

UNIVERSITE SAAD DAHLAB DE BLIDA

Faculté des Sciences de l'Ingénieur
Département de Génie Mécanique

MEMOIRE DE MAGISTER

Spécialité : Construction Mécanique

ETUDE ET CHOIX DES MATERIAUX UTILISES DANS L'ISOLATION VIBROACOUSTIQUE DES PANNEAUX DE CARROSSERIE AUTOMOBILE

Par :

TELDJI Smail

Devant le jury composé de :

Y. BENKHEDDA	Professeur	(U.S.D. Blida)	Président
M. DERBAL	Maître de Conférences (A)	(U.S.D. Blida)	Examineur
R. TIBERKAK	Maître de Conférences (B)	(U.S.D. Blida)	Invité
A. AIAD	Professeur	(U.S.D. Blida)	Rapporteur

BLIDA, Février 2012

RESUMÉ

La réduction du bruit et vibrations structurels est un enjeu économique de première importance et constitue un des soucis majeurs des concepteurs de l'industrie du transport en général et de celle de l'automobile en particulier. En effet, l'interaction entre les vibrations de la structure et l'environnement donne naissance à un rayonnement acoustique pouvant être très nocif s'il n'est pas régulé à travers un contrôle et réduction. Dans ce cadre, l'isolation passive jouit d'un intérêt particulier par la caractérisation des matériaux absorbants. Cette technique est très robuste, simple à mettre en œuvre et moins coûteuse que les deux autres techniques active et hybride.

Dans le domaine d'automobile, les matériaux les plus utilisés dans l'isolation passive vibroacoustique sont de type poreux, vu leur haute qualité d'absorption en hautes fréquences; ils jouent le rôle d'amortissement acoustique du bruit.

Dans ce travail, une étude de matériaux spécifiques, tels les matériaux fibreux, les mousses mélamines, les mousses polyuréthannes et les laines de verre, sera menée. A l'issue de cette étude, des applications de simulation, basées sur le modèle généralisé de Biot-Allard seront effectuées, sur des modèles simples, tels les plaques pour déterminer la qualité d'absorption des matériaux poreux les plus répandus dans l'isolation vibroacoustique des panneaux de carrosserie automobile.

Mots clés : isolation vibroacoustique, matériaux poreux, modèle de Biot, techniques passives, bruit d'automobile.

ABSTRACT

The reduction of the noise and structural vibrations is an economic stake of first importance and constitute one of the majors concerns of the designers of the general transports industry and that of the car in particular. Indeed, the interaction between the structure vibrations and the environment give rise to an acoustic radiation able to be very noxious if it is not regulated by a control and reduction. In this context, the passive isolation enjoys a particular interest by the characterisation of the absorbing materials. This technique is very robust, simple to implement and less expensive than the two other active and hybrid techniques.

In the car domain, the most utilised materials in passive vibroacoustic isolation are the porous type, also since their high quality of absorption in high frequencies; they play the role of the acoustic damping of the noises.

In this work, a specifics materials study, such the fibrous materials, the melamine foams, the polyurethanes foams and the glass wools, will be carried. After this study, applications of simulation, based to the generalised model of Biot-Allard will be effected, on simple models, such the plates to determine the absorbing quality of the porous materials most widespread in the vibroacoustic isolation of the panels of car body.

Keywords: vibroacoustic isolation, porous materials, Biot model, passive techniques, car noise.

techniques passives, bruit d'automobile.

ملخص

التقليل من الضجيج والاهتزازات الهيكلية هو رهان اقتصادي ذات أهمية كبيرة ويعد من بين احد اشغالات المبتكرين في مجال صناعات النقل عامة و صناعة السيارات خاصة. حيث أن التفاعل بين اهتزازات الهيكل مع المحيط ينتج عنه نشأة إشعاعات صوتية قد تكون مضرّة إن لم تضبط بجهاز ضبط و تخفيض. في هذا الإطار، للجزل غير المتفاعل نصيب خاص لتمييز المواد الممتصة. هذه التقنية تتميز بقوتها، سهولة اجازها و سعرها المنخفض مقارنة بالتقنيتين الأخرى بين المتفاعلة و الهجينة.

في مجال السيارات، المواد الأكثر استعمالا في الجزل الغير المتفاعل الاهتزازي-الصوتي هي من ذوات المسامات، وهذا لميزتها العالية لامتصاص في الترددات العالية، حيث تعمل عمل المطفات الصوتية للضجيج.

في هذا الأتجاه، سنقوم بدراسة لمواد نوعية، مثل ذوات الألياف، الرغوية و خيوط الزجاج. في غضون هذه الدراسة، سنقوم بتطبيقات رقمية تستند أساسا على المثل المعم لـ Biot-Allard، في أمثلة بسيطة مثل الصفائح، لتحديد مدى نوعية الامتصاص لدى المواد ذات المسامات الأكثر شيوعا في الجزل الاهتزازي-الصوتي لمعالم هيكل سيارة.

كلمات مفتاحية: الجزل الاهتزازي الصوتي، المواد ذات المسامات، مثل Biot، التقنيات الغير المتفاعلة، ضجيج السيارات

REMERCIEMENTS

Au terme de ce travail, je tiens à remercier d'abord Dieu le tout puissant de m'avoir donné la volonté et le courage pour terminer ce mémoire.

J'exprime tout particulièrement ma reconnaissance et mes sincères remerciements au Professeur A.Aiad de m'avoir encadré, pour l'intérêt attentif, la rigueur qu'il a portés à ce travail et surtout sa disponibilité.

Je tiens à remercier également les membres du jury pour avoir accepté de juger ce travail.

Je remercie tous mes enseignants d'avoir contribué à ma formation.

J'exprime ma gratitude à ma famille qui m'a soutenu tout au long de ma vie ainsi qu'à ma femme pour son aide moral.

Je remercie tous mes amis pour leur aide surtout Sadouni et Laataf.

Ma reconnaissance à tous ceux qui m'ont aidé de près ou de loin à terminer ce travail.

SOMMAIRE

INTRODUCTION GENERALE

CHAPITRE 1 : GENERALITES

1.1. Introduction	5
1.2. Matériaux absorbants utilisés dans l'industrie automobile	5
1.2.1. Matériaux fibreux	6
1.2.1.1. Fabrication de la laine de verre	7
1.2.1.2. Structure et propriétés microscopiques	9
1.2.1.3. Propriétés macroscopiques	9
1.2.2. Les mousses	10
1.2.2.1. Formation des mousses	11
1.2.2.2. Comportement mécanique	13

CHAPITRE 2 : LE CONTROLE VIBROACOUSTIQUE

2.1. Différentes techniques de contrôle vibroacoustique	14
2.1.1. Contrôle passif	14
2.1.2. Contrôle actif	14
2.1.3. Contrôle hybride (actif-passif)	18
2.2. Conclusion	21

CHAPITRE 3 : ETUDE THEORIQUE DES MATERIAUX POREUX

3.1. Description qualitative	22
3.2. Principes de dissipation des matériaux poreux	23
3.3. La méthode des éléments finis pour les matériaux poreux	24
3.3.1. Approche de Biot	25
3.3.1.1. Modèle de Biot-Allard généralisé	26
3.3.1.2. Différents types de formulations	27
3.3.1.3. Hypothèses de modèle généralisé de Biot-Allard	29
1) Echelle macroscopique	29
2) Grande longueur d'onde	30
3) Elasticité linéaire	30
4) Régime harmonique	31
3.3.1.4. Relations contraintes-déformations	34
3.3.1.5. Equations du mouvement	35
3.3.1.5.1. Effets visqueux	36
3.3.1.5.2. Effets thermiques	36
3.3.2. Formulation mixte déplacement-pression (u, p)	37
3.3.2.1. Principe de la formulation mixte (u, p)	38
3.3.2.1.1. Phase solide	38
3.3.2.1.2. Phase fluide	40
3.3.2.2. Formulation intégrale faible	41

3.3.2.3. Puissances dissipées	42
3.4. Conclusion	43
CHAPITRE 4 : MODELISATION ET APPLICATION	
4.1. Introduction	44
4.2. Propriétés mécaniques des poreux utilisés	44
4.3. Propriétés du fluide saturant	45
4.4. Domaines des fréquences	46
4.5. Propriétés géométriques des plaques étudiées	46
4.6. Applications	47
4.6.1. Modèle porte	47
4.6.1.1. Dimensions de la plaque	47
4.6.1.2. Choix des éléments	47
4.6.1.3. Conditions aux limites appliquées à la plaque	49
4.6.1.4. Contraintes appliquées à la plaque	49
4.6.2. Modèle plafond	50
4.6.2.1. Dimensions de la plaque	50
4.6.2.2. Les conditions aux limites	51
4.6.2.3. Contraintes subies par la plaque	52
4.6.3. Modèle tableau de bord	52
4.6.3.1. Dimensions du problème	52

4.6.3.2. Conditions aux limites	53
4.6.3.3. Les contraintes	54
4.7. Organigramme de résolution	54
4.8. Résultats obtenus sous forme de plots et tableaux	55
4.8.1. Modèle porte	55
4.8.1.1. Fibre textile	55
4.8.1.2. Laine de verre	57
4.8.1.3. Mousse mélamine	60
4.8.1.4. Mousse polyuréthane	63
4.8.2. Modèle plafond	65
4.8.2.1. Fibre textile	65
4.8.2.2. Laine de verre	67
4.8.2.3. Mousse mélamine	70
4.8.2.4. Mousse polyuréthane	73
4.8.3. Modèle tableau de bord	75
4.8.3.1. fibre textile	75
4.8.3.2. laine de verre	77
4.8.3.3. Mousse mélamine	80
4.8.3.4. Mousse polyuréthane	83
4.9. Comparaison des résultats	85

CONCLUSION GENERALE

BIBLIOGRAPHIE

ANNEXE

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 2.1	: Comparaison des stratégies de contrôles actifs	17
Tableau 4.1	: Propriétés mécaniques des poreux	44
Tableau 4.2	: Propriétés du fluide saturant	45
Tableau 4.3	: Pressions obtenues pour la fibre textile, modèle porte	56
Tableau 4.4	: Pressions obtenues pour la laine de verre, modèle porte	58
Tableau 4.5	: Pressions obtenues pour la laine de verre à 6 MHz, modèle porte	59
Tableau 4.6	: Pressions obtenues pour la mousse mélamine, modèle porte	61
Tableau 4.7	: Pressions obtenues pour la mousse mélamine à 9 MHz, modèle porte	62
Tableau 4.8	: Pressions obtenues pour la mousse polyuréthane, modèle porte	64
Tableau 4.9	: Pressions obtenues pour la fibre textile, modèle plafond	66
Tableau 4.10	: Pressions obtenues pour la laine de verre, modèle plafond	68
Tableau 4.11	: Pressions obtenues pour la laine de verre à 6 MHz, modèle plafond	69
Tableau 4.12	: Pressions obtenues pour la mousse mélamine, modèle plafond	71
Tableau 4.13	: Pressions obtenues pour la mousse mélamine à 9 MHz, modèle plafond	72
Tableau 4.14	: Pressions obtenues pour la mousse polyuréthane, modèle plafond	74
Tableau 4.15	: Pressions obtenues pour la fibre textile, modèle tableau de bord	76
Tableau 4.16	: Pressions obtenues pour la laine de verre, modèle tableau de bord	78
Tableau 4.17	: Pressions obtenues pour la laine de verre à 6 MHz, modèle tableau de bord	79
Tableau 4.18	: Pressions obtenues pour la mousse mélamine, modèle tableau de bord	81

Tableau 4.19	: Pressions obtenues pour la mousse mélamine à 9 MHz, modèle tableau de bord	82
Tableau 4.20	: Pressions obtenues pour la mousse polyuréthane, modèle tableau de bord	84
Tableau 4.21	: Bruits maximums transmis	86

LISTE DES FIGURES

Figure 1.1	: Matériaux fibreux	6
Figure 1.2	: Laine de verre	7
Figure 1.3	: Chaîne de fabrication de matelas de laines de verre	8
Figure 1.4	: Mousses de polyuréthane	10
Figure 1.5	: Mousse mélamine	11
Figure 1.6	: Représentation schématique des étapes du moussage	12
Figure 2.1	: Schémas pour le contrôle actif	16
Figure 2.2	: Configurations de contrôle hybride	19
Figure 3.1	: Schématisation d'un milieu poreux selon Coussy	22
Figure 3.2	: Echelle macroscopique	30
Figure 3.3	: Hypothèse de grande longueur d'onde	30
Figure 3.4	: Profils des vitesses dans un pore cylindrique	33
Figure 3.5	: Représentation d'un matériau poreux diphasique d'après la formulation (u, p)	38
Figure 4.1	: Domaines des fréquences	46
Figure 4.2	: Dimensions de la plaque poreuse, modèle porte	47
Figure 4.3	: Élément CPT 215	48
Figure 4.4	: Conditions aux limites, modèle porte	49
Figure 4.5	: Pression appliquée, modèle porte	50
Figure 4.6	: Dimensions de la plaque poreuse, modèle plafond	50
Figure 4.7	: Conditions aux limites, modèle plafond	51
Figure 4.8	: Pression appliquée, modèle plafond	52
Figure 4.9	: Dimensions de la plaque poreuse, modèle tableau de bord	53
Figure 4.10	: Conditions aux limites, modèle tableau de bord	53
Figure 4.11	: Pression appliquée, modèle tableau de bord	54
Figure 4.12	: Organigramme de résolution	54
Figure 4.13	: la pression propagée dans la fibre textile, modèle porte à 3 KHz	58

Figure 4.14	: la pression propagée dans la fibre textile, modèle porte à 600 KHz	59
Figure 4.15	: la pression propagée dans la fibre textile, modèle porte à 1 MHz	59
Figure 4.16	: la pression propagée dans la fibre textile, modèle porte à 3 MHz	60
Figure 4.17	: la pression propagée dans la laine de verre, modèle porte à 3 KHz	61
Figure 4.18	: la pression propagée dans la laine de verre, modèle porte à 600 KHz	62
Figure 4.19	: la pression propagée dans la laine de verre, modèle porte à 1 MHz	62
Figure 4.20	: la pression propagée dans la laine de verre, modèle porte à 3 MHz	63
Figure 4.21	: la pression propagée dans la laine de verre, modèle porte à 6 MHz	64
Figure 4.22	: la pression propagée dans la mousse mélamine, modèle porte à 3 KHz	65
Figure 4.23	: la pression propagée dans la mousse mélamine, modèle porte à 600KHz	66
Figure 4.24	: la pression propagée dans la mousse mélamine, modèle porte à 1 MHz	66
Figure 4.25	: la pression propagée dans la mousse mélamine, modèle porte à 3 MHz	67
Figure 4.26	: la pression propagée dans la mousse mélamine, modèle porte à 9 MHz	68
Figure 4.27	: la pression propagée dans la mousse polyuréthane, modèle porte à 3 KHz	69
Figure 4.28	: la pression propagée dans la mousse polyuréthane, modèle porte à 600 KHz	70
Figure 4.29	: la pression propagée dans la mousse polyuréthane, modèle porte à 1 MHz	70
Figure 4.30	: la pression propagée dans la mousse polyuréthane, modèle porte à 3 MHz	71
Figure 4.31	: la pression propagée dans la fibre textile, modèle plafond à 3 KHz	72
Figure 4.32	: la pression propagée dans la fibre textile, modèle plafond à 600 KHz	73
Figure 4.33	: la pression propagée dans la fibre textile, modèle plafond à 1 MHz	73
Figure 4.34	: la pression propagée dans la fibre textile, modèle plafond à 3 MHz	74
Figure 4.35	: la pression propagée dans la laine de verre, modèle plafond à 3 KHz	75
Figure 4.36	: la pression propagée dans la laine de verre, modèle plafond à 600 KHz	76
Figure 4.37	: la pression propagée dans la laine de verre, modèle plafond à 1 MHz	76
Figure 4.38	: la pression propagée dans la laine de verre, modèle plafond à 3 MHz	77
Figure 4.39	: la pression propagée dans la laine de verre, modèle plafond à 6 MHz	78
Figure 4.40	: la pression propagée dans la mousse mélamine, modèle plafond à 3KHz	79

Figure 4.41	: la pression propagée dans la mousse mélamine, modèle plafond à 600 KHz	80
Figure 4.42	: la pression propagée dans la mousse mélamine, modèle plafond à 1 MHz	80
Figure 4.43	: la pression propagée dans la mousse mélamine, modèle plafond à 3 MHz	81
Figure 4.44	: la pression propagée dans la mousse mélamine, modèle plafond à 9 MHz	82
Figure 4.45	: la pression propagée dans la mousse polyuréthane, modèle plafond à 3 KHz	83
Figure 4.46	: la pression propagée dans la mousse polyuréthane, modèle plafond à 600 KHz	84
Figure 4.47	: la pression propagée dans la mousse polyuréthane, modèle plafond à 1MHz	84
Figure 4.48	: la pression propagée dans la mousse polyuréthane, modèle plafond à 3MHz	85
Figure 4.49	: la pression propagée dans la fibre textile, modèle tableau de bord à 3KHz	86
Figure 4.50	: la pression propagée dans la fibre textile, modèle tableau de bord à 600 KHz	87
Figure 4.51	: la pression propagée dans la fibre textile, modèle tableau de bord à 1MHz	87
Figure 4.52	: la pression propagée dans la fibre textile, modèle tableau de bord à 3MHz	88
Figure 4.53	: la pression propagée dans la laine de verre, modèle tableau de bord à 3KHz	89
Figure 4.54	: la pression propagée dans la laine de verre, modèle tableau de bord à 600 KHz	90
Figure 4.55	: la pression propagée dans la laine de verre, modèle tableau de bord à 1MHz	90
Figure 4.56	: la pression propagée dans la laine de verre, modèle tableau de bord à 3MHz	91
Figure 4.57	: la pression propagée dans la laine de verre, modèle tableau de bord à 6MHz	92
Figure 4.58	: la pression propagée dans la mousse mélamine, modèle tableau de bord à 3KHz	93
Figure 4.59	: la pression propagée dans la mousse mélamine, modèle tableau de bord à 600 KHz	94
Figure 4.60	: la pression propagée dans la mousse mélamine, modèle tableau de bord à 1MHz	94

Figure 4.61	: la pression propagée dans la mousse mélamine, modèle tableau de bord à 3MHz	95
Figure 4.62	: la pression propagée dans la mousse mélamine, modèle tableau de bord à 9MHz	96
Figure 4.63	: la pression propagée dans la mousse polyuréthane, modèle tableau de bord à 3KHz	97
Figure 4.64	: la pression propagée dans la mousse polyuréthane, modèle tableau de bord à 600 KHz	98
Figure 4.65	: la pression propagée dans la mousse polyuréthane, modèle tableau de bord à 1 MHz	98
Figure 4.66	: la pression propagée dans la mousse polyuréthane, modèle tableau de bord à 3 MHz	99

LISTE DES SYMBOLES

u	: déplacement de la phase solide
U	: déplacement de la phase fluide
P	: la pression dans les pores
k_0'	: perméabilité thermique
V_M	: élément de volume
ρ_s	: masse volumique de matériau constituant le squelette
ϕ	: porosité
$[H_s]$: matrice d'élasticité de Hooke
η_s	: coefficient d'amortissement
$[\tilde{H}_s]$: matrice d'élasticité complexe
E	: module d'Young
ν	: coefficient de Poisson
V_f	: volume du fluide
V_t	: volume total du matériau
α_∞	: tortuosité
ρ_e	: masse volumique du fluide saturant le matériau
ρ_0	: masse volumique de l'air au repos
σ	: résistivité
Q_v	: débit volumique
Δp	: différence de pression
μ	: viscosité de l'air
k_0	: perméabilité statique de l'air

Λ : longueur caractéristique visqueuse

δ : épaisseur de la couche limite visqueuse

S_i : interface de contact fluide-squelette

\dot{U}_m : vitesse microscopique d'un fluide parfait incompressible dans les pores

Λ' : longueur caractéristique thermique

δ_{ij} : symbole de Kronecker

λ : coefficient de Lamé

ν : coefficient de Poisson macroscopique

η_s : coefficient d'amortissement structural

ρ_1 : masse volumique de la phase solide

ρ_{11} : masses volumiques apparentes de la phase solide

ρ_{22} : masses volumiques apparentes de la phase fluide

ρ_{12} : facteur de couplage massique entre les deux phases

\tilde{K}_e : module de compression dynamique complexe

γ : rapport des chaleurs spécifiques de l'air

P_r : nombre de Prandtl

α : coefficient de Biot

T_0 : température de l'air au repos

c_0 : vitesse de son

K_a : module d'incompressibilité adiabatique

Z_0 : impédance caractéristique

f_c : fréquence caractéristique de Biot

f_d : fréquence de diffusion de Biot

F : fréquence d'excitation

P : pression d'excitation

BF : basses fréquences

HF : hautes fréquences

P_0 : pression acoustique de référence

INTRODUCTION GENERALE

La lutte contre le bruit et plus généralement contre les nuisances sonores et vibratoires constitue un véritable enjeu scientifique et technologique dans de nombreux secteurs de l'industrie tels que l'automobile, l'aéronautique, l'aérospatiale, l'instrumentation et bien d'autres.

Réduire les nuisances sonores, limiter la fatigue des matériaux, ou encore améliorer la stabilité d'un système, la transmission des vibrations à d'autres systèmes et réduire le bruit interne ou externe dû au rayonnement acoustique sont quelques-uns des buts recherchés par les vibroacousticiens. Les retombées industrielles de ces recherches sont considérables [1 à 3].

Si la distinction entre contrôle acoustique et contrôle vibratoire n'est pas toujours très prononcée tant le couplage entre ces phénomènes est fort, la finalité recherchée est généralement très différente [4].

Le contrôle vibratoire tend à limiter l'amplitude des vibrations d'une structure afin d'améliorer ou de fiabiliser son fonctionnement. Par exemple, la diminution des vibrations de certains articles de sports (skis, raquettes) apporte confort et performances supplémentaires.

Le contrôle de vibration d'une structure permet également d'augmenter sa résistance à la fatigue donc d'augmenter sa durée de vie.

Le contrôle acoustique quand a lui, cherche à réduire le niveau acoustique dans des espaces clos (conduits, salles...) ou en champ libre [5]. Ce type de contrôle a d'abord été appliqué dans des systèmes anti-bruit. Ceux-ci sont basés sur l'émission d'une onde acoustique secondaire interagissant avec l'onde primaire afin de diminuer le niveau acoustique dans une région donnée de l'espace. Ces systèmes sont généralement utilisés pour les champs acoustiques simples, tels que ceux présents dans les guides d'onde (conduits d'aération...).

Le contrôle acoustique peut également viser à réduire le bruit à sa source, en agissant sur le comportement vibratoire de la structure responsable de la perturbation sonore. C'est le cas notamment des parois où la réduction des

vibrations limite son rayonnement consécutif à des excitations acoustiques et/ou solidiennes. Dans ce cas, le contrôle acoustique est donc obtenu par un contrôle vibratoire de la source, mettant en exergue le couplage direct existant entre ces deux phénomènes. On parle alors de contrôle vibroacoustique [6].

Les domaines concernés par la lutte contre le bruit sont nombreux [7 à 11] et requièrent pour chacun une analyse précise et raisonnée des solutions adaptées. Citons par exemple le bâtiment (isolation, cloisons, double-vitrages...) qui doit répondre à des normes bien définies et de plus en plus drastiques, les appareils électroménagers que nous utilisons dans la vie courante, les applications plus confidentielles comme celles de l'armée ou de l'aérospatiale. Dans le domaine de l'aéronautique, on cherche à réduire le bruit des avions à tous les niveaux [10, 12, 13], pour obtenir des atténuations importantes : sources, conditions de décollage ou d'atterrissage, bruit de jet et bien sûr traitement des nacelles.

Dans le domaine de l'automobile, les constructeurs doivent faire face à de nouvelles exigences de bruit [14], tandis que les véhicules s'allègent en vue de réduire leur coût et leur consommation d'énergie. On cherche à produire des véhicules confortables et économiques. En outre, la conception acoustique est également devenue aussi un enjeu social et commercial [1, 15 à 17]. Cette dimension, longtemps ignorée dans les contraintes de conception des véhicules, se retrouve aujourd'hui souvent dans les dossiers d'appel d'offres, y compris dans ceux des sous-traitants ne maîtrisant qu'une partie du projet.

Pour cela, les chercheurs se penchent de plus en plus sur la question de la maîtrise du son rayonné par les structures. Des études en psychoacoustique [7, 18] mettent en évidence le lien entre la gêne ressentie et le niveau du son rayonné par les structures.

La diminution de bruit implique la mise en oeuvre de deux outils essentiels : la prédiction du bruit et son atténuation. Ces deux outils sont complémentaires, car pour aboutir à un contrôle efficace, soit par réduction des vibrations (amortissement structural) soit par absorption du bruit, il est indispensable de

disposer de méthodes de prédiction du bruit et des vibrations efficaces, précises et peu coûteuses.

Les solutions techniques de réduction des niveaux sonores sont de trois ordres :

- Il est possible d'annuler le son ou les vibrations une fois propagés, par un système de contrôle actif antibruit [19], à l'aide d'un dispositif électromécanique, où l'on oppose à l'onde originale une onde secondaire de telle sorte que la somme des perturbations s'annule. Cette méthode, dite active, plutôt adaptée aux basses fréquences, peut être délicate à mettre en place et nécessite une certaine maintenance.
- La méthode passive [18, 20 à 22], repose sur l'isolation et l'absorption phoniques au moyen de matériaux isolants et absorbants. Cette méthode est souvent utilisée en haute fréquence. Elle est caractérisée par la simplicité de sa mise en œuvre et son coût relativement modéré.
- Enfin, la méthode hybride (passive-active) [23, 24], combine les propriétés passives d'un matériau absorbant et les performances d'un système de contrôle actif.

Notre étude se concentre particulièrement sur l'étude et le choix des matériaux absorbants utilisés dans l'isolation passive des nuisances sonores des panneaux de carrosserie automobile. L'étude est envisagée suivant les approches théorique et numérique à travers de la simulation sur modèles.

Le mémoire se présente en quatre chapitres. Le premier chapitre est consacré à des généralités. Dans le deuxième chapitre on présente l'état de l'art du contrôle vibroacoustique. Le troisième chapitre décrit l'étude théorique de l'isolation passive des bruits. Quand au quatrième chapitre, il est consacré à l'étude numérique et modélisation des plaques absorbantes utilisées dans la carrosserie automobile.

CHAPITRE 1 : GENERALITES

1.1. INTRODUCTION

Le confort acoustique est devenu un critère discriminant pour les véhicules modernes tant les exigences en matière de réduction du bruit sont de plus en plus fortes. Nous nous intéressons dans cette étude au calcul de la performance acoustique des matériaux utilisés dans l'isolation acoustique passive acoustique [18, 25 à 27] des parois d'automobile. Ces parois sont généralement composées de la structure du véhicule sur laquelle sont ajoutés des composants satisfaisant plusieurs fonctions : acoustique, mécanique, décors et thermique [28, 29].

Pour leur grande qualité acoustique, on rencontre souvent des matériaux absorbants tels des laines de verres, des feutres, des mousses synthétiques ou encore des fibreux [26, 30, 31]. D'un point de vue théorique ces matériaux sont rangés dans la catégorie poreuse [3, 5, 21, 32]. Il est possible de voir se propager dans de tels milieux des ondes acoustiques tant dans la phase solide que dans la phase fluide. Notre étude consiste à modéliser, dans une bande de hautes fréquences, des plaques poreuses, pour déterminer leurs propriétés acoustiques.

1.2. MATERIAUX ABSORBANTS UTILISES DANS L'INDUSTRIE AUTOMOBILE

Les matériaux absorbant l'énergie acoustique, les plus répandus dans l'industrie automobile, sont de type poreux [20] vu leur haute qualité absorbante, ils sont: des fibreux (laines de roche, fibres de verre, fibre textile...), des mousses (mélamines, polymères, polyuréthanes,...), des feutres ou des structures multi-couches consistant en l'assemblage de plusieurs matériaux.

1.2.1. Matériaux fibreux



Figure 1.1 : Matériaux fibreux [33]

Les matériaux fibreux rencontrés dans des applications liées au transport sont constitués généralement de laines minérales [6, 34]. Les trois principales variétés de laines minérales utilisées sont :

- les laines de verre fabriquées généralement à partir de sable et de verre recyclé (calcin),
- les laines de roche produites à partir de roches volcaniques,
- les laines de laitier réalisées à partir de matières recyclées en provenance de hauts-fourneaux.

Le choix entre laine de verre et laine de roche se fait en fonction des applications [26]: lorsque la souplesse du matériau est nécessaire, les laines de verre sont choisies. Dans le cas où le matériau subit essentiellement des chargements en compression, les solutions en laines de roche sont à privilégier.

Dans l'industrie automobile, on trouve plus les matériaux de type laine de verre utilisés comme isolants acoustiques et thermiques.

1.2.1.1 Fabrication de la laine de verre

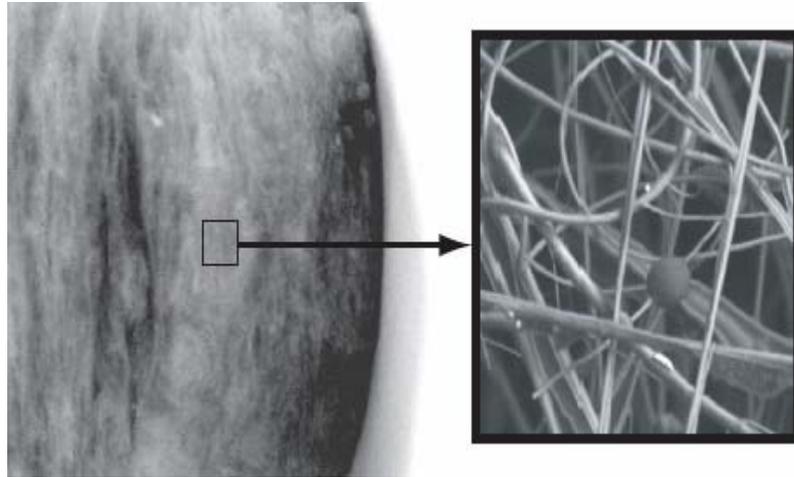


Figure 1.2 : Laine de verre [6]

Les laines de verre sont fabriquées à partir de diverses matières premières naturelles [6, 34]: sable, calcaire, dolomie, phélithe, bore, calcin de verre, carbonate de soude,...etc. Des matériaux recyclés tels que le verre des vitres, le verre automobile ou des bouteilles ainsi que les rognures provenant du processus de production sont de plus en plus utilisés dans la fabrication de la laine de verre et peuvent représenter 30 à 60 % des matières premières intermédiaires.

Une chaîne de fabrication de matelas de laine de verre est représentée par la figure 1.3. Les matières premières sont tout d'abord concassées puis fondues dans une cuve à très haute température (environ 1450 °C). Après fusion, le mélange est étiré à travers une assiette percée de milliers de trous et animée d'une rotation rapide pour obtenir des fibres. Un liant est alors injecté afin de « coller » les fibres entre elles et d'assurer ainsi la cohésion et la tenue mécanique des produits.

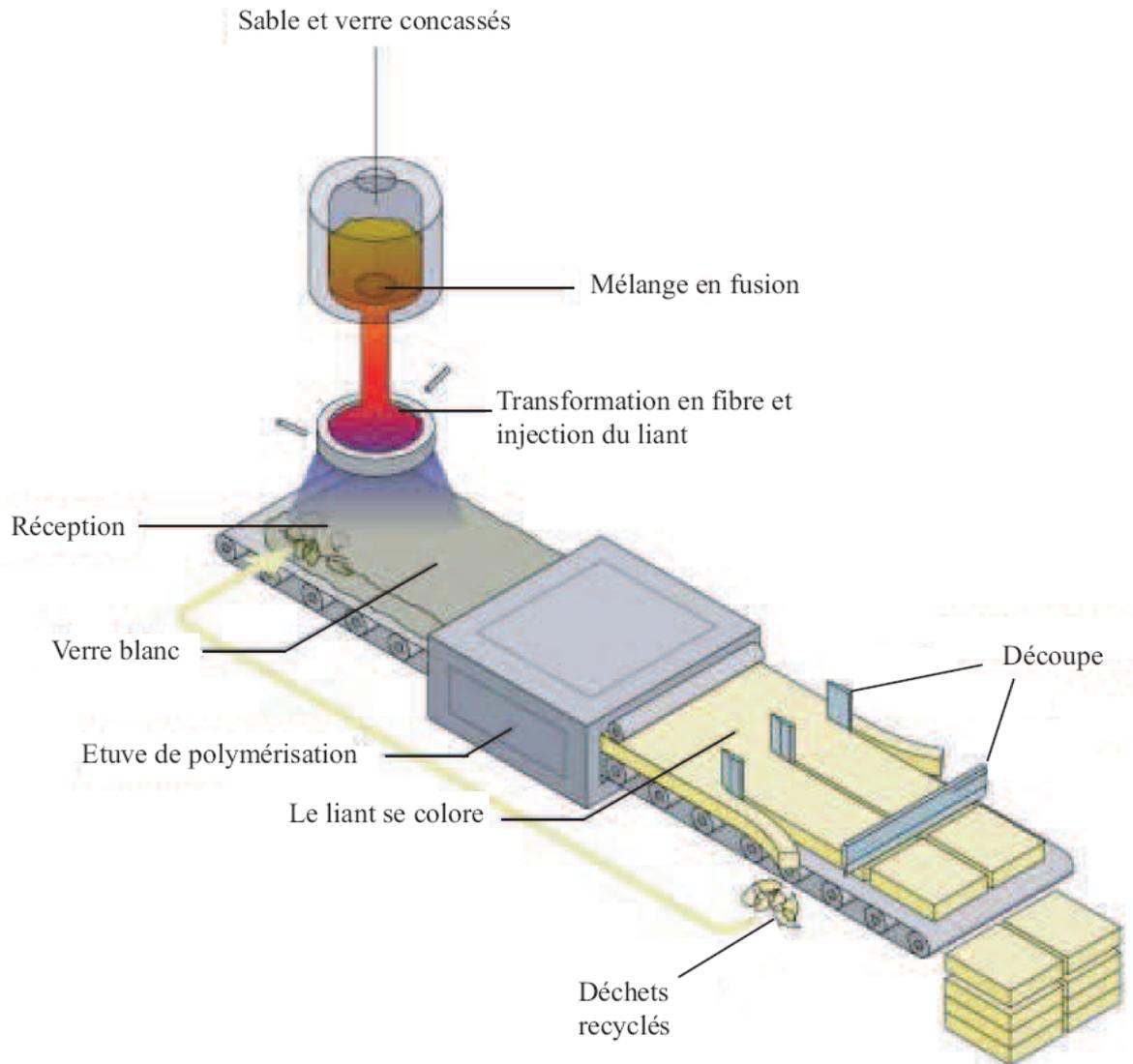


Figure 1.3 : Chaîne de fabrication de matelas de laines de verre [35].

La structure et la densité du produit peuvent être adaptées selon l'utilisation finale. Les fibres s'enchevêtrent alors de manière aléatoire et désordonnée sur un tapis de conformation, formant un matelas de laine de verre. Le matelas est ensuite porté à environ 200 °C afin de fixer le liant aux fibres (polymérisation de la résine) puis comprimé à la hauteur désirée, ce qui lui donne tenue et stabilité.

1.2.1.2 Structure et propriétés microscopiques

Le comportement mécanique à l'échelle de la fibre est isotrope [36]. En effet, les fibres de verre qui constituent le matériau sont principalement constituées de silice ($\approx 50\text{--}60\%$ SiO_2). Divers oxydes sont ajoutés en quantité moindre pour baisser la température de chauffe [6].

La structure de base est constituée d'un tétraèdre fait de quatre ions d'oxygène et d'un ion de silicium central. La composition d'un seul tétraèdre est donc SiO_4 . Cependant, chaque ion d'oxygène est partagé entre deux tétraèdres, donnant la composition en SiO_2 . La structure de base est donc répétée dans les trois dimensions. Lors de la fabrication, la chauffe des molécules à forte température et le refroidissement brutal rend la structure incapable de s'ordonner. Les tétraèdres s'arrangent donc en réseau de façon aléatoire empêchant ainsi tout alignement préférentiel. On considère donc, au niveau microscopique de la fibre, que leur comportement est isotrope [36].

La fibre de verre qui constitue le matériau est généralement de faible densité. Sa résistance à la traction peut être élevée. Pour les matériaux dédiés à l'isolation de bruit, le diamètre des fibres est compris entre 5 et 20 μm .

1.2.1.3 Propriétés macroscopiques

A l'échelle macroscopique, le comportement du matelas fibreux est fortement anisotrope et hétérogène. L'hétérogénéité générée par l'empilement des couches successives est généralement plus forte que celle générée par la disposition aléatoire des fibres dans le plan. Par conséquent, l'axe perpendiculaire au plan des fibres (axe longitudinal) peut être considéré comme un axe de symétrie : ces matériaux sont alors du type isotrope transverse.

– La résistivité et l'atténuation des ondes sont plus importantes selon l'axe longitudinal que selon l'axe transverse et les propriétés sont égales pour deux directions orthogonales prises dans le plan des fibres. Ceci a montré par des

mesures de résistivité au passage de l'air et de propagation du son dans diverses directions de laines de verre [34, 37].

– Les propriétés mécaniques de ces matériaux sont elles aussi anisotropes : la raideur est plus importante dans le plan parallèle aux fibres que dans le plan transverse [38].

1.2.2 Les mousses

Les mousses sont des enchaînements macromoléculaires organiques de motifs simples appelés monomères [39 à 41]. La nature chimique des monomères constituant les macromolécules, leur nombre et leur arrangement procurent aux polymères des propriétés élastiques ou viscoélastiques particulières. Différents arrangements de ces monomères confèrent une propriété macroscopique particulière du matériau. Leur loi de comportement dépend donc du niveau de désordre : si celui-ci est élevé, la rigidité est importante.

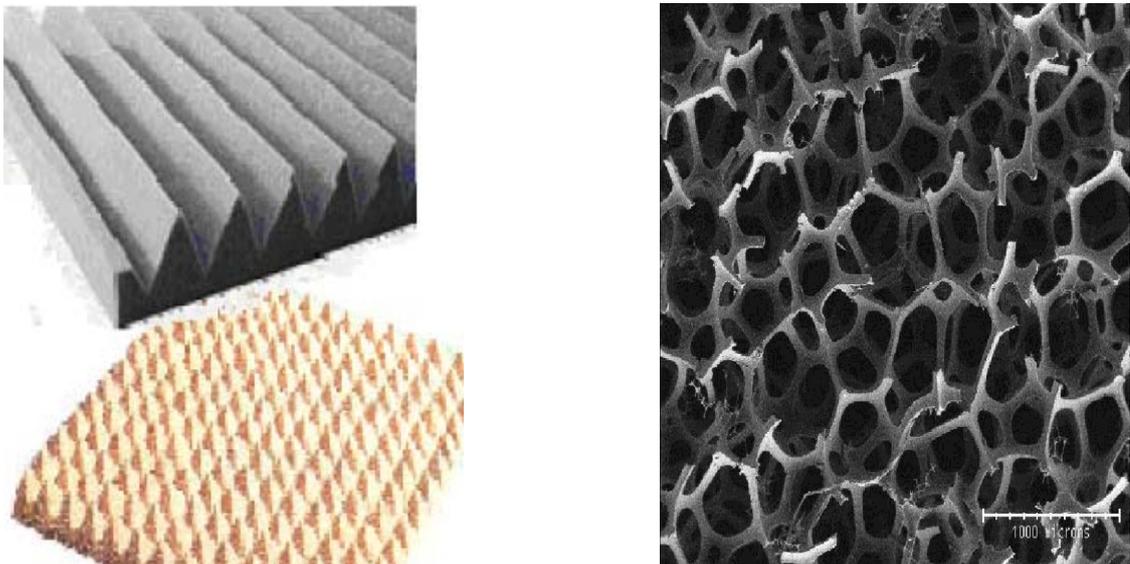


Figure 1.4 : mousses de polyuréthane [26, 42].



Figure 1.5 : Mousse mélamine [43]

Les mousses utilisées en acoustique possèdent un squelette d'origine polymère. Les méthodes de caractérisation élastique de ces matériaux acoustiques découlent donc naturellement des travaux sur les polymères.

Les mousses rencontrées sont des : mélamines, polyéthylènes, polyuréthanes. Le comportement mécanique des polymères est influencé par la nature des groupes chimiques mis en jeu mais également par leurs caractéristiques physiques telles que la masse volumique et la forme géométrique [6, 39, 41].

1.2.2.1 Formation des mousses

La plupart des mousses sont le résultat d'une génération puis d'une expansion de bulles dans un polymère sous forme liquide. Lors d'une première étape, les bulles sont dispersées dans le liquide (figure 1.6.a). Dans une deuxième étape, le processus d'expansion rejette le liquide dans des confinements faisant généralement apparaître une structure polygonale (figure 1.6.b). A ce stade, la mousse possède une faible masse volumique, elle est à cellules ou pores fermées.

Finalement, les membranes entre les cellules peuvent être perforées par le dégagement de dioxyde de carbone lors du moussage ou par un traitement chimique ou mécanique supplémentaire (figure 1.6.c). La taille, la distribution et

l'ouverture des pores sont des paramètres issus du moussage qui influencent autant les propriétés mécaniques qu'acoustiques de la mousse [6, 41].

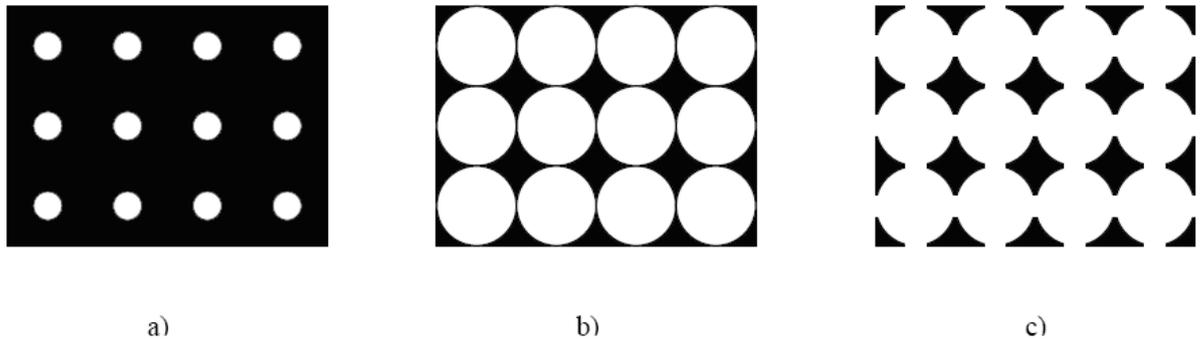


Figure 1.6 : représentation schématique des étapes du moussage [26].

a) génération de bulles b) expansion des bulles c) connexion entre bulles.

Une anisotropie des mousses est souvent mise en évidence expérimentalement. Le processus de moussage en est une des causes : la direction de croissance de la mousse dans le creuset doit à priori être considérée comme une direction particulière du matériau final. De plus, la concentration plus élevée de polymère liquide dans le fond du creuset au début du moussage peut également provoquer une hétérogénéité de la mousse. Melon et al. [44] discutent de ces phénomènes en étudiant les propriétés mécaniques et acoustiques dans le cas d'une mousse de polyuréthane orthotropique, proche de l'isotropie transverse.

La découpe des mousses en vue de leur utilisation provoque également des inhomogénéités de surface. De petites poutres du squelette non reliées entre elles apparaissent effectivement à la surface. Ces poutres sont parfois appelées les « cheveux » de la mousse.

1.2.2.2 Comportement mécanique

Les mousses polymères possèdent généralement un comportement mécanique du type viscoélastique [45]. Leur réponse, à une contrainte constante pendant un temps donné, est une combinaison entre un comportement élastique

(instantané et réversible) et un comportement visqueux (fonction du temps et irréversible).

Les mousses polymères utilisées en acoustique ont un comportement linéaire [39]. Le domaine viscoélastique linéaire définit le domaine pour lequel le comportement mécanique du matériau peut se construire comme une combinaison linéaire des modèles comportementaux simples.

Dans le domaine viscoélastique linéaire, la loi comportementale du matériau est réécrite comme une loi de Hooke appliquée à des grandeurs complexes (contrainte, déformation et module) et dépendantes du temps ou de la fréquence.

CHAPITRE 2 : LE CONTROLE VIBROACOUSTIQUE

2.1. DIFFERENTES TECHNIQUES DE CONTROLE VIBROACOUSTIQUE

2.1.1. Contrôle passif

Pour réduire le niveau vibratoire rayonné par une structure, on peut en particulier agir de manière passive au niveau des structures en dissipant l'énergie vibratoire avec un matériau jouant le rôle d'amortisseur. De telles méthodes de réduction sont regroupées sous la dénomination de techniques passives [18, 22, 46, 47].

Contrairement aux approches actives, elles sont faciles à mettre en œuvre car elles ne nécessitent pas un appareillage lourd ni de sources d'énergie pour réduire le bruit. Peu coûteuses, ces solutions passives trouvent leurs applications dans des domaines multiples (transports, bâtiment...) grâce à leur grande efficacité aux hautes fréquences.

Le choix de techniques passives passe alors par la conception de structures ayant la propriété de dissiper l'énergie mécanique et acoustique. De telles structures sont généralement un assemblage de plusieurs sous-structures dont certaines sont constituées de matériaux possédant des propriétés dissipatives. Le choix de la nature du matériau étant lié au type d'utilisation.

2.1.2 Contrôle actif

Le contrôle actif du bruit est apparu un peu avant le milieu du 20^{ème} siècle par le chercheur allemand Paul Lueg, qui a déposé pour la première fois, un brevet américain intitulé « Process of silencing sound oscillations » [48] présenté auparavant en Allemagne au début de l'année 1933, mais qui n'a vu son essor que relativement récemment.

Ce type de contrôle peut apporter une solution à certaines applications où l'utilisation d'isolants spécifiques ou de matériaux massifs peut constituer un réel obstacle, comme l'aéronautique par exemple.

Dans les années 70, l'engouement de la communauté scientifique sur les potentialités du contrôle actif va de pair avec les progrès technologiques de l'époque, début de l'essor spectaculaire de l'électronique numérique et de l'informatique. Ceci a permis au contrôle actif, d'améliorer la précision à apporter à la réalisation de la fonction de transfert optimale et de diminuer le temps de traitement électronique de l'algorithme utilisé.

Les techniques actives sont utilisées en isolation basses fréquences lorsque la longueur de l'onde sonore devient relativement grande par rapport à l'épaisseur du matériau isolant (on suggère une épaisseur minimum correspondant à $1/4$ de longueur d'onde). Elles permettent de contrôler l'état vibratoire ou acoustique à chaque instant par des actionneurs qui agissent sur les vibrations ou le champ acoustique de la structure selon une loi de commande conçue pour minimiser une mesure quelconque de l'intensité des vibrations ou de bruit indésirables. Ces mesures sont, soit basées sur une référence, soit fournies par des capteurs plus ou moins intégrés dans la structure.

Une structure contenant des actionneurs et capteurs collés ou intégrés et couplés par un système de contrôle est dite intelligente ou adaptative. En effet, les mesures fournies par le capteur sont traitées par un système de contrôle approprié, microcontrôleur, carte DSP (Digital Signal Processing), voir microprocesseur, qui envoie ensuite à l'actionneur un signal capable de modifier le comportement de la structure, l'adaptant à un comportement requis. La figure 2.1 illustre le principe de fonctionnement du contrôle actif à travers deux exemples.

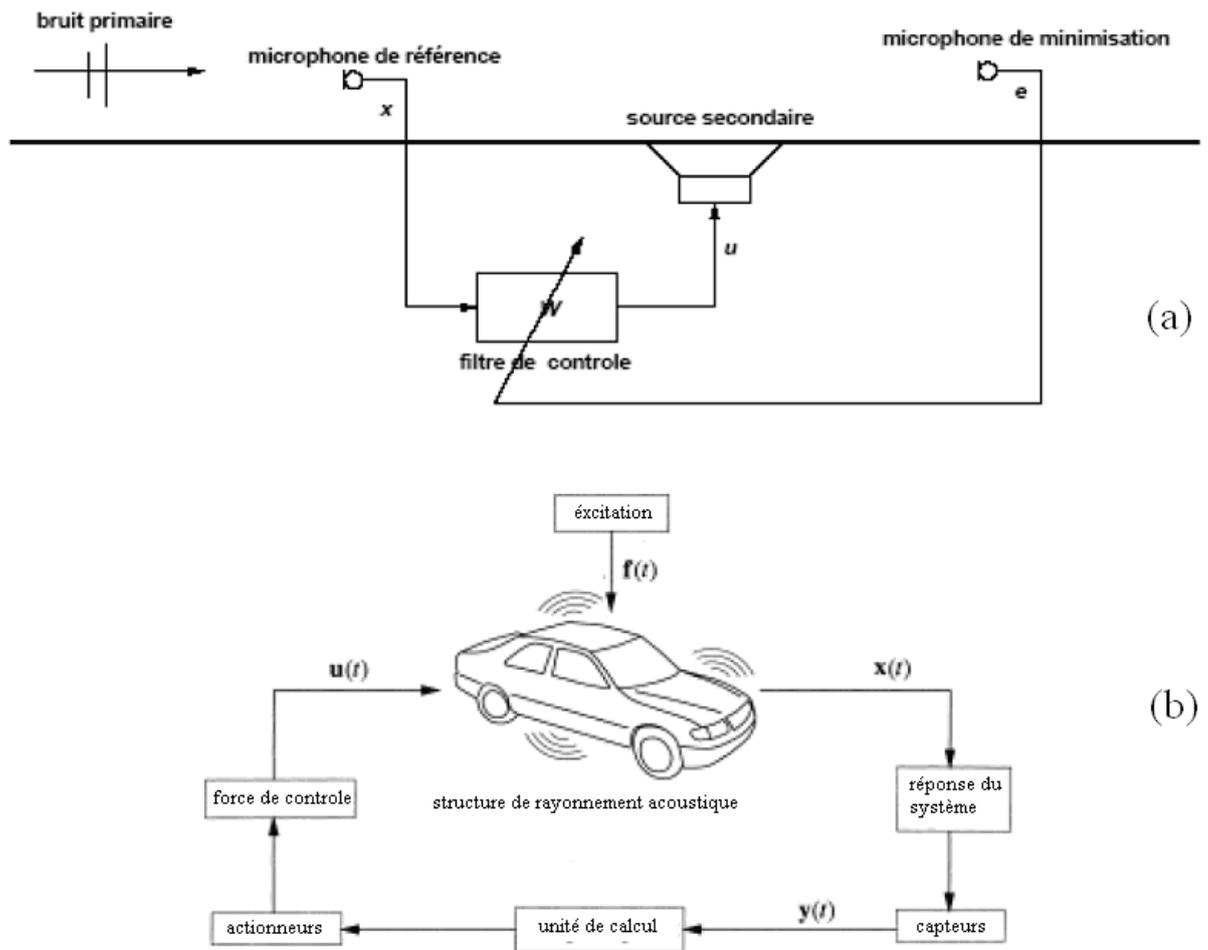


Figure 2.1 : schémas pour le contrôle actif : a-le contrôle actif dans un conduit, b- le contrôle actif dans une voiture [48, 49].

Il existe plusieurs manières de construire une structure intelligente à partir d'une structure de base. Cette conception consiste à choisir les actionneurs, capteurs et systèmes de contrôle. Les actionneurs et capteurs sont, généralement, fabriqués à partir de matériaux, dits *intelligents* [50], capables de fournir une action distribuée, générée par le couplage naturel de leurs déformations ou contraintes avec différents facteurs externes comme des champs électrique, magnétique ou de température,...etc.

Parmi les matériaux intelligents les plus utilisés on peut citer les céramiques et polymères piézoélectriques, les matériaux à mémoire de forme, les matériaux électrostrictifs ou magnétostrictifs et les fluides électro-rhéologiques.

On distingue deux grands principes de contrôle actif [48] ; le contrôle par rétroaction (feedback control), et par anticipation (feedforward control). Une comparaison entre les deux contrôles est présentée dans le tableau suivant. On y retrouve les caractéristiques principales de chacun d'entre eux.

Type de contrôle		Avantages	Inconvénients
Contrôle par rétroaction (Feedback control)	Amortissement actif	<ul style="list-style-type: none"> - pas de modèle. - stabilité garantie si les capteurs et les actionneurs sont colocalisés 	<ul style="list-style-type: none"> - efficace aux résonances uniquement.
	Contrôle optimal	<ul style="list-style-type: none"> - méthode globale - atténue toute perturbation dans la bande passante 	<ul style="list-style-type: none"> - bande passante limitée - perturbation en dehors de la bande passante amplifiée - débordement - nécessite un modèle
Contrôle par anticipation (Feedforward control)	Filtrage adaptatif	<ul style="list-style-type: none"> - pas de modèle nécessaire - large bande passante - approprié pour perturbations périodiques 	<ul style="list-style-type: none"> - besoin d'un signal de référence - méthode locale - nécessite une puissance de calcul élevée

Tableau 2.1 : Comparaison des stratégies de contrôles actifs. [48]

Limitations de la méthode

L'utilisation du contrôle actif s'est montrée efficace pour les basses fréquences, mais la limitation principale de cette technique est la difficulté de mise en œuvre [51], aussi bien d'un point de vue matériel que logiciel car elle nécessite généralement une chaîne complète de contre-réaction et intégrante capteurs, système de calcul et actionneurs.

De plus, la nécessité d'utiliser des sources d'énergie externes ne la rend pas facilement intégrable, ce qui constitue un frein technologique pour son intégration sur les structures légères.

Le contrôle actif du bruit reste à l'heure actuelle un problème complexe. Seules quelques applications industrielles existent et leur succès est dû en grande partie au choix judicieux de l'application en elle même.

2.1.3. Contrôle hybride (actif-passif)

Suggérées par Plump et Hubbard [23], les techniques hybrides cherchent à concilier les avantages des deux types de contrôle afin d'obtenir une performance du contrôle sur une large bande fréquentielle, et être à la fois, fiable et robuste, comme le contrôle passif et, efficace et commandable, comme le contrôle actif.

Le système de contrôle hybride, utilise dans le même traitement les matériaux absorbants (passif) et piézoélectrique (actif) [52 à 54]. Le premier assure la fiabilité et la robustesse du système puisqu'en cas de mauvais fonctionnement du contrôle actif, le système reste amorti. Le second améliore les performances du système pour les très basses fréquences. Les deux contrôles passif et actif agissent donc en complémentarité.

Le principe de contrôle hybride consiste à remplacer la couche élastique par des actionneurs piézoélectriques. Cette technique, dite "*Revetement Contraint Actif* " (RCA) présente les avantages suivants:

- la capacité d'augmenter activement le cisaillement du matériau absorbant à travers l'actionneur piézoélectrique, améliorant ainsi la dissipation d'énergie.
- la combinaison des performances aux fréquences plus élevées, des matériaux absorbants, et aux très basses fréquences, des actionneurs piézoélectriques.
- l'augmentation de la robustesse du contrôle actif, dans la mesure où, en cas de mauvais fonctionnement, le système reste amorti.

Depuis le début des années 90, plusieurs configurations de traitements *RCA* ont été présentées. Celle proposée par Plump et Hubbard [23] a été retenue par la majorité des chercheurs. Néanmoins, une multitude de systèmes ont été proposés selon les positions et types des capteurs/actionneurs.

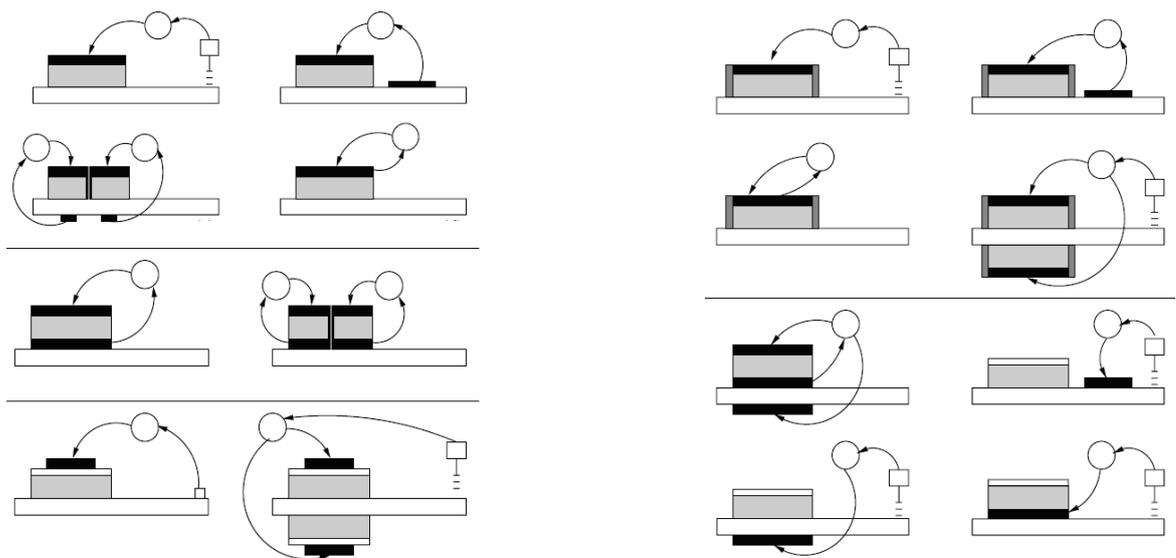


Figure 2.2 : Configurations de contrôle hybride [24, 55].

Les matériaux piézoélectriques sont largement utilisés dans ce type de contrôle vu les divers avantages qu'ils procurent. Ils sont capables d'assurer une conversion d'énergie électromécanique réversible par effet piézoélectrique (direct ou inverse). Ils peuvent donc être indifféremment utilisés comme capteurs ou actionneurs, ou même cumuler ces deux fonctions. Cette réversibilité permet surtout de gérer les transferts d'énergie au sein d'une structure sur laquelle est

intégré ce type de matériau et permet d'obtenir des systèmes « avancé » (smart system).

Il est donc envisageable d'optimiser l'extraction d'une part de l'énergie mécanique de la structure par des techniques appropriées et de contrôler ainsi son état vibratoire.

Ces matériaux possèdent également de forts avantages en termes d'intégration. Ils sont de types monolithiques et possèdent généralement une densité de puissance élevée.

En outre, ils sont disponibles sous divers formes : éléments massifs (plaques, colonnes...) films, fibres, éléments composites souples...

Généralement issus de processus de synthèse, les matériaux piézoélectriques proposent un large panel de caractéristiques électromécaniques dépendant directement de leur constitution chimique. On trouve ainsi par exemple des matériaux plus particulièrement adaptés aux applications « capteurs » garantissant une large bande passante alors que certains autres matériaux possèdent au contraire un fort coefficient de surtension et sont plus particulièrement destinés à la génération de fortes puissances vibratoires.

Clairement, tous ces aspects contribuent à faire des matériaux piézoélectriques un choix judicieux pour les systèmes de contrôle où faible masse, faible encombrement et efficacité sont escomptés.

Indiscutablement, les performances en termes d'atténuation obtenues avec les techniques hybrides sont très élevées. Cependant, ces techniques restent très lourdes à mettre en place, elles souffrent des limitations associées à ces deux techniques de contrôle. Elles sont toutes handicapées de la perte de transmissibilité entre la structure et l'actionneur piézoélectrique, due à la souplesse de la couche absorbante, et dans ce cadre, de nombreuses études de recherche sont engagées pour remédier à ce problème.

2.2. CONCLUSION

Dans le domaine des transports automobile, la méthode la plus couramment utilisée pour répondre à l'amélioration du confort acoustique, utilise un contrôle passif de l'énergie acoustique au moyen de matériaux dissipatifs poreux vu les nombreux avantages que présente ce type de contrôle par rapport aux deux autres types : il ne nécessite aucun apport extérieur d'énergie, ni un dispositif de contre-réaction et il est facile à mettre en œuvre.

L'objet de notre étude s'inscrit dans ce cadre dans le but de déterminer l'absorption acoustique des matériaux poreux utilisés dans l'industrie automobile. Une étude théorique de ces matériaux est envisagée relayée par une partie numérique en terme de modélisation, simulation et calculs.

CHAPITRE 3 : ETUDE THEORIQUE DES MATERIAUX POREUX

3.1. DESCRIPTION QUALITATIVE

Les matériaux poreux sont des matériaux résultant de l'interpénétration de deux phases. La première phase est solide et constitue le squelette du matériau. La seconde phase est celle du fluide saturant les pores du matériau (l'air dans le cas de l'acoustique). La taille caractéristique des pores des matériaux utilisés en vibroacoustique va du dixième de millimètres au centimètre. Il peut exister des pores emprisonnés à l'intérieur de la phase solide, et dans ce cas, on considérera qu'ils sont partie intégrante de la phase solide [32].

On distingue deux types d'interpénétration pour les phases [56, 57]. Le premier type est dit à porosité fermée car la phase solide est continue et la phase fluide est discontinue. Les pores du matériau constituent des entités fluides isolées les unes des autres et sont donc fermés. Dans le deuxième type, les deux phases sont continues. Les pores sont alors interconnectés permettant au fluide de circuler et d'être en contact avec l'extérieur, la porosité est dite ouverte.

Dans les matériaux poreux classiquement employés en isolation vibroacoustique, le volume occupé par l'air représente plus de 90 % du volume total, ce qui signifie que la masse volumique apparente du matériau est environ dix fois plus petite que celle du squelette qui constitue la phase solide [58]. Une représentation schématique d'un matériau poreux est donnée par la figure 3.1.

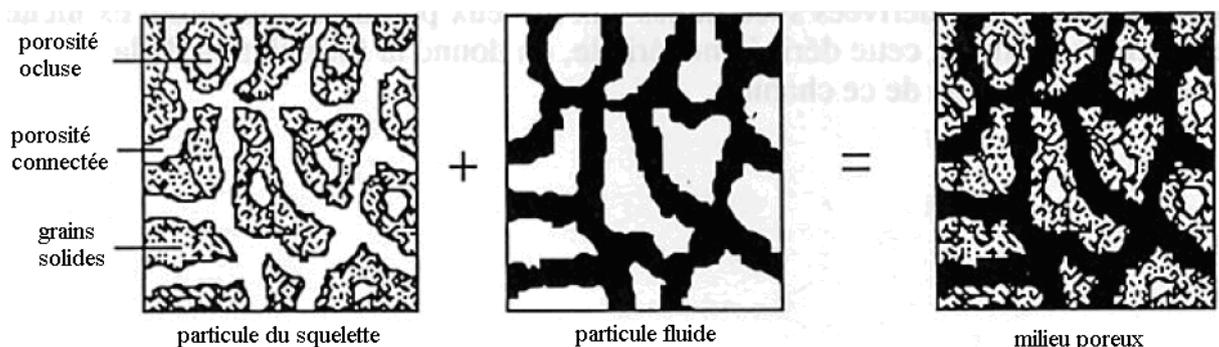


Figure 3.1 : Schématisation d'un milieu poreux selon Coussy [32].

La matrice solide est présentée à gauche, avec son espace interstitiel. Au milieu, l'espace occupé par le fluide est présenté en noir. A droite, la combinaison du squelette et de la phase fluide conduit au milieu poroélastique.

3.2. PRINCIPES DE DISSIPATION DES MATERIAUX POREUX

Ces matériaux dissipent l'énergie acoustique par trois mécanismes particuliers [59, 60].

- Le premier de ces mécanismes est associé à la vibration du squelette qui constitue le matériau. En effet, au niveau moléculaire, ce mouvement se traduit par des rotations irréversibles des molécules les unes par rapport aux autres, dégradant ainsi l'énergie initialement fournie au matériau. On parle de perte par effet structural.

- Le second mécanisme est relié à un transfert d'énergie de l'onde acoustique vers la phase solide. La conductivité thermique de l'air est généralement beaucoup plus faible que celle du matériau constituant le squelette. Des phénomènes de diffusion traduisant les échanges thermiques entre les deux phases vont donc intervenir. Ainsi, un flux de chaleur se développe de la phase fluide vers la phase solide. Cette chaleur reçue peut échauffer le solide (c'est-à-dire augmenter son énergie interne calorifique) ou être expulsée vers le milieu extérieur. C'est ce second phénomène qui se produit majoritairement. L'énergie mécanique de l'onde acoustique est donc transformée en chaleur puis expulsée vers le milieu extérieur. On parle de pertes par effets thermiques.

- Enfin, le dernier mécanisme est rattaché aux effets visqueux. Le phénomène de viscosité est dû au glissement des différentes couches d'un fluide visqueux les unes par rapport aux autres et provoque une dissipation.

Grâce à leur nature, les matériaux poreux sont donc dissipatifs et légers, ce qui souligne fortement leur intérêt pour des applications dans différents domaines de l'ingénierie.

3.3. LA METHODE DES ELEMENTS FINIS POUR LES MATERIAUX POREUX

La mise en œuvre de méthodes numériques peut être faite de diverses façons. Pour des cas simples ou simplifiés, des solutions analytiques ou semi-analytiques peuvent être obtenues et l'aspect numérique se résume alors au calcul de ces solutions.

Dans le cas qui va nous intéresser (modélisation des matériaux absorbants), des solutions analytiques simples ne peuvent être exhibées [6, 61]. Le calcul de la réponse vibroacoustique doit alors passer par des techniques de discrétisation permettant d'approcher la solution du problème continu par la solution d'un problème discret.

La méthode des éléments-finis (MEF) est une méthode couramment utilisée en statique et en dynamique des structures pour la résolution de problèmes aux limites [62]. On appelle problème aux limites dans un domaine de l'espace, une équation aux dérivées partielles gouvernant la physique dans le domaine couplé avec des conditions aux limites sur la frontière de ce domaine.

La MEF est basée sur la discrétisation de la formulation variationnelle du problème. Celle-ci est une autre écriture du problème aux limites dont l'existence et l'unicité d'une solution peuvent être prouvées. On peut montrer que la solution du problème aux limites est solution du problème variationnel au sens des distributions. La théorie de l'approximation variationnelle permet de définir une projection de l'espace du problème continu vers un espace discrétisé. Cet espace est de dimension finie et la recherche de la solution approchée du problème variationnel se résume à la résolution d'un système linéaire qu'il est possible d'effectuer à l'aide de moyen informatique.

La MEF a commencé à être utilisée pour prédire la réponse des structures impliquant des matériaux poreux dans les années 1990 [20, 63]. Il existe plusieurs types de formulations dérivées des équations de M.A. Biot [36, 56, 64 à 66].

3.3.1. Approche de Biot

Biot en 1956 [64] suggéra que le milieu poreux pouvait être vu au niveau macroscopique comme la superposition en temps et en espace de deux milieux continus couplés. Cette approche était novatrice dans la mesure où elle s'extrait du contexte hétérogène des deux phases pour arriver à l'idée de superposition. En particulier, Biot montra que 3 types d'ondes pouvaient se propager dans le milieu poreux, deux ondes de compression et une onde de cisaillement.

Le formalisme de Biot est celui qui est encore utilisé de nos jours, même s'il a subi quelques mises à jour ou compléments. Biot avait néanmoins formulé quelques conjectures qu'il s'agissait d'étudier plus en détail. On peut ainsi citer les travaux de Plona [67] qui ont mis en évidence expérimentalement l'onde lente par ultrasons qui constitua une avancée importante dans la validation de la théorie de Biot.

D'autre part, le modèle de Biot fut justifié théoriquement par les théories des mixtures et de l'homogénéisation. Cette dernière est basée sur des travaux théoriques d'analyse fonctionnelle [61, 68] grâce aux quels Auriault [69, 70] retrouva dans le contexte de la mécanique des milieux hétérogènes les équations de Biot dans un formalisme différent mais totalement équivalent. La technique d'homogénéisation consiste à prendre pour point de départ les équations de la microstructure pour en déduire le comportement du milieu homogène équivalent. Partant des équations de la microstructure, le comportement moyen du milieu homogène équivalent apparaît alors comme une conséquence des phénomènes microscopiques.

Biot présupposait l'existence de ce milieu homogène équivalent et de ces liens entre les phénomènes à l'échelle microscopique et leurs conséquences au niveau du milieu homogène : l'homogénéisation l'a mis en évidence. A partir de la technique d'homogénéisation Burridge et Keller [71] furent en mesure de justifier une des hypothèses de Biot : bien que le fluide soit visqueux au niveau de la

microstructure, la phase fluide homogénéisée pouvait se comporter au premier ordre comme un fluide parfait ! Ainsi les conjectures initiales de Biot avaient été justifiées théoriquement et validées expérimentalement.

3.3.1.1 Modèle de Biot-Allard généralisé

Parallèlement à ces travaux théoriques, des approches phénoménologiques, c'est-à-dire basées sur l'observation expérimentale des phénomènes, ont été menées. La théorie de Biot était initialement dévolue au contexte géotechnique.

Néanmoins le formalisme, lui, pouvait très bien s'adapter à l'acoustique. Il s'agissait alors d'y apporter quelques modifications afin de modéliser le plus fidèlement possible les effets dissipatifs que nous avons évoqués précédemment : En 1987 Johnson *et al.* [72] ont amélioré la modélisation des effets visqueux en introduisant une fonction de forme visqueuse qui, contrairement à celle de Zwikker et Kosten [73], n'était pas limitée par la nature géométrique du squelette. Cette fonction avait pour but de modéliser la variation en fréquence du module de dissipation visqueuse du matériau.

Ces travaux ont en particulier permis d'établir l'existence d'une longueur caractéristique visqueuse Λ , paramètre intrinsèque du matériau. L'esprit des travaux de Johnson *et al.* consistait à étudier les cas asymptotiques basse et haute fréquence et à les relier simplement dans le domaine moyenne fréquence.

Par conséquent, non seulement le modèle de Johnson procède d'une observation macroscopique des phénomènes, mais aussi il permet de mettre en évidence des grandeurs propres au matériau comme la longueur caractéristique visqueuse. On parle alors de modèle semi-phénoménologique. Champoux et Allard [74], s'inspirant de l'esprit des travaux de Johnson *et al.* , ont procédé de façon similaire et ont défini une fonction de forme liée aux effets thermiques ainsi qu'une longueur caractéristique thermique Λ' . En 1996, Lafarge *et al.* [75]

introduisent un nouveau paramètre, la perméabilité thermique k_0' . Celle-ci améliore la prise en compte des effets thermiques en basses fréquences.

Ces contributions furent regroupées et intégrées dans le cadre de la théorie de Biot par Allard [68, 76] pour former ce qui est maintenant couramment appelé le modèle de Biot-Allard.

Cette théorie constitue aujourd'hui la référence en ce qui concerne la modélisation dynamique du comportement des milieux poreux. On peut la voir sous la forme suivante : il s'agit d'une technique de mécanique des milieux continus à deux champs couplés où les coefficients constitutifs et inertiels dépendent de la fréquence [27, 77, 78].

3.3.1.2. Différents types de formulations

Il existe plusieurs types de formulations [6, 79], dérivées des équations de Biot pour modéliser le comportement des matériaux poreux par la méthode des éléments finis. Pour les recenser, il est possible de les classer suivant qu'elles font intervenir comme variables :

- Le déplacement de la phase solide et le déplacement de la phase fluide, formulation (u, U) .
- Le déplacement de la phase solide et le déplacement relatif, formulation (u, w) .
- Le déplacement de la phase solide et la pression dans les pores, formulation (u, p) .
- Le déplacement de la phase solide, la pression dans les pores et le déplacement de la phase fluide, formulation (u, p, U) .
- Le déplacement de la phase solide, le potentiel du déplacement de la phase fluide et la pression dans les pores, formulation (u, ψ, p) .
- Ou enfin la pression dans les pores, formulation (p) .

Certaines formulations ont été abandonnées car jugées trop peu performantes et le nombre de formulations que l'on trouve aujourd'hui pour

modéliser les problèmes de vibroacoustique se réduit alors à 3 voir 4 [(u, U), (u, p), (u, w) et (p)].

- la formulation (u, U) qui est la formulation originelle, et directement dérivée du modèle de Biot généralisée [18, 22, 80, 81]. Elle s'avère un peu lourde à utiliser avec ses 6 inconnues nodales (les 3 déplacements de chaque phase) car elle conduit à de gros systèmes matriciels à résoudre.

- Toujours dans le cadre des formulations à 6 inconnues par nœuds, il existe la formulation (u, w), on la retrouve dans les versions récentes de codes commerciaux tels RAYON/PEM et ACTRAN [82].

- Ensuite, il y a la formulation (u, p) [25, 83 à 86], qui est la plus répandue. Cette formulation, quoiqu'un peu plus délicate que la formulation (u, U) en ce qui concerne l'interprétation des bilans énergétiques [61], présente l'avantage de réduire le nombre d'inconnues nodales de 6 à 4. Elle conserve la même précision et est aussi robuste que sa consœur à 6 degrés de liberté par nœuds [86]. Les systèmes à résoudre sont moins « lourds », ce qui permet de faire des gains de temps de calcul et d'utiliser moins de mémoire sur les machines. D'autre part, son expression est exacte [83] et ce choix d'inconnues facilite l'imposition des conditions aux limites [84]. Ces avantages certains lui valent une grande popularité.

- Enfin, la formulation en fluide équivalent ou formulation (p). Cette formulation est en fait un cas limite du modèle de Biot-Allard où l'on considère que la matrice solide (squelette) reste immobile en raison de sa grande rigidité ou sa masse élevée. Malgré les limites qui lui sont propres, cette formulation est particulièrement intéressante car elle ne compte qu'une seule inconnue par nœud et est très facile à l'implanter numériquement.

Dans notre étude, on utilise la formulation mixte (u, p) implantée par Atalla et al. [1998] [25, 87] pour prédire l'absorption acoustique de différents matériaux poreux utilisés dans l'industrie automobile.

3.3.1.3. Hypothèses fondamentales de modèle généralisé de Biot-Allard

L'étude de la propagation acoustique dans les milieux poreux nécessite la prise en compte de plusieurs hypothèses [32, 56, 57, 64]:

1) Echelle macroscopique

La complexité et la grande variété des microgéométries des matériaux poreux rendent difficile toute modélisation au niveau microscopique.

Cependant, à une échelle dite macroscopique, on peut caractériser cette microgéométrie de façon statistique. L'échelle macroscopique est celle d'un élément de volume V_M , ensemble de pores suffisamment grand, tel que les caractéristiques statistiques soient sensiblement invariantes en déplaçant ce volume (figure 3.2). Cela suppose par ailleurs que le matériau est localement homogène.

Les variables décrivant le mouvement sont par conséquent des quantités résultant d'une moyenne des quantités définies à l'échelle microscopique sur un élément de volume macroscopique. Par exemple, les déplacements de la phase solide et fluide, respectivement u et U , se déduisent des déplacements observés à l'échelle microscopique u_m et U_m par :

$$u = \langle u_m \rangle = \frac{1}{V_M} \int_{V_M} u_m dV \quad (3.1)$$

$$U = \langle U_m \rangle = \frac{1}{V_M} \int_{V_M} U_m dV \quad (3.2)$$

Avec V_M le volume de l'élément macroscopique.

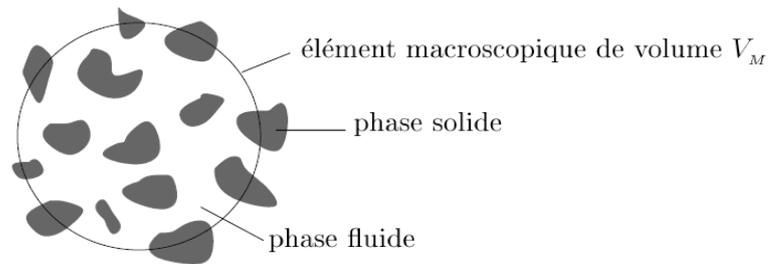


Figure 3.2 échelle macroscopique.

2) Grande longueur d'onde

Afin de pouvoir utiliser les outils de la mécanique des milieux continus, la longueur des différentes ondes pouvant se propager dans le matériau, doit être grande devant l'élément de volume V_M (figure 3.3). Cela assure que chaque phase est décrite par un déplacement unique à l'échelle macroscopique

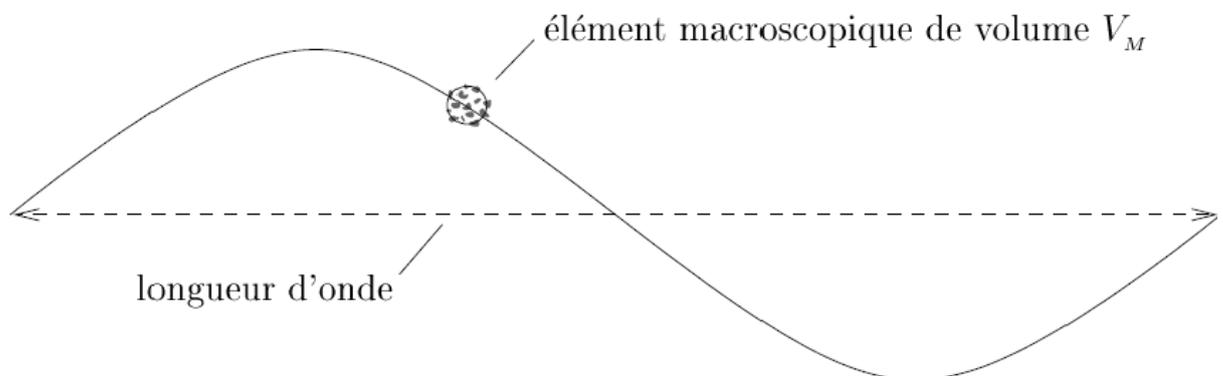


Figure 3.3 : hypothèse de grande longueur d'onde devant l'élément de volume macroscopique.

3) Elasticité linéaire

Dans l'hypothèse des petits déplacements, les relations contraintes-déformations sont linéaires.

4) Régime harmonique

Les variables décrivant le mouvement possèdent une dépendance temporelle harmonique de la forme $e^{j\omega t}$, de sorte que les quantités instantanées $a(t)$ s'expriment en fonction des amplitudes complexes a par :

$$a(t) = \Re e(ae^{j\omega t}) \quad (3.3)$$

La description complète d'un matériau poroélastique regroupe trois ensembles de paramètres concernant :

a. le fluide saturant, qui est l'air dans l'acoustique, il est décrit par sa masse volumique au repos ρ_0 , la vitesse du son c_0 , ... etc (chapitre 4, section (4.3)).

b. le comportement mécanique du squelette est caractérisé par la masse volumique ρ_1 :

$$\rho_1 = (1 - \phi)\rho_s \quad (3.4)$$

Avec ρ_s , la masse volumique de matériau constituant le squelette et ϕ la porosité.

La loi de comportement caractérisée par la matrice d'élasticité de Hooke $[H_s]$ et le coefficient d'amortissement η_s . Ce dernier permet d'écrire une matrice d'élasticité complexe $[\tilde{H}_s]$ telle que :

$$[\hat{H}_s] = [H_s](1 + j\eta_s) \quad (3.5)$$

Par commodité, le squelette est habituellement supposé isotrope. Dans ce cas, deux grandeurs telles que le module d'Young E et le coefficient de Poisson ν suffisent pour définir la loi de comportement.

c. la prise en compte des interactions entre les deux phases, l'ordre élastique, inertiel, visqueux et thermique, nécessite la connaissance de cinq paramètres :

- **La porosité** ϕ : Elle désigne la porosité fluide ouverte : c'est le rapport du volume occupé par la phase fluide continue sur le volume total du matériau :

$$\phi = \frac{V_f}{V_t} \quad (3.6)$$

Avec :

V_f : le volume du fluide.

V_t : le volume total du matériau

La valeur de la porosité varie donc entre 0 (limite solide) et 1 (limite fluide).

- **La tortuosité** α_∞ : elle traduit le fait qu'une onde se propageant dans une des phases du matériau suit un chemin tortueux pour contourner l'autre phase du matériau. La tortuosité possède une valeur supérieure ou égale à 1. Elle est égale à l'unité lorsque le milieu possède des pores cylindriques parallèles à la direction de propagation de l'onde.

La masse volumique du fluide saturant le matériau est donc modifiée et est égale à :

$$\rho_e = \alpha_\infty \rho_0 \quad (3.7)$$

ρ_0 : la masse volumique du fluide saturant au repos (l'air dans le cas de l'acoustique).

- **La résistivité** σ : elle décrit les interactions visqueuses en basses fréquences. La résistivité σ s'exprime suivant la loi de Darcy [32], par :

$$\sigma = \frac{\Delta p S}{Q_v l} \quad (3.8)$$

Avec Q_v le débit créé par la différence de pression Δp aux bornes d'un échantillon de section S et d'épaisseur l .

Comme σ dépend de la viscosité μ du fluide saturant, on peut y préférer la perméabilité statique qui ne dépend que de la microgéométrie du squelette.

$$k_0 = \frac{\mu}{\sigma} \quad (3.9)$$

- **La longueur caractéristique visqueuse Λ** : décrit la variation des effets visqueux en hautes fréquences. Cet effet est significatif à proximité des parois dans l'épaisseur de la couche limite visqueuse δ , il dépend donc du rapport δ/Λ avec (figure 3.4):

$$\Lambda = 2 \frac{\int_{V_f} |\dot{U}_m|^2 dV}{\int_{S_i} |\dot{U}_m|^2 dS} \quad (3.10)$$

Où :

S_i : est l'interface de contact fluide-squelette.

V_f : le volume de fluide.

\dot{U}_m : la vitesse microscopique d'un fluide parfait incompressible circulant à travers les pores de la structure solide.

La valeur du Λ est de l'ordre du rayon des pores les plus petits.

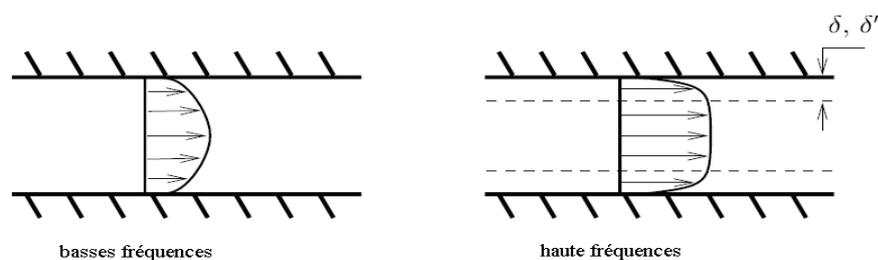


Figure 3.4 : profils des vitesses dans un pore cylindrique.

- **La longueur caractéristique thermique** Λ' : décrit les échanges thermiques entre les deux phases en hautes fréquences, elle est donnée par :

$$\Lambda' = \frac{\int dV}{2 \int_{S_i} dS} \frac{v_f}{v_s} \quad (3.11)$$

Λ' : a une dimension de l'ordre des pores les plus grands, là où les surfaces d'échange sont plus importantes.

3.3.1.4. Relations contraintes-déformations

Les relations contraintes-déformations pour les deux phases solide et fluide d'un milieu poreux s'écrivent [57] :

$$\sigma_{ij}^s(\underline{u}, \underline{U}) = (\tilde{A}u_{i,i} + \tilde{Q}U_{i,i})\delta_{ij} + 2N\varepsilon_{ij}^s \quad (3.12)$$

$$\sigma_{ij}^f = -\phi p \delta_{ij} = (\tilde{Q}u_{i,i} + \tilde{R}U_{i,i})\delta_{ij} \quad (3.13)$$

Où : \underline{u} et \underline{U} représentent respectivement les déplacements macroscopiques des phases solide et fluide. ε_{ij}^s exprime les composantes du tenseur des déformations macroscopiques associées à la phase solide, σ_{ij}^s et σ_{ij}^f , celles du tenseur des contraintes de la phase solide et de la phase fluide respectivement. δ_{ij} est le symbole de Kronecker.

Les coefficients élastiques dynamiques complexes peuvent s'exprimer, en supposant que le module de compressibilité du poreux soit faible, ce qui est vérifié pour la majorité des poreux en acoustique [88]:

$$\tilde{A} = \frac{(1-\phi)^2}{\phi} \tilde{K}_e + 2N \frac{\nu}{(1-2\nu)} \quad (3.14)$$

$$\tilde{Q} = (1-\phi)\tilde{K}_e \quad (3.15)$$

$$\tilde{R} = \phi \tilde{K}_e \quad (3.16)$$

\tilde{A} : s'identifie au premier coefficient de Lamé λ dans la théorie de l'élasticité.

\tilde{Q} : exprime le couplage existant entre les déformations de la phase solide et celles de la phase fluide.

\tilde{R} : peut être interprété comme le module de compression du fluide occupant une fraction ϕ du volume du milieu poreux.

\tilde{K}_e : est le module de compressibilité équivalent de la phase fluide (donc de l'air) tenant compte de la dissipation due aux échanges thermiques entre les deux phases. Son expression est détaillée en section (3.3.1.5.2).

Ces coefficients sont complexes et dépendent de la fréquence. Cette dépendance est marquée par le sigle tilde ($\tilde{}$).

N : correspond au deuxième coefficient de Lamé μ en élasticité (ou de module de cisaillement G). Il est complexe, mais supposé réel et indépendant de la fréquence à l'origine des travaux de M.A. Biot.

ν et η_s : sont respectivement le coefficient de Poisson macroscopique et le coefficient d'amortissement structural de la matrice du milieu poreux. Ils sont supposés réels et constants en fréquence à l'origine.

3.3.1.5. Equations du mouvement

Les équations en mouvement harmonique pour les deux phases du matériau poreux s'écrivent :

$$\sigma_{ij,j}^s(\underline{u}, \underline{U}) = -\omega^2 (\tilde{\rho}_{11} u_i + \tilde{\rho}_{12} U_i) \quad (3.17)$$

$$-\phi p_{,i} = -\omega^2 (\tilde{\rho}_{12} u_i + \tilde{\rho}_{22} U_i) \quad (3.18)$$

Où :

$$\tilde{\rho}_{11} = \rho_{11} + \frac{\tilde{b}}{j\omega} \quad (3.19)$$

$$\tilde{\rho}_{12} = \rho_{12} - \frac{\tilde{b}}{j\omega} \quad (3.20)$$

$$\tilde{\rho}_{22} = \rho_{22} + \frac{\tilde{b}}{j\omega} \quad (3.21)$$

Les termes définis en équations (3.19), (3.20) et (3.21) sont homogènes à des masses volumiques. Ces grandeurs tiennent compte des effets d'inertie, via les termes ρ_{ij} , et sont corrigés des effets visqueux par un coefficient complexe \tilde{b} dont l'expression est détaillée à la section suivante.

Les termes ρ_{ij} sont définis par :

$$\rho_{11} = \rho_1 - \rho_{12} \quad (3.22)$$

$$\rho_{12} = -\phi\rho_0(\alpha_\infty - 1) \quad (3.23)$$

$$\rho_{22} = \phi\rho_0 - \rho_{12} \quad (3.24)$$

$$\rho_1 = (1-\phi)\rho_s \quad (3.25)$$

ρ_0 : représente la masse volumique de l'air, ρ_1 celle de la phase solide et ρ_s celle du matériau constituant la phase solide. ρ_{11} et ρ_{22} sont respectivement les masses volumiques apparentes des phases solide et fluide corrigées d'un facteur de couplage massique ρ_{12} entre les deux phases du matériau. α_∞ , la tortuosité géométrique du réseau poreux, étant supérieure ou égale à 1, ρ_{12} est toujours négative. Son influence sur les termes ρ_{11} et ρ_{22} est donc un effet de masse ajoutée liée à la géométrie macroscopique du matériau.

3.3.1.5.1. Effets visqueux

Les effets visqueux sont pris en compte par le coefficient \tilde{b} , qui intervient dans l'expression des masses volumiques dynamiques complexes (équations (3.19), (3.20) et (3.21)). Ce coefficient d'amortissement visqueux est complexe et

dépendant de la fréquence. Son expression générale est reliée à la porosité et à la résistance statique à l'écoulement :

$$\tilde{b} = \phi^2 \sigma \tilde{G} \quad (3.26)$$

Où \tilde{G} est un facteur correcteur de la viscosité en hautes fréquences, exprimé par Johnson et al. [65] par:

$$\tilde{G} = \sqrt{1 + j \frac{4\alpha_\infty^2 \mu \rho_0 \omega}{\sigma^2 \Lambda^2 \phi^2}} \quad (3.27)$$

μ : la viscosité de l'air.

3.3.1.5.2. Effets thermiques

Les mécanismes de dissipation reliés aux effets thermiques ont été introduits par Champoux et Allard [74] de façon similaire aux mécanismes de dissipation visqueux.

Les mécanismes de dissipation thermique sont considérés indépendants des effets visqueux et pris en compte par le module de compression dynamique complexe \tilde{K}_e . Cette dissipation thermique est le résultat des échanges thermiques entre l'onde acoustique se propageant dans la phase fluide et la matrice solide du matériau poreux.

L'expression de \tilde{K}_e est donnée par :

$$\tilde{K}_e = \frac{\mathcal{P}_0}{\gamma - (\gamma - 1) \left[1 + \frac{8\mu}{j\Lambda^2 B^2 \omega \rho_0} \tilde{G}' \right]^{-1}} \quad (3.28)$$

Où γ est le rapport des chaleurs spécifiques de l'air, p_0 est la pression atmosphérique et P_r est le nombre de Prandtl, rapport de la viscosité cinématique sur la diffusivité thermique.

\tilde{G}' : est le facteur correcteur thermique :

$$\tilde{G}' = \sqrt{1 + j \frac{\Lambda'^2 B^2 \omega \rho_0}{16\mu}} \quad (3.29)$$

3.3.2. Formulation mixte déplacement-pression (u, p)

Dans la section précédente, le modèle comportemental de Biot-Allard a été décrit en utilisant les déplacements des phases solide (u) et fluide (U). Une formulation dite : la formulation mixte (u, p), implantée par Attala et all. exprimée par les déplacements des phases solides et la pression dans les pores permettant ainsi de réduire le nombre d'inconnues nodales de 6 inconnues nodales à 4 inconnues.

Cette formulation est extraite de la formulation (u, U) et utilise les mêmes hypothèses déjà citées en section (3.3.1.3).

3.3.2.1. Principe de la formulation mixte (u, p)

3.3.2.1.1. Phase solide

Dans un premier temps, on développe l'équation du mouvement reliée à la phase solide. L'équation (3.18) permet d'exprimer le déplacement moyen de la phase fluide U en fonction de la pression p dans les pores et du déplacement moyen u de la phase solide.

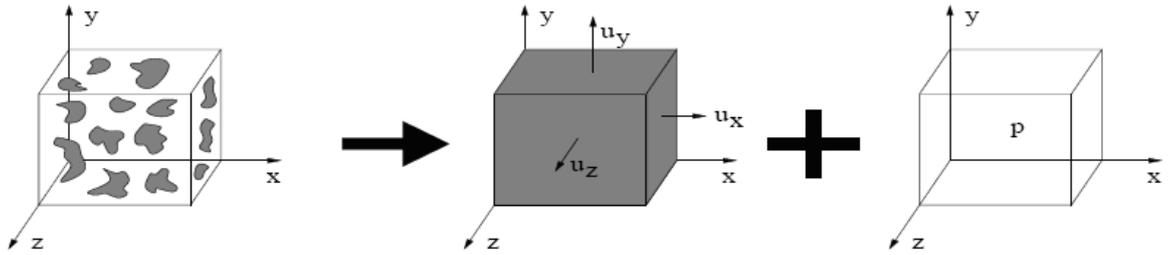


Figure 3.5 : Représentation d'un matériau poreux diphasique d'après la formulation mixte déplacement-pression ou (u, p) [86].

Ce qui conduit à l'équation suivante :

$$U_i = \frac{\phi}{\omega^2 \tilde{\rho}_{22}} p_{,i} - \frac{\tilde{\rho}_{12}}{\tilde{\rho}_{22}} u_i \quad (3.30)$$

On substitue cette expression dans l'équation d'équilibre dynamique liée à la phase solide (3.17), pour obtenir :

$$\sigma_{ij,j}^s(\underline{u}, \underline{U}) = -\omega^2 \left(\tilde{\rho}_{11} - \frac{\tilde{\rho}_{12}^2}{\tilde{\rho}_{22}} \right) u_i - \tilde{\rho}_{12} \frac{\phi}{\tilde{\rho}_{22}} p_{,i} \quad (3.31)$$

Qui devient :

$$\sigma_{ij,j}^s(\underline{u}, \underline{U}) + \omega^2 \tilde{\rho}_s u_i + \phi \frac{\tilde{\rho}_{12}}{\tilde{\rho}_{22}} p_{,i} = 0 \quad (3.32)$$

Avec :

$$\tilde{\rho}_s = \tilde{\rho}_{11} - \frac{\tilde{\rho}_{12}^2}{\tilde{\rho}_{22}} \quad (3.33)$$

$\tilde{\rho}_s$: est la masse volumique fictive de la phase solide. L'équation (3.32) s'exprime bien en fonction du déplacement moyen \underline{u} de la phase solide et de la pression p

dans les pores. Cependant, on remarque que le terme $\sigma_{ij,j}^s(\underline{u}, \underline{U})$, faisant intervenir le tenseur des contraintes de la phase solide, est toujours dépendant de la variable \underline{U} . Afin d'éliminer cette variable de l'équation (3.32), on utilise les relations contraintes-déformations présentées à la section (3.3.1.4). En isolant le terme $U_{i,i}$ de la relation (3.13) et en multipliant le résultat par \tilde{Q}/\tilde{R} , on obtient :

$$\tilde{Q}U_{i,i} = \frac{-\phi\tilde{Q}}{\tilde{R}}p - \frac{\tilde{Q}^2}{\tilde{R}}u_{i,i} \quad (3.34)$$

On introduit cette nouvelle expression dans la relation contraintes-déformations pour la phase solide donnée en (3.12) de façon à éliminer la dépendance du tenseur des contraintes du squelette solide en \underline{U} . On obtient ainsi:

$$\sigma_{ij,j}^s(\underline{u}, \underline{U}) = \left(\tilde{A} - \frac{\tilde{Q}^2}{\tilde{R}} \right) u_{i,i} \delta_{ij} + 2N\varepsilon_{ij}^s - \phi \frac{\tilde{Q}}{\tilde{R}} p \delta_{ij} \quad (3.35)$$

On définit ensuite le tenseur des contraintes réduit $\hat{\sigma}_{ij}^s(\underline{u})$:

$$\hat{\sigma}_{ij}^s(\underline{u}) = \left(\tilde{A} - \frac{\tilde{Q}^2}{\tilde{R}} \right) u_{i,i} \delta_{ij} + 2N\varepsilon_{ij}^s \quad (3.36)$$

Ce nouveau tenseur s'interprète physiquement comme étant le tenseur des contraintes agissant sur la phase solide *in vacuo*. Ce sont les contraintes qui agiraient sur le squelette solide seul si le fluide dans les pores était "remplacé" par du vide. En substituant cette relation dans l'équation (3.35), on obtient :

$$\sigma_{ij}^s(\underline{u}, \underline{U}) = \hat{\sigma}_{ij}^s(\underline{u}) - \phi \frac{\tilde{Q}}{\tilde{R}} p \delta_{ij} \quad (3.37)$$

En utilisant les expressions de \tilde{Q} et \tilde{R} , données en équations (3.14), (3.16) et (3.15), il est facile de s'apercevoir que $\phi\tilde{Q}/\tilde{R}$ peut se simplifier en $(1-\phi)$, ce qui permet de réécrire l'équation (3.37) de la façon suivante :

$$\sigma_{ij}^s(\underline{u}, \underline{U}) = \hat{\sigma}_{ij}^s(\underline{u}) - (1-\phi)p\delta_{ij} \quad (3.38)$$

Le tenseur des contraintes agissant sur la phase solide du milieu poreux s'exprime alors comme la somme du tenseur des contraintes réduit $\hat{\sigma}_{ij}^s(\underline{u})$ et des contraintes fluides agissant sur un volume $(1-\phi)$. On peut ensuite introduire cette expression dans (3.32) pour obtenir l'équation du mouvement de la phase solide en fonction de \underline{u} et p :

$$\hat{\sigma}_{ij,j}^s(\underline{u}) + \omega^2 \tilde{\rho}_s u_i + \tilde{\gamma} p_{,i} = 0 \quad (3.39)$$

Avec :

$$\tilde{\gamma} = \phi \left(\frac{\tilde{\rho}_{12}}{\tilde{\rho}_{22}} - \frac{\tilde{Q}}{\tilde{R}} \right) \quad (3.40)$$

$\tilde{\gamma}$: est un coefficient de couplage volumique. L'équation (3.39) ainsi obtenue est l'équation d'équilibre dynamique associée à la phase solide du matériau poroélastique. Elle a la forme de l'équation de l'élastodynamique classique, $\tilde{\gamma} p_{,i}$ représentant un terme de charge fluide appliquée sur la phase solide.

3.3.2.1.2. Phase fluide

Dans un second temps, on développe l'équation du mouvement liée à la phase fluide.

La divergence de l'équation (3.30) donne :

$$U_{i,i} = \frac{\phi}{\omega^2 \tilde{\rho}_{22}} p_{,ii} - \frac{\tilde{\rho}_{12}}{\tilde{\rho}_{22}} u_{i,i} \quad (3.41)$$

En combinant cette expression avec la relation (3.18), on obtient l'équation du mouvement de la phase fluide en fonction des variables \underline{u} et p :

$$\phi p_{,ii} - \omega^2 \left(\tilde{\rho}_{12} - \tilde{\rho}_{22} \frac{\tilde{Q}}{\tilde{R}} \right) u_{i,i} + \omega^2 \tilde{\rho}_{22} \frac{\phi}{\tilde{R}} p = 0 \quad (3.42)$$

En multipliant cette relation par $\frac{1}{\phi}$ et en utilisant l'expression de $\tilde{\gamma}$ donnée en (3.40), on obtient :

$$p_{,ii} + \omega^2 \frac{\tilde{\rho}_{22}}{\tilde{R}} p - \omega^2 \frac{\tilde{\rho}_{22}}{\phi^2} \tilde{\gamma} u_{i,i} = 0 \quad (3.43)$$

Qui se réécrit, en la multipliant par $\phi^2 / (\omega^2 \tilde{\rho}_{22})$:

$$\frac{\phi^2}{\omega^2 \tilde{\rho}_{22}} p_{,ii} + \frac{\phi^2}{\tilde{R}} p = \tilde{\gamma} u_{i,i} \quad (3.44)$$

Cette dernière relation peut être alors vue comme l'équation de Helmholtz modifiée par un terme source $\tilde{\gamma} u_{i,i}$ relié à la dilatation harmonique de la phase solide.

3.3.2.2. Formulation intégrale faible

Les équations du mouvement en déplacement-pression développées dans la section précédente nous permettent de construire la formulation variationnelle du problème poro-élastique exprimée en terme du déplacement moyen de la phase solide et de la pression dans les pores. Elles s'écrivent en régime harmonique :

$$\hat{\sigma}_{ij,j}^s(\underline{u}) + \omega^2 \tilde{\rho}_s u_i + \tilde{\gamma} u_{i,i} = 0 \quad (3.45)$$

$$\frac{\phi^2}{\omega^2 \tilde{\rho}_{22}} p_{,ii} + \frac{\phi^2}{\tilde{R}} p - \tilde{\gamma} u_{i,i} = 0 \quad (3.46)$$

Soit δu_i et δp_i des variations admissibles du champ de déplacement de la phase solide et du champ de pression de la phase fluide du milieu poro-élastique.

On multiplie respectivement les relations (3.45) et (3.46) par δu_i et δp_i , puis on intègre sur le domaine poreux Ω^m pour obtenir la formulation intégrale forte de Galerkin associée au milieu poreux :

$$\int_{\Omega^m} \left(\hat{\sigma}_{ij,j}^s(\underline{u}) + \omega^2 \tilde{\rho}_s u_i + \tilde{\gamma} u_{i,i} \right) \delta u_i d\Omega = 0 \quad (3.47)$$

$$\int_{\Omega^m} \left(\frac{\phi^2}{\omega^2 \tilde{\rho}_{22}} p_{,ii} + \frac{\phi^2}{\tilde{R}} p - \tilde{\gamma} u_{i,i} \right) \delta p_i d\Omega = 0 \quad (3.48)$$

En appliquant la deuxième formule de Green aux intégrales précédentes et en tenant compte de la symétrie du tenseur des contraintes réduit $\hat{\sigma}_{ij}^s$ de la phase solide, on obtient les formulations intégrales faibles de Galerkin pour les deux phases du milieu poroélastique :

$$\int_{\Omega^m} \hat{\sigma}_{ij}^s(\underline{u}) \varepsilon_{ij}^s(\delta \underline{u}) d\Omega - \omega^2 \int_{\Omega^m} \tilde{\rho}_s u_i \delta u_i d\Omega - \int_{\Omega^m} \tilde{\gamma} p_{,i} \delta u_i d\Omega - \int_{\partial\Omega^m} \hat{\sigma}_{ij}^s(\underline{u}) n_j^p \delta u_i dS = 0 \quad (3.49)$$

$$\int_{\Omega^m} \left[\frac{\phi^2}{\omega^2 \tilde{\rho}_{22}} p_{,i} \delta p_{,i} - \frac{\phi^2}{\tilde{R}} p \delta p \right] d\Omega - \int_{\Omega^m} \tilde{\gamma} u_i \delta p_{,i} d\Omega + \int_{\partial\Omega^m} \left[\tilde{\gamma} u_i n_i^p - \frac{\phi^2}{\omega^2 \tilde{\rho}_{22}} p_{,i} n_i^p \right] \delta p dS = 0 \quad (3.50)$$

Les deux équations (3.49) et (3.50) définissent la formulation mixte en déplacement-pression introduite par Atalla et al. [87]. Cette formulation est utilisée pour des problèmes de couplages poroélastique - acoustique.

3.3.2.3. Puissances dissipées

Des résultats précédents, il est possible d'écrire les expressions des puissances dissipées par les différents mécanismes entrant en jeu dans un matériau poroélastique.

- Puissance dissipée par effets structuraux.

La moyenne temporelle de la puissance dissipée par les effets structuraux est donnée par :

$$\Pi_{diss}^s = \frac{1}{2} \text{Im} \left(\omega \int_{\Omega^m} \underline{\hat{\sigma}}^s(\underline{u}) : \underline{\hat{\varepsilon}}^s(\underline{u}) d\Omega \right) \quad (3.51)$$

- Puissance dissipée par effets visqueux.

La moyenne temporelle de la puissance dissipée par les effets visqueux est donnée par :

$$\Pi_{diss}^v = \frac{1}{2} \text{Im} \left[-\omega^3 \int_{\Omega^m} \tilde{\rho} \underline{u} \cdot \underline{u}^* d\Omega + \int_{\Omega^m} \frac{\phi^2}{\omega \tilde{\rho}_{22}} \nabla p \cdot (\nabla p)^* d\Omega - 2\omega \frac{\phi^2 \rho_0}{\tilde{\rho}_{22}} \int_{\Omega^m} \text{Re}(\nabla p \cdot \underline{u}^*) d\Omega \right] \quad (3.52)$$

En faisant l'approximation que le rapport \tilde{Q}/\tilde{R} est purement réel, on obtient :

$$\text{Im} \left[\frac{\phi^2 \rho_0}{\tilde{\rho}_{22}} \right] = \text{Im} \left[\tilde{\gamma} + \phi \left(1 + \frac{\tilde{Q}}{\tilde{R}} \right) \right] \approx \text{Im}[\tilde{\gamma}] \quad (3.53)$$

Et une approximation de la puissance dissipée par effets visqueux est :

$$\Pi_{diss}^v \approx \frac{1}{2} \text{Im} \left[-\omega^3 \int_{\Omega^m} \tilde{\rho} \underline{u} \cdot \underline{u}^* d\Omega + \int_{\Omega^m} \frac{\phi^2}{\omega \tilde{\rho}_{22}} \nabla p \cdot (\nabla p)^* d\Omega - 2\omega \tilde{\gamma} \int_{\Omega^m} \text{Re}(\nabla p \cdot \underline{u}^*) d\Omega \right] \quad (3.54)$$

- Puissance dissipée par effets thermiques.

La moyenne temporelle de la puissance dissipée par les effets thermiques s'écrit :

$$\Pi_{diss}^t = \frac{1}{2} \text{Im} \left[\omega \phi \left(1 + \frac{\tilde{Q}}{\tilde{R}} \right) \int_{\Omega^m} 2 \text{Re}(\nabla p \cdot \underline{u}^*) d\Omega - \omega \int_{\Omega^m} \frac{\phi^2}{\tilde{R}} p \cdot p^* d\Omega \right] \quad (3.55)$$

En faisant la même approximation que précédemment sur la valeur de \tilde{Q}/\tilde{R} , la puissance dissipée par effets thermiques est approximée par la relation :

$$\Pi_{diss}^t = \frac{1}{2} \text{Im} \left[-\omega \int_{\Omega^m} \frac{\phi^2}{\tilde{R}} p \cdot p^* d\Omega \right] \quad (3.56)$$

3.4. CONCLUSION

La formulation mixte (u, p) , exprimée par les trois déplacements par nœuds et la pression dans les pores, permet de réduire le nombre d'inconnues nodales de quatre à six, ce qui donne des systèmes matriciels peu importants et fournit des gains dans les espaces mémoires utilisés.

Cette formulation, implantée récemment dans le logiciel Ansys 12.0, en utilisant des éléments poreux appelés : éléments CPT (Coupled Pore-Pressure Element), sera utilisée dans la partie numérique qui suit, dans le but d'étudier l'absorption acoustique des matériaux poreux les plus répandus dans l'industrie automobile.

CHAPITRE 4 : MODELISATION ET APPLICATION

4.1. INTRODUCTION

Dans leurs applications courantes pour les véhicules de transport, les dispositifs passifs de contrôle du bruit construits à base de matériaux poreux, se trouvent sous la forme de plaques parallélépipédiques [6, 89, 90].

Notre étude consiste à modéliser numériquement, sous Ansys 12.0, des plaques poreuses de différentes natures (mousse polymère, mousse polyuréthane, fibre textile et laine de verre), et de faire une étude comparative d'absorption de chaque type.

Dans ce sens, nous avons exploité la flexibilité du code Ansys pour proposer et injecter des variantes de petits modèles nécessaires à notre projet. En effet nous avons fait intervenir des spécificités comme il est illustré dans les applications présentées.

4.2. PROPRIETES MECANIQUES DES POREUX UTILISES

Les matériaux poreux à modéliser, sont les plus utilisés dans l'industrie automobile, ils sont, des mousses mélamine et polyuréthane, des laines de verre et des fibres textiles. Les propriétés mécaniques de ces matériaux sont récapitulées dans le tableau ci-dessous [6, 25, 80, 91] :

Matériau Propriétés	Mousse Mélamine	Mousse Polyuréthane	Laine de Verre	Fibre Textile
$E(N/m^2) \times 10^3$	160	190	14	170
ν	0.44	0.3	0	0
$\rho_1(Kg/m^3)$	8.35	57.20	17	58
η	0.06	0.05	0.1	0.1
ϕ	0.99	0.90	0.95	0.95
$\sigma(N.s/m^4) \times 10^3$	12.60	26.60	105	23
α_∞	1	1.3	1	1
$\Lambda(m \times 10^{-6})$	78	82	35.1	54.1
$\Lambda'(m \times 10^{-6})$	192	236	105.3	162.3
Coefficient de Biot α (%)	90	45	80	50
Perméabilité $k_0(m^2/s) \times 10^{-9}$	1,46	0.69	0.17	0.8

Tableau 4.1 : propriétés mécaniques des poreux

α : est un facteur d'absorption de Biot qui caractérise les matériaux absorbants et représente le rapport de l'énergie sonore absorbée sur l'énergie sonore incidente [92, 93].

- Si $\alpha = 0$, rien n'est absorbé et tout le bruit est réverbéré (exemple : le béton lisse).
- Si $\alpha = 1$, tout est absorbé (exemple : porte ouverte).

4.3. PROPRIETES DU FLUIDE SATURANT

Le fluide saturant est généralement bien connu. C'est l'air, et ne fait pas l'objet d'une caractérisation particulière. Ses propriétés viscothermiques sont bien sûr essentielles. Les valeurs prises par défaut pour l'air sont répertoriées dans le tableau suivant [6, 32, 94] :

Température au repos	$T_0 = 18^\circ C$
Pression au repos	$P_0 = 101320 Pa$
Masse volumique au repos	$\rho_0 = 1.21 Kg / m^3$
Vitesse de son	$c_0 = 342.2 m / s$
Module d'incompressibilité adiabatique	$K_a = 142 \times 10^3 Pa$
Impédance caractéristique	$Z_0 = 415.1 Pa m^{-1} s$
Viscosité	$\mu = 1.84 \times 10^{-5} Kg / m s$
Nombre de Prandtl	$P_r = 0.71$
Rapport des chaleurs spécifiques	$\gamma = 1.4$

Tableau 4.2 : propriétés du fluide saturant

4.4. DOMAINES DES FREQUENCES

Le modèle Biot-Allard est caractérisé par trois domaines fréquentiels [65, 66, 91], figure 4.1:

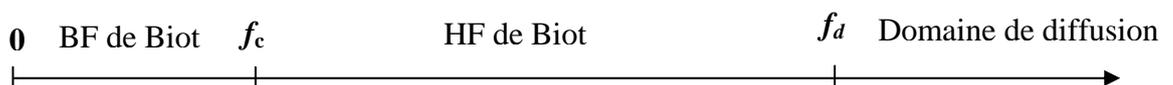


Figure 4.1 : domaines des fréquences

1. Entre 0 et f_c : domaine basses fréquences de Biot.
2. Entre f_c et f_d : domaine hautes fréquences de Biot.
3. Au-delà de f_d : domaine basses fréquences des modèles de diffusion (modèle Biot cesse d'être applicable).

Avec :

f_c : Fréquence caractéristique de Biot, elle est d'ordre de 10^3 Hz [91].

f_d : Fréquence de diffusion de Biot, elle est d'ordre de 10^6 Hz [91].

Les techniques passives de réduction du bruit utilisant des matériaux absorbant poreux sont plus efficaces aux hautes fréquences de Biot, à savoir, dans le domaine $[f_c, f_d]$.

4.5. PROPRIETES GEOMETRIQUES DES PLAQUES ETUDIEES

Les dimensions des plaques modélisées, sont des dimensions réelles d'un véhicule léger. En analysant les parties du véhicule, les plus exposés au bruit, on peut citer :

1. la plaque poreuse colée à la face interne des portes.
2. la plaque poreuse du plafond.
3. la plaque poreuse fixée contre le tableau de bord.

On peut donc parler respectivement, de :

1. modèle porte.
2. modèle plafond.
3. modèle tableau de bord.

4.6. APPLICATIONS

4.6.1. Modèle porte

4.6.1.1. Dimensions de la plaque

Ce modèle fait intervenir une plaque poreuse de dimensions $L_x=800mm$, $L_y=10mm$ et $L_z=550mm$ (figure 4.2). La plaque est excitée, sur sa face externe, par une pression de 0.01 Pa.

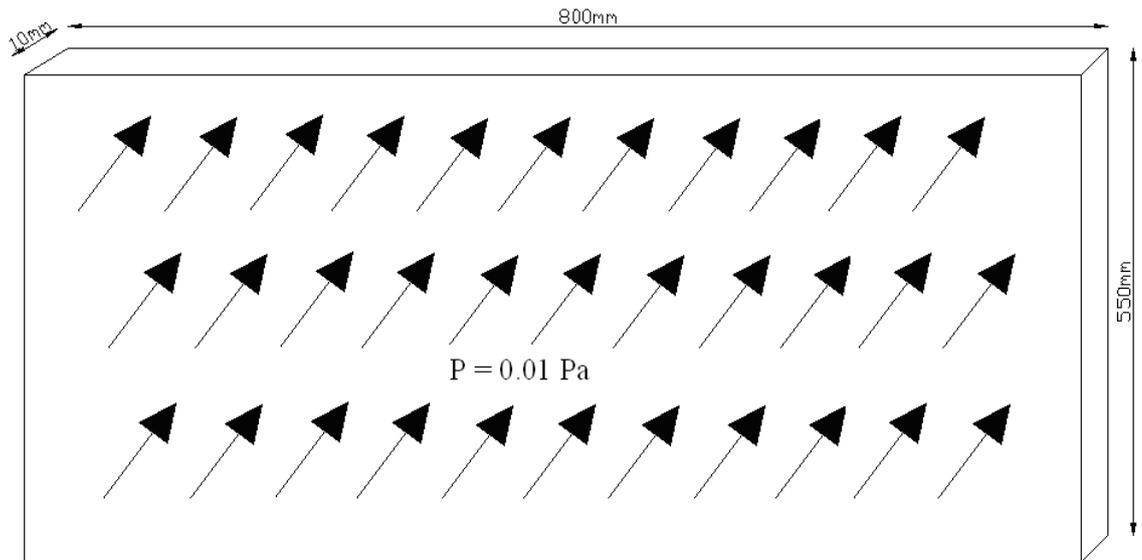


Figure 4.2 : dimensions de la plaque poreuse, modèle porte

4.6.1.2. Choix des éléments

Les éléments finis utilisés sont des éléments poreux 3D à 8 nœuds, implantés dans le logiciel Ansys 12.0, appelés : CPT 215 (Coupled Pore-Pressure Element) (figure4.3), ces éléments possède 04 ddl par noeud, trois déplacements, suivant x, y et z et une pression dans les pores. Pour les trois modèles (porte, plafond et tableau de bord), les mêmes éléments finis seront utilisés.

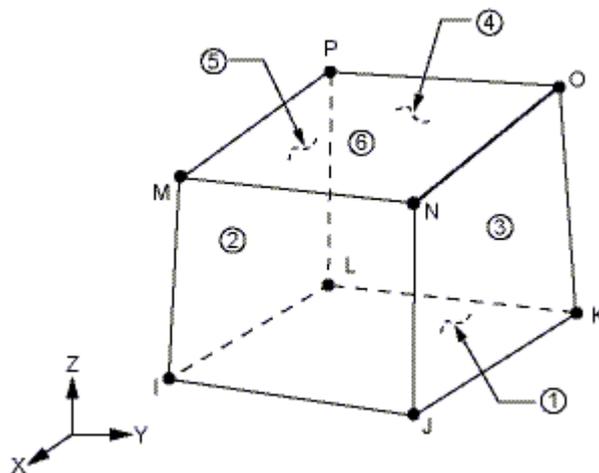


Figure 4.3 : élément CPT 215 [95]

Les propriétés poreuses des éléments CPT215 ont été introduites à travers un programme constituant la contribution personnelle, injecté en qualité de macros. Ci-dessous, un exemple de programme des propriétés poreuses d'une fibre textile :

```

/PREP7
!      CHOIX DE L'ELEMENT FINI
ET,1,CPT215
!      PROPRIETES DE L'ELEMENT
E=170E3      ! MODULE DE YOUNG
.....
.....
.....
!      INTRODUCTION DES PROPRIETES
MP,EX,1,E
.....
.....
.....
FINISH

```

4.6.1.3. Conditions aux limites appliquées à la plaque

La plaque poreuse est fixée par 16 vis contre l'ossature de la porte. Ces vis éliminent les 3 déplacements suivant : x, y et z. la figure ci-dessous (figure 4.4), présente les conditions aux limites appliquées à la plaque poreuse sous le logiciel Ansys, en éliminant les déplacements dans les trois directions dans des points bien répartis, en s'approchant le plus possible de la position réelle des vis fixant la plaque.

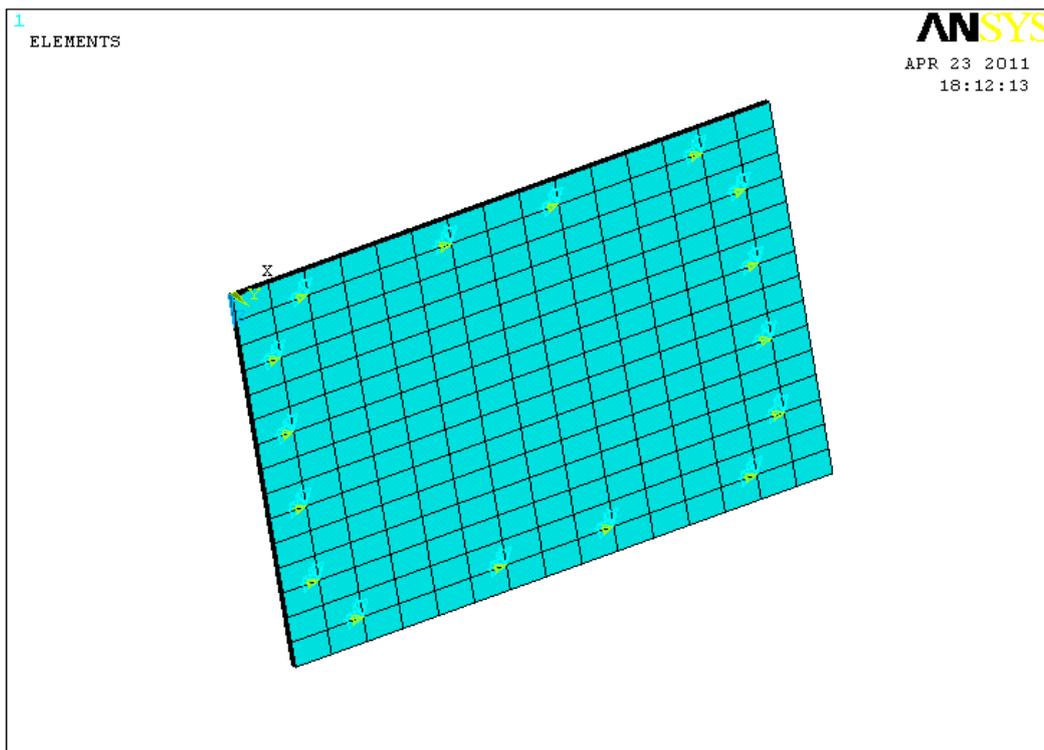


Figure 4.4 : conditions aux limites, modèle porte

4.6.1.4. Contraintes appliquées à la plaque

Toutes les contraintes subies par la plaque poreuse seront négligeables, et en prenant compte que la pression acoustique (bruit), s'exerçant sur la face colée contre l'ossature métallique de la porte, afin de déterminer, l'efficacité de la plaque poreuse, à arrêter ou à diminuer les nuisances sonores pénétrantes à l'intérieur du véhicule à travers la porte. La pression appliquée sur la plaque est de 0.01 Pa (figure 4.5).

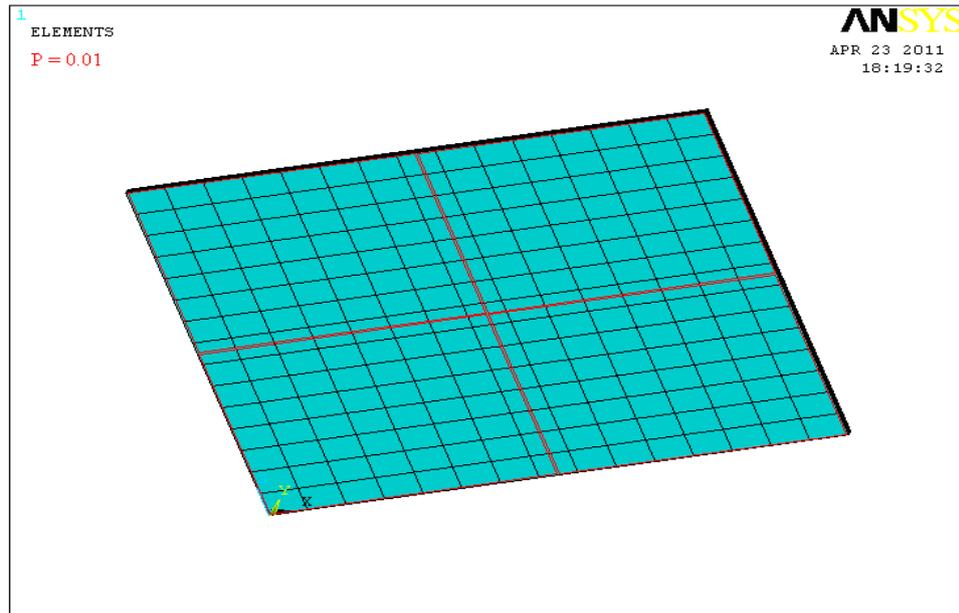


Figure 4.5 : pression appliquée, modèle porte

4.6.2. Modèle plafond

4.6.2.1. Dimensions de la plaque

Ce modèle est une plaque poreuse de dimensions $L_x = 1600\text{ mm}$, $L_y = 1000\text{ mm}$ et $L_z = 10\text{ mm}$ (figure 4.6). La plaque est excitée, sur sa face colée contre l'ossature métallique du plafond, par une pression de 0.01 Pa.

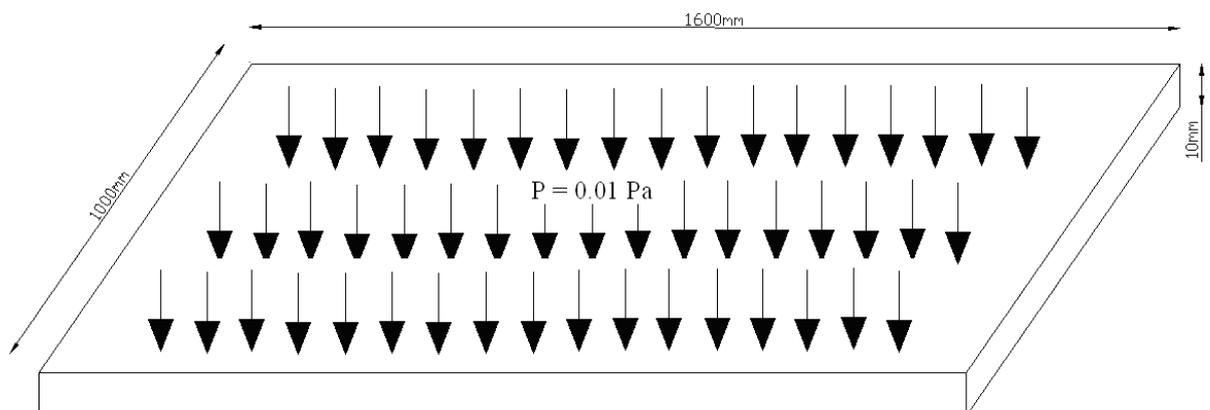


Figure 4.6 : dimensions de la plaque poreuse, modèle plafond

4.6.2.2. Les conditions aux limites

En partant de même principe que le modèle porte, la plaque poreuse collée contre l'ossature métallique du plafond est fixée par 14 vis, dont certains fixent aussi, les 2 plafonniers de devant et du milieu, ainsi que les 4 bras en plastiques situés juste au dessus des portes. La plaque poreuse est encastrée au niveau de ces deux faces latérales contre le véhicule (figure 4.7).

La plaque poreuse du plafond est modélisée par les mêmes éléments finis que la porte, à ça voir, les éléments CPT 215.

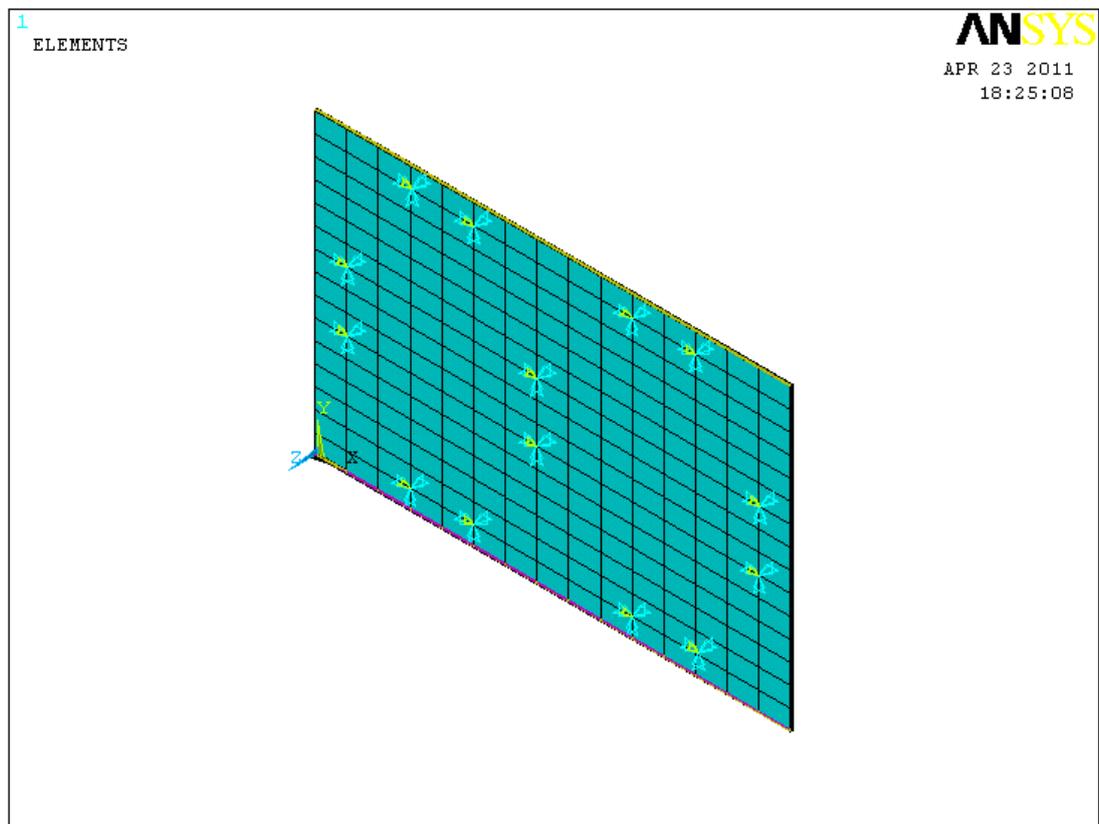


Figure 4.7 : conditions aux limites, modèle plafond

4.6.2.3. Contraintes subies par la plaque

On considère que la plaque est excitée perpendiculairement à sa face de dessus, par une pression acoustique de 0.01 Pa (figure 4.8).

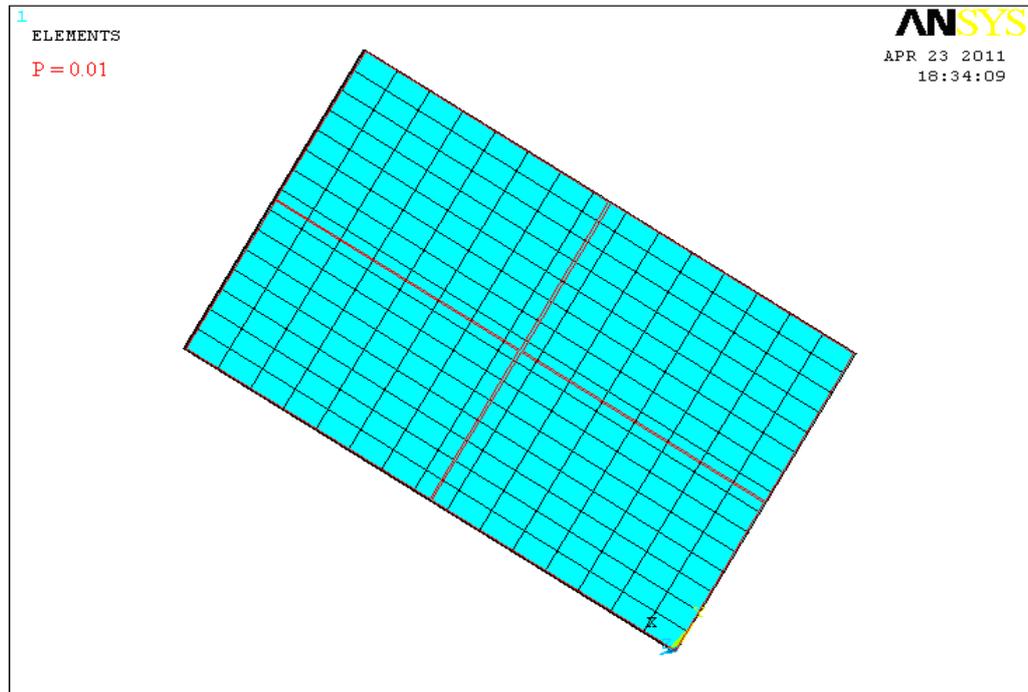


Figure 4.8 : pression appliquée, modèle plafond

4.6.3. Modèle tableau de bord

4.6.3.1. Dimensions du problème

Ce modèle fait intervenir une plaque poreuse de dimensions $L_x = 400\text{mm}$, $L_y = 1200\text{mm}$ et $L_z = 10\text{mm}$ (figure 4.9). La plaque est excitée, dans sa surface collée au véhicule, par une pression de 0.01 Pa.

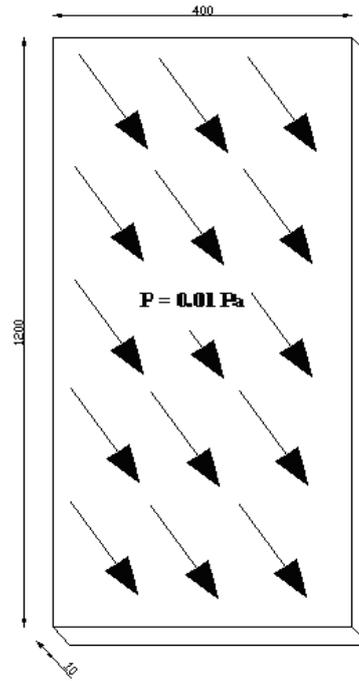


Figure 4.9 : dimensions de la plaque poreuse, modèle tableau de bord

4.6.3.2. Conditions aux limites

La plaque poreuse permettant de réduire les nuisances sonores provenant du moteur, est encastrée sur ces deux surfaces latérales contre l'ossature métallique du véhicule (figure 4.10).

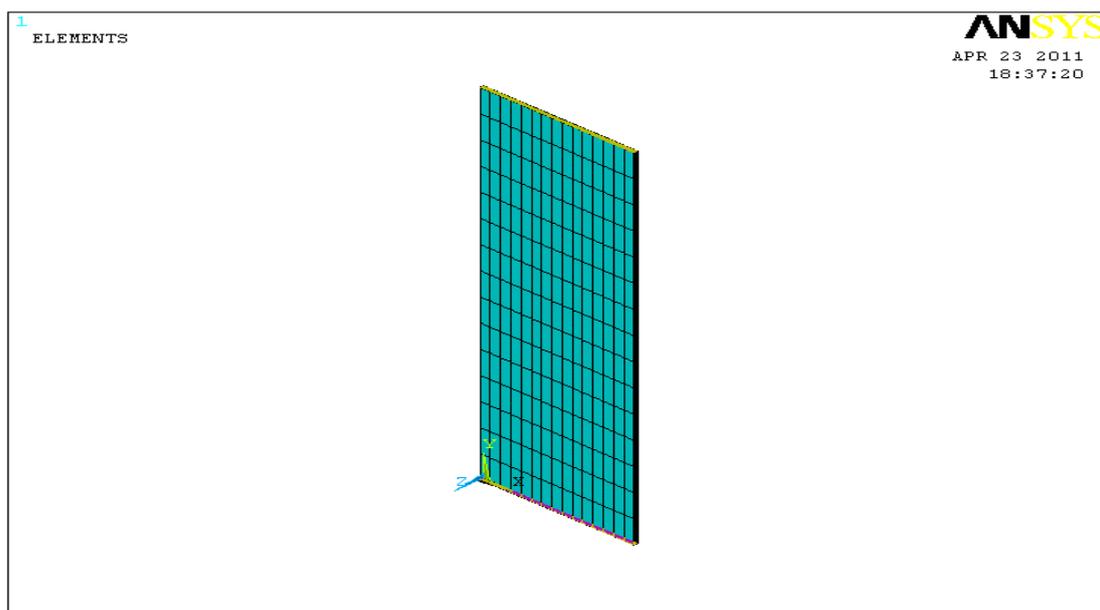


Figure 4.10 : conditions aux limites, modèle tableau de bord

4.6.3.3. Les contraintes

On considère que les nuisances sonores sont perpendiculaires à la surface poreuse et représentées par une pression de 0.01 Pa (figure 4.11).

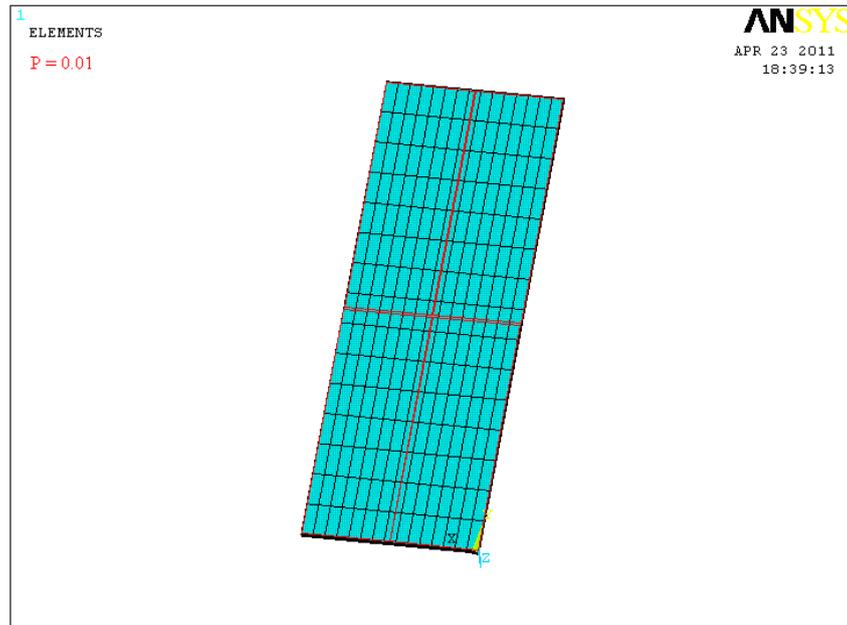


Figure 4.11 : pression appliquée, modèle tableau de bord

4.7. ORGANIGRAMME DE RESOLUTION

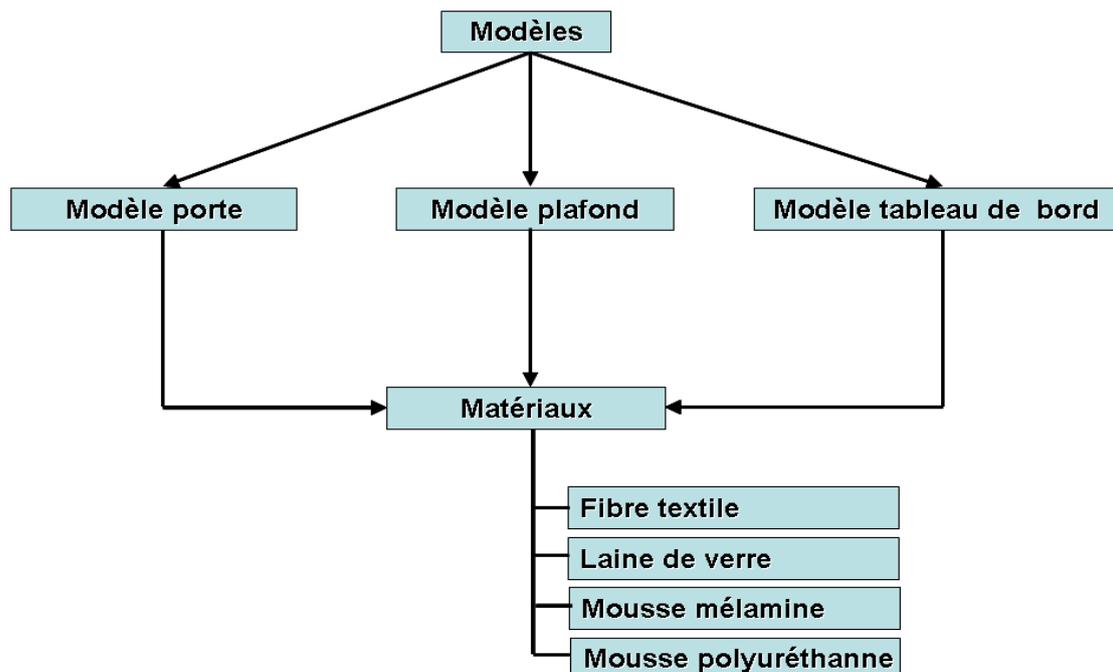


Figure 4.12 : Organigramme de résolution

4.8 RESULTATS OBTENUS SOUS FORME DE PLOTS ET TABLEAUX

Les trois modèles seront étudiés sous Ansys dans le domaine HP de Biot, avec des fréquences allant du 3 KHz à 3 MHz. Uniquement le mode 12 sera présenté avec des fréquences différentes : 3 KHz, 600 KHz, 1 MHz et 3 MHz.

Les résultats obtenus seront présentés sous forme de plots et tableaux, les plots illustrent la façon de la propagation de la pression dans la plaque et les valeurs récapitulées dans les tableaux donnent la valeur de la pression dans les nœuds de la face interne au véhicule (opposée à la face d'excitation).

Dans ce qui suit, les résultats sont illustrés sous forme de « plots » tandis-que les tableaux complets sont présentés en annexe.

4.8.1. Modèle porte

4.8.1.1. Fibre textile

Les plots présentés ci-dessous représentent la propagation de la pression au niveau de la face intérieure du véhicule, la valeur de la pression est représentée sur la barre colorée en bas du plot. Si une couleur n'apparait pas sur le plot, ça veut dire que la pression représentée par cette couleur est configurée sur l'une des autres faces de la plaque.

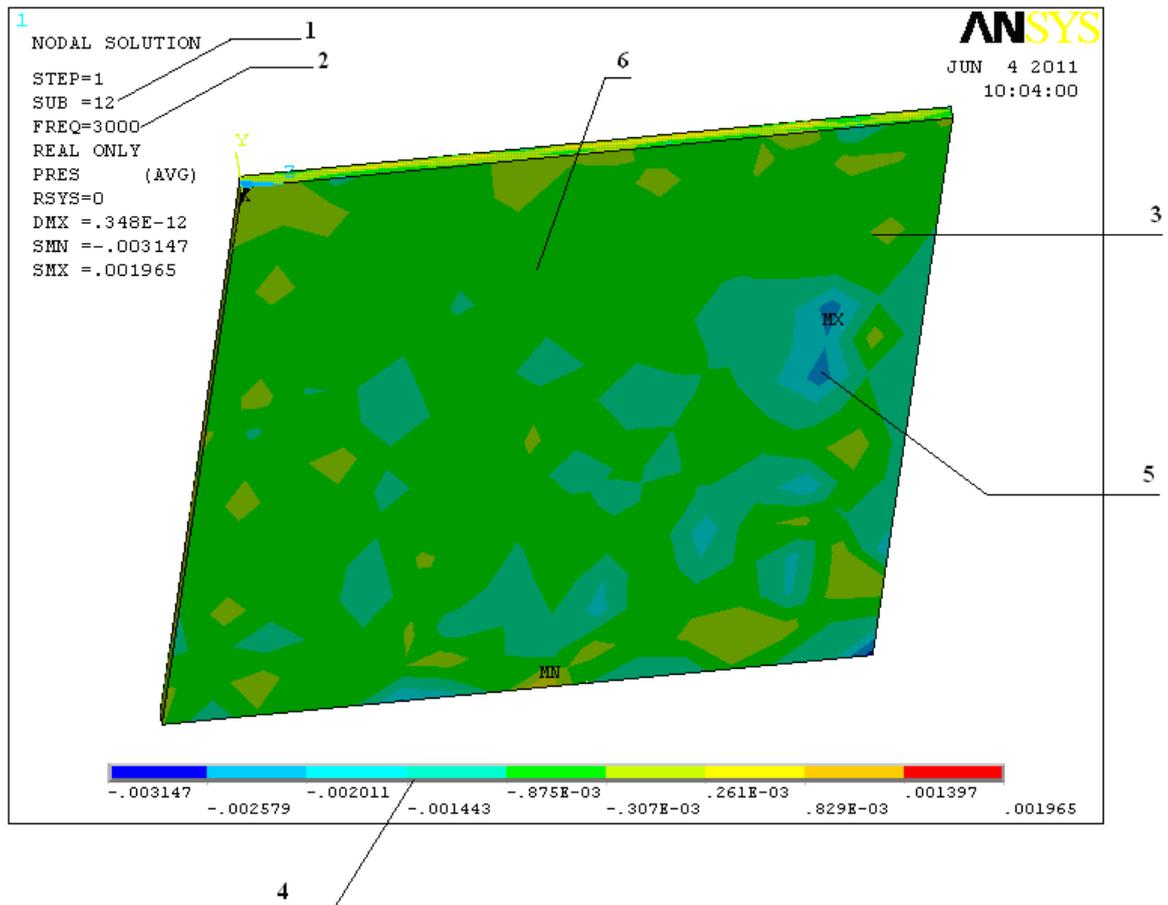


Figure 4.13 : la pression propagée dans la fibre textile, modèle porte à 3 KHz

Le plot ci-dessus représente la propagation de la pression dans la plaque poreuse en fibre textile du modèle porte. On remarque que le rouge n'apparait pas sur le plot, donc la couleur rouge est apparie sur une autre face de la plaque que celle étudiée (la face intérieure du véhicule).

1 : mode 12.

2 : fréquence d'excitation du 3 KHz.

3 : propagation de la pression sur la face opposée à celle d'excitation.

4 : bande colorée représente la valeur de la pression indiquée par chaque couleur.

5 : nœuds qui enregistrent la plus grande pression transmise en couleur bleu et en valeur absolue elle est de 0.003147 Pa.

6 : nœuds les moins affectés, qui enregistrent la petite pression transmise, en valeur absolue, elle est de 0.000307 Pa.

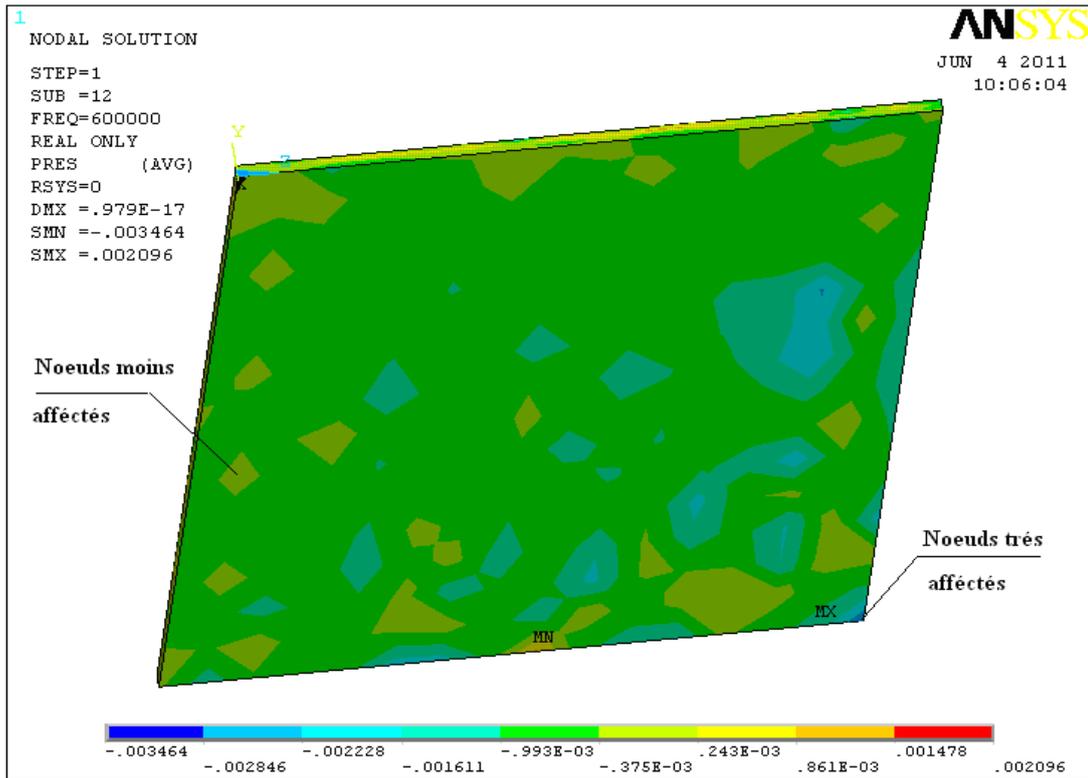


Figure 4.14 : la pression propagée dans la fibre textile, modèle porte à 600 KHz

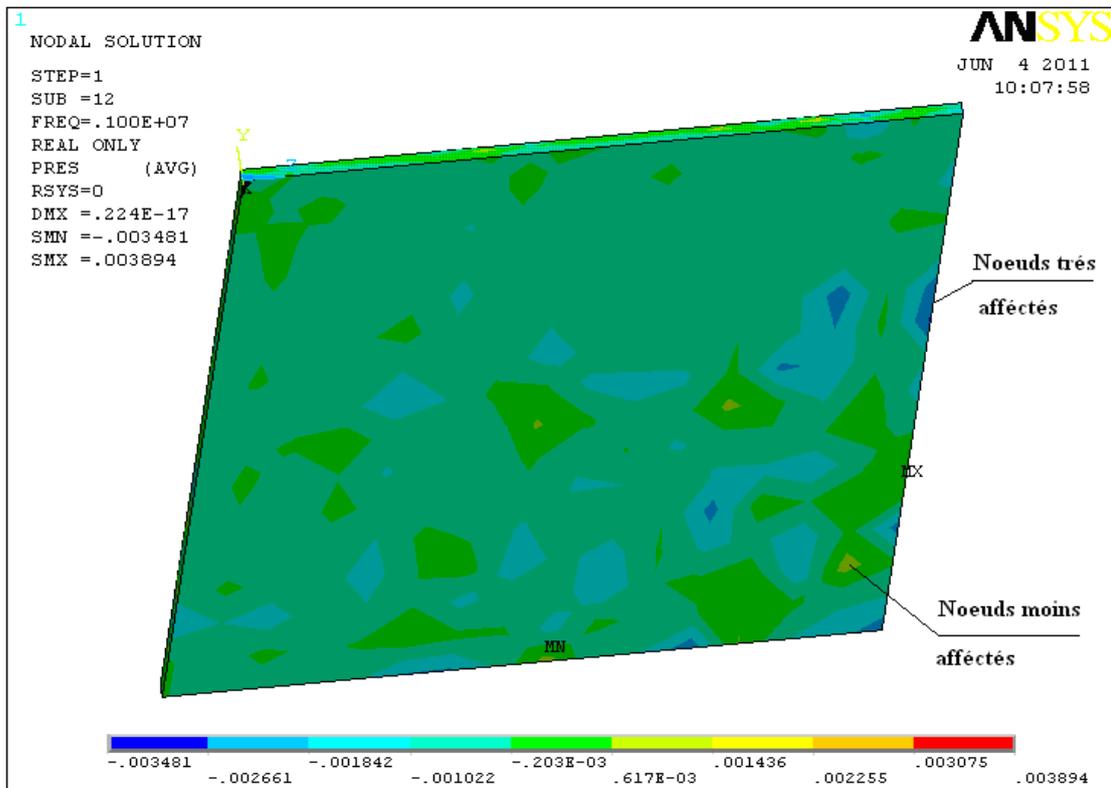


Figure 4.15 : la pression propagée dans la fibre textile, modèle porte à 1 MHz

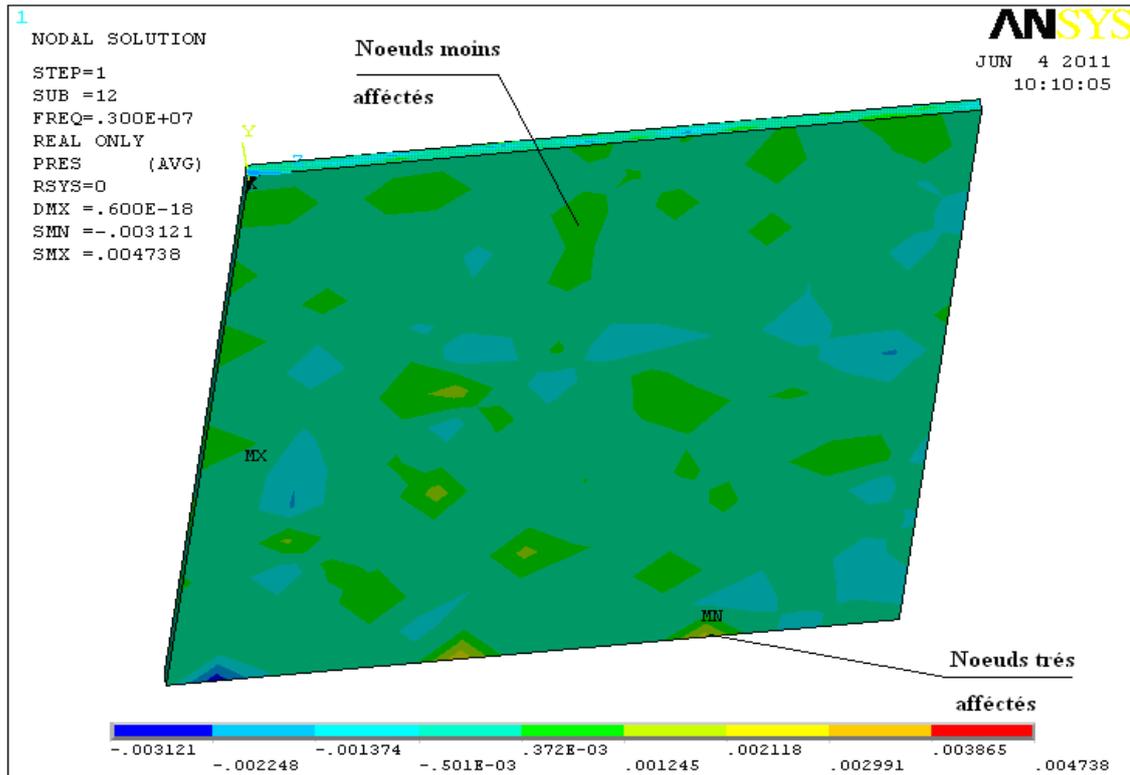


Figure 4.16 : la pression propagée dans la fibre textile, modèle porte à 3 MHz

Nous représentons ci-dessous les nœuds qui enregistrent la pression minimale transmise par la fibre textile pour les 4 fréquences d'excitation. Le tableau complet est présenté en annexe A.

3 KHz	600 KHz	1 MHz	3 MHz
396 0.16736E-03	396 0.18778E-03	396 0.80595E-03	396 0.17804E-43
398 0.80075E-03	398 0.76310E-03	398 0.63884E-03	398 0.34450E-43
407 0.12113E-03	407 0.14216E-03	407 0.32601E-03	407 0.30515E-43
434 0.63189E-04	434 0.62810E-04	434 0.25231E-03	434 0.24249E-43
497 0.48662E-03	497 0.54380E-03	497 0.23077E-03	497 0.63996E-44
498 0.50609E-03	498 0.45512E-03	498 0.62100E-03	498 0.52488E-44
500 0.92273E-03	500 0.93397E-03	500 0.18547E-02	500 0.75974E-44
504 0.39911E-03	504 0.40505E-03	504 0.60580E-03	504 0.21959E-43
509 0.87692E-03	509 0.84076E-03	509 0.55985E-03	509 0.98893E-44
511 0.25881E-03	511 0.31451E-03	511 0.39331E-03	511 0.69131E-44
512 0.50092E-03	512 0.57832E-03	512 0.55905E-03	512 0.97145E-45
537 0.11370E-02	537 0.11798E-02	537 0.23341E-03	537 0.14436E-43
540 0.89145E-04	540 0.14599E-03	540 0.16876E-04	540 0.13634E-43
558 0.64004E-03	558 0.61058E-03	558 0.15572E-03	558 0.15834E-43
560 0.42403E-03	560 0.47135E-03	560 0.39055E-03	560 0.21963E-43

Tableau 4.3: pressions obtenues pour la fibre textile, modèle porte

Commentaires

La plaque poreuse en fibre textile est excitée sur sa face par une pression de 0.01 Pa, et sur l'autre face nous avons obtenu dans la gamme des hautes fréquences, des pressions toutes inférieures à la pression d'excitation (tableau ci-dessus), ce qu'explique la qualité d'absorption de la fibre textile. D'après les résultats obtenus, nous constatons aussi que l'absorption de ce matériau dépend de la fréquence et elle est meilleure aux fréquences très élevées.

A 3 MHz, la pression est presque totalement absorbée (nœuds : 497, 498, 500, 509, 511 et 512). Le tableau ci-dessus montre que la plus grande pression transmise par la plaque poreuse vers l'intérieur du véhicule à travers la porte est d'ordre de $0.1E-2$ Pa, nœud 537.

4.8.1.2. Laine de verre

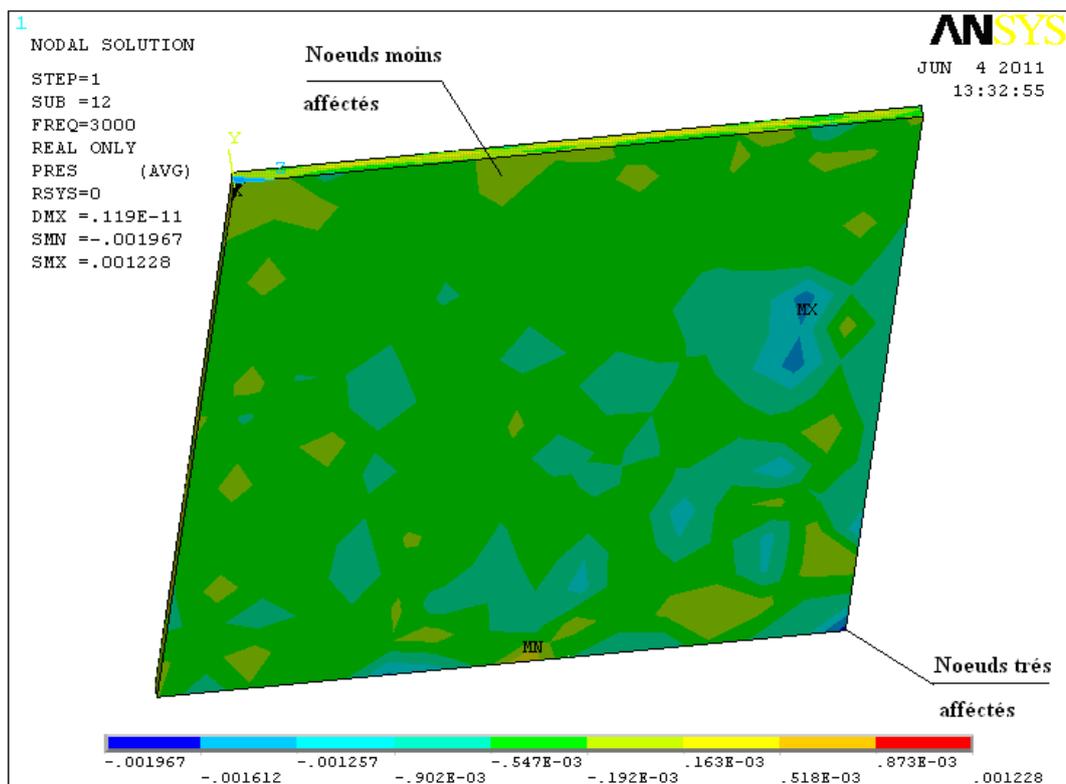


Figure 4.17 : la pression propagée dans la laine de verre, modèle porte à 3 KHz

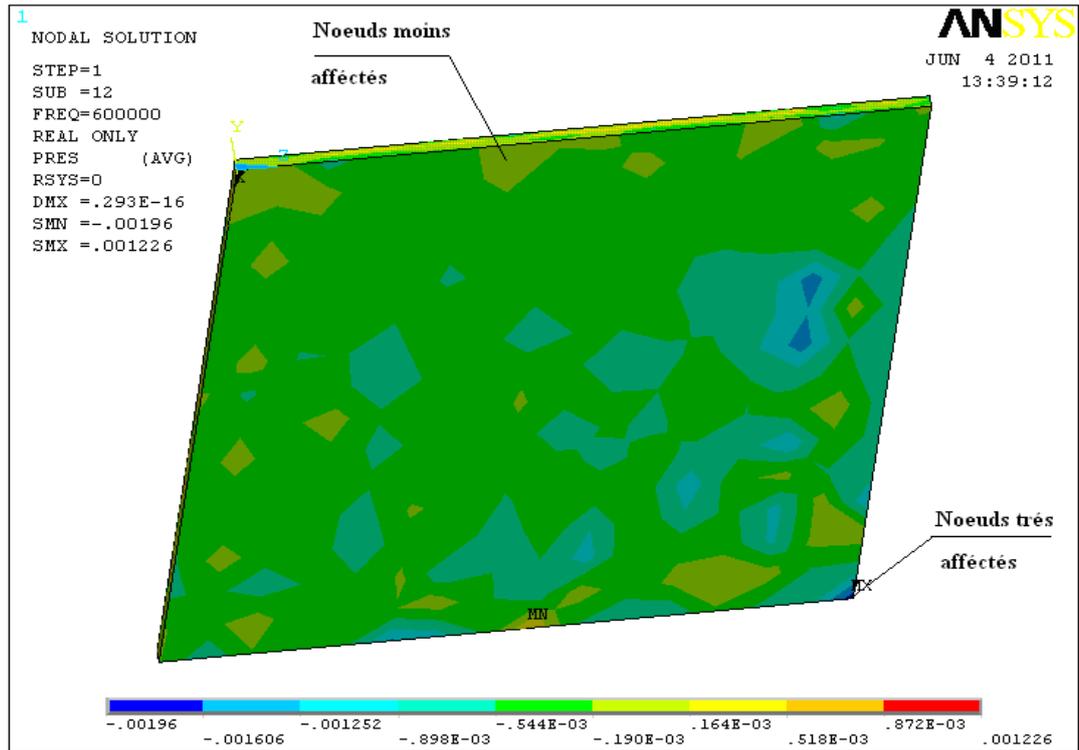


Figure 4.18 : la pression propagée dans la laine de verre, modèle porte à 600 KHz

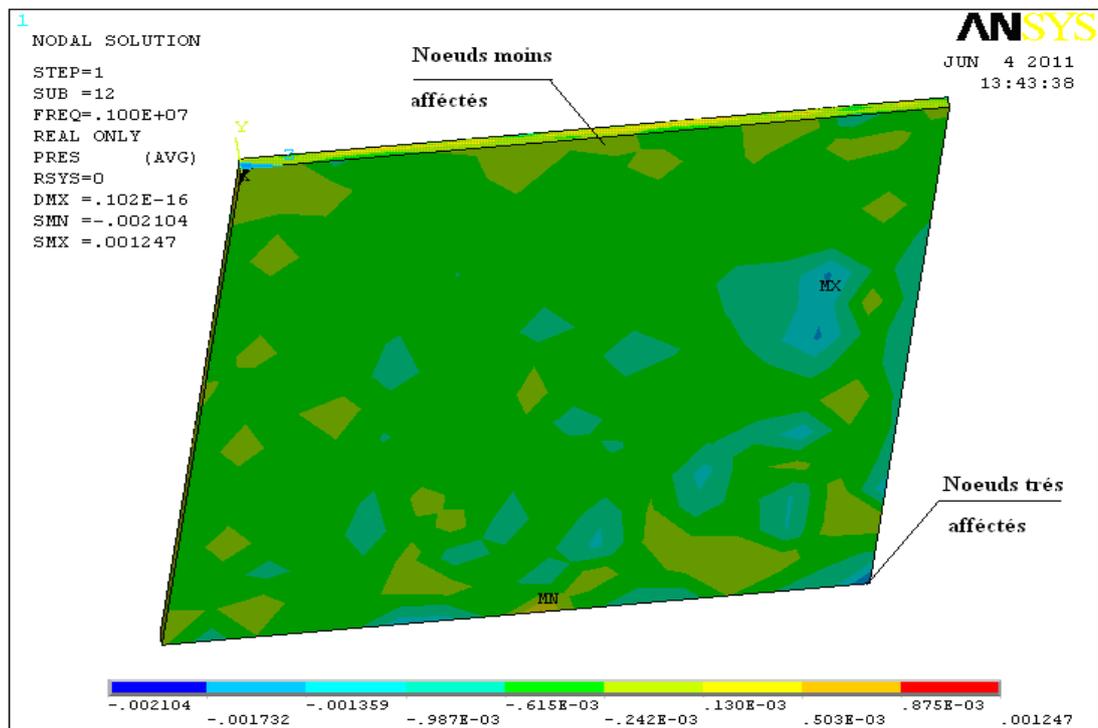


Figure 4.19 : la pression propagée dans la laine de verre, modèle porte à 1 MHz

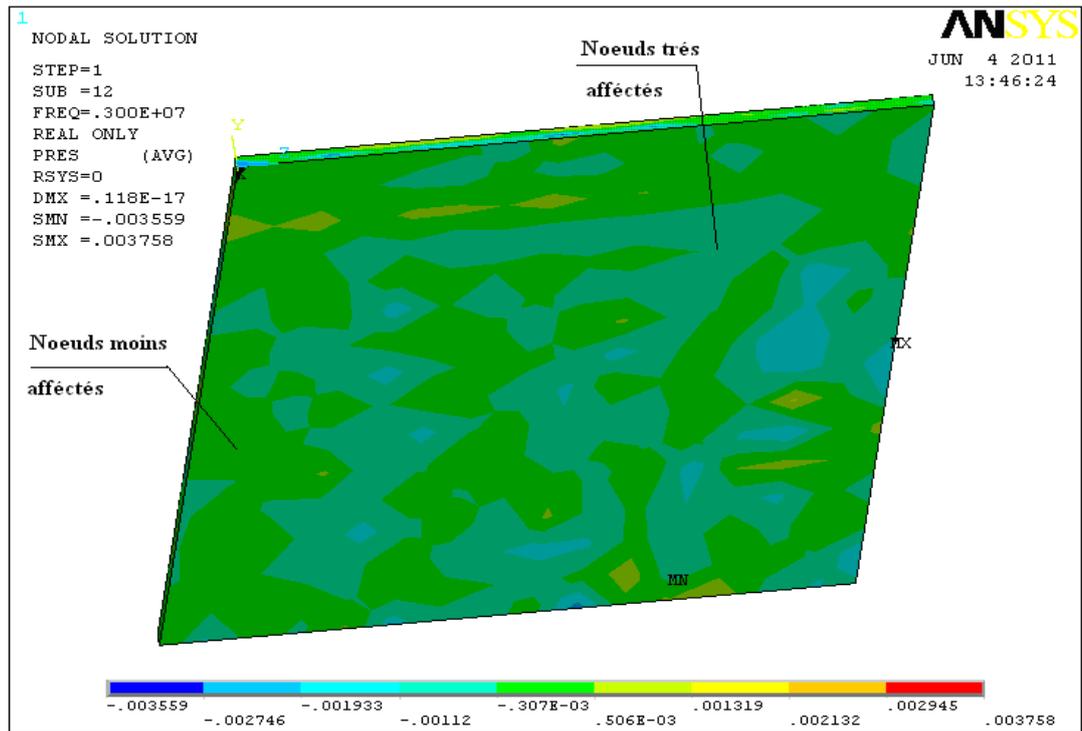


Figure 4.20 : la pression propagée dans la laine de verre, modèle porte à 3 MHz

Les résultats de la pression minimale transmise par la laine de verre sont récapitulés ci-dessous, le reste des résultats est présenté en annexe B.

3 KHz	600 KHz	1 MHz	3 MHz
401 0.35232E-03	401 0.34091E-03	401 0.32050E-03	401 0.24086E-03
402 0.40596E-03	402 0.40348E-03	402 0.37252E-03	402 0.17673E-03
405 0.37299E-03	405 0.36404E-03	405 0.35618E-03	405 0.20870E-03
467 0.52759E-03	467 0.52786E-03	467 0.54602E-03	467 0.20610E-04
476 0.22677E-03	476 0.22613E-03	476 0.23511E-03	476 0.28678E-03
490 0.44948E-03	490 0.44745E-03	490 0.44027E-03	490 0.34371E-03
524 0.82717E-03	524 0.81810E-03	524 0.85536E-03	524 0.39276E-03
528 0.27083E-04	528 0.16879E-04	528 0.18715E-04	528 0.45203E-03
530 0.33427E-04	530 0.33521E-04	530 0.43685E-04	530 0.46873E-03
532 0.23679E-03	532 0.23236E-03	532 0.23227E-03	532 0.42036E-03
533 0.46572E-03	533 0.46747E-03	533 0.46046E-03	533 0.45302E-03
539 0.56621E-03	539 0.55807E-03	539 0.57096E-03	539 0.30168E-03
543 0.71503E-03	543 0.70475E-03	543 0.67261E-03	543 0.36300E-03
556 0.20363E-03	556 0.20425E-03	556 0.23082E-03	556 0.18127E-03
560 0.26502E-03	560 0.26355E-03	560 0.27721E-03	560 0.28962E-04

Tableau 4.4: pressions obtenues pour la laine de verre, modèle porte

Commentaires

Les pressions obtenues pour la plaque poreuse en laine de verre sont aussi d'ordre inférieure à la pression d'excitation, que se soit à 3 KHz, à 0.6 MHz, à 1 MHz ou à 3 MHz, dans le tableau ci-dessus, on observe qu'aucune pression n'est supérieure ou égale à 0.01 Pa, donc la laine de verre joue le rôle d'absorbeur de pression.

Sauf qu'au contraire de la fibre textile, à 3 MHz, la pression obtenue est de même ordre que les pressions obtenues pour les autres fréquences, noeuds 528 et 530 pour 3 KHz, 600 KHz et 1 MHz, les noeuds 467 et 560 pour 3 MHz.

Ce que nous a conduit à tester la laine de verre à des fréquences plus élevées. A 6 MHz, nous avons constaté que la laine de verre absorbe presque toutes la pression à des niveaux différents de la plaque, les noeuds : 497, 498, 500, 511 et 512 du tableau 4.5, le reste du tableau est présenté en annexe C. Les résultats obtenus à 6 MHz sont représentés en plot et tableau, ci-dessous :

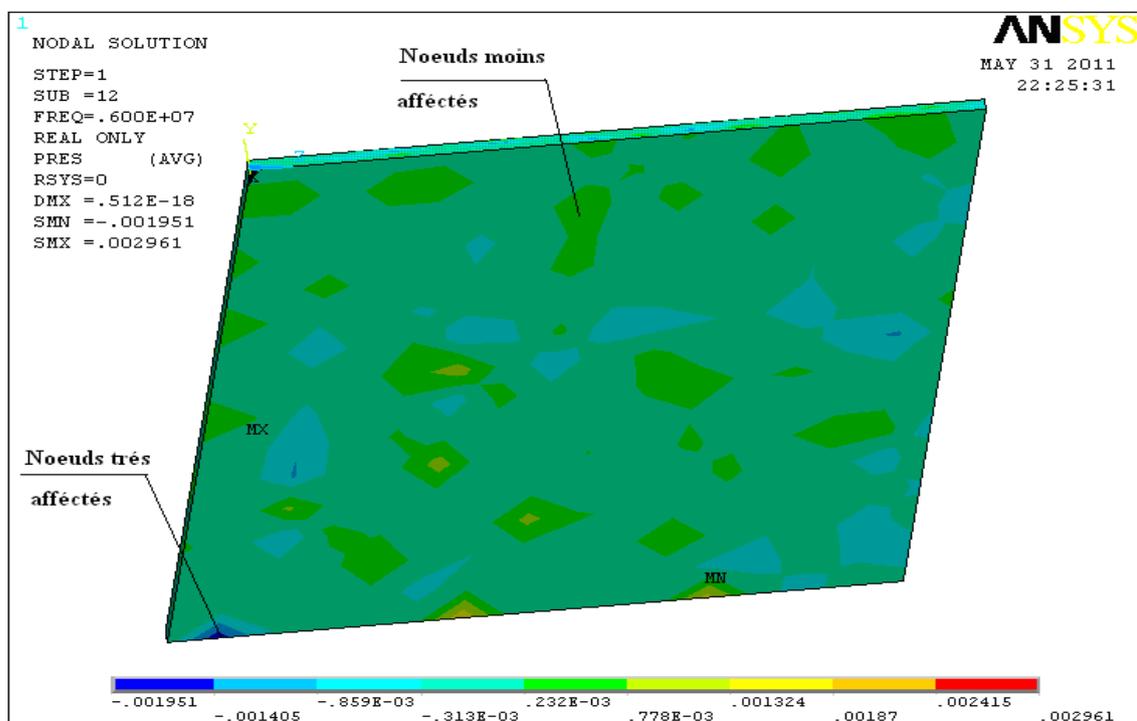


Figure 4.21 : la pression propagée dans la laine de verre, modèle porte à 6 MHz

F = 6 MHz	
401	0.19096E-43
405	0.21069E-43
476	0.16828E-43
497	0.74492E-44
498	0.61097E-44
500	0.88434E-44
511	0.80470E-44
512	0.11308E-44
528	0.33260E-43
530	0.22453E-43
532	0.19117E-43
539	0.14627E-43
540	0.15870E-43
556	0.25575E-43
560	0.25566E-43

Tableau 4.5: pressions obtenues pour la laine de verre à 6 MHz, modèle porte

4.8.1.3. Mousse mélamine

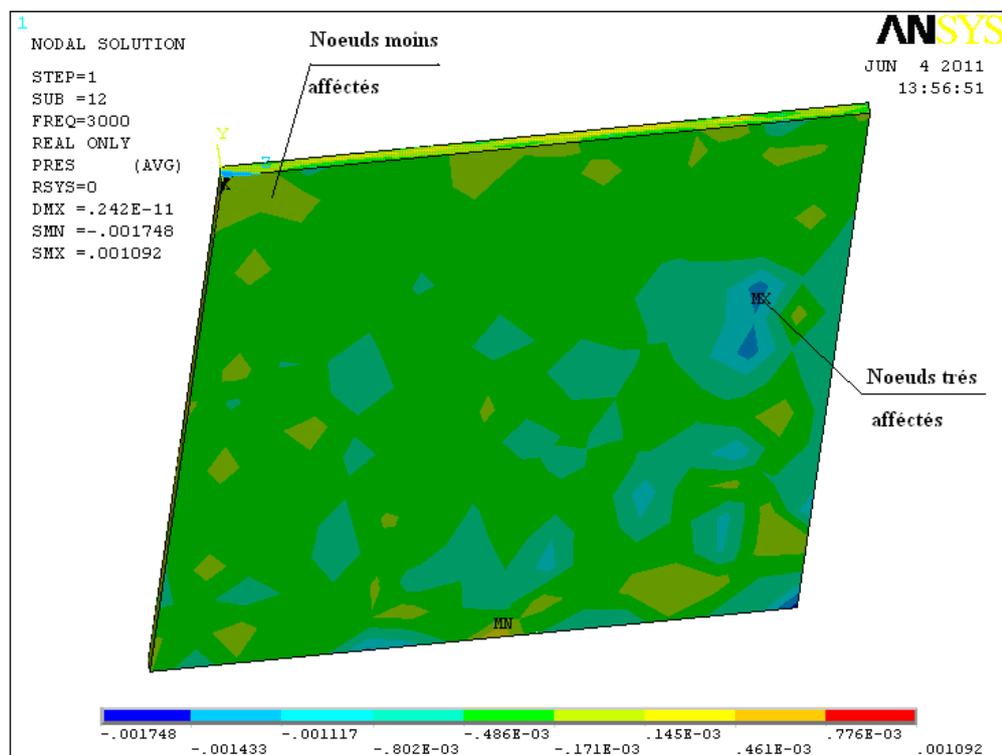


Figure 4.22 : la pression propagée dans la mousse mélamine, modèle porte à 3 KHz

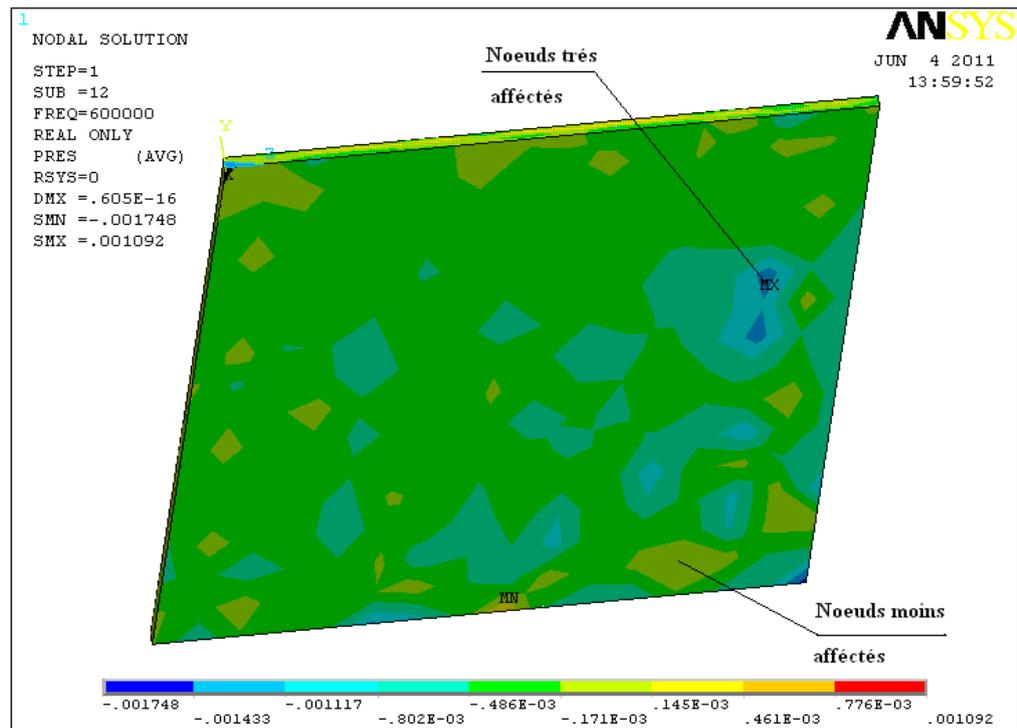


Figure 4.23: la pression propagée dans la mousse mélamine, modèle porte à 600KHz

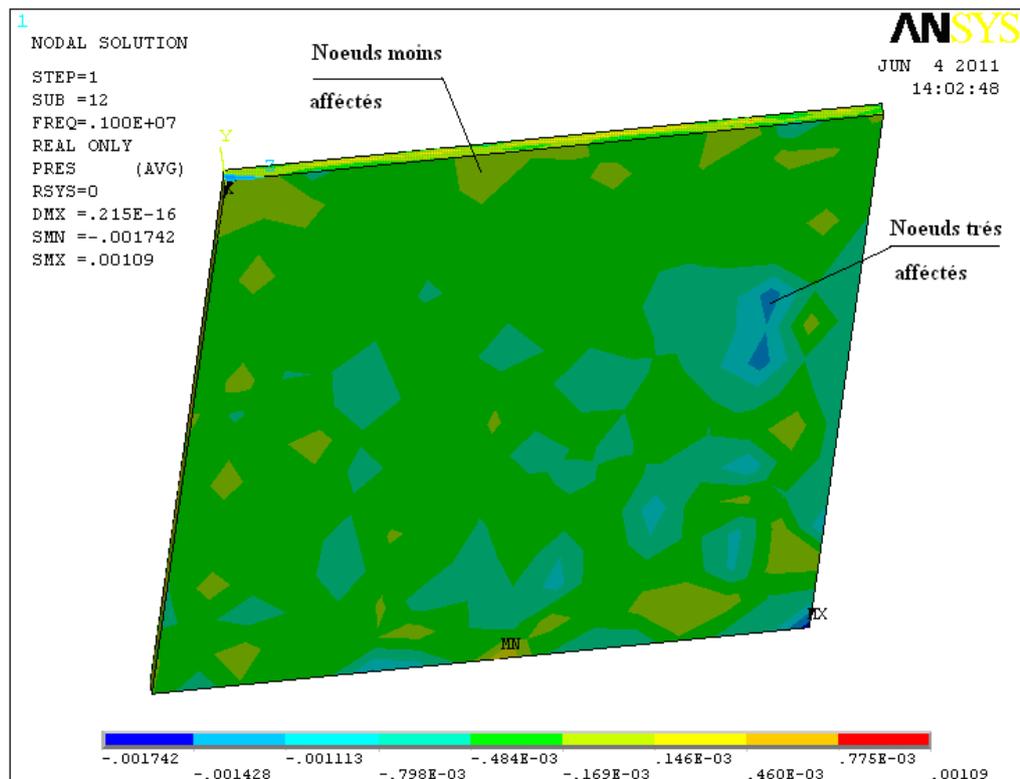


Figure 4.24: la pression propagée dans la mousse mélamine, modèle porte à 1 MHz

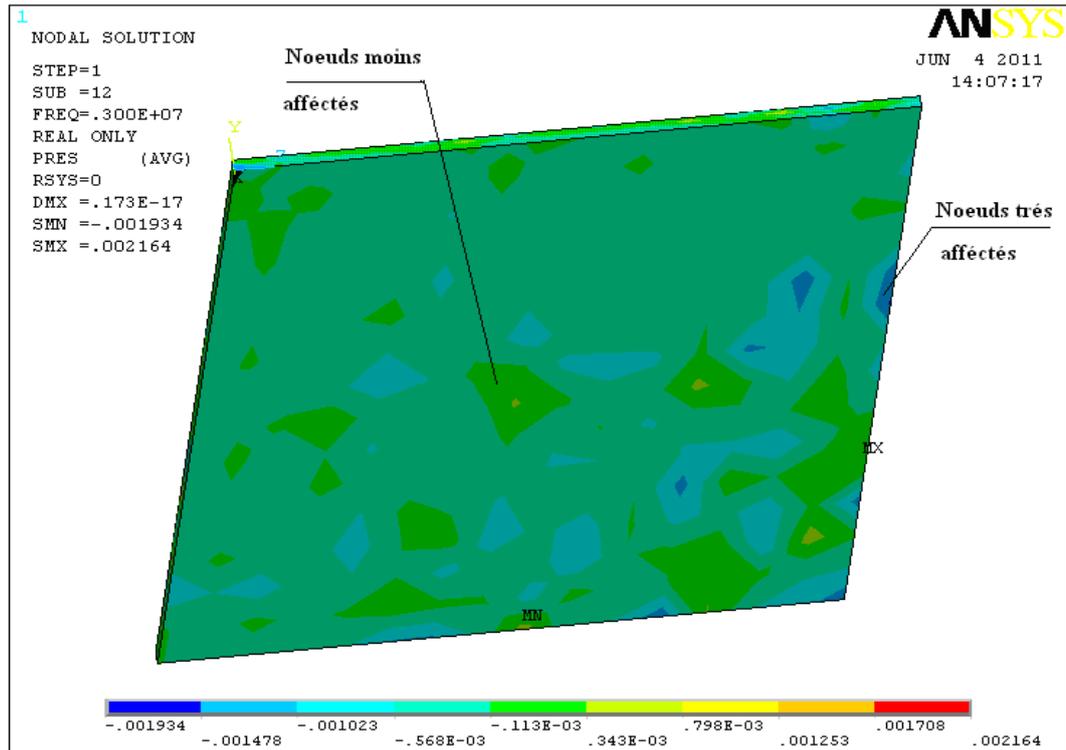


Figure 4.25: la pression propagée dans la mousse mélamine, modèle porte à 3 MHz

Les nœuds qui enregistrent la pression minimale transmise par la mousse mélamine sont récapitulés ci-dessous, le reste du tableau est représenté en annexe D.

3 KHz		600 KHz		1 MHz		3 MHz	
405	0.33155E-03	405	0.33155E-03	405	0.32359E-03	405	0.24190E-03
407	0.67297E-04	407	0.67297E-04	407	0.62449E-04	407	0.18112E-03
434	0.35106E-04	434	0.35105E-04	434	0.34835E-04	434	0.14017E-03
474	0.21006E-03	474	0.21005E-03	474	0.21383E-03	474	0.85150E-04
476	0.20157E-03	476	0.20157E-03	476	0.20100E-03	476	0.15780E-03
490	0.39954E-03	490	0.39954E-03	490	0.39774E-03	490	0.25352E-03
497	0.27035E-03	497	0.27035E-03	497	0.27074E-03	497	0.12821E-03
503	0.27679E-03	503	0.27679E-03	503	0.27205E-03	503	0.97568E-04
517	0.20853E-03	517	0.20853E-03	517	0.20715E-03	517	0.72553E-04
530	0.29715E-04	530	0.29713E-04	530	0.29796E-04	530	0.51864E-07
532	0.21048E-03	532	0.21048E-03	532	0.20654E-03	532	0.93460E-04
537	0.63165E-03	537	0.63165E-03	537	0.62880E-03	537	0.12967E-03
540	0.49525E-04	540	0.49525E-04	540	0.53119E-04	540	0.93754E-05
554	0.42722E-03	554	0.42723E-03	554	0.41182E-03	554	0.15423E-03
558	0.35558E-03	558	0.35558E-03	558	0.35408E-03	558	0.86511E-04

Tableau 4.6: pressions obtenues pour la mousse mélamine, modèle porte

Commentaires

On remarque que la plaque en mousse mélamine absorbe la pression exercée sur sa face en l'empêchant de pénétrer à l'intérieur du véhicule. Le tableau ci-dessus montre que dans toute la gamme fréquentielle étudiée, la quantité absorbée est presque de même ordre, les noeuds 407 et 434 pour 3 KHz, 600 KHz et 1 MHz et les noeuds 503 et 517 pour 3 MHz (tableau 4.6).

En élevant la fréquence, et à 9 MHz, nous avons obtenu des pressions très réduites et même négligeables, les noeuds 497, 498 et 500 du tableau 4.17, le reste du tableau est représenté en annexe E.

Donc la mousse mélamine assure une absorption presque totale de la pression à la fréquence 9 MHz. Les résultats en plot et tableau sont présentés ci-dessous :

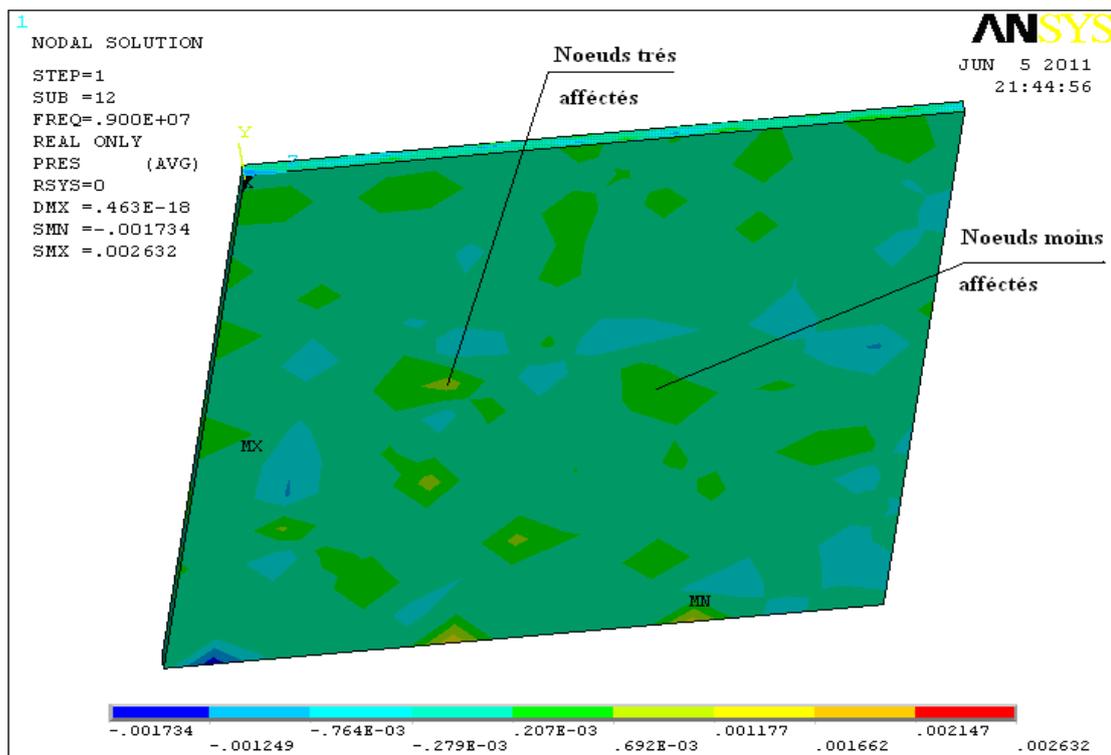


Figure 4.26: la pression propagée dans la mousse mélamine, modèle porte à 9 MHz

F = 9 MHz	
396	0.19089E-43
398	0.36937E-43
400	0.22524E-43
401	0.17589E-43
403	0.23834E-43
497	0.68616E-44
498	0.56277E-44
500	0.81458E-44
511	0.74122E-44
512	0.10416E-44
528	0.30636E-43
530	0.20682E-43
556	0.23557E-43
558	0.16977E-43
560	0.23549E-43

Tableau 4.7: pressions obtenues pour la mousse mélamine à 9 MHz, modèle porte

4.8.1.4. Mousse polyuréthane

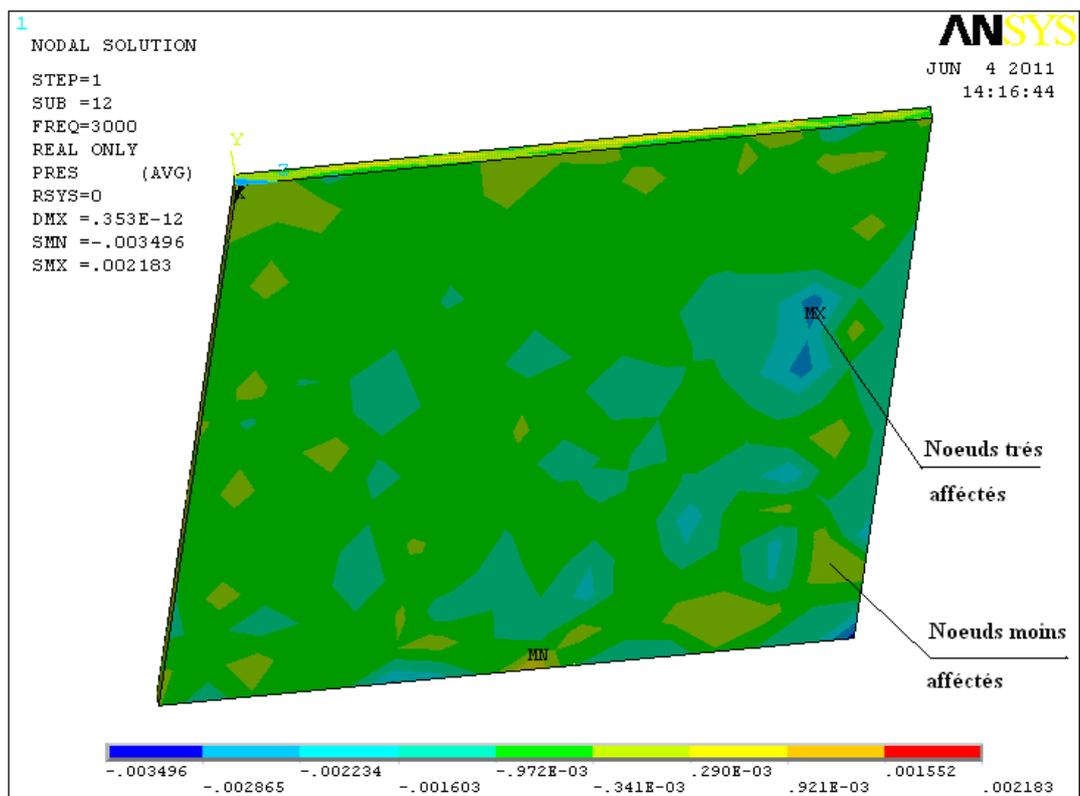


Figure 4.27 : la pression propagée dans la mousse polyuréthane, modèle porte à 3 KHz

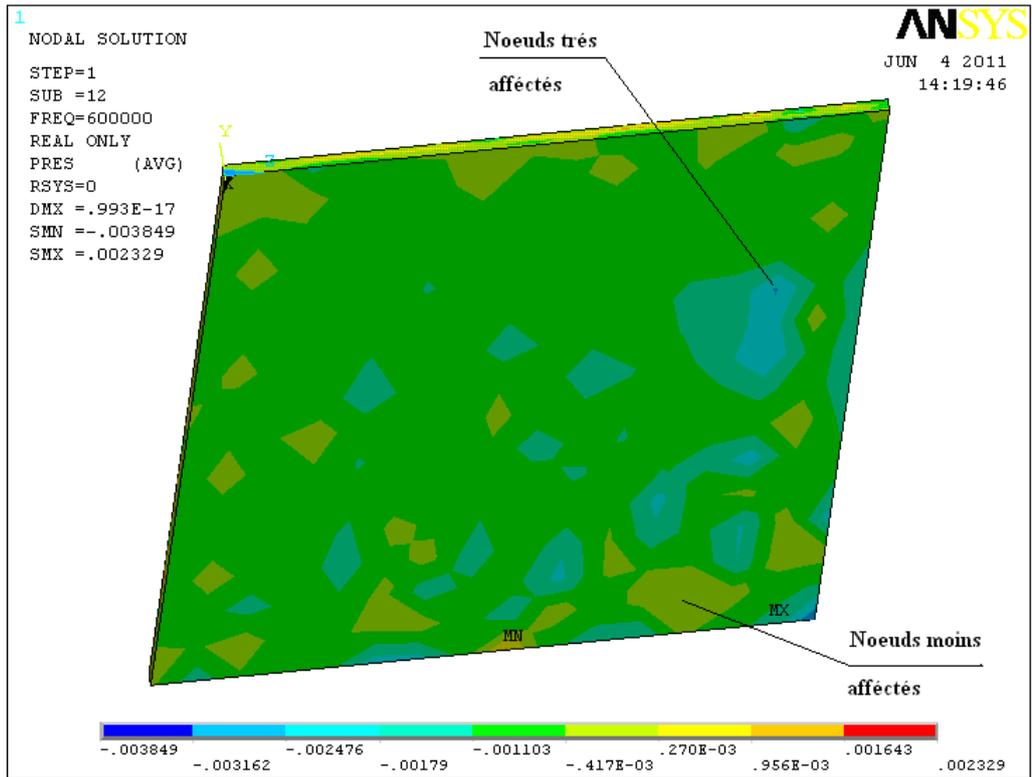


Figure 4.28 : la pression propagée dans la mousse polyuréthane, modèle porte à 600 KHz

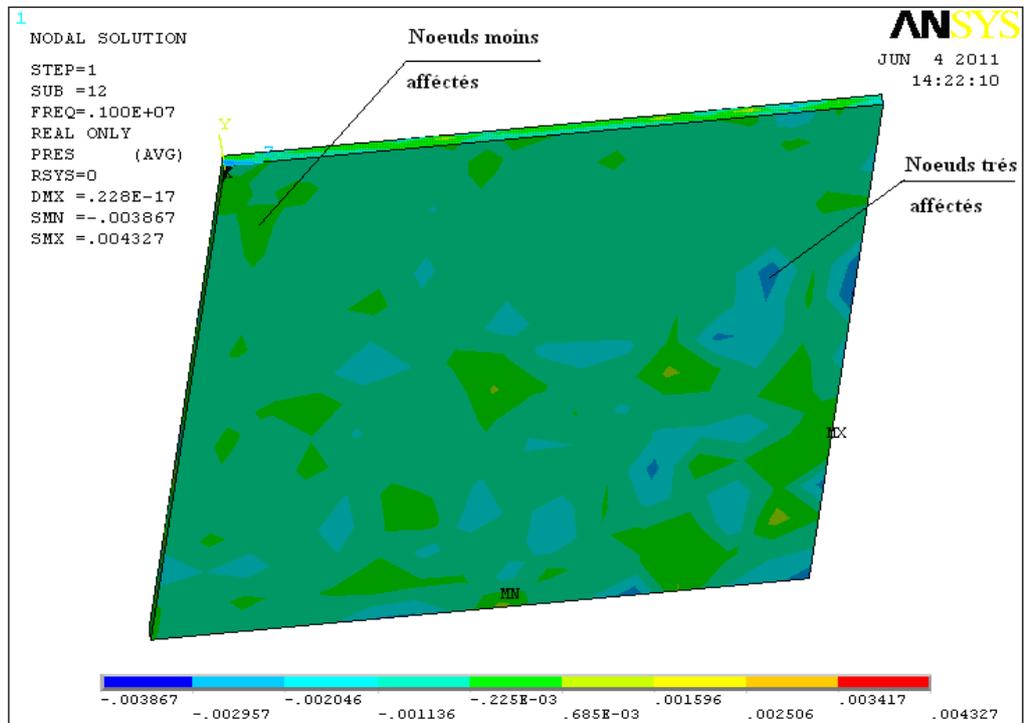


Figure 4.29 : la pression propagée dans la mousse polyuréthane, modèle porte à 1 MHz

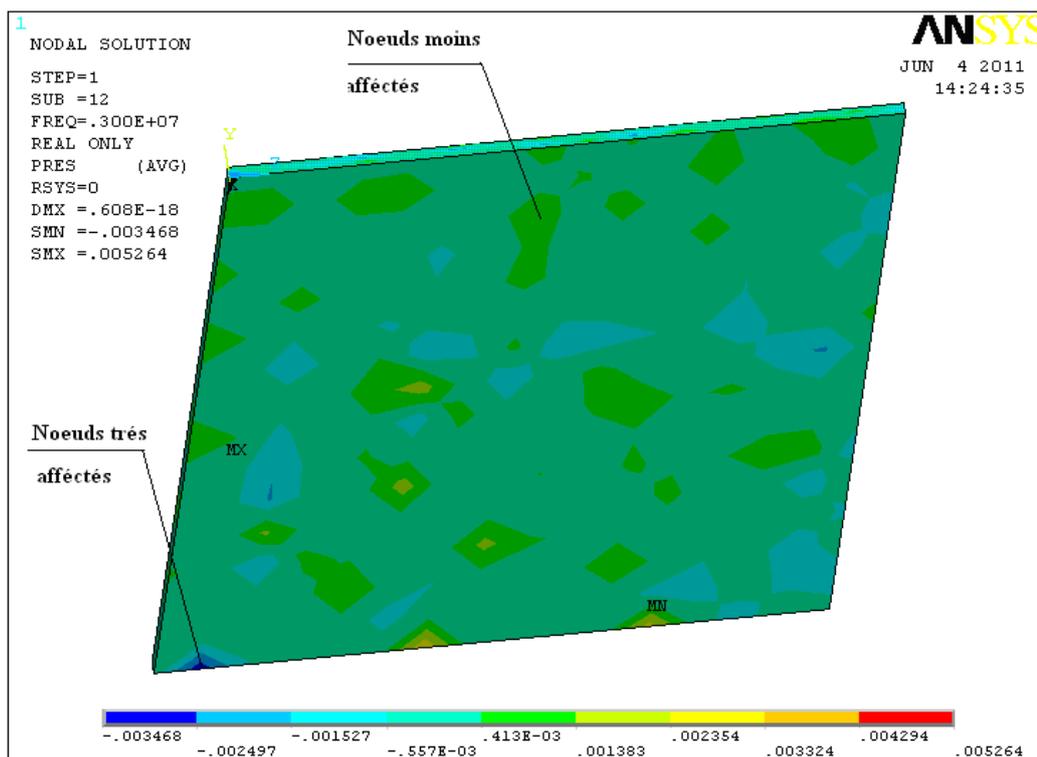


Figure 4.30 : la pression propagée dans la mousse polyuréthane, modèle porte à 3 MHz

Les nœuds de la plaque où la pression transmise est minimale sont récapitulés dans le tableau ci-dessous, le reste des résultats sont présentés en annexe F.

3 KHz	600 KHz	1 MHz	3 MHz
398 0.88972E-03	398 0.84789E-03	398 0.70982E-03	398 0.31879E-43
400 0.19834E-03	400 0.25673E-03	400 0.99408E-04	400 0.19440E-43
405 0.66310E-03	405 0.66178E-03	405 0.48379E-03	405 0.16749E-43
431 0.38841E-03	431 0.40666E-03	431 0.58032E-03	431 0.22356E-43
473 0.67162E-03	473 0.71868E-03	473 0.10864E-02	473 0.11080E-43
497 0.54069E-03	497 0.60422E-03	497 0.25641E-03	497 0.59219E-44
498 0.56232E-03	498 0.50569E-03	498 0.69000E-03	498 0.48570E-44
504 0.44345E-03	504 0.45005E-03	500 0.20607E-02	500 0.70302E-44
509 0.97435E-03	509 0.93418E-03	509 0.62206E-03	509 0.91511E-44
511 0.28757E-03	511 0.34946E-03	511 0.43702E-03	511 0.63971E-44
512 0.55658E-03	512 0.64258E-03	512 0.62116E-03	512 0.89893E-45
532 0.42096E-03	532 0.44985E-03	532 0.18692E-03	532 0.15197E-43
556 0.36201E-03	556 0.43035E-03	556 0.56895E-03	556 0.20331E-43
558 0.71115E-03	558 0.67842E-03	558 0.17302E-03	558 0.14652E-43
560 0.47114E-03	560 0.52372E-03	560 0.43395E-03	560 0.20324E-43

Tableau 4.8: pressions obtenues pour la mousse polyuréthane, modèle porte

Commentaires

La pression exercée sur la plaque en mousse polyuréthane a diminué en la traversant ce qu'explique que la plaque poreuse absorbe la pression acoustique. La qualité d'absorption de la plaque devient meilleure à des très hautes fréquences, on remarque que à 3 MHz, la pression transmise dans la plaque est presque nulle, résultats des nœuds 509, 511 et 512 du tableau ci-dessus.

4.8.2. Modèle plafond

4.8.2.1. Fibre textile

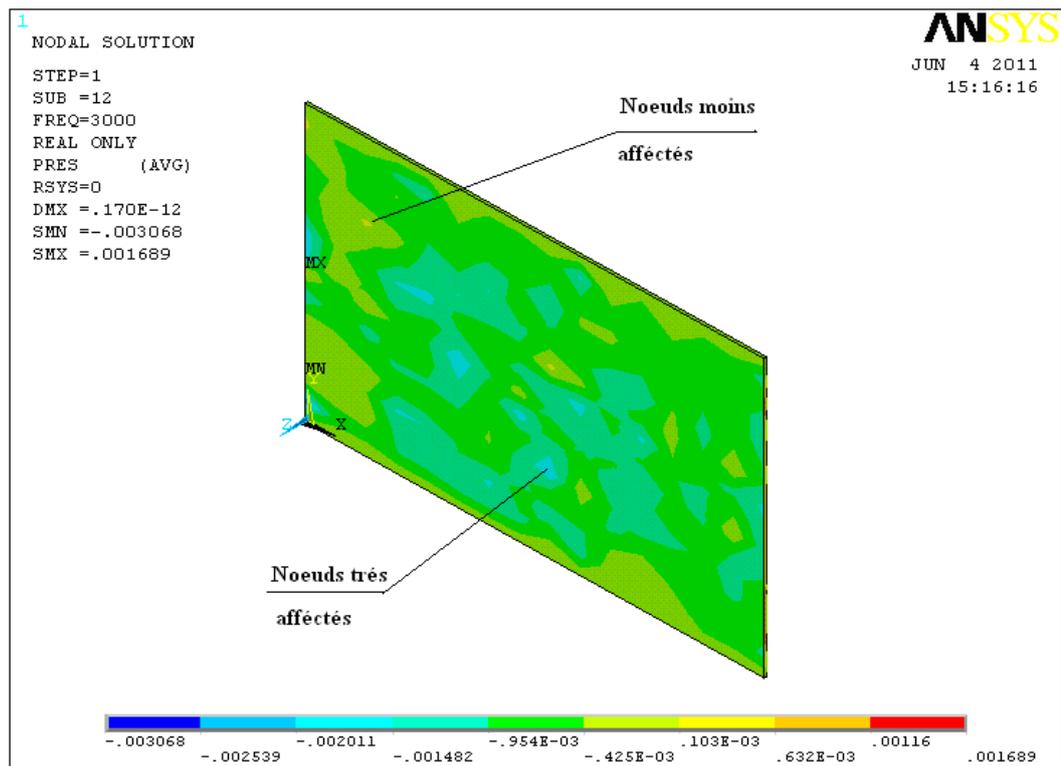


Figure 4.31 : la pression propagée dans la fibre textile, modèle plafond à 3 KHz

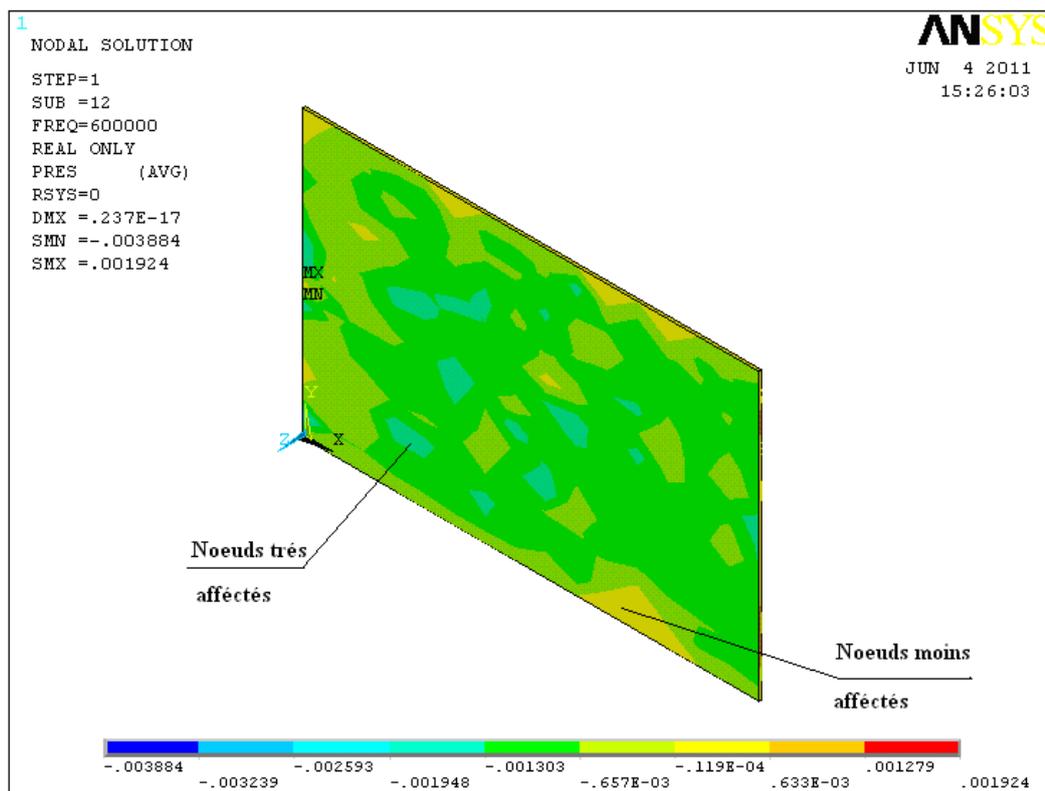


Figure 4.32 : la pression propagée dans la fibre textile, modèle plafond à 600 KHz

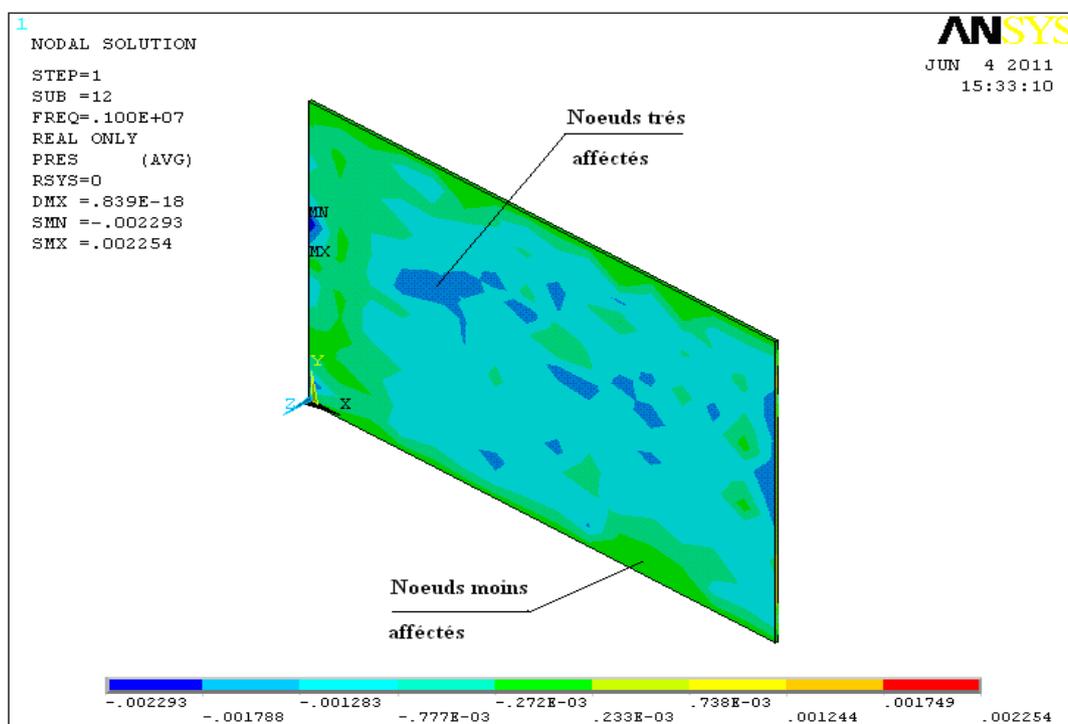


Figure 4.33 : la pression propagée dans la fibre textile, modèle plafond à 1 MHz

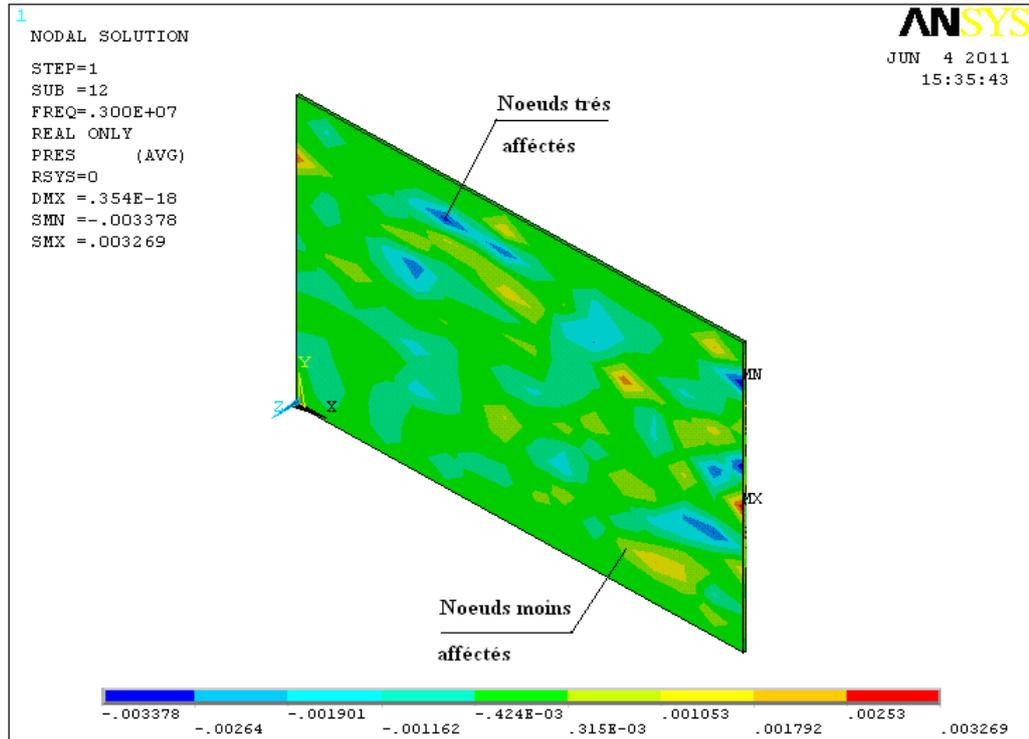


Figure 4.34 : la pression propagée dans la fibre textile, modèle plafond à 3 MHz

Les nœuds qui représentent la faible pression transmise sont récapitulés dans le tableau ci-dessous, le reste des résultats sont présentés en annexe G :

3 KHz	600 KHz	1 MHz	3 MHz
339 0.68443E-03	339 0.70644E-03	339 0.75943E-03	339 0.68340E-45
340 0.32775E-03	340 0.32681E-03	340 0.78222E-03	340 0.42272E-45
348 0.68253E-03	348 0.72797E-03	348 0.77621E-03	348 0.10496E-45
372 0.12508E-02	372 0.12628E-02	372 0.12076E-02	372 0.49222E-45
400 0.85632E-03	400 0.85621E-03	400 0.72076E-03	400 0.59826E-45
422 0.13328E-02	422 0.13338E-02	422 0.15521E-02	422 0.94037E-45
428 0.54136E-03	428 0.52414E-03	428 0.76872E-03	428 0.11749E-45
442 0.16097E-02	442 0.16214E-02	442 0.12216E-02	442 0.11609E-45
464 0.15919E-02	464 0.16021E-02	464 0.16855E-02	464 0.30285E-45
465 0.66968E-03	465 0.65893E-03	465 0.10702E-02	465 0.40727E-45
467 0.94692E-03	467 0.95236E-03	467 0.83661E-03	467 0.79354E-45
470 0.83273E-03	470 0.82800E-03	470 0.99430E-03	470 0.15612E-45
492 0.83772E-03	492 0.84685E-03	492 0.12044E-02	492 0.13758E-45
494 0.11592E-02	494 0.11709E-02	494 0.15528E-02	494 0.42609E-45
498 0.72355E-03	498 0.70494E-03	498 0.91117E-03	498 0.11453E-45

Tableau 4.9: pressions obtenues pour la fibre textile, modèle plafond

Commentaires

Pour cette plaque en fibre textile, on remarque une diminution du bruit transmis à l'intérieur du véhicule en provenant de plafond du véhicule. La plaque assure une absorption de la pression pour toutes les fréquences étudiées (tableau ci-dessus). Pour une pression d'excitation du 0.01 Pa, nous avons obtenu des pressions d'ordre minimal du 0.001 Pa, grâce à la propriété poreuse de ce matériau.

A une fréquence du 3 MHz, la plaque empêche presque la totalité de la pression de pénétrer à l'intérieur du véhicule, les nœuds 428, 442 et 498 du tableau 4.9.

4.8.2.2. laine de verre

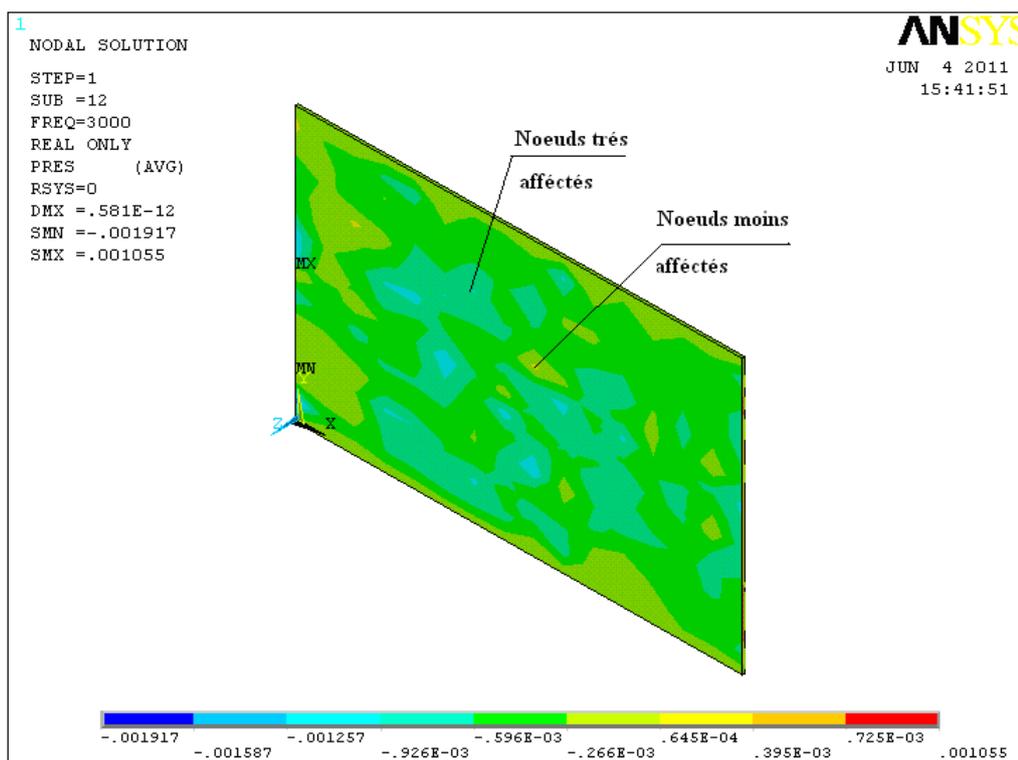


Figure 4.35 : la pression propagée dans la laine de verre, modèle plafond à 3 KHz

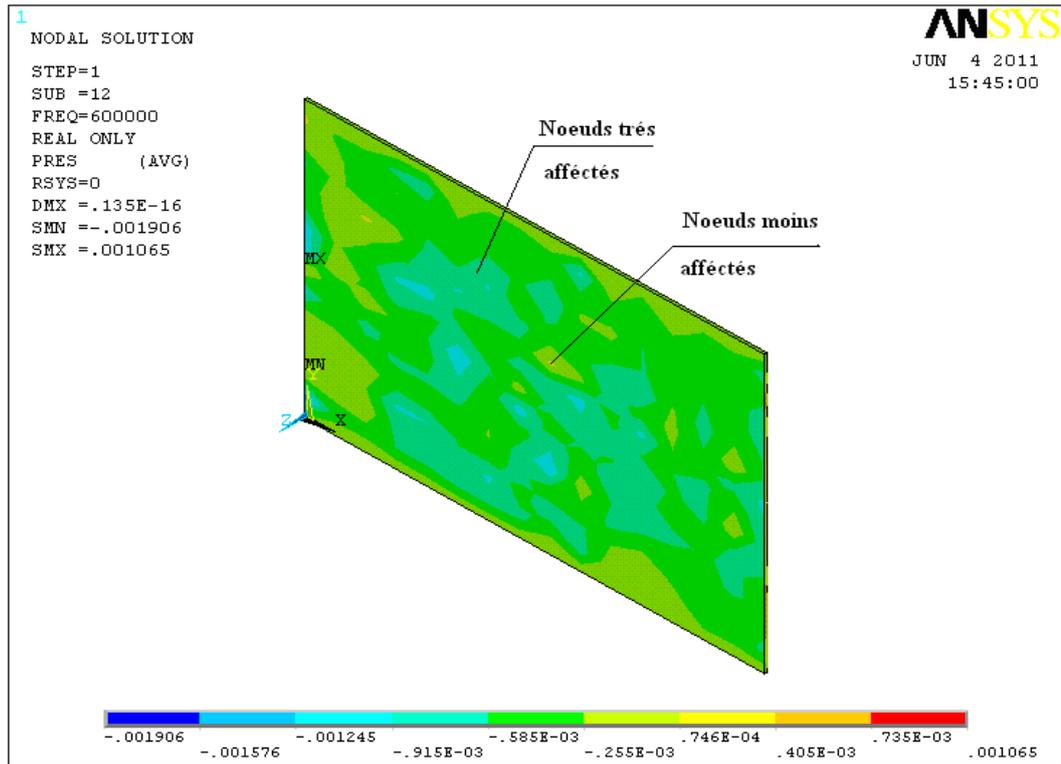


Figure 4.36 : la pression propagée dans la laine de verre, modèle plafond à 600 KHz

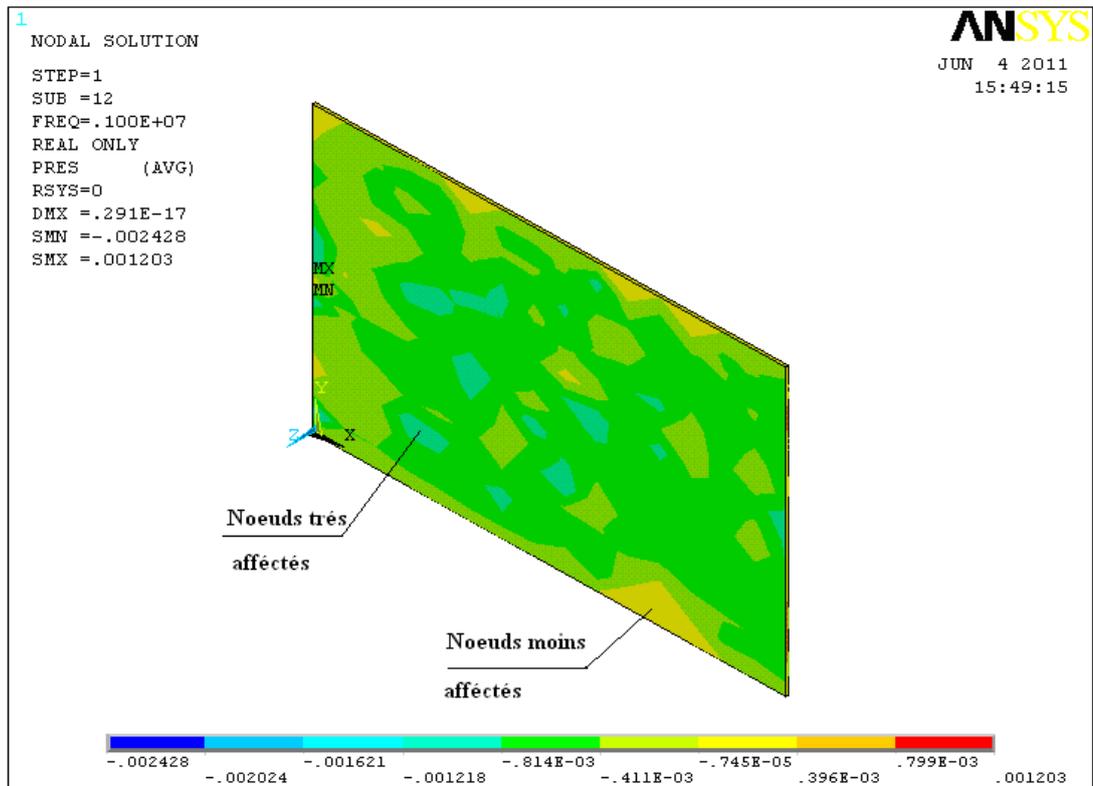


Figure 4.37 : la pression propagée dans la laine de verre, modèle plafond à 1 MHz

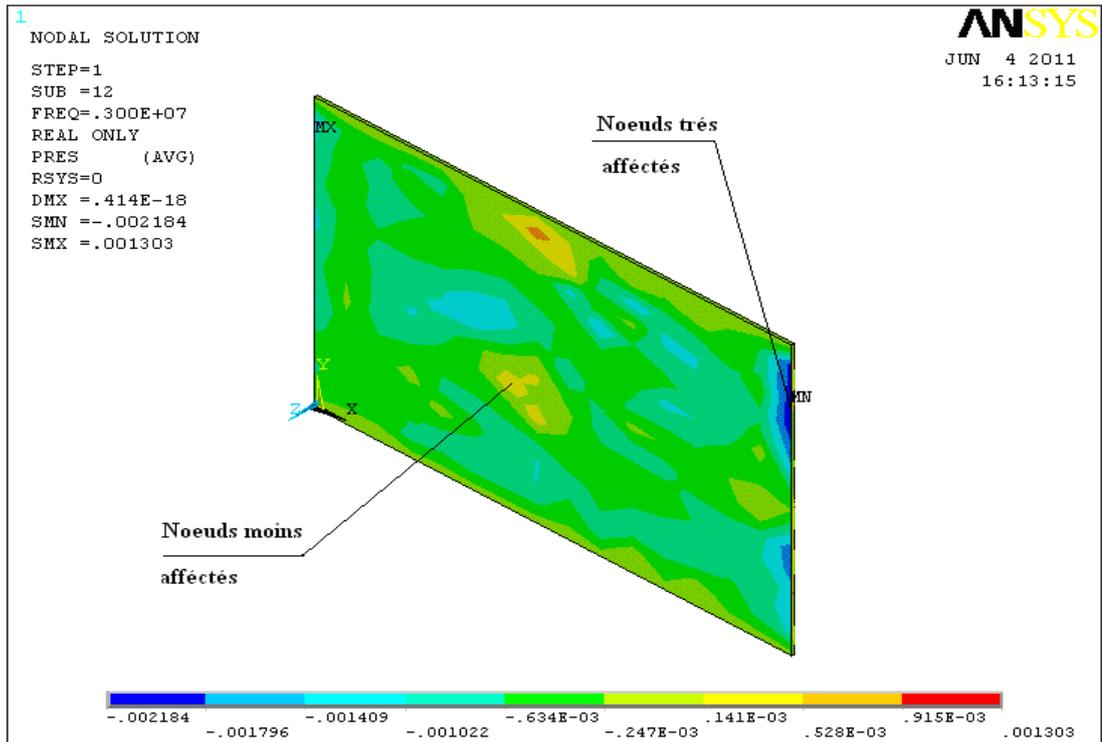


Figure 4.38 : la pression propagée dans la laine de verre, modèle plafond à 3 MHz

Le tableau ci-dessous illustre les nœuds où la pression transmise est minimale, le reste du tableau est représenté dans l'annexe H.

3 KHz	600 KHz	1 MHz	3 MHz
331 0.38587E-03	331 0.38551E-03	331 0.41293E-03	331 0.32009E-03
348 0.42658E-03	348 0.42415E-03	348 0.45498E-03	348 0.92692E-04
392 0.38170E-03	392 0.37949E-03	392 0.38593E-03	392 0.35885E-03
393 0.61675E-03	393 0.61541E-03	393 0.62451E-03	393 0.17539E-04
400 0.53520E-03	400 0.53244E-03	400 0.53513E-03	400 0.16708E-03
408 0.64359E-03	408 0.64527E-03	408 0.67282E-03	408 0.20211E-03
420 0.44252E-03	420 0.44529E-03	420 0.43619E-03	420 0.17727E-03
428 0.33835E-03	428 0.33703E-03	428 0.32759E-03	428 0.21649E-03
463 0.57325E-03	463 0.57510E-03	463 0.56922E-03	463 0.27492E-03
470 0.52046E-03	470 0.52060E-03	470 0.51750E-03	470 0.28542E-03
485 0.50084E-03	485 0.49820E-03	485 0.50361E-03	485 0.47662E-03
490 0.64122E-03	490 0.64446E-03	490 0.63957E-03	490 0.35052E-03
492 0.52357E-03	492 0.52650E-03	492 0.52928E-03	492 0.34799E-03
497 0.39949E-03	497 0.39872E-03	497 0.38934E-03	497 0.24268E-03
498 0.45222E-03	498 0.45387E-03	498 0.44059E-03	498 0.30282E-03

Tableau 4.10: pressions obtenues pour la laine de verre, modèle plafond

Commentaires

On remarque que de même pour la plaque en laine de verre du modèle porte, la pression absorbée par la plaque du plafond est de même ordre pour les fréquences 3 KHz, 0.6 MHz, 1 MHz et même pour 3 MHz, les nœuds 428 et 497 du tableau 4.10.

Nous avons donc excité la plaque à des fréquences plus élevée, et à 6 MHz, nous avons eu des résultats où presque la totalité de la pression exercée est absorbée, les nœuds 348, 442 et 428 du tableau 4.11, le reste des résultats sont présentés en annexe I.

Les résultats de cette application sont représentés en tableau et plot comme suit :

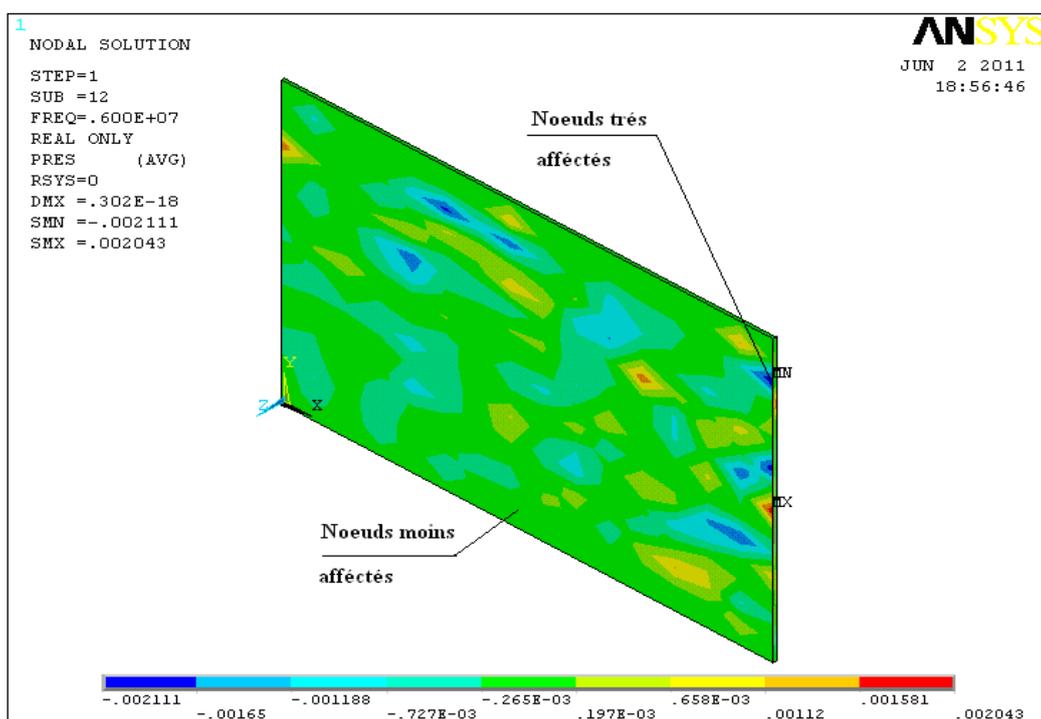


Figure 4.39 : la pression propagée dans la laine de verre, modèle plafond à 6 MHz

F = 6 MHz	
339	0.79549E-45
340	0.49206E-45
344	0.39702E-45
348	0.12218E-45
372	0.57295E-45
400	0.69638E-45
428	0.13676E-45
442	0.13513E-45
464	0.35252E-45
465	0.47407E-45
467	0.92369E-45
470	0.18173E-45
492	0.16014E-45
494	0.49597E-45
498	0.13332E-45

Tableau 4.11: pressions obtenues pour la laine de verre à 6 MHz, modèle plafond

4.8.2.3. mousse mélamine

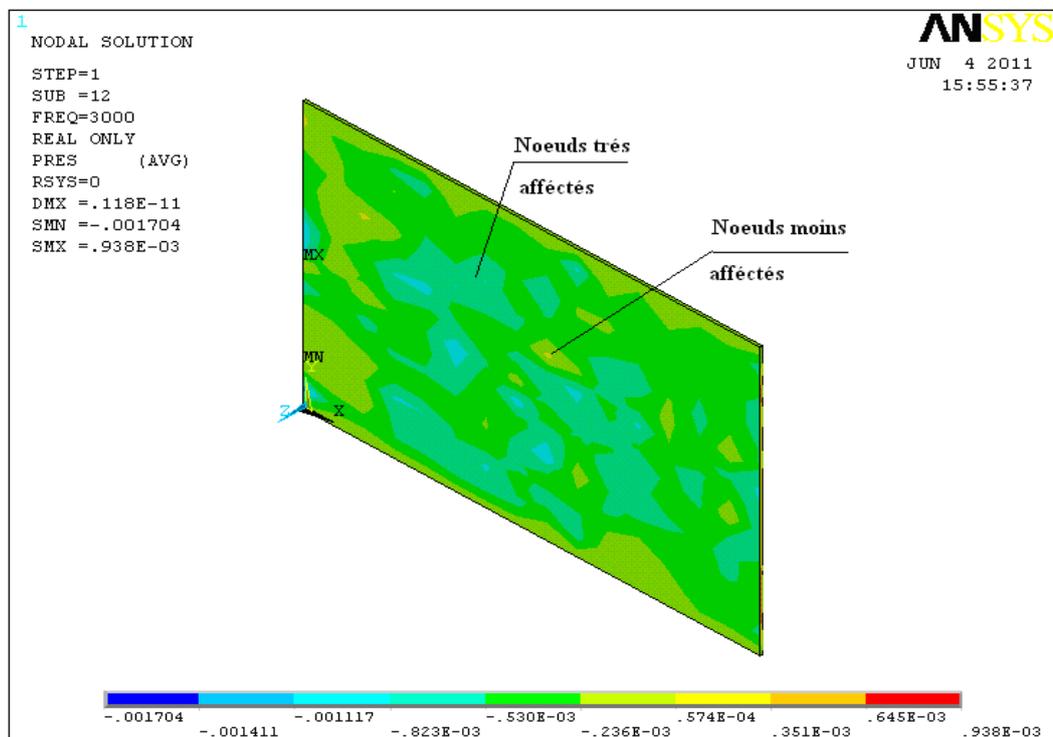


Figure 4.40 : la pression propagée dans la mousse mélamine, modèle plafond à 3KHz

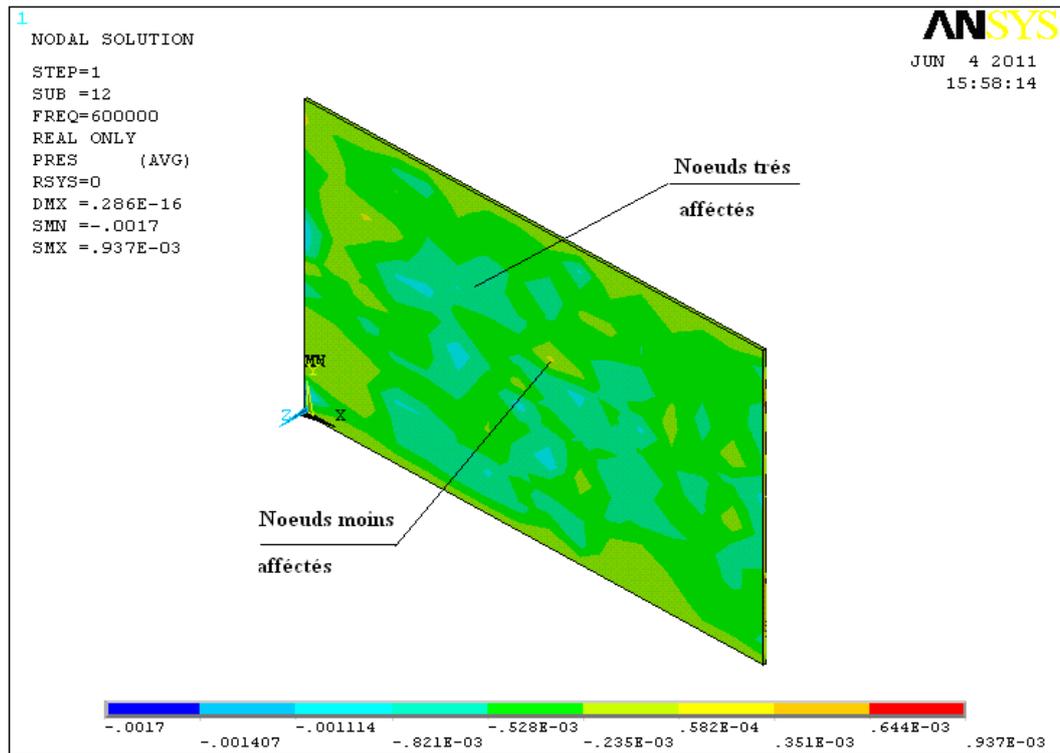


Figure 4.41 : la pression propagée dans la mousse mélamine, modèle plafond à 600 KHz

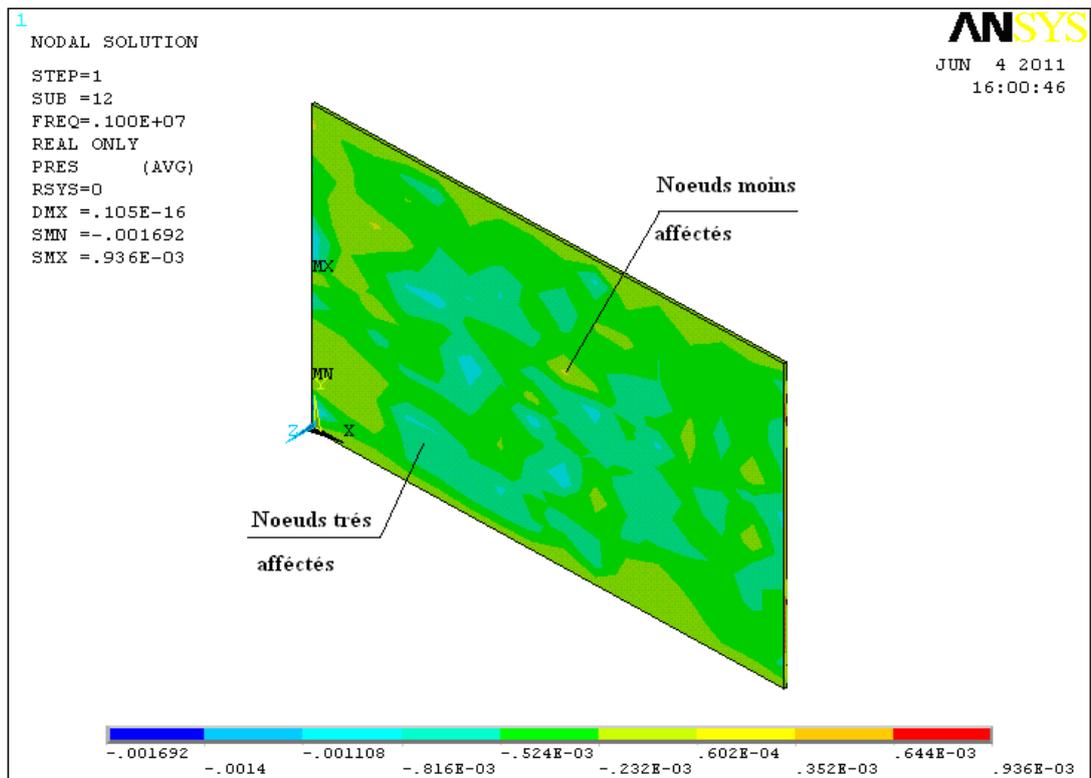


Figure 4.42 : la pression propagée dans la mousse mélamine, modèle plafond à 1 MHz

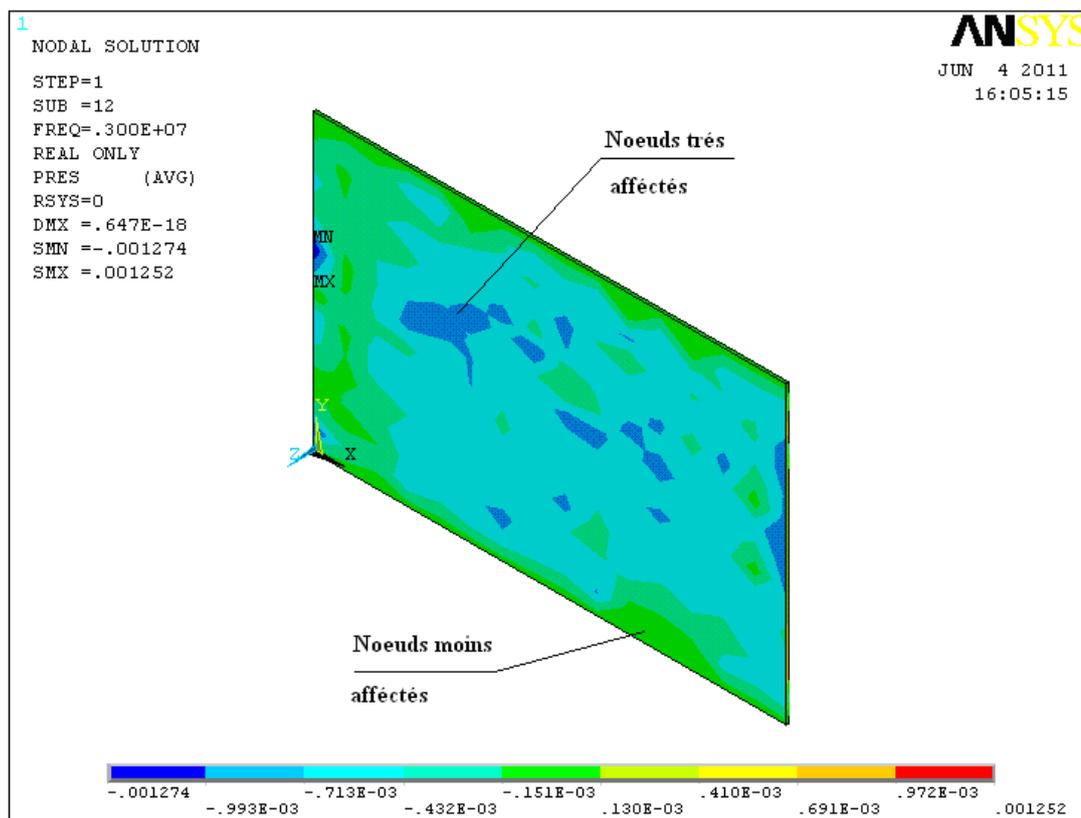


Figure 4.43 : la pression propagée dans la mousse mélamine, modèle plafond à 3 MHz

Le tableau ci-dessous présente les nœuds où la pression transmise par la plaque est très réduite, le reste des résultats sont présentés en annexe J.

3 KHz		600 KHz		1 MHz		3 MHz	
331	0.34300E-03	331	0.34073E-03	331	0.33917E-03	331	0.20373E-03
344	0.28602E-03	344	0.28677E-03	344	0.28405E-03	344	0.19797E-03
359	0.54006E-03	359	0.53945E-03	359	0.53819E-03	359	0.42724E-03
400	0.47573E-03	400	0.47500E-03	400	0.47020E-03	400	0.40042E-03
452	0.69539E-03	452	0.69423E-03	452	0.69394E-03	452	0.55184E-03
457	0.23174E-04	457	0.22605E-04	457	0.24007E-04	457	0.11640E-03
460	0.68737E-03	460	0.68639E-03	460	0.68711E-03	460	0.70121E-03
462	0.62134E-03	462	0.61989E-03	462	0.61882E-03	462	0.80083E-03
463	0.50956E-03	463	0.50998E-03	463	0.51006E-03	463	0.49811E-03
464	0.88437E-03	464	0.88379E-03	464	0.88192E-03	464	0.93636E-03
465	0.37204E-03	465	0.37169E-03	465	0.37352E-03	465	0.59456E-03
467	0.52607E-03	467	0.52570E-03	467	0.52522E-03	467	0.46478E-03
470	0.46263E-03	470	0.46307E-03	470	0.46373E-03	470	0.55239E-03
490	0.56997E-03	490	0.57064E-03	490	0.57223E-03	490	0.55387E-03
501	0.56783E-03	501	0.56515E-03	501	0.55973E-03	501	0.54740E-03

Tableau 4.12: pressions obtenues pour la mousse mélamine, modèle plafond

Commentaires

La pression diminue en traversant la plaque grâce aux propriétés poreuses de la mousse qui permettent d'obtenir des pressions très réduites au niveau de la face intérieure du véhicule contre 0.01 Pa comme pression d'excitation.

Les pressions transmises par la mousse mélamine du modèle plafond sont presque de même ordre pour les différentes fréquences d'excitation, les nœuds 344, 460 et 490 du tableau ci-dessus.

Pour trouver une fréquence où la plaque est plus absorbante, nous avons élevé la fréquence d'excitation jusqu'à ce que nous avons obtenu des pressions presque négligeables à 9 MHz, ces résultats sont montrés ci-dessous, la totalité des résultats sont présentés en annexe K :

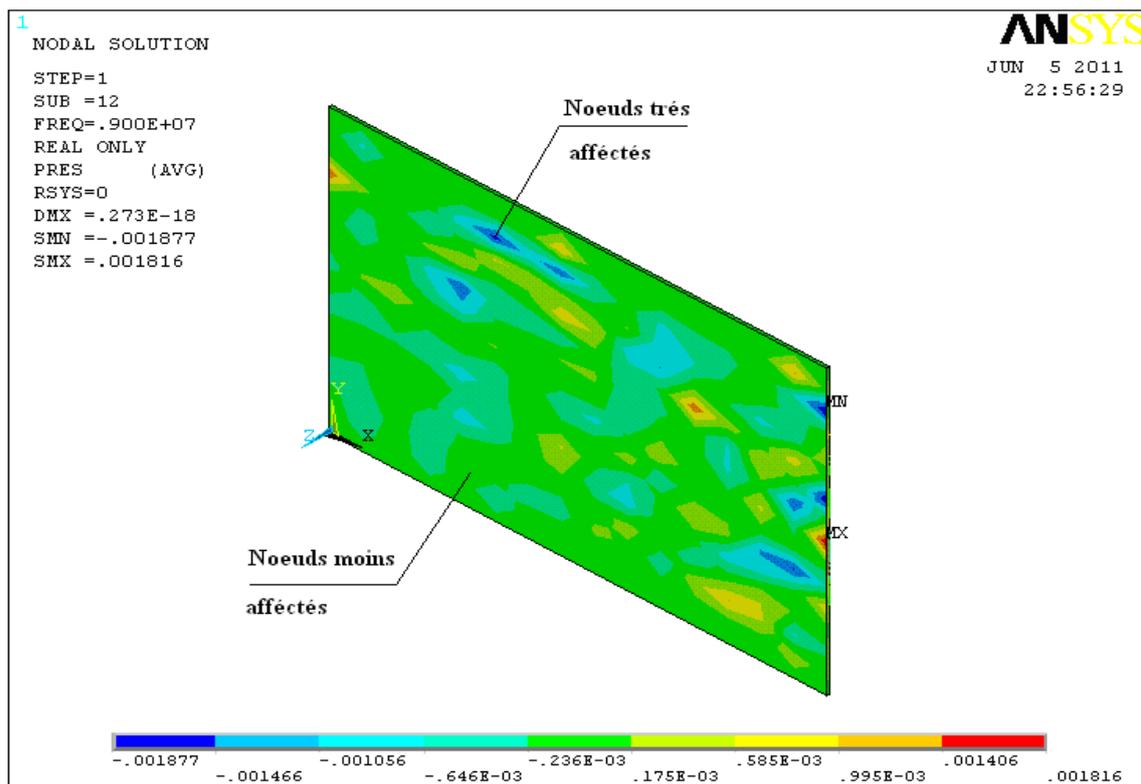


Figure 4.44 : la pression propagée dans la mousse mélamine, modèle plafond à 9 MHz

F = 9 MHz	
339	0.73274E-45
340	0.45324E-45
344	0.36570E-45
348	0.11254E-45
372	0.52775E-45
400	0.64145E-45
428	0.12597E-45
442	0.12447E-45
464	0.32471E-45
465	0.43667E-45
467	0.85083E-45
470	0.16739E-45
492	0.14751E-45
494	0.45685E-45
498	0.12280^E-45

Tableau 4.13: pressions obtenues pour la mousse mélamine à 9 MHz, modèle plafond

4.8.2.4. Mousse polyuréthane

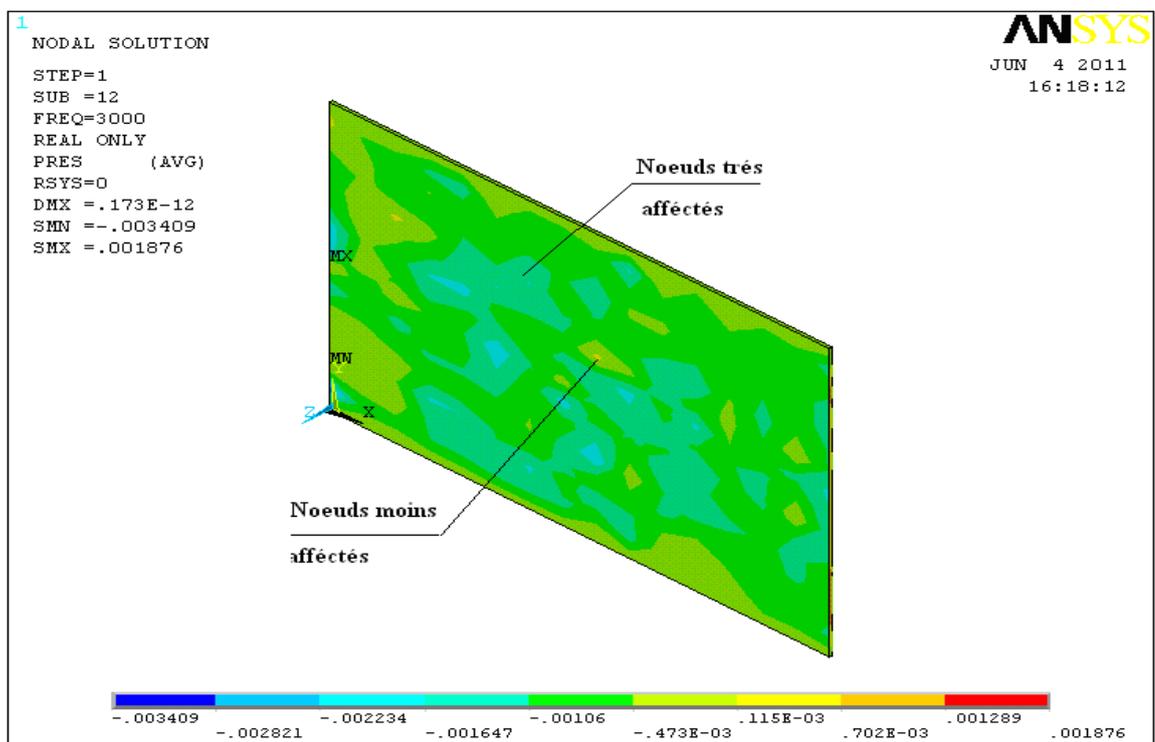


Figure 4.45 : la pression propagée dans la mousse polyuréthane, modèle plafond à 3 KHz

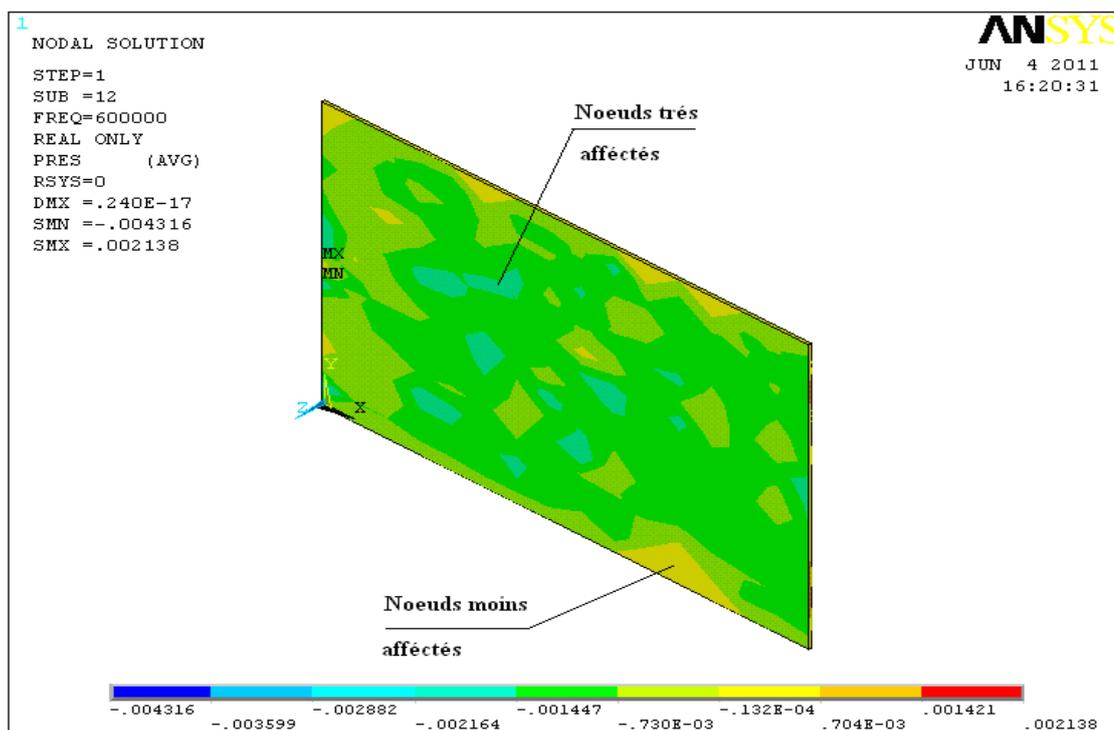


Figure 4.46 : la pression propagée dans la mousse polyuréthane, modèle plafond à 600 KHz

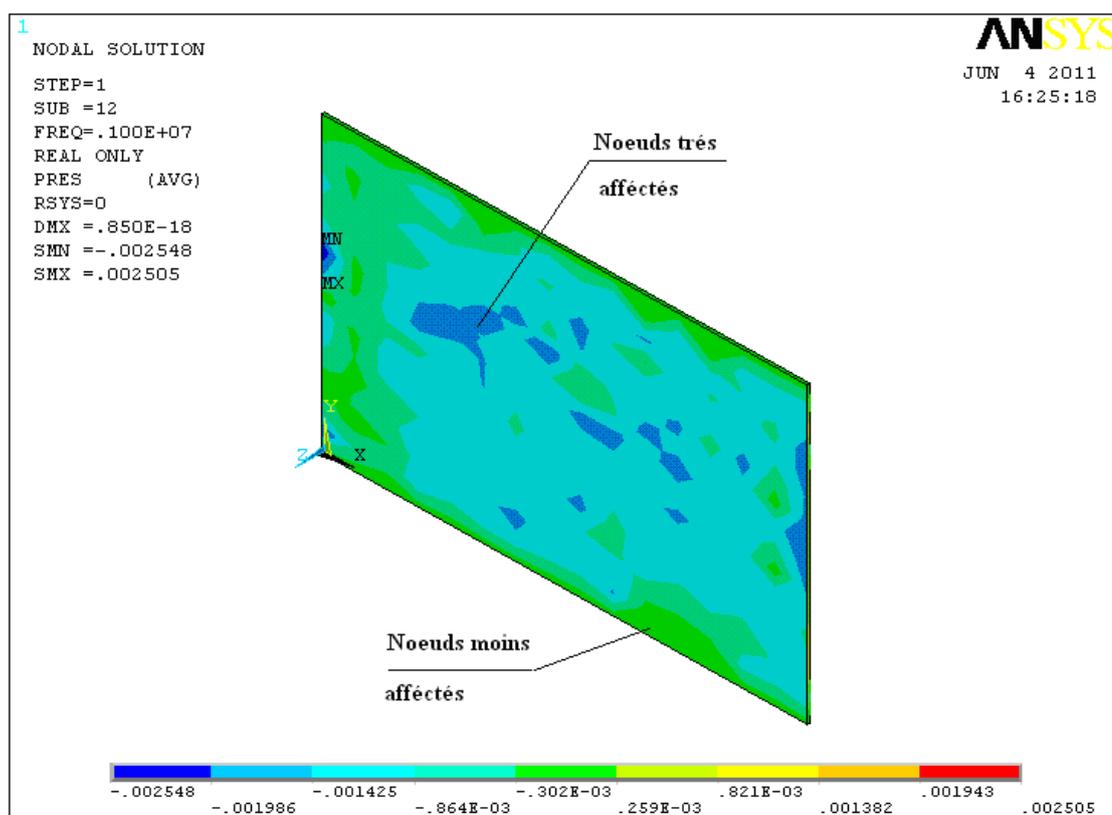


Figure 4.47 : la pression propagée dans la mousse polyuréthane, modèle plafond à 1MHz

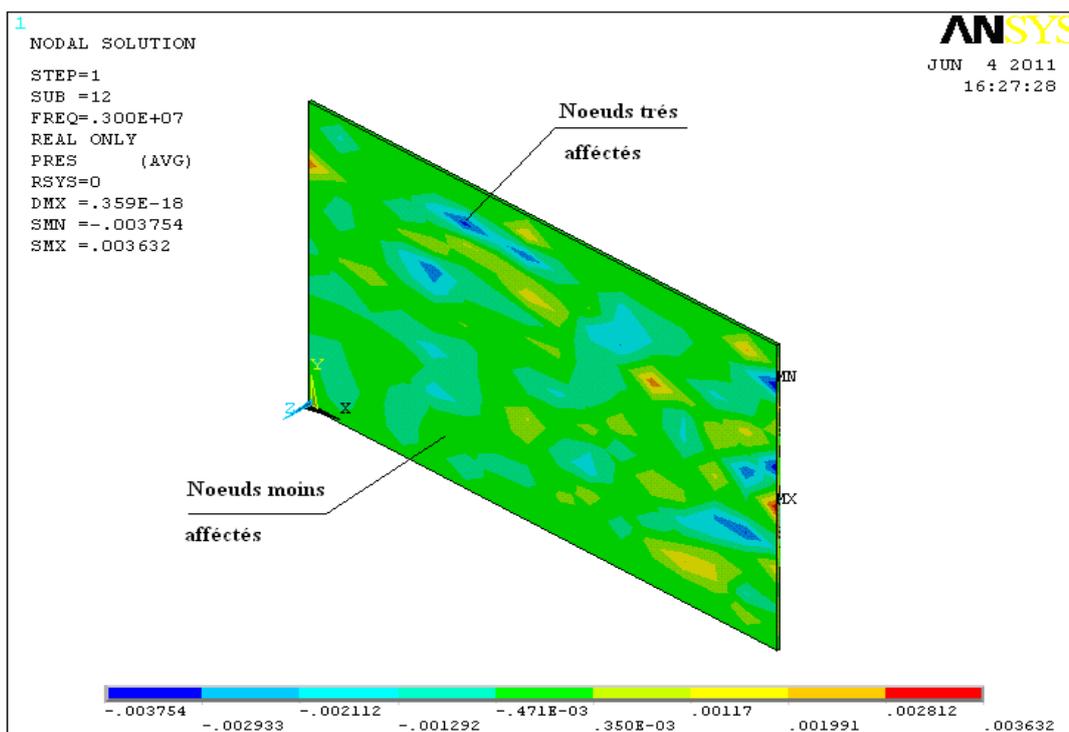


Figure 4.48 : la pression propagée dans la mousse polyuréthane, modèle plafond à 3MHz

Les nœuds qui résultent les plus petites pressions transmises par la plaque sont montrés par le tableau ci-dessous, le reste des résultats sont présentés en annexe L.

3 KHz		600 KHz		1 MHz		3 MHz	
339	0.76048E-03	339	0.78494E-03	339	0.84381E-03	339	0.63239E-45
340	0.36416E-03	340	0.36312E-03	340	0.86913E-03	340	0.39117E-45
342	0.75109E-03	342	0.79434E-03	342	0.72002E-03	342	0.81476E-45
344	0.57204E-03	344	0.59344E-03	344	0.39594E-03	344	0.31562E-45
348	0.75837E-03	348	0.80885E-03	348	0.86245E-03	348	0.97128E-46
372	0.13898E-02	372	0.14031E-02	372	0.13417E-02	372	0.45547E-45
400	0.95146E-03	400	0.95135E-03	400	0.80084E-03	400	0.55360E-45
428	0.60151E-03	428	0.58238E-03	428	0.85413E-03	428	0.10872E-45
442	0.17886E-02	442	0.18015E-02	442	0.13574E-02	442	0.10743E-45
464	0.17687E-02	464	0.17801E-02	464	0.18727E-02	464	0.28024E-45
465	0.74409E-03	465	0.73215E-03	465	0.11891E-02	465	0.37687E-45
470	0.92526E-03	470	0.92000E-03	470	0.11048E-02	470	0.14447E-45
492	0.93080E-03	492	0.94095E-03	492	0.13383E-02	492	0.12731E-45
494	0.12880E-02	494	0.13010E-02	494	0.17253E-02	494	0.39428E-45
498	0.80395E-03	498	0.78327E-03	498	0.10124E-02	498	0.10598E-45

Tableau 4.14: pressions obtenues pour la mousse polyuréthane, modèle plafond.

Commentaires

La mousse polyuréthane modélisée absorbe la pression exercée sur sa face grâce à sa nature poreuse, les résultats obtenus et récapitulés dans le tableau ci-dessus illustrent que l'absorption est presque de même ordre pour les trois premières fréquences, les nœuds 342, 494 et 442 (tableau ci-dessus).

La pression transmise pour la fréquence 3 MHz est presque négligeable où la plaque est presque imperméable avec des pressions très réduites, les nœuds : 348, 442 et 498 du tableau ci-dessus.

4.8.3. Modèle tableau de bord

4.8.3.1. fibre textile

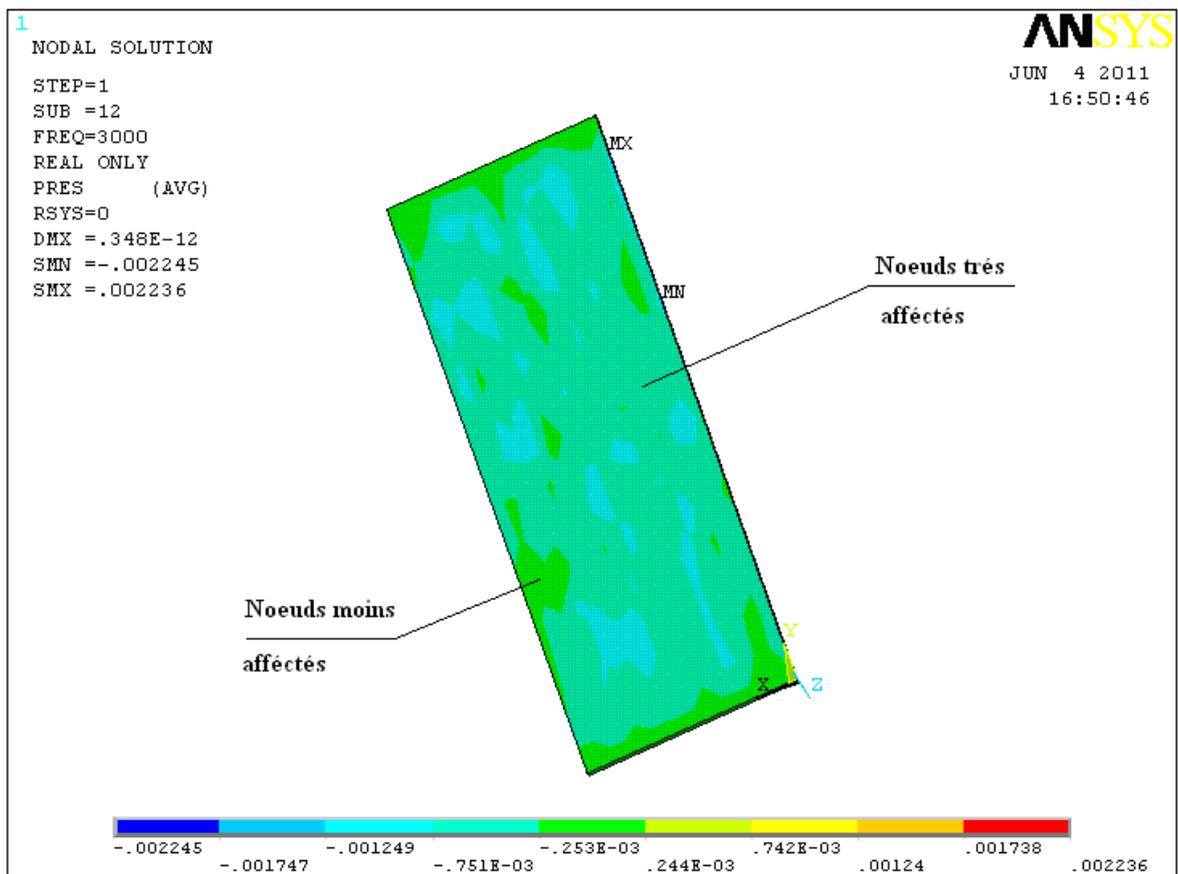


Figure 4.49 : la pression propagée dans la fibre textile, modèle tableau de bord à 3KHz

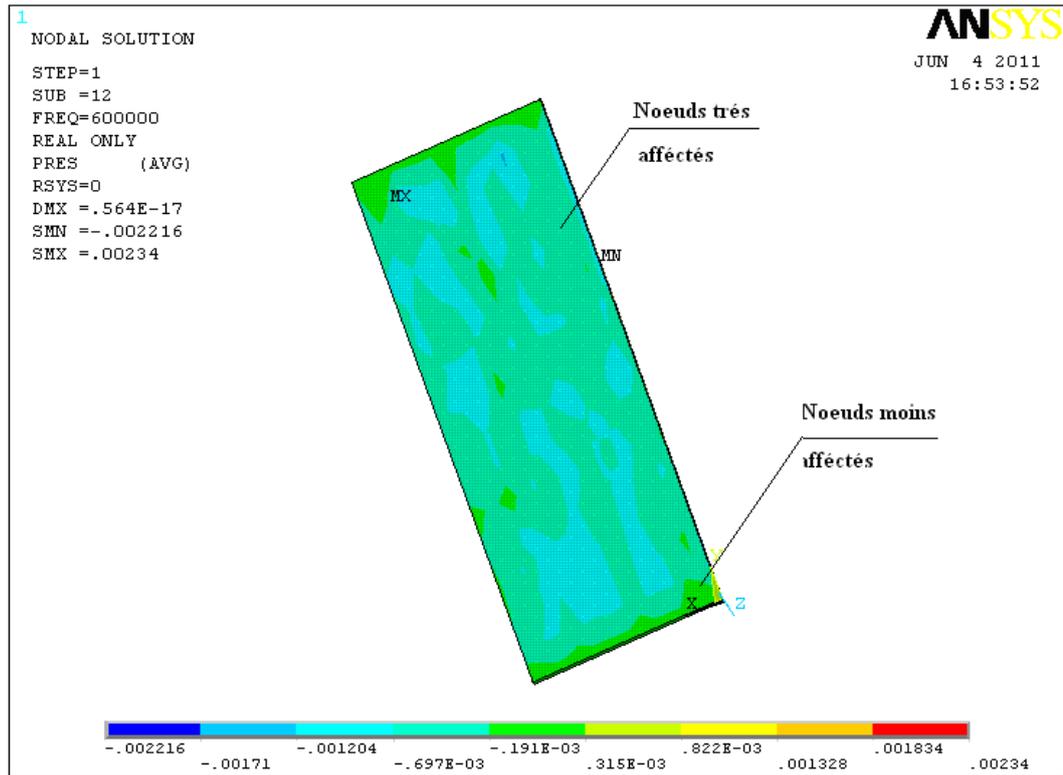


Figure 4.50 : la pression propagée dans la fibre textile, modèle tableau de bord à 600 KHz

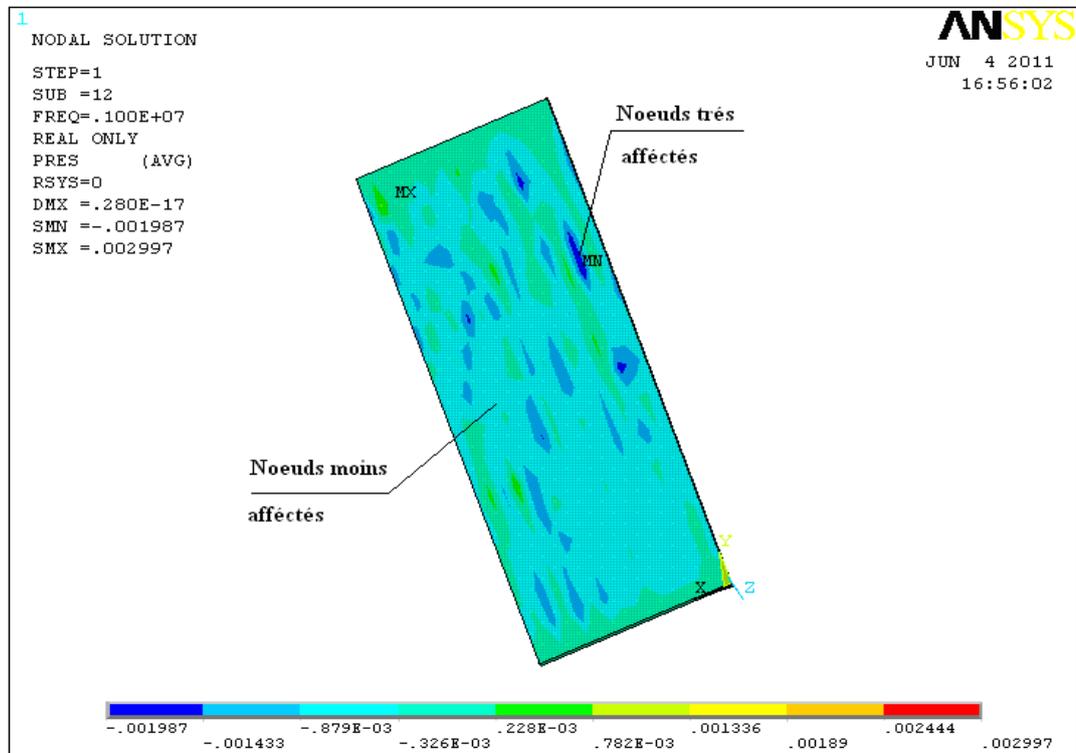


Figure 4.51 : la pression propagée dans la fibre textile, modèle tableau de bord à 1MHz

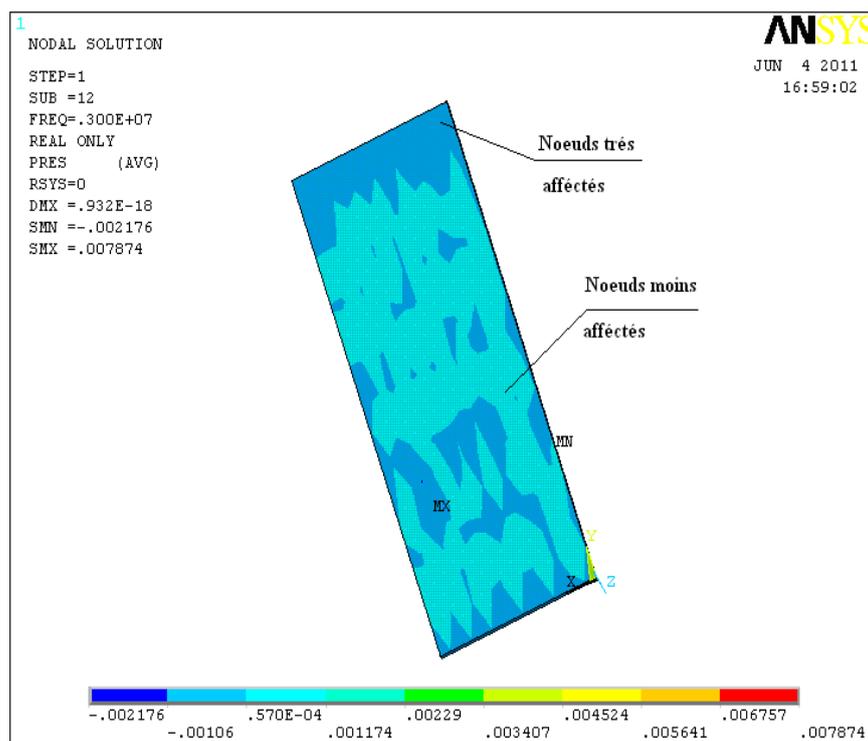


Figure 4.52 : la pression propagée dans la fibre textile, modèle tableau de bord à 3MHz

Les noeuds qui enregistrent les pressions transmises les plus réduites sont montrés dans le tableau ci-dessous, le reste des résultats sont présentés en annexe M.

3 KHz		600 KHz		1 MHz		3 MHz	
71	0.42027E-03	71	0.43038E-03	71	0.13994E-02	71	0.10592E-42
73	0.68591E-03	73	0.77195E-03	73	0.11347E-02	73	0.14194E-42
85	0.73212E-03	85	0.72882E-03	85	0.96343E-03	85	0.12265E-42
97	0.88959E-03	97	0.94126E-03	97	0.64047E-03	97	0.53573E-43
132	0.42459E-03	132	0.49339E-03	132	0.36920E-03	132	0.53637E-43
136	0.28904E-03	136	0.38850E-03	136	0.24258E-03	136	0.65157E-44
138	0.89027E-03	138	0.82993E-03	138	0.14982E-03	138	0.55967E-43
139	0.75979E-03	139	0.77943E-03	139	0.14751E-02	139	0.57493E-43
140	0.54082E-03	140	0.62832E-03	140	0.48029E-03	140	0.60219E-43
142	0.65566E-03	142	0.77617E-03	142	0.38908E-03	142	0.38272E-44
161	0.56937E-03	161	0.69415E-03	161	0.30456E-03	161	0.16376E-43
164	0.51481E-03	164	0.50574E-03	164	0.13998E-02	164	0.39535E-44
170	0.80726E-03	170	0.81543E-03	170	0.40897E-03	170	0.34515E-43
184	0.71456E-03	184	0.74759E-03	184	0.11634E-02	184	0.73737E-43
194	0.32561E-03	194	0.32303E-03	194	0.22841E-05	194	0.94784E-45

Tableau 4.15: pressions obtenues pour la fibre textile, modèle tableau de bord.

Commentaires

La pression exercée sur la plaque en fibre textile est diminuée de faite qu'elle traverse la plaque d'une nature poreuse, les résultats obtenus pour ce modèle illustrent que pour les fréquences 3 KHz, 0.6 MHz et 1 MHz, la pression transmise est presque de même ordre, les nœuds 97 et 142 (tableau ci-dessus), tandis-que pour la fréquence 3 MHz elle est presque négligeable (les nœuds 136, 142 et 194).

Donc la fibre textile absorbe la pression d'excitation et réduit le bruit ressenti à l'intérieur du véhicule.

4.8.3.2. laine de verre

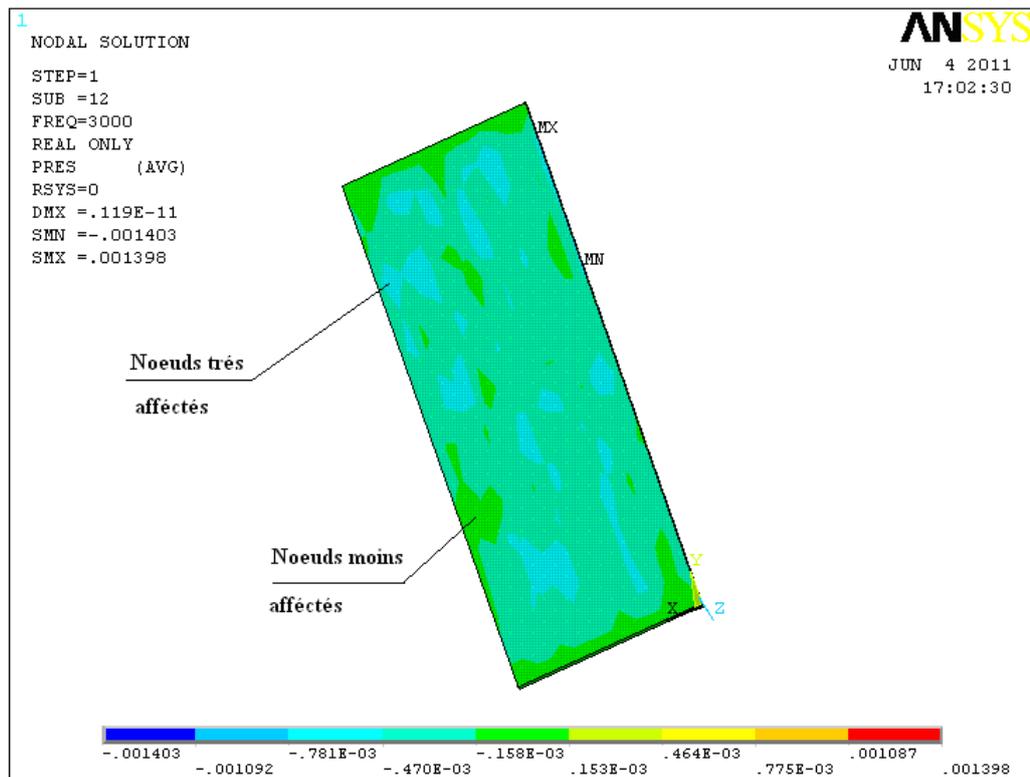


Figure 4.53 : la pression propagée dans la laine de verre, modèle tableau de bord à 3KHz

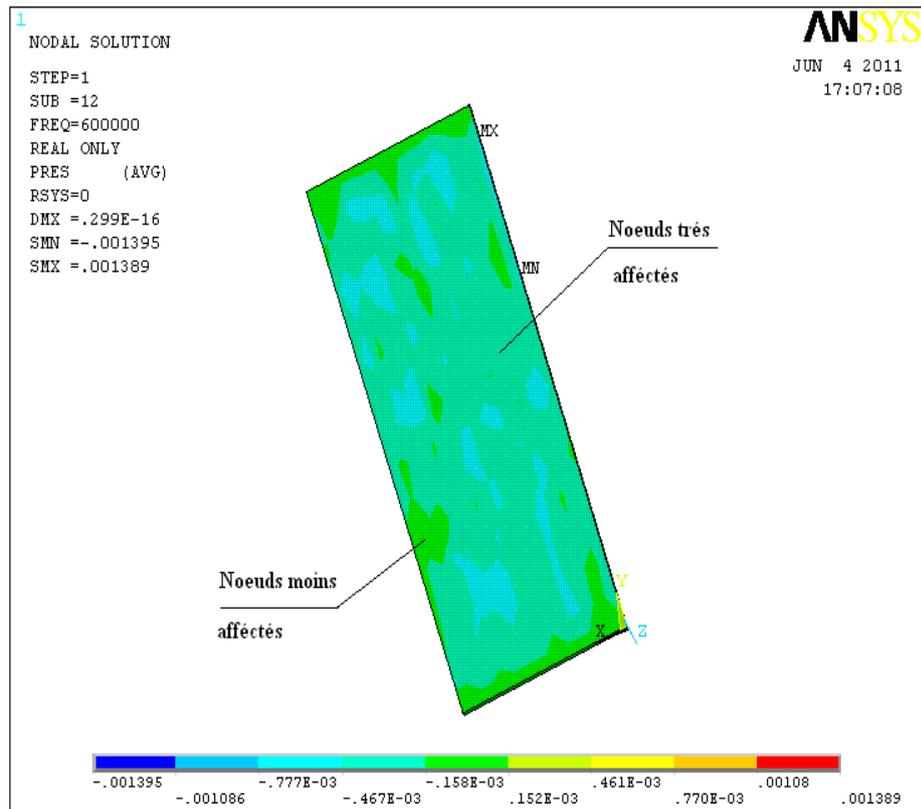


Figure 4.54 : la pression propagée dans la laine de verre, modèle tableau de bord à 600 KHz

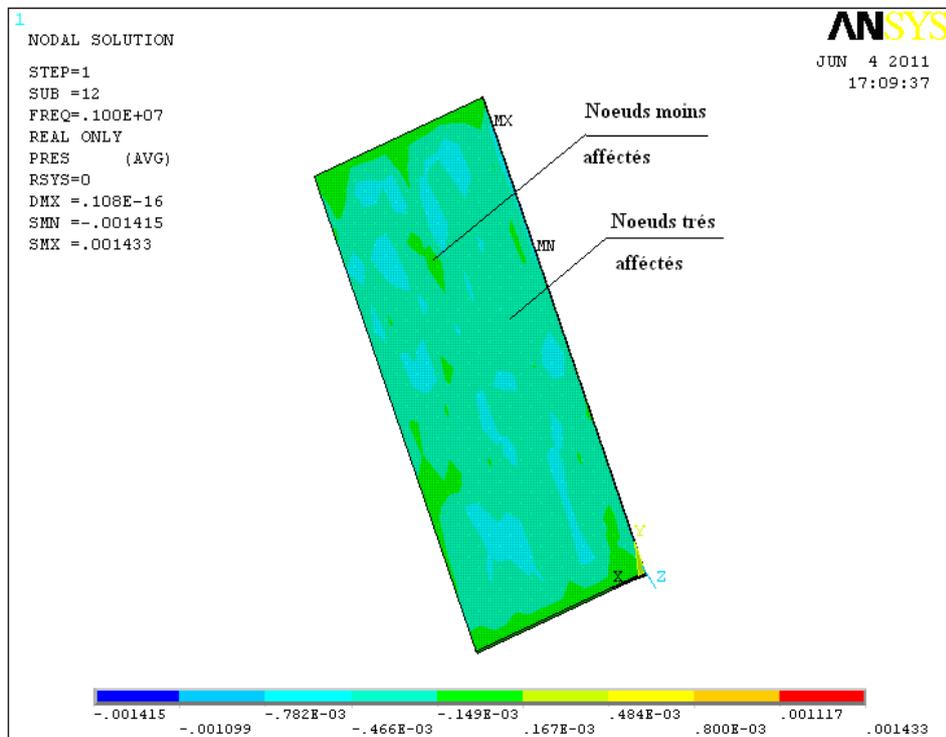


Figure 4.55 : la pression propagée dans la laine de verre, modèle tableau de bord à 1MHz

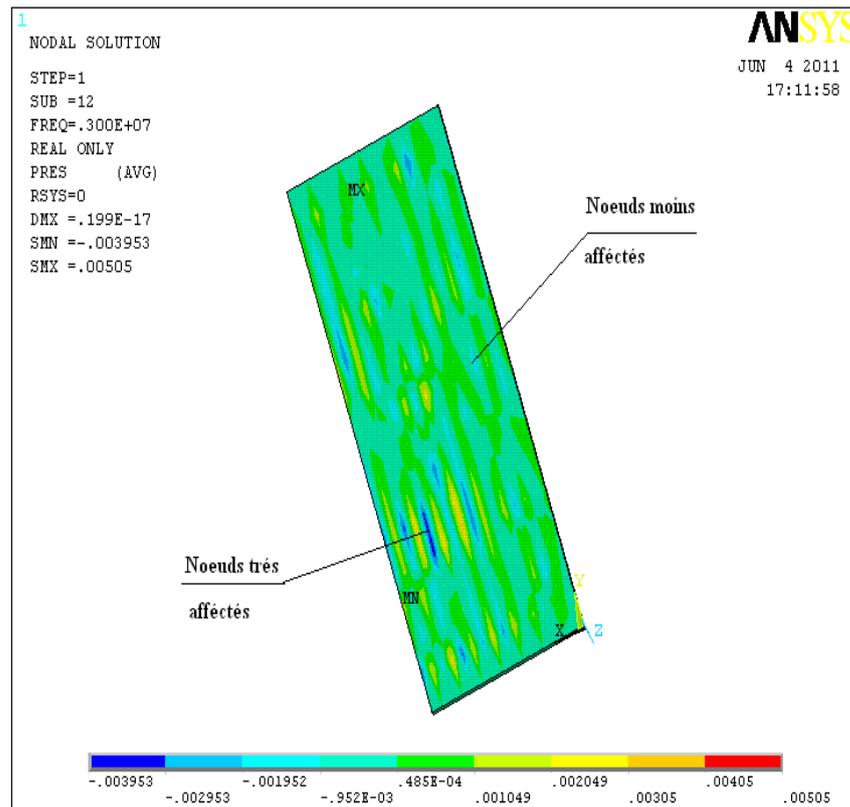


Figure 4.56 : la pression propagée dans la laine de verre, modèle tableau de bord à 3MHz

Le tableau ci-dessous récapitule les nœuds où la pression transmise est réduite, les résultats complets sont présentés en annexe N.

3 KHz		600 KHz		1 MHz		3 MHz	
65	0.43338E-03	65	0.43532E-03	65	0.46037E-03	65	0.66604E-03
85	0.45758E-03	85	0.45776E-03	85	0.44376E-03	85	0.29863E-03
91	0.21630E-03	91	0.21917E-03	91	0.22126E-03	91	0.79426E-03
92	0.50127E-03	92	0.50299E-03	92	0.49746E-03	92	0.52639E-03
93	0.40905E-03	93	0.40979E-03	93	0.42288E-03	93	0.52769E-03
94	0.21361E-03	94	0.21698E-03	94	0.21617E-03	94	0.11172E-02
95	0.43188E-03	95	0.43063E-03	95	0.42215E-03	95	0.10418E-02
98	0.52941E-03	98	0.53108E-03	98	0.54476E-03	98	0.23364E-04
140	0.33801E-03	140	0.33762E-03	140	0.34985E-03	140	0.31844E-03
170	0.50454E-03	170	0.50470E-03	170	0.50870E-03	170	0.17164E-03
197	0.29708E-03	196	0.54113E-03	196	0.50916E-03	196	0.13484E-03
224	0.18807E-03	224	0.19324E-03	224	0.23685E-03	224	0.92709E-04
248	0.50223E-03	248	0.50503E-03	248	0.48560E-03	248	0.11017E-03
254	0.61547E-03	254	0.61257E-03	254	0.66052E-03	254	0.54493E-03
256	0.87040E-04	256	0.88583E-04	256	0.89578E-04	256	0.60565E-03

Tableau 4.16: pressions obtenues pour la laine de verre, modèle tableau de bord.

Commentaires

Les résultats obtenus pour la laine de verre sont presque de même ordre pour toutes les fréquences, les nœuds 65, 140 et 256 (tableau ci-dessus). Ce qui nous permet de dire que la laine de verre absorbe la pression d'excitation qui est de 0.01 Pa pour donner des pressions au niveau de l'autre face d'ordre très inférieure.

Pour déterminer une fréquence optimale de la laine de verre, nous avons augmenté la fréquence d'excitation, et à 6 MHz, nous avons obtenu des pressions très réduites, les nœuds 96, 142 et 194 du tableau ci-dessous, la totalité des résultats sont présentés en annexe O.

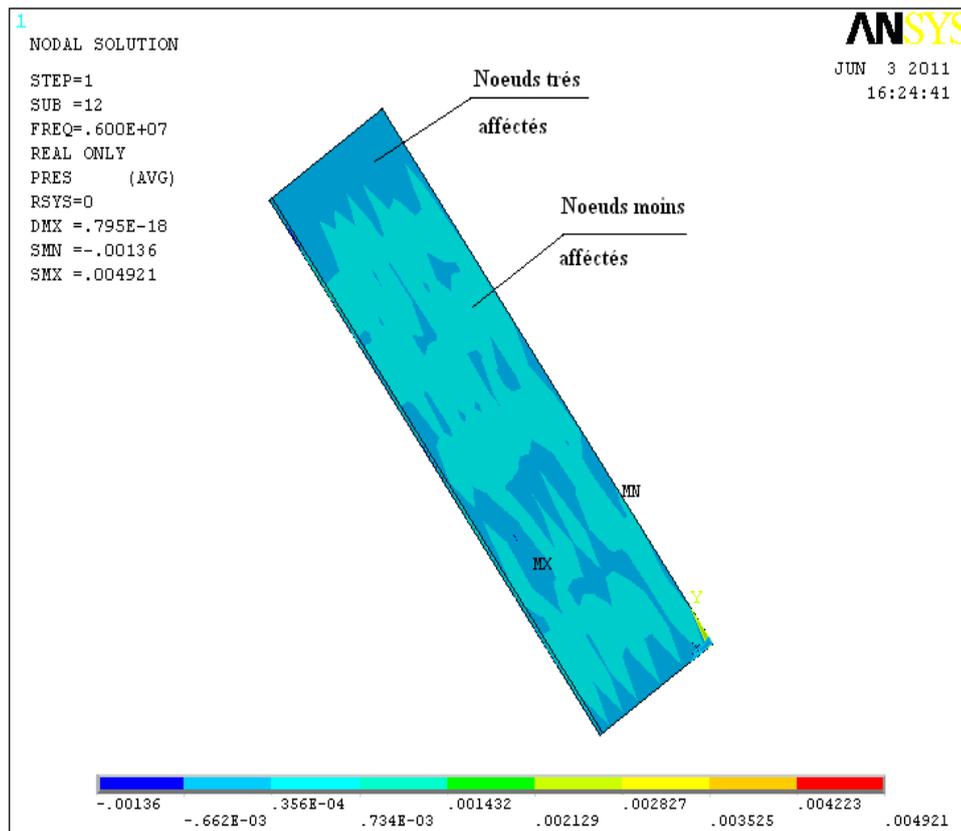


Figure 4.57 : la pression propagée dans la laine de verre, modèle tableau de bord à 6MHz

F = 6 MHz	
96	0.51371E-44
97	0.62360E-43
132	0.62434E-43
136	0.75843E-44
138	0.65147E-43
139	0.66922E-43
140	0.70095E-43
142	0.44549E-44
161	0.19062E-43
164	0.46019E-44
170	0.40176E-43
194	0.11033E-44
203	0.36288E-43
206	0.46483E-43
212	0.48431E-43

Tableau 4.17: pressions obtenues pour la laine de verre à 6 MHz, modèle tableau de bord.

4.8.3.3. Mousse mélamine

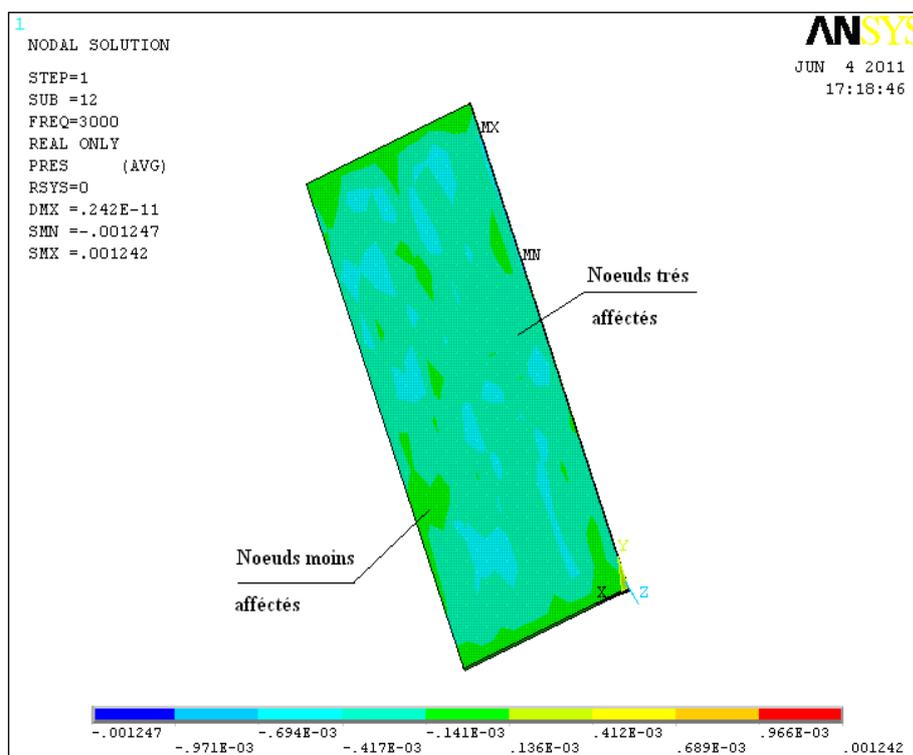


Figure 4.58 : la pression propagée dans la mousse mélamine, modèle tableau de bord à 3KHz

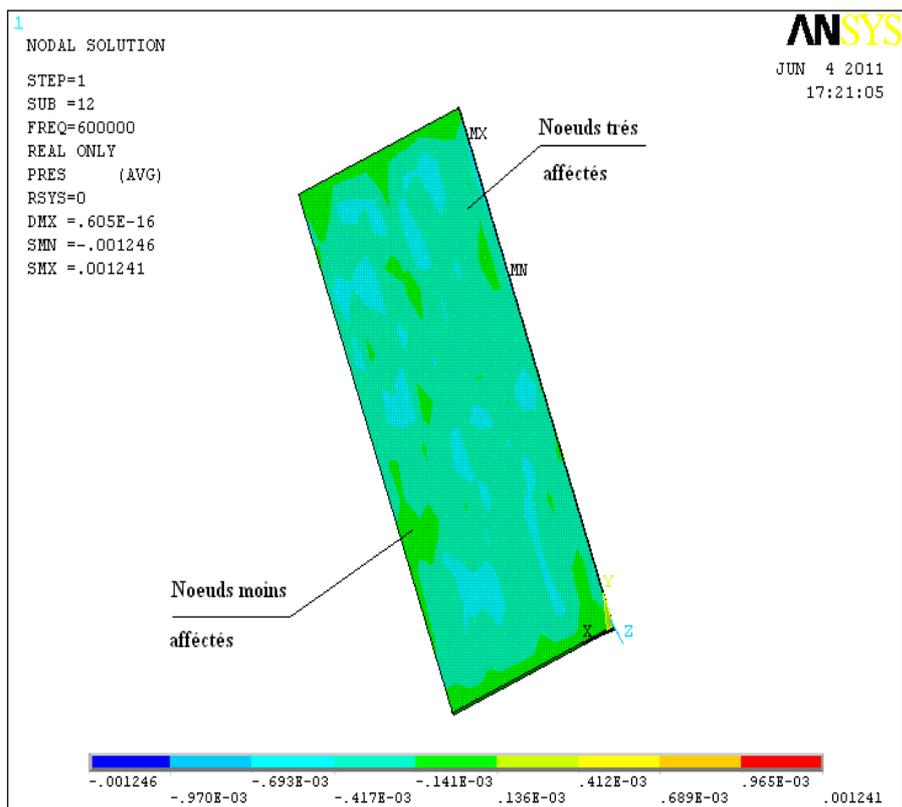


Figure 4.59 : la pression propagée dans la mousse mélamine, modèle tableau de bord à 600 KHz

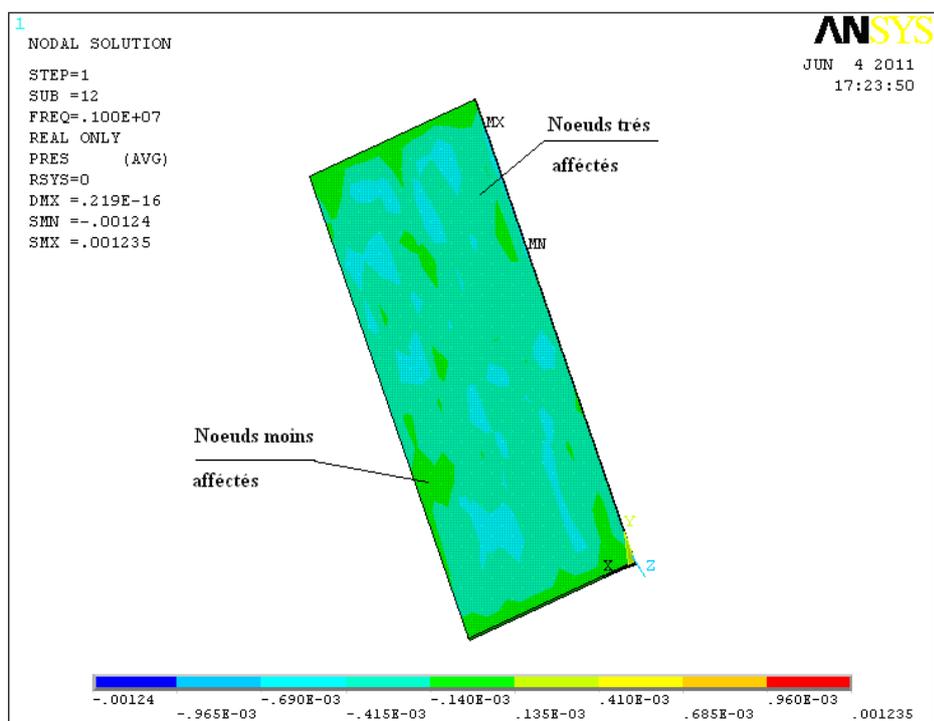


Figure 4.60 : la pression propagée dans la mousse mélamine, modèle tableau de bord à 1MHz

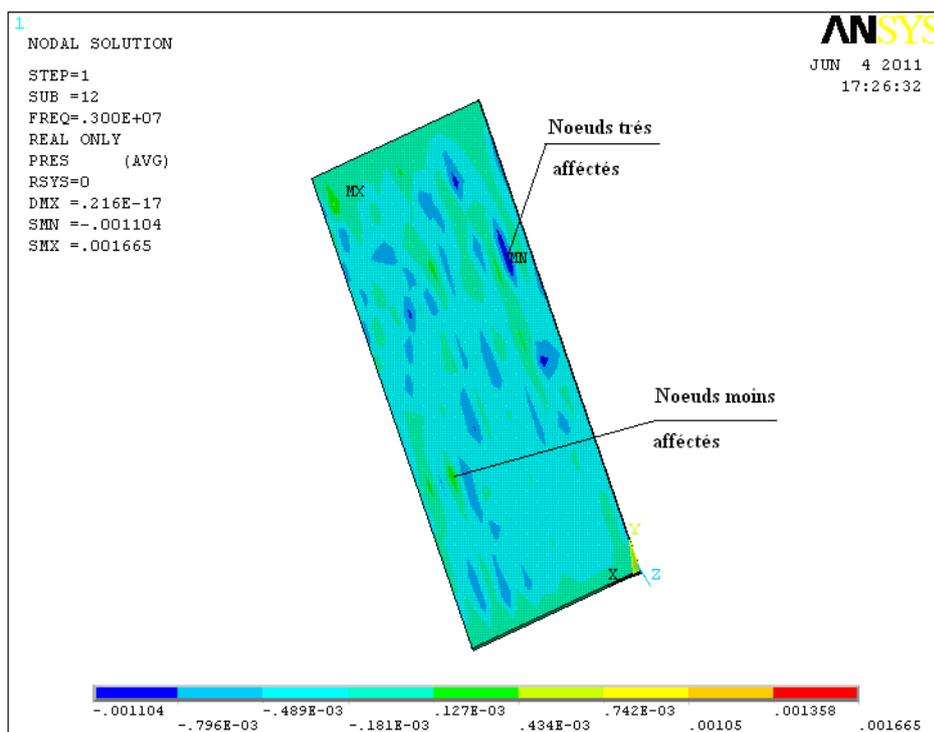


Figure 4.61 : la pression propagée dans la mousse mélamine, modèle tableau de bord à 3MHz

Les nœuds qui enregistrent la faible pression transmise sont comme suit et le reste des résultats sont présentés en annexe P.

3 KHz		600 KHz		1 MHz		3 MHz	
63	0.41053E-03	63	0.41035E-03	63	0.41060E-03	63	0.38817E-03
77	0.32752E-03	77	0.32708E-03	77	0.32639E-03	77	0.26591E-03
100	0.32847E-03	100	0.32807E-03	100	0.32663E-03	100	0.27458E-03
142	0.36426E-03	142	0.36438E-03	142	0.36001E-03	142	0.21616E-03
144	0.11787E-03	144	0.11818E-03	144	0.12082E-03	144	0.24816E-04
161	0.31632E-03	161	0.31685E-03	161	0.31437E-03	161	0.16920E-03
170	0.44848E-03	170	0.44865E-03	170	0.44862E-03	170	0.22720E-03
175	0.30439E-03	175	0.30472E-03	175	0.30325E-03	175	0.22602E-04
194	0.18090E-03	194	0.18069E-03	194	0.18001E-03	194	0.12689E-05
196	0.48460E-03	196	0.48485E-03	196	0.48101E-03	196	0.13162E-03
203	0.30923E-03	203	0.30973E-03	203	0.30906E-03	203	0.97484E-04
245	0.40710E-03	245	0.40769E-03	245	0.40281E-03	245	0.22889E-03
248	0.44643E-03	248	0.44733E-03	248	0.44892E-03	248	0.13441E-03
249	0.32569E-03	249	0.32610E-03	249	0.32721E-03	249	0.96049E-04
254	0.54709E-03	254	0.54759E-03	254	0.54451E-03	254	0.14729E-03

Tableau 4.18: pressions obtenues pour la mousse mélamine, modèle tableau de bord.

Commentaires

D'après les résultats obtenus, on observe que la mousse mélamine empêche la transmission de la pression d'excitation vers l'autre face de la plaque en permettant ainsi d'assurer un confort acoustique à l'intérieur du véhicule.

Pour toute la gamme fréquentielle étudiée, la pression transmise est presque de même ordre, les nœuds 63, 161 et 254 (tableau ci-dessus).

En augmentant la fréquence, nous avons constaté que la mousse mélamine devient très isolante à 9 MHz et la pression transmise est presque nulle, les nœuds 96, 142 et 194 du tableau ci-dessous, le reste des résultats sont présentés en annexe Q.

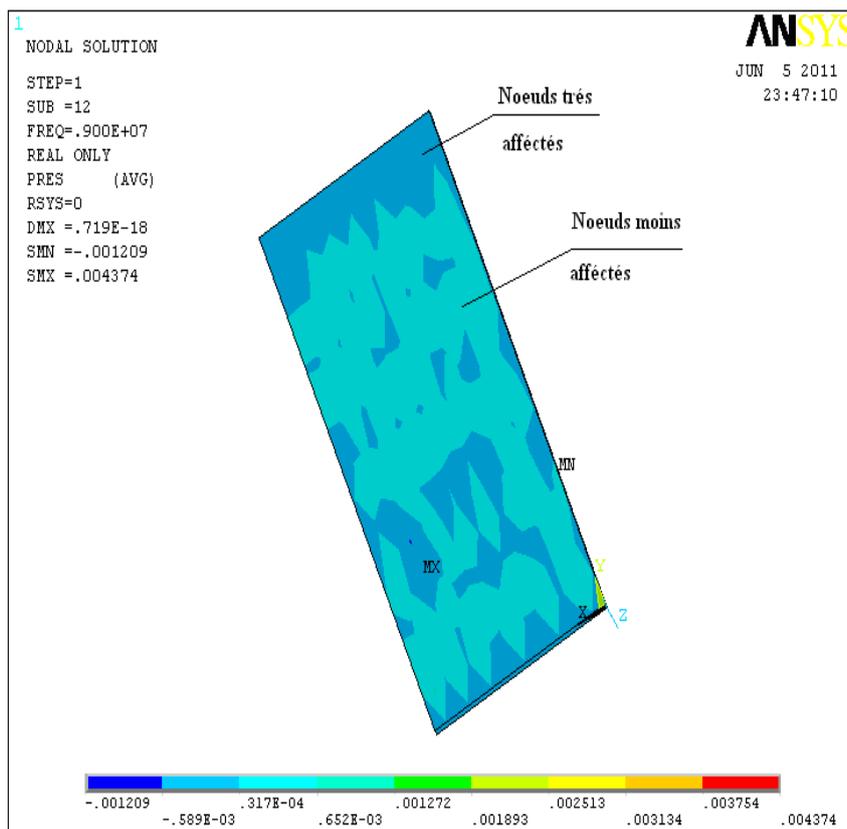


Figure 4.62 : la pression propagée dans la mousse mélamine, modèle tableau de bord à 9MHz

F = 9 MHz	
96	0.47319E-44
97	0.57440E-43
132	0.57509E-43
136	0.69860E-44
138	0.60008E-43
139	0.61643E-43
142	0.41035E-44
161	0.17558E-43
164	0.42389E-44
170	0.37007E-43
194	0.10163E-44
203	0.33425E-43
206	0.42816E-43
212	0.44610E-43
252	0.13556E-43

Tableau 4.19: pressions obtenues pour la mousse mélamine à 9 MHz, modèle tableau de bord.

4.8.3.4. Mousse polyuréthane

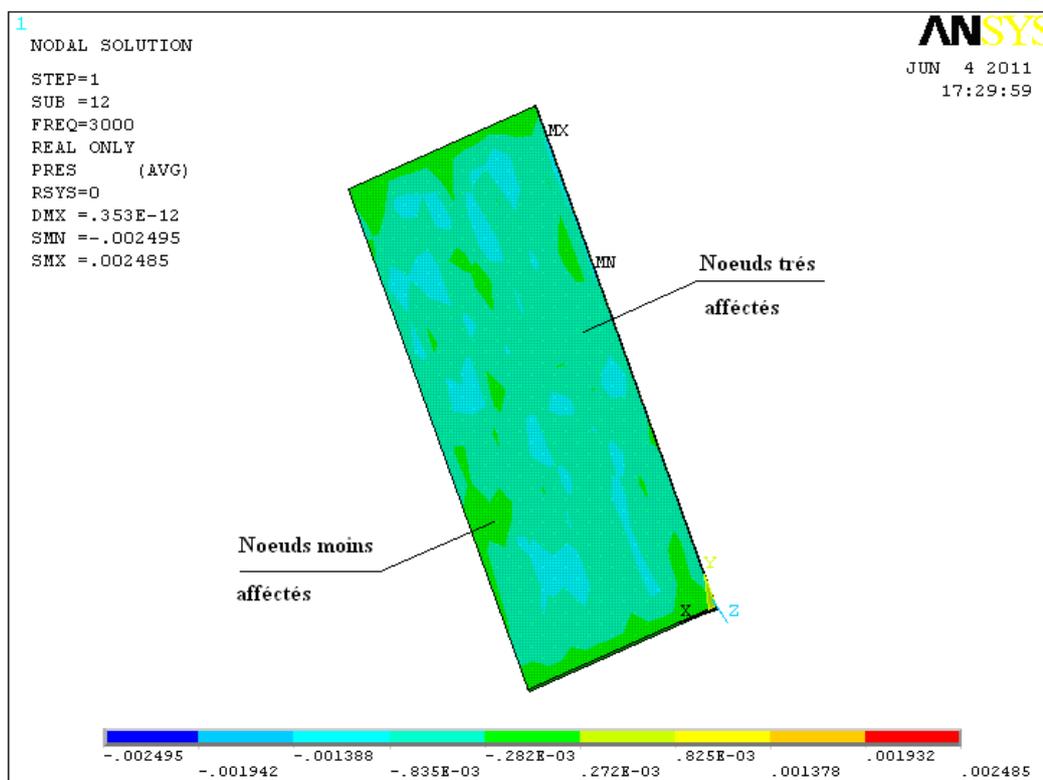


Figure 4.63 : la pression propagée dans la mousse polyuréthane, modèle tableau de bord à 3KHz

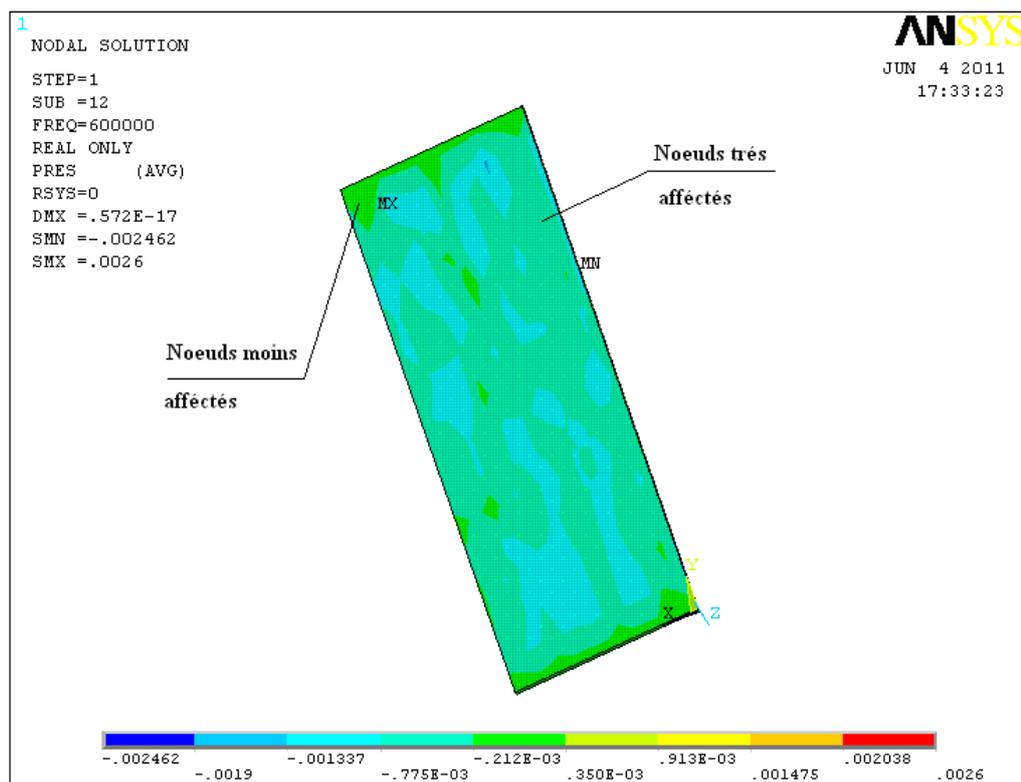


Figure 4.64 : la pression propagée dans la mousse polyuréthane, modèle tableau de bord à 600 KHz

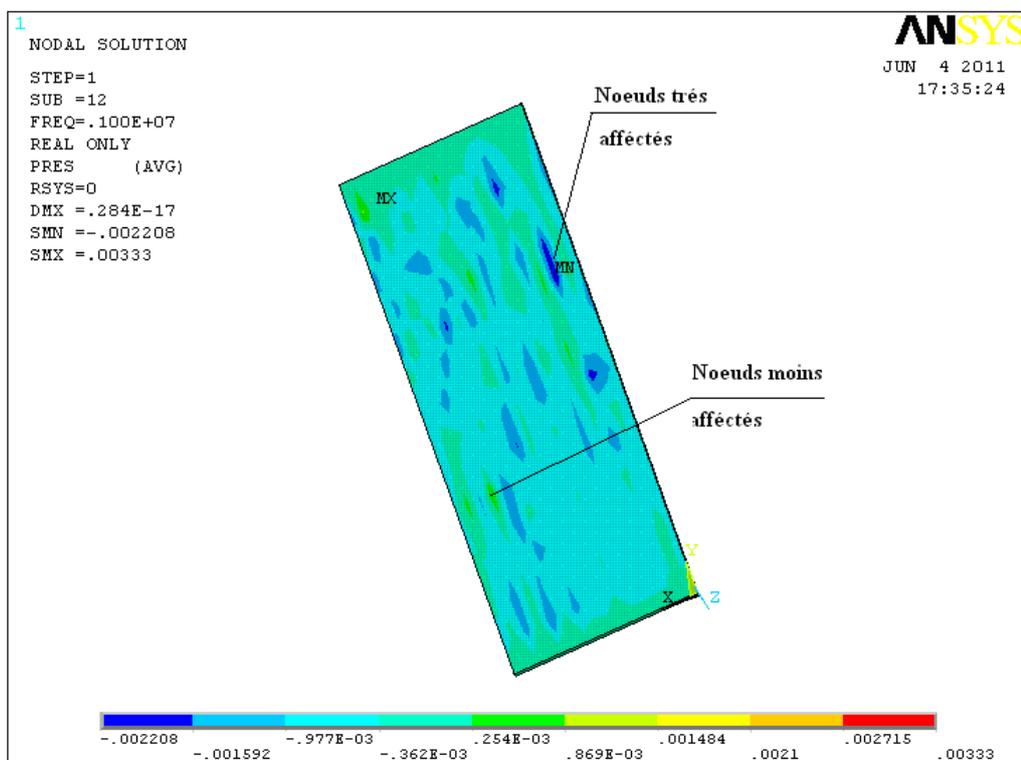


Figure 4.65 : la pression propagée dans la mousse polyuréthane, modèle tableau de bord à 1 MHz

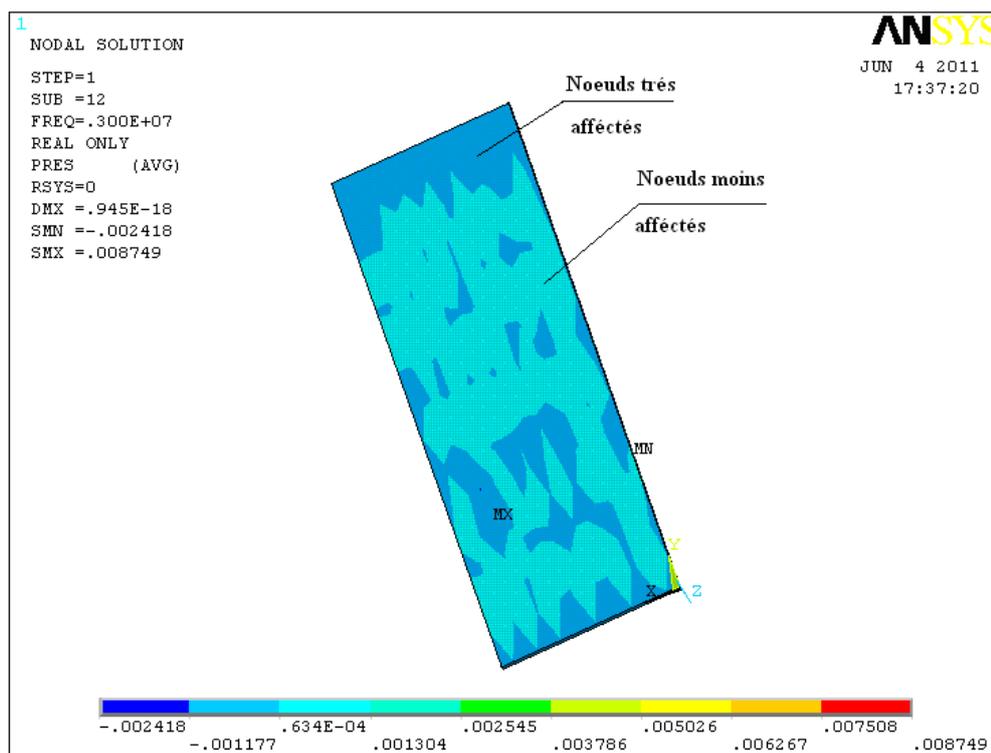


Figure 4.66 : la pression propagée dans la mousse polyuréthane, modèle tableau de bord à 3 MHz

Les nœuds où la pression transmise est la plus réduites sont récapitulés dans le tableau ci-dessous, le reste des résultats sont présentés en annexe R.

3 KHz		600 KHz		1 MHz		3 MHz	
96	0.80684E-03	96	0.79563E-03	96	0.84778E-03	96	0.40838E-44
132	0.47177E-03	132	0.54821E-03	132	0.41022E-03	132	0.49633E-43
136	0.32115E-03	136	0.43167E-03	136	0.26953E-03	136	0.60293E-44
139	0.84421E-03	139	0.86604E-03	139	0.16390E-02	139	0.53201E-43
142	0.72852E-03	142	0.86241E-03	142	0.43231E-03	142	0.35415E-44
161	0.63263E-03	161	0.77128E-03	161	0.33840E-03	161	0.15153E-43
164	0.57201E-03	164	0.56193E-03	164	0.15553E-02	164	0.36584E-44
170	0.89696E-03	170	0.90603E-03	170	0.45441E-03	170	0.31939E-43
194	0.36179E-03	194	0.35892E-03	194	0.25378E-05	194	0.87708E-45
196	0.96920E-03	196	0.10354E-02	196	0.26323E-03	196	0.87127E-43
203	0.61846E-03	203	0.56465E-03	203	0.19497E-03	203	0.28848E-43
206	0.81493E-03	206	0.73960E-03	206	0.53689E-03	206	0.36952E-43
212	0.74015E-03	212	0.78003E-03	212	0.58565E-03	212	0.38501E-43
252	0.83381E-03	252	0.82774E-03	252	0.26124E-03	252	0.11700E-43
256	0.15474E-03	256	0.12772E-03	256	0.97248E-03	256	0.88106E-43

Tableau 4.20: pressions obtenues pour la mousse polyuréthane, modèle tableau de bord.

Commentaires

La mousse polyuréthane diminue la propagation de la pression vers l'autre face de la plaque, les résultats récapitulés dans le tableau ci-dessus montrent que la plaque a une bonne qualité absorbante puisque sur sa face opposée à celle d'excitation, nous avons enregistré des pressions toutes inférieures à la pression exercée.

Pour la fréquence 3 MHz, la plaque absorbe la totalité de la pression, les nœuds 136 et 194 (tableau ci-dessus) et garantie ainsi une très bonne isolation acoustique des bruits.

4.9. COMPARAISON DES RESULTATS

Dans la partie précédente, nous avons étudié le comportement acoustique des plaques poreuses utilisées dans les portes, le plafond et le tableau de bord du véhicule. La gamme haute fréquence utilisée s'étale entre 3 KHz à 3 MHz.

Dans cette partie, nous allons faire une étude comparative des résultats obtenus, seulement pour la fréquence 3 MHz, puisque c'est la fréquence la plus représentative des bruits ressentis lorsqu'on est à l'intérieur d'un véhicule.

A cette fréquence et d'après les résultats obtenus pour les différents modèles, il est remarquable que les pressions aux niveaux de la plaque ne sont pas uniformes, donc l'absorption de la plaque diffère d'un nœud à un autre à cause de la porosité des matériaux utilisés.

Pour analyser la différence et la qualité de l'absorption des quatre matériaux poreux, on prend, pour chaque matériau, le nœud qui enregistre la plus grande pression transmise ou bien le bruit maximum pénétrant à l'intérieur du véhicule.

Le bruit est exprimé en décibels [2], suivant la formule suivante :

$$L_p = 10 \ln \left(\frac{P}{P_0} \right)^2 \quad (4.1)$$

Avec :

P_0 : est la pression acoustique de référence, $P_0 = 2.10^{-5} Pa$.

Donc la pression d'excitation peut être exprimée par un bruit de :

$$P = 10 \ln \left(\frac{0.01}{2.10^{-5}} \right)^2 = 124.29 \text{ dB}$$

De même, les bruits maximums en décibels des endroits des plaques poreuses les moins absorbants sont récapitulés dans le tableau ci-dessous :

Modèle	Matériau	Bruit max (dB)
Modèle porte	Fibre textile	91.74
	Laine de verre	82.34
	Mousse mélamine	78.34
	Mousse polyuréthane	93.85
Modèle plafond	Fibre textile	80.48
	Laine de verre	78.36
	Mousse mélamine	76
	Mousse polyuréthane	89.86
Modèle tableau de bord	Fibre textile	77.93
	Laine de verre	68.53
	Mousse mélamine	66.17
	Mousse polyuréthane	80.04

Tableau 4.21: bruits maximums transmis

4.10. CONCLUSION

Les matériaux poreux étudiés sont des très bons absorbeurs du bruit en hautes fréquences. Chaque matériau possède une fréquence pour laquelle sa qualité absorbante devient optimale, elle est de 3 MHz pour la fibre textile et la mousse polyuréthane, de 6 MHz pour la laine de verre et de 9 MHz pour la mousse mélamine.

Pour les trois modèles, la mousse mélamine est le meilleur matériau absorbant le bruit, la laine de verre vient la deuxième, la fibre textile est troisième et la mousse polyuréthane est la quatrième, Ce qui nous permet de dire que la qualité d'absorption des bruits de ces matériaux, même si elle dépend aussi des conditions aux limites appliquées à la plaque ou le mode de fixation de la plaque contre l'ossature métallique du véhicule, elle est dépendante essentiellement de la nature et les propriétés poreuses du matériau utilisé.

Donc, pour le choix du matériau à mettre dans les portes, le plafond ou le tableau de bord d'un véhicule, il y a d'autres facteurs qu'il faut tenir en compte, à savoir leur prix de revient (rapport : qualité / prix), la résistance qu'offre chaque matériau aux différentes contraintes mécaniques et le rôle qu'il joue en plus d'atténuation des bruits, comme l'isolation thermique par exemple.

CONCLUSION GENERALE

L'objet de la présente étude est de prospecter les performances, en matière d'isolation vibroacoustique, des matériaux utilisés dans les panneaux de carrosserie automobile.

La technique d'isolation passive est la plus utilisée, dans la gamme des hautes fréquences, pour les matériaux à haute qualité d'absorption du bruit comme les matériaux poreux. Ces matériaux, couramment employés, sont généralement des fibreux, des mousses et des laines de verre. Ils dissipent l'énergie acoustique par trois mécanismes particuliers : le premier mécanisme est associé à la vibration du squelette, le second est relié à un transfert d'énergie de l'onde acoustique vers la phase solide et le dernier est rattaché aux effets visqueux.

La technique passive, à base de matériaux poreux, est très robuste, simple à mettre en œuvre et son prix est très réduit, comparée à ses consœurs, la technique active et la technique hybride, qui nécessitent un appareillage lourd et des sources d'énergie auxiliaires. Ces caractéristiques lui accordent, ainsi, une large utilisation dans plusieurs domaines de l'industrie, tels que l'automobile, le bâtiment, l'aéronautique et l'aérospatial.

Les matériaux poreux sont des matériaux très complexes et le calcul analytique de leurs propriétés absorbantes ne peut être mené. Par conséquent, le calcul de la réponse vibroacoustique doit alors passer par des techniques numériques de simulation permettant d'approcher la solution du problème continu par la solution d'un problème discret. Des modèles numériques ont été adoptés en considérant certaines hypothèses comme l'échelle macroscopique, l'élasticité linéaire et le régime harmonique. Le modèle le plus connu et le plus utilisé est le modèle de Biot qui suggère que le milieu poreux peut être vu au niveau macroscopique comme la superposition en temps et en espace de deux milieux continus couplés, un milieu fluide et un milieu solide. Ce modèle a connu des contributions et des améliorations qui sont regroupées et intégrées dans le cadre

de la théorie de Biot par Allard pour former ce qui est maintenant couramment appelé le modèle de Biot-Allard.

Pour calculer l'absorption acoustique des matériaux poreux, nous avons modélisé des plaques en fibre textile, en mousse mélamine, en mousse polyuréthane et en laine de verre en exploitant les capacités du code Ansys. Nous avons adopté la formulation (u, p) de modèle Biot-Allard, qui utilise seulement 04 inconnues par nœuds au lieu de 06 inconnues pour la formulation (u, U) . Les dimensions des plaques modélisées sont les dimensions réelles des plaques fixées respectivement aux portes, au plafond et au tableau de bord d'un véhicule léger. Les plaques ont été excitées par une pression acoustique de 0.01 Pa soit 124 dB, par contre, les conditions aux limites appliquées aux plaques sont très rapprochées des vis de fixation de chaque plaque.

Les résultats obtenus sont très satisfaisants. Il a été constaté sur l'autre face des plaques, des pressions très réduites. Ainsi, la pression acoustique diminue d'avantage en traversant la plaque poreuse grâce aux effets vibratoires du squelette, aux effets visqueux et au transfert d'énergie de l'onde acoustique vers la phase solide.

Pour les performances des divers matériaux utilisés, il a été constaté que la mousse mélamine absorbe plus de bruit, comparativement à la laine de verre, la fibre textile et la mousse polyuréthane respectivement. Cette différence d'absorption est due essentiellement aux propriétés intrinsèques des matériaux et surtout aux dimensions microscopiques des pores.

Les résultats obtenus nous autorisent à dire que l'absorption acoustique de ces matériaux, même si elle dépend aussi des conditions aux limites appliquées aux plaques, reste une propriété liée à la nature du matériau utilisé. En effet, une plaque en mousse mélamine par exemple, avec les conditions aux limites modèle plafond, absorbe mieux qu'avec les conditions aux limites modèle porte ou tableau de bord, mais elle reste toujours meilleure que celle des autres matériaux pour les trois modèles étudiés.

Le choix d'un matériau poreux dans l'industrie automobile dépend non seulement de sa qualité de réduction des bruits mais aussi des autres rôles qu'il joue. Ces matériaux sont souvent utilisés comme isolateurs acoustiques et thermiques simultanément d'une part, et pour le décor d'autre part. En outre, il ne faut pas occulter le côté économique qui peut influencer sur le choix du matériau utilisé. A titre d'exemple, la mousse mélamine absorbe plus de bruit que la mousse polyuréthane. Cependant, le prix d'un panneau en mousse mélamine est de 50% plus cher que celui d'un panneau en mousse polyuréthane.

Bien que cette étude nous ait permis de prospecter les capacités des matériaux permettant d'assurer le confort acoustique à l'intérieur des véhicules, une étude pratique pourrait certainement enrichir l'approche numérique adoptée. L'expérimentation permettra d'élargir l'étude à des familles toutes entières de matériaux et on ne parlera plus, par exemple, d'une laine de verre ou de mousse mélamine mais de la famille de laines de verre et la famille de mousses mélamines.

Nous espérons que cette étude contribuera à ouvrir une voie de recherche dans le domaine des matériaux utilisés en vibroacoustique et sera enrichie par d'autres études en mettant en évidence les autres modèles comme le modèle p qui permet de réduire le nombre d'inconnues à 1 au lieu de 4 inconnues pour le modèle (u, p) adopté dans le cadre de ce travail. L'étude des matériaux à double porosité et les matériaux à porosité de géométrie différente est à envisager également.

BIBLIOGRAPHIE

1. **V.Heloisa** : Les nouveaux matériaux, l'innovation comme un enjeu stratégique pour les constructeurs automobiles, le cas de Renault. Revue scientifique, 12/2001.
2. **F.Lacroix, B.Vincens** : Prévention des risques et nuisances technologiques. Document de cours, université Aix-Marseille II, France, 2005.
3. **L.Jaouen** : Contribution à la caractérisation mécanique des matériaux poro-visco-élastiques en vibroacoustique. Communication, groupe d'acoustique de l'université de Sherbrooke, Canada, 12/2003.
4. **T.Thierry** : Dynamique et vibroacoustique. Rapport de recherche, école polytechnique fédérale de Zurich, 2005.
5. **W.Larbi, J.F.Deü, R.Ohayon** : Modélisation d'interfaces absorbantes en vibroacoustique interne. Publication, laboratoire de mécanique des structures et des systèmes couplés Paris, France, 2006.
6. **O.Doutres** : Caractérisation mécanique de matériaux fibreux en vibroacoustique. Thèse doctorat, école doctorale du Maine, France, 09/2007.
7. **J.Rosa** : Transport noise disturbances and public decision-making. Publication, ENPC-Ceras, Saints-Pères Paris, France, 05/2001.
8. **J.D.Chazot** : Transparence acoustique de doubles parois remplies de matériaux granulaires. Thèse doctorat, institut national des sciences appliquées de Lyon, 2006.
9. Prévention des risques engendrés par le bruit dans l'environnement professionnel. Publication officielle Luxembourg, agence européenne pour la sécurité et la santé au travail, 2006.
10. **E.Goncalvès** : Eléments d'aéroacoustique. Document de cours, institut national polytechnique de Grenoble, 03/2005.
11. **C.Hocquard** : L'industrie automobile, les matériaux légers à l'assaut de l'acier. Revue, édition ecomine, 09/ 2005.

12. D.L.Jeffrey, S.Vipperman : On the noise transmission and control for a cylindrical chamber core composite structure. Publication, journal of sound and vibration, 03/2005.

13. M.O.Tanneau : Modélisation de panneaux d'isolation aéronautiques-couplages poro-élastiques, élastodynamiques et acoustiques par méthodes analytiques, FEM et BEM. Thèse doctorat, université Pierre et Marie Curie, Paris VI, 2004.

14. Le classement sonore des transports terrestres. Article, code de l'environnement, France, 2002.

15. P.André, J.P.Gagné : Atténuation du bruit routier en milieu résidentiel de moyenne et haute densité. Guide méthodologique, école d'orthophonie et d'audiologie Montréal, Canada, 12/2000.

16. A.Morcheoine : Le bruit des transports terrestres. Recueil des recherches, 2007.

17. T.Masano, Rockefeller : World motor sports show. Revue, New-York SPORTS, 2008.

18. G.Lovat, P.Danière, T.Loyau : Vibro-acoustic diagnosis a fundamental stage in machine noise reduction at source. INRS, Nancy, France, 1998.

19. Bruel, Kjaer : Contrôle actif de bruit. Revue, département avionique et systèmes, Toulouse, France.

20. F.Castel : Modélisation numérique de matériaux poreux hétérogènes. Thèse doctorat, université de Sherbrooke, Canada, 2005.

21. J.Faure : Etude de l'influence des paramètres structuraux d'une plaque rayonnante sur la perception. Thèse doctorat, INSA, Lyon, France, 2003.

22. E.Guibert : Etude vibroacoustique et perceptive du bruit rayonné à l'intérieur d'une voiture de train. Communication, laboratoire de mécanique et d'acoustique, Marseille, France, 12/2008.

23. M.A.Trindade : Contrôle hybride actif-passif des vibrations de structures par des matériaux piézo-électriques et viscoélastiques : poutres sandwich / multicouches intelligentes. Thèse doctorat, conservatoire national des arts et métiers, France, 06/2000.

24. O.Hilbrunner : Développement et optimisation d'un système de contrôle actif pour les absorbants acoustiques hybrides. Thèse doctorat, école centrale de Lyon, France, 10/2003.

25. N.Atalla, C.H.Amédin, R.Panneton, F.Sgaed : Etude numérique et expérimentale de l'absorption acoustique et de la transparence acoustique des matériaux poreux. Communication, bibliothèque nationale de Montréal, Canada, 2001.

26. J.Malchaire : Matériaux acoustiques. Document de cours, 2008.

27. E.Guibert : Etude vibroacoustique et perceptive du bruit rayonné à l'intérieur d'une voiture de train à grande vitesse. Thèse doctorat, université Aix-Marseille I, 2008.

28. P.Duysinx : Le système véhicule et ses constituants. Document de cours, université de Liège, 2007.

29. V.Chritin : Des véhicules de transport urbains plus léger et plus silencieux. Revue, école polytechnique fédérale de Lausanne, 06/2006.

30. Vincent : Les matériaux composites dans l'industrie automobile. Revue Renault, 2002.

31. Glossaire des matériaux composites. Revue, centre d'animation régional en matériaux avancés, France, 2006.

32. O.Coussy : Mécanique des milieux poreux. Livre, édition Wiley, 1995.

33. www.chenevotte.com

34. C.Delisée, D.Jeulin, F.Michaud : Caractérisation morphologique et porosité en 3D de matériaux fibreux cellulosiques. Publication, université de Bordeaux, France, 2000.

35. www.eurima.org

36. **M.A.Biot** : Theory of elasticity and consolidation for a porous anisotropic solid. Publication, journal physical society of America, 1955.

37. **V.Tarnow** : Measurements of anisotropic sound propagation in glass wool. Publication, Journal acoustical society of America, 2000.

38. **V.Tarnow** : Dynamic measurements of the elastic constants of glass wool. Publication, Journal acoustical society of America, 2005.

39. **M.Deverge** : Propriétés mécaniques et rhéologiques des mousses de polymères réticulés. Thèse doctorat, école doctorale du Maine-Le-Mans, France, 12/2006.

40. **B.H.Lecocq** : Contribution à l'étude du comportement acoustique de matériaux présentant des cavités débouchantes. Thèse doctorat, école doctorale sciences des métiers de l'ingénieur, Paris, 12/2006.

41. **P.Leroy** : Les mousses adaptatives pour l'amélioration de l'absorption acoustique, modélisation, mise en oeuvre, mécanismes de contrôle. Thèse doctorat, école doctorale Marseille I, 11/2008.

42. www.RT60.net

43. www.audioland.fr

44. **M.Melon, al., E.Mariez, C.Ayrault, S.Sahraoui** : Acoustical and mechanical characterization of anisotropic open-cell foams. Publication, Journal acoustical society of America, 11/1998.

45. **L.Jaouen** : Contribution à la caractérisation mécanique de matériaux poro-visco-élastiques en vibroacoustique. Thèse doctorat, université de Sherbrooke Québec, Canada, 2003.

46. **O.Tanneau, P.Lamary, S.Lemoyne, Y.Chevalier** : Modélisation de parois absorbantes incluant des matériaux poroélastique. Communication, groupe vibroacoustique Saint Ouen, France, 09/2003.

47. M.R.Arab, E.Semma, N.Calve, B.Pateyron, M. El ganaoui : Caractérisation physique des matériaux poreux par une méthode de type Boltzmann sur réseau. Publication, laboratoire de mécanique, FST de Settat, Maroc.

48. P.D.Man : Le contrôle actif du bruit. Thèse doctorat, université libre de Bruxelles, 06/2004.

49. N.Sellen : Modification de l'impédance de surface d'un matériau par contrôle actif, application à la caractérisation et à l'optimisation d'un absorbant acoustique. Thèse doctorat, école centrale de Lyon, 09/2003.

50. C.Florens, E.Balmès, F.Cléro : Effet local d'une pastille piézoélectrique sur une poutre en nid d'abeille, comparaison calcul/essais. Publication, école centrale de Paris, 2006.

51. E.Friot : Limites et outils d'optimisation du contrôle acoustique actif. Publication, laboratoire de mécanique et d'acoustique Aix-Marseille II, 11/2007.

52. P.Crausse, J.P.Laurent, B.Perrin : Influence des phénomènes d'hystérésis sur les propriétés hydriques de matériaux poreux. Cahier scientifique, institut de mécanique des fluides Toulouse, France, 1996.

53. A.Faiz : Amortissement vibratoire et anéchoïsme par traitement non-linéaire d'éléments piézoélectriques. Thèse doctorat, institut national des sciences appliquées de Lyon, 05/2006.

54. S.Belouettar, H.Hu, E.Daya : Modélisation numérique des structures sandwichs viscoélastiques. Revue technique, centre de recherche publique Henri Tudor, Luxembourg, 3/2004.

55. M.A.Biot : General theory of three-dimensional consolidation. Publication, Journal physical society of America, 1941.

56. O.Bareille : Approche ondulatoire sélective en vibroacoustique large bande. Thèse doctorat, école doctorale de mécanique de Lyon, 09/2005.

57. N.E.Hogrlin, M.Nordstrom, P.Gogransson : A 3-d hierarchical formulation of Biot's equations for elasto-acoustic modelling of porous media. Publication, journal of sound and vibration, 2001.

58. B.Naitali : Elaboration, caractérisation et modélisation de matériaux poreux, influence de la structure poreuse sur la conductivité thermique effective. Thèse doctorat, université de Limoges, 09/2005.

59. G.Kergourlay : Mesure et prédiction vibroacoustique de structures viscoélastiques. Thèse doctorat, école centrale de Paris, 03/2004.

60. L.Dormieux, E.Lemarchand, J.Sanahuja : Comportement macroscopique des matériaux poreux à microstructure en feuillets. Communication, journal de mécanique, 03/2006.

61. O.Dazel : Synthèse modale pour les matériaux poreux. Thèse doctorat, institut national des sciences appliquées de Lyon, France, 12/2003.

62. G.R.Liu, S.S.Quek : The finite element method, a practical course. Livre, Butterworth-Heinemann edition, 2003.

63. Finite element formulation of poro-elasticity suitable for large deformation dynamic analysis. Report of stage, Stamford university, 02/2005.

64. M.A.Biot : General solutions of the equations of elasticity and consolidation for a porous material. Publication, journal physical of society of America, 1956.

65. M.A.Biot : Theory of propagation of elastic waves in a fluid-saturated porous solid high frequency range. Publication, journal acoustical society of America, 1956.

66. M.A.Biot : Theory of propagation of elastic waves in a fluid-saturated porous solid low frequency range. Publication, journal acoustical society of America, 1956.

67. T.Plona : Observation of a second bulk compressional wave in a porous medium at ultrasonic frequencies. Publication, journal physical society of America, 1980.

68. C.Depollier, J.F.Allard, W.Lauriks : Biot theory and stress-strain equations in porous sound absorbing materials. Publication, journal acoustical society of America, 1988.

69. J.Auriault : Dynamic behaviour of a porous medium saturated by a newtonian fluid. Publication, journal of mechanics, 1980.

70. J.Auriault : Etude du comportement macroscopique d'un milieu poreux saturé déformable. Publication, journal de mécanique, 1977.

71. R.Burridge, J.Keller : Poroelasticity equations derived from microstructure. Journal acoustical society of America, 1981.

72. D.L.Johnson, J.Koplik, R.Dashen : Theory of dynamic permeability and tortuosity in fluid-saturated porous media. Publication, journal of mechanics of fluids, 1987.

73. C.Zwikker, C.Kosten : Sound absorbing materials. Revue scientifique, New York, 1949.

74. Y.Champoux, J.F.Allard : Dynamic tortuosity and bulk modulus in air-saturated porous media. Publication, journal of physics, 1991.

75. D.Lafarge, P.Lemarinier, J.Allard, V.Tarnow : Dynamic compressibility of air in porous structures at audible frequencies. Publication, journal acoustical society of America, 1997.

76. J.F.Allard : Modèles récents pour la propagation du son dans les matériaux poreux. Publication, journal de physique, 05/1994.

77. S.Vincent-Bonnieu : Multiscale simulation and modelling of 2D foam rheology. Doctorat thesis, Marne-La-Vallée university, 09/2006

78. I.Terrasse, T.Abboud : Modélisation des phénomènes de propagation d'ondes. Document de cours, science de l'ingénieur de l'école polytechnique, Paris, 2007.

79. N.C.Hilyard, A.Cunningham : Low density cellular plastics, physical basis of behaviour. Livre, Chapman and Hall edition, 1994.

80. O.Doutres, N.Dauchez, J.M.Génevaux : Caractérisation des matériaux poreux par l'étude du rayonnement d'une plaque traitée acoustiquement. Publication, laboratoire de l'acoustique Le-Mans, France, 09/2005.

81. F.A.Grondin : Modélisation multi-échelles du comportement thermo-hydro-mécanique des matériaux hétérogènes applications aux matériaux cimentaires sous sollicitations sévères. Thèse doctorat, université Paris VI, 2005.

82. Free field technologies acoustic design solutions, www.fft.be.

83. N.Atalla, M.A.Hamdi, R.Panneton : Enhanced weak integral formulation for the mixed (u, p) poroelastic equations. Publication, journal acoustical society of America, 2001.

84. P.Debergue, R.Panneton, N.Atalla : Boundary conditions for the weak formulation of the mixed (u, p) proelasticity problem. Publication, journal acoustical society of America, 1999.

85. N.Atalla : The vibroacoustic response of a cylindrical shell structure with viscoelastic and poroelastic materials. Publication, journal of sound and vibration, Sherbrooke university, Québec, Canada, 10/1998.

86. N.Atalla, R.Panneton, P.Debergue : A mixed displacement-pressure formulation for poroelastic materials. Publication, journal acoustical society of America, 1998.

87. N.Atalla, F.C. Sgard, X. Olny, R. Panneton : Acoustic absorption of macro-perforated porous materials. Publication, journal of sound and vibration, 2000.

88. V.Decouvreux, P.Ladeveze : Updating 3D acoustic models with the constitutive relation error method, A two-stage approach for absorbing material characterization. Communication, journal of sound and vibration, 09/2007.

89. J.François : Modèle de représentation du bruit habitacle automobile prenant en compte les phénomènes de masquage. Rapport de stage master, SCIABICA PSA Peugeot Citroën, 08/2007.

90. M.C.Bézat : Perception des bruits d'impact application au bruit de fermeture de porte automobile. Thèse doctorat, laboratoire de mécanique et d'acoustique Aix-Marseille I, 12/2007.

91. P.Leclaire : Caractérisation physique de matériaux poreux pour l'étude des interactions acoustique/structure. Communication, université Paris VII, 03/2006.

92. Q.H.Tran, M.Ouissel, N.Bouhaddi : Sous-structuration en vibroacoustique par une formulation en potentiel de déplacement. Publication, laboratoire de mécanique appliquée R.Chaléat Besançon, 05/2007.

93. J.T.Chena, I.L.Chenb, Y.T.Leea : The boundary point method for the calculation of exterior acoustic radiation problem. Communication, journal of sound and vibration, 09/2007.

94. M.Jean : Mécanique et génie des matériaux acoustiques. Revue, France, 1996.

95. Y.Nakasone, S.Yoshimoto : Engineering analysis with Ansys software. Document de cours, department of engineering and mechanics Tokyo, Japon.

ANNEXE

Annexe A

3 KHz	600 KHz	1 MHz	3 MHz
396 0.16736E-03	396 0.18778E-03	396 0.80595E-03	396 0.17804E-43
398 0.80075E-03	398 0.76310E-03	398 0.63884E-03	398 0.34450E-43
400 0.17851E-03	400 0.23106E-03	400 0.89467E-04	400 0.21008E-43
401 0.56370E-03	401 0.58701E-03	401 0.90719E-03	401 0.16405E-43
402 0.64954E-03	402 0.69557E-03	402 0.38915E-03	402 0.13047E-03
403 0.10339E-02	403 0.99368E-03	403 0.89945E-03	403 0.22229E-43
405 0.59679E-03	405 0.59561E-03	405 0.43541E-03	405 0.18101E-43
407 0.12113E-03	407 0.14216E-03	407 0.32601E-03	407 0.30515E-43
417 0.42026E-03	417 0.39783E-03	417 0.56575E-03	417 0.34160E-03
425 0.35853E-03	425 0.33814E-03	425 0.56764E-03	425 0.72386E-41
427 0.59403E-03	427 0.59026E-03	427 0.86222E-03	427 0.50774E-41
429 0.98627E-05	429 0.17021E-04	429 0.63004E-04	429 0.25252E-41
431 0.34957E-03	431 0.36599E-03	431 0.52229E-03	431 0.24160E-43
434 0.63189E-04	434 0.62810E-04	434 0.25231E-03	434 0.24249E-43
435 0.88130E-03	435 0.87185E-03	435 0.81233E-03	435 0.16404E-03
439 0.61157E-03	439 0.57426E-03	439 0.56153E-03	439 0.15996E-03
452 0.19648E-02	452 0.20308E-02	452 0.30437E-02	452 0.14321E-02
455 0.12733E-02	455 0.12835E-02	455 0.20514E-02	455 0.12495E-02
460 0.58784E-03	460 0.63703E-03	460 0.97828E-03	460 0.38913E-03
467 0.84415E-03	467 0.85954E-03	467 0.21254E-02	467 0.25883E-41
469 0.28530E-03	469 0.28669E-03	469 0.84924E-03	469 0.14732E-41
471 0.29566E-03	471 0.29131E-03	471 0.12451E-02	471 0.15503E-42
473 0.60446E-03	473 0.64681E-03	473 0.97776E-03	473 0.11974E-43
474 0.37809E-03	474 0.38970E-03	474 0.15327E-03	474 0.33651E-03
476 0.36283E-03	476 0.37365E-03	476 0.28404E-03	476 0.14457E-43
477 0.68356E-03	477 0.66029E-03	477 0.76172E-03	477 0.44478E-03
482 0.33893E-03	482 0.43559E-03	482 0.11044E-02	482 0.19239E-03
484 0.69325E-03	484 0.78001E-03	484 0.66728E-03	484 0.43152E-03
485 0.40826E-03	485 0.48406E-03	485 0.83683E-03	485 0.42659E-03
490 0.71917E-03	490 0.70506E-03	490 0.45634E-03	490 0.21627E-03
494 0.13487E-02	494 0.14883E-02	494 0.21355E-02	494 0.18483E-03
495 0.28970E-03	495 0.29055E-03	495 0.46450E-03	495 0.19170E-43
497 0.48662E-03	497 0.54380E-03	497 0.23077E-03	497 0.63996E-44
498 0.50609E-03	498 0.45512E-03	498 0.62100E-03	498 0.52488E-44
500 0.92273E-03	500 0.93397E-03	500 0.18547E-02	500 0.75974E-44
502 0.26882E-03	502 0.26279E-03	502 0.51695E-03	502 0.19234E-43
503 0.49822E-03	503 0.51976E-03	503 0.17562E-03	503 0.28674E-03
504 0.39911E-03	504 0.40505E-03	504 0.60580E-03	504 0.21959E-43
508 0.37959E-03	508 0.52894E-03	508 0.11125E-02	508 0.11402E-03
509 0.87692E-03	509 0.84076E-03	509 0.55985E-03	509 0.98893E-44
510 0.11927E-02	510 0.12688E-02	510 0.16138E-02	510 0.10161E-02
511 0.25881E-03	511 0.31451E-03	511 0.39331E-03	511 0.69131E-44
512 0.50092E-03	512 0.57832E-03	512 0.55905E-03	512 0.97145E-45
517 0.37536E-03	517 0.37492E-03	517 0.13059E-03	517 0.20073E-03
522 0.18089E-02	522 0.19266E-02	522 0.33959E-02	522 0.10634E-02
524 0.13235E-02	524 0.14252E-02	524 0.15115E-02	524 0.54254E-04
528 0.43333E-04	528 0.24366E-04	528 0.18526E-03	528 0.28574E-43

529	0.93560E-03	529	0.90191E-03	529	0.22328E-03	529	0.49076E-03
530	0.53483E-04	530	0.87415E-04	530	0.93354E-07	530	0.19289E-43
532	0.37886E-03	532	0.40487E-03	532	0.16823E-03	532	0.16423E-43
533	0.74515E-03	533	0.78513E-03	533	0.85783E-03	533	0.20341E-04
537	0.11370E-02	537	0.11798E-02	537	0.23341E-03	537	0.14436E-43
538	0.44713E-03	538	0.53338E-03	538	0.84804E-03	538	0.27334E-03
539	0.90593E-03	539	0.93122E-03	539	0.17492E-02	539	0.12566E-43
540	0.89145E-04	540	0.14599E-03	540	0.16876E-04	540	0.13634E-43
542	0.30698E-03	542	0.35513E-03	542	0.13897E-02	542	0.10672E-04
543	0.11440E-02	543	0.10923E-02	543	0.97332E-03	543	0.81347E-03
546	0.66687E-03	546	0.66365E-03	546	0.50056E-03	546	0.55481E-03
554	0.76901E-03	554	0.64021E-03	554	0.27761E-03	554	0.46676E-03
556	0.32581E-03	556	0.38731E-03	556	0.51205E-03	556	0.21971E-43
557	0.35884E-03	557	0.37149E-03	557	0.91067E-03	557	0.88675E-04
558	0.64004E-03	558	0.61058E-03	558	0.15572E-03	558	0.15834E-43
559	0.60149E-03	559	0.57814E-03	559	0.31129E-03	559	0.10186E-04
560	0.42403E-03	560	0.47135E-03	560	0.39055E-03	560	0.21963E-43

Annexe B

3 KHz		600 KHz		1 MHz		3 MHz	
396	0.10460E-03	396	0.10877E-03	396	0.95565E-04	396	0.10141E-02
398	0.50047E-03	398	0.48907E-03	398	0.47604E-03	398	0.11587E-02
400	0.11157E-03	400	0.10557E-03	400	0.93878E-04	400	0.48366E-03
401	0.35232E-03	401	0.34091E-03	401	0.32050E-03	401	0.24086E-03
402	0.40596E-03	402	0.40348E-03	402	0.37252E-03	402	0.17673E-03
403	0.64618E-03	403	0.63180E-03	403	0.59264E-03	403	0.38025E-03
405	0.37299E-03	405	0.36404E-03	405	0.35618E-03	405	0.20870E-03
407	0.75709E-04	407	0.70255E-04	407	0.76163E-04	407	0.32530E-03
417	0.26266E-03	417	0.24973E-03	417	0.24255E-03	417	0.18178E-02
425	0.22408E-03	425	0.22911E-03	425	0.21483E-03	425	0.28424E-02
427	0.37127E-03	427	0.37124E-03	427	0.37517E-03	427	0.25585E-02
429	0.61643E-05	429	0.21553E-05	429	0.80396E-05	429	0.24019E-02
431	0.21848E-03	431	0.22044E-03	431	0.21409E-03	431	0.23307E-02
434	0.39493E-04	434	0.39189E-04	434	0.53898E-04	434	0.11873E-02
435	0.55081E-03	435	0.53816E-03	435	0.55872E-03	435	0.83123E-03
439	0.38223E-03	439	0.37943E-03	439	0.33945E-03	439	0.15401E-02
452	0.12280E-02	452	0.12185E-02	452	0.12475E-02	452	0.12082E-02
455	0.79581E-03	455	0.78958E-03	455	0.77717E-03	455	0.82041E-03
460	0.36740E-03	460	0.36832E-03	460	0.36929E-03	460	0.74123E-03
467	0.52759E-03	467	0.52786E-03	467	0.54602E-03	467	0.20610E-04
469	0.17832E-03	469	0.17193E-03	469	0.16584E-03	469	0.25789E-02
471	0.18479E-03	471	0.17353E-03	471	0.17836E-03	471	0.28441E-02
473	0.37779E-03	473	0.37103E-03	473	0.38084E-03	473	0.15673E-02
474	0.23631E-03	474	0.24056E-03	474	0.24250E-03	474	0.20280E-02
476	0.22677E-03	476	0.22613E-03	476	0.23511E-03	476	0.28678E-03
477	0.42722E-03	477	0.42171E-03	477	0.42701E-03	477	0.47477E-03
482	0.21183E-03	482	0.21047E-03	482	0.25678E-03	482	0.28671E-02
484	0.43328E-03	484	0.42690E-03	484	0.45773E-03	484	0.19565E-02
485	0.25516E-03	485	0.25268E-03	485	0.27021E-03	485	0.15593E-02
490	0.44948E-03	490	0.44745E-03	490	0.44027E-03	490	0.34371E-03
494	0.84295E-03	494	0.83606E-03	494	0.88243E-03	494	0.99777E-03

495 0.18106E-03	495 0.18146E-03	495 0.16827E-03	495 0.32620E-02
497 0.30414E-03	497 0.30458E-03	497 0.32059E-03	497 0.26056E-02
498 0.31631E-03	498 0.31315E-03	498 0.30201E-03	498 0.22470E-02
500 0.57671E-03	500 0.57466E-03	500 0.58007E-03	500 0.18304E-02
502 0.16801E-03	502 0.16479E-03	502 0.16518E-03	502 0.10553E-02
503 0.31139E-03	503 0.30606E-03	503 0.30476E-03	503 0.59412E-03
504 0.24944E-03	504 0.25451E-03	504 0.23422E-03	504 0.58431E-03
508 0.23724E-03	508 0.23026E-03	508 0.28611E-03	508 0.72243E-03
509 0.54807E-03	509 0.54936E-03	509 0.52542E-03	509 0.19028E-02
510 0.74542E-03	510 0.73313E-03	510 0.75730E-03	510 0.77707E-03
511 0.16176E-03	511 0.16353E-03	511 0.18460E-03	511 0.17898E-02
512 0.31308E-03	512 0.30484E-03	512 0.34051E-03	512 0.15370E-02
517 0.23460E-03	517 0.23304E-03	517 0.22762E-03	517 0.37992E-03
522 0.11306E-02	522 0.11289E-02	522 0.11447E-02	522 0.12056E-02
524 0.82717E-03	524 0.81810E-03	524 0.85536E-03	524 0.39276E-03
528 0.27083E-04	528 0.16879E-04	528 0.18715E-04	528 0.45203E-03
529 0.58475E-03	529 0.58326E-03	529 0.55863E-03	529 0.17977E-02
530 0.33427E-04	530 0.33521E-04	530 0.43685E-04	530 0.46873E-03
532 0.23679E-03	532 0.23236E-03	532 0.23227E-03	532 0.42036E-03
533 0.46572E-03	533 0.46747E-03	533 0.46046E-03	533 0.45302E-03
537 0.71061E-03	537 0.70740E-03	537 0.73545E-03	537 0.17986E-02
538 0.27946E-03	538 0.27665E-03	538 0.30068E-03	538 0.71751E-03
539 0.56621E-03	539 0.55807E-03	539 0.57096E-03	539 0.30168E-03
540 0.55716E-04	540 0.59759E-04	540 0.90344E-04	540 0.91301E-03
542 0.19186E-03	542 0.19358E-03	542 0.21076E-03	542 0.70817E-03
543 0.71503E-03	543 0.70475E-03	543 0.67261E-03	543 0.36300E-03
546 0.41679E-03	546 0.41542E-03	546 0.41547E-03	546 0.49363E-03
554 0.48063E-03	554 0.46330E-03	554 0.42974E-03	554 0.21551E-02
556 0.20363E-03	556 0.20425E-03	556 0.23082E-03	556 0.18127E-03
557 0.22428E-03	557 0.21918E-03	557 0.23392E-03	557 0.40389E-03
558 0.40002E-03	558 0.39834E-03	558 0.36175E-03	558 0.12000E-02
559 0.37593E-03	559 0.37626E-03	559 0.36719E-03	559 0.14711E-02
560 0.26502E-03	560 0.26355E-03	560 0.27721E-03	560 0.28962E-04

Annexe C

F = 6 MHz	
396 0.20724E-43	497 0.74492E-44
398 0.40101E-43	498 0.61097E-44
400 0.24453E-43	500 0.88434E-44
401 0.19096E-43	502 0.22388E-43
402 0.81545E-04	503 0.17921E-03
403 0.25875E-43	504 0.25561E-43
405 0.21069E-43	508 0.71261E-04
407 0.35520E-43	509 0.11511E-43
417 0.21350E-03	510 0.63506E-03
425 0.84258E-41	511 0.80470E-44
427 0.59102E-41	512 0.11308E-44
429 0.29394E-41	517 0.12546E-03
431 0.28122E-43	522 0.66462E-03
434 0.28226E-43	524 0.33909E-04

435	0.10252E-03	528	0.33260E-43
439	0.99976E-04	529	0.30673E-03
452	0.89504E-03	530	0.22453E-43
455	0.78093E-03	532	0.19117E-43
460	0.24320E-03	533	0.12713E-04
467	0.30128E-41	537	0.16804E-43
469	0.17148E-41	538	0.17084E-03
471	0.18046E-42	539	0.14627E-43
473	0.13937E-43	540	0.15870E-43
474	0.21032E-03	542	0.66700E-05
476	0.16828E-43	543	0.50842E-03
477	0.27799E-03	546	0.34676E-03
482	0.12024E-03	554	0.29173E-03
484	0.26970E-03	556	0.25575E-43
485	0.26662E-03	557	0.55422E-04
490	0.13517E-03	558	0.18431E-43
494	0.11552E-03	559	0.63664E-05
495	0.22314E-43	560	0.25566E-43

Annexe D

3 KHz	600 KHz	1 MHz	3 MHz				
396	0.92977E-04	396	0.92976E-04	396	0.96688E-04	396	0.44775E-03
398	0.44486E-03	398	0.44486E-03	398	0.43473E-03	398	0.35491E-03
400	0.99172E-04	400	0.99171E-04	400	0.93838E-04	400	0.49704E-04
401	0.31317E-03	401	0.31317E-03	401	0.30303E-03	401	0.50399E-03
402	0.36086E-03	402	0.36086E-03	402	0.35865E-03	402	0.21619E-03
403	0.57439E-03	403	0.57439E-03	403	0.56160E-03	403	0.49969E-03
405	0.33155E-03	405	0.33155E-03	405	0.32359E-03	405	0.24190E-03
407	0.67297E-04	407	0.67297E-04	407	0.62449E-04	407	0.18112E-03
417	0.23348E-03	417	0.23348E-03	417	0.22199E-03	417	0.31431E-03
425	0.19918E-03	425	0.19918E-03	425	0.20365E-03	425	0.31535E-03
427	0.33002E-03	427	0.33002E-03	427	0.32999E-03	427	0.47901E-03
429	0.54773E-05	429	0.54794E-05	429	0.19158E-05	429	0.35002E-04
431	0.19421E-03	431	0.19421E-03	431	0.19595E-03	431	0.29016E-03
434	0.35106E-04	434	0.35105E-04	434	0.34835E-04	434	0.14017E-03
435	0.48961E-03	435	0.48961E-03	435	0.47836E-03	435	0.45129E-03
439	0.33976E-03	439	0.33976E-03	439	0.33728E-03	439	0.31196E-03
455	0.70739E-03	455	0.70738E-03	455	0.70185E-03	455	0.11397E-02
460	0.32658E-03	460	0.32658E-03	460	0.32740E-03	460	0.54349E-03
467	0.46897E-03	467	0.46897E-03	467	0.46921E-03	467	0.11808E-02
469	0.15850E-03	469	0.15850E-03	469	0.15282E-03	469	0.47180E-03
471	0.16426E-03	471	0.16425E-03	471	0.15425E-03	471	0.69173E-03
473	0.33581E-03	473	0.33581E-03	473	0.32981E-03	473	0.54320E-03
474	0.21006E-03	474	0.21005E-03	474	0.21383E-03	474	0.85150E-04
476	0.20157E-03	476	0.20157E-03	476	0.20100E-03	476	0.15780E-03
477	0.37975E-03	477	0.37975E-03	477	0.37485E-03	477	0.42318E-03
482	0.18830E-03	482	0.18830E-03	482	0.18708E-03	482	0.61357E-03
484	0.38514E-03	484	0.38514E-03	484	0.37947E-03	484	0.37071E-03
485	0.22681E-03	485	0.22681E-03	485	0.22460E-03	485	0.46491E-03
490	0.39954E-03	490	0.39954E-03	490	0.39774E-03	490	0.25352E-03

494 0.74929E-03	494 0.74929E-03	494 0.74317E-03	494 0.11864E-02
495 0.16094E-03	495 0.16094E-03	495 0.16130E-03	495 0.25806E-03
497 0.27035E-03	497 0.27035E-03	497 0.27074E-03	497 0.12821E-03
498 0.28116E-03	498 0.28116E-03	498 0.27836E-03	498 0.34500E-03
500 0.51264E-03	500 0.51263E-03	500 0.51081E-03	500 0.10304E-02
502 0.14935E-03	502 0.14934E-03	502 0.14648E-03	502 0.28720E-03
503 0.27679E-03	503 0.27679E-03	503 0.27205E-03	503 0.97568E-04
504 0.22173E-03	504 0.22172E-03	504 0.22624E-03	504 0.33656E-03
508 0.21089E-03	508 0.21088E-03	508 0.20467E-03	508 0.61803E-03
509 0.48718E-03	509 0.48718E-03	509 0.48832E-03	509 0.31103E-03
510 0.66260E-03	510 0.66260E-03	510 0.65167E-03	510 0.89654E-03
511 0.14379E-03	511 0.14378E-03	511 0.14536E-03	511 0.21851E-03
512 0.27829E-03	512 0.27829E-03	512 0.27097E-03	512 0.31058E-03
517 0.20853E-03	517 0.20853E-03	517 0.20715E-03	517 0.72553E-04
522 0.10050E-02	522 0.10049E-02	522 0.10035E-02	522 0.18866E-02
524 0.73527E-03	524 0.73526E-03	524 0.72720E-03	524 0.83971E-03
528 0.24073E-04	528 0.24074E-04	528 0.15004E-04	528 0.10292E-03
529 0.51977E-03	529 0.51978E-03	529 0.51845E-03	529 0.12404E-03
530 0.29715E-04	530 0.29713E-04	530 0.29796E-04	530 0.51864E-07
532 0.21048E-03	532 0.21048E-03	532 0.20654E-03	532 0.93460E-04
533 0.41397E-03	533 0.41397E-03	533 0.41553E-03	533 0.47657E-03
537 0.63165E-03	537 0.63165E-03	537 0.62880E-03	537 0.12967E-03
538 0.24841E-03	538 0.24841E-03	538 0.24592E-03	538 0.47113E-03
539 0.50330E-03	539 0.50330E-03	539 0.49606E-03	539 0.97178E-03
540 0.49525E-04	540 0.49525E-04	540 0.53119E-04	540 0.93754E-05
542 0.17055E-03	542 0.17055E-03	542 0.17207E-03	542 0.77203E-03
543 0.63558E-03	543 0.63558E-03	543 0.62644E-03	543 0.54073E-03
546 0.37048E-03	546 0.37048E-03	546 0.36926E-03	546 0.27809E-03
554 0.42722E-03	554 0.42723E-03	554 0.41182E-03	554 0.15423E-03
556 0.18100E-03	556 0.18100E-03	556 0.18156E-03	556 0.28447E-03
557 0.19936E-03	557 0.19936E-03	557 0.19483E-03	557 0.50593E-03
558 0.35558E-03	558 0.35558E-03	558 0.35408E-03	558 0.86511E-04
559 0.33416E-03	559 0.33416E-03	559 0.33445E-03	559 0.17294E-03
560 0.23557E-03	560 0.23557E-03	560 0.23427E-03	560 0.21697E-03

Annexe E

F = 9 MHz	
396 0.19089E-43	497 0.68616E-44
398 0.36937E-43	498 0.56277E-44
400 0.22524E-43	500 0.81458E-44
401 0.17589E-43	502 0.20622E-43
402 0.72484E-04	503 0.15930E-03
403 0.23834E-43	504 0.23544E-43
405 0.19407E-43	508 0.63343E-04
407 0.32718E-43	509 0.10603E-43
417 0.18978E-03	510 0.56450E-03
425 0.77611E-41	511 0.74122E-44
427 0.54440E-41	512 0.10416E-44
429 0.27075E-41	517 0.11152E-03
431 0.25904E-43	522 0.59078E-03

434	0.25999E-43	524	0.30141E-04
435	0.91132E-04	528	0.30636E-43
439	0.88867E-04	529	0.27265E-03
452	0.79559E-03	530	0.20682E-43
455	0.69416E-03	532	0.17609E-43
460	0.21618E-03	533	0.11301E-04
467	0.27751E-41	537	0.15478E-43
469	0.15795E-41	538	0.15185E-03
471	0.16622E-42	539	0.13473E-43
473	0.12838E-43	540	0.14618E-43
474	0.18695E-03	542	0.59289E-05
476	0.15501E-43	543	0.45193E-03
477	0.24710E-03	546	0.30823E-03
482	0.10688E-03	554	0.25931E-03
484	0.23973E-03	556	0.23557E-43
485	0.23699E-03	557	0.49264E-04
490	0.12015E-03	558	0.16977E-43
494	0.10268E-03	559	0.56590E-05
495	0.20553E-43	560	0.23549E-43

Annexe F

3 KHz	600 KHz	1 MHz	3 MHz				
396	0.18595E-03	396	0.20865E-03	396	0.89550E-03	396	0.16475E-43
398	0.88972E-03	398	0.84789E-03	398	0.70982E-03	398	0.31879E-43
400	0.19834E-03	400	0.25673E-03	400	0.99408E-04	400	0.19440E-43
401	0.62634E-03	401	0.65224E-03	401	0.10080E-02	401	0.15180E-43
402	0.72171E-03	402	0.77286E-03	402	0.43239E-03	402	0.14497E-03
403	0.11488E-02	403	0.11041E-02	403	0.99939E-03	403	0.20570E-43
405	0.66310E-03	405	0.66178E-03	405	0.48379E-03	405	0.16749E-43
407	0.13459E-03	407	0.15796E-03	407	0.36223E-03	407	0.28237E-43
417	0.46696E-03	417	0.44203E-03	417	0.62861E-03	417	0.37955E-03
425	0.39836E-03	425	0.37571E-03	425	0.63071E-03	425	0.66982E-41
427	0.66004E-03	427	0.65585E-03	427	0.95803E-03	427	0.46984E-41
429	0.10958E-04	429	0.18912E-04	429	0.70005E-04	429	0.23367E-41
431	0.38841E-03	431	0.40666E-03	431	0.58032E-03	431	0.22356E-43
434	0.70210E-04	434	0.69789E-04	434	0.28035E-03	434	0.22438E-43
435	0.97922E-03	435	0.96872E-03	435	0.90258E-03	435	0.18226E-03
439	0.67952E-03	439	0.63807E-03	439	0.62392E-03	439	0.17773E-03
452	0.21832E-02	452	0.22565E-02	452	0.33819E-02	452	0.15912E-02
455	0.14148E-02	455	0.14261E-02	455	0.22794E-02	455	0.13883E-02
460	0.65315E-03	460	0.70781E-03	460	0.10870E-02	460	0.43236E-03
467	0.93794E-03	467	0.95504E-03	467	0.23615E-02	467	0.23951E-41
469	0.31700E-03	469	0.31854E-03	469	0.94360E-03	469	0.13632E-41
471	0.32851E-03	471	0.32368E-03	471	0.13835E-02	471	0.14346E-42
473	0.67162E-03	473	0.71868E-03	473	0.10864E-02	473	0.11080E-43
474	0.42011E-03	474	0.43299E-03	474	0.17030E-03	474	0.37390E-03
476	0.40314E-03	476	0.41517E-03	476	0.31560E-03	476	0.13378E-43
477	0.75951E-03	477	0.73366E-03	477	0.84636E-03	477	0.49420E-03
482	0.37659E-03	482	0.48399E-03	482	0.12271E-02	482	0.21377E-03
484	0.77028E-03	484	0.86667E-03	484	0.74142E-03	484	0.47946E-03
485	0.45362E-03	485	0.53784E-03	485	0.92981E-03	485	0.47398E-03
490	0.79907E-03	490	0.78340E-03	490	0.50705E-03	490	0.24030E-03

494	0.14986E-02	494	0.16537E-02	494	0.23728E-02	494	0.20536E-03
495	0.32189E-03	495	0.32283E-03	495	0.51611E-03	495	0.17739E-43
497	0.54069E-03	497	0.60422E-03	497	0.25641E-03	497	0.59219E-44
498	0.56232E-03	498	0.50569E-03	498	0.69000E-03	498	0.48570E-44
500	0.10253E-02	500	0.10377E-02	500	0.20607E-02	500	0.70302E-44
502	0.29869E-03	502	0.29199E-03	502	0.57439E-03	502	0.17798E-43
503	0.55358E-03	503	0.57752E-03	503	0.19514E-03	503	0.31860E-03
504	0.44345E-03	504	0.45005E-03	504	0.67311E-03	504	0.20320E-43
508	0.42177E-03	508	0.58771E-03	508	0.12361E-02	508	0.12669E-03
509	0.97435E-03	509	0.93418E-03	509	0.62206E-03	509	0.91511E-44
510	0.13252E-02	510	0.14097E-02	510	0.17931E-02	510	0.11290E-02
511	0.28757E-03	511	0.34946E-03	511	0.43702E-03	511	0.63971E-44
512	0.55658E-03	512	0.64258E-03	512	0.62116E-03	512	0.89893E-45
517	0.41706E-03	517	0.41658E-03	517	0.14511E-03	517	0.22304E-03
522	0.20099E-02	522	0.21407E-02	522	0.37733E-02	522	0.11816E-02
524	0.14705E-02	524	0.15836E-02	524	0.16794E-02	524	0.60282E-04
528	0.48148E-04	528	0.27073E-04	528	0.20584E-03	528	0.26441E-43
529	0.10396E-02	529	0.10021E-02	529	0.24808E-03	529	0.54529E-03
530	0.59426E-04	530	0.97128E-04	530	0.10373E-06	530	0.17849E-43
532	0.42096E-03	532	0.44985E-03	532	0.18692E-03	532	0.15197E-43
533	0.82794E-03	533	0.87236E-03	533	0.95314E-03	533	0.22601E-04
537	0.12633E-02	537	0.13108E-02	537	0.25934E-03	537	0.13358E-43
538	0.49681E-03	538	0.59264E-03	538	0.94227E-03	538	0.30371E-03
539	0.10066E-02	539	0.10347E-02	539	0.19436E-02	539	0.11628E-43
540	0.99050E-04	540	0.16221E-03	540	0.18751E-04	540	0.12616E-43
542	0.34109E-03	542	0.39459E-03	542	0.15441E-02	542	0.11858E-04
543	0.12712E-02	543	0.12137E-02	543	0.10815E-02	543	0.90386E-03
546	0.74096E-03	546	0.73739E-03	546	0.55618E-03	546	0.61646E-03
554	0.85445E-03	554	0.71135E-03	554	0.30846E-03	554	0.51863E-03
556	0.36201E-03	556	0.43035E-03	556	0.56895E-03	556	0.20331E-43
557	0.39871E-03	557	0.41276E-03	557	0.10119E-02	557	0.98528E-04
558	0.71115E-03	558	0.67842E-03	558	0.17302E-03	558	0.14652E-43
559	0.66832E-03	559	0.64238E-03	559	0.34588E-03	559	0.11318E-04
560	0.47114E-03	560	0.52372E-03	560	0.43395E-03	560	0.20324E-43

Annexe G

3 KHz	600 KHz	1 KHz	3 MHz				
331	0.61740E-03	331	0.66068E-03	331	0.36672E-03	331	0.42284E-43
332	0.73520E-04	332	0.89722E-04	332	0.26231E-03	332	0.48213E-43
335	0.77653E-03	335	0.82441E-03	335	0.10038E-02	335	0.85512E-04
337	0.17543E-03	337	0.22645E-03	337	0.68598E-03	337	0.10039E-43
339	0.68443E-03	339	0.70644E-03	339	0.75943E-03	339	0.68340E-45
340	0.32775E-03	340	0.32681E-03	340	0.78222E-03	340	0.42272E-45
342	0.67598E-03	342	0.71491E-03	342	0.64802E-03	342	0.88049E-45
343	0.94030E-03	343	0.99355E-03	343	0.69477E-03	343	0.18654E-03
344	0.51484E-03	344	0.53410E-03	344	0.35635E-03	344	0.34108E-45
348	0.68253E-03	348	0.72797E-03	348	0.77621E-03	348	0.10496E-45
357	0.38457E-03	357	0.39869E-03	357	0.46206E-03	357	0.30761E-04
359	0.97210E-03	359	0.98504E-03	359	0.76903E-03	359	0.23840E-43
372	0.12508E-02	372	0.12628E-02	372	0.12076E-02	372	0.49222E-45
374	0.10603E-02	374	0.10826E-02	374	0.11541E-02	374	0.14914E-03
375	0.88363E-03	375	0.90482E-03	375	0.89742E-03	375	0.25925E-03

387	0.12269E-02	387	0.12209E-02	387	0.11790E-02	387	0.30860E-43
388	0.15688E-02	388	0.15761E-02	388	0.14429E-02	388	0.83335E-03
389	0.71410E-03	389	0.70743E-03	389	0.90403E-03	389	0.14077E-43
390	0.36774E-03	390	0.36218E-03	390	0.79798E-03	390	0.14253E-03
391	0.50760E-03	391	0.50733E-03	391	0.96554E-03	391	0.93934E-44
392	0.61071E-03	392	0.61748E-03	392	0.62040E-03	392	0.24773E-04
393	0.98681E-03	393	0.99922E-03	393	0.86324E-03	393	0.71462E-44
394	0.80321E-03	394	0.80496E-03	394	0.88863E-03	394	0.80822E-04
395	0.70563E-03	395	0.69621E-03	395	0.12371E-02	395	0.15967E-44
396	0.12840E-02	396	0.12872E-02	396	0.11430E-02	396	0.86502E-03
397	0.15056E-02	397	0.15228E-02	397	0.14333E-02	397	0.11993E-44
398	0.11524E-02	398	0.11613E-02	398	0.92023E-03	398	0.92317E-03
400	0.85632E-03	400	0.85621E-03	400	0.72076E-03	400	0.59826E-45
401	0.10770E-02	401	0.10814E-02	401	0.88652E-03	401	0.12799E-03
403	0.10780E-02	403	0.11025E-02	403	0.12210E-02	403	0.26519E-03
404	0.11228E-02	404	0.11366E-02	404	0.11317E-02	404	0.50819E-03
408	0.10297E-02	408	0.10765E-02	408	0.84237E-03	408	0.92100E-04
415	0.47229E-03	415	0.46210E-03	415	0.79448E-03	415	0.14880E-43
416	0.12591E-02	416	0.12560E-02	416	0.82056E-03	416	0.43260E-03
417	0.59584E-03	417	0.58381E-03	417	0.79511E-03	417	0.12154E-43
420	0.70803E-03	420	0.69791E-03	420	0.10983E-02	420	0.96245E-44
422	0.13328E-02	422	0.13338E-02	422	0.15521E-02	422	0.94037E-45
424	0.52898E-03	424	0.53555E-03	424	0.53623E-03	424	0.22193E-44
426	0.14452E-02	426	0.14447E-02	426	0.14687E-02	426	0.16269E-44
428	0.54136E-03	428	0.52414E-03	428	0.76872E-03	428	0.11749E-45
429	0.12027E-02	429	0.12193E-02	429	0.13371E-02	429	0.66234E-43
430	0.10285E-02	430	0.10309E-02	430	0.10641E-02	430	0.21753E-03
442	0.16097E-02	442	0.16214E-02	442	0.12216E-02	442	0.11609E-45
446	0.94293E-03	446	0.94687E-03	446	0.11258E-02	446	0.29726E-44
447	0.11744E-02	447	0.11972E-02	447	0.10663E-02	447	0.25771E-03
450	0.75384E-03	450	0.74081E-03	450	0.97714E-03	450	0.62117E-04
451	0.12417E-02	451	0.12586E-02	451	0.14519E-02	451	0.53823E-03
452	0.12517E-02	452	0.12624E-02	452	0.99332E-03	452	0.34486E-03
457	0.41713E-04	457	0.59046E-04	457	0.20951E-03	457	0.10524E-41
460	0.12373E-02	460	0.12488E-02	460	0.12622E-02	460	0.22617E-03
462	0.11184E-02	462	0.11202E-02	462	0.14415E-02	462	0.10986E-43
463	0.91721E-03	463	0.91075E-03	463	0.89660E-03	463	0.18595E-03
464	0.15919E-02	464	0.16021E-02	464	0.16855E-02	464	0.30285E-45
465	0.66968E-03	465	0.65893E-03	465	0.10702E-02	465	0.40727E-45
467	0.94692E-03	467	0.95236E-03	467	0.83661E-03	467	0.79354E-45
470	0.83273E-03	470	0.82800E-03	470	0.99430E-03	470	0.15612E-45
473	0.77824E-03	473	0.77871E-03	473	0.83412E-03	473	0.96911E-42
485	0.80135E-03	485	0.80577E-03	485	0.94926E-03	485	0.71447E-42
490	0.10260E-02	490	0.10233E-02	490	0.99697E-03	490	0.45733E-44
492	0.83772E-03	492	0.84685E-03	492	0.12044E-02	492	0.13758E-45
494	0.11592E-02	494	0.11709E-02	494	0.15528E-02	494	0.42609E-45
496	0.87461E-03	496	0.87396E-03	496	0.92126E-03	496	0.15559E-44
497	0.63918E-03	497	0.62294E-03	497	0.77542E-03	497	0.23463E-03
498	0.72355E-03	498	0.70494E-03	498	0.91117E-03	498	0.11453E-45
501	0.10221E-02	501	0.10358E-02	501	0.98533E-03	501	0.25043E-03
502	0.10346E-02	502	0.10509E-02	502	0.11136E-02	502	0.26032E-03

Annexe H

3 KHz		600 KHz		1 MHz		3 MHz	
331	0.38587E-03	331	0.38551E-03	331	0.41293E-03	331	0.32009E-03
332	0.45950E-04	332	0.38909E-04	332	0.56076E-04	332	0.55331E-03
335	0.48533E-03	335	0.47533E-03	335	0.51525E-03	335	0.59888E-03
337	0.10964E-03	337	0.11297E-03	337	0.14153E-03	337	0.74229E-03
339	0.42777E-03	339	0.42040E-03	339	0.44153E-03	339	0.79436E-03
340	0.20484E-03	340	0.19912E-03	340	0.20426E-03	340	0.57142E-03
342	0.42249E-03	342	0.42128E-03	342	0.44682E-03	342	0.72600E-03
343	0.58769E-03	343	0.58352E-03	343	0.62097E-03	343	0.92348E-03
344	0.32177E-03	344	0.32186E-03	344	0.33381E-03	344	0.47931E-03
348	0.42658E-03	348	0.42415E-03	348	0.45498E-03	348	0.92692E-04
357	0.24036E-03	357	0.23788E-03	357	0.24918E-03	357	0.26723E-03
359	0.60757E-03	359	0.60603E-03	359	0.61565E-03	359	0.62337E-03
372	0.78177E-03	372	0.78150E-03	372	0.78922E-03	372	0.78096E-03
374	0.66271E-03	374	0.66387E-03	374	0.67662E-03	374	0.77200E-03
375	0.55227E-03	375	0.55238E-03	375	0.56551E-03	375	0.52339E-03
387	0.76679E-03	387	0.76597E-03	387	0.76306E-03	387	0.71252E-03
388	0.98049E-03	388	0.98010E-03	388	0.98503E-03	388	0.92651E-03
389	0.44631E-03	389	0.44519E-03	389	0.44214E-03	389	0.83833E-03
390	0.22984E-03	390	0.22817E-03	390	0.22637E-03	390	0.70058E-03
391	0.31725E-03	391	0.31517E-03	391	0.31708E-03	391	0.39204E-03
392	0.38170E-03	392	0.37949E-03	392	0.38593E-03	392	0.35885E-03
393	0.61675E-03	393	0.61541E-03	393	0.62451E-03	393	0.17539E-04
394	0.50201E-03	394	0.50170E-03	394	0.50310E-03	394	0.73842E-03
395	0.44102E-03	395	0.44090E-03	395	0.43513E-03	395	0.12145E-02
396	0.80249E-03	396	0.80263E-03	396	0.80453E-03	396	0.10172E-02
397	0.94101E-03	397	0.93803E-03	397	0.95174E-03	397	0.62944E-03
398	0.72026E-03	398	0.71870E-03	398	0.72580E-03	398	0.36910E-03
400	0.53520E-03	400	0.53244E-03	400	0.53513E-03	400	0.16708E-03
401	0.67313E-03	401	0.67414E-03	401	0.67589E-03	401	0.67919E-03
403	0.67375E-03	403	0.67548E-03	403	0.68907E-03	403	0.10330E-02
404	0.70178E-03	404	0.70171E-03	404	0.71035E-03	404	0.58790E-03
408	0.64359E-03	408	0.64527E-03	408	0.67282E-03	408	0.20211E-03
415	0.29518E-03	415	0.29552E-03	415	0.28881E-03	415	0.38387E-03
416	0.78692E-03	416	0.78647E-03	416	0.78503E-03	416	0.63870E-03
417	0.37240E-03	417	0.37183E-03	417	0.36488E-03	417	0.73069E-03
420	0.44252E-03	420	0.44529E-03	420	0.43619E-03	420	0.17727E-03
422	0.83301E-03	422	0.82671E-03	422	0.83362E-03	422	0.98955E-03
424	0.33061E-03	424	0.32744E-03	424	0.33472E-03	424	0.37682E-03
426	0.90324E-03	426	0.90223E-03	426	0.90294E-03	426	0.11523E-02
428	0.33835E-03	428	0.33703E-03	428	0.32759E-03	428	0.21649E-03
429	0.75171E-03	429	0.75097E-03	429	0.76203E-03	429	0.76044E-03
430	0.64283E-03	430	0.64295E-03	430	0.64432E-03	430	0.65304E-03
442	0.10061E-02	442	0.10033E-02	442	0.10134E-02	442	0.51944E-03
446	0.58933E-03	446	0.58583E-03	446	0.59179E-03	446	0.52731E-03
447	0.73400E-03	447	0.73585E-03	447	0.74823E-03	447	0.49938E-03
450	0.47115E-03	450	0.46941E-03	450	0.46301E-03	450	0.76526E-03
451	0.77609E-03	451	0.77548E-03	451	0.78662E-03	451	0.47377E-03
452	0.78231E-03	452	0.77858E-03	452	0.78897E-03	452	0.57061E-03
457	0.26071E-04	457	0.25680E-04	457	0.36904E-04	457	0.59115E-03
460	0.77329E-03	460	0.77124E-03	460	0.78052E-03	460	0.59387E-03
462	0.69901E-03	462	0.69706E-03	462	0.70011E-03	462	0.73570E-03

463	0.57325E-03	463	0.57510E-03	463	0.56922E-03	463	0.27492E-03
464	0.99491E-03	464	0.99359E-03	464	0.10013E-02	464	0.72254E-03
465	0.41855E-03	465	0.41902E-03	465	0.41183E-03	465	0.11450E-02
467	0.59183E-03	467	0.59069E-03	467	0.59523E-03	467	0.84354E-03
470	0.52046E-03	470	0.52060E-03	470	0.51750E-03	470	0.28542E-03
473	0.48640E-03	473	0.48372E-03	473	0.48669E-03	473	0.77994E-03
485	0.50084E-03	485	0.49820E-03	485	0.50361E-03	485	0.47662E-03
490	0.64122E-03	490	0.64446E-03	490	0.63957E-03	490	0.35052E-03
492	0.52357E-03	492	0.52650E-03	492	0.52928E-03	492	0.34799E-03
494	0.72452E-03	494	0.72525E-03	494	0.73180E-03	494	0.73239E-03
496	0.54663E-03	496	0.54722E-03	496	0.54623E-03	496	0.84538E-03
497	0.39949E-03	497	0.39872E-03	497	0.38934E-03	497	0.24268E-03
498	0.45222E-03	498	0.45387E-03	498	0.44059E-03	498	0.30282E-03
501	0.63881E-03	501	0.62955E-03	501	0.64737E-03	501	0.63426E-03
502	0.64660E-03	502	0.63930E-03	502	0.65684E-03	502	0.99988E-03

Annexe I

F = 6 MHz			
331	0.49219E-43	416	0.27038E-03
332	0.56121E-43	417	0.14147E-43
335	0.53445E-04	420	0.11203E-43
337	0.11686E-43	422	0.10946E-44
339	0.79549E-45	424	0.25833E-44
340	0.49206E-45	426	0.18937E-44
342	0.10249E-44	428	0.13676E-45
343	0.11659E-03	429	0.77097E-43
344	0.39702E-45	430	0.13596E-03
348	0.12218E-45	442	0.13513E-45
357	0.19226E-04	446	0.34601E-44
359	0.27750E-43	447	0.16107E-03
372	0.57295E-45	450	0.38823E-04
374	0.93214E-04	451	0.33640E-03
375	0.16203E-03	452	0.21554E-03
387	0.35921E-43	457	0.12250E-41
388	0.52084E-03	460	0.14136E-03
389	0.16386E-43	462	0.12788E-43
390	0.89082E-04	463	0.11622E-03
391	0.10934E-43	464	0.35252E-45
392	0.15483E-04	465	0.47407E-45
393	0.83183E-44	467	0.92369E-45
394	0.50514E-04	470	0.18173E-45
395	0.18586E-44	473	0.11281E-41
396	0.54064E-03	485	0.83165E-42
397	0.13960E-44	490	0.53234E-44
398	0.57698E-03	492	0.16014E-45
400	0.69638E-45	494	0.49597E-45
401	0.79995E-04	496	0.18111E-44
403	0.16574E-03	497	0.14664E-03
404	0.31762E-03	498	0.13332E-45
408	0.57563E-04	501	0.15652E-03
415	0.17321E-43	502	0.16270E-03

Annexe J

3 KHz		600 KHz		1 MHz		3 MHz	
331	0.34300E-03	331	0.34073E-03	331	0.33917E-03	331	0.20373E-03
332	0.40844E-04	332	0.40425E-04	332	0.35906E-04	332	0.14573E-03
335	0.43140E-03	335	0.43026E-03	335	0.41954E-03	335	0.55767E-03
337	0.97460E-04	337	0.96272E-04	337	0.10168E-03	337	0.38110E-03
339	0.38024E-03	339	0.37750E-03	339	0.37444E-03	339	0.42190E-03
340	0.18208E-03	340	0.18185E-03	340	0.17502E-03	340	0.43457E-03
342	0.37555E-03	342	0.37743E-03	342	0.36945E-03	342	0.36001E-03
343	0.52239E-03	343	0.52351E-03	343	0.51252E-03	343	0.38598E-03
344	0.28602E-03	344	0.28677E-03	344	0.28405E-03	344	0.19797E-03
348	0.37918E-03	348	0.37470E-03	348	0.37456E-03	348	0.43123E-03
357	0.21365E-03	357	0.21341E-03	357	0.20741E-03	357	0.25670E-03
359	0.54006E-03	359	0.53945E-03	359	0.53819E-03	359	0.42724E-03
372	0.69491E-03	372	0.69459E-03	372	0.69185E-03	372	0.67086E-03
374	0.58908E-03	374	0.58836E-03	374	0.59098E-03	374	0.64117E-03
375	0.49090E-03	375	0.48941E-03	375	0.49022E-03	375	0.49856E-03
387	0.68159E-03	387	0.68226E-03	387	0.68107E-03	387	0.65499E-03
388	0.87154E-03	388	0.87210E-03	388	0.87263E-03	388	0.80162E-03
389	0.39672E-03	389	0.39698E-03	389	0.39595E-03	389	0.50224E-03
390	0.20430E-03	390	0.20401E-03	390	0.19985E-03	390	0.44332E-03
391	0.28200E-03	391	0.28129E-03	391	0.27894E-03	391	0.53641E-03
392	0.33929E-03	392	0.33757E-03	392	0.33719E-03	392	0.34467E-03
393	0.54823E-03	393	0.54640E-03	393	0.54763E-03	393	0.47958E-03
394	0.44623E-03	394	0.44493E-03	394	0.44536E-03	394	0.49368E-03
395	0.39201E-03	395	0.39151E-03	395	0.38961E-03	395	0.68729E-03
396	0.71333E-03	396	0.71341E-03	396	0.71307E-03	396	0.63500E-03
397	0.83646E-03	397	0.83604E-03	397	0.83426E-03	397	0.79630E-03
398	0.64023E-03	398	0.63963E-03	398	0.63857E-03	398	0.51124E-03
400	0.47573E-03	400	0.47500E-03	400	0.47020E-03	400	0.40042E-03
401	0.59834E-03	401	0.59829E-03	401	0.59834E-03	401	0.49251E-03
403	0.59889E-03	403	0.59783E-03	403	0.60140E-03	403	0.67833E-03
404	0.62380E-03	404	0.62301E-03	404	0.62800E-03	404	0.62873E-03
408	0.57208E-03	408	0.57178E-03	408	0.57947E-03	408	0.46798E-03
415	0.26238E-03	415	0.26277E-03	415	0.26516E-03	415	0.44138E-03
416	0.69949E-03	416	0.69966E-03	416	0.69541E-03	416	0.45587E-03
417	0.33102E-03	417	0.33050E-03	417	0.33387E-03	417	0.44173E-03
420	0.39335E-03	420	0.39277E-03	420	0.39261E-03	420	0.61016E-03
422	0.74045E-03	422	0.73848E-03	422	0.73717E-03	422	0.86226E-03
424	0.29388E-03	424	0.29355E-03	424	0.29039E-03	424	0.29790E-03
426	0.80288E-03	426	0.80205E-03	426	0.80704E-03	426	0.81593E-03
428	0.30075E-03	428	0.30071E-03	428	0.29717E-03	428	0.42707E-03
429	0.66819E-03	429	0.66764E-03	429	0.67042E-03	429	0.74282E-03
430	0.57141E-03	430	0.57111E-03	430	0.57184E-03	430	0.59115E-03
442	0.89430E-03	442	0.89443E-03	442	0.90009E-03	442	0.67868E-03
446	0.52385E-03	446	0.52237E-03	446	0.52077E-03	446	0.62546E-03
447	0.65245E-03	447	0.65166E-03	447	0.65107E-03	447	0.59237E-03
450	0.41880E-03	450	0.41791E-03	450	0.41539E-03	450	0.54285E-03
451	0.68986E-03	451	0.68914E-03	451	0.69110E-03	451	0.80661E-03
452	0.69539E-03	452	0.69423E-03	452	0.69394E-03	452	0.55184E-03
457	0.23174E-04	457	0.22605E-04	457	0.24007E-04	457	0.11640E-03
460	0.68737E-03	460	0.68639E-03	460	0.68711E-03	460	0.70121E-03
462	0.62134E-03	462	0.61989E-03	462	0.61882E-03	462	0.80083E-03

463	0.50956E-03	463	0.50998E-03	463	0.51006E-03	463	0.49811E-03
464	0.88437E-03	464	0.88379E-03	464	0.88192E-03	464	0.93636E-03
465	0.37204E-03	465	0.37169E-03	465	0.37352E-03	465	0.59456E-03
467	0.52607E-03	467	0.52570E-03	467	0.52522E-03	467	0.46478E-03
470	0.46263E-03	470	0.46307E-03	470	0.46373E-03	470	0.55239E-03
473	0.43235E-03	473	0.43100E-03	473	0.42975E-03	473	0.46340E-03
485	0.44519E-03	485	0.44415E-03	485	0.44320E-03	485	0.52737E-03
490	0.56997E-03	490	0.57064E-03	490	0.57223E-03	490	0.55387E-03
492	0.46540E-03	492	0.46539E-03	492	0.46964E-03	492	0.66914E-03
494	0.64402E-03	494	0.64410E-03	494	0.64465E-03	494	0.86265E-03
496	0.48590E-03	496	0.48605E-03	496	0.48689E-03	496	0.51181E-03
497	0.35510E-03	497	0.35532E-03	497	0.35342E-03	497	0.43079E-03
498	0.40197E-03	498	0.40278E-03	498	0.40232E-03	498	0.50621E-03
501	0.56783E-03	501	0.56515E-03	501	0.55973E-03	501	0.54740E-03
502	0.57475E-03	502	0.57232E-03	502	0.56855E-03	502	0.61866E-03

Annexe K

F = 9 MHz			
331	0.45336E-43	416	0.24033E-03
332	0.51694E-43	417	0.13031E-43
335	0.47507E-04	420	0.10319E-43
337	0.10764E-43	422	0.10082E-44
339	0.73274E-45	424	0.23795E-44
340	0.45324E-45	426	0.17444E-44
342	0.94405E-45	428	0.12597E-45
343	0.10363E-03	429	0.71015E-43
344	0.36570E-45	430	0.12085E-03
348	0.11254E-45	442	0.12447E-45
357	0.17090E-04	446	0.31872E-44
359	0.25561E-43	447	0.14317E-03
372	0.52775E-45	450	0.34509E-04
374	0.82856E-04	451	0.29902E-03
375	0.14403E-03	452	0.19159E-03
387	0.33088E-43	457	0.11284E-41
388	0.46297E-03	460	0.12565E-03
389	0.15093E-43	462	0.11779E-43
390	0.79184E-04	463	0.10331E-03
391	0.10071E-43	464	0.32471E-45
392	0.13763E-04	465	0.43667E-45
393	0.76621E-44	467	0.85083E-45
394	0.44901E-04	470	0.16739E-45
395	0.17120E-44	473	0.10391E-41
396	0.48057E-03	485	0.76604E-42
397	0.12859E-44	490	0.49034E-44
398	0.51287E-03	492	0.14751E-45
400	0.64145E-45	494	0.45685E-45
401	0.71107E-04	496	0.16683E-44
403	0.14733E-03	497	0.13035E-03
404	0.28233E-03	498	0.12280E-45
408	0.51167E-04	501	0.13913E-03
415	0.15954E-43	502	0.14462E-03

Annexe L

3 KHz	600 KHz	1 MHz	3 MHz
331 0.68600E-03	331 0.73409E-03	331 0.40747E-03	331 0.39127E-43
332 0.81689E-04	332 0.99691E-04	332 0.29145E-03	332 0.44614E-43
335 0.86281E-03	335 0.91601E-03	335 0.11153E-02	335 0.95014E-04
337 0.19492E-03	337 0.25162E-03	337 0.76220E-03	337 0.92896E-44
339 0.76048E-03	339 0.78494E-03	339 0.84381E-03	339 0.63239E-45
340 0.36416E-03	340 0.36312E-03	340 0.86913E-03	340 0.39117E-45
342 0.75109E-03	342 0.79434E-03	342 0.72002E-03	342 0.81476E-45
343 0.10448E-02	343 0.11039E-02	343 0.77197E-03	343 0.20727E-03
344 0.57204E-03	344 0.59344E-03	344 0.39594E-03	344 0.31562E-45
348 0.75837E-03	348 0.80885E-03	348 0.86245E-03	348 0.97128E-46
357 0.42730E-03	357 0.44299E-03	357 0.51341E-03	357 0.34179E-04
359 0.10801E-02	359 0.10945E-02	359 0.85448E-03	359 0.22061E-43
372 0.13898E-02	372 0.14031E-02	372 0.13417E-02	372 0.45547E-45
374 0.11782E-02	374 0.12029E-02	374 0.12823E-02	374 0.16571E-03
375 0.98181E-03	375 0.10054E-02	375 0.99713E-03	375 0.28806E-03
387 0.13632E-02	387 0.13566E-02	387 0.13100E-02	387 0.28556E-43
388 0.17431E-02	388 0.17512E-02	388 0.16032E-02	388 0.92594E-03
389 0.79344E-03	389 0.78603E-03	389 0.10045E-02	389 0.13026E-43
390 0.40860E-03	390 0.40243E-03	390 0.88665E-03	390 0.15837E-03
391 0.56400E-03	391 0.56370E-03	391 0.10728E-02	391 0.86922E-44
392 0.67857E-03	392 0.68609E-03	392 0.68933E-03	392 0.27526E-04
393 0.10965E-02	393 0.11102E-02	393 0.95916E-03	393 0.66128E-44
394 0.89246E-03	394 0.89439E-03	394 0.98737E-03	394 0.89802E-04
395 0.78403E-03	395 0.77357E-03	395 0.13746E-02	395 0.14775E-44
396 0.14266E-02	396 0.14303E-02	396 0.12700E-02	396 0.96113E-03
397 0.16729E-02	397 0.16920E-02	397 0.15926E-02	397 0.11098E-44
398 0.12805E-02	398 0.12903E-02	398 0.10225E-02	398 0.10257E-02
400 0.95146E-03	400 0.95135E-03	400 0.80084E-03	400 0.55360E-45
401 0.11967E-02	401 0.12016E-02	401 0.98502E-03	401 0.14221E-03
403 0.11978E-02	403 0.12250E-02	403 0.13567E-02	403 0.29465E-03
404 0.12476E-02	404 0.12628E-02	404 0.12575E-02	404 0.56466E-03
408 0.11442E-02	408 0.11961E-02	408 0.93596E-03	408 0.10233E-03
415 0.52477E-03	415 0.51344E-03	415 0.88275E-03	415 0.13769E-43
416 0.13990E-02	416 0.13956E-02	416 0.91173E-03	416 0.48067E-03
417 0.66204E-03	417 0.64868E-03	417 0.88346E-03	417 0.11246E-43
420 0.78670E-03	420 0.77545E-03	420 0.12203E-02	420 0.89060E-44
422 0.14809E-02	422 0.14820E-02	422 0.17245E-02	422 0.87017E-45
424 0.58775E-03	424 0.59505E-03	424 0.59581E-03	424 0.20537E-44
426 0.16058E-02	426 0.16052E-02	426 0.16319E-02	426 0.15055E-44
428 0.60151E-03	428 0.58238E-03	428 0.85413E-03	428 0.10872E-45
429 0.13364E-02	429 0.13547E-02	429 0.14856E-02	429 0.61290E-43
430 0.11428E-02	430 0.11455E-02	430 0.11823E-02	430 0.24170E-03
442 0.17886E-02	442 0.18015E-02	442 0.13574E-02	442 0.10743E-45
446 0.10477E-02	446 0.10521E-02	446 0.12509E-02	446 0.27507E-44
447 0.13049E-02	447 0.13302E-02	447 0.11847E-02	447 0.28634E-03
450 0.83760E-03	450 0.82312E-03	450 0.10857E-02	450 0.69018E-04
451 0.13797E-02	451 0.13984E-02	451 0.16132E-02	451 0.59804E-03
452 0.13908E-02	452 0.14026E-02	452 0.11037E-02	452 0.38318E-03
457 0.46348E-04	457 0.65606E-04	457 0.23279E-03	457 0.97383E-42
460 0.13747E-02	460 0.13876E-02	460 0.14024E-02	460 0.25130E-03
462 0.12427E-02	462 0.12446E-02	462 0.16017E-02	462 0.10166E-43

463	0.10191E-02	463	0.10119E-02	463	0.99622E-03	463	0.20661E-03
464	0.17687E-02	464	0.17801E-02	464	0.18727E-02	464	0.28024E-45
465	0.74409E-03	465	0.73215E-03	465	0.11891E-02	465	0.37687E-45
467	0.10521E-02	467	0.10582E-02	467	0.92957E-03	467	0.73431E-45
470	0.92526E-03	470	0.92000E-03	470	0.11048E-02	470	0.14447E-45
473	0.86471E-03	473	0.86523E-03	473	0.92680E-03	473	0.89676E-42
485	0.89039E-03	485	0.89530E-03	485	0.10547E-02	485	0.66113E-42
490	0.11399E-02	490	0.11370E-02	490	0.11077E-02	490	0.42319E-44
492	0.93080E-03	492	0.94095E-03	492	0.13383E-02	492	0.12731E-45
494	0.12880E-02	494	0.13010E-02	494	0.17253E-02	494	0.39428E-45
496	0.97179E-03	496	0.97107E-03	496	0.10236E-02	496	0.14398E-44
497	0.71020E-03	497	0.69216E-03	497	0.86158E-03	497	0.26070E-03
498	0.80395E-03	498	0.78327E-03	498	0.10124E-02	498	0.10598E-45
501	0.11357E-02	501	0.11509E-02	501	0.10948E-02	501	0.27825E-03
502	0.11495 ^E -02	502	0.11677E-02	502	0.12373E-02	502	0.28925E-03

Annexe M

3 KHz		600 KHz		1 MHz		3 MHz	
63	0.73895E-03	63	0.79155E-03	63	0.69870E-03	63	0.55925E-42
65	0.69340E-03	65	0.76887E-03	65	0.74679E-03	65	0.34924E-41
66	0.31715E-03	66	0.36239E-03	66	0.34623E-03	66	0.53848E-41
68	0.73150E-03	68	0.80653E-03	68	0.57046E-03	68	0.79133E-42
69	0.69165E-03	69	0.71295E-03	69	0.10732E-02	69	0.95037E-42
71	0.42027E-03	71	0.43038E-03	71	0.13994E-02	71	0.10592E-42
73	0.68591E-03	73	0.77195E-03	73	0.11347E-02	73	0.14194E-42
77	0.58954E-03	77	0.66586E-03	77	0.47864E-03	77	0.33471E-42
81	0.67881E-03	81	0.71918E-03	81	0.73256E-03	81	0.93739E-04
85	0.73212E-03	85	0.72882E-03	85	0.96343E-03	85	0.12265E-42
91	0.34609E-03	91	0.31559E-03	91	0.53791E-03	91	0.24563E-41
93	0.65448E-03	93	0.69656E-03	93	0.63432E-03	93	0.44558E-42
94	0.34177E-03	94	0.39191E-03	94	0.40802E-03	94	0.13351E-41
95	0.69100E-03	95	0.68923E-03	95	0.68722E-03	95	0.55029E-04
96	0.72616E-03	96	0.71607E-03	96	0.76300E-03	96	0.44133E-44
97	0.88959E-03	97	0.94126E-03	97	0.64047E-03	97	0.53573E-43
98	0.84706E-03	98	0.87673E-03	98	0.10357E-02	98	0.13464E-42
100	0.59125E-03	100	0.61958E-03	100	0.49424E-03	100	0.26310E-04
102	0.55847E-03	102	0.56933E-03	102	0.58899E-03	102	0.13255E-42
109	0.55623E-03	109	0.50766E-03	109	0.78725E-03	109	0.40350E-04
120	0.59841E-03	120	0.52637E-03	120	0.10511E-02	120	0.30076E-05
129	0.19764E-03	129	0.21780E-03	129	0.97568E-03	129	0.58012E-04
132	0.42459E-03	132	0.49339E-03	132	0.36920E-03	132	0.53637E-43
134	0.77033E-03	134	0.85465E-03	134	0.96119E-03	134	0.12742E-42
136	0.28904E-03	136	0.38850E-03	136	0.24258E-03	136	0.65157E-44
138	0.89027E-03	138	0.82993E-03	138	0.14982E-03	138	0.55967E-43
139	0.75979E-03	139	0.77943E-03	139	0.14751E-02	139	0.57493E-43
140	0.54082E-03	140	0.62832E-03	140	0.48029E-03	140	0.60219E-43
142	0.65566E-03	142	0.77617E-03	142	0.38908E-03	142	0.38272E-44
144	0.21216E-03	144	0.26248E-03	144	0.44668E-04	144	0.61455E-04
159	0.57569E-03	159	0.67260E-03	159	0.52776E-03	159	0.30360E-04
161	0.56937E-03	161	0.69415E-03	161	0.30456E-03	161	0.16376E-43
164	0.51481E-03	164	0.50574E-03	164	0.13998E-02	164	0.39535E-44
166	0.29298E-03	166	0.36063E-03	166	0.10700E-02	166	0.20136E-42

168	0.36709E-05	168	0.27765E-04	168	0.36675E-03	168	0.24099E-42
170	0.80726E-03	170	0.81543E-03	170	0.40897E-03	170	0.34515E-43
172	0.72889E-03	172	0.73678E-03	172	0.42404E-03	172	0.61139E-04
175	0.54789E-03	175	0.51955E-03	175	0.40684E-04	175	0.11914E-42
177	0.71804E-03	177	0.77781E-03	177	0.54398E-03	177	0.27572E-42
178	0.65709E-03	178	0.72108E-03	178	0.70362E-03	178	0.10376E-42
184	0.71456E-03	184	0.74759E-03	184	0.11634E-02	184	0.73737E-43
186	0.30416E-03	186	0.25726E-03	186	0.33000E-03	186	0.89020E-43
194	0.32561E-03	194	0.32303E-03	194	0.22841E-05	194	0.94784E-45
196	0.87228E-03	196	0.93185E-03	196	0.23691E-03	196	0.94156E-43
202	0.23152E-03	202	0.27340E-03	202	0.17372E-02	202	0.42211E-04
203	0.55662E-03	203	0.50819E-03	203	0.17547E-03	203	0.31175E-43
206	0.73344E-03	206	0.66564E-03	206	0.48320E-03	206	0.39933E-43
208	0.21442E-03	208	0.25925E-03	208	0.46098E-03	208	0.30415E-05
212	0.66614E-03	212	0.70203E-03	212	0.52708E-03	212	0.41607E-43
214	0.73138E-03	214	0.71992E-03	214	0.10571E-02	214	0.33951E-04
222	0.47556E-03	222	0.54032E-03	222	0.46938E-03	222	0.27506E-42
224	0.30091E-03	224	0.33361E-03	224	0.47287E-03	224	0.13830E-42
233	0.23788E-03	233	0.27627E-03	233	0.26781E-03	233	0.57811E-04
245	0.73278E-03	245	0.66748E-03	245	0.41200E-03	245	0.25052E-42
247	0.77697E-03	247	0.82782E-03	247	0.62494E-03	247	0.23225E-42
248	0.80357E-03	248	0.74237E-03	248	0.24193E-03	248	0.27296E-42
249	0.58624E-03	249	0.65053E-03	249	0.17289E-03	249	0.24190E-04
250	0.46549E-04	250	0.21458E-04	250	0.30931E-03	250	0.18067E-42
252	0.75043E-03	252	0.74496E-03	252	0.23511E-03	252	0.12643E-43
254	0.98475E-03	254	0.10729E-02	254	0.26512E-03	254	0.16700E-42
256	0.13926E-03	256	0.11495E-03	256	0.87523E-03	256	0.95214E-43

Annexe N

	3 KHz	600 KHz	1 MHz	3 MHz	
63	0.46184E-03	63	0.46192E-03	63	0.10602E-02
65	0.43338E-03	65	0.43532E-03	65	0.66604E-03
66	0.19822E-03	66	0.20178E-03	66	0.19297E-02
68	0.45719E-03	68	0.45876E-03	68	0.24728E-02
69	0.43228E-03	69	0.43405E-03	69	0.20724E-02
71	0.26267E-03	71	0.26345E-03	71	0.30025E-02
73	0.42869E-03	73	0.42897E-03	73	0.13928E-02
77	0.36846E-03	77	0.36719E-03	77	0.13857E-02
81	0.42425E-03	81	0.42427E-03	81	0.10740E-02
85	0.45758E-03	85	0.45776E-03	85	0.29863E-03
91	0.21630E-03	91	0.21917E-03	91	0.79426E-03
92	0.50127E-03	92	0.50299E-03	92	0.52639E-03
93	0.40905E-03	93	0.40979E-03	93	0.52769E-03
94	0.21361E-03	94	0.21698E-03	94	0.11172E-02
95	0.43188E-03	95	0.43063E-03	95	0.10418E-02
96	0.45385E-03	96	0.45538E-03	96	0.57602E-03
97	0.55599E-03	97	0.55631E-03	97	0.10192E-02
98	0.52941E-03	98	0.53108E-03	98	0.23364E-04
100	0.36953E-03	100	0.36746E-03	100	0.15615E-02
102	0.34904E-03	102	0.34929E-03	102	0.73791E-03
109	0.34764E-03	109	0.34943E-03	109	0.28198E-02
120	0.37401E-03	120	0.37680E-03	120	0.62105E-03

129	0.12352E-03	129	0.12284E-03	129	0.14283E-03	129	0.32436E-02
132	0.26537E-03	132	0.26645E-03	132	0.28064E-03	132	0.32661E-03
134	0.48146E-03	134	0.48027E-03	134	0.46317E-03	134	0.52827E-03
136	0.18065E-03	136	0.18105E-03	136	0.17112E-03	136	0.64129E-03
138	0.55642E-03	138	0.55550E-03	138	0.55499E-03	138	0.81882E-03
139	0.47487E-03	139	0.47078E-03	139	0.43079E-03	139	0.25424E-02
140	0.33801E-03	140	0.33762E-03	140	0.34985E-03	140	0.31844E-03
142	0.40979E-03	142	0.40501E-03	142	0.38381E-03	142	0.67763E-03
144	0.13260E-03	144	0.13593E-03	144	0.13692E-03	144	0.13105E-02
159	0.35981E-03	159	0.36060E-03	159	0.38410E-03	159	0.11289E-02
161	0.35586E-03	161	0.35366E-03	161	0.35350E-03	161	0.15620E-02
164	0.32175E-03	164	0.31811E-03	164	0.31059E-03	164	0.36711E-03
166	0.18311E-03	166	0.18927E-03	166	0.21471E-03	166	0.25741E-02
168	0.22943E-05	168	0.95720E-05	168	0.48107E-04	168	0.16582E-02
170	0.50454E-03	170	0.50470E-03	170	0.50870E-03	170	0.17164E-03
172	0.45556E-03	172	0.45479E-03	172	0.44899E-03	172	0.58844E-03
175	0.34243E-03	175	0.34115E-03	175	0.34809E-03	175	0.71969E-03
177	0.44878E-03	177	0.45292E-03	177	0.45576E-03	177	0.48277E-03
178	0.41068E-03	178	0.41086E-03	178	0.43741E-03	178	0.85511E-03
184	0.44660E-03	184	0.44435E-03	184	0.44441E-03	184	0.15855E-02
186	0.19010E-03	186	0.19010E-03	186	0.21358E-03	186	0.85417E-03
194	0.20351E-03	194	0.20251E-03	194	0.18281E-03	194	0.54796E-03
197	0.29708E-03	196	0.54113E-03	196	0.50916E-03	196	0.13484E-03
202	0.14470E-03	202	0.14772E-03	202	0.16531E-03	202	0.20893E-02
203	0.34789E-03	203	0.34770E-03	203	0.31541E-03	203	0.12041E-02
206	0.45840E-03	206	0.45372E-03	206	0.44104E-03	206	0.68107E-03
208	0.13401E-03	208	0.13521E-03	208	0.18422E-03	208	0.80362E-05
212	0.41634E-03	212	0.41862E-03	212	0.43666E-03	212	0.72298E-03
214	0.45712E-03	214	0.45884E-03	214	0.44129E-03	214	0.19612E-02
222	0.29722E-03	222	0.29667E-03	222	0.32489E-03	222	0.35454E-03
224	0.18807E-03	224	0.19324E-03	224	0.23685E-03	224	0.92709E-04
233	0.14868E-03	233	0.15068E-03	233	0.15094E-03	233	0.47037E-03
245	0.45799E-03	245	0.45316E-03	245	0.45097E-03	245	0.50961E-03
247	0.48561E-03	247	0.48843E-03	247	0.50689E-03	247	0.15368E-02
248	0.50223E-03	248	0.50503E-03	248	0.48560E-03	248	0.11017E-03
249	0.36640E-03	249	0.36812E-03	249	0.39241E-03	249	0.55364E-03
250	0.29093E-04	250	0.33288E-04	250	0.77513E-05	250	0.12908E-02
252	0.46902E-03	252	0.47182E-03	252	0.46901E-03	252	0.83116E-03
254	0.61547E-03	254	0.61257E-03	254	0.66052E-03	254	0.54493E-03
256	0.87040E-04	256	0.88583E-04	256	0.89578E-04	256	0.60565E-03

Annexe O

F = 6 MHz			
63	0.65098E-42	161	0.19062E-43
65	0.40653E-41	164	0.46019E-44
66	0.62680E-41	166	0.23438E-42
68	0.92112E-42	168	0.28051E-42
69	0.11062E-41	170	0.40176E-43
71	0.12329E-42	172	0.38212E-04
73	0.16522E-42	175	0.13868E-42
77	0.38961E-42	177	0.32094E-42

81	0.58587E-04	178	0.12078E-42
85	0.14277E-42	184	0.85831E-43
91	0.28591E-41	186	0.10362E-42
93	0.51866E-42	194	0.11033E-44
94	0.15541E-41	196	0.10960E-42
95	0.34393E-04	202	0.26382E-04
96	0.51371E-44	203	0.36288E-43
97	0.62360E-43	206	0.46483E-43
98	0.15672E-42	208	0.19009E-05
100	0.16444E-04	212	0.48431E-43
102	0.15429E-42	214	0.21219E-04
109	0.25219E-04	222	0.32018E-42
120	0.18797E-05	224	0.16099E-42
129	0.36257E-04	233	0.36132E-04
132	0.62434E-43	245	0.29160E-42
134	0.14831E-42	247	0.27035E-42
136	0.75843E-44	248	0.31772E-42
138	0.65147E-43	249	0.15119E-04
139	0.66922E-43	250	0.21030E-42
140	0.70095E-43	252	0.14717E-43
142	0.44549E-44	254	0.19439E-42
144	0.38410E-04	256	0.11083E-42
159	0.18975E-04		

Annexe P

3 KHz		600 KHz		1 MHz		3 MHz	
63	0.41053E-03	63	0.41035E-03	63	0.41060E-03	63	0.38817E-03
65	0.38522E-03	65	0.38488E-03	65	0.38695E-03	65	0.41488E-03
66	0.17620E-03	66	0.39311E-03	66	0.17936E-03	66	0.19235E-03
68	0.40639E-03	68	0.40591E-03	68	0.40779E-03	68	0.31692E-03
69	0.38425E-03	69	0.38385E-03	69	0.38582E-03	69	0.59622E-03
71	0.23348E-03	71	0.23330E-03	71	0.23417E-03	71	0.77743E-03
73	0.38106E-03	73	0.38042E-03	73	0.38131E-03	73	0.63038E-03
77	0.32752E-03	77	0.32708E-03	77	0.32639E-03	77	0.26591E-03
81	0.37711E-03	81	0.37667E-03	81	0.37713E-03	81	0.40698E-03
85	0.40674E-03	85	0.40659E-03	85	0.40690E-03	85	0.53524E-03
91	0.19227E-03	91	0.19278E-03	91	0.19482E-03	91	0.29884E-03
93	0.36360E-03	93	0.36309E-03	93	0.36425E-03	93	0.35240E-03
94	0.18987E-03	94	0.18970E-03	94	0.19287E-03	94	0.22668E-03
95	0.38389E-03	95	0.38287E-03	95	0.38279E-03	95	0.38179E-03
96	0.40342E-03	96	0.40343E-03	96	0.40478E-03	96	0.42389E-03
97	0.49422E-03	97	0.49389E-03	97	0.49450E-03	97	0.35582E-03
98	0.47059E-03	98	0.47014E-03	98	0.47207E-03	98	0.57541E-03
100	0.32847E-03	100	0.32807E-03	100	0.32663E-03	100	0.27458E-03
102	0.31026E-03	102	0.31034E-03	102	0.31048E-03	102	0.32722E-03
109	0.30902E-03	109	0.30977E-03	109	0.31061E-03	109	0.43736E-03
120	0.33245E-03	120	0.33272E-03	120	0.33494E-03	120	0.58393E-03
129	0.10980E-03	129	0.11050E-03	129	0.10919E-03	129	0.54204E-03
132	0.23589E-03	132	0.23590E-03	132	0.23685E-03	132	0.20511E-03
134	0.42796E-03	134	0.42769E-03	134	0.42690E-03	134	0.53400E-03

136	0.16058E-03	136	0.16002E-03	136	0.16093E-03	136	0.13477E-03
138	0.49459E-03	138	0.49502E-03	138	0.49378E-03	138	0.83236E-04
139	0.42211E-03	139	0.42194E-03	139	0.41847E-03	139	0.81948E-03
140	0.30045E-03	140	0.30066E-03	140	0.30011E-03	140	0.26683E-03
142	0.36426E-03	142	0.36438E-03	142	0.36001E-03	142	0.21616E-03
144	0.11787E-03	144	0.11818E-03	144	0.12082E-03	144	0.24816E-04
159	0.31983E-03	159	0.32021E-03	159	0.32054E-03	159	0.29320E-03
161	0.31632E-03	161	0.31685E-03	161	0.31437E-03	161	0.16920E-03
164	0.28600E-03	164	0.28593E-03	164	0.28277E-03	164	0.77764E-03
166	0.16276E-03	166	0.16340E-03	166	0.16824E-03	166	0.59447E-03
168	0.20383E-05	168	0.31768E-05	168	0.85085E-05	168	0.20375E-03
170	0.44848E-03	170	0.44865E-03	170	0.44862E-03	170	0.22720E-03
172	0.40494E-03	172	0.40457E-03	172	0.40426E-03	172	0.23558E-03
175	0.30439E-03	175	0.30472E-03	175	0.30325E-03	175	0.22602E-04
177	0.39891E-03	177	0.39944E-03	177	0.40259E-03	177	0.30221E-03
178	0.36505E-03	178	0.36476E-03	178	0.36520E-03	178	0.39090E-03
184	0.39698E-03	184	0.39692E-03	184	0.39498E-03	184	0.64633E-03
186	0.16898E-03	186	0.16893E-03	186	0.16898E-03	186	0.30782E-03
194	0.18090E-03	194	0.18069E-03	194	0.18001E-03	194	0.12689E-05
196	0.48460E-03	196	0.48485E-03	196	0.48101E-03	196	0.13162E-03
202	0.12862E-03	202	0.12905E-03	202	0.13131E-03	202	0.96511E-03
203	0.30923E-03	203	0.30973E-03	203	0.30906E-03	203	0.97484E-04
206	0.40746E-03	206	0.40743E-03	206	0.40330E-03	206	0.26845E-03
208	0.11912E-03	208	0.11864E-03	208	0.12019E-03	208	0.25610E-03
212	0.37007E-03	212	0.37005E-03	212	0.37211E-03	212	0.29282E-03
214	0.40632E-03	214	0.40663E-03	214	0.40785E-03	214	0.58729E-03
222	0.26420E-03	222	0.26514E-03	222	0.26371E-03	222	0.26077E-03
224	0.16717E-03	224	0.16764E-03	224	0.17176E-03	224	0.26270E-03
233	0.13216E-03	233	0.13184E-03	233	0.13394E-03	233	0.14878E-03
245	0.40710E-03	245	0.40769E-03	245	0.40281E-03	245	0.22889E-03
247	0.43165E-03	247	0.43240E-03	247	0.43416E-03	247	0.34719E-03
248	0.44643E-03	248	0.44733E-03	248	0.44892E-03	248	0.13441E-03
249	0.32569E-03	249	0.32610E-03	249	0.32721E-03	249	0.96049E-04
250	0.25860E-04	250	0.26708E-04	250	0.29589E-04	250	0.17184E-03
252	0.41690E-03	252	0.41812E-03	252	0.41939E-03	252	0.13062E-03
254	0.54709E-03	254	0.54759E-03	254	0.54451E-03	254	0.14729E-03
256	0.77371E-04	256	0.77270E-04	256	0.78740E-04	256	0.48624E-03

Annexe Q

F = 9 MHz			
63	0.59962E-42	161	0.17558E-43
65	0.37446E-41	164	0.42389E-44
66	0.57735E-41	166	0.21589E-42
68	0.84846E-42	168	0.25838E-42
69	0.10190E-41	170	0.37007E-43
71	0.11357E-42	172	0.33966E-04
73	0.15219E-42	175	0.12774E-42
77	0.35887E-42	177	0.29562E-42
81	0.52077E-04	178	0.11125E-42
85	0.13150E-42	184	0.79060E-43
91	0.26336E-41	186	0.95446E-43

93	0.47775E-42	194	0.10163E-44
94	0.14315E-41	196	0.10095E-42
95	0.30572E-04	202	0.23451E-04
96	0.47319E-44	203	0.33425E-43
97	0.57440E-43	206	0.42816E-43
98	0.14436E-42	208	0.16897E-05
100	0.14616E-04	212	0.44610E-43
102	0.14211E-42	214	0.18862E-04
109	0.22417E-04	222	0.29492E-42
120	0.16709E-05	224	0.14829E-42
129	0.32229E-04	233	0.32117E-04
132	0.57509E-43	245	0.26860E-42
134	0.13661E-42	247	0.24902E-42
136	0.69860E-44	248	0.29266E-42
138	0.60008E-43	249	0.13439E-04
139	0.61643E-43	250	0.19371E-42
140	0.64566E-43	252	0.13556E-43
142	0.41035E-44	254	0.17906E-42
144	0.34142E-04	256	0.10209E-42
159	0.16866E-04		

Annexe R

3 KHz	600 KHz	1 MHz	3 MHz				
63	0.82105E-03	63	0.87950E-03	63	0.77633E-03	63	0.51750E-42
65	0.77045E-03	65	0.85430E-03	65	0.82977E-03	65	0.32317E-41
66	0.35239E-03	66	0.40266E-03	66	0.38470E-03	66	0.49829E-41
68	0.81278E-03	68	0.89614E-03	68	0.63385E-03	68	0.73226E-42
69	0.76851E-03	69	0.79217E-03	69	0.11924E-02	69	0.87942E-42
71	0.46696E-03	71	0.47820E-03	71	0.15549E-02	71	0.98015E-43
73	0.76212E-03	73	0.85773E-03	73	0.12608E-02	73	0.13135E-42
77	0.65504E-03	77	0.73984E-03	77	0.53182E-03	77	0.30973E-42
81	0.75423E-03	81	0.79909E-03	81	0.81395E-03	81	0.10415E-03
85	0.81347E-03	85	0.80980E-03	85	0.10705E-02	85	0.11349E-42
91	0.38454E-03	91	0.35065E-03	91	0.59767E-03	91	0.22729E-41
93	0.72720E-03	93	0.77396E-03	93	0.70481E-03	93	0.41232E-42
94	0.37974E-03	94	0.43545E-03	94	0.45336E-03	94	0.12355E-41
95	0.76778E-03	95	0.76581E-03	95	0.76358E-03	95	0.61143E-04
96	0.80684E-03	96	0.79563E-03	96	0.84778E-03	96	0.40838E-44
97	0.98843E-03	97	0.10458E-02	97	0.71164E-03	97	0.49574E-43
98	0.94117E-03	98	0.97415E-03	98	0.11508E-02	98	0.12459E-42
100	0.65694E-03	100	0.68842E-03	100	0.54915E-03	100	0.29233E-04
102	0.62052E-03	102	0.63259E-03	102	0.65444E-03	102	0.12265E-42
109	0.61803E-03	109	0.56406E-03	109	0.87472E-03	109	0.44834E-04
120	0.66490E-03	120	0.58485E-03	120	0.11679E-02	120	0.33418E-05
129	0.21959E-03	129	0.24200E-03	129	0.10841E-02	129	0.64458E-04
132	0.47177E-03	132	0.54821E-03	132	0.41022E-03	132	0.49633E-43
134	0.85592E-03	134	0.94962E-03	134	0.10680E-02	134	0.11790E-42
136	0.32115E-03	136	0.43167E-03	136	0.26953E-03	136	0.60293E-44
138	0.98919E-03	138	0.92214E-03	138	0.16647E-03	138	0.51790E-43
139	0.84421E-03	139	0.86604E-03	139	0.16390E-02	139	0.53201E-43

140	0.60091E-03	140	0.69813E-03	140	0.53366E-03	140	0.55723E-43
142	0.72852E-03	142	0.86241E-03	142	0.43231E-03	142	0.35415E-44
144	0.23574E-03	144	0.29164E-03	144	0.49631E-04	144	0.68284E-04
159	0.63966E-03	159	0.74733E-03	159	0.58640E-03	159	0.33733E-04
161	0.63263E-03	161	0.77128E-03	161	0.33840E-03	161	0.15153E-43
164	0.57201E-03	164	0.56193E-03	164	0.15553E-02	164	0.36584E-44
166	0.32553E-03	166	0.40070E-03	166	0.11889E-02	166	0.18633E-42
168	0.40787E-05	168	0.30851E-04	168	0.40750E-03	168	0.22300E-42
170	0.89696E-03	170	0.90603E-03	170	0.45441E-03	170	0.31939E-43
172	0.80988E-03	172	0.81865E-03	172	0.47115E-03	172	0.67932E-04
175	0.60877E-03	175	0.57728E-03	175	0.45205E-04	175	0.11025E-42
177	0.79782E-03	177	0.86424E-03	177	0.60442E-03	177	0.25514E-42
178	0.73010E-03	178	0.80120E-03	178	0.78180E-03	178	0.96014E-43
184	0.79395E-03	184	0.83066E-03	184	0.12927E-02	184	0.68233E-43
186	0.33796E-03	186	0.28585E-03	186	0.61564E-03	186	0.82375E-43
194	0.36179E-03	194	0.35892E-03	194	0.25378E-05	194	0.87708E-45
196	0.96920E-03	196	0.10354E-02	196	0.26323E-03	196	0.87127E-43
202	0.25725E-03	202	0.30378E-03	202	0.19302E-02	202	0.46902E-04
203	0.61846E-03	203	0.56465E-03	203	0.19497E-03	203	0.28848E-43
206	0.81493E-03	206	0.73960E-03	206	0.53689E-03	206	0.36952E-43
208	0.23824E-03	208	0.28806E-03	208	0.51220E-03	208	0.33794E-05
212	0.74015E-03	212	0.78003E-03	212	0.58565E-03	212	0.38501E-43
214	0.81265E-03	214	0.79992E-03	214	0.11746E-02	214	0.37723E-04
222	0.52840E-03	222	0.60036E-03	222	0.52154E-03	222	0.25453E-42
224	0.33434E-03	224	0.37067E-03	224	0.52541E-03	224	0.12798E-42
233	0.26431E-03	233	0.30696E-03	233	0.29757E-03	233	0.64234E-04
245	0.81420E-03	245	0.74165E-03	245	0.45778E-03	245	0.23182E-42
247	0.86330E-03	247	0.91980E-03	247	0.69437E-03	247	0.21492E-42
248	0.89286E-03	248	0.82486E-03	248	0.26881E-03	248	0.25258E-42
249	0.65138E-03	249	0.72281E-03	249	0.19210E-03	249	0.26878E-04
250	0.51721E-04	250	0.23843E-04	250	0.34368E-03	250	0.16718E-42
252	0.83381E-03	252	0.82774E-03	252	0.26124E-03	252	0.11700E-43
254	0.10942E-02	254	0.11921E-02	254	0.29458E-03	254	0.15453E-42
256	0.15474E-03	256	0.12772E-03	256	0.97248E-03	256	0.88106E-43