

LA PRÉCISION COMMENCE À LA BASE : CHOISIR LA BONNE TABLE OPTIQUE

Guofeng SUN¹, Dalila AIT AMIR^{2,*}

¹ Senior Product Marketing Manager Newport Products

² Senior Sales Manager Newport Products, France

*Dalila.AitAmir@mks.com



<https://doi.org/10.1051/photon/202613651>

Les tables optiques servent de support commun pour des ensembles opto-mécaniques complets. Ces plateformes, conçues avec une précision extrême, offrent une surface stable et isolée des vibrations pour réaliser des expériences optiques sensibles et maintenir un alignement précis, garantissant ainsi la performance fiable des composants optiques tels que les lasers, miroirs et lentilles. Dans cet article, nous examinons les paramètres clés à prendre en compte lors du choix d'une table optique pour des applications photoniques avancées exigeant une stabilité exceptionnelle et une isolation vibratoire optimale.

Dans le domaine de la photonique, même les plus légères vibrations peuvent perturber la propagation des faisceaux laser, compromettant à la fois la précision expérimentale et l'efficacité de fabrication. Pour préserver l'intégrité des systèmes optiques, il est essentiel d'isoler le trajet optique des perturbations environnementales susceptibles de provoquer des désalignements. Les tables optiques constituent la base pour concevoir des configurations optiques stables et extrêmement précises. Au cours de la dernière décennie, le développement rapide des

technologies quantiques a intensifié la demande de tables optiques haute performance pour des applications scientifiques de pointe. Étant donné la sensibilité extrême des configurations photoniques modernes et les efforts considérables investis dans leur conception, les tables optiques doivent répondre aux normes les plus élevées en matière de précision et de stabilité mécanique.

DÉFINITIONS ET PRINCIPES DE CONCEPTION

Un système de table optique désigne un ensemble d'isolation vibratoire comprenant un plateau et support (voir Figure 2). L'objectif principal d'un système de table optique est de minimiser les mouvements relatifs

entre les composants sensibles à la position sur la surface de travail de la table. Le support isolateur de vibrations est conçu pour filtrer les vibrations provenant du sol avant qu'elles n'atteignent le plateau et ne perturbent le trajet du faisceau optique. La structure en nid d'abeilles de la table optique est conçue pour résister rigidement à toute déformation causée par des charges mobiles ou par des vibrations traversant le système d'isolation.

Selon l'application, plusieurs aspects critiques doivent être pris en compte lors du choix d'une table optique :

- **Amortissement et isolation des vibrations** – Capacité à isoler l'installation expérimentale de toute perturbation.

- **Propriétés des matériaux** – Choix approprié des matériaux pour garantir la stabilité mécanique et la compatibilité.
- **Personnalisation et flexibilité** – Configurations sur mesure, options de modification et accessoires pour répondre aux exigences expérimentales spécifiques et aux contraintes d'espace.

PLATEAU OPTIQUE ET AMORTISSEMENT

Le plateau optique est une plateforme rigide destinée à supporter des équipements sensibles aux vibrations. L'objectif est de créer un corps parfaitement rigide – un concept théorique idéal – où la distance entre deux points quelconques reste constante dans le temps. En d'autres termes, la taille et la forme du corps ne changent pas sous l'effet des forces induites par les vibrations, les charges statiques ou les variations de température. Lorsque tous les éléments sont assemblés pour former un corps rigide idéal, ils ne se déplacent pas les uns par rapport aux autres et les performances du système ne sont pas altérées.

La caractéristique vibratoire la plus critique d'une table optique est sa fréquence de résonance. Comme la table est conçue pour une rigidité maximale, elle se comporte comme un corps rigide tant que ses fréquences de résonance ne sont pas excitées. Une table optique typique présente une ou deux résonances principales et plusieurs résonances secondaires. C'est pourquoi un amortissement est nécessaire pour réduire les amplitudes de résonance et minimiser la déformation du système lorsque des vibrations ambiantes excitent ces fréquences. Trois types de méthodes d'amortissement sont disponibles pour les tables optiques : large bande, bande étroite et actif/hybride.

- **Amortissement large bande** : absorbe et dissipe l'énergie vibratoire sur une large gamme de fréquences. Il est largement utilisé dans les tables antivibratoires en raison de son coût abordable et de

son adéquation aux applications ne nécessitant pas des performances d'amortissement élevées.

- **Amortissement à bande étroite avec absorbeur dynamique (Tuned Mass Damper – TMD)** : consiste en une masse, un ressort et un amortisseur fixés à une structure pour réduire sa réponse dynamique. Il est réglé sur une fréquence structurelle particulière de sorte que, lorsque la résonance de la table est excitée, l'amortisseur résonne en opposition de phase avec le mouvement de la structure. L'énergie vibratoire est alors dissipée par la force d'inertie de l'amortisseur agissant sur la structure. Les TMD sont la méthode passive la plus efficace, car ils concentrent l'amortissement là où il est nécessaire, aux fréquences des modes de résonance dominants. Contrairement à l'amortissement large bande qui absorbe une quantité modérée d'énergie vibratoire sur une large plage, les TMD ciblent les

résonances et sont donc beaucoup plus efficaces.

- **Amortissement actif** : détecte les vibrations en temps réel et envoie des signaux aux actionneurs pour contrebalancer et annuler les vibrations. Il traite efficacement les résonances des tables optiques en intégrant une paire de capteurs et d'actionneurs dans la conception de la table et utilise un contrôleur externe pour coordonner le traitement du signal, permettant une réponse rapide et précise. Il présente un temps de stabilisation beaucoup plus court qu'un système passif et réduit toutes les résonances de la table dans toute la bande active.
- **Amortissement hybride** : combine les avantages de l'amortissement actif et des amortisseurs dynamiques accordés. Le système actif peut réduire davantage les vibrations sur la base solide créée par des amortisseurs accordés avec précision, offrant des tables optiques et des systèmes avec des pics de résonance minimaux. L'amortissement hybride est la technique la plus avancée pour les tables optiques et convient aux applications les plus exigeantes. Les fournisseurs de haute qualité proposent souvent

Figure 1. Nouveau laboratoire laser à l'Institut Max Planck d'Optique Quantique en Allemagne, équipé de tables optiques et d'un système de stabilisation de la température. ©MPQ/Aidelsburger.



la possibilité de mettre à niveau les tables optiques ultérieurement, ce qui garantit une flexibilité pour des besoins expérimentaux évolutifs. Cette capacité permet aux laboratoires de commencer avec une solution économique et d'améliorer les performances sans remplacer l'ensemble de l'installation.

Pour évaluer les caractéristiques de rigidité dynamique d'une table optique, les fabricants fournissent généralement **la courbe de compliance de la table**. Elle montre la réponse dynamique du plateau en espace libre soumis à une force externe, c'est-à-dire qu'elle indique comment la surface se déforme en réponse à une vibration. Les courbes de compliance sont des courbes de fonction de transfert qui montrent la réponse en position d'un point de la surface de la table à une force variable dans le temps appliquée au même point. Elles indiquent la plage de fréquences sur laquelle la table optique se comporte comme un corps essentiellement rigide. La courbe fournit également la fréquence des modes de résonance principaux et une indication de leurs amplitudes relatives, ce qui donne des informations sur l'amortissement intégré à la structure.

CONTRÔLE ET ISOLATION DES VIBRATIONS

En plus des méthodes d'amortissement du plateau, les supports de table optique peuvent filtrer les vibrations avant que le bruit mécanique n'atteigne la surface de travail. Bien que des pieds rigides sans contrôle supplémentaire des vibrations puissent suffire pour des applications non critiques, des pieds isolants autonomes, sont le meilleur choix pour les configurations sensibles aux vibrations. En général, l'isolation vibratoire des supports de table peut être réalisée par isolation passive ou active. Les systèmes d'isolation active utilisent des composants piézoélectriques ou électrodynamiques, tandis que les options passives incluent des ressorts, des patins en caoutchouc, des chambres à air gonflées ou des pieds pneumatiques remise à niveau automatique. Chaque méthode offre différents niveaux de performance,

de capacité et, naturellement, de coût. L'isolation active peut coûter jusqu'à dix fois plus cher que l'isolation pneumatique. Un tel investissement n'est généralement justifié que pour des applications sensibles aux vibrations sub-Hz, comme la microscopie à force atomique. Le type d'isolateur le plus courant en photonique est le système pneumatique, car il offre une remise à niveau automatique et minimise l'effet des variations de masse sur l'isolation.

La performance de l'isolateur est définie principalement par sa fréquence propre et ses caractéristiques d'amortissement :

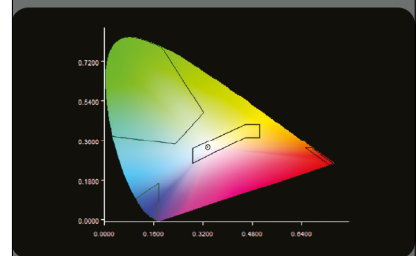
- **Fréquence propre (mode naturel, résonance)** – L'isolateur pneumatique est essentiellement un oscillateur harmonique simple qui utilise la « chute rapide » à des fréquences élevées pour agir comme un filtre mécanique passe-bas. En dessous de la fréquence propre de l'oscillateur harmonique, l'isolateur est essentiellement rigide et la vibration est transmise directement à la plateforme. À la fréquence propre, la vibration est amplifiée. L'objectif principal est donc d'abaisser la fréquence propre, car cela améliore l'isolation aux basses fréquences et la bande passante globale d'isolation.
- **Amortissement** – Un autre objectif essentiel est d'amortir l'amplitude de l'oscillateur harmonique à la résonance. Cela réduit l'amplification des vibrations à basse fréquence et améliore la stabilité du système. Malheureusement, il existe un compromis entre la fréquence propre et l'amortissement : lorsque l'amortissement augmente, la fréquence propre de l'isolateur se déplace légèrement vers le haut et l'isolation à haute fréquence diminue.

Un autre facteur différenciateur important pour l'isolation pneumatique est la manière de filtrer les « bruits » horizontaux. Chez certains fabricants, les isolateurs pneumatiques ne couvrent que l'isolation dans la direction verticale, tandis que l'isolation horizontale est obtenue par des systèmes de filtres mécaniques avec une surface de roulement ou de pivot pour filtrer les vibrations. Les isolateurs avancés proposés par MKS intègrent des ●●●



Specbos 2511 portable Luxmètre - Spectroradiomètre UV-VIS-NIR Haute Précision

- Gammes spectrales :
380-780 nm (VIS)
380-1050 nm (NIR)
200-1050 nm (UV-VIS-NIR)
- Bande passante :
4 nm / 2 nm (HiRes)
- Modes :
Radiance, Éclairement, Couleur,
Flux total, Intensité
- Interfaces :
USB, Bluetooth, LAN/PoE
- Options :
HiRes, Focus, Flicker, Trigger
- Applications :
Mesures LEDs, Lampes, Voyants
automobile et aéronautique,
Éclairage urbain, Mesures de
dangerosité photobiologique



SCIENTEC C'EST AUSSI,
de la formation, du SAV, de la calibration
et la distribution de :

Luxmètres - Photomètres
Chromamètres - Spectroradiomètres
Vidéo-Colorimètres - Photogoniomètres
Sources de Référence...

Contact us for more information
Phone: +33 (0) 164532700
Email: info@scientec.fr



SCIENTEC
www.scientec.fr

Precision Tuned Damping

Patented precision tunable dampers improve damping efficiency by 10x



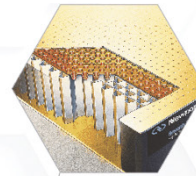
Individually Sealed Mounting Holes

Prevent spilling and protect the core



Vertically Bonded Honeycomb Core

Together with integrated damping layers provide robust broadband damping



Stiff Working Surface

400 Series stainless steel



Optical Table Supports

Isolated or rigid options

Highly Damped Side Panel

Eliminate vibrations from the side



Figure 2. Une table optique combine un plateau et un système de support ©MKS Inc.

systèmes pendulaires trifilaires sans friction pour l'isolation des vibrations horizontales. Comme le système fonctionne par flexion, il n'offre aucune résistance frictionnelle au mouvement et peut isoler des vibrations mécaniques de très faible amplitude.

Pour comparer la « qualité » d'isolation d'une table optique, les fabricants fournissent généralement une courbe de transmissibilité. Elle montre les propriétés de filtrage mécanique du pied isolant et donne une indication de la quantité de vibration du sol qui sera transmise au plateau. Il s'agit d'une mesure relative exprimée comme un rapport entre la vibration en deux points : l'un sur le dessus de l'isolateur et l'autre sur le sol. Ces courbes donnent également une indication de l'amortissement présent dans la conception.

QUELLE EST LA SENSIBILITÉ DE L'APPLICATION ?

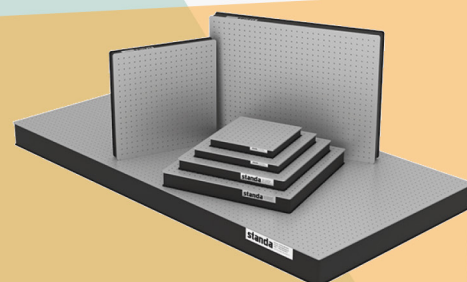
La question suivante est : quelles exigences l'application spécifique impose-t-elle ? C'est une question que les utilisateurs doivent clarifier

à l'avance avant de sélectionner une table optique appropriée. Les deux aspects les plus critiques à considérer lors de l'achat d'une table optique sont l'application principale et l'environnement du laboratoire. Les exigences pour les travaux pratiques d'étudiants sont bien moins contraignantes que celles des laboratoires de physique quantique, où les chercheurs passent des années à construire leurs montages et à aligner des faisceaux laser avec une précision micrométrique — ou que celles des biologistes cherchant à obtenir une image nette des réseaux neuronaux grâce à l'imagerie biphotonique.

Première étape : analyser et quantifier les sources potentielles de bruit. Pour les applications très exigeantes, la réduction nécessaire des vibrations doit idéalement être

déterminée par une analyse des mesures de l'environnement et des éléments présents dans l'application. Cela inclut une étude vibratoire du site à l'aide d'accéléromètres sismiques à faible bruit et éventuellement une analyse vibratoire sans contact utilisant des vibromètres laser Doppler. Ce dernier procédé est coûteux et long, réservé aux applications les plus précises et exigeantes telles que la fabrication de wafers semi-conducteurs, l'interférométrie et l'holographie. En général, ces applications nécessitent au minimum un système d'isolation pneumatique et une table optique fortement amortie. Dans des cas extrêmes, un système d'isolation active ou une table à amortissement actif peut être requis, selon que la source de vibration provient du sol ou de la surface de la table, et en fonction de l'ampleur de ces perturbations.

TABLES OPTIQUE & ACCESSOIRES



- ▲ Table Optique, breadboard Nid d'abeille,
- ▲ Isolation Rigide, pneumatique ou active
- ▲ En stock ou sur-mesure
- ▲ Planéité +/- 0.1mm/m²
- ▲ Déflexion de 4µm (100kg de charge)
- ▲ Amagnétisme en option
- ▲ Fabriquées en Europe
- ▲ Options & add-ons : étagère laser, étagère indépendante pour instrument, repose-bras, roulettes, hotte à flux laminaire ...



Support pour table Optique pneumatique ou rigide

Cependant, pour la plupart des applications, l'évaluation du rapport coût-bénéfice de la réalisation de telles études approfondies peut indiquer qu'elles ne sont pas nécessaires. Les fournisseurs de haute qualité offrent souvent la possibilité de mettre à niveau les tables optiques ultérieurement, ce qui garantit une flexibilité pour des besoins expérimentaux évolutifs. Cette capacité permet aux laboratoires de commencer avec une solution économique et d'améliorer les performances sans remplacer l'ensemble de l'installation.

Les « courbes génériques de critères vibratoires » sont couramment utilisées comme guide pour les clients choisissant des solutions d'isolation vibratoire. Ces courbes de critères génériques ont été développées à partir de données provenant de systèmes individuels et de mesures effectuées dans des installations avant et après la résolution des problèmes de vibrations. Elles ont été largement utilisées par les principaux consultants en vibrations, par exemple dans l'industrie de la fabrication de semi-conducteurs, depuis près de 20 ans, et ont été étendues et affinées à mesure que l'industrie est passée à des largeurs de ligne plus étroites. Ces courbes tiennent compte du fait que les équipements utilisés pour les tâches les plus exigeantes (comme la fabrication de semi-conducteurs avec des géométries de dispositifs plus petites) sont plus rigides et mieux isolés. Il est toutefois important de noter que ces critères ne sont fournis qu'à titre indicatif.

Une fois les sources potentielles de vibrations et de bruit identifiées, l'étape suivante consiste à évaluer les exigences spécifiques du système afin de déterminer si une isolation vibratoire est nécessaire, et dans quelle mesure. Une conception bien pensée, qui minimise les sources de bruit et maintient un espace de travail propre et organisé, peut améliorer considérablement la fiabilité expérimentale et conduire à des

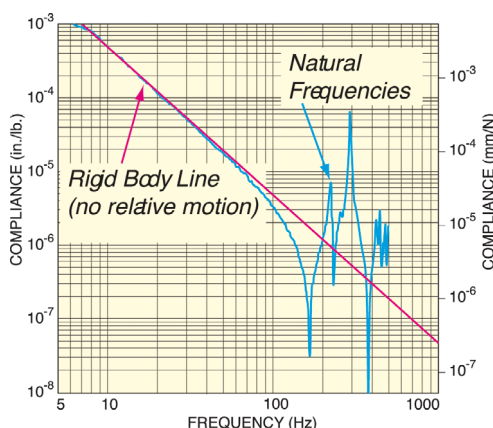


Figure 3. Exemple de courbe de compliance d'une table optique MKS Newport ©MKS, Inc.

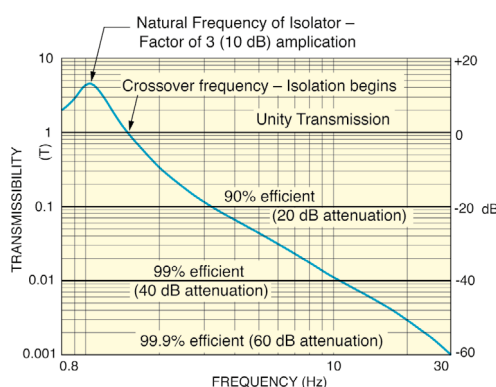
résultats réussis, y compris de nouvelles découvertes.

PROPRIÉTÉS DES MATÉRIAUX

La stabilité du trajet du faisceau est une exigence essentielle pour de nombreuses expériences et procédés optiques. En plus de l'amortissement et du contrôle des vibrations, les tables optiques doivent également offrir une planéité de surface élevée et une stabilité thermique. Idéalement, le plateau doit être fabriqué en une seule pièce, conformément aux normes de production les plus strictes, afin de garantir une planéité optimale.

Les tables optiques modernes utilisent généralement une peau supérieure en acier inoxydable, ●●●

Figure 4. Exemple de courbe de transmissibilité ©MKS Inc.



combinée à d'autres matériaux tels que le nid d'abeilles en acier et l'époxy, car l'acier inoxydable offre une surface de travail rigide, stable et résistante à la corrosion. Cette construction crée une structure très rigide mais légère, qui minimise les vibrations et maintient la planéité, ce qui est crucial pour les expériences optiques sensibles. Certains fabricants, comme MKS, incluent d'autres caractéristiques intéressantes, telles que des trous non corrosifs et scellés individuellement pour empêcher la poussière et les liquides de pénétrer dans le cœur de la table, ainsi que des panneaux latéraux en bois composite à amortissement élevé pour éliminer les vibrations provenant des côtés. Pour les applications exigeant le plus haut degré de stabilité thermique, des matériaux tels que le Super Invar et d'autres alliages avancés sont utilisés. Le Super Invar est un alliage spécial connu pour son taux d'expansion thermique exceptionnellement faible. Cela lui permet de conserver sa forme et ses dimensions même en cas de fluctuations extrêmes de température, ce qui en fait un matériau essentiel pour les instruments de précision et les équipements scientifiques. Les applications sensibles au magnétisme doivent être installées sur une structure non magnétique fabriquée en acier inoxydable 316. Ces plateaux de table optique présentent le même amortissement large bande, tandis que les peaux supérieure et inférieure ainsi que le cœur en nid d'abeilles sont fabriqués en acier inoxydable de la série 316, pratiquement non magnétique. Pour atteindre une planéité maximale, certains fournisseurs proposent des plateformes en granit, des composites granit-époxy ou des composites granit-nid d'abeilles. Cependant, le granit n'est généralement pas le premier choix pour les plateaux, car sa masse ne contribue pas de manière significative à la rigidité structurelle. À la place, la structure en nid d'abeilles offre une masse réduite, une rigidité accrue

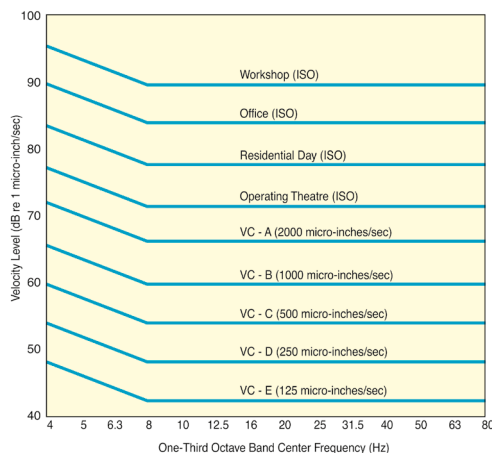


Figure 5. Le tableau générique des critères vibratoires est basé sur les recherches de Colin G. Gordon et Eric E. Ungar dans les années 1980 et a été publié pour la première fois dans un article de la SPIE en 1992 [1].

et des performances supérieures en matière de contrôle des vibrations.

PERSONNALISATION ET FLEXIBILITÉ

Lors de l'évaluation des options pour les tables optiques, il est important de considérer non seulement les configurations standard, mais aussi la flexibilité d'adapter les produits existants afin de répondre aux besoins spécifiques de l'application. Les fabricants expérimentés proposent souvent une large gamme d'options de personnalisation pour accompagner cette démarche. Par exemple, si votre configuration implique une charge importante et

entraîne un centre de gravité élevé, il peut devenir difficile d'obtenir une flottaison stable — en particulier dans les systèmes isolés des vibrations. Dans ce cas, des ajustements de conception tels que l'abaissement de la hauteur de montage ou la redistribution de la masse peuvent être nécessaires pour maintenir la stabilité et les performances du système. Lorsque de grands plateaux ne peuvent pas être déplacés dans l'installation en une seule pièce, des systèmes doubleurs sont disponibles, reliés par des interfaces de jonction uniques conçues pour maintenir la rigidité et la solidité entre les sections individuelles de la table.

CONCLUSION

Choisir le bon emplacement pour votre laboratoire et réduire les bruits environnementaux constitue une première étape importante. Cependant, dans de nombreux cas, ces choix sont limités. La bonne nouvelle est qu'il existe des options très efficaces pour l'amortissement et le contrôle des vibrations, permettant de réaliser des applications très sensibles sur des tables optiques, même dans des laboratoires situés à proximité de voies ferrées. Consulter un fournisseur expérimenté garantit que votre table optique et votre système d'isolation sont adaptés à vos exigences spécifiques, afin d'offrir des performances maximales et une fiabilité à long terme. ●

RÉFÉRENCES

[1] Gordon, C. G. (1992). Generic criteria for vibration-sensitive equipment. In *Vibration Control in Microelectronics, Optics, and Metrology* (Proc. SPIE Vol. 1619, pp. 71–85). Society of Photo-Optical Instrumentation Engineers. <https://doi.org/10.1117/12.56826>

<https://www.newport.com/g/metric-table-top-finder>

<https://www.newport.com/n/compliance-and-transmissibility-curves>

<https://www.newport.com/n/optics-based-research-the-need-for-vibration-isolated-rigid-support-structures>

https://www.newport.com/medias/sys_master/images/images/h0e/h4a/8797226041374/Optical-Table-Basics.pdf