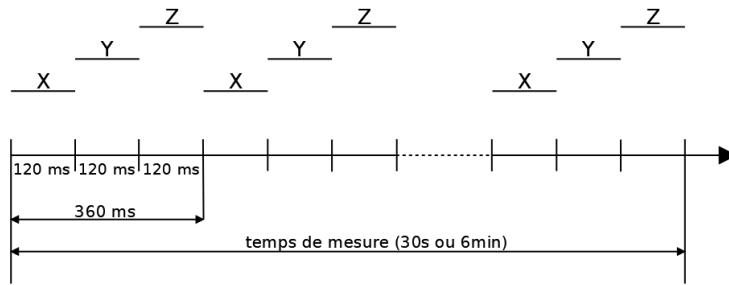


Figure 5 : chronogramme de l'acquisition par axe

Des algorithmes bas-niveau ont été développés afin d'assurer des phases de réveil de l'électronique pour l'instrumentation de la sonde et pour l'envoi des données collectées. Les heures de réveils peuvent être choisies ainsi que la durée de la mesure (30s ou 6 min).

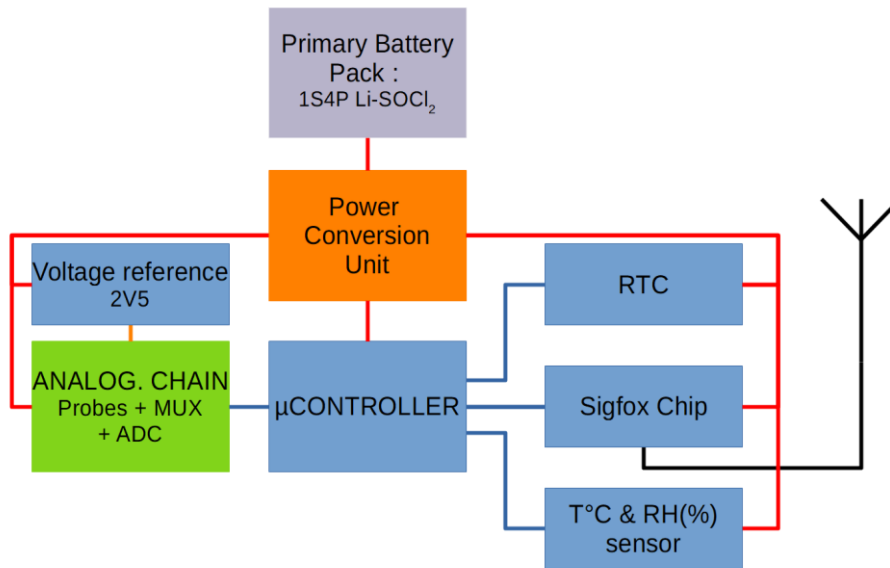


Figure 6 : Architecture du système

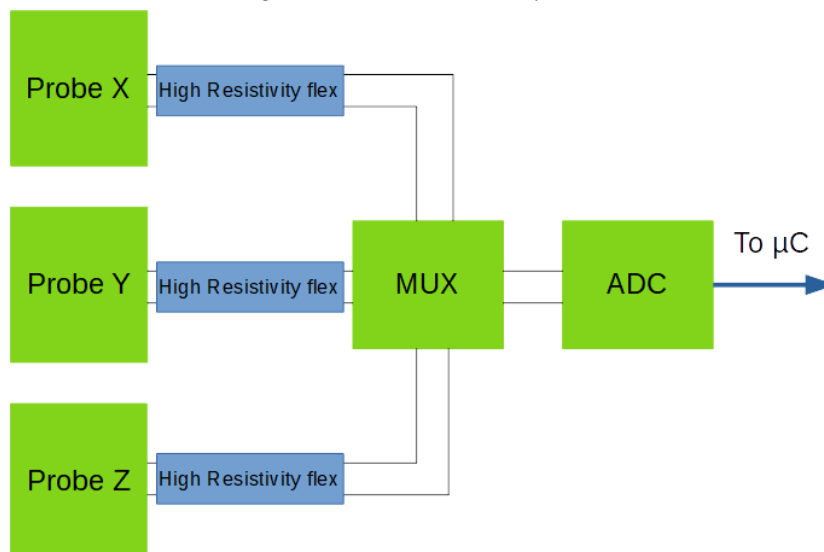


Figure 7 : Chaîne analogique

3.3 Méthodologie de calibration du capteur

- Réponse en tension selon le niveau de champ :

Le calibration de notre capteur est effectué en chambre anéchoïde, le setup est donné sur la Figure 8 [7]. L'antenne est de type cornet, alimentée par un amplificateur de puissance, lui-même relié à un synthétiseur de fréquence. Le capteur est positionné en zone de « champ lointain ». Une sonde de référence étalonnée par un laboratoire COFRAC est utilisée pour le réglage des puissances d'émission.

NB : Une antenne semi-log est utilisée pour les fréquences <500 MHz.

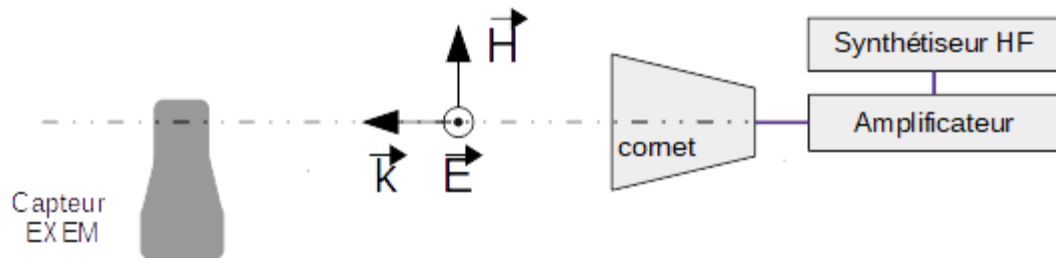


Figure 8 : Setup de calibration

Nous injectons à différentes fréquences représentatives de la bande mesurée (500 MHz, 1GHz et 3GHz) et en déduisons la réponse du capteur ; qui est la somme linéaire des tensions DC issues de chaque sonde ($\sum(\mu V) = X(\mu V) + Y(\mu V) + Z(\mu V)$) en fonction du champ.

Nous observons 2 zones, une première à faible champ, de type parabolique, et une seconde, à champ plus élevé, de type linéaire. Nous obtenons donc 2 coefficients, α_1 et α_2 . Le choix de ce dernier à appliquer pour le calcul de E se fait logiciellement, selon la somme en tension mesurée.

Afin d'obtenir des coefficients α_1 et α_2 applicables sur la totalité de la bande de fréquence, nous prenons une valeur moyenne des différents coefficients obtenus aux différentes fréquences.

La sensibilité du capteur est définie comme le niveau de champ E pour lequel la somme des tensions issues des sondes n'est plus distincte du bruit de la chaîne analogique du capteur. Nos mesures nous permettent d'avancer une sensibilité $s = 0.3V/m$.

Une réponse en fréquences des capteurs est réalisée à l'issue de ce calibration afin de s'assurer de leur bon fonctionnement et du respect des spécifications relatives à la platitude en fréquence.

- Linéarité :

La linéarité du capteur est mesurée en traçant sa réponse en champ par rapport au champ E de référence (cf. Figure 9). L'écart maximum toléré est de $\pm 1.5dB$ par rapport à la courbe de régression linéaire [4].

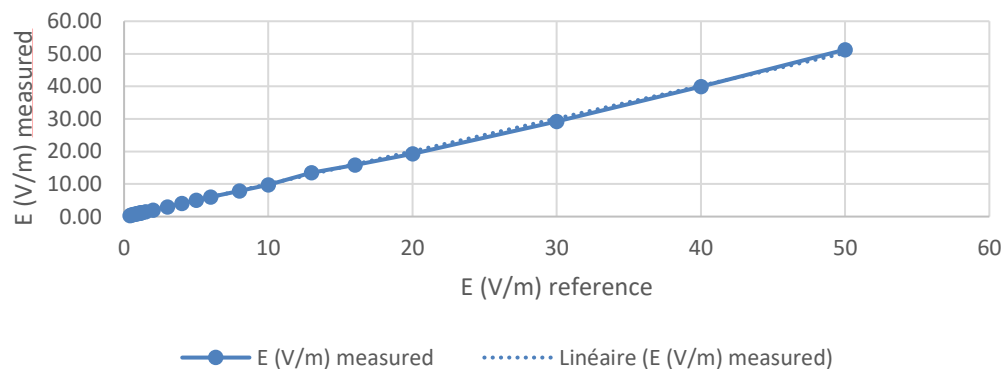


Figure 9 : Linéarité du capteur @1GHz

4 Conclusion et perspectives

L'Observatoire des Ondes est une solution complète pour la supervision de l'exposition électromagnétique. La plateforme de supervision permet de collecter en temps réel les données issues des capteurs de champ électrique déployés dans les villes.

L'Observatoire a pour vocation d'accompagner les collectivités pour leur permettre d'apporter des réponses aux questions du grand public sur leur exposition aux ondes électromagnétiques.

Nous avons présenté dans cette communication les capteurs que nous avons conçus et optimisés pour permettre un déploiement facile dans les villes (conception mécanique) tout en assurant une bonne qualité des mesures du champ électrique (conception de l'électronique). Le capteur permet de mesurer le champ électrique dans la bande 80 MHz – 6 GHz avec une platitude en fréquences comprise entre +/- 3 dB et une étendue dynamique de plus de 46 dB entre 0,3 V/m et 61 V/m.

L'optimisation de la consommation énergétique du capteur nous impose une quantité limitée des mesures sur 24h. Cependant, avec dizaine de mesures journalière, les variations des niveaux d'exposition sont bien représentées.

Des travaux de recherche sont menés actuellement par une équipe de Télécom Paris qui exploite les résultats des capteurs pour alimenter un algorithme d'intelligence artificiel basé sur les réseaux de neurones et qui a pour but la prédiction du champ électromagnétique dans les rues (pour une exposition représentative au niveau du sol) avec la prise en compte de la variation temporelle du champ électrique. Les premiers résultats de ce travail sont très encourageants et nous permettent d'envisager à l'avenir un système hybride pour la supervision de l'exposition aux champs électromagnétiques basés à la fois sur de la mesure et de la simulation.

Références bibliographiques

- [1] Howard I. Bassen, “*Electric field probes for cellular phone dosimetry*” in IEEE Proceedings 19th international conference, Oct. 30 – Nov. 2, 1997, Chicago USA.
- [2] Howard I. Bassen, Senior Member, IEEE, and Glenn S. Smith, Senior Member, IEEE, “*Electric field probes – A Review*”, IEEE Transactions on antennas and propagation, VOL.AP-31, No.5, September 1983.
- [3] T. E. Batchman and P. H. Howerton, “*Development of a three-axis microwave E-field probe having submillimeter dimensions*” presented at the Conf. on Precision Electromagnetic Meas., Gaithersburg, MD, June 23 - 27, 1986.
- [4] Norme NF EN 50492, Janvier 2009.
- [5] SAFT Lithium Batteries, “*Selector guide*”, Document N°54083-2-0219, Edition: February 2019
- [6] Décret n°2002-775 du 3 mai 2002 pris en application du 12° de l'article L. 32 du code des postes et télécommunications et relatif aux valeurs limites d'exposition du public aux champs électromagnétiques émis par les équipements utilisés dans les réseaux de télécommunication ou par les installations radioélectriques.
- [7] Zlatko Živković, Damir Senić, Antonio Šarolić, Ante Vučić, “*Design and Testing of a Diode-Based Electric Field Probe Prototype*”, January 2011