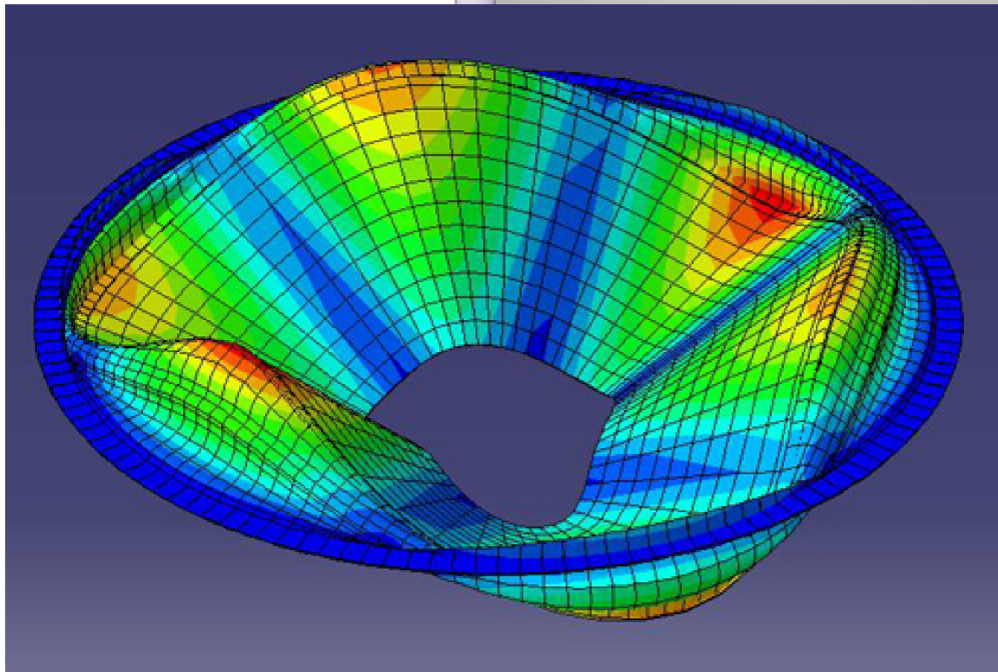


La modélisation numérique et l'étude de la suspension en caoutchouc de la membrane d'un haut parleur



Réalisé par :

David BRUSSON

Guillaume GIRARD

Eric SIAGO

Amadi SI MOHAMMED



Remerciements

Nous tenions tout d'abord à remercier M. Florent Calvayrac, pour nous avoir permis d'étudier au sein du Master de Modélisation Numérique en Physique et Mécanique et de nous avoir guidé tout au long de ce projet.

Nous remercions également M. Cyrille Pinton de nous avoir donné l'opportunité de travailler sur ce projet et de nous avoir fait part de ses connaissances sur les haut-parleurs.

Enfin, nous remercions M. Olivier Dazel de nous avoir expliqué le fonctionnement d'Abaqus et de nous avoir donné quelques conseils pour utiliser efficacement ce logiciel.

Table des matières

I) Historique du haut-parleur.....	5
II) Description et fonctionnement d'un haut-parleur	7
II.1) Description du haut-parleur :	7
II.1.a) La partie structurale :	7
II.1.b) Le moteur.....	8
II.2) Fonctionnement.....	9
II.3) Domaine acoustique :	10
III) Modèle géométrique et matériaux.....	11
III.1) Géométrie.....	11
III.2) Matériaux.....	14
III.2.a) La membrane.....	14
III.2.b) La suspension.....	14
IV) Étude modale de la suspension.....	16
V) Étude dynamique de la réponse du haut-parleur et de sa suspension.....	20
V.1) Présentation de la méthode de simulation.....	20
V.2) Intérêt de la suspension.....	22
V.3) Effet du déplacement sur la réponse fréquentielle.....	23
V.4) Réponse et amortissement de la membrane en fonction du matériau utilisé pour la suspension.....	25

Introduction :

Le haut-parleur est une technologie assez répandue de nos jours. Que ce soit dans nos téléphones portables, téléviseurs, voitures ou, plus communément, caché derrière la grille ou le tissu de protection d'une enceinte, ce dernier est omniprésent dans notre vie quotidienne. Cette technologie peut étonner au premier abord par sa relative simplicité mais certaines parties du haut-parleur sont encore de nos jours à étudier.

Ce projet a été initié par Cyrille PINTON, fondateur de sa propre entreprise de création et réparation de système audio. Il a en effet rencontré des problèmes liés à la résonance de la suspension en caoutchouc de haut-parleur à des très basses fréquences. Le but de ce projet est donc de déterminer l'influence de la suspension en caoutchouc d'un haut-parleur sur la résonance de ce dernier, et donc sur la qualité de la restitution du spectre sonore qu'il doit reproduire.

Dans le cadre de ce projet, nous nous concentrerons sur le haut-parleur électrodynamique, qui est le type de haut-parleur le plus communément utilisé. Dans une première partie, nous développerons un léger historique du haut-parleur ainsi qu'une description de ces différents éléments et de son fonctionnement général. Puis nous entamerons la phase de modélisation numérique avec le logiciel SolidWorks, avec tout d'abord une présentation du modèle géométrique et des matériaux utilisés. Ensuite nous commencerons une étude modale pour la mise en évidence d'une résonance dans le domaine des très basses fréquences en utilisant le logiciel Abaqus. Enfin, nous terminerons en effectuant une étude dynamique pour obtenir la réponse du haut-parleur en fonction des matériaux utilisés pour la suspension, toujours avec Abaqus.

Semaine	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21
Recherche bibliographique	■	■																				
Modèle 2D/3D SolidWorks				■	■	■	■															
Prise en main du logiciel Abaqus						■	■	■	■	■	■		■									
Définition du modèle Abaqus									■	■			■	■								
Recherche des modes propres														■	■							
Simulation de la réponse à une excitation (modèle 2D)															■	■	■	■	■	■		
Simulation de la réponse à une excitation (modèle 3D)															■	■	■	■	■	■		
Exploitation des résultats																■					■	■
Rédaction				■	■	■	■	■	■	■			■	■	■	■	■	■	■	■	■	■
Semaines de repos			■								■	■										

Planning du projet

I) Historique du haut-parleur

Les premiers hauts parleurs naissent au milieu du XIX^{ème} siècle avec la volonté de retranscrire un son préalablement enregistré (phonographe) ou un son transporté sur une longue distance (téléphone). L'invention du haut-parleur coïncide ainsi avec l'invention du téléphone puisque c'est le scientifique allemand Johann Philipp Reis qui intégra le premier haut-parleur électrique dans le tout premier téléphone, il y a de cela plus d'un siècle et demi. Ce tout premier haut-parleur était capable de retranscrire des sons purs mais aussi une voix humaine mais de manière peu intelligible. Ce n'est qu'en 1876 qu'une voix humaine peut être retranscrite de manière compréhensible grâce au haut-parleur intégré au premier téléphone breveté d'Alexander Graham Bell. Il est à noter que quelque année plus tard, en 1881, Nikola Tesla de son côté développa et incorpora un de ces tout premiers haut-parleurs pour sa version du téléphone, mais il ne déposa pas de brevet. Parallèlement, Thomas Edison développa un système permettant de retranscrire acoustiquement un son préalablement enregistré sur des cylindres phonographiques de son invention. Il en découla un brevet déposé en Grande Bretagne.

La technologie du haut-parleur prend un premier essor avec l'invention du transducteur à bobine mobile par Oliver Lodge en 1898. La réalisation du tout premier haut-parleur doté d'un tel système revient à Peter L. Jensen et Edwin Pridham au début du XX^{ème} siècle, mais leur brevet ne fut jamais retenu. Le véritable brevet du haut-parleur transducteur électrodynamique revient à Chester W. Rice et Edward W. Kellogg en 1924. Ce nouveau haut-parleur, à la différence des anciens modèles, possède une fréquence de résonance très basse. Rice et Kellogg ont en effet joué sur les propriétés mécaniques des matériaux pour déplacer cette fréquence de résonance vers le domaine de la basse fréquence. Ces tous premiers haut-parleurs ne présentaient pas à la base d'aimant permanent car leur prix n'était pas négligeable pour l'époque. Ces haut-parleurs utilisaient en réalité un électroaimant qui avait comme inconvénients principaux de produire une légère modulation du signal sonore ainsi qu'un ronflement assez présent. Ce n'est que quelque année plus tard que l'ajout d'aimant permanent se généralise grâce au développement de la technologie de l'aimant.

Dans les années 30, on commence à utiliser des combinaisons de deux à trois haut-parleurs pour augmenter le volume acoustique et la réponse fréquentielle dans des systèmes de restitution sonore (ce type de configuration se généralise notamment grâce à l'arrivée du son au cinéma). A partir de ce moment et jusqu'aux années 40, les recherches autour du haut-parleur se focalisent surtout sur son rendement, le plus souvent au détriment de la bande passante et de la distorsion, grâce à l'utilisation de pavillons qui éliminaient pour un long temps la nécessité d'une enceinte acoustique.

Les années 50 et 60 furent marquées par l'apparition des premières enceintes acoustiques qui permirent d'augmenter considérablement le rendement des hauts parleurs et de produire une meilleure qualité sonore. A partir des années 70, l'industrie de l'enceinte acoustique prit alors le chemin de la miniaturisation, grâce à des petits hauts parleurs à résonance basse et à des équipages mobiles à fort déplacement le tout noyé à l'arrière dans une abondante laine de verre.

Aujourd'hui il existe une assez large diversité de haut-parleurs, on peut citer par exemple les hauts parleurs électrostatiques, piézoélectriques ou encore les hauts parleurs à plasma. Mais le haut-parleur électrodynamique reste de nos jours la technologie de restitution sonore la utilisée puisqu'elle représente plus de 90% des haut-parleurs utilisés dans le monde.

II) Description et fonctionnement d'un haut-parleur

Le haut-parleur électrodynamique est un transducteur dont le rôle est de traduire les variations de grandeur électrique à ses bornes en une modification d'une grandeur acoustique, ceci grâce à un travail mécanique. En fait, c'est le déplacement de la membrane, un solide de forme creuse le plus souvent, qui est à l'origine même des variations de la pression acoustique du local d'écoute, elles-mêmes responsables du son perçu par l'auditeur.

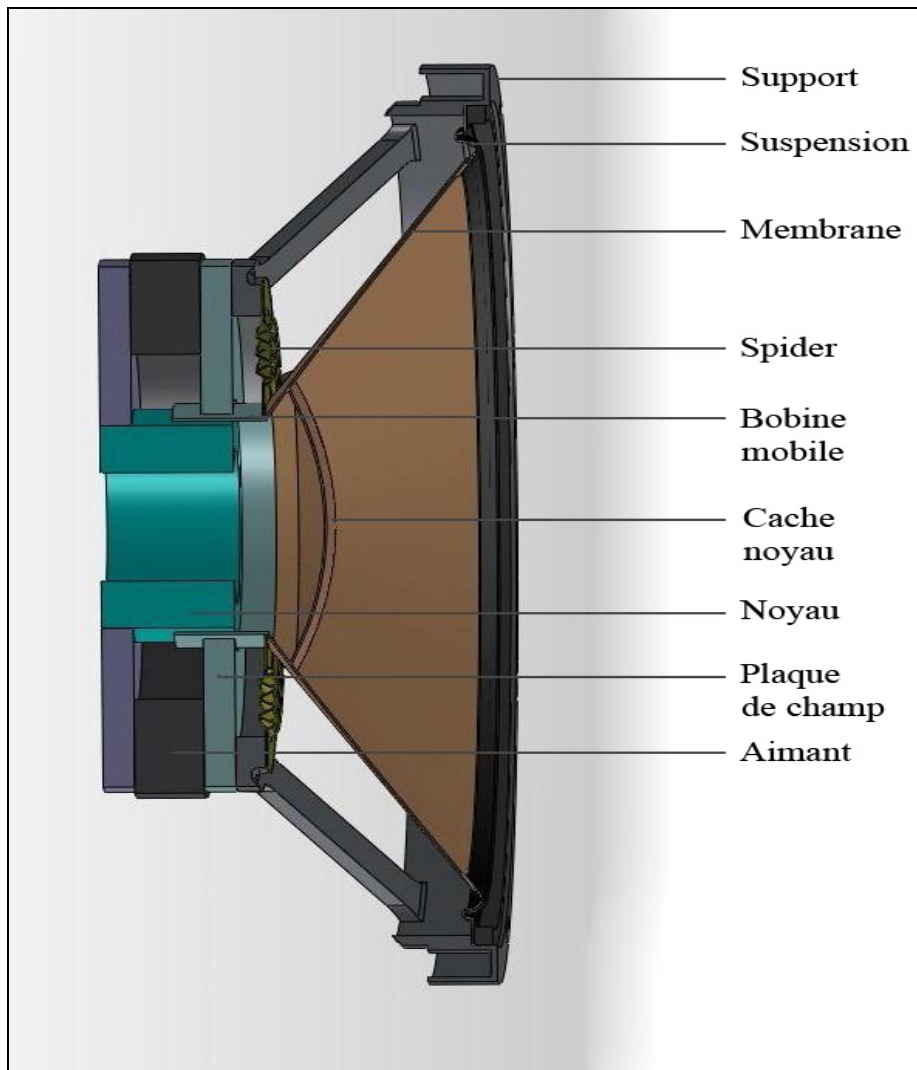
II.1) Description du haut-parleur :

Un haut-parleur est principalement composé de deux parties essentielles : une partie structurelle et un moteur.

II.1.a) La partie structurelle :

Cette partie comprend généralement trois éléments essentiels :

- Un châssis dont la principale fonction est de maintenir physiquement en place les différentes pièces non mobiles du haut-parleur.
- Une membrane qui agit tel un piston et repousse les molécules d'air environnantes. De la taille de cette membrane dépend directement la gamme de fréquences retranscrites.
- Une suspension fixée entre la membrane et le châssis dont la principale utilité est l'amortissement du déplacement de la membrane pour éviter son usure et donc l'altération du son.

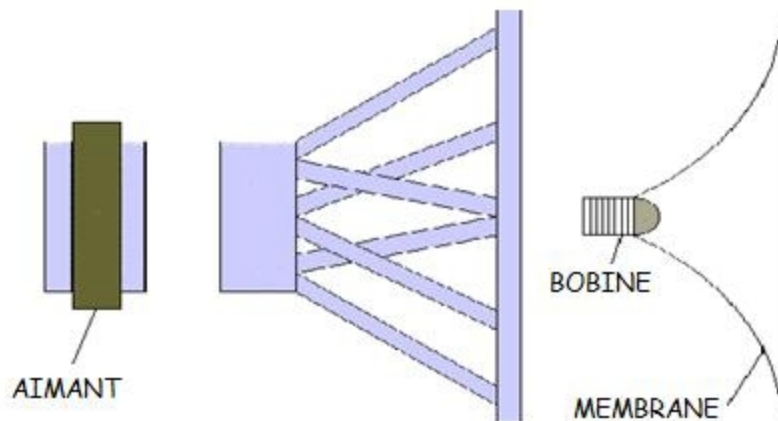


II.1.b) Le moteur

Le moteur quant a lui comprend deux éléments :

- Un aimant permanent généralement polarisé dans le sens axial permettant d'affecter un champ magnétique aux différents éléments du haut-parleur. Contrairement à une idée reçue, la taille de l'aimant n'a pas de lien direct avec le rendement du haut-parleur, ici l'aimant est simplement utilisé en tant que source d'énergie magnétique.

- Une bobine mobile disposée sur un support cylindrique au centre du haut-parleur dans le sens axial, qui traverse par un courant et sous l'effet d'un champ magnétique va imposer un déplacement à la membrane à laquelle elle est rattachée. Du diamètre de la bobine dépendra en partie la puissance du haut-parleur.



II.2) Fonctionnement

Le principe de restitution du son par un haut-parleur s'effectue en trois temps :

1. Un moteur transforme l'énergie électrique en énergie mécanique
2. Ce moteur transmet ensuite cette énergie mécanique à la membrane
3. La membrane transmet l'énergie mécanique à l'air ambiant, d'où la formation d'un son

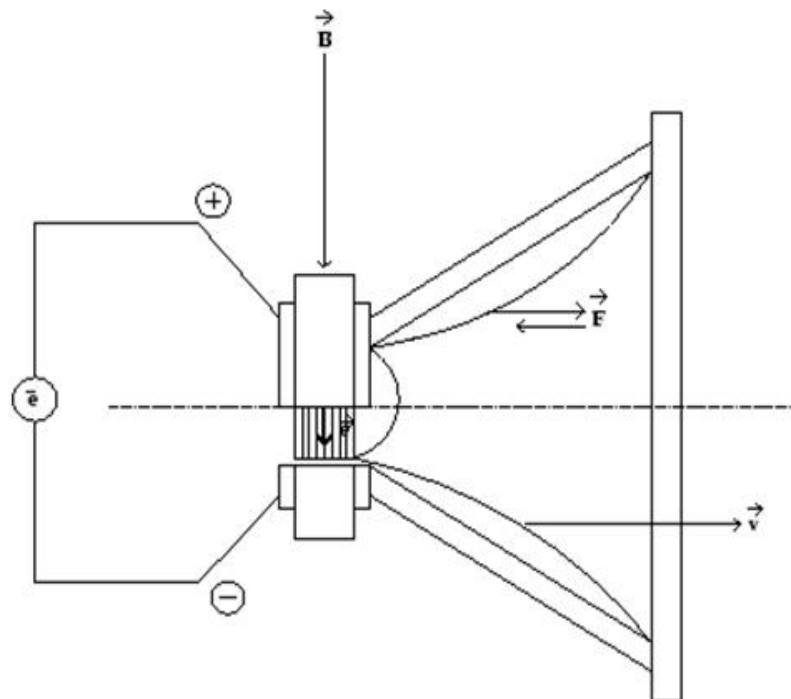
Pour transformer l'énergie électromagnétique en énergie mécanique, un courant doit parcourir la bobine, du fait de la tension que l'on fixe à ses bornes, une force (F) tend à faire sortir la bobine du champ B de l'entrefer dans le sens axial. Cette force, appelée **Force de Laplace**, est définie par la formule :

$$F = B * L * I * \sin(\alpha)$$

B étant le champ dans l'entrefer, L la longueur de fil de la bobine introduite dans l'entrefer, I le courant parcourant la bobine, et l'angle alpha qui est égal à l'angle entre le vecteur B et le vecteur I : donc dans le cas du haut-parleur, on fixe la direction du champ magnétique et l'orientation la bobine suivant l'axe du haut parleur pour obtenir une force maximale ($\sin(\alpha)$ fixe et égal à 1).

La force F est proportionnelle à I si B est constant (ce qui est le cas si l'ensemble magnétique est bien conçu) et si L est constant quel que soit le déplacement de la bobine : il faut donc veiller à ce que la bobine soit montée symétriquement par rapport au champ, de manière à ce que la longueur de fil qui sort de l'entrefer soit compensée par celle qui rentre dans l'entrefer.

Le passage de l'énergie électromagnétique à l'énergie mécanique ne se fait pas sans perte puisque le passage du courant dans la bobine entraîne entre autre un effet Joule, affectant ainsi le rendement global du haut-parleur. Cette énergie mécanique est ensuite transmise à la membrane qui va ensuite faire vibrer l'air, ce qui crée un son.



II.3) Domaine acoustique :

Chaque haut-parleur possède son domaine de restitution du spectre sonore. On distingue trois grands types de haut-parleurs :

- Un haut-parleur de grave émet à partir de 20 Hz jusqu'à 300 Hz dans le meilleur des cas
- Un haut-parleur de médium émet à partir de 300 Hz jusqu'à 5 kHz
- Un haut-parleur d'aigu à un spectre compris entre 5 kHz et 20 kHz

Pour obtenir la meilleur restitution du son possible, une combinaison de ces différents types de haut-parleurs est primordiale.

III) Modèle géométrique et matériaux

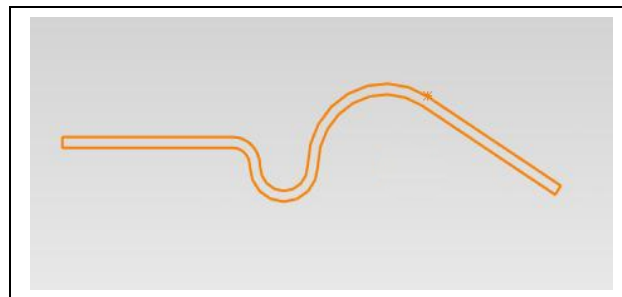
III.1) Géométrie

Pour commencer nos travaux de simulation, nous avons commencé par modéliser un haut-parleur sur SolidWorks. La partie électrodynamique n'étant pas au cœur de notre problème, nous avons décidé de simplement modéliser la membrane ainsi que la suspension d'un haut-parleur 18" d'un haut-parleur existant et fonctionnel dont nous pûmes trouver les dimensions sur internet.

Pour la création du modèle géométrique de ce haut-parleur, notre choix du logiciel a utiliser c'est porter sur SolidWorks étant donné que nous en avons quelques connaissances et que c'est un outil de construction de modèle 3D bien plus puissants que le module de construction de pièce d'Abaqus. Son utilisation dans le cadre de ce projet nous a ainsi entre autre permis d'approfondir nos connaissances sur ce logiciel.

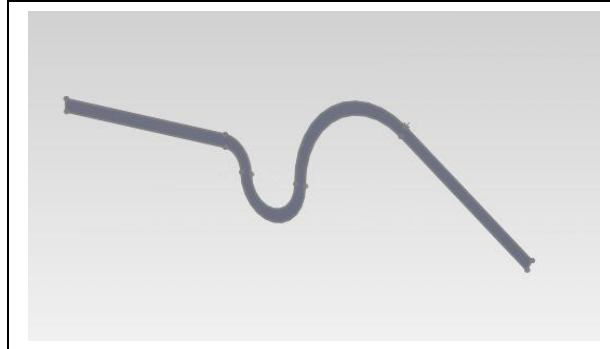
Toutes les pièces utilisées pour notre simulation ne possédaient pas de géométrie complexe, il nous était donc, une fois les différentes fonctions du logiciel reconnues, possible de créer nos différentes pièces suivant le cheminement suivant :

Pour construire chacune des pièces, nous avons commencer par créer leur profil plan.



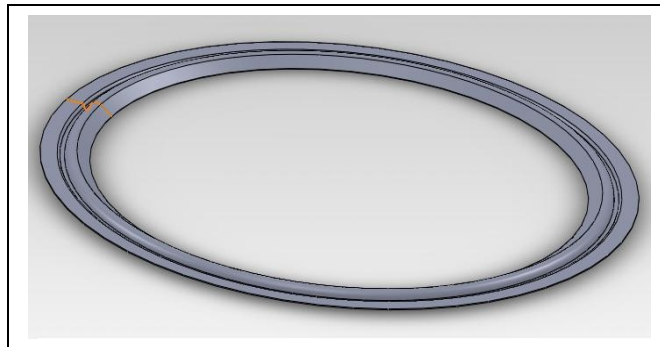
Profil de la suspension

Ensuite, à partir de ce simple segment, nous avons créé une surface plane.



Surface de base de la suspension

Puis par simple rotation nous avons pu créer les pièces dans leur intégralité.

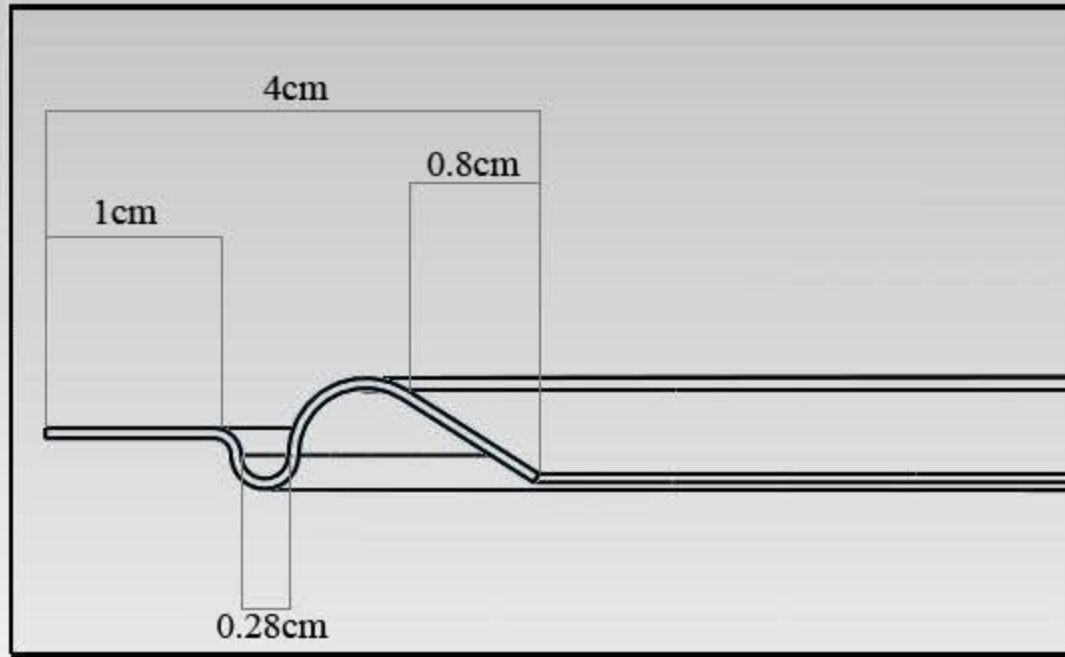


Suspension finale obtenue

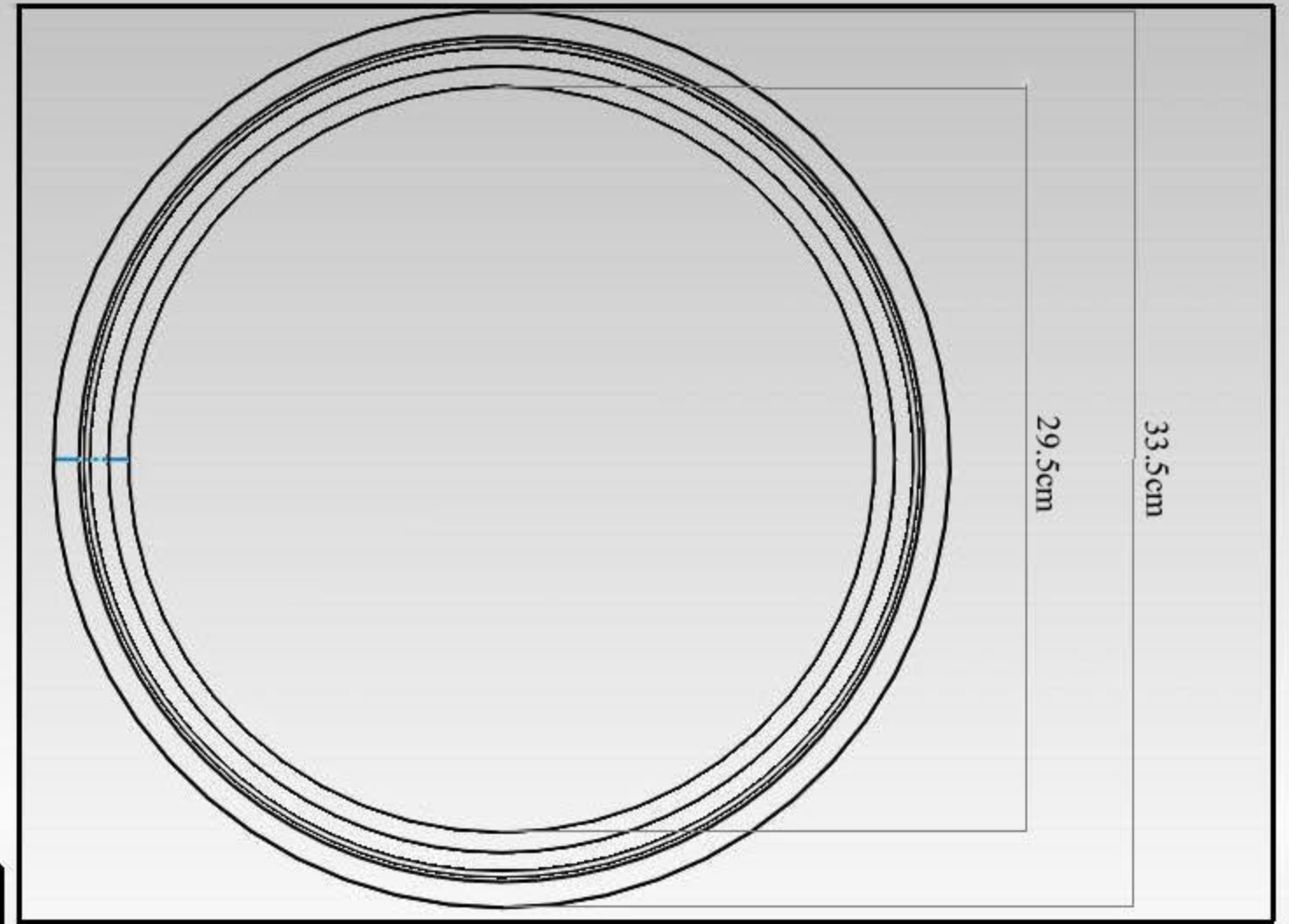
Pour ce qui est de l'assemblage des deux pièces, nous avons précédé ainsi :

Nous avons tout d'abord contraints les deux pièces sous SolidWorks grâce à des contraintes coaxiale et de coïncidence. Ce qui nous a permis après ouverture du modèle sous Abaqus, d'avoir un bon positionnement des pièces les unes par rapport aux autres. Il nous suffit juste pour attacher les deux pièces d'ajouter par la suite une contrainte « Tie » sous Abaqus.

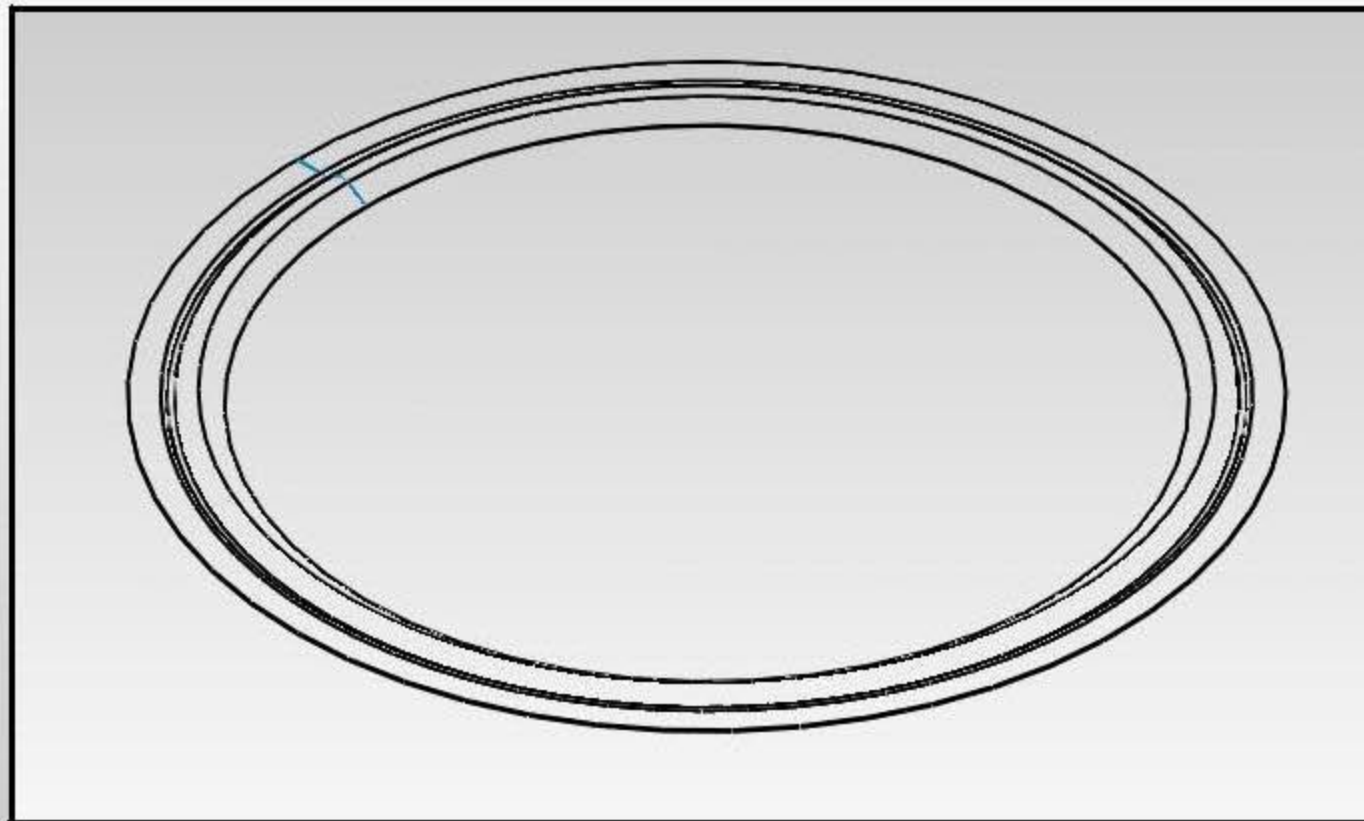
Les trois prochaines pages sont des mises en plan détaillées de nos pièces et de leur assemblage.



VUE EN COUPE

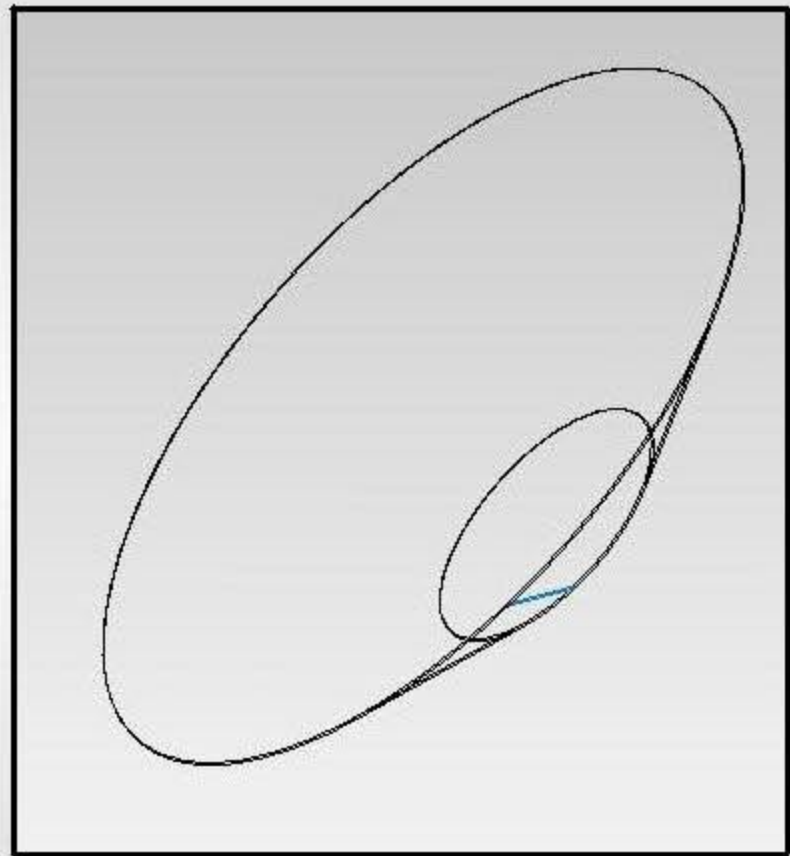


VUE DE DESSUS

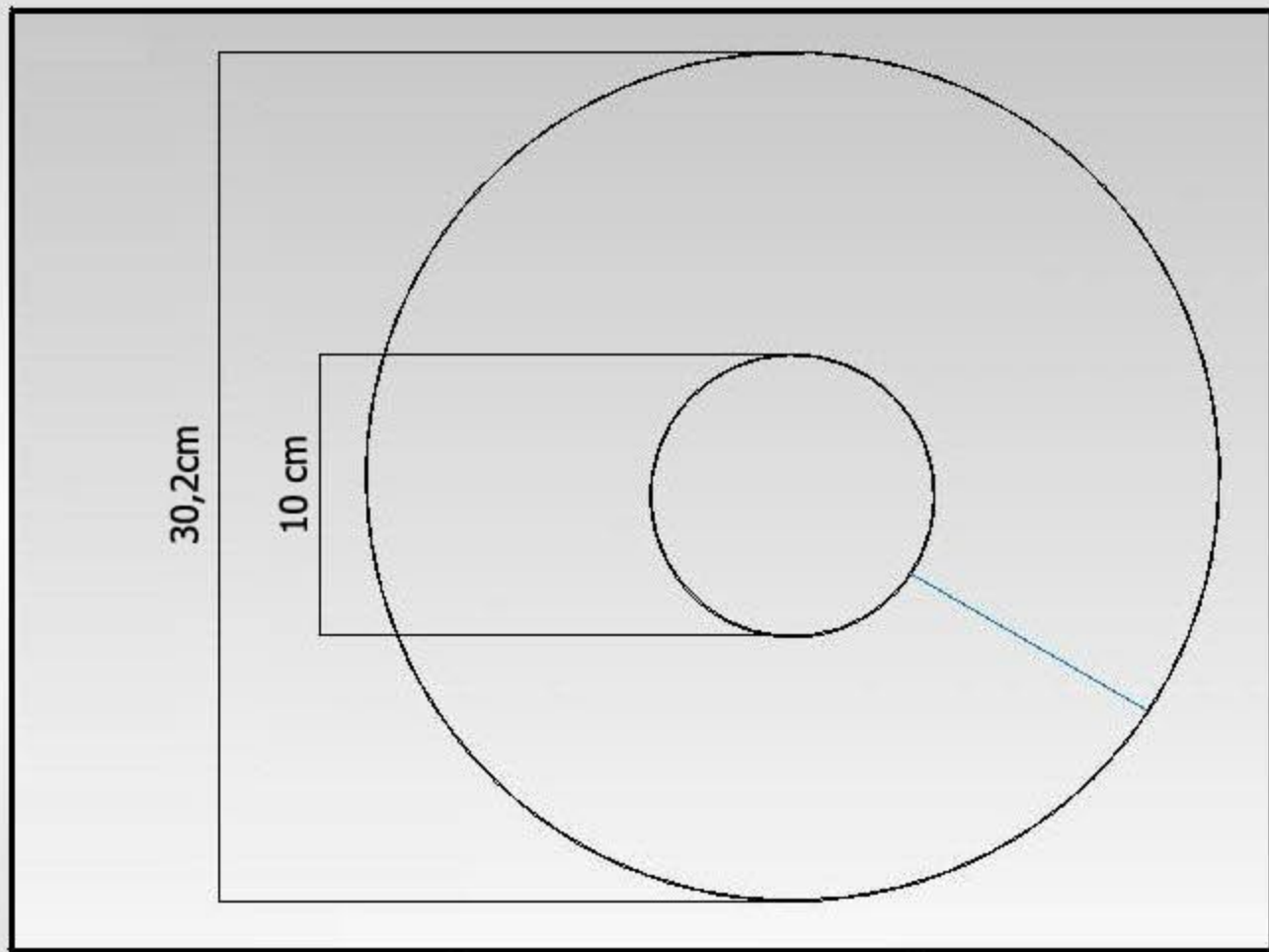


VUE RELIEF

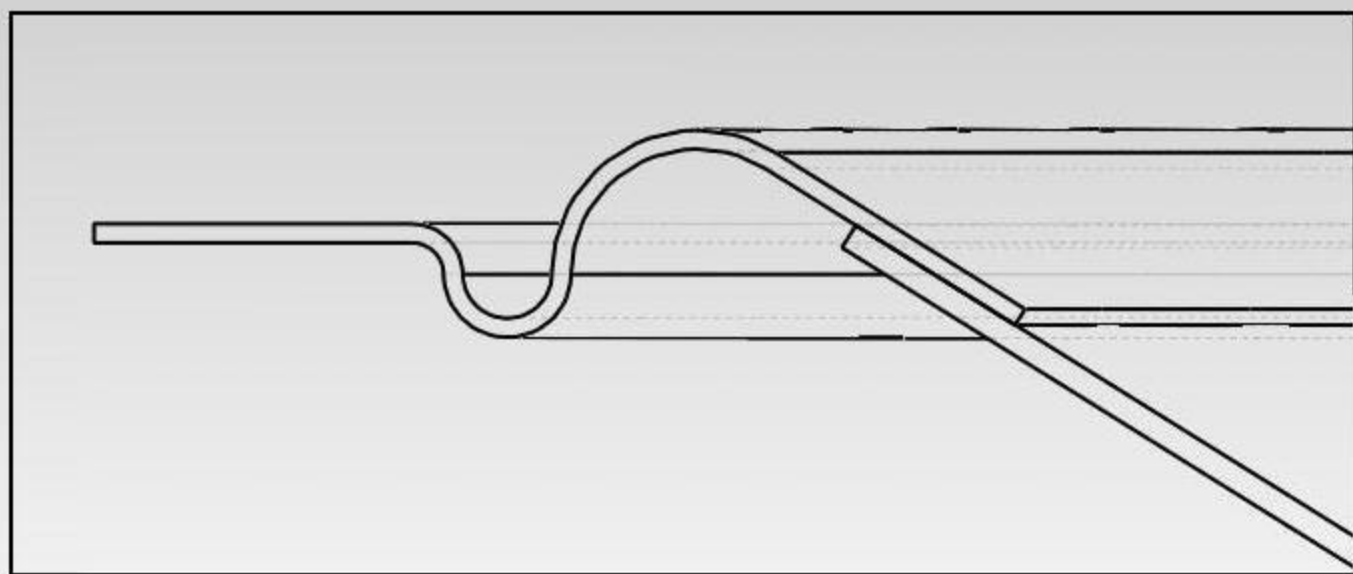
Suspension du Haut
Parleur



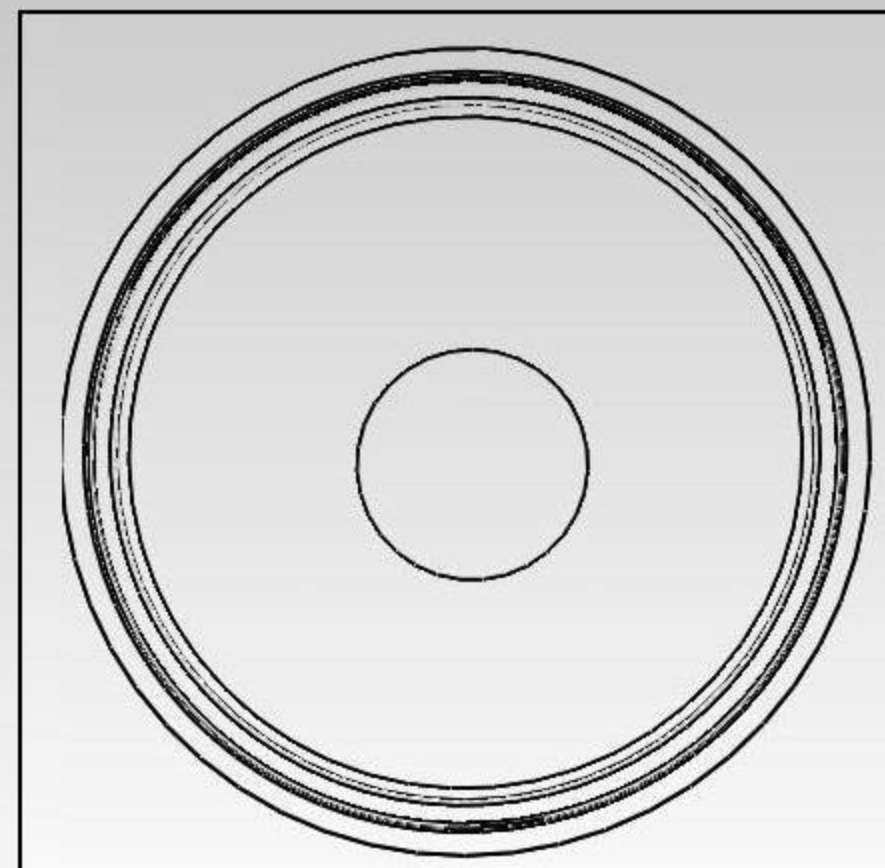
VUE RELIEF



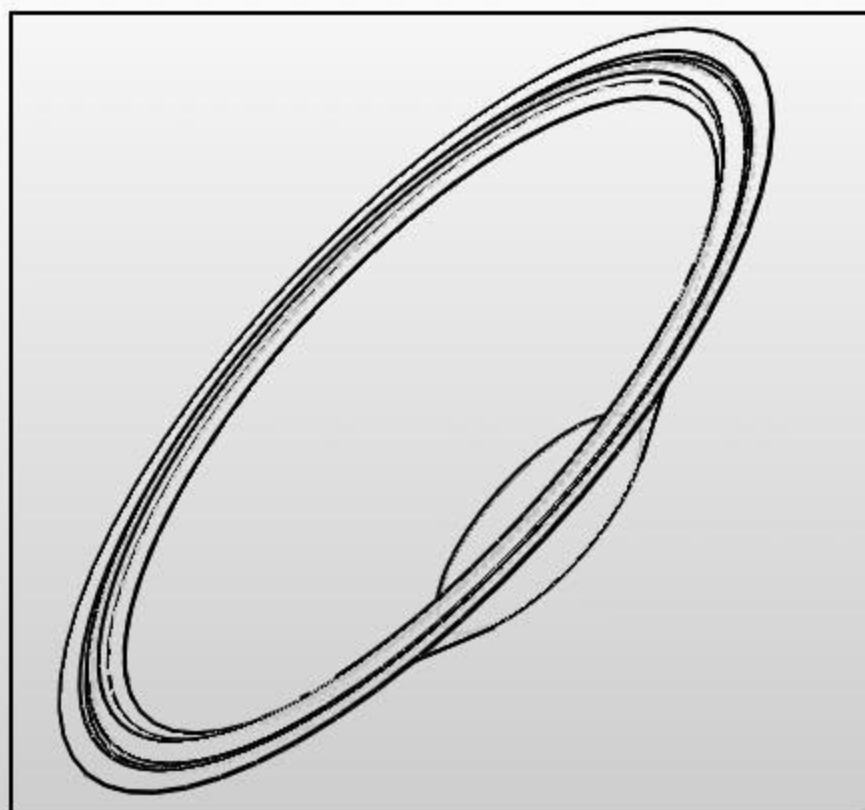
VUE DE DESSUS



VUE EN COUPE DE LA LIAISON



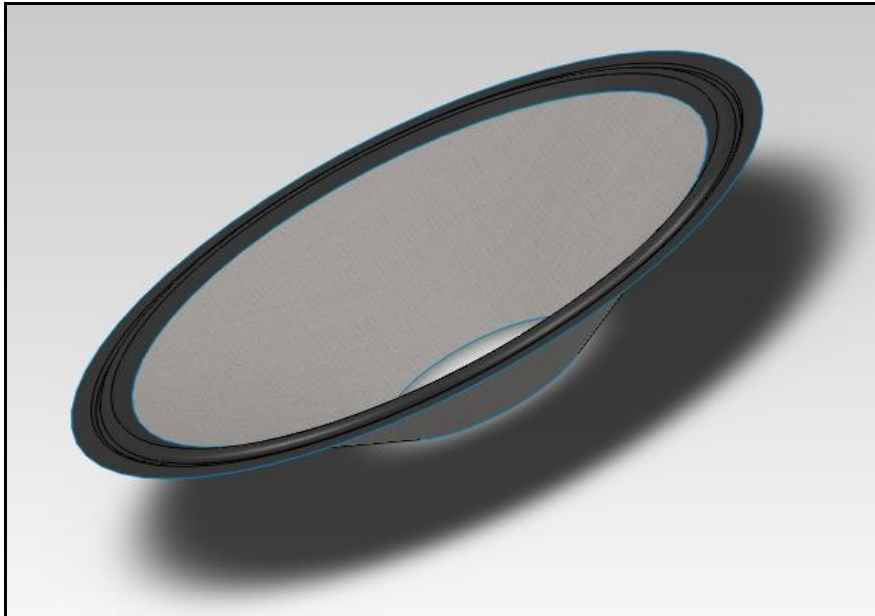
VUE DU DESSUS



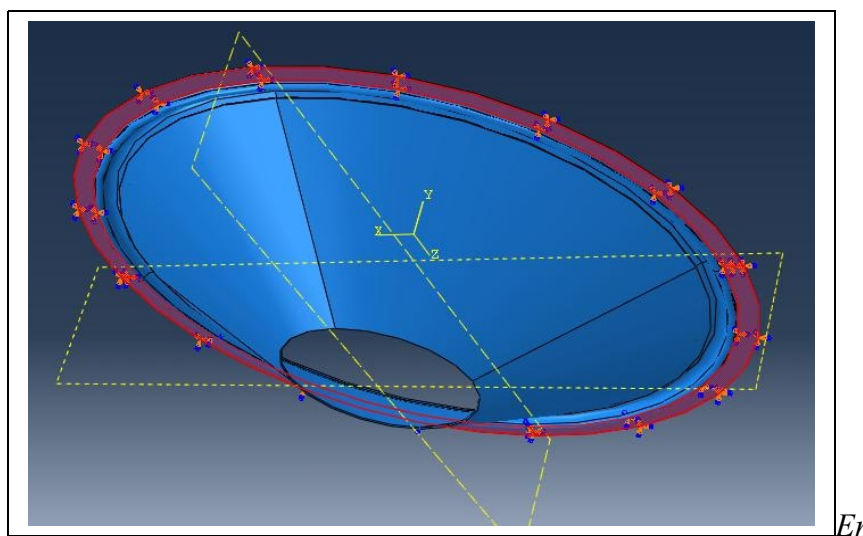
VUE RELIEF

ASSEMBLAGE
SUSPENSION - MEMBRANE

A partir de ce modèle 3D nous avons développé un modèle plus simple en 2D pour la suite de cette étude.



Une fois l'assemblage importé sous Abaqus et une fois une contrainte définie entre nos deux pièces, une condition aux limites doit être définie pour fixer le modèle de façon réaliste. On a pour cela encastrez les nœuds situés sur la partie inférieure de la suspension comme suit :



castrement de la suspension

III.2) Matériaux

Pour le choix des matériaux à utiliser pour la suspension et la membrane, nous nous sommes basé sur des document extraits de « *Voice Coil* », un périodique sur l'industrie des haut-parleurs, que Cyrille Pinton a eu la gentillesse de nous fournir. Nos simulation se feront donc avec des matériaux réellement utilisé pour ce type de technologie.

III.2.a) La membrane

Les membranes de haut-parleurs sont fabriquées en matériaux rigides qui vont pouvoir résister aux vibrations sans se déformer. La plupart sont en carton traité, mais on en trouve également en Kevlar, en fibre de carbone tressées voire même en aluminium. Pour notre simulation, nous avons utilisé une membrane en carbone.

Nous avons donc choisi d'utiliser une membrane en carbone, dont les propriétés sont les suivantes :

	Fibre de Carbone
Densité	1,81
Module d'Young (en Pa)	228.10 ⁹
Coefficient de Poisson	0.33

*Propriétés de la fibre de carbone composant
la membrane*

III.2.b) La suspension

Concernant les suspensions, elles sont maintenant faites à base d'élastomère, comme le caoutchouc par exemple. Ces matériaux possèdent en effet des propriétés très intéressantes : ils peuvent supporter de très grandes déformations avant rupture. Dans notre cas, ils vont amortir le déplacement de la membrane pour que cette dernière ne se déforme pas, ce qui altérerait le son et, à terme, endommagerait cette dernière.

Le but de ce projet étant de déterminer l'influence de la suspension, nous avons utilisé plusieurs matériaux différents pour définir notre suspension.

Description rapide des matériaux utilisés pour nos simulations :

- Caoutchouc naturel : c'est un polymère hydrocarboné élastique confectionné à partir du latex qui est produit naturellement par certaines plantes, mais il peut également être synthétisé.
- Hytrel 3078 et Arnitel EL250 : ce sont des élastomères thermoplastiques poly ether-ester qui possèdent la flexibilité du caoutchouc et aussi la robustesse des matières plastiques.
- Santoprene 70 : C'est un élastomères thermoplastiques (TPE) obtenu par mélange de caoutchouc EPDM et de polypropylène.

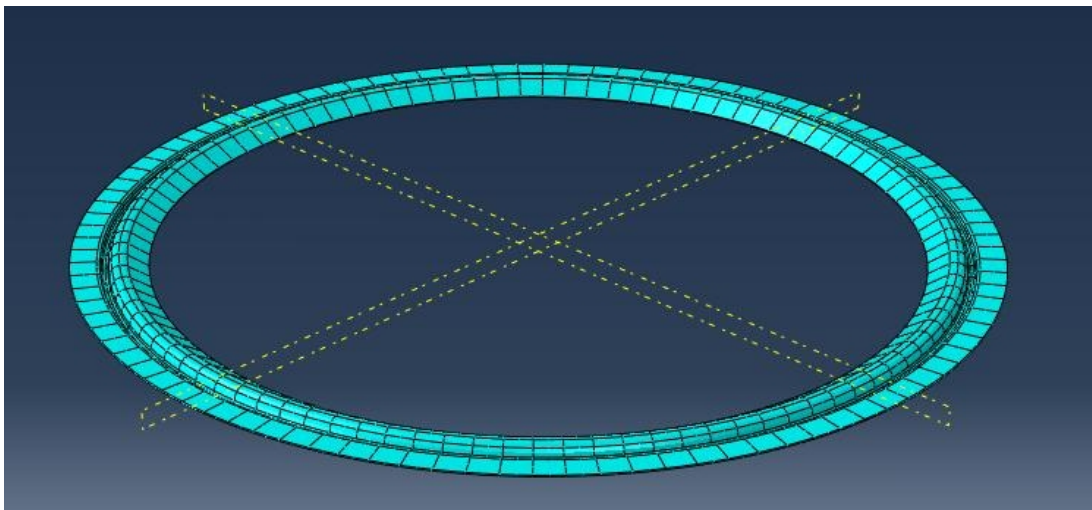
	Densité	Module d'Young (en Pa)	Coefficient de Poisson
Caoutchouc Naturel	0,93	$3 \cdot 10^6$	0,48
Arnitel EL250	1,08	$25 \cdot 10^6$	0,45
Hytrel 3078	1,07	$28 \cdot 10^6$	0,45
Santoprène 70	0,97	$30 \cdot 10^6$	0,47

Propriétés des différents élastomères

Malheureusement, le temps consacré à cette étape n'a pas été suffisant pour mettre en œuvre des simulations avec une modélisation avancée de ces matériaux en incorporant des effets de viscoélasticité et d'hyperélasticité.

IV) Étude modale de la suspension

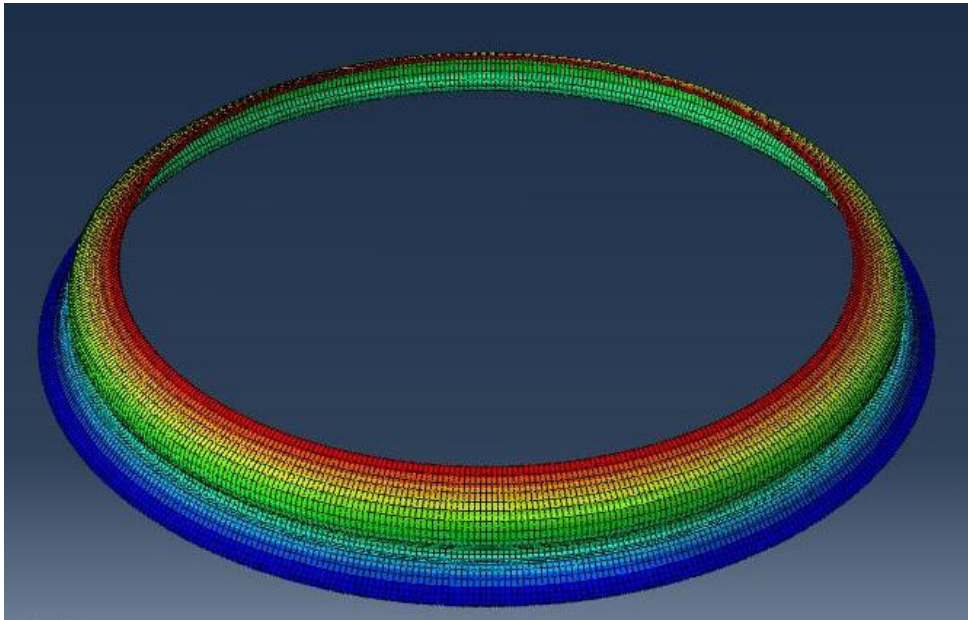
La première étude que nous avons menée a été de trouver les modes de vibrations de la structure. Le but était de déterminer s'il y avait une résonance de la suspension à une fréquence correspondant au spectre audible (20 – 20000 Hz). Nous avons pour cela effectué une recherche de modes avec différents types de maillage, sur notre modèle 3D mais aussi pour le modèle 2D puisque ce type de système est le plus souvent modéliser par ce biais, pour déterminer quelle était la configuration optimale de maillage à utiliser par la suite. La dernier point à noter est que pour la détermination des modes propres, nous n'avons uniquement utilisé la suspension faite en caoutchouc naturel qui nous servira ici de matériau témoin.



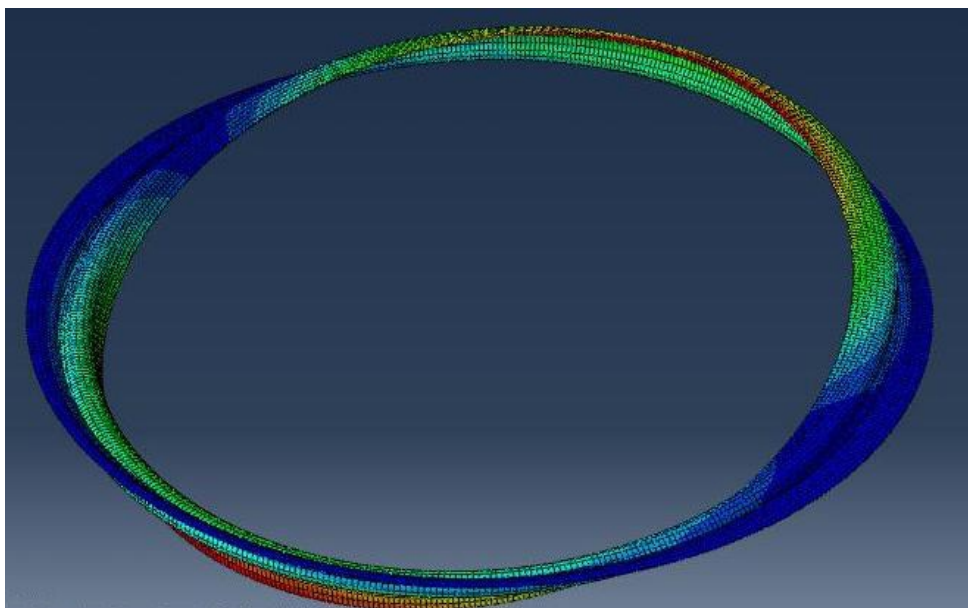
Maillage de la suspension sous Abaqus (Éléments hexaédrique)

Sur les deux prochaines pages, nous avons représenté les six premiers modes propres de la suspension obtenus à partir d'Abaqus.

Les trois premiers modes propres de la suspension

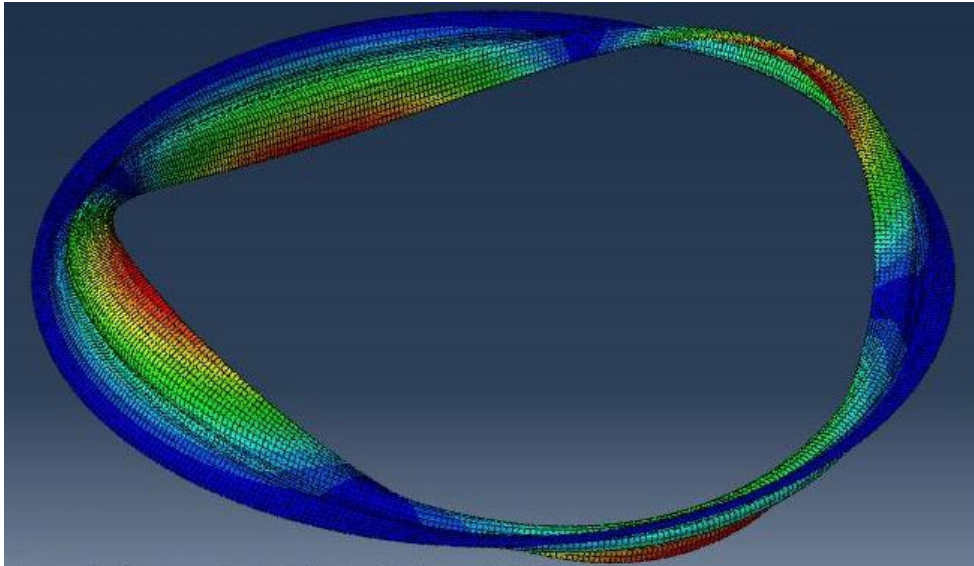


Mode n° 1 (fréquence = 0,26 Hz)

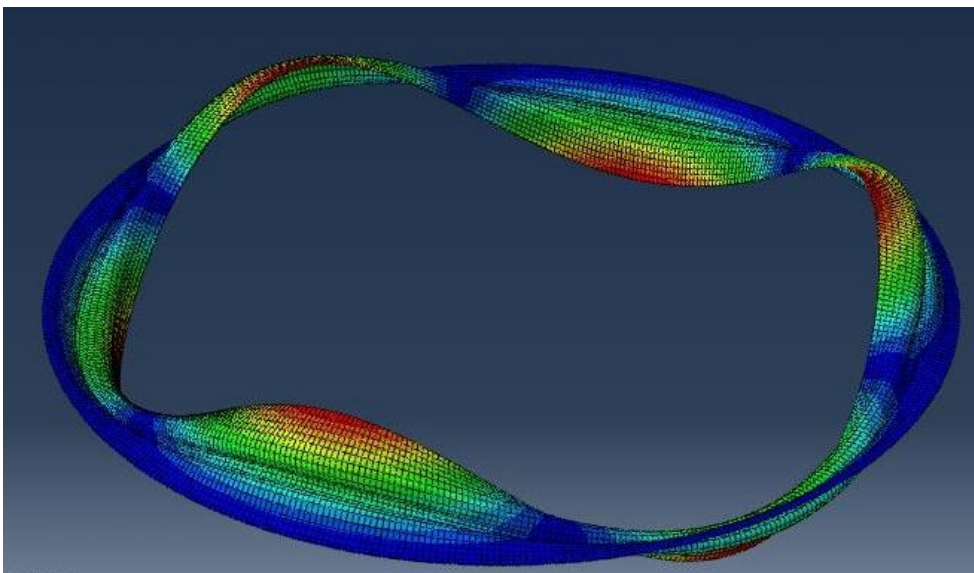


Modes n° 2 et 3 (fréquence = 27,59 Hz)

Quatrième au sixième modes propres de la suspension :



Modes n° 4 et 5 (fréquence = 88,02 Hz)



Mode n°6 (fréquence = 171,45 Hz)

Impact du maillage sur les premiers modes propres de la suspension

Ici, nous avons tenté de voir si le maillage a une certaine influence sur le calcul des modes propres de la suspension du haut-parleur. Nous avons donc calculé les modes propres de la suspension sous Abaqus avec différents maillages en modifiant le type d'élément entre chaque calcul.

Tableau récapitulatif de nos simulations:

Type d'element	Elements	Nombre d'elements	Taille approximative des elements	Approximation	Mode 1	Mode 2	Mode 3	Mode 4	Mode 5	Mode 6
2D	Quadrangle	1078	20	Linéaire	1,8917	44,827	44,854	150,47	150,88	301,96
		1078	20	Quadratique	0,44894	26,761	26,761	99,597	99,6	184,67
	Triangle	980	10	Linéaire	2,8626	48,251	49,446	162,23	164,52	323,41
		980	10	Quadratique	0,48513	23,982	24,068	101,76	101,77	187,66
3D	Hexaedrique	1964	20	Linéaire	1,4060	46,970	49,970	158,09	158,09	344,81
		1964	20	Quadratique	0,26187	27,590	27,590	88,020	88,02	171,45
	Tetraedrique	1800	10	Linéaire	1,6460	49,060	49,060	167,2	167,2	366,44
		1800	10	Quadratique	0,27018	27,940	28,070	88,450	88,61	174,23

Les premiers modes propres calculés pour une suspension en caoutchouc naturel nous permettent donc de mettre en évidence une fréquence de résonance aux alentours de 27 Hz, c'est à dire à la limite du spectre audible dans les très basses fréquences. On peut s'apercevoir également que le maillage choisi a un certain impact sur nos résultats. En effet, en utilisant des éléments 3D linéaires, on obtient des variations de fréquences non négligeables. On peut donc proscrire les éléments linéaires pour les études à suivre. L'utilisation ici d'éléments 2D semble bien appropriée à ce type de structure même si un calcul par éléments 3D quadratique semble plus précis.

Pour la suite de ce projet, pour un minimum de fiabilité dans nos résultats, nous choisirons les éléments hexaédriques quadratiques pour mailler nos différentes pièces.

V) Étude dynamique de la réponse du haut-parleur et de sa suspension

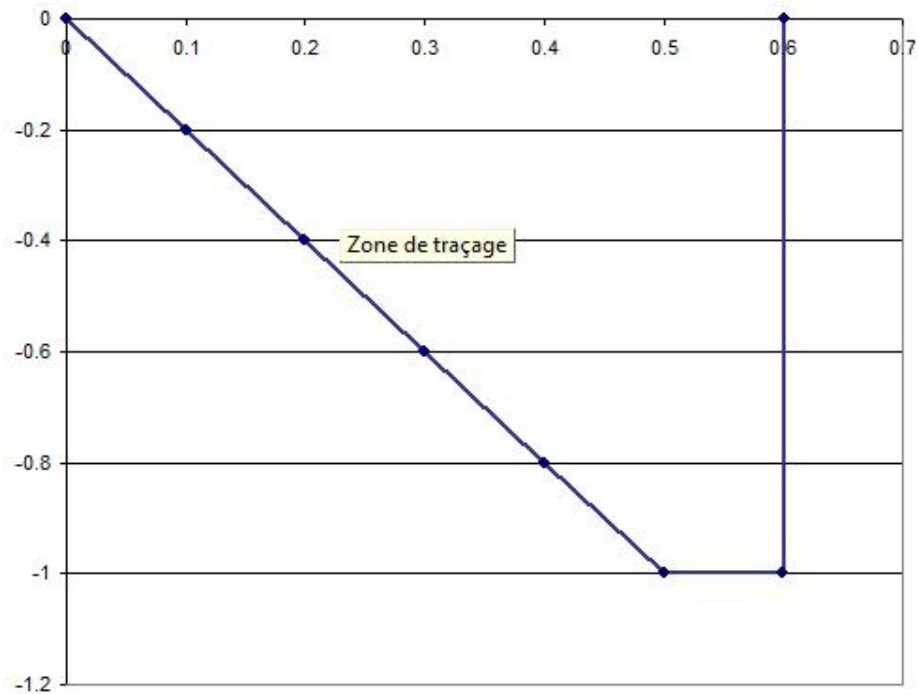
Dans cette dernière partie nous consacrerons notre étude numérique à la réponse fréquentielle de ce haut parleur ainsi que l'impact que peut avoir la suspension sur celle ci et sur l'amortissement global de la membrane. Pour cela nous présenterons tout d'abord la méthode de simulation employée pour cette étude. Puis nous comparerons les réponses de modèle présentant ou non une suspension pour voir l'intérêt de celle ci. Nous verrons ensuite que le choix de l'amplitude de notre condition aux limites peut entraîner des non-linéarités dans la réponse du haut parleur. Finalement nous observerons comment est amorti la membrane du haut parleur en fonction du matériau utilisé pour la suspension.

V.1) *Présentation de la méthode de simulation*

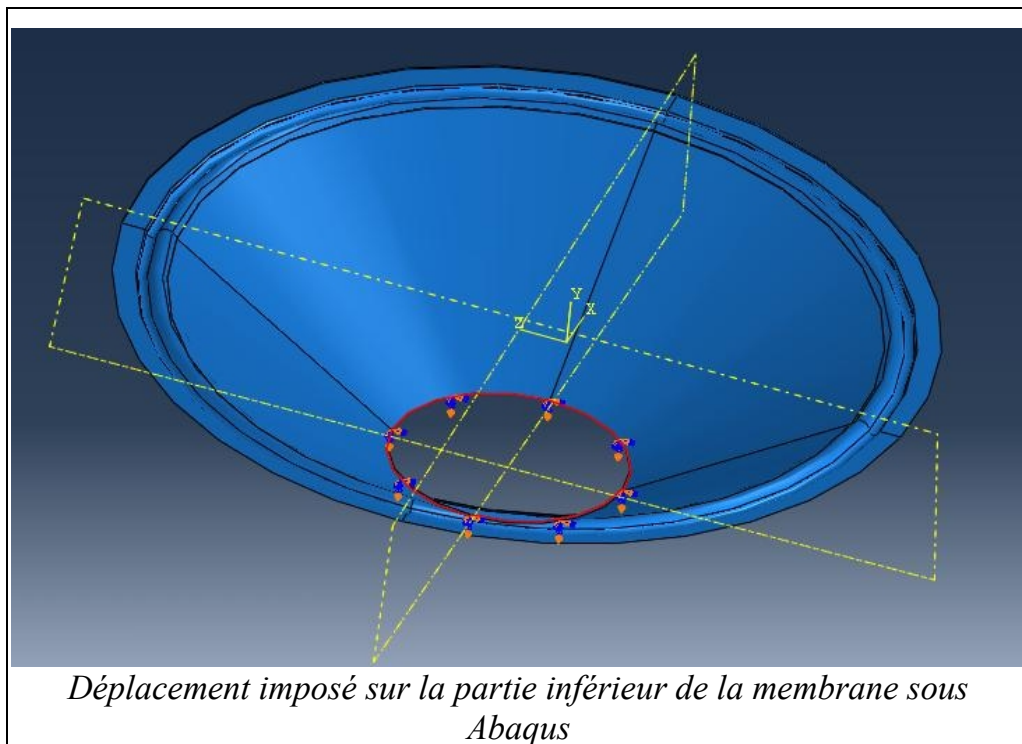
Pour déterminer le comportement et les différentes caractéristiques du haut-parleur, une méthode consiste tout simplement à imposer sous la membrane une force sinusoïdale. En faisant varier cette fréquence on peut obtenir les caractéristiques souhaitées (comme l'amortissement par exemple). Nous avons opté pour une approche plus originale : nous avons appliqué un déplacement forcé de la membrane vers le bas, puis nous avons relâché d'un seul coup. On peut ainsi voir le comportement du haut-parleur, et si on impose un grand déplacement on peut même voir les non-linéarités de la réponse. De plus, une fois stabilisée, la suspension va vibrer en fonction de ses fréquences propres, qui devraient être les même que celles calculées précédemment.

Pour faire cette simulation, nous avons créé une nouvelle condition aux limites composé d'un déplacement vertical imposé sur la partie inférieure de la membrane. Pour définir cette condition aux limites nous avons tabulé une amplitude comme suit :

Temps	Amplitude
0	0*A
0.1	0.2*A
0.2	0.4*A
0.3	0.6*A
0.4	0.8*A
0.5	1*A
0.6	1*A
0.601	0*A



Amplitude du déplacement imposé en fonction du temps



Nous avons choisi ce profil de déplacement imposé puisque si nous avons commencer une simulation avec la membrane déjà tirée vers le bas, des problèmes de stabilités se présentaient. En effet dans cette configuration le membrane vibrait beaucoup lors de nos essais alors que nous n'avions pas encore lâché la membrane.

A cette condition aux limites nous avons affecté trois types d'amplitude globale A pour le déplacement :

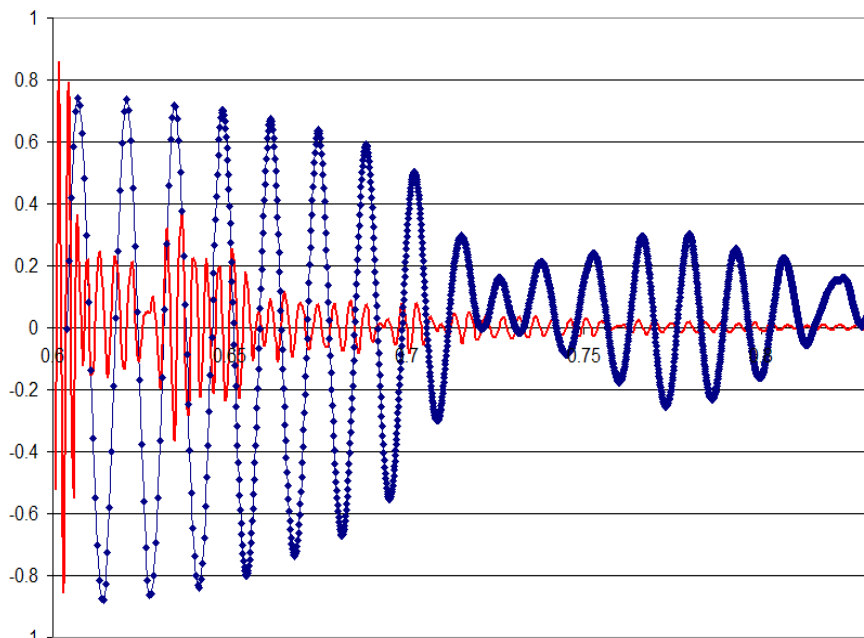
- $A = 0.1\text{mm}$ pour voir le comportement avec une faible perturbation
- $A = 1\text{ mm}$ pour étudier le comportement avec une perturbation moyenne
- $A = 4\text{ mm}$ pour étudier ce comportement mais avec une amplitude forte

Nous verrons par la suite l'impact que peut avoir l'amplitude du déplacement choisi sur la réponse du haut-parleur.

V.2) Intérêt de la suspension

Pour bien comprendre pourquoi ce type de haut-parleur présente une suspension en caoutchouc, nous avons lancé une simulation dynamique sous Abaqus pour un modèle ne comportant que la membrane encastée en son extrémité supérieure.

Nous allons maintenant comparer le résultat du déplacement imposé de cette structure à celle d'un modèle contenant une suspension en caoutchouc naturel. Pour cela on trace dans les deux cas le déplacement moyen de tous les nœuds de la membrane.



Signal obtenu après relâchement de la membrane (Courbe bleu : Modèle avec suspension ; Courbe rouge : Modèle sans suspension)

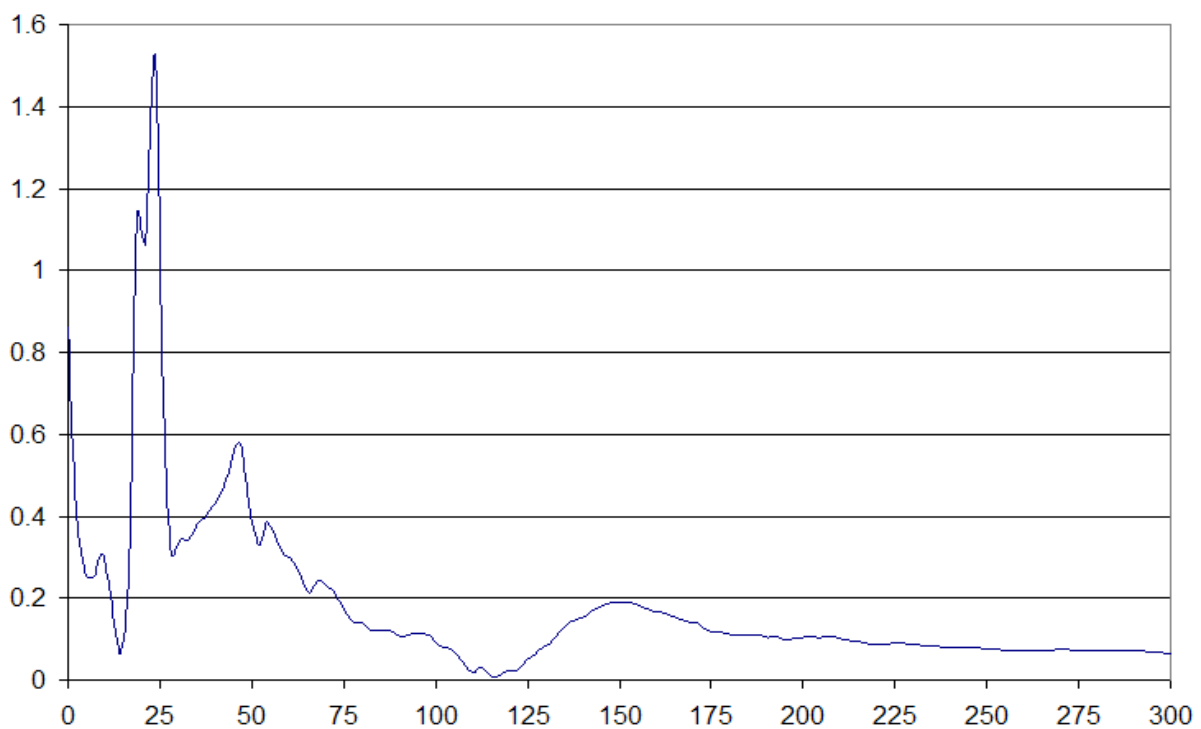
On peut très vite remarquer que dans le cas où la suspension est présente l'amortissement se fait de manière très brutale alors que pour le modèle contenant la suspension l'amortissement se fait sur un laps de temps beaucoup plus long, L'ajout d'une suspension au haut parleur permet un bon amortissement de la membrane lors de son déplacement, permettant ainsi de limiter son usure ce qui entrainerait une détérioration de son.

Mais l'ajout de la suspension n'est pas sans conséquence, puisque comme nous avons pu le voir dans les précédentes pages, celle-ci résonne à très basses fréquences, mais une modification du matériau de la membrane peut permettre de décaler cette fréquence vers le domaine non-audible.

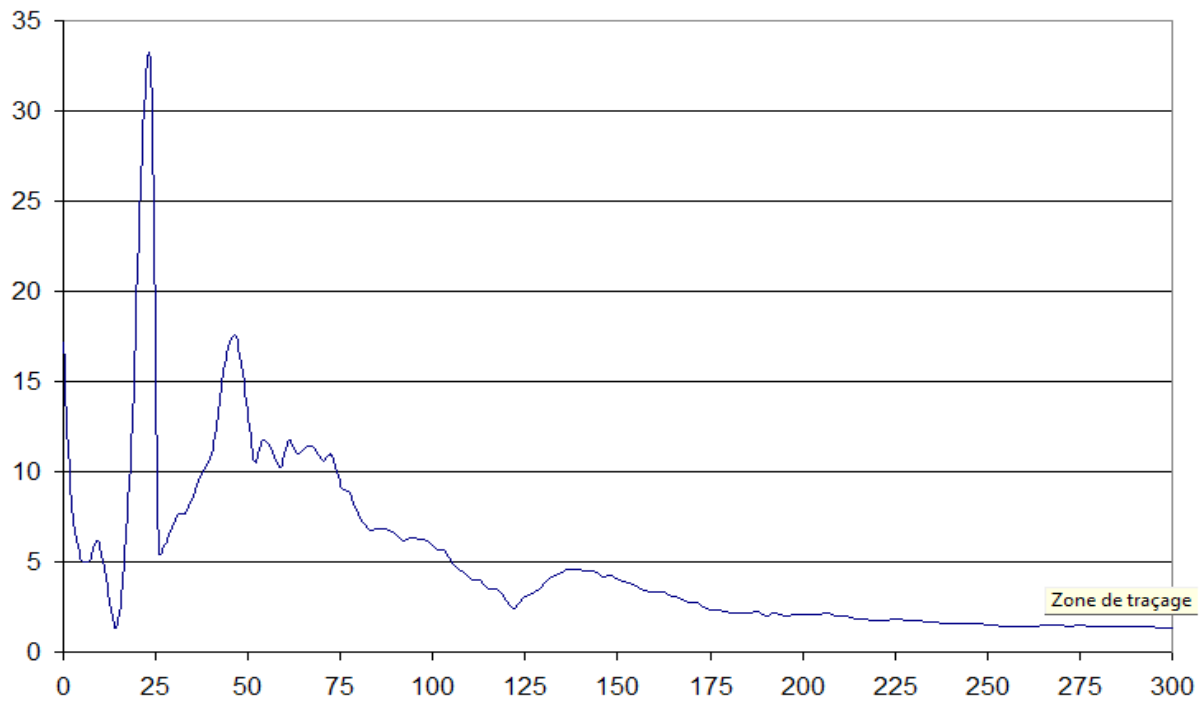
V.3) Effet du déplacement sur la réponse fréquentielle

Nous allons dès à présent tester sur un modèle composé d'une membrane en fibre de carbone ainsi que d'une suspension en caoutchouc naturel, les trois amplitudes de déplacement imposé pour en observer l'impact sur la réponse fréquentielle de ce système.

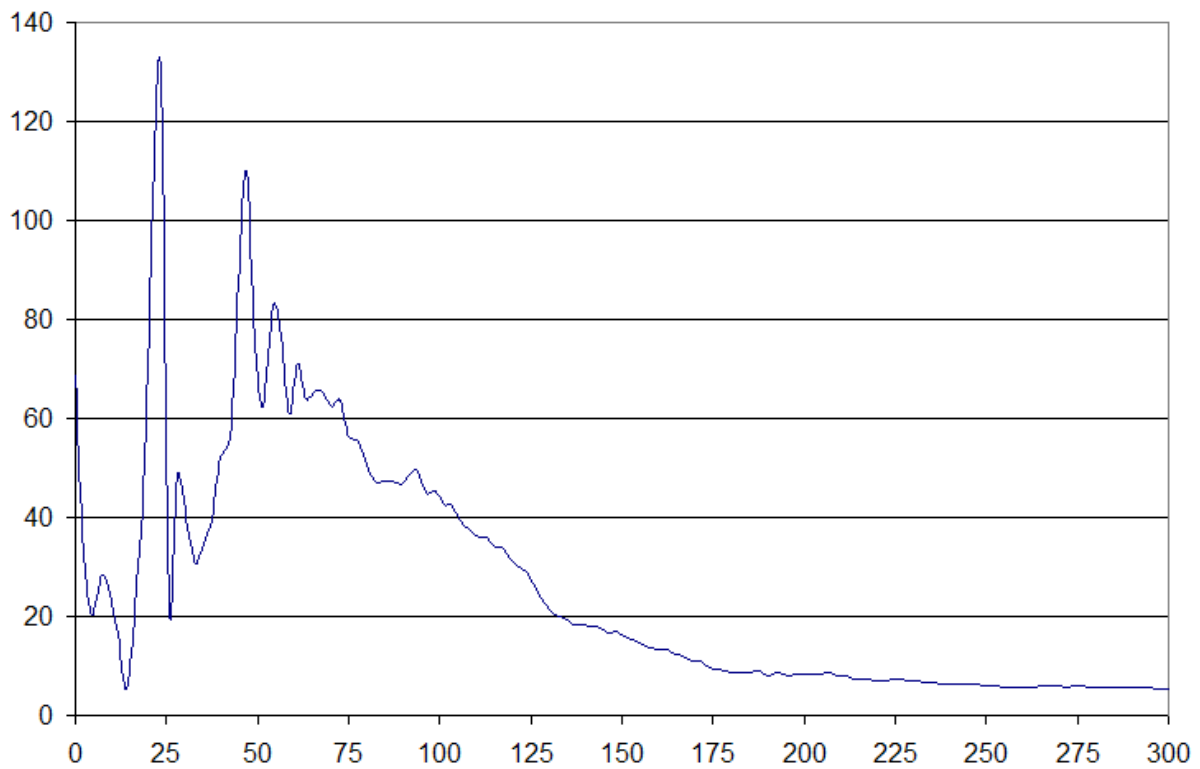
Voici les trois réponse de notre système pour chacune des amplitude imposé (obtenu par transformée de Fourier) :



Réponse spectrale obtenue pour un déplacement minimal



Réponse spectrale obtenue pour un déplacement moyen



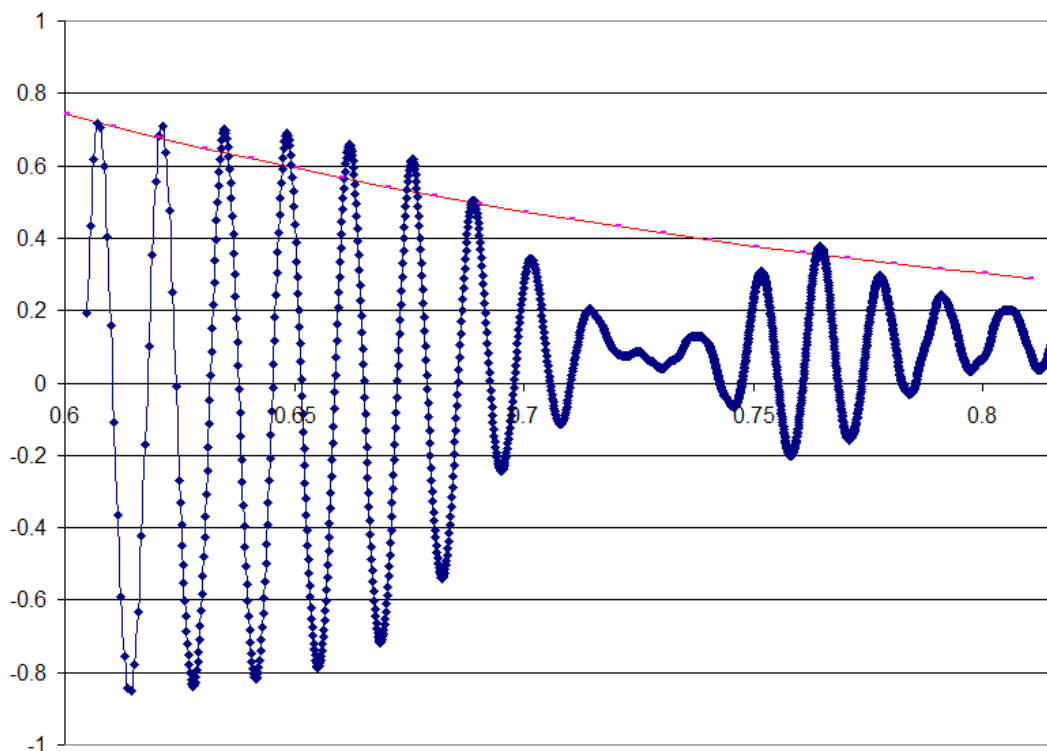
Réponse spectrale obtenue pour un déplacement maximal

Première remarque sur ces différents spectres, on retrouve sur chaque graphique la résonance calculée plutôt au alentour de 27Hz. La résonance de la suspension affecte donc le haut parleur à des très basses fréquences. On peut également observer que lorsque l'on augmente l'amplitude du déplacement imposé des non-linéarités dans la réponse apparaissent faisant apparaître des harmoniques du mode propre de la suspension.

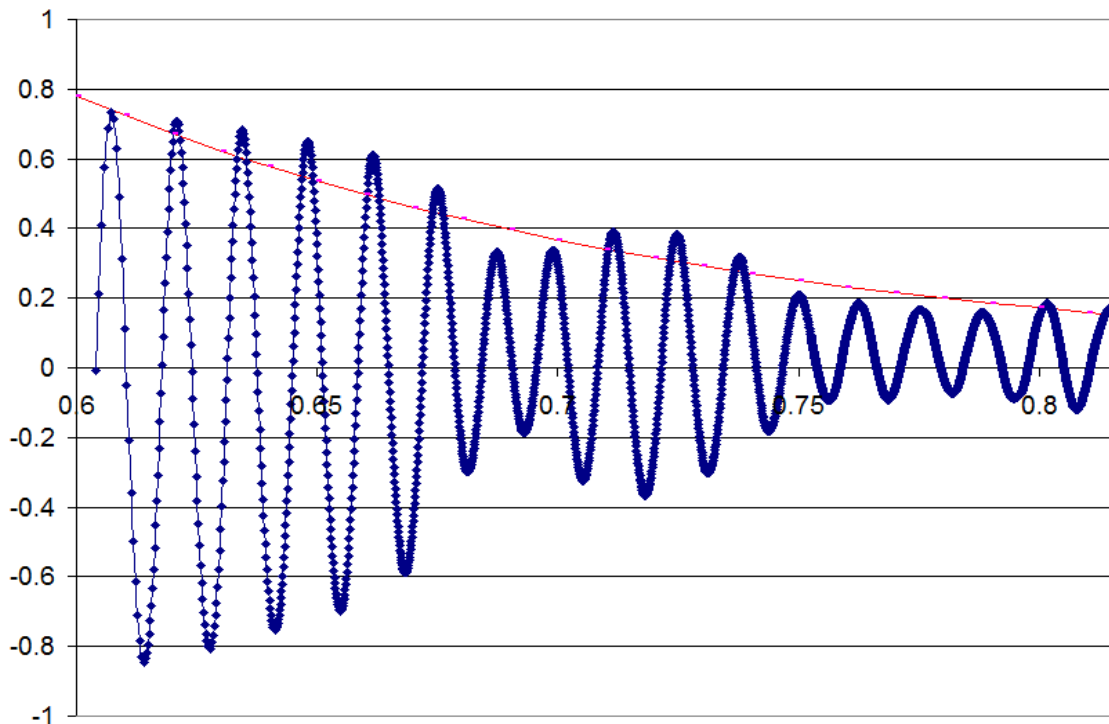
V.4) Réponse et amortissement de la membrane en fonction du matériau utilisé pour la suspension

Dans cette dernière partie nous allons lancer la simulation précédemment décrite pour différents matériaux de suspension et pour une amplitude de déplacement maximale, c'est à dire 4 mm. Le temps consacré à cette étude ne nous a pas permis d'effectuer la simulation avec les trois amplitude précédemment utilisé. Nous allons donc regarder la réponse ainsi que l'amortissement de la membrane. Pour cela nous allons comme précédemment tracer le déplacement moyen des nœuds de la membrane ainsi que la transformée de Fourier du signal associé.

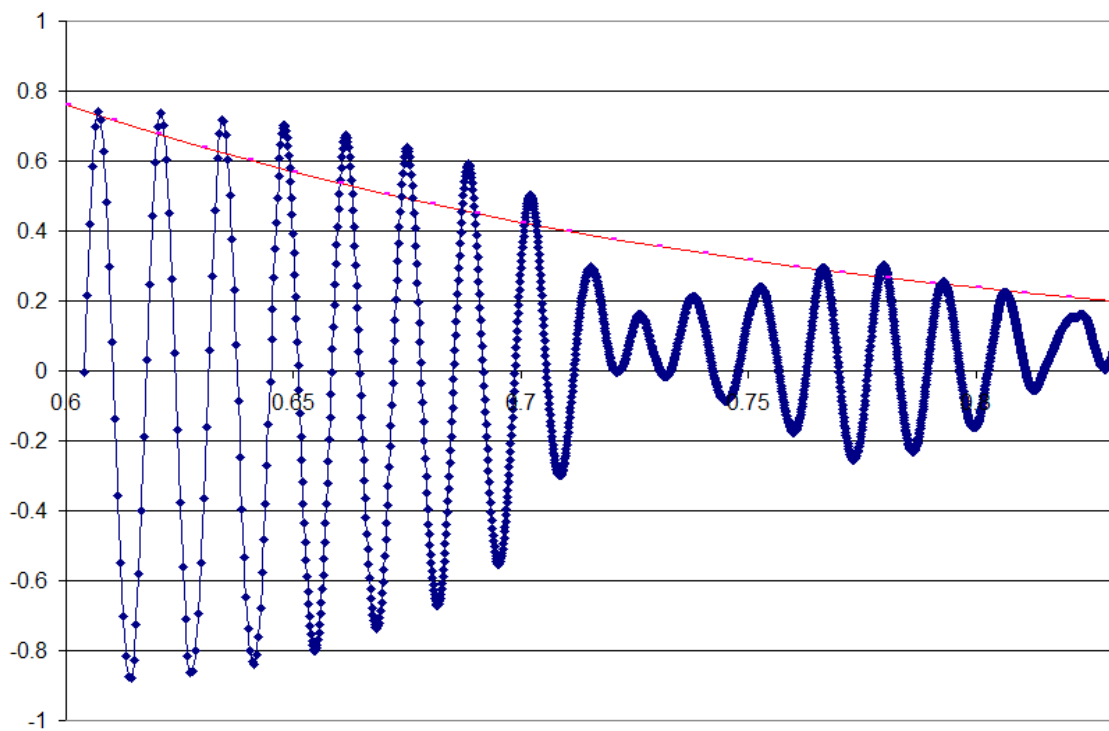
Signaux temporels obtenus après le relâchement de la membrane :



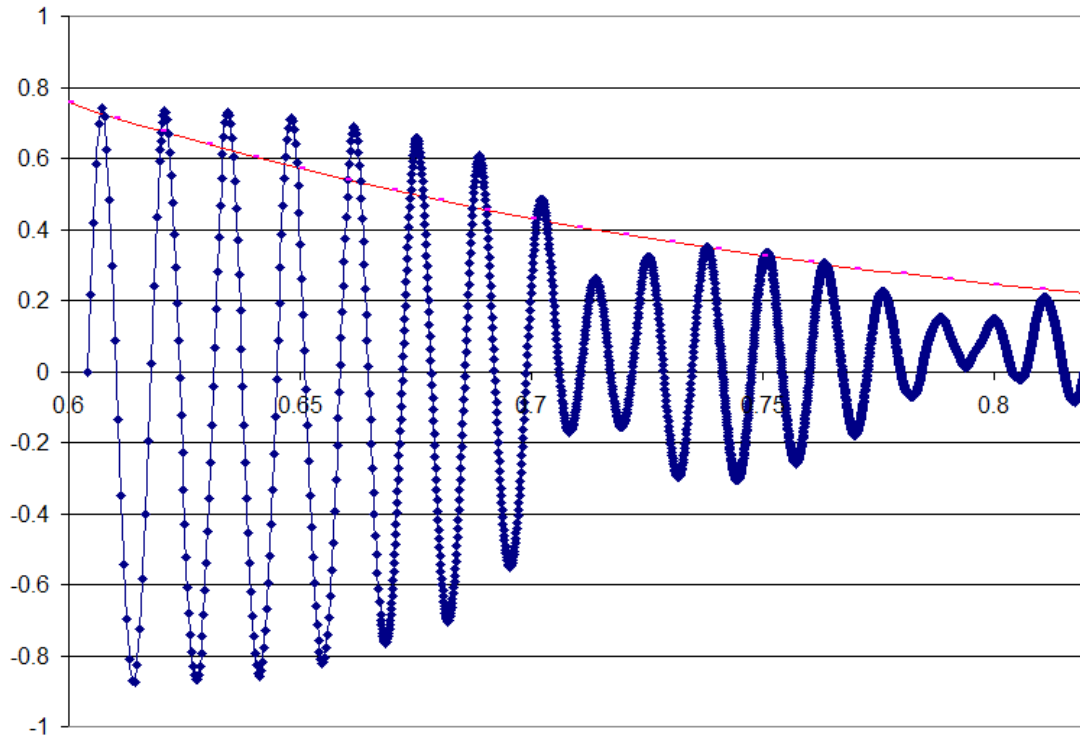
Matériau utilisé : Arnitel EL250 (Taux d'amortissement calculé : 0,22)



Matériau utilisé : Hytrel 3078 (Taux d'amortissement calculé: 0,13)

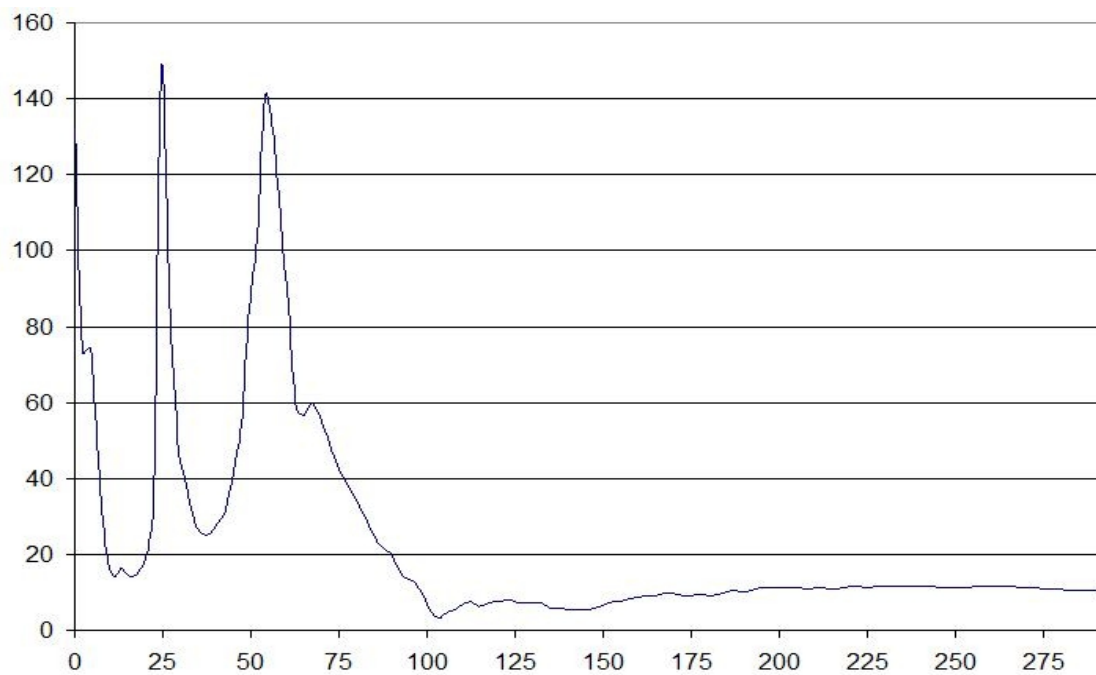


Matériau utilisé : Caoutchouc naturel (Taux d'amortissement calculé: 0,17)

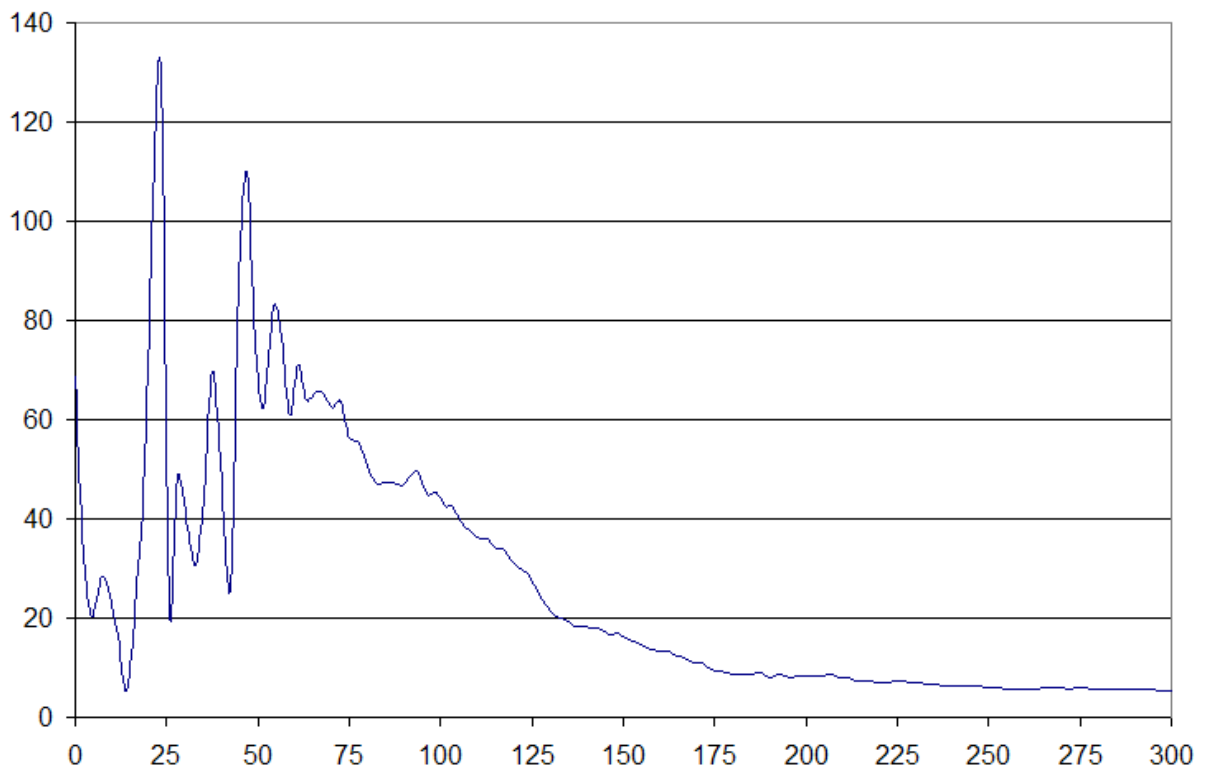


Matériau utilisé : Santoprene 70 (Taux d'amortissement calculé: 0,18)

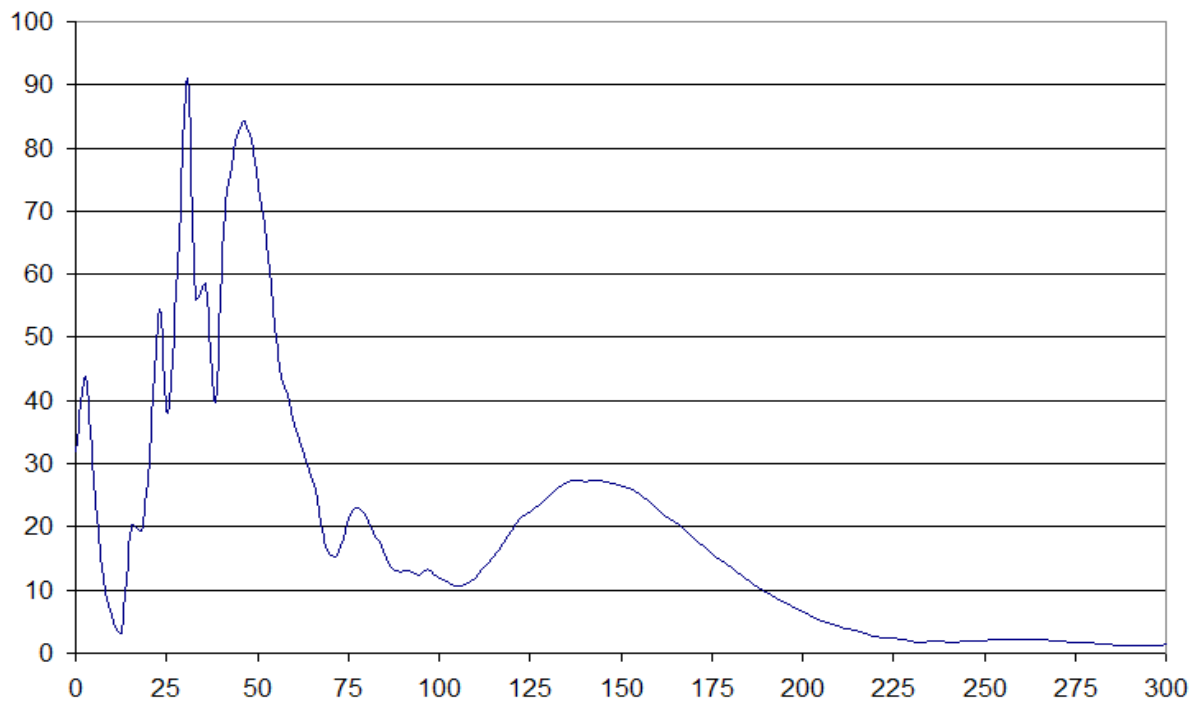
A partir de ces quatre signaux, nous avons ainsi obtenu les réponses spectrales suivantes par transformée de Fourier :



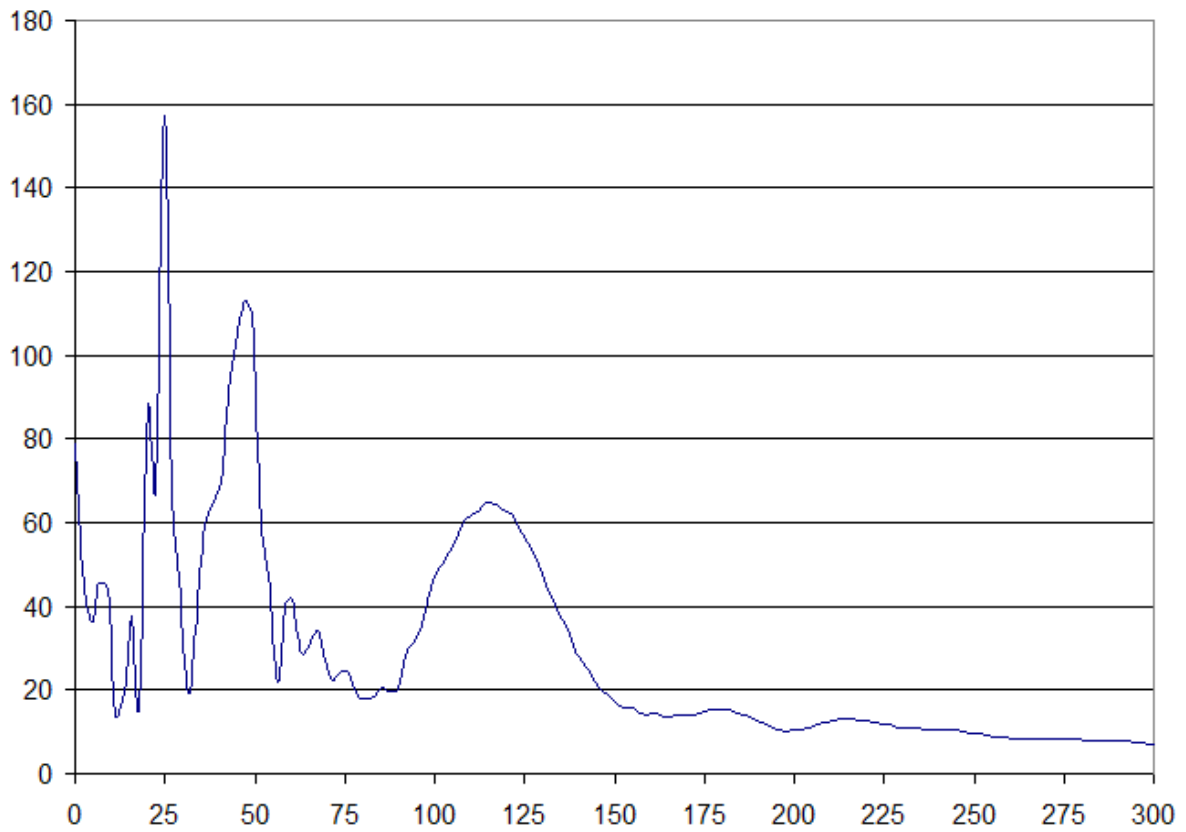
Réponse spectrale obtenue pour le matériau : Arnitel EL250



Réponse spectrale obtenue pour le matériau : Hytel 3078



Réponse spectrale obtenue pour le matériau : Caoutchouc naturel



Réponse spectrale obtenue pour le matériau : Santoprene 70

A partir des signaux obtenus sous Abaqus, nous avons pu calculer, par une méthode de fit en exponentielle décroissante ($e^{-t/\tau}$, avec τ : taux d'amortissement du signal) sur chacune de nos courbes, le taux d'amortissement pour chaque matériau utilisé pour la suspension (la valeur du taux d'amortissement de chaque matériau est en légende des graphiques correspondants). De plus grâce à des logiciel comme Scilab nous pouvons créer un fichier audio de ces signaux en format wave ce qui nous permet de nous rendre compte du bruit réellement généré par la simulation.

En étudiant les spectres de ces mêmes courbes, nous pouvons observer l'impact de la résonance de la suspension sur la réponse finale du haut-parleur. En effet la résonance de la suspension est fortement présente sur tout les spectres étudiés ainsi que quelques unes de ces harmoniques dû à l'amplitude maximale imposée sur la partie inférieure de la membrane comme vu précédemment. On peut également observer que la fréquence de résonance diffère pour chaque matériau utilisé, ainsi les matériaux Hytrel et Arnitel résonnent vers 24 Hz alors que le caoutchouc naturel plutôt vers 28 Hz.

La méthode de simulation développée ici nous a donc permis de remonter jusqu'au taux d'amortissement de chaque matériau utilisé, ainsi qu' à la mise en évidence de la résonance à basse fréquence de la suspension et de son impact sur le haut-parleur tout entier.

A partir de cette étape peut donc être réalisé une étude pour l'optimisation matérielle de la suspension afin de décaler cette fréquence de résonance en jouant sur les propriétés du matériau utilisé pour la suspension.

Conclusion

Au cours de ce projet, nous avons pu mettre en évidence un phénomène de résonance au niveau de la suspension d'un haut-parleur 18" sur la plage fréquentielle 20-30 Hz. De plus nous avons développé une méthode de simulation qui nous a permis de remonter jusqu'au taux d'amortissement de la membrane du haut-parleur ainsi qu'à la réponse spectrale de celui ci dans le domaine des très basses fréquences et ceci en fonction du matériau utilisé pour la suspension.

Pour que cette étude soit complète, certains points pourraient être approfondis. En effet, nous nous sommes rendu compte qu'il aurait peut être fallu tenir compte du couple bobine/spider accroché à la membrane. Nous n'avons pas eu le temps de refaire nos études, mais elles n'auraient pas changé dans leur déroulement, mais il est probable qu'avec la masse de la bobine l'amortissement aurait été plus important.

Le deuxième point à approfondir concernerait la modélisation des matériaux de la suspension. En effet, sur Abaqus il est possible de tenir compte des effets d'hyperélasticités des élastomères composant cette suspension. Cette hyperélasticité peut être à l'origine de phénomènes non linéaires et peut provoquer l'apparition d'harmoniques non désirées qui altèreraient le son. On peut également définir dans Abaqus des lois de comportements spécifiques à un matériau, il pourrait donc être intéressant de trouver des lois régissant le comportement d'un caoutchouc pour pouvoir faire nos simulations.

On pourrait également créer un modèle en thermique, pour prendre en compte l'échauffement de la membrane et de la suspension au cours du fonctionnement du HP ce qui induirait un léger changement de propriétés vibratoires.