

Mesure des champs électromagnétiques et incertitude

Aujourd'hui, tout le monde possède son smartphone et souhaite pouvoir l'utiliser partout. Mais personne ne souhaite être exposé à des rayonnements trop importants. Pour contrôler les champs électromagnétiques, il est nécessaire de les mesurer, ce qui n'est pas aussi simple que l'on pourrait le penser. Une mesure sans indication d'incertitude n'est pas pertinente. Les recommandations de mesure de l'office fédéral de l'environnement (OFEV) et de METAS mentionnent une incertitude de 45 %. Pour le profane, ces incertitudes araisent énormes voire dépassées. Que signifie cette incertitude de mesure et comment la comprendre ?

FRÉDÉRIC PYTHOUD

Chaque installation d'une nouvelle antenne de téléphonie mobile fait l'objet d'une mise à l'enquête. Lors de l'une de ces mises à l'enquête sur la commune de Morat, les divergences entre opposants et l'opérateur de téléphonie mobile n'ont pas pu être aplanies. Cela a conduit le cas devant le Tribunal administratif, puis devant le Tribunal fédéral qui s'est prononcé dans un arrêt du septembre 2013 [1]. Dans cet arrêt, le Tribunal fédéral a statué, entre autres (point E 4.3), que compte tenu de l'évolution technique dans le secteur des télécommunications au cours des dix dernières années, il s'avère opportun de s'assurer que les recommandations sur les mesures pour les services de radiocommunication GSM [3]/ UMTS [4] qui datent de 2002 et 2003 correspondent encore à l'état actuel de la technique. A cette fin, il a exigé que l'on demande à l'Institut fédéral de métrologie (METAS) de rédiger un rapport officiel sur la question. Ce rapport [6] confirme que l'incertitude de mesure élargie qui est mentionnée dans ces recommandations de mesure, à savoir environ 40 %, est toujours actuelle.

L'incertitude de mesure : motivation

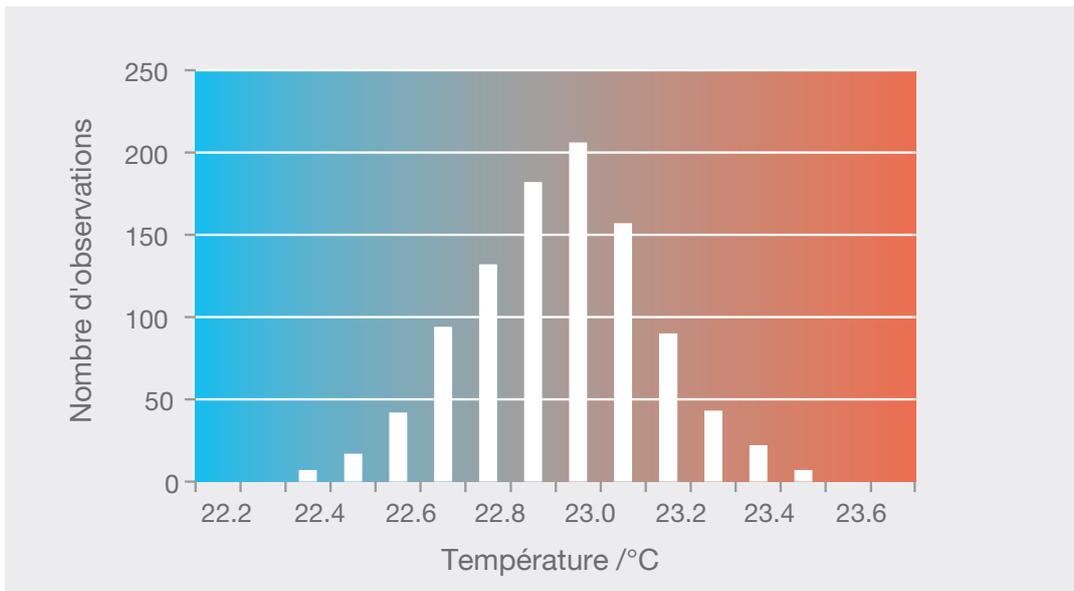
L'incertitude de mesure est un paramètre, associé au résultat d'une mesure, et qui donne une indication sur la qualité de la mesure. Plus l'incertitude est petite, plus la mesure est précise. Ce concept est l'un des éléments fondamentaux de la métrologie. Il est décrit dans une norme : le GUM (Guide to the expression of uncertainty in measurement) [7]. En l'absence d'une telle indication, les résultats de mesure ne peuvent pas être comparés, soit entre eux, soit par rapport à des valeurs de référence données dans une spécification ou une norme.



¹ Sans l'incertitude de mesure, les résultats de mesure ne peuvent pas être comparés, soit entre eux, soit par rapport à une valeur de référence. Pour garantir qu'une vis produite par un fabricant soit compatible avec l'écrou produit par un autre, il est important de respecter des tolérances en mesurant avec une incertitude de mesure qui ne doit pas être trop importante.

Concept d'incertitude de mesure

Quelle interprétation ou signification faut-il donner à cette incertitude ? L'incertitude, selon le GUM, caractérise la dispersion des valeurs qui pourraient raisonnablement être attribuées au mesurande (terme qui désigne la grandeur particulière que l'on mesure). Cette définition implique la réalisation de plusieurs mesures et l'évaluation de la distribution des valeurs en résultant. Si l'on n'effectue qu'une seule mesure, on doit faire une estimation de la distribution que l'on obtiendrait en faisant plusieurs mesures ; il faut donc aussi faire des « mesures mentales ». L'incertitude de mesure est donc très étroitement liée à l'analyse statistique, plus précisément à la distribution statistique des valeurs mesurées. On admet également, dans cette approche, que l'on ne mesure jamais exactement deux fois la même valeur : soit que la grandeur mesurée (l'objet mesuré) a changé, soit que l'instrument de mesure s'est très légèrement modifié, soit que les grandeurs d'influence extérieures (températures, vibrations, ...) se sont modifiées et ont influencé la mesure. Remarquons que l'on peut avoir l'impression, en utilisant des appareils digitaux, que l'on obtient toujours la même valeur. Dans ce cas, on peut s'imaginer ce qui se passerait si l'appareil avait une résolution supérieure.



2 La figure ci-dessus représente par exemple l'histogramme des mesures effectuées sur une heure dans une pièce.

Exemples

Imaginons qu'un laboratoire d'étalonnage ait mesuré une masse de 200 g. Il obtient comme résultat une valeur de 200.0021 g, avec une incertitude standard de 0.7 mg, valeur obtenue en caractérisant et en additionnant selon le GUM [7] chacune des contributions à l'incertitude. Si l'on fait l'hypothèse d'une distribution normale pour l'incertitude, l'intervalle (200,0021 ± 0,0007) g caractérise un intervalle dans lequel environ 68 % des valeurs mesurées se trouvent. Comme cette probabilité de confiance est souvent jugée insuffisante, on utilise fréquemment l'incertitude élargie avec un facteur 2, dans notre exemple 1.4 mg. L'intervalle (200,0021 ± 0,0014) g caractérise ainsi un intervalle de confiance d'environ 95 %.

On comprend que l'incertitude de mesure dépend non seulement de la méthode de mesure, de la qualité des appareils utilisés, mais également de la grandeur que l'on mesure. Prenons l'exemple d'un mètre-étalon en platine et iridium : il est aisément concevable que l'on puisse caractériser sa longueur à température donnée (20°C) avec une précision de l'ordre de grandeur de quelques dizaines de nanomètres. Par contre, il n'est pas possible de caractériser avec une telle précision, la longueur d'une table de bureau, la largeur d'une porte, et ceci bien que l'on dispose d'instruments très précis.

Le tableau suivant donne quelques ordres de grandeur des meilleures incertitudes avec lesquelles nous sommes capables de mesurer aujourd'hui. La réponse dépend du domaine et de la grandeur mesurée.

Domaine	Grandeur	Meilleure incertitude
Temps	Intervalle de temps ou fréquence	1/10 ¹⁵
Electricité	Tension électrique DC	1/10 ¹⁰
Longueur	Longueur d'un corps matérialisé	1/10 ⁸
Masse	Masse d'une copie du kilogramme	1/10 ⁸

Il est intéressant de constater que la grandeur que l'on peut mesurer avec la plus grande précision est le temps, c'est-à-dire l'une des grandeurs ci-dessus les moins palpables. Chacun peut quotidiennement faire l'expérience de la longueur ou de la masse, toucher physiquement un objet, le soulever pour estimer son poids. Que dire du temps, où chaque intervalle est unique ? A peine passé qu'il n'est déjà plus là !

METAS, en tant que laboratoire national de métrologie, dispose des laboratoires, des instruments, et du personnel qualifié qui permettent d'atteindre ces incertitudes. Cependant les précisions mentionnées ci-dessus ne sont atteintes que dans des conditions très particulières. En général, lors d'étalonnages réalisés pour nos clients, les incertitudes sont supérieures. Elles dépendent en grande partie des plages de mesure ainsi que des appareils / étalons à étalonner.



3 Deux phénomènes différents: à gauche les vagues provoquées par une goutte d'eau, à droite une surface d'eau agitée par le vent, où les ondes provenant de différentes directions interfèrent.

La nature ondulatoire des ondes électromagnétiques

Les champs électromagnétiques sont produits par des courants électriques. Ils sont utilisés par exemple pour la transmission des informations (téléphonie mobile, radio). Ils ont la propriété de se propager sous forme d'ondes, un peu comme on peut les observer à la surface d'une étendue d'eau. Ces ondes peuvent être très « régulières » comme dans l'exemple de gauche (photo ci-dessus), ou alors être un peu plus irrégulières comme dans l'exemple de droite.

Dans l'image de gauche, au centre, on distingue très facilement la source des ondes : les ondes ont été produites par l'impact d'une goutte d'eau à la surface. Dans l'image de droite au contraire, on ne distingue pas la source des ondes : certainement le vent qui agite la surface de l'eau. Les ondes créées se réfléchissent dans la périphérie de la surface d'eau et reviennent en arrière pour se mélanger aux ondes incidentes : cela se nomme interférences.

Le rayonnement non-ionisant des installations de téléphonie mobile qui pénètre dans un bâtiment depuis l'extérieur n'est généralement pas réparti uniformément dans les locaux. Cela est dû à différents phénomènes physiques, comme par exemple la réflexion du rayonnement, les interférences, l'absorption différente par les murs et les fenêtres et la propagation du rayonnement dans la pièce, la réflexion des ondes contre le mobilier. L'image de droite donne donc une bonne illustration de la structure du champ que l'on pourrait mesurer dans une pièce exposée au rayonnement d'une antenne de téléphonie mobile. De plus, la pratique montre que l'intensité des ondes est en principe plus grande devant les fenêtres qu'au fond de la pièce.

« Il n'est pour l'instant pas possible de mesurer le champ électrique à distance. »

Mesure du champ par immersion

Les champs électromagnétiques pourraient être définis comme une propriété de l'espace : la propriété d'exercer des forces mécaniques sur des charges électriques. Ainsi, lorsque l'on place une antenne dans un champ électromagnétique, les charges électriques du métal de l'antenne se mettent en mouvement sous l'influence du champ et produisent ainsi une tension électrique que l'on peut mesurer. Le principe de cette mesure a déjà été présenté dans un numéro précédent [8] [9]. Ce qu'il est important de comprendre, c'est que pour mesurer l'intensité du champ électrique en un endroit donné, il n'existe pour l'instant aucune autre solution que de placer en cet endroit un senseur (antenne, sonde) qui permet de constater l'effet du champ sur des charges électriques. Autrement dit, il n'est pour l'instant pas possible de mesurer le champ électrique à distance, comme on pourrait estimer la longueur d'un bâtiment en étant situé à plusieurs centaines de mètres, par exemple en utilisant une lunette optique ou un laser.



4 Lorsque l'on veut mesurer un champ en un point donné, il n'existe pour l'instant aucune autre solution que de placer en ce point un senseur. On y distingue une sonde de champ placée sur un trépied. Ainsi, mesurer le champ électromagnétique, c'est un peu comme mesurer l'amplitude d'une vague en plaçant un petit flotteur à la surface de l'eau et en quantifiant l'amplitude de son mouvement d'oscillation.

Les recommandations de mesure

A ce jour, des recommandations et des rapports techniques sur les mesures relatives aux stations de base pour la téléphonie mobile GSM (Global System for Mobile Communications, téléphonie mobile de 2^{ème} génération) [3], UMTS (Universal Mobile Telecommunications System, téléphonie mobile de 3^{ème} génération) [4] et LTE (Long Term Evolution, téléphonie mobile de 4^{ème} génération) [5] ont été publiés. Ces recommandations et ces rapports décrivent la procédure et les exigences à respecter pour les mesures de réception des stations de base pour téléphonie mobile. On contrôle si une station de base pour téléphonie mobile respecte la valeur limite de l'installation sur les lieux à utilisation sensible (ci-après LUS) fixée dans l'ordonnance sur la protection contre le rayonnement non ionisant (ORNI) [2]. Les LUS désignent principalement des locaux dans lesquels des gens séjournent de façon prolongée.

Pour les mesures de réception d'une station de base pour la téléphonie mobile, on considère comme valeur d'appréciation, selon les recommandations sur les mesures, l'intensité maximale du champ électromagnétique. Cette intensité maximale est définie comme l'intensité du rayonnement non-ionisant que l'on mesurerait en tant que maximum local si l'installation était exploitée dans le mode d'exploitation déterminant. Selon l'annexe 1, ch. 63 ORNI [2], on entend par mode d'exploitation déterminant le mode d'exploitation dans lequel un maximum de conversations et de données est transféré, l'émetteur étant au maximum de sa puissance. En effet, lorsqu'un nombre restreint d'utilisateurs utilisent l'antenne de téléphonie mobile, la puissance d'émission de l'antenne s'adapte en proportion.

La pratique

Avec une mesure de réception, on enregistre la valeur du maximum local du rayonnement non ionisant sur un LUS, afin d'intégrer aussi dans l'évaluation le lieu le plus fortement exposé. Pour éviter de mesurer la fluctuation du champ due à l'adaptation de la puissance de l'émetteur au nombre d'utilisateurs, on ne mesure pas tout le champ produit par l'antenne, mais seulement le champ produit par l'un des canaux de contrôle dont l'intensité ne dépend pas du nombre d'utilisateurs. Ce principe est resté inchangé depuis la publication des recommandations sur les mesures. Ensuite, la valeur de champ du canal mesuré est extrapolée, par calcul, de façon à prédire le champ que l'on mesurerait si l'installation était exploitée à sa puissance maximale. Les recommandations sur les mesures décrivent aussi les formules pour l'extrapolation des valeurs mesurées.

Pour la détermination expérimentale directe de la valeur maximale locale du rayonnement non-ionisant sur un lieu donné, on utilise la méthode dite „méthode par balayage“. Elle consiste à balayer le LUS avec une antenne de mesure, selon le principe d'immersion qui a été présenté plus haut. Le but est de « sonder » expérimentalement l'espace du LUS. Selon le type d'antenne de mesure, il est important de faire varier simultanément, son orientation et sa polarisation. Grâce à sa grande praticabilité, cette méthode s'est très bien établie. Elle permet de mesurer efficacement et simplement le rayonnement non ionisant dans les locaux. Finalement les valeurs expérimentales obtenues sont extrapolées selon l'ORNI [2] à la puissance émettrice maximale de la station de base pour téléphonie mobile.



5 Mesurer le champ dans un LUS, c'est un peu comme de déterminer, par sondage, l'amplitude des vagues dans un port (ici Morat) et de ne retenir que l'amplitude maximale.

L'incertitude de mesure

L'incertitude de mesure inhérente à la mesure des stations de base pour téléphonie mobile selon la recommandation sur les mesures de l'OFEV/METAS comprend deux contributions: l'incertitude de l'équipement de mesure et l'incertitude de la prise d'échantillon.

Sur la base de l'expérience acquise, il est établi que l'incertitude standard de l'équipement de mesure varie entre 10 % et 16 %. Elle englobe les sources d'incertitude suivantes: antenne de mesure/sonde, câble de connexion, linéarité et l'appareil de mesure lui-même. L'incertitude de mesure provient principalement de l'antenne de mesure/sonde; ses autres composantes, comme celle de l'appareil de mesure, sont toutes plus petites et n'ont qu'une influence minimale sur l'incertitude globale. Chaque laboratoire de mesure doit déterminer cette incertitude de l'équipement de mesure sur la base des spécifications et des données d'étalonnage de l'équipement utilisé, et la consigner dans le rapport de mesure.

L'incertitude de la prise d'échantillon est liée à la nature des champs électromagnétiques et à la manière de procéder légèrement différente des mesureurs qui balayent le local, ce qui provoque une dispersion des résultats de mesure même avec un équipement de mesure et un étalonnage identiques. L'incertitude standard de la prise d'échantillon pour la mesure du rayonnement GSM a été déterminée de façon expérimentale en 2002 dans une vaste intercomparaison [10]. Elle est d'environ 15 %. Cette valeur a été confirmée dans d'autres inter-comparaisons réalisées pour UMTS (2006) [11], pour le rayonnement de la radiodiffusion (2007) [12] et récemment aussi pour LTE (2013,

rapport en cours d'élaboration). Selon la recommandation sur les mesures, elle doit être utilisée comme composante fixe de 15 % dans la détermination de l'incertitude standard combinée. A partir de ces deux contributions à l'incertitude standard de l'équipement et de la prise d'échantillon, on obtient selon les règles de l'addition quadratique une incertitude standard combinée située typiquement entre 18 % et 22 %. L'incertitude élargie est alors typiquement comprise entre 36 % et 44 %. Cela ne signifie pas qu'un résultat de mesure dévie autant de la vraie valeur dans chaque situation. Dans un cas concret, on ne peut en principe pas indiquer l'écart exact. Les petits écarts sont fréquents, les grands écarts sont plus rares. L'incertitude élargie admise selon les recommandations est de 45 %.

« C'est un peu comme de déterminer, par sondage, l'amplitude des vagues dans un port. » »

Discussion

Cet article met en lumière les raisons pour lesquelles la mesure des champs électromagnétiques émis par les stations de base de téléphonie mobile se fait avec des incertitudes de plusieurs dizaines de pourcents. L'évolution des appareils de mesure se caractérise principalement par le fait qu'ils sont au niveau des nouvelles technologies dans le domaine de la téléphonie mobile et des modulations correspondantes (GSM, UMTS et LTE) et qu'ils doivent être en mesure de décoder le signal souhaité parmi une quantité de signaux. Par contre, le principe de mesure par balayage de l'espace (ou sondage de l'espace) reste pour l'instant une méthode très efficace pour saisir la complexité de la structure du champ électromagnétique et le quantifier.

Die Messunsicherheit beim Messen der Strahlung von Mobilfunk-Basisstationen (Amtsbericht)

Dieser Bericht ist in den Amtssprachen allgemein zugänglich auf www.metas.ch/nisv.

L'incertitude de mesure inhérente à la mesure du rayonnement de stations de base pour téléphonie mobile (Rapport officiel)

Ce rapport est publié dans les trois langues officielles sur www.metas.ch/nisv.

L'incertezza di misura della radiazione delle stazioni di base di telefonia mobile (rapporto ufficiale)

Questo rapporto ufficiale è accessibile a tutti in tutte le lingue ufficiali su www.metas.ch/nisv.

Références

- [1] Tribunal fédéral: Arrêt 1C_661/2012 du 5 septembre 2013.
- [2] Ordonnance du 23 décembre 1999: Ordonnance sur la protection contre le rayonnement non ionisant (ORNI ; RS 814.701).
- [3] OFEV/METAS 2002: Stations de base de téléphonie mobile (GSM) –Recommandation sur les mesures (VU-5800-D) Office fédéral de l'environnement, des forêts et du paysage Berne. www.bafu.admin.ch/publikation/publikation/00685/index.html?lang=fr
- [4] OFEV/METAS 2003: Stations de base pour téléphonie mobile (UMTS-FDD) – Recommandation sur les mesures, projet. www.bafu.admin.ch/elektrosmog/01100/01108/01110/index.html?lang=fr
- [5] METAS 2012: Technical report: Measurement Method for LTE Base Stations. Version allemande 2014 www.metas.ch/2012-218-808
- [6] METAS 2013: L'incertitude de mesure inhérente à la mesure du rayonnement de stations de base pour téléphonie mobile (Rapport officiel). www.metas.ch/nisv
- [7] JCGM 100:2008 : Évaluation des données de mesure – Guide pour l'expression de l'incertitude de mesure (Evaluation of measurement data – Guide to the expression of uncertainty in measurement). <http://www.bipm.org/fr/publications/guides/gum.html>
- [8] METAS 2005 : Invisibles et pourtant on les mesure. MetInfo Vol. 12 No. 1/2005.
- [9] METAS 2009 : L'homme et les champs électromagnétiques. METinfo Vol. 16 No. 1/2009
- [10] METAS 2002: Nichtionisierende Strahlung: Vergleichsmessungen an Mobilfunk-Basisstationen. www.metas.ch/nisv
- [11] METAS 2006: UMTS Vergleichsmessungen, Sommer 2006. www.metas.ch/nisv
- [12] METAS 2007: An Inter-laboratory Comparison, Autumn 2007. www.metas.ch/nisv



Dr Frédéric Pythoud, Chef du laboratoire CEM
E-Mail: frederic.pythoud@metas.ch
Telefon: +41 58 387 03 35

Messung elektromagnetischer Felder und Messunsicherheit

Das von der Antenne einer Mobilfunk-Basisstation ausgehende elektromagnetische Feld zu messen ist nicht vergleichbar etwa mit der Messung der Dimensionen eines Gegenstands. Elektromagnetische Felder breiten sich wellenförmig aus. Wenn es zu Reflexionen kommt, treten Interferenzen auf und die Feldstärke wird damit stark ortsabhängig. Für eine Bestimmung der Feldstärke wird in der Praxis der Feldverlauf im betrachteten Volumen mit der sogenannten Schwenkmethode möglichst vollständig abgetastet. Die vom Bundesamt für Umwelt (BAFU) und vom METAS ausgearbeiteten Messempfehlungen beschreiben diese Methode sowie die Berechnungen, die notwendig sind, um aus der gemessenen Feldstärke die Strahlung von Mobilfunk-Basisstationen zuverlässig zu bestimmen.

Die Messunsicherheit bei dieser Art der Messung bewegt sich üblicherweise im Bereich zwischen 36% und 44% (erweiterte Messunsicherheit). Dabei trägt die Messeinrichtung zu einem geringen Teil zur Gesamtunsicherheit bei. Die neuesten Messgeräte halten mit den neuen Mobilfunktechnologien und den entsprechenden Modulationen (GSM, UMTS, und LTE) Schritt und sind in der Lage, das gewünschte Signal aus einer Vielzahl von Signalen zu entschlüsseln. Der Hauptteil der Messunsicherheit ist durch die Natur der elektromagnetischen Strahlung, insbesondere durch die starke Ortsabhängigkeit der Feldstärke, bestimmt. Die eingesetzte Messmethode der selektiven Abtastung (Schwenkmethode) hat sich wegen ihrer guten Praxistauglichkeit sehr gut etabliert. Sie erlaubt rasche und unkomplizierte Messungen der nichtionisierenden Strahlung.

Misurazione del campo elettromagnetico e incertezza

Misurare il campo elettromagnetico prodotto da un'antenna di base di telefonia mobile non è lo stesso che misurare la dimensione di un oggetto. Il campo elettromagnetico è di natura ondulatoria. In caso di riflessioni, appaiono fenomeni d'interferenza e il campo dipende fortemente dalla posizione. Per la misura del profilo di campo in un volume dato, viene applicato il cosiddetto metodo di scansione. Le Raccomandazioni di misurazione dell'Ufficio federale dell'ambiente (UFAM) e del METAS descrivono questo metodo, così come i calcoli che devono essere applicati per la determinazione del campo elettromagnetico prodotto dalle stazioni di base di telefonia mobile.

L'incertezza tipo del dispositivo di misurazione si situa nell'intervallo compreso tra il 36% e il 44% (incertezza estesa). In tal modo, gli strumenti di misura contribuiscono solo a una piccola parte dell'incertezza totale. L'evoluzione degli apparecchi di misura è caratterizzata principalmente dal fatto che tengono il passo con le nuove tecnologie di telefonia mobile e le corrispondenti modulazioni (GSM, UMTS e LTE), e che devono essere in grado di poter decodificare il segnale desiderato da una molteplicità di segnali. La maggior parte dell'incertezza è dovuta alla natura del campo elettromagnetico, particolarmente alla forte dipendenza spaziale. Tra i metodi di misurazione, il metodo conserviero applicato è stato dimostrato per la sua buona praticità. Esso permette misure efficaci e rapide delle radiazioni non-ionizzanti.

Measurement of electromagnetic fields and uncertainty

Measuring the electromagnetic field generated by the antenna of a base station for mobile telephony is not quite like measuring the dimensions of an object. The electromagnetic field is of an undulatory nature. When reflections are present, interference phenomena appear and the field strength strongly depends on the location. For the measurement of the field profile in a given volume, the so called scanning method is applied. The measurement recommendations of the Federal Office for the Environment (FOEN) and METAS describe this method, as well as the calculations that have to be applied for the reliable determination of the electromagnetic field produced by mobile communication base stations.

The uncertainty of this type of measurement is generally in the order of 36% to 44% (expanded uncertainty). Thereby, the measuring instruments only contribute to a small part to the total uncertainty. The newest instruments are up to date regarding the new technologies and mobile telephony modulations (GSM, UMTS and LTE), and they are capable to decode the required signal from a variety of other signals. The main part of the uncertainty is due to the nature of the electromagnetic field, especially to the strong spatial dependence. Among the measurement methods, the applied scanning method has been proven for its good practicality. It allows efficient and rapid measurements of the non-ionizing radiation.