

N° d'ordre : 3052

THESE

présentée à

L'UNIVERSITE DES SCIENCES ET TECHNOLOGIES DE LILLE

pour obtenir le grade de

DOCTEUR DE L'UNIVERSITE

Spécialité : ELECTRONIQUE

par

Frédéric HOËPPE

ANALYSE DU COMPORTEMENT ELECTROMAGNETIQUE
DES CHAMBRES REVERBERANTES A BRASSAGE DE MODES
PAR L'UTILISATION DE SIMULATIONS NUMERIQUES

Soutenue le 10 décembre 2001, devant la Commission d'Examen

Membres du Jury : MM.	J.C. BOLOMEY	Président
	F. CANAVERO	Rapporteur
	A. REINEIX	Rapporteur
	B. DEMOULIN	Directeur de thèse
	P.N. GINESTE	Co-directeur de thèse
	F. FLOURENS	Examineur
	V. BERAT	Invité

Résumé

La chambre réverbérante à brassage de modes pour les essais d'immunité électromagnétique est promise à un certain essor. Toutefois, sa mise en œuvre nécessite une compréhension approfondie de certains phénomènes physiques. Les développements proposés au cours de cette thèse traitent de l'analyse des chambres réverbérantes par deux méthodes. La première est un outil analytique simple basé sur le fonctionnement modal d'une cavité. La seconde s'appuie sur des simulations numériques.

L'outil analytique établit le lien entre la théorie des cavités et l'approche statistique pour traiter du comportement électromagnétique de la chambre réverbérante lors d'une superposition de modes de résonance.

Pour analyser correctement le comportement d'une cavité avec un environnement interne complexe (présence du brasseur, de l'équipement sous test, des antennes, ...), il faut s'appuyer sur des simulations numériques. La première méthode réalise une analyse modale large bande de la cavité et permet de calculer son coefficient de qualité. La seconde simule fidèlement la rotation du brasseur de modes. Ainsi, la chambre réverbérante du LRPE et celle de EADS Airbus ont été modélisées.

L'exploitation de ces modèles a permis d'apprécier les limites de fonctionnement des chambres réverbérantes : en espace pour déterminer le volume utile d'essai et en fréquence afin d'évaluer sa limite basse, notamment en fonction de la forme du brasseur. L'influence de l'équipement sous test sur cette limite est également examinée. Les simulations effectuées renseignent aussi sur la compréhension des couplages en chambre réverbérante en les comparant à la chambre anéchoïque. L'application de la méthode du brassage de modes à la caractérisation de cavités avion est ensuite évaluée et comparée à des mesures effectuées sur la soute électronique d'un Airbus A320. Finalement, les résultats obtenus sont exploités pour mettre en place une procédure d'essais d'immunité en chambre réverbérante.

<p>Chapitre I</p> <p>Analyse phénoménologique d'une cavité électromagnétique surdimensionnée</p>
--

INTRODUCTION.....	17
1 ESSAIS D'IMMUNITÉ AUX RADIOFRÉQUENCES SUR DES ÉQUIPEMENTS AÉRONAUTIQUES.....	19
1.1 ESSAIS DE SUSCEPTIBILITÉ CONDUITE	19
1.2 ESSAIS DE SUSCEPTIBILITÉ RAYONNÉE.....	19
1.3 ALTERNATIVE AUX ESSAIS DE SUSCEPTIBILITÉ RAYONNÉE.....	20
2 PRINCIPE DE FONCTIONNEMENT DE LA CHAMBRE RÉVERBÉRANTE À BRASSAGE DE MODES.....	20
2.1 CONCEPT DE MODES APPLIQUÉ AUX CHAMBRES RÉVERBÉRANTES	21
2.2 BRASSAGE DE MODES DANS UNE CAVITÉ MÉTALLIQUE PARALLÉLÉPIPÉDIQUE.....	23
2.2.1 <i>Perturbation des modes de cavité</i>	24
2.2.2 <i>Distribution du champ dans une chambre réverbérante à brassage de modes</i>	25
3 MODÈLE ANALYTIQUE DE LA CAVITÉ MÉTALLIQUE PARALLÉLÉPIPÉDIQUE.....	28
3.1 DESCRIPTION DU MODÈLE	28
3.2 OUTILS STATISTIQUES D'ANALYSE DU COMPORTEMENT DU CHAMP ÉLECTROMAGNÉTIQUE À L'INTÉRIEUR DE LA CAVITÉ	34
3.3 RECHERCHE DES ERREURS DE BIAIS INTRODUITES PAR L'ÉCHANTILLONNAGE STATISTIQUE.....	38
3.3.1 <i>Discrétisation du champ sur une dimension</i>	38
3.3.1.1 Discrétisation à intervalle régulier	39
3.3.1.2 Discrétisation aléatoire.....	40
3.3.1.3 Discrétisation logarithmique.....	42
3.3.2 <i>Discrétisation du champ sur deux dimensions</i>	43
3.3.2.1 Discrétisation à intervalle régulier	43
3.3.2.2 Discrétisation aléatoire.....	44
3.4 ÉTUDE STATISTIQUE DE LA DISTRIBUTION DU CHAMP RÉALISÉE PAR UNE SUPERPOSITION DE MODES DE RÉSONANCE.....	46
3.4.1 <i>Lois de distribution du champ en fonction de l'espace</i>	46
3.4.2 <i>Lois de distribution du champ en fonction de la fréquence</i>	49
3.4.3 <i>Propriétés statistiques du champ</i>	50
3.4.3.1 Isotropie et uniformité en espace	50
3.4.3.2 Isotropie et uniformité en fréquence.....	51
3.4.3.3 Ergodisme espace-fréquence	51
3.4.4 <i>Limites de validité des lois statistiques</i>	52
3.4.4.1 Influence de la distribution des poids aléatoires.....	52
3.4.4.2 Limites fréquentielles.....	52
3.4.4.3 Limites spatiales	54
CONCLUSION.....	56

Chapitre II

Mise en place des outils de simulation des chambres réverbérantes à brassage de modes

INTRODUCTION.....	59
1 BRÈVE REVUE DES MÉTHODES DE SIMULATION APPLICABLES À LA MODÉLISATION DES CHAMBRES RÉVERBÉRANTES À BRASSAGE DE MODES	61
1.1 MÉTHODE DES DIFFÉRENCES FINIES DANS LE DOMAINE TEMPOREL	61
1.2 MÉTHODE DES LIGNES DE TRANSMISSION	62
1.3 MÉTHODE DES ÉLÉMENTS FINIS.....	62
1.4 MÉTHODE DES ÉLÉMENTS FINIS DE FRONTIÈRE	63
1.5 MÉTHODE DU LANCER DE RAYONS	63
1.6 MÉTHODE DU SPECTRE D'ONDES PLANES	64
1.7 MÉTHODES HYBRIDES	64
1.8 CHOIX DES MÉTHODES.....	65
2 DESCRIPTION DES MÉTHODES NUMÉRIQUES UTILISÉES	66
2.1 MÉTHODE DES DIFFÉRENCES FINIES DANS LE DOMAINE TEMPOREL (FDTD).....	66
2.2 MÉTHODE DES ÉLÉMENTS FINIS DE FRONTIÈRE DANS LE DOMAINE FRÉQUENTIEL (BEM)	69
2.2.1 Principe de la méthode.....	69
2.2.2 Assemblage partiel.....	70
3 VALIDATION DES MÉTHODES NUMÉRIQUES UTILISÉES POUR LA MODÉLISATION DES CHAMBRES RÉVERBÉRANTES.....	72
3.1 VALIDATION DU MODÈLE DIFFÉRENCES FINIES (FDTD)	72
3.1.1 Description du modèle.....	72
3.1.2 Validation du modèle FDTD par des observables déterministes	74
3.1.3 Validation du modèle FDTD par des observables statistiques.....	76
3.1.3.1 Cas des échantillons répartis dans l'espace.....	76
3.1.3.2 Cas des échantillons de fréquence.....	77
3.1.3.3 Recherche du volume de champ statistiquement uniforme	79
3.2 VALIDATION DU MODÈLE ÉLÉMENTS FINIS DE FRONTIÈRE (BEM)	81
3.2.1 Propriétés et description du modèle	81
3.2.2 Validation à partir d'observables déterministes	83
3.2.3 Validation à partir d'observables statistiques	83
3.2.3.1 Comportements statistiques en fonction de la position angulaire du brasseur	84
3.2.3.2 Comportement statistique en fonction de la position de l'observateur.....	85
3.2.3.3 Recherche du volume utile à l'aide de la dérive des lois statistiques	86
3.2.4 Validation expérimentale du modèle de chambre réverbérante à brassage de modes	88
CONCLUSION	90

Chapitre III

Analyse des chambres réverbérantes à brassage de modes par les outils de simulation numérique

INTRODUCTION.....	93
1 LIMITES DE FONCTIONNEMENT DES CHAMBRES RÉVERBÉRANTES À BRASSAGE DE MODES	95
1.1 LIMITES SPATIALES ET FRÉQUENTIELLES DE FONCTIONNEMENT DES CHAMBRES RÉVERBÉRANTES.....	95
1.1.1 Limites spatiales de fonctionnement.....	95
1.1.2 Limite fréquentielle de fonctionnement.....	97
1.2 INFLUENCE DES CARACTÉRISTIQUES GÉOMÉTRIQUE ET MORPHOLOGIQUE DU BRASSEUR DE MODES.....	100
1.2.1 Influence de la taille du brasseur.....	100
1.2.2 Influence de la forme du brasseur.....	101
1.3 ETUDE DE L'INFLUENCE DE LA FORME DE LA CHAMBRE SUR SES PROPRIÉTÉS.....	102
1.4 ANALYSE DE LA DÉRIVE DES PARAMÈTRES STATISTIQUES	103
2 EFFET DE L'INTRODUCTION DE L'ÉQUIPEMENT SOUS TEST SUR LES PROPRIÉTÉS DE LA CHAMBRE	108
2.1 INFLUENCE DU VOLUME DE L'EST.....	108
2.2 INFLUENCE DE LA POSITION DE L'EST	110
2.3 INFLUENCE DU COUPLAGE PRODUIT PAR L'ANTENNE D'ÉMISSION	112
3 ANALYSE DU COUPLAGE SUR ÉQUIPEMENT DANS UNE CHAMBRE RÉVERBÉRANTE	114
3.1 SIMULATION THÉORIQUE DES COUPLAGES SUR UN CÂBLE PLACÉ AU-DESSUS D'UN PLAN DE MASSE.....	115
3.2 SIMULATION THÉORIQUE DES COUPLAGES SUR UN BOÎTIER.....	118
3.3 ANALYSE EXPÉRIMENTALE DE QUELQUES PHÉNOMÈNES DE COUPLAGE.....	123
3.3.1 Protocole des mesures pratiquées en C.R.B.M.	124
3.3.2 Protocole des mesures pratiquées en Chambre anéchoïque.	124
3.3.3 Comparaison des résultats C.A / CRBM.....	125
4 APPLICATION DE LA MÉTHODE DU BRASSAGE DE MODES À LA CARACTÉRISATION DE L'ENVIRONNEMENT INTERNE D'UNE CAVITÉ AVION	126
4.1 COMPORTEMENT DE LA CHAMBRE RÉVERBÉRANTE MUNIE D'UNE OUVERTURE ET EXCITÉE PAR UNE ONDE PLANE.....	127
4.1.1 Evaluation de l'ergodisme espace - angle - fréquence dans une cavité munie d'une ouverture..	127
4.1.2 Influence de la direction d'illumination de l'onde plane.....	128
4.2 MODÉLISATION DE L'ENVIRONNEMENT ÉLECTROMAGNÉTIQUE INTERNE D'UNE CAVITÉ RÉELLE DU TYPE CAVITÉ AVION	132
4.2.1 Propriétés statistiques d'une cavité munie d'une cloison interne	132
4.2.2 Cas d'une cavité complexe excitée par une source interne.....	134
4.2.3 Cas d'une cavité complexe excitée par une source externe	136
4.2.4 Incidence de l'absorption électromagnétique	138
4.3 VALIDATION DES MÉTHODES DE CARACTÉRISATION DE L'ENVIRONNEMENT INTERNE D'UNE CAVITÉ RÉELLE PAR DES MESURES DANS UNE SOUTE ÉLECTRONIQUE D'UN AIRBUS A320.....	144
4.3.1 Validation des méthodes de caractérisation dans le cas d'une excitation interne.....	144
4.3.2 Validation des méthodes de caractérisation dans le cas d'une excitation externe.....	146

5	PROTOCOLE D'ESSAIS D'IMMUNITÉ EN CHAMBRE RÉVERBÉRANTE À BRASSAGE DE MODES	147
5.1	CALIBRAGE DE LA CHAMBRE RÉVERBÉRANTE À VIDE.....	147
5.1.1	<i>Uniformité du champ dans la chambre vide.....</i>	<i>148</i>
5.1.2	<i>Taux de remplissage maximum.....</i>	<i>150</i>
5.2	CALIBRAGE DE LA CHAMBRE EN PRÉSENCE DE L'EST	151
5.3	PROCÉDURE D'ESSAIS EN CHAMBRE RÉVERBÉRANTE.....	152
	CONCLUSION.....	153

	CONCLUSION GENERALE.....	155
--	---------------------------------	------------

	BIBLIOGRAPHIE.....	161
--	---------------------------	------------

	ANNEXE I - OSCILLATIONS PROPRES D'UNE CAVITE METALLIQUE PARALLELEPIPEDIQUE.....	167
--	--	------------

	ANNEXE II - CALCUL ANALYTIQUE DES FONCTIONS CUMULATIVES DE DISTRIBUTION D'AMPLITUDE DE FONCTIONS SINUSOÏDALES.....	179
--	---	------------

Un aéronef, qu'il soit au sol ou en vol, est exposé à de multiples agressions de nature électromagnétique. Ce peut être le foudroiement direct de l'aéronef qui, outre les dommages matériels engendrés sur la structure de l'appareil, induit des courants transitoires intenses sur son fuselage. Ce peut être la proximité d'un radar qui illumine certains organes sensibles, notamment à l'approche des zones aéroportuaires. Ce peut être également des agressions intentionnelles comme l'IEMN (Impulsion ElectroMagnétique d'origine Nucléaire) ou des menaces micro ondes provenant d'armes électromagnétiques.

Les équipements électroniques qui se trouvent à l'intérieur de ces aéronefs subissent indirectement ces agressions via des chemins de couplages à travers les ouvertures, les matériaux composites, les hublots, les joints de portes ou les câbles, qui sont autant de points faibles capables d'engendrer des dysfonctionnements. Les couplages électromagnétiques sont habituellement répartis en mécanismes de conduction ou d'induction qu'on appelle communément perturbation conduite ou perturbation rayonnée.

A ces phénomènes violents se superposent les couplages introduits par la compatibilité électromagnétique interne à l'appareil. Il s'agit d'interférences provenant de la cohabitation d'équipements pollueurs et de fonctions électroniques sensibles. Ces équipements peuvent être situés aux côtés de l'appareil, en soute ou dans le cockpit, ou même éloignés, tel un appareil électronique portatif utilisé par un passager.

L'aéronautique est donc confrontée à la réalisation et à l'installation de fonctions électroniques qui résistent à ces agressions électromagnétiques et qui soient aussi peu polluantes. Pour valider un appareil face à ce type de contraintes, des essais sont pratiqués. Le test d'immunité reproduisant les agressions signalées plus haut assure la qualification vis à vis des contraintes électromagnétiques de forte intensité. Les mesures de rayonnement sur une large bande de fréquence permettent de situer les spectres d'émission vis à vis de tolérances normalisées.

La contribution apportée par ce travail concerne la pratique d'essais d'immunité sur des équipements situés dans les soutes d'un aéronef. La thèse s'attache dans un premier temps à faire une revue succincte des méthodes d'essais d'immunité aux radiofréquences applicables aux équipements électroniques rencontrés en aéronautique.

L'élaboration d'un essai d'immunité électromagnétique suppose que :

- l'équipement soumis au test (EST) doit subir une agression ciblée caractérisée par une amplitude, un spectre de fréquences et des conditions d'illumination bien spécifiques ;
- les moyens mis en œuvre pour générer l'agression ne doivent pas polluer exagérément l'environnement proche du site d'essai.

La première condition est contenue dans le respect des normes qui recommandent un protocole d'essai qui soit le plus reproductible possible. La seconde nécessite l'isolement électromagnétique de l'installation d'essai dans une cage blindée.

A ces critères primaires s'ajoutent d'autres paramètres plus précis définissant le type et la signature des champs perturbateurs. Ces phénomènes doivent être les plus proches possible des environnements les plus sévères auxquels l'appareil sera exposé durant ses missions. Cela implique la recherche des zones les plus sensibles des équipements.

La méthode d'essais classiquement utilisée pour les essais d'immunité rayonnée est la chambre anéchoïque blindée. Le principe de cette méthode d'essais pose un certain nombre de problèmes illustrés par l'usage d'une illumination sous onde plane. En effet, nous avons dit

qu'il fallait évaluer l'immunité de l'EST en l'éclairant vers sa zone de couplage la plus sensible. L'emploi d'ondes planes est un facteur qui peut accroître le temps d'exécution des essais de façon considérable. D'autre part, les risques considérés en aéronautique demandent la génération de champs électriques d'une amplitude pouvant atteindre 200 V/m à une distance spécifiée de l'antenne d'émission de 3 mètres. L'emploi d'amplificateurs de fortes puissances larges bandes, donc assez coûteux, est indispensable. De plus, il n'est pas certain qu'aux fréquences les plus basses envisagées dans ces tests, la condition du champ lointain est réalisée.

Ces obstacles d'ordres pratique et économique ont amené à envisager des essais d'immunité alternatifs. L'emploi des chambres réverbérantes à brassage de modes (CRBM) est une technique dont le principe peut alléger les investissements et garantir de meilleures conditions pour une illumination homogène des objets expérimentés. Cette méthode d'essais est issue des acousticiens, qui dans les années 1960, retirèrent les absorbants des chambres anéchoïques. Elle ne fut expérimentée par les électromagnéticiens qu'à la fin des années 1970 en Italie puis aux Etats-Unis. Elle eut du mal à émerger car les spécialistes de la CEM étaient réticents à l'idée de certifier leurs équipements sur des notions statistiques. Dans les années 1980, seuls les Américains l'utilisaient pour l'évaluation de l'efficacité de blindage des composants passifs. Puis dans les années 1990, la connaissance du fonctionnement de ce moyen d'essais s'est enrichie. Des chambres réverbérantes se sont construites en Europe et entre autres en 1991 au LRPE (nouvellement TELICE). Aujourd'hui, la norme internationale DO-160 [1] propose cette méthode pour la certification en immunité des équipements aéronautiques et elle est sur le point d'être applicable à l'ensemble des appareils électroniques.

La chambre réverbérante à brassage de modes offre de nombreux avantages. Comme nous allons le montrer au cours de la thèse, elle permet en théorie de soumettre l'EST à un champ statistiquement isotrope, ce qui évite une recherche de la configuration d'illumination la plus pénalisante. L'autre avantage de cette méthode est la possibilité de générer des champs de forte puissance avec des appareils de puissance d'émission raisonnable. En outre, le champ a la propriété d'être statistiquement uniforme à l'intérieur de la chambre et permet ainsi de réaliser des essais sur de grands systèmes. L'isotropie et l'uniformité du champ s'entendent au sens des distributions statistiques d'amplitude réalisées au moyen d'un brasseur de modes. Un avantage de ce procédé serait d'obtenir une reproductibilité très satisfaisante basée sur la recherche des critères d'incertitude stabilisés par certaines propriétés statistiques.

Toutefois, cette méthode possède certaines limitations. Ce procédé n'est utilisable qu'au-dessus d'une limite basse en fréquence et à l'intérieur d'un volume fictif imbriqué dans la chambre. De plus, l'introduction de l'EST peut engendrer des perturbations modifiant les propriétés d'isotropie et d'uniformité du champ.

L'identification de ces limitations demande une étude approfondie du fonctionnement de la chambre réverbérante. L'étape initiale de ce travail rassemblée au premier chapitre de la thèse concerne la compréhension de l'excitation modale d'une cavité. Cette analyse est d'abord entreprise à l'aide des formules donnant le champ dans une enceinte parfaitement métallique. Chaque mode excité est caractérisé par une distribution sinusoïdale du champ. La période de la distribution est d'autant plus faible que la longueur d'onde est réduite par rapport aux dimensions de la cavité. C'est le fonctionnement surdimensionné proche des théories optiques.

La suite de ce chapitre illustre une approche intuitive dont le principe est d'examiner les effets engendrés par des interférences modales. En effet, les objets qui sont introduits dans la chambre (EST, antennes, etc...) provoquent une perturbation du champ dont l'effet est interprété par l'addition au mode excité des modes latéraux. La variabilité des formes et des dimensions des objets implique que la distribution du champ est presque imprévisible. Ce contexte a donc amené à substituer à la distribution sinusoïdale du champ des lois statistiques, dont les propriétés seront utilisées par la suite pour adjoindre aux chambres réverbérantes des données quantitatives.

Le brassage de modes caractérisé par l'introduction d'un objet métallique permet d'agir sur la répartition du champ afin de réaliser un nombre important mais non infini de configurations modales. La rotation du brasseur de modes, dont la dimension est rattachée à l'efficacité de la chambre, sera reliée à la limite basse fréquence au-dessous de laquelle les propriétés statistiques du champ ne sont plus satisfaisantes. La recherche de la forme et des dimensions adéquates d'un brasseur de modes relève pour cette raison de tests empiriques qu'il est peu envisageable de réaliser par des expériences systématiques.

Les chapitres qui suivent sont donc tournés vers la recherche de simulations théoriques des phénomènes électromagnétiques associés directement au brasseur et indirectement à l'EST. Après une revue des différentes méthodes numériques utilisées pour représenter une chambre réverbérante, le deuxième chapitre porte sur la description des outils de simulation développés par EADS CCR. Il s'agit d'abord d'un outil basé sur une technique temporelle utilisant la méthode des différences finies (FDTD : Finite Differences in Time Domain). Une autre méthode qui sera perfectionnée pour les besoins de la thèse est basée sur les éléments finis de frontière dans le domaine fréquentiel (BEM : Boundary Element Method). Le perfectionnement apporté à la méthode BEM adopte la technique d'assemblage partiel dont l'avantage est de réduire le temps de calcul nécessaire à la simulation de la rotation du brasseur de modes. En effet, la simulation consiste pour une fréquence donnée à calculer la distribution du champ dans la chambre pour des positions angulaires du brasseur de modes réparties régulièrement. La technique adoptée permet de réduire le volume de calcul en ne tenant compte que de la perturbation engendrée par le brasseur.

Ces simulations seront validées sur les modèles de deux chambres réverbérantes respectivement installées au LRPE et à EADS Airbus. Leur validation se base initialement sur des observables déterministes montrant la comparaison des simulations aux formules analytiques des cavités. Puis la validation de ces méthodes s'appuie sur des observables statistiques permettant d'analyser le comportement de la cavité en fonctionnement surdimensionné, en examinant parallèlement d'éventuelles dérives des lois probabilistes. Les simulations sont ensuite comparées aux résultats issus de l'approche développée dans le premier chapitre, ainsi qu'aux résultats des mesures effectuées dans la chambre réverbérante du LRPE.

Le troisième chapitre est consacré à une exploitation des outils de simulation dans le but d'analyser divers aspects des chambres réverbérantes à brassage de modes. Dans un premier temps, les limites de fonctionnement des chambres réverbérantes sont évaluées. Ces limites sont d'une part de nature spatiale. L'examen de ces limites permet de définir le volume utile de test. D'autre part, elles sont de nature fréquentielle et concernent notamment la fréquence basse d'utilisation des chambres. Cependant, cette limite dépend de nombreux paramètres qui sont, entre autres, le type de brasseur utilisé ou la forme de la cavité. Ainsi l'influence de la forme et des dimensions du brasseur sur les propriétés d'uniformité et

d'isotropie du champ dans la chambre réverbérante est examinée. De plus, l'introduction de l'équipement sous test est susceptible de perturber ces propriétés. La deuxième partie de ce chapitre est donc dirigée vers l'étude de l'influence du volume et de la position d'un équipement métallique sur l'environnement chambre réverbérante.

L'autre aspect étudié concerne les couplages sur des équipements de faible ou de forte directivité. Ces résultats sont confrontés aux couplages sous ondes planes, afin de faire le lien entre CRBM et chambre anéchoïque. Des mesures réalisées au LRPE viendront étayer ces résultats théoriques.

La fin de ce chapitre évalue l'application de la méthode du brassage de modes à la caractérisation de l'environnement interne d'une cavité réelle dans un avion. L'objectif est d'appliquer les essais menés en CRBM directement dans une soute électronique ou dans un cockpit. Ainsi, les propriétés statistiques des CRBM sont estimées lorsque leur environnement interne est complexe : présence d'objets métalliques, de câblages, d'absorbants et d'ouvertures. L'excitation par une illumination sous onde plane qui se couple à travers les ouvertures est également examinée. Des mesures effectuées dans la soute électronique d'un Airbus A320 viennent contrôler la validité de cette méthode.

Finalement, les résultats obtenus durant cette thèse apportent de nombreux éléments sur le comportement électromagnétique des chambres réverbérantes. Ces éléments de compréhension sont alors mis à profit pour établir une procédure d'essais d'immunité en chambre réverbérante.

La méthode de la chambre réverbérante à brassage de modes connaît depuis quelques années un développement important. Des chambres réverbérantes se construisent dans la plupart des laboratoires universitaires de compatibilité électromagnétique (CEM), mais également dans les industries à vocation d'études et de recherches dans le domaine de la CEM. La norme DO-160D [1], qui définit les méthodes d'essais en environnement applicables aux équipements aéronautiques, propose d'ores et déjà l'utilisation de cette méthode en alternative au protocole d'essais en chambre anéchoïque. En outre, un projet de norme IEC [14] est actuellement en cours d'étude. Cela signifie que cette méthode pourra être employée sur tout type d'appareil électronique. Les industries de développement et de production seront donc probablement amenées à se munir d'une chambre réverbérante dans le cadre des essais de certification CEM de leurs équipements ou à faire appel à des laboratoires extérieurs utilisant cette méthode.

Cependant, nombreux sont les doutes qui subsistent sur les performances promises par cette méthode, notamment parce qu'elle est basée sur des notions statistiques. Les travaux réalisés dans cette thèse ont apporté quelques réponses aux principales interrogations touchant la phénoménologie des chambres réverbérantes. Plusieurs approches ont donc été confrontées pour parvenir à simuler de façon objective le fonctionnement de ces chambres. Pour cette raison, la thèse a consisté à analyser le comportement électromagnétique d'une chambre réverbérante à brassage de modes dans l'hypothèse des essais en immunité.

La première approche utilisée s'est appuyée sur le fonctionnement modal d'une cavité. C'est un outil analytique simple permettant de caractériser le comportement électromagnétique d'une cavité en fonctionnement surdimensionné, en superposant plusieurs modes de résonance. Dans ce cas précis, l'interférence modale confère au champ électromagnétique une distribution complexe, voire quasi-aléatoire. La caractérisation de cette distribution de champ relève alors d'une loi statistique qui est le prolongement des lois déterministes modales. Le modèle analytique affecte à ces lois déterministes des poids aléatoires dont le choix caractérise les incertitudes apportées par les éléments perturbateurs de la cavité. Ces différents éléments sont la source émettrice, les câblages, l'équipement et le brasseur mécanique.

Les lois statistiques ont dû être validées par l'emploi d'outils d'analyse, comme le test de Kolmogorov-Smirnov, qui permet d'évaluer le rapprochement de la fonction de répartition du champ dans la cavité à une fonction de répartition statistique connue. Ainsi, il a été mis en évidence que le champ électromagnétique dans une cavité surdimensionnée observe une distribution proche de celle du χ^2 . Ce rapprochement dépend toutefois de nombreux paramètres dont l'influence a été étudiée : le nombre d'échantillons de champ, le nombre de modes contributeurs et la fréquence d'étude. En outre, ce modèle a permis d'identifier certaines limitations de l'approche statistique comme sa signification aux limites basse fréquence et surtout dans le volume utile de la cavité. Les calculs effectués ont vérifié l'ergodisme des variables champs explorées dans l'espace et en fréquence. Cette propriété offre la possibilité de caractériser les cavités en réalisant des mesures par une scrutation fréquentielle plutôt que dans l'espace. Ce modèle offre également d'autres perspectives puisqu'il pourrait par exemple examiner le rôle du coefficient de qualité de l'enceinte sur les limitations de l'approche statistique.

Par contre, pour analyser le comportement d'une chambre réverbérante dont l'environnement interne est complexe puisqu'il contient notamment le brasseur, les antennes et/ou l'équipement sous test, les lois déterministes de la théorie des cavités ne sont plus applicables. Par conséquent, l'utilisation du modèle analytique n'est plus possible.

La deuxième approche employée pour analyser le comportement d'une chambre réverbérante est alors intervenue. Cette approche consiste à utiliser des simulations numériques. Différentes méthodes numériques sont possibles pour représenter les chambres réverbérantes. Une brève revue de ces méthodes, proposée dans cette thèse, a permis d'extraire les aptitudes de chacune d'entre elles à simuler le fonctionnement d'une chambre réverbérante.

Deux méthodes complémentaires ont été retenues et décrites dans cette thèse. La première est basée sur les éléments finis de frontière dans le domaine fréquentiel (BEM). Cette méthode a l'avantage de simuler précisément l'influence électromagnétique de la rotation du brasseur mécanique de modes et de le représenter de façon exacte. De plus, elle réalise cette tâche en des temps de calculs raisonnables : 4 heures sur une machine à 8 processeurs, moyennant des aménagements d'assemblage partiel que nous avons également présentés. Toutefois, ces simulations ne sont réalisées qu'à des fréquences particulières.

L'analyse de la chambre réverbérante sur une large bande de fréquences s'est appuyée sur la seconde méthode : les différences finies dans le domaine temporel (FDTD). Cette méthode offre, par rapport à la précédente, l'avantage de déterminer précisément le coefficient de qualité de la chambre réverbérante.

La validation de ces méthodes a été établie principalement autour de la modélisation de la chambre réverbérante du LRPE. Cette validation s'est déroulée en deux phases. La première s'est appuyée sur des observables déterministes, c'est-à-dire dans le mode de fonctionnement sous-dimensionné de la chambre réverbérante. Les modèles ont donc été confrontés à la théorie des cavités sur les premiers modes de résonance. La deuxième phase s'est intéressée au fonctionnement surdimensionné de la cavité en utilisant les observables statistiques qui avaient été employés par la première approche. Les méthodes numériques ont ainsi reproduit les comportements prévus par cette approche : notamment ceux se rapportant aux distributions de champ, à l'uniformité et à l'isotropie. En outre, la méthode BEM a été confrontée à des résultats de mesures effectuées dans la chambre réverbérante du LRPE. Cette comparaison a montré une concordance sur les niveaux de champ et de puissance, ainsi que sur les propriétés statistiques.

Certaines dérives observées au cours de la validation ont permis de localiser les limites de fonctionnement de la chambre réverbérante et des phénomènes de couplage associés. Ces problèmes ont été abordés dans la troisième partie de la thèse. L'évaluation des limites de fonctionnement en espace a permis de déterminer le volume utile de test. Ce volume défini auparavant dans les normes de façon empirique est ici justifié par la simulation à une distance de $\lambda/5$ par rapport aux parois. En outre, nous avons montré qu'aucune restriction de distance n'est à respecter par rapport au brasseur mécanique.

La détermination de la limite basse fréquence de fonctionnement des chambres réverbérantes est un problème plus complexe. En effet, cette limite dépend de nombreux paramètres : la forme de la cavité, la forme du brasseur mécanique, la nature et le volume de l'équipement sous test... Ces différents aspects ont été abordés au cours de la thèse. Ainsi, une cavité sphérique permet de reculer la limite basse fréquence. Cependant, elle est difficilement exploitable. La forme du brasseur et ses dimensions jouent également un rôle important sur cette limite. Ainsi un système de quatre pales dont les dimensions sont proches de $\lambda/2$ permet de réaliser un brassage efficace.

Les simulations ont aussi mis en évidence l'influence de la présence de l'équipement sous test sur la limite basse fréquence d'exploitation. Un appareil métallique trop volumineux peut décaler cette limite vers le haut. La simulation a montré que le taux de chargement ne devait pas excéder 8% pour ne pas altérer les performances basses fréquences. En outre, nous avons montré que l'usage d'antennes filaires d'émission en présence d'un équipement provoquent des couplages directs qui ont tendance à dégrader les propriétés de la chambre réverbérante. L'utilisation d'antennes directives orientées vers les coins de la chambre doit donc, dans la mesure du possible, être privilégiée.

Pour caractériser les phénomènes de couplage sur les objets installés en chambre réverbérante, les couplages sur des dispositifs assez directif et peu directif ont été simulés. Les prévisions théoriques ont été comparées à des simulations effectuées sous onde plane. Des mesures réalisées dans la chambre anéchoïque et dans la chambre réverbérante du LRPE sont venues étayer les résultats de calcul et ont abouti aux conclusions suivantes :

- Des équipements directifs sont plus réceptifs aux couplages réalisés en chambre anéchoïque, car il est facile d'identifier les zones sensibles de l'objet.
- Pour les équipements peu directifs, le couplage pratiqué en chambre réverbérante est supérieur au couplage sous onde plane. En effet, on conçoit que les ondes brassées dans une chambre réverbérante soient équivalentes à l'illumination produite par un très grand nombre d'ondes planes provenant de toutes les directions. Cette situation est évidemment impossible à reproduire en chambre anéchoïque.

Pour autant, cette conclusion doit être tempérée. Elle est fondée sur des cas particuliers. Une analyse paramétrique serait nécessaire pour généraliser ces conclusions. En effet, les phénomènes de couplage en chambre réverbérante dépendent fortement de l'efficacité du brassage, des fréquences explorées et de la nature de l'équipement soumis aux essais. Mais cette analyse demande une étude approfondie qui dépasse le cadre de cette thèse.

Une autre question abordée dans la thèse concerne l'application de la méthode du brassage de modes à la caractérisation de l'environnement interne des cavités réelles rencontrées sur avion. L'objectif de cette application était d'estimer l'atténuation de structure d'une cavité avion par une mesure plus rapide que la scrutation des niveaux de champ dans la cavité. En outre, on pourrait suggérer d'appliquer la méthode du brassage de modes pour réaliser des essais d'immunité des équipements directement installés dans la cavité avion.

Pour réaliser cette étude, la chambre réverbérante a été complexifiée en y introduisant des éléments métalliques, des câblages, des ouvertures et des absorbants. Les simulations ont montré que le coefficient de qualité influence notablement les propriétés statistiques d'une chambre réverbérante, ainsi que sa limite basse fréquence. Il ne doit être ni trop élevé faute de dégrader l'efficacité du brassage, ni trop faible. Dans la configuration étudiée, un coefficient de qualité inférieur à 1000 a engendré une dérive des propriétés statistiques. Cependant, pour généraliser cette conclusion, il faudrait effectuer une étude plus approfondie de cet aspect par une analyse paramétrique portant sur la nature de la cavité, les fréquences explorées et le type de brasseur utilisé.

Pour adapter le brassage de modes à la mesure d'atténuation de structure de la cavité avion, les conditions d'excitation dans la simulation ont été modifiées en une illumination sous onde plane. Certaines conditions d'éclairement ne permettent pas de produire l'isotropie et l'uniformité du champ dans la cavité. Nous avons montré que l'illumination sous onde plane devait suivre une incidence normale à l'ouverture sous les polarisations horizontale et

verticale pour produire, d'une part, un champ maximum uniforme dans le volume de la cavité et, d'autre part, pour garantir l'isotropie.

Un modèle de soute électronique a été élaboré. Les simulations ont montré que la méthode du brassage de modes est applicable à la caractérisation des cavités réelles. Ces résultats ont été validés par des mesures réalisées dans la soute électronique d'un Airbus A320. L'isotropie et l'uniformité du champ ont pu être établies et les mesures d'atténuation de structure ont montré des niveaux semblables aux valeurs connues.

Finalement, l'ensemble des résultats rassemblés dans la thèse a permis d'établir une procédure d'essais d'immunité en chambre réverbérante à brassage mécanique de modes. Cette procédure est très proche du protocole proposé par la norme DO-160 portant sur les essais appliqués aux équipements aéronautiques. Il faut souligner que la version finale de la norme a été établie en tenant compte des justifications théoriques apportées par la thèse.

Il sera maintenant très intéressant de mettre à profit ces simulations numériques pour caractériser et mettre en place une procédure d'essais d'émission en chambre réverbérante à brassage de modes. En effet, ce moyen d'essais permet de mesurer la puissance totale rayonnée d'un équipement. Mais par rapport aux essais en chambre anéchoïque, la notion de directivité est soit partiellement, soit totalement perdue. Il faudra donc examiner si la directivité joue un rôle majeur sur la compatibilité électromagnétique entre des équipements situés, par exemple, dans une cavité avion. Si tel est le cas, il faudra évaluer dans quelle mesure la perte de directivité en chambre réverbérante est acceptable.

- [1] - EUROCAE ED-14D / RTCA/D0-160D
"Environmental Conditions and Test Procedures for Airborne Equipment - Section 20 : Radio Frequency Susceptibility (Radiated and Conducted)"
Draft #9 (Final Draft), 6 Octobre 2000.
- [2] - P. Degauque, J. Hamelin
"Compatibilité Electromagnétique - Bruits et Perturbations Radioélectriques"
Collection Technique et Scientifique des Télécommunications, Edition Dunod-CNET-ENST, 1990.
- [3] - B.H. Liu, D.C. Chang & M.T. Ma
"Eigenmodes and the Composite Quality Factor in a Reverberating Chamber"
NBS Technical Note 1066, Août 1983.
- [4] - M.W. Zemansky
"Heat and Thermodynamics 5th Edition"
Mc Graw-Hill, 1968.
- [5] - N. Lamblain
"Etude du Brassage Electronique de Modes en Chambre Réverbérante Appliqué aux Mesures d'Immunité Electromagnétique"
Thèse de Doctorat en Electronique, Université de Lille, Novembre 1996.
- [6] - R.H. Price, H.T. Davis & E.P. Wenaas
"Determination of the Statistical Distribution of Electromagnetic-field Amplitudes in Complex Cavities"
Physical Review, Vol. 48, n°6, Décembre 1993.
- [7] - B. Démoulin, L. Kone, C. Gouyer, C. Si Ahmed
"Résumé d'un Etat de l'Art Relatif aux Chambres Réverbérantes à Brassage de Modes"
Rapport interne d'avancement du projet MADERE, Juillet 1999.
- [8] - J.G. Kostas & B. Boverie
"Statistical Model for a Mode-Stirred Chamber"
IEEE Trans. on EMC, Vol. 33, n°4, Novembre 1991.
- [9] - C. Si-Ahmed
"Contribution à l'Etude du Coefficient de Qualité dans une Chambre Réverbérante à Brassage de Modes"
Thèse de Doctorat en Electronique, Université de Lille, Mars 2001.
- [10] - B. Démoulin
"Les Chambres Réverbérantes à Brassage de Modes - Principes et Applications"
9^{ème} Colloque International sur la Compatibilité Electromagnétique, Brest, France, 1998.
- [11] - F. Leferink, J.C. Boudenot & W. van Etten
"Experimental Results Obtained in the Vibrating Intrinsic Reverberation Chamber"
IEEE Int. Symp. on Electromagnetic Compatibility, Washington, USA, Août 2000.

- [12] - J. Perini, L.S. Cohen
"An Alternative Way to Stir the Fields in a Mode Stirred Chamber"
IEEE Int. Symp. on Electromagnetic Compatibility, Washington, USA, Août 2000.
- [13] - M.L. Crawford, G.H. Koepke
"Design, Evaluation and Use of a Reverberation Chamber for Performing Electromagnetic Susceptibility/Vulnerability Measurements"
National Bureau of Standards, Technical Note 1092, April 1986.
- [14] – International Electrotechnical Commission
"Electromagnetic Compatibility - Part 4 : Testing and measurement Techniques - Section 21 : Reverberation Chamber Test Methods"
Projet de Norme IEC 61000421
- [15] - D.A.Hill
"Plane Wave Integral Representation for Fields in Reverberation Chambers"
IEEE Trans. on EMC, Vol. 40, n°3, Août 1998.
- [16]- A. Hald
"Statistical Theory with Engineering Applications"
John Wiley & Sons, Inc, 1952.
- [17] - L. Capetta, M. Feo, V. Fiumara, V. Pierro & I.M. Pinto
"Electromagnetic Chaos in Mode-Stirred Reverberation Enclosures"
IEEE Trans. on EMC, Vol. 40, n°3, Août 1998.
- [18] - F. Hoëppe, P.N. Gineste, L. Kone, B. Demoulin
"Concept de Groupe de Modes appliqué au Calcul de la Distribution du Champ Electromagnétique dans des Cavités Réverbérantes"
10^{ème} Colloque International sur la Compatibilité Electromagnétique, pp. 318-323,
Clermont-Ferrand, France, Mars 2000.
- [19] - S. Siegel
"Nonparametric Statistics for the Behavioral Sciences"
McGraw-Hill Book Compagny, Inc, 1956.
- [20] - M. Höijer; A.M. Andersson, O. Lundén, M. Bäckström
"Numerical Simulations as a Tool for Optimizing the Geometrical Design of Reverberation Chambers"
IEEE Int. Symp. on Electromagnetic Compatibility, Washington, USA, Août 2000.
- [21] - K. Harima
"FDTD Analysis of Electromagnetic Fields in a Reverberation Chamber"
IEICE Trans. Commun., Vol. E81-B, n°10, Octobre 1998.
- [22] - F. Hoëppe, S. Baranowski, P.N. Gineste, B. Demoulin
"Use of a Statistical Gauge to Test Theoretical Simulations of the Field Distribution in Over Sized Electromagnetic Cavities"
4th European Symposium on Electromagnetic Compatibility, vol. 1, pp. 557-561, Bruges,
Belgique, Septembre 2000.

- [23] - L. Bai, L. Wang, B. Wang, J. Song
"Reverberation Chamber Modeling Using FDTD"
IEEE International Symp. on Electromagnetic Compatibility, Seattle, USA, Août 1999.
- [24] - D.I. Wu, D.C. Chang
"The Effect of an Electrically Large Stirrer in a Mode-Stirred Chamber"
IEEE Trans. on EMC, Vol. 31, n°2, Mai 1989.
- [25] - P. Besnier
"Analyse modale d'une chambre réverbérante à brasseur de modes à l'aide d'une simulation numérique de la propagation du champ électromagnétique basée sur la méthode TLM"
8^{ème} Colloque International sur la Compatibilité Electromagnétique, pp. 159-164, Lille, France, Septembre 1996.
- [26] - C.F. Bunting, K.J. Moeller, C.J. Reddy, S.A. Scearce
"Finite Element Analysis of Reverberation Chambers : A Two-Dimensional Study at Cutoff"
IEEE Int. Symp. on Electromagnetic Compatibility, Denver, USA, Août 1998.
- [27] - D.H. Kwon, R.J. Burkholder, P.H. Pathak
"Ray Analysis of Electromagnetic Field Build-Up and Quality Factor of Electrically Large Shielded Enclosures"
IEEE Trans. on EMC, Vol. 40, n°1, Février 1998.
- [28] - D. A. Hill
"A Reflection Coefficient Derivation for the Q of a Reverberation Chamber"
IEEE Trans. on EMC, Vol. 38, n°4, Novembre 1996.
- [29] - C. Fiachetti, B. Michielsen, F. Issac, A. Reineix
"Etude d'un modèle de champ aléatoire pour la modélisation du couplage sur un équipement électronique dans une chambre réverbérante à brassage de modes"
10^{ème} Colloque International sur la Compatibilité Electromagnétique, pp. 324-329, Clermont-Ferrand, France, Mars 2000.
- [30] - L. Musso, B. Démoulin, F.G. Canavero, V. Bérat
"Susceptibility of a Transmission Line in Two Reverberation Chambers"
COST 261, Workshop on EMC Measurement Techniques for Complex and Distributed Systems, Lille, France, Juin 2001.
- [31] - M. Cauterman, D. Lecointe et J.C. Bolomey
"Modélisation des chambres réverbérantes, application à l'analyse du spectre instantané d'ondes planes"
10^{ème} Colloque International sur la Compatibilité Electromagnétique, pp. 330-333, Clermont-Ferrand, France, Mars 2000.
- [32] - A. Taflove
"Computational Electrodynamics: the FDTD Method"
Artech House, 1995.

- [33] - M. Ney
"Electromagnetic Modeling in EMC"
14th International Zurich Symposium on Electromagnetic Compatibility, pp. 385-388,
Zurich, Suisse, Février 2001.
- [34] - F. Hoëppe, P.N. Gineste, L. Kone, B. Demoulin
*"Simulation Numérique du Brassage de Modes et Confrontation avec des Mesures de
Fonction Cumulative de Distribution d'Amplitude du Champ Electromagnétique"*
10^{ème} Colloque International sur la Compatibilité Electromagnétique, pp. 324-329,
Clermont-Ferrand, France, Mars 2000.
- [35] - Y. Huang
"Asymmetric Reverberation Chambers for EMC Measurements"
EMC York 99, Conference Publication n° 464, pp. 65-68, 1999.
- [36] - F. Hoëppe, P.N. Gineste, B. Démoulin
"Numerical Modelling for Mode-Stirred Chamber"
14th International Zurich Symposium on Electromagnetic Compatibility, Zurich, Suisse,
Février 2001.
- [37] - H.A. Bethe
"Theory of diffraction by small holes"
The Physical Review, vol. 66, n° 7 et 8, octobre 1944.
- [38] - F. Hoëppe, P.N. Gineste, B. Démoulin, L. Kone, F. Flourens
"Numerical Predictions Applied to Mode Stirred Reverberation Chambers"
Reverberation Chamber, Anechoic Chamber and OATS Users Meeting, Seattle, USA,
Juin 2001.
- [39] - P. Poincelot
"Précis d'Electromagnétique Théorique"
Dunod.
- [40] – J. Lelong-Ferrand, J.M. Arnaudès
"Cours de Mathématiques - Tome 2 - Analyse"
Dunod.