

Dimensionnement, conception, réalisation et test d'un système de récupération d'énergie de vibration

Matthieu Denoual, Olivier Clouard
matthieu.denoual@ecole.ensicaen.fr
ENSICAEN, 6 bd Maréchal Juin, 14050 Caen cedex 4

RESUME : Cet article présente une série de travaux pratiques, sous forme de bureau d'étude, dédiée au dimensionnement, à la conception et au test d'un système de récupération d'énergie de vibration. Les objectifs sont : (1) illustrer un enseignement intitulé « énergie pour les systèmes nomades », (2) placer les étudiants face à un problème de dimensionnement et d'optimisation sous contraintes, (3) permettre aux étudiants de concevoir et tester leur propre système.

Mots clés : récupération d'énergie, dimensionnement et optimisation.

1 INTRODUCTION

Cet article présente une série de 4 séances de 2h de travaux pratiques, sous forme de bureau d'étude, consacrée au dimensionnement, à la conception et au test d'un système de récupération d'énergie de vibration. Cette série de TP accompagne un enseignement « énergie pour les systèmes nomades » qui brosse les solutions technologiques pour l'autonomie énergétique des systèmes électroniques (stockage, transfert, récupération). C'est la récupération d'énergie de vibration qui est illustrée à travers ces TP. Cette technique de récupération d'énergie de vibration est étudiée et développée pour des contextes applicatifs particuliers dans lesquels les techniques photovoltaïques ou thermoélectriques plus efficaces ne sont pas applicables.

L'objectif est de récupérer l'énergie de vibration de l'environnement dont les sources peuvent être des équipements électro-ménagers, des machines-outils, des véhicules ou des personnes. Les vibrations mécaniques correspondantes couvrent un domaine spectral de quelques Hertz à quelques centaines de Hertz avec des pics caractéristiques pour les équipements alimentés sur le secteur à 50/60Hz et ses harmoniques. Elles sont caractérisées par des amplitudes d'accélération de quelques m/s^2 [1].

Le principe de la récupération de l'énergie de vibration peut reposer sur un système mécanique résonant associé à un principe de conversion d'énergie mécanique en énergie électrique soit électrostatique (souvent pour des systèmes miniaturisés) soit piézoélectrique le plus souvent. Plus rares, des modules électromagnétiques à bobinage et aimants permanents ont été proposés comme le Perpetuum PMG7. Le système mécanique est conçu pour présenter une fréquence de résonance mécanique proche de celle des vibrations [2].

A travers cette illustration d'une technique de récupération d'énergie de l'environnement (*Energy harvesting*) d'actualité, c'est un problème de dimensionnement et d'optimisation qui est posé aux étudiants. C'est l'occasion pour eux de s'approprier un modèle physique, d'utiliser un outil de simulation pour affiner un dimensionnement, d'optimiser leur conception puis de valider expérimentalement leur prototype. Les étudiants concernés sont en dernière année d'école d'ingénieur.

2 ORGANISATION DES SÉANCES

L'objectif de la série de TP est la conception et le test d'un système de récupération d'énergie optimisé pour une fréquence de travail donnée. Le choix d'une fréquence différente pour chaque binôme d'étudiant garantit un développement autonome de chaque prototype tout en autorisant l'échange de savoir-faire. Depuis 2 ans, les fréquences utilisées sont celles de l'alimentation secteur (50/60Hz) et ses harmoniques (100/120/200/240Hz). Auparavant, nous travaillions avec des fréquences plus élevées (kHz), alors uniquement simulation car ces fréquences de travail conduisent à des structures millimétriques ou plus petites du domaine des microsystèmes non réalisables dans notre établissement [3].

En début de première séance, une fréquence de résonance de travail est donnée à chaque binôme. Leur travail se structure ensuite sous forme de 5 tâches réparties sur 4 séances de 2h. L'organisation est présentée en figure 1. Le cahier des charges est détaillé en section 3.

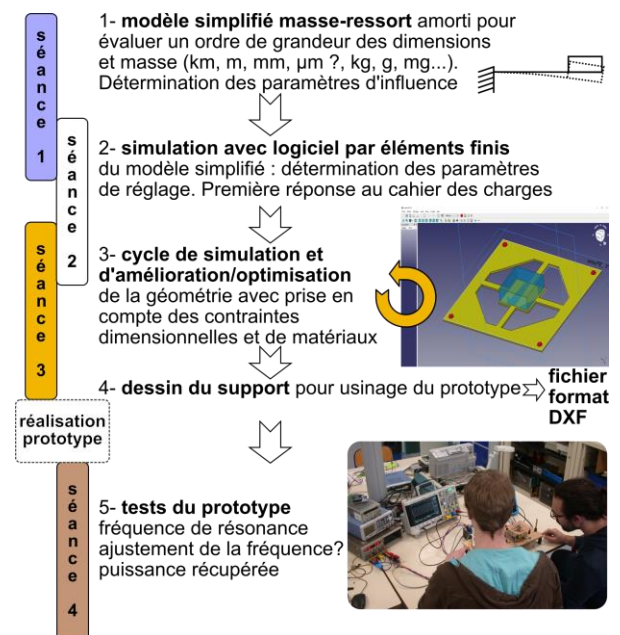


Fig. 1 : Démarche et organisation des séances.

2.1 Appropriation du modèle, ordre de grandeur

La première tâche est l'appropriation d'un modèle simplifié du système mécanique résonant sous forme masse-ressort-amorti. Il s'agit de se remémorer les conditions de résonance d'un système du second ordre, sa fréquence naturelle propre et sa fréquence de résonance. Le modèle simplifié permet également un premier dimensionnement du système. Les étudiants n'ont pas a priori d'idée de l'ordre de grandeur de la dimension et de la masse du système (km, m, mm, μm ? / tonne, kg, g, mg ?). La manipulation du modèle simplifié permet également de comprendre les tendances de variation de la fréquence de résonance (par exemple $\propto 1/\sqrt{m}$, inversement proportionnelle à la racine carrée de la masse, ...). Les **outils utilisés** pour cette appropriation sont soit **papier-crayon** soit un **tableur** soit **Scilab**.

Méthodologie : ① on commence par manipuler des ordres de grandeurs avec des modèles simplifiés et des outils simples (papier-crayon, calculatrice, tableur).

Modèle simplifié de la puissance récupérée pour un système résonant de type masse-ressort-amorti

Le détail de la modélisation est disponible dans [1, 2]. Pour l'évaluation de l'ordre de grandeur, on s'appuie sur un système masse-ressort avec ressort de type poutre comme illustré en figure 2.

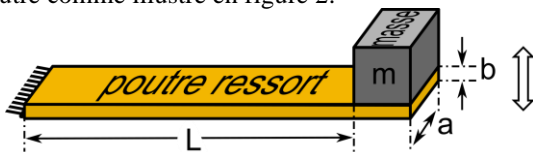


Fig 2 : Modèle simplifié masse-ressort, avec ressort de type poutre (longueur L, largeur a, épaisseur b).

En cas de régime résonant faiblement amorti, la fréquence de résonance est approximée par la fréquence naturelle propre du système.

$$f_n = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{k}{m}}$$

↑ raideur ressort $\rightarrow k = \frac{Yab^3}{4L^3}$
↑ masse $\rightarrow m = \rho V$
↑ dépend des matériaux
↑ dépend de la géométrie

Le maximum de puissance est récupéré à la résonance du système et s'exprime par :

$$|P(f_n)|_{\max} = \frac{m}{32\pi \epsilon_m f_n} A^2(f_n)$$

↑ prop. masse du convertisseur $\rightarrow m$
↑ prop. au carré de l'accélération des vibrations $\rightarrow A^2(f_n)$
↑ inv. prop. à l'amortissement mécanique $\rightarrow \epsilon_m$
↑ inv. prop. à la fréquence des vibrations $\rightarrow f_n$

2.2 Simulation par éléments finis

Un premier dimensionnement de système est ensuite réalisé en introduisant la contrainte la plus forte qui est celle de l'épaisseur du matériau pour le support matériel du système développé. Le premier système dimensionné est demandé sous forme d'un assemblage simple d'une poutre et d'une masse ponctuelle. Ce premier dimensionnement permet une transition entre le modèle analytique simplifié et le simulateur par éléments finis (FEA Finite Element Analysis). La géométrie correspondant au premier dimensionnement du système poutre-masse ponctuelle est entrée dans le logiciel de simulation FEA. Cette étape conforte le modèle simplifié, permet la prise en main du logiciel et valide l'utilisation de la simulation avant d'aller plus avant dans le dimensionnement et l'optimisation.

Méthodologie : ② on commence par utiliser un logiciel de simulation avec un système simple dont on connaît le fonctionnement pour valider la bonne prise en main du logiciel.

Cette démarche est utile pour rappeler aux étudiants, prompts à saisir des schémas électriques complexes ou à taper des dizaines de lignes de codes avant de lancer les premières simulations ou les premiers tests, qu'une démarche progressive est souvent plus rapide et plus gratifiante (moins d'insultes de la part du simulateur ou du compilateur). Elle permet de se mettre en condition de succès. La plupart du temps, la simulation du système simple masse ponctuelle-ressort conduit à une fréquence de résonance très proche de celle obtenue par la formule analytique. Les différences permettent de dériver des problèmes d'erreurs d'unités (g au lieu de kg pour l'unité standard) ou de maillage non adapté pour la simulation (pas assez de maille en épaisseur).

2.3 Optimisation

La suite du travail vise à affiner le dimensionnement en tenant compte de la réalité du système :

- masse non ponctuelle mais répartie,
- point d'ancrage potentiellement multiples,
- prise en compte de la masse du matériau support.

Le modèle simplifié masse ponctuelle-ressort ne permet pas de rendre compte de ces conditions.

La simulation permet étape par étape de s'approcher des conditions réelles du prototype final. Une première étape peut être de passer d'une masse ponctuelle à une masse réelle avec un volume déterminé par sa géométrie et la densité du matériau choisi. Cette modification simple conduit à un écart par rapport au modèle analytique masse-ressort. La compréhension des tendances de variation de la fréquence en fonction de la géométrie et de la masse permet de guider les modifications à apporter au système pour réajuster sa fréquence de résonance à la valeur souhaitée. Le **logiciel** utilisé est **FreeCAD** (illustration en figure 3) qui comme son

nom l'indique est gratuit, par ailleurs ce logiciel bénéficie de nombreux tutoriaux sur le web.

Méthodologie : © le logiciel validé, on peut utiliser sa puissance pour optimiser le système, étape par étape, une contrainte à la fois.

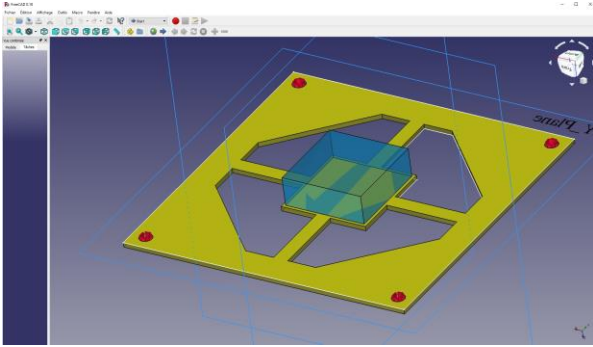


Fig. 3 : Modèle du système masse-ressort sous FreeCAD.

L'optimisation de la puissance récupérée passe par une augmentation de la masse et une augmentation de la raideur en proportion pour maintenir la fréquence de résonance. L'augmentation de la raideur conduit à réduire la longueur des poutres, la limite fixée dépend ici de notre machine d'usinage. La précision de découpe étant de l'ordre du millimètre les dimensions minimales en longueur sont fixées un ordre de grandeur au-dessus, c'est-à-dire à 10 mm.

La symétrisation de la structure permet de réduire les mouvements de torsions parasites et contrôler l'axe de déplacement privilégié de la masse. A partir de là, toutes les optimisations sont faites en simulation car celle-ci, avec un maillage adapté, prend en compte les points d'ancrage, les conditions aux limites et les effets de bords. Le logiciel FreeCAD permet d'obtenir les modes et fréquences de résonance (illustré en figure 4) en tenant compte des améliorations successives et d'évaluer des solutions avec mise en parallèle et/ou en série de ressorts.

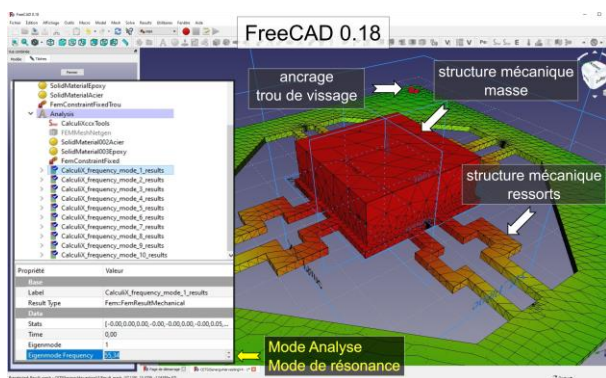


Fig. 4 : Déplacement absolu de la masse du système.

2.4 Dessin de prototype

Le résultat du cycle d'optimisation est une géométrie pour le matériau support qui est fournie sous forme d'un **fichier au format DXF**. Ce fichier sert directement pour l'usinage du PCB (*Printed Circuit Board*, circuit imprimé) de chaque binôme.

2.5 Tests et caractérisation

Le PCB est fourni en début de dernière séance aux étudiants pour qu'ils réalisent leur prototype en assemblant la masse et pour qu'ils puissent tester l'ensemble. La masse est constituée de masselottes élémentaires sous forme d'aimant parallélépipédiques. Cette technique présente plusieurs avantages : (1) il n'y a pas besoin de fixation (les aimants de part et d'autre du support se maintiennent), (2) la masse peut être ajustée au quantum d'aimant près, (3) l'ensemble est démontable et réutilisable (4) les aimants permettent de fixer les éléments piézo-résistifs utilisés pour la conversion d'énergie. La figure 5 illustre un exemple de réalisation associée au banc de test.

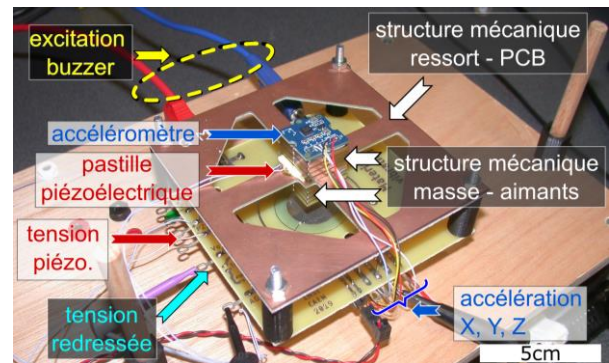


Fig. 5 : Exemple de prototype réalisé.

Le test consiste en une caractérisation de la fréquence de résonance et une validation de la récupération d'énergie par le système. L'utilisation de masselottes permet un ajustement de la fréquence de résonance par ajout ou retrait de masse. Elle permet aussi une étude de la variation de la fréquence de résonance en fonction de la masse de façon à confirmer la variation théorique en $1/\sqrt{m}$. Le banc de test est illustré en figure 6.

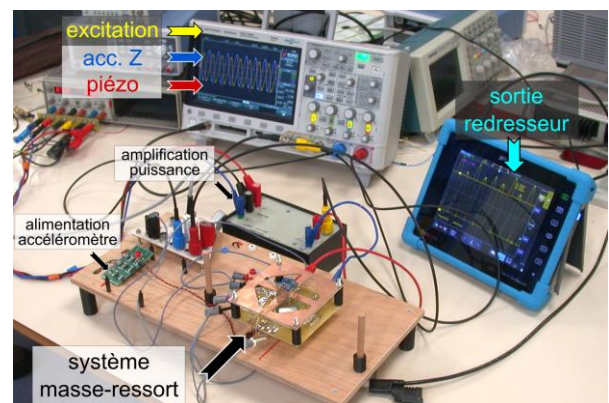


Fig. 6 : Banc de TP pour la partie expérimentale.

Méthodologie : ④ l'évaluation du prototype permet un retour sur la modélisation et la simulation et peut conduire à de nouveaux cycles de conception/simulation/réalisation/test pour optimiser le système.

La figure 7 illustre les relevés typiques qui peuvent être obtenus lors de la caractérisation, avec notamment la réponse en fréquence du système, l'observation des signaux temporels d'excitation et d'accélération de la structure. L'énergie est récupérée à partir d'éléments piézo-résistifs contraints lors du déplacement de la structure. La tension générée aux bornes de l'élément piézorésistif peut être observée. L'énergie produite peut être visualisée après un pont redresseur ou à travers la charge d'une capacité.

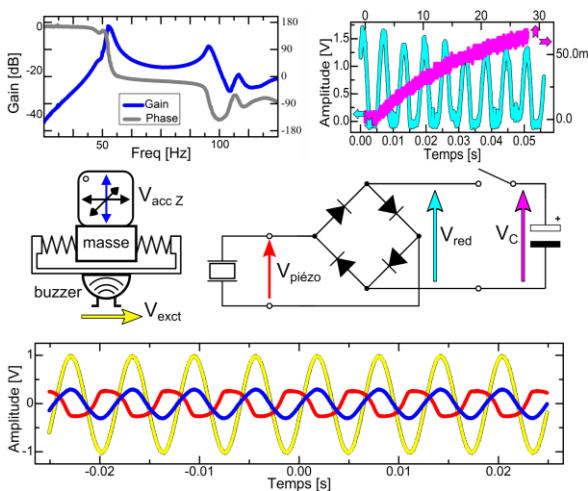


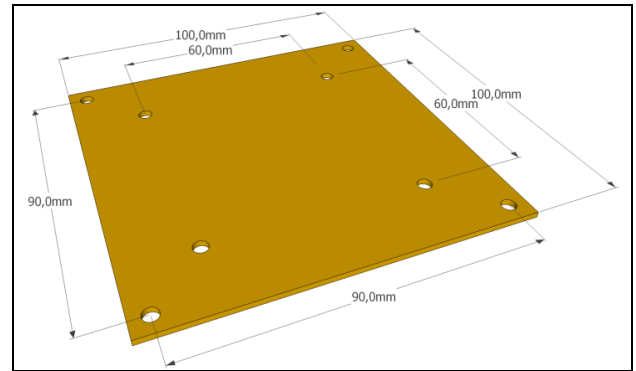
Fig. 7 : Allures typiques des signaux et enregistrements lors de la caractérisation du prototype.

3 CAHIER DES CHARGES

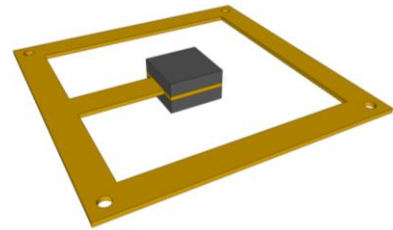
Le système développé doit tenir dans un volume de 100 mm×100 mm×50 mm. Le système est intégré à son environnement par vissage. Les configurations proposées pour le vissage (trous de Ø5 mm espacés de 60 mm ou espacés de 90 mm) compatibles avec les supports vibrant de test sont illustrées dans le dimensionnel de la plaque support du système dans la figure 8.

Le matériau support pour la structure (cale) est de l'époxy pour les cartes électroniques. Des plaques de 1.6 mm d'épaisseur sont utilisées.

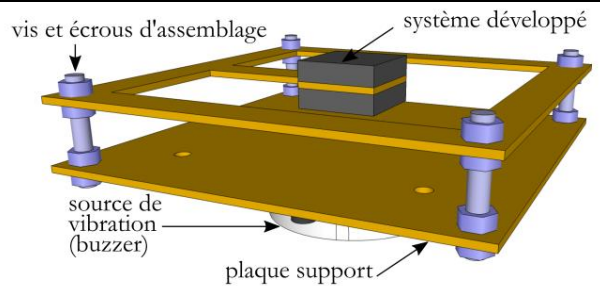
Ce matériau est mis en forme par usinage avec des forets de 0.8 mm de diamètre pour définir la forme du cadre et du ressort reliant la masse au cadre. Un fichier en format DXF doit être fourni en fin de 3^{ème} séance pour l'usinage du support.



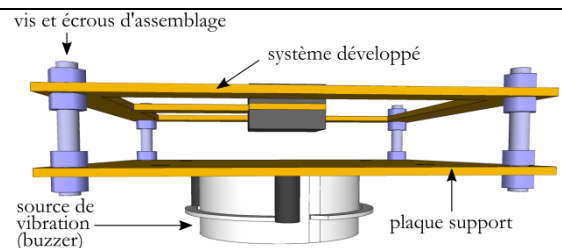
Dimensions limites (100mm) et positionnement des trous de fixation pour la cale du système développé.



Exemple à titre indicatif de système vibrant réalisé à partir du carré de matériau de 100mm×100mm.



Vue de 3/4 de l'ensemble support vibrant et système développé.








Vue de côté du support vibrant et du système développé.

Fig. 8 : Contraintes géométriques et d'assemblage au support vibrant.

Le module d'Young du matériau époxy est caractérisé à 6 GPa pour des plaques de PCB.

La masse peut être réalisée à partir d'aimants en néodyme parallélépipédiques.

Les éléments piézorésistifs disponibles pour la conversion de l'énergie mécanique en énergie électrique sont soit des disques de quartz, soit des rectangles de polyfluorure de vinylidène.

Nature	Matériau	Caractéristiques	Illustration
Matériau support	époxy	épaisseur 1.6 mm, densité $\sim 1.6 \text{ g/cm}^3$ $Y \in [3.5-24 \text{ GPa}]$	
Matériau pour masse	aimant néodyme	10 mm×10 mm×3 mm $\sim 2.2 \text{ g}$	
Matériau piézoélectrique pour conversion énergie	quartz	$\varnothing 15 \text{ mm} \times 0.75 \text{ mm}$ réf RS 134-7301	
	PVF2	25 mm×13 mm 10 mV/ms^{-2} Farnell 1007374	
Source de vibration	buzzer	4 Ω , 30 W	

Tab 1 : Matériel pour la réalisation du prototype.

4 CONCLUSION

L'objectif de cette série de TP, mis à part l'illustration d'un enseignement relatif à la récupération d'énergie, est de mettre en œuvre une démarche de conception et d'optimisation progressive, et de faire en sorte que les étudiants prennent confiance dans l'utilisation de logiciels de CAO conçus pour aider la conception. Certains étudiants concluent parfois de façon péremptoire que « les outils de simulation ne sont pas assez précis » ou « fournissent des résultats aberrants ». Il s'agit souvent de mauvaise utilisation de l'outil ou de mauvais dimensionnements initiaux. Dans cette série de TP, la simulation la plus intéressante est celle du modèle simplifié masse ponctuelle-ressort car elle conduit à des valeurs numériques très proches de celles données par le modèle analytique.

Cela constitue une étape importante dans la confiance envers le logiciel. Les cycles d'optimisation ultérieurs étape par étape permettent de conserver un suivi attentif des effets de chaque optimisation et de corroborer leurs cohérences avec les tendances attendues en théorie.

En règle générale, les étudiants sont contents de développer un système du début à la fin. C'est le cas ici avec le prototype réalisé selon leur dessin de conception. Le fait d'avoir des cahiers des charges individualisés pour chaque binôme (fréquences différentes, fondamental 50/60Hz et harmoniques) leur permet d'échanger sur la méthode, l'utilisation des outils mais les oblige à adapter les variables et grandeurs. C'est une source de liberté dans la conception et leurs designs sont souvent originaux (exemple en figure 9).

Bibliographie

- [1] S. Roundy, P. K. Wright, J. M. Rabaey "Energy scavenging for wireless sensor networks", *IKluwer Academic Publisher*, (2004).
- [2] Claire Jean-Mistral, Skandar Basrour, "Récupération de l'énergie des vibrations mécaniques pour générer de l'électricité", *Techniques de l'ingénieur, Energies | Conversion de l'énergie électrique*, (2010), Réf: RE135v1.
- [3] Yoshio Mita, Manasori Kubota, Matthieu Denoual, Eric Lebrasseur, Tomoki Sawamura, "MEMS de Piano, un TP de conception, de fabrication et test de résonateur MEMS", *Actes du Colloque sur l'Enseignement des Technologies et des Sciences de l'Information et des Systèmes (CESTIS), Besançon (France), Novembre 2014.*

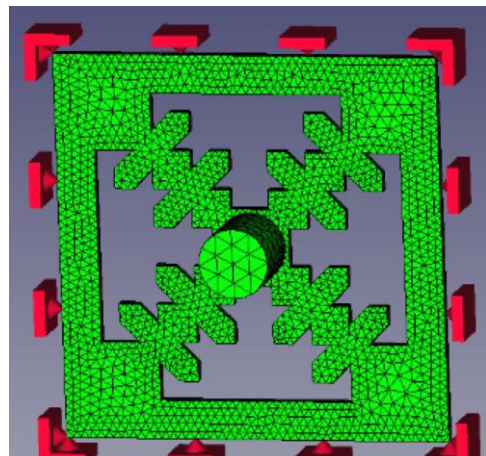


Fig. 9 : Exemple de design original (édition 2020). Cette structure flocon conduit à un pic de résonance plus étroit que les géométries standards.