



FLORIAN FEPPON (2012)

COMMENT FAIRE VIBRER UN X

C'est avec une légère angoisse de la page blanche que nous avons commencé notre PSC, projet scientifique collectif de 2^e année. L'École nous avait annoncé plus ou moins avec le sourire en septembre 2013 que nous avions neuf mois pour créer un démonstrateur technologique susceptible de donner lieu à une *start-up*, ou bien d'apporter des résultats de recherche significatifs sur un sujet non encore étudié, exemples de PSC 2011 primés en guise de preuve que cela est possible.

Que s'est-il passé concrètement pendant ces neuf mois ? Nous sommes tout d'abord cinq élèves X 2012 unis par le souhait commun d'effectuer un PSC de physique dans le domaine des ondes. La première bonne idée que nous avons eue a été d'obtenir conseil auprès du laboratoire PMC (Physique de la matière condensée) localisé à l'École polytechnique. Nous avons de la sorte été orientés sur les travaux récents de Marcel Filoche (82), devenu notre tuteur, et de sa collègue mathématicienne Svitlana Mayboroda, professeur à l'université du Minnesota.

COMMENT innover pour innover ? Comment choisir un sujet de recherche avec l'objectif de découvrir quelque chose de nouveau ? Le tout dans un temps limité ? Heureusement, les opportunités ne manquent pas à l'X et c'est de manière finalement assez naturelle que nous avons trouvé notre sujet et mené sa réalisation.

En neuf mois, notre groupe, avec l'aide de son tuteur et d'autres chercheurs, est parvenu à poser les bases d'une méthode totalement nouvelle d'ingénierie des vibrations, issue de travaux extrêmement récents et jamais appliqués dans l'industrie.

Nous avons prouvé son efficacité aussi bien numériquement qu'expérimentalement sur un problème modèle simple qui a valu à notre projet d'être retenu parmi les trois PSC primés cette année.

PRÉDIRE LA LOCALISATION DES VIBRATIONS

Nous nous sommes intéressés au problème du contrôle de la *localisation* des vibrations. Ce thème est par exemple omniprésent dans l'industrie, où l'on s'efforce de concevoir des structures capables de se protéger contre des vibrations indésirables, de maîtriser leur répartition spatiale et spectrale, ou encore d'optimiser la fatigue des matériaux.

Tout d'abord, on entend par localisation le fait qu'à l'intérieur d'une structure complexe ou hétérogène, les

vibrations peuvent avoir tendance à se concentrer en des endroits différents en fonction de la fréquence ou du mode d'excitation. Or, jusqu'à présent, ce phénomène de localisation reste essentiellement imprévisible et mal maîtrisé. Les méthodes utilisées pour s'en prémunir ou pour le contrôler sont donc essentiellement fondées sur des méthodes empiriques.

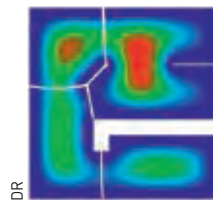
En 2012, Marcel Filoche et Svitlana Mayboroda découvrent qu'il est en fait possible de prédire la localisation des vibrations. L'idée est assez simple : prenez par exemple une plaque mince en métal ayant une géométrie aussi complexe

que vous le souhaitez. Appliquez une pression uniforme sur cette plaque et considérez les lignes de plus forte résistance (celles où la déflexion locale de la plaque est minimale). La théorie développée démontre que les vibrations ont alors tendance à se localiser dans les zones bordées par ces lignes, les lignes de plus forte résistance chassant en quelque sorte les vibrations. Contrôler

la localisation des vibrations revient alors à contrôler la géométrie de ces zones. Mais le grand intérêt de leurs résultats est que ces lignes sont calculables numériquement assez facilement et que le résultat se généralise à tout système vibratoire. Les vibrations étant omniprésentes en physique, il n'a pas été

difficile d'être immédiatement séduit par la théorie.

« Poser les bases d'une méthode nouvelle d'ingénierie des vibrations »



Les zones de localisation pour une plaque à géométrie complexe¹.

COMMENT LOCALISER UN X

Nous avons alors rapidement voulu tenter d'appliquer cette théorie, qui n'avait jusque-là été vérifiée que numériquement, à la résolution d'un problème inverse: est-il possible de définir d'abord les caractéristiques vibratoires d'un système, puis d'en déduire sa morphologie? En d'autres termes, quelles contraintes doit-on imposer pour délimiter les zones de localisation dès la conception du système? Avec notre tuteur, nous avons alors eu l'idée amusante de déterminer les contraintes qui permettraient par exemple de localiser un « X » dans une plaque, en référence à l'École.



DR

La plaque ayant servi au montage expérimental.

CONTRAINDRE LE PROBLÈME

Le problème qui s'est alors posé et qui s'est peut-être révélé le plus difficile à résoudre a été de *bien contraindre le problème*. Une solution triviale pour localiser un X est par exemple de bloquer intégralement son contour: cela n'est pas une solution acceptable. Nous avons donc restreint le problème qui comptait trop de degrés de liberté à la question suivante: comment localiser les vibrations au sein du X en altérant au minimum la plaque, par exemple, en se donnant la possibilité de ne bloquer qu'un nombre fixé de points?

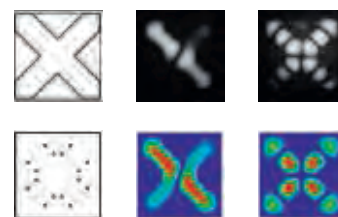
En quelques mois, nous avons alors dessiné ce X, développé une méthode nous permettant de calculer numériquement la position optimale de 4 ou 16 points de blocages, puis réalisé les plaques avec les points bloqués correspondants. Quelle satisfaction de voir quelques semaines plus tard notre « X » vibrer dans la plaque conformément à nos attentes sur les instruments de mesure.

UNE MÉTHODE GÉNÉRALISABLE

Bien évidemment, le problème résolu peut paraître relativement simpliste, mais l'intérêt de notre méthode est qu'elle semble généralisable et même applicable à des systèmes industriels. Nous devons également concevoir un système compatible avec l'expérimentation. Il s'agissait donc plus de placer le problème à notre portée que de restreindre l'objectif.

Nous ne nous sommes bien sûr pas limités au X et avons également appliqué notre méthode pour des formes ayant moins de symétries ou pour une plaque d'épaisseur variable.

Que retenir finalement de ce projet de recherche à l'X? Qu'une petite période d'angoisse au début est naturelle, voire nécessaire, et que définir précisément son cadre de travail est l'une des étapes les plus délicates. S'il y a bien une chose que nous ayons également constatée, c'est que les résultats et les idées ne tombent pas du ciel mais proviennent de rencontres et de l'expérience de chacun. Nous avons eu l'extrême chance de pouvoir être mis en relation avec l'équipe de Patrick Sebbah de l'Institut Langevin à Paris, et notamment avec Michaël Atlan, chercheur de l'Institut Langevin ayant développé un outil de mesure qui est l'un des meilleurs du monde dans son domaine, sans lequel nous n'aurions peut-être jamais pu disposer de la précision et du temps nécessaire pour réaliser nos expérimentations.



DR

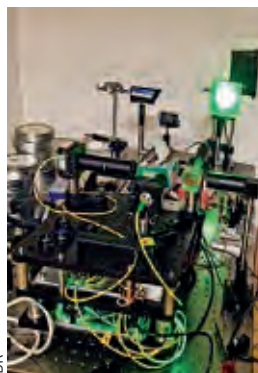
À gauche, le X dans lequel on souhaitait localiser les vibrations et la configuration à 16 points optimale. À sa droite, des acquisitions expérimentales de modes de vibration confrontés à des simulations numériques.

LE JEU EN VALAIT LA CHANDELLE

Travailler tous ensemble aura été une grande expérience. Nous étions plusieurs membres très perfectionnistes (peut-être parfois trop) et avons passé de nombreuses heures à peaufiner travail numérique et expérimental, rapport, article de recherche et présentations. Concilier ce projet avec cours, rendu d'autres projets et binets n'a pas toujours été aisé.

Le jeu en a valu la chandelle par la satisfaction d'avoir beaucoup appris, que ce soit en mathématiques pures ou appliquées, en physique théorique et expérimentale. Quelle chance de disposer des connaissances nécessaires pour « goûter » la théorie! Aujourd'hui, le projet est poursuivi sur le plan expérimental par l'équipe de l'Institut Langevin. Bien évidemment, du travail reste à accomplir pour transformer la méthode développée par ce projet de recherche en outil industriel. ■

« Les résultats et les idées ne tombent pas du ciel mais proviennent de rencontres »



DR

Le dispositif de mesure.

1. Image reproduite d'après Marcel Filoche et Svitlana Mayboroda, "Universal Mechanism for Anderson and Weak Localization". *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 109(37) :14761-14766, 2012.

PSC réalisé par Maxence Ernoult, Aimé Labbé, Alix Garelli, Florian Feppon et Camille Gillot (2012).