

DES EXPERIENCES D'HEINRICH HERTZ A LA CEM D'AUJOURD'HUI

B. Demoulin

Université Lille1 – groupe TELICE de l'IEMN, Bât. P3 - 59650 Villeneuve d'Ascq.
Bernard.Demoulin@univ-lille1.fr

Résumé. La communication trace un bref historique de l'évolution de la compatibilité électromagnétique (CEM). Après un exposé introductif relatant une certaine analogie entre la CEM et les expériences réalisées par Heinrich Hertz à la fin du XIX^{ème} siècle sur les ondes électriques, on aborde la diaphonie puis le contexte des interférences large bande dues aux parasites d'allumage des moteurs thermiques. Les études sur l'irradiation de l'impulsion électromagnétique nucléaire seront évoquées ainsi que l'émission d'interférences dans le domaine micro ondes.

INTRODUCTION

L'usage du terme Compatibilité Electromagnétique qui n'est autre que la traduction de l'expression anglophone Electromagnetic Compatibility (EMC) date probablement du début des années soixante. Effectivement, c'est dans cette période qu'est fondée aux Etats-Unis l'EMC Society dont l'une des préoccupations majeures sera l'analyse approfondie des interférences électromagnétiques. Cette époque coïncide également avec les premières éditions de la revue IEEE Transactions on EMC. Toutefois, nous devons nous souvenir que durant les décennies précédant cette période, les pionniers de la radioélectricité et des télécommunications furent les premiers confrontés à ces phénomènes physiques qu'on appelait « parasites » et contre lesquels il fallait trouver des moyens de protection et imaginer un cadre législatif. L'invention des récepteurs superhétérodynes témoigne tout à fait bien la démarche adoptée au tout début de la TSF (Télégraphie Sans Fils) pour réduire l'impact des interférences. Sur le plan légal, la mise en place d'institutions internationales parmi lesquelles figure le Comité International Spécial des Perturbations Radioélectriques (CISPR) fondé en 1934 reflète également la volonté de proposer des techniques d'investigations des troubles électromagnétiques. Puis, progressivement et en concordance avec les utilisateurs de plus en plus nombreux de l'espace radioélectrique, des normes furent édifiées afin de réduire autant que possible les effets indésirables de ces pollutions invisibles, mais combien redoutables pour qui souhaitait se divertir à l'écoute de la radio ou communiquer par le téléphone.

Ce contexte historique a donc incité l'auteur à consulter l'ouvrage sur les ondes électriques qu'Heinrich Hertz publia en 1888 et qui fut traduit en anglais vers 1893. Dans ce livre le physicien allemand décrit avec grande précision le déroulement des expériences qu'il avait entreprises. La lecture de ce cahier d'expériences prouve que son auteur fut le précurseur de la démarche

qu'adoptent la plupart des ingénieurs CEM actuels confrontés à une tâche d'expertise. Il était donc tout à fait naturel de consacrer le premier paragraphe de notre texte à un descriptif allégé du travail accompli par Hertz, 122 ans plus tôt. [1]

Les domaines concernés aujourd'hui par la CEM sont très étendus. L'impact de la foudre sur les grands réseaux électriques fait toujours l'objet d'études attentives. L'effet des interférences induites sur les composants électroniques actifs mobilise également de gros efforts, pour comprendre la physique de ces phénomènes et intégrer ces mécanismes non linéaires en simulation théorique. Les interférences produites par la commutation toujours plus rapide des composants d'électronique de puissance accaparent de plus en plus les concepteurs et utilisateurs de convertisseurs d'énergie électrique. Dans un tout autre domaine les questions grandissantes sur les liens présumés des ondes électromagnétiques avec les fonctions biologiques ouvrent de nouvelles voies de recherche. L'entrée massive des circuits électroniques sur les véhicules de tout type constitue également un champ d'action extrêmement vaste à qui souhaite garantir la fiabilité et la sécurité des transports modernes évoluant dans une pollution électromagnétique croissante.

Il était donc illusoire de traiter dans l'espace restreint de cette communication l'ensemble du domaine, ces raisons expliquent que le texte est uniquement réduit aux aspects électromagnétiques. Ce choix était naturellement guidé par le contexte historique rappelé dans le premier paragraphe mais aussi par les thèmes de prédilection de l'auteur.

Bien que réduit, cet espace demandait encore un effort de sélection des sujets abordés. C'est ainsi qu'on trouvera dans l'ordre d'apparition, un bref état de l'art des études sur la diaphonie initiées vers les années trente dans les travaux de Sergei Alexander Schelkunof et poursuivies ensuite. A ce second paragraphe succède un survol des interférences à large spectre de fréquence et plus spécialement les parasites produits par l'allumage des moteurs thermiques, et à une échelle toute autre, les effets destructeurs de l'impulsion électromagnétique nucléaire (IEMN). Le quatrième paragraphe regardera l'évolution de l'approche CEM face à l'émergence des perturbations produites par les sources micro ondes.

Bien qu'il existe d'excellents ouvrages rédigés en langue française sur la CEM. La sélection des références

produites en fin de texte ne concernera que les articles des revues scientifiques anglophones. Ce choix n'est évidemment pas étranger à la préférence accordée par les organismes d'état chargés d'évaluer la recherche.

I. LES EXPERIENCES D'HEINRICH HERTZ

I.1. Naissance des oscillations hautes fréquences

Après la soutenance d'un Doctorat très théorique consacré au calcul des courants induits sur une sphère métallique, le Docteur Heinrich Hertz occupe un poste de chargé de cours à l'Université de Karlsruhe. C'est dans un but purement didactique qu'il met au point un dispositif générateur de courants transitoires composé d'une source de tension continue, d'une inductance et d'un interrupteur rapide. Le but est de produire une surtension aux bornes de l'inductance lors de l'ouverture du circuit préalablement parcouru par un courant continu. Pour localiser l'impulsion transitoire, Hertz installe aux bornes de l'inductance deux électrodes entre lesquelles un arc électrique prend naissance lors de l'apparition de la surtension. L'arc électrique constituait alors un détecteur indiquant aux étudiants le synchronisme avec l'induction produite dans un circuit similaire secondaire couplé au précédent. Par curiosité, Hertz mis en contact avec les bornes de l'inductance primaire un circuit formé d'une boucle de quelques mètres de longueur, il constatait que l'arc devenait plus lumineux et que le phénomène observé semblait plus étalé dans le temps. Intrigué par le résultat, il interrompt la boucle dans sa partie médiane et redresse les conducteurs pour former deux brins symétriques rectilignes dont l'une des extrémités reste connectée à l'une des bornes de l'inductance. La luminosité de l'arc est encore amplifiée et la durée du phénomène également accrue. Hertz procède alors au calcul très approximatif de l'inductance et de la capacité de ces conducteurs pour conclure que leur fréquence de résonance propre se situe très au-dessus des oscillations électriques produites à l'époque dans la plupart des laboratoires de physique. Il faut préciser que dans sa version définitive, le dipôle de Hertz ainsi constitué atteint une envergure proche de 3 mètres. Il en résultait que les oscillations quasi entretenues par l'arc électrique devaient probablement se situer vers 50 Mégacycles par seconde.

I.2. La mesure du champ électromagnétique

Devant le succès de cette expérience, Heinrich Hertz chercha à prouver que les courants transportés sur les conducteurs constituant le dipôle ne pouvait pas s'établir instantanément. La propagation des courants devait donc obéir à la théorie des potentiels retardés développée quelques années auparavant par James Clerk Maxwell. Hertz s'efforça dans les perfectionnements ultérieurs de ses expériences d'apporter cette preuve en concevant un circuit récepteur mobile. Il s'agit d'une boucle constituée d'un conducteur formant un carré ou une circonférence

d'un périmètre variable. Cette boucle ouverte en partie médiane reçoit deux électrodes dont l'espacement précis est réglable par une vis micrométrique. A l'aide de ce détecteur rudimentaire, Hertz parvient à réaliser des mesures relatives du champ électromagnétique dans le voisinage du dipôle. Le procédé consiste à observer l'arc extrêmement ténu détecté entre les deux électrodes lors de l'exposition de la boucle au champ hautes fréquences. L'intensité du champ est appréciée par l'écartement des électrodes procurant la formation critique de l'arc. Convaincu qu'il était indispensable d'améliorer la sensibilité du récepteur pour la poursuite convenable de ses expériences, Hertz recherche les conditions de résonances de la boucle.

C'est grâce à ce dispositif, qu'il parvint à démontrer que les courants produits dans le dipôle se propagent à une vitesse proche de la célérité. Conscient de la complexité de l'interprétation physique qu'il proposait de ces phénomènes. Il chercha à justifier autrement ce concept en prouvant que le champ électromagnétique provenant du dipôle était la cause d'ondes stationnaires dont la mesure fournirait directement la valeur de la vitesse de propagation des champs dans l'espace.

I.3. L'expérience décisive

Pour produire les ondes stationnaires qui vérifieront les hypothèses énoncées dans les théories de Maxwell, Hertz installe le dipôle dans la salle de cours la plus vaste de l'Université de Karlsruhe. Le dipôle est en position verticale et localisé à un mètre d'un des murs délimitant la plus grande dimension du local. Ce mur ainsi que son opposé sont préalablement revêtus d'une tôle en zinc de quelques mètres carrés de surface. Dans la zone présumée de formation des ondes stationnaires provoquées par les réflexions de ces deux écrans métalliques, Hertz procède à des mesures de champ réalisées grâce à la boucle réceptrice mise au point précédemment. Il trace une cartographie minutieuse du champ mettant en évidence la présence de ventre et de nœuds. Sachant que les électrodes du cadre récepteur étaient parallèles à l'axe du dipôle émetteur, Hertz observe qu'une rotation de 180° de la boucle ainsi maintenue dans le plan vertical, engendre des variations de l'intensité de l'arc induit par l'onde stationnaire. Il en conclut que ce phénomène résulte de la composition d'une onde de champ électrique et d'une onde de champ magnétique. L'illustration portée dans l'ouvrage montre alors très clairement le déphasage d'un quart de longueur d'onde observé entre ces deux champs stationnaires. Précurseur lointain des chambres réverbérantes, Heinrich Hertz ouvrait ainsi la voie aux transmissions radioélectriques. A un étudiant qui lui posait la question, si cette découverte verrait un jour une application pratique, Hertz, répondit « certainement pas... ». Et pourtant, l'unité physique la plus utilisée en CEM est sans nul doute celle qui porte le nom de cet illustre physicien auquel notre modeste article rendra hommage.

II. LA DIAPHONIE

II.1. Les travaux précurseurs de Schelkunoff

Sergei Alexander Schekunoff émigra de sa Russie natale vers les Etats-Unis lors de la révolution bolchevique de 1917. Si les travaux de Schelkunoff ont connu une grande notoriété dans le domaine des antennes. Sa contribution à la compréhension physique des phénomènes de diaphonie a été tout aussi déterminante. Dans un article qu'il publie in Bell System Technical Journal en 1937 avec F. M. Odrenko [2], on trouve les bases de la théorie de la diaphonie exercée par le couplage de deux lignes de transmission parallèles. Cet article énonce les formules des tensions induites en extrémités de lignes encore utilisées de nos jours. Les équations obtenues montrent très clairement que les phénomènes de propagation des ondes émettrices et des ondes induites s'accompagnent d'interférences génératrices de résonances. Dans cette revue scientifique, on peut également retrouver un article publié en 1934 dans lequel Schelkunoff développe une démonstration mathématique très élégante menant au calcul de l'impédance de transfert d'un blindage métallique tubulaire et homogène [3]. Cette référence est encore fréquemment citée par les ingénieurs confrontés aux mesures ou aux calculs de l'impédance de transfert de câbles. Les raisons qui poussèrent Schelkunoff à étudier ces phénomènes physiques avaient certainement leur origine dans la recherche de procédés capables de réduire le « cross talk » engendré dans les câbles téléphoniques souterrains alors en pleine extension sur le territoire américain.

II.2 Les perfectionnements de la théorie

Les calculs élaborés par Schelkunoff négligeaient la réaction de la ligne réceptrice sur la ligne émettrice. Cette hypothèse simplificatrice a surtout pour conséquence de surestimer l'amplitude des résonances observées sur les tensions prélevées aux extrémités des lignes. A partir des années soixante dix et dans les décennies suivantes, de nombreux scientifiques apportèrent des aménagements à la théorie initiale. Ce fut le cas du calcul des modes propres dont les propriétés intégraient les interactions électromagnétiques réciproques [5]. Ce perfectionnement offrait également l'avantage d'étendre le calcul à un nombre quelconque de lignes. Durant cette période très prolifique en résultats de simulations et en expériences, la théorie de la diaphonie fut étendue au couplage des ondes électromagnétiques sur les faisceaux de câbles [4]. La seule restriction imposée par cette approche supposait que les lignes en question possèdent une référence de potentiel commune, et que leur distance rapportée à ce référentiel demeure très inférieure à la longueur d'onde des champs perturbateurs [6]. Sous ces hypothèses, on parvint à réaliser des logiciels capables d'entreprendre le calcul des parasites induits sur des faisceaux de câbles installés dans des bâtiments, des aéronefs, des véhicules automobiles ou de tout autre équipement respectant les conditions d'application mentionnées plus haut. Ces

analyses connurent après les années quatre vingt dix leur paroxysme avec l'adoption des principes de la topologie électromagnétique [8]. En effet, l'usage du formalisme matriciel, permettait de convertir le couplage des champs aux lignes sous les concepts de matrices de répartition (matrices S). Il en résultait une grande facilité de traitement des réseaux de câbles arborescents connectés à des charges quelconques. Dans une évolution plus récente du sujet, la taille des matrices a pu être réduite moyennant l'usage du principe de conducteur équivalent [7]. Sachant que le calcul concerne généralement un ou deux conducteurs appartenant à un ensemble filiforme bien plus vaste, ou peut éviter le traitement global du faisceau en réduisant les éléments concernés à des conducteurs fictifs. Les paramètres géométriques des conducteurs équivalents ainsi constitués sont déterminés par des calculs auxiliaires tenant compte des couplages exercés par leurs voisins. Il faut signaler que cet artifice a été récemment appliqué avec succès sur des réseaux de câbles installés à bord de véhicules automobiles [9].

III. LES INTERFERENCES A LARGE BANDE

III.1. L'allumage des moteurs thermiques

L'allumage des moteurs thermiques à essence est provoqué par la formation d'une étincelle déclanchée dans une bougie alimentée sous haute tension. Le processus d'amorçage de cet arc électrique s'accompagne d'un appel de courant transitoire pouvant atteindre un ampère sous une durée de quelques nanosecondes. Ce courant transite dans les câbles haute tension reliant le distributeur aux bougies placées dans des puits situés au sommet des chambres de combustion du moteur. Le courant transitoire composé d'impulsions récurrentes engendre un rayonnement dont le spectre peut atteindre le GHz. La capture de ces interférences à large spectre par les antennes réceptrices des téléviseurs analogiques des années cinquante perturbait sérieusement la réception de l'image par l'apparition de scintillements. Les ingénieurs de l'automobile ont donc été contraints d'atténuer ce phénomène par la pose d'un filtrage adéquat directement intégré au système d'allumage. Les cordons blindés haute tension s'avérant à l'époque inutilisable pour des raisons technologiques et de coûts, les solutions retenues consistaient soit à réduire l'amplitude des impulsions de courant ou limiter leur étendue spectrale. En effet, il était montré que l'énergie détonante minimale tolérait une diminution importante du courant générateur de l'étincelle. Cette propriété a donc permis de réduire l'intensité du courant par l'insertion de résistances de fortes valeurs dans le circuit haute tension. Restait ensuite à intégrer le procédé dans les bougies ou sur les cordons de liaison, avec fiabilité et pour un coût acceptable. La seconde solution consistait à revêtir la surface des conducteurs haute tension d'une gaine de ferrite. Le ferrite réalisait un filtre passe bas capable d'atténuer fortement les raies d'émission localisées au-dessus d'une dizaine de MHz [10]. Il faut toutefois préciser que ces

parasites affectaient beaucoup moins la réception des programmes de la radio en grandes ondes ou petites ondes dont les fréquences porteuses se situaient très au-dessous de la bande III (200 MHz) utilisée à l'époque pour la télévision. Ce comportement s'explique aisément en considérant que l'impulsion de rayonnement provient d'oscillations amorties engendrées par la résonance propre des cordons haute tension dont les dimensions excèdent rarement trente centimètres. Ce contexte physique transportait l'émission au-dessus d'une centaine de MHz. Phénomène auquel s'ajoutait l'effet de blindage de l'enveloppe métallique du compartiment moteur dont l'atténuation était plus conséquente pour les grandes et les petites ondes. Cette problématique inaugurait les défis posés aux constructeurs automobiles confrontés à l'usage d'équipements utilisant des signaux électriques. Cet épisode confirme également que l'évolution de la CEM est en permanence stimulée par les progrès de la radioélectricité et de l'industrie électronique en général.

III.2. L'impulsion électromagnétique nucléaire

Les ultimes campagnes d'essais d'armes nucléaires en atmosphère pratiquées vers la seconde moitié des années soixante, révélèrent que la réaction nucléaire violente engendrait une impulsion électromagnétique très intense pouvant détruire des circuits électroniques fonctionnant sous basse tension [11]. Lorsqu'on entreprit la simulation théorique de ce phénomène, les conclusions des analyses physiques étaient unanimes pour indiquer que l'explosion d'une arme propulsée à une centaine de kilomètres d'altitude pouvait constituer une sérieuse agression stratégique. En effet, une explosion survenant au sommet de la tropopause s'avère presque inoffensive pour les installations situées aux sols, hormis la propagation de l'impulsion électromagnétique seulement atténuée par la dispersion naturelle de l'onde. L'effet électromagnétique se manifesterait par l'induction de tensions capables de détruire le moindre circuit exposé à ce phénomène. Sachant que le spectre du choc électromagnétique s'étend au-dessus de 100 MHz et que l'amplitude crête de l'onde peut atteindre plusieurs dizaines de kV / m sur de vastes territoires, des investigations devaient être menées par les organismes militaires et civil pour connaître les risques que cette menace impliquait. Ce contexte fut le point de départ d'importants programmes d'études dont le but consistait à mettre en place les simulations théoriques des couplages affectant une grande variété d'installations. Cette approche purement théorique des choses était assortie de vérifications expérimentales réalisées sur des simulateurs de signaux reproduisant la signature de l'Impulsion Electromagnétiques Nucléaires désignée désormais sous l'abréviation IEMN.

III.3. La simulation numérique des couplages

Pour résumer très simplement les choses, la simulation théorique était typiquement confrontée au scénario que nous adopterons pour exemple et présentement représenté

par une centrale de production d'énergie électrique illuminée par l'IEMN. Compte tenu de l'étendue géographique du phénomène, les inductions engendrées par l'impulsion devaient concerner toutes les liaisons filaires de la centrale allant des lignes à très haute tension jusqu'aux câbles de commandes ou de contrôle conduisant des signaux sous de bas niveaux d'amplitude. L'appréhension physique du problème était considérable, car la diversité de l'amplitude des phénomènes induits est telle, que la configuration menant à la destruction d'un circuit vulnérable peut être très variée. Il peut s'agir d'un transitoire induit sur une ligne directement connectée au circuit, ou de l'action indirecte d'une induction affectant d'autres parties de l'installation parfois très éloignée du circuit. La simulation théorique globale du comportement de la centrale étant manifestement impossible, seule des analyses topologiques minutieuses coordonnées par des simulations locales permettait d'estimer les risques dans l'unique but de prescrire les protections adéquates. Un appel fut lancé aux scientifiques capables de concevoir des outils de simulation dont la base commune reposait sur la résolution numérique des équations de Maxwell [12], [13]. Les difficultés rencontrées dans ces travaux de recherche dont l'exercice s'étalera sur une quinzaine d'années connaîtront leur apogée dans le milieu des années quatre vingt lorsqu'il s'agira de choisir les techniques de calcul les plus performantes. Il faut prendre conscience que les simulations théoriques pratiquées en compatibilité électromagnétique diffèrent manifestement des autres domaines d'application du calcul numérique. La conception d'un circuit électronique aussi complexe soit-il est fixée par un cahier des charges et par le respect de règles de fonctionnalités nominales. Dans la plupart des cas, l'effort de simulation demandé en CEM vise un tout autre objectif, car la contrainte supportée par le système dépasse largement les limites du fonctionnement nominal d'une installation. Tel est le cas par exemple pour le calcul de l'IEMN induite sur une ligne à très haute tension connectée à un transformateur de puissance dont on connaît très bien les propriétés aux fréquences industrielles de 50 Hz ou de 60 Hz, mais dont on ignore le comportement à 10 MHz ou 100 MHz !

III.4. L'expérimentation et le durcissement

L'expérimentation des couplages produits par l'IEMN ne put être réalisée que dans les cas particuliers où les dimensions des équipements concernés tolèrent leur insertion dans des simulateurs d'ondes. Un simulateur est généralement composé d'une nappe de fils disposée parallèlement à la surface du sol [14]. Un générateur délivrant une impulsion de tension dont l'amplitude crête peut dans certains cas dépasser plusieurs millions de volts permet de reproduire sous la nappe un champ électromagnétique dont l'amplitude et la signature s'approchent de l'impulsion réelle. Le déroulement des programmes d'essais demandait un gros effort d'analyse pour éviter la contamination des signaux induits collectés durant les mesures. Leur transfert vers les récepteurs de

traitement analogique ou numérique s'effectuait pour ces raisons au moyen de liaisons optiques. L'attention devait être redoublée lors de l'évaluation des dispositifs de durcissement de l'équipement expérimenté. Par rapport au blindage traditionnel, le durcissement vise un tout autre objectif. Examinons l'exemple d'une antenne réceptrice reliée à un téléviseur par un câble coaxial de constitution usuelle. Il est certain que cette protection électromagnétique rudimentaire ne répond pas aux critères exigés par le durcissement. En effet, le câble coaxial de descente d'antenne protège le récepteur des interférences provenant de perturbateurs hors bande et d'amplitude modérée. Le blindage forme également un écran vis-à-vis du champ électrique ambiant de fréquence industrielle 50 Hz. Un téléviseur durci pour le protéger contre la menace de l'IEMN comportera un filtre agencé de telle manière qu'un composant non linéaire absorbe l'énergie venant directement du signal transitoire de grande amplitude induit sur l'antenne réceptrice. Le câble coaxial devra être composé d'un blindage à haute immunité électromagnétique afin d'atténuer fortement l'impulsion de tension résiduelle provenant du courant transitoire intense induit sur la face extérieure du blindage [15]. Pour une raison similaire, le courant induit sur ce blindage doit être dévié du circuit de masse du téléviseur afin d'éliminer toute contamination interne susceptible de détruire des composants sensibles. L'entrée du câble coaxial sur un plan métallique connecté à la terre par une liaison de très faible impédance peut réaliser cette troisième fonction du durcissement. Si la menace de l'IEMN semble dans le contexte politique actuel peu probable et même pour certains relever de la pure fiction, les efforts fournis par la communauté scientifique pour résoudre nombre de ces questions ont largement contribué au progrès du savoir faire en CEM. Il est indéniable que l'industrie aéronautique a été bénéficiaire de ce travail et dans une moindre mesure l'industrie automobile.

IV. L'AVENEMENT DES MICRO – ONDES

La génération d'ondes par des sources de plus en plus nombreuses émettant bien au-dessus de quelques GHz est entrain de profondément bouleverser l'environnement électromagnétique. Ces fréquences très élevées autorisent l'usage d'antennes compactes et directives offrant la capacité d'émettre des faisceaux d'ondes porteuses d'une densité de puissance conséquente. Ces propriétés jointes à l'induction de tensions amplifiées par l'accroissement de la fréquence et le déclenchement de résonances stimulées par la faible longueur d'onde imposent de nouvelles approches à la problématique CEM. Dans l'ordre d'apparition des risques électromagnétiques, il convient de signaler les micro ondes de forte puissance élaborées pour produire des interférences intentionnelles [16]. Si cette question intéresse en priorité le contexte de la guerre électronique, la lutte contre le terrorisme analyse également l'occurrence d'attaques de cibles vulnérables.

Comparées aux phénomènes traditionnels observés en CEM, les inductions produites par des longueurs d'ondes de quelques centimètres pose d'emblée la question du lien avec les simulations théoriques et du réalisme de leurs vérifications expérimentales. Nous avons vu dans les paragraphes précédents, que l'analyse CEM recherche des outils de prédictions qu'il faut à tout prix valider par l'expérience. Si cette démarche a été prouvée pour les inductions provenant de l'IEMN ou de la plupart des interférences produites au-dessous du GHz. La réduction de la longueur d'onde pose de sérieuses interrogations. En effet, l'examen d'un simple circuit imprimé indique tout de suite que face à une agression micro ondes, les pistes seront surdimensionnées par rapport à la longueur d'onde et a fortiori les autres éléments composant l'infra structure du moindre équipement électronique. Face à ce constat, l'induction électromagnétique est principalement gouvernée par des mécanismes de résonances. Il est évident que d'infimes variations des paramètres géométriques et physiques seront ressenties par une évolution d'amplitude quasi imprévisible des tensions ou des courants induits. La simulation théorique est donc exposée à une source d'incertitude inévitable guidée par la loi des grands nombres. La pratique expérimentale sera évidemment soumise à d'autres incertitudes tout aussi significatives en raison de l'absence de reproductibilité stimulée par l'auto perturbation des mesures. Certains théoriciens proposent d'ailleurs assimiler ce problème au principe d'incertitude d'Heisenberg bien connu des physiciens de la mécanique quantique. Ces nouvelles contraintes physiques ont donc incité la communauté scientifique à procéder à des simulations partiellement empruntées aux analyses statistiques et d'adopter un raisonnement similaire lors de l'analyse des résultats expérimentaux. L'approche la plus utilisée consiste à reconnaître des amplitudes moyennes et des marges d'incertitudes établies sur des critères dûment justifiés. Sur cette question les travaux accomplis sur les chambres réverbérantes à brassage de modes ont ouvert la voie à de nouveaux concepts de la « métrologie CEM » tout en concevant une stratégie spécifique aux simulations théoriques des phénomènes de couplage observés dans ces milieux confinés [17]. Des travaux originaux sont à ce jour entrepris par plusieurs équipes de recherches, il est pratiquement acquis que les résultats attendus permettront d'éclaircir de nombreux points demeurés obscurs. [19], [20]

POUR CONCLURE

Si on excepte la bande de radiodiffusion FM où les interférences deviennent de plus en plus insupportables. L'utilisation des ondes hertziennes dans d'autres régions du spectre reste irréprochable grâce à l'excellence de l'approche scientifique du problème. Néanmoins, de nouvelles sources de nuisances électromagnétiques sont entrain d'apparaître avec les émissions d'impulsions ultra large bande qu'elles soient ou non intentionnelles et contre lesquelles il faudra trouver remède. [18]

Le recours systématique au tout numérique constitue aussi un nouvel enjeu où l'analyse CEM devra de plus en plus fusionner avec le traitement du signal. Les parasites rayonnés par l'allumage des véhicules automobile sont à ce titre éloquentes, que deviennent ces perturbations sur la réception des images transmises en TNT ?

L'avènement de la nano électronique va également lever de nouvelles questions sur la contribution insoupçonnée des phénomènes de compatibilité électromagnétique. Ces technologies de l'infiniment petit fourniront-elles aux ingénieurs, le capteur idéal restituant la valeur exacte d'un champ ? Car depuis les expériences inaugurées par Heinrich Hertz un siècle auparavant, le doute demeure toujours sur la précision absolue des mesures de champs hautes fréquences.

REFERENCES

- [1] H. Hertz, "*Electric Waves*", translated by D.E. Jones, London Macmillan and co (1893) and New York Dover (1962)
- [2] S.A. Schelkunoff, F.M. Odrenko, "*Cross Talk between Coaxial Transmission Lines*", Bell System Tech., 1937, pp 144-164
- [3] S.A. Schelkunoff, "*The Electromagnetic Theory of Coaxial Transmission Lines and Cylindrical Shields*", Bell System Tech., 1934, pp 533-579
- [4] C.D. Taylor, J.P. Castillo, "*On Electromagnetic-Field Excitation of Unshielded Multiconductor Cables*", IEEE Transactions on EMC, Vol. 20, N°4, November 1978, pp 495-500
- [5] C.R. Paul, "*Computation of Crosstalk in a Multiconductor Transmission Lines*", IEEE Transactions on EMC, Vol. 23, N°4, November 1981, pp 352-358
- [6] J. Nitsch, C.E. Baum, R. Sturm, "*Analytical Treatment of Circulant Nonuniform Multiconductor Transmission Lines*", IEEE Transactions on EMC, Vol. 34, N°1, February 1992, pp 32-38
- [7] C. Poudroux, M. Rifi, B. Démoulin, "*A Simplified Approach to determine the Amplitude of the Transient Voltage Induced on a Cable Bundle*", IEEE Transactions on EMC, Vol. 37, N°4, November 1995, pp 497-504
- [8] L. Paletta, J-P. Parmantier, F. Issac, P. Dumas, J-C. Alliot, "*Susceptibility Analysis of Wiring in a Complex System Combining a 3-D Solver and a Transmission Line Network Simulation*", IEEE Transactions on EMC, Vol. 44, N°2, May 2002, pp 309-317
- [9] G. Andrieu, L. Koné, F. Bocquet, B. Démoulin, J-P., Parmantier, "*Multiconductor Reduction Technique for Modelling Common-Mode Currents on Cable Bundles at High Frequency for Automotive Applications*", IEEE Transactions on EMC, Vol. 50, N°1, February 2008, pp 175-184
- [10] Hwei Piao Hsu, "*Automotive Ignition Interference*", IEEE Transactions on EMC, Vol. 6, N°3, August 1964, pp 15-20
- [11] R. O. Lange, "*Simulating the Electrical Effects of Nuclear Detonations*", IEEE Transactions on EMC, Vol. 8, N°4, December 1966, pp 197-209
- [12] G. Mur, "*Absorbing Boundary Conditions for the Finite-Difference Approximation of the Time Domain Electromagnetic-Field Equations*", IEEE Transactions on EMC, Vol. 23, N°4, November 1981, pp 377-382
- [13] A. Reineix, A. Boijaud, B. Jecko, "*Electromagnetic Pulse Penetration into Reinforced- Concrete Building*", IEEE Transactions on EMC, Vol. 29, N°1, February 1987, pp 72-78
- [14] F.M. Tesche "*Prediction of the E and H Fields produced by the Swiss Mobile EMP Simulator (MEMPS)*", IEEE Transactions on EMC, Vol. 34, N°4, November 1992, pp 381-390
- [15] C. Godstein, P. Mani, "*CW and Pulsed Mode Transfer Impedance Measurements in Coaxial Cables*", IEEE Transactions on EMC, Vol. 34, N°1, February 1992, pp 50-57
- [16] C.E. Baum, "*From the Electromagnetic Pulse to High Power Electromagnetics*", Proceeding of the IEEE, Vol. 80, N°6, 1992, 789-817
- [17] P. Corona, J. Ladbury, G. Latmiral, "*Reverberation-Chamber Research-Then and Now: A Review of Early Work and Comparison with Current Understanding*", IEEE Transactions on EMC, Vol. 44, N°1, February 2002, pp 87-94
- [18] W. D. Prather, C.E. Baum, R.J. Tornes, F. Sabath, D. Nitsch, "*Survey of Worldwide High-Power Wideband Capabilities*", IEEE Transactions on EMC, Vol. 46, N°3, August 2004, pp 335-344
- [19] C. Lemoine, P. Besnier, M. Drissi, "*Estimating the Effective Sample Size to Select Independent Measurements in a Reverberation Chamber*", IEEE Transactions on EMC, Vol. 50, N°2, May 2008, pp 227-236
- [20] A. Cozza, "*Statistics of the Performances of Time Reversal in a Lossy Reverberating Medium*", Physical Review Journal, E80, 056604, November 2009

REMERCIEMENTS

L'auteur remercie Mme Bellurier de la bibliothèque de l'Université Lille 1 pour la fourniture de documents d'archives.

Many thanks to Mrs Zappe from the library of Karlsruhe University for his kind of help