

INGÉNIEURS ET ARCHITECTES SUISSES
BULLETIN TECHNIQUE DE LA SUISSE ROMANDE
126^e année - 9 Février 2000

IAS

03

sia

Grâce à de nouvelles techniques, la visualisation de phénomènes physiques trouve des applications industrielles multiples. P.26 En acoustique, elle permet de cerner les sources de bruit. P.32

 GEP usic

Vincent Chritin, Dr. es sc. techn.,
IAV Engineering
Parc Scientifique de l'EPFL, 1015 Lausanne,
email: iav@iav.epfl.ch, www.iav.ch

Silence... on produit !

La maîtrise du bruit, un enjeu de production incontournable

L'augmentation des exigences en matière de réduction des nuisances et de protection des usagers conduit à la nécessité croissante de maîtriser le bruit des équipements, infrastructures et installations. En tant que tel, le bruit peut se définir comme un « sous-produit » de la société industrielle que, par analogie aux déchets, on cherche à réduire, traiter, éliminer.

A cet effet, les recettes sont bien connues: diminution du bruit « à la source », absorption, encabineage, isolement - à défaut: les « bouchons d'oreille » - ou, à la mode, le contrôle actif encore appelé « anti-bruit ». Dans l'industrie, en particulier, les textes réglementaires énoncent deux types d'exigences:

- d'une part: « Les nouvelles machines ne doivent pas faire trop de bruit »;

- d'autre part: « Les personnes exposées au bruit dans le cadre de leur travail ne doivent pas subir une dose de bruit excessive ».

Le traitement du bruit devient donc une responsabilité du constructeur comme de l'exploitant.

Les exigences s'appliquant à la machine

La première directive impose au constructeur d'équipements des niveaux limites d'émission à respecter: il s'agit de certifier par une mesure *ad hoc* la performance « bruit » de l'équipement. La mission du constructeur consiste donc à fournir des équipements silencieux. Une tâche relativement simple s'il peut se permettre de produire des machines a priori plus lourdes (amortissement du bruit et des vibrations), voire moins rapides (vitesses lentes, synonymes de moins de bruit), probablement plus compliquées (joints, amortisseurs, etc.) et, finalement, à coup sûr moins pratiques (capots, écrans, masses mobiles). Autrement dit, l'objectif de construire silencieux se heurte dans les faits à diverses contingences de développement souvent pénalisantes, puisque la tendance générale est bien entendu à l'allègement des structures, à la diminution des encombrements, à la réduction des coûts et des délais de conception et de maintenance, sans oublier l'approvisionnement en composants externes et l'ergonomie.

Pour ces raisons, « l'optimisation bruit et vibrations » des biens d'équipement appelle aujourd'hui une approche

méthodologique globale, dès l'avant-projet de conception, jusqu'à la réception des premiers de série.

Le vrai problème auquel le constructeur se trouve confronté est donc d'assurer la production d'équipements performants, ergonomiques et économiques, qui respectent en même temps les limites d'émission de bruit en vigueur, voire dépassent les performances affichées par les concurrents. Ainsi, la maîtrise du bruit des équipements comporte un aspect réglementaire, un aspect technique et un aspect commercial.

Les exigences concernant l'environnement de travail

La seconde directive s'applique aux exploitants d'usine ou d'équipements par le biais des mesures de protection imposées en cas de dépassement de la dose de bruit hebdomadaire tolérée. La mission de l'exploitant est donc de contrôler les doses de bruit dans l'exploitation et, en cas d'excès, de définir et mettre en oeuvre les mesures de protection. Le cas échéant, l'application de telles mesures peut influencer sur la productivité, notamment par la pénalisation des communications interpersonnelles du fait du port des protections auditives ou par les surcoûts liés à la modification ou au rem-placement des parcs de machines. Sur ce point, il faut bien préciser que l'exploitation d'un parc de machines répondant toutes strictement aux limites d'émission en vigueur ne constitue pas encore une garantie de respect des limites d'exposition au bruit pour le personnel qui utilise ces machines! En effet, la dose de bruit hebdomadaire ne dépend pas uniquement des émissions de la machine utilisée par la personne exposée: y contribuent également le bruit émanant d'autres sources (machines, auxiliaires, conditionnement d'air, etc.), ainsi que les réflexions et la réverbération du lieu ou encore le taux d'occupation d'une personne à différents postes. Ces facteurs font que l'exploitant qui s'approvisionne exclusivement en nouvelles machines (soit en équipements conformes du point de vue des émissions acoustiques) n'a pas pour autant la garantie que le critère de limite d'exposition sera respecté dans son exploitation.

Le vrai problème de l'exploitant consiste donc à respecter les limites établies pour l'exposition des personnes, sans pénaliser - voire en améliorant - la productivité de l'exploitation.

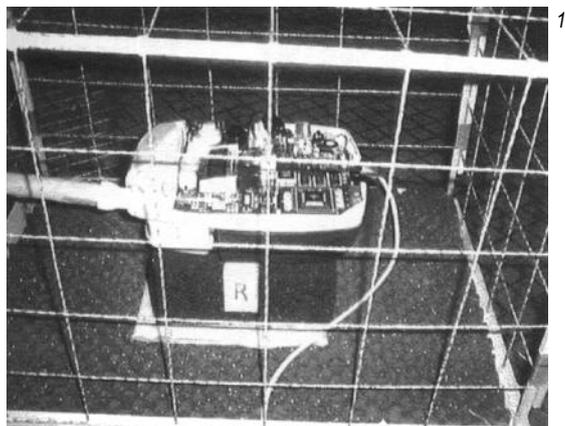


Fig. 1: Analyse et optimisation du bruit d'un appareil d'assistance respiratoire
(Photo : IAV Engineering, Lausanne)

Un nouveau métier: l'acoustique industrielle

L'optimisation des caractéristiques acoustiques est donc aujourd'hui un objectif prioritaire de conception des équipements et de l'évolution de produits existants. Cette situation confronte les constructeurs à des problèmes tels que la définition d'objectifs de performances en matière de «bruit et vibrations», l'identification du cadre des actions possibles, le choix des moyens à mettre en oeuvre, l'évaluation, la mise en oeuvre et la validation de solutions constructives, la qualification des équipements

Etant donné que les principes techniques de réduction du bruit présentent des aspects qui sont en porte-à-faux avec les critères actuels de construction, la pratique appelle des «solutions bruit» complexes ou combinées, par exemple:

- la maîtrise de l'isolement aux sons aériens des éléments de construction sous des contraintes de masse, d'encombrement, d'ergonomie, de coût;
- la maîtrise des effets de transmission solidienne dans les structures par l'aménagement des caractéristiques élastodynamiques des éléments sous des contraintes de résistance statique ;
- le dimensionnement d'encabineages ou d'écrans sous des contraintes de maniabilité, thermiques, esthétiques, de sécurité, de maintenance et de comportement au feu.

Ce type d'action définit typiquement le cadre de l'optimisation en matière de bruit et vibrations des équipements, réunissant l'ensemble des principes, actions, moyens et méthodes liés à la définition et à la réalisation d'objectifs acoustiques dans le cadre du développement d'un nouvel équipement, ou de la mise en conformité d'un équipement existant. Comme, par nature, le bruit fluctue en fonction de l'espace, du temps, de la fréquence, et varie selon le mode de fonctionnement des équipements, la solution découle le plus souvent de l'art du meilleur compromis.

Une approche particulièrement bien adaptée repose sur le principe de la segmentation du comportement au bruit global des équipements en un nombre restreint de situations dites d'objectif, lesquelles sont à leur tour décomposées en termes de contributions potentiellement dominantes (composante émergente du bruit provenant d'une source ou d'un chemin de transmission particulier). La maîtrise des contri-

butions est intégrée dans le cadre d'un plan d'analyses pré-défini spécifique au bruit, et dès lors adapté aux étapes classiques de conception : établissement de critères individuels de comportement au bruit des composants, analyse des couplages, spécification de ces critères aux équipementiers, contrôle et optimisation des performances des composants et ensembles critiques. L'intérêt principal de cette démarche réside, d'une part, dans le schéma global structuré des principales actions à entreprendre en matière de bruit et vibrations, qui est proposé aux constructeurs en amont des développements, d'autre part, dans l'acquisition de bases de connaissances relatives au comportement et méthodes d'analyse du bruit spécifiques aux équipements concernés.

Deux cas relevant du constructeur: équipements de transport et machines d'emballage

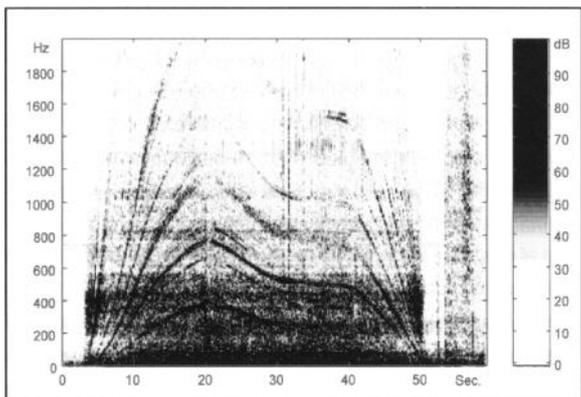
Les biens d'équipement - véhicules de transport urbain, transformateurs électriques, machines - sont composés d'une structure principale de grandes dimensions (châssis, bâti, ossature, structure portante), sur laquelle sont agencés toutes sortes d'éléments. Tous les composants étant potentiellement des sources ou des chemins de transmission de bruit et de vibrations, la performance d'ensemble résulte toujours de contributions multiples, lesquelles varient en fonction des modes de fonctionnement. Maîtriser le bruit de l'équipement revient donc à en maîtriser individuellement toutes les contributions dominantes.

Des véhicules plus légers... et plus silencieux (Bombardier Transport)

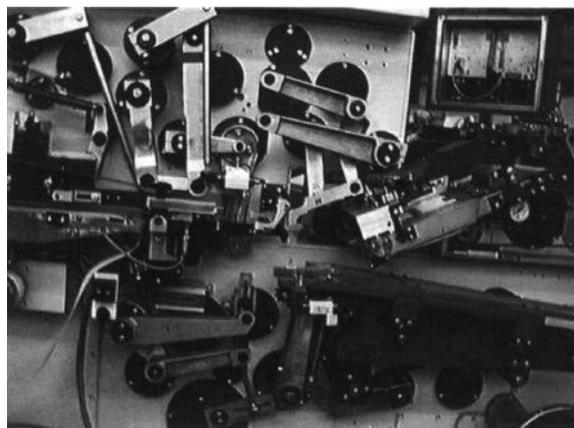
Pour un équipement tel qu'un métro ou un tramway, le confort «acoustique» des passagers dépend notamment du bruit des moteurs, des réducteurs, du contact roue-rail, des convertisseurs de puissance, des freins, du conditionnement d'air, des chauffages, des ventilations, des compresseurs et du bruit aérodynamique. Par ailleurs, les exigences en matière de réduction de bruit se doublent de contraintes liées à la diminution des masses et de l'encombrement, dans le but général d'augmenter le nombre de passagers transportés par m², par kg et par kW de véhicule. Par rapport à l'effort total de développement (actions de conception et d'industrialisation jusqu'au 1^{er} exemplaire de série), on constate que 5% sont dédiés à l'application de la méthodologie d'« optimisation bruit et vibrations». A titre de comparaison, on relèvera que dans l'industrie automobile, l'optimisation des techniques NVH (*Noise and Vibrations*) et de durabilité est estimée à près de 20% des efforts consentis pour le développement d'un véhicule, la plupart intervenant durant la phase de pré-production.



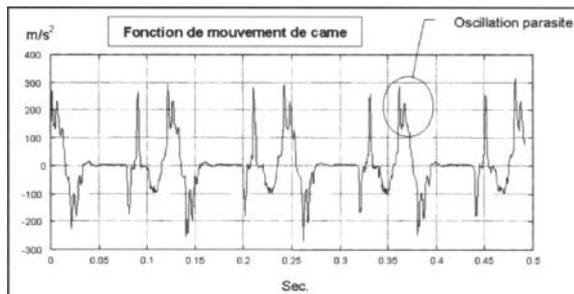
2



3



4



5

De nature très différente, les bruits cités contribuent néanmoins tous de manière significative à la résultante globale qui détermine le confort des passagers. Aussi, il est nécessaire de les traiter en parallèle comme autant de composantes d'un niveau de bruit à minimiser. Le cas du réducteur illustre la démarche appliquée à l'un de ces facteurs de bruit.

Les raies visibles sur le sonogramme correspondent aux bruits d'induction des moteurs et d'engrènement des réducteurs, dont les fréquences varient proportionnellement à la vitesse du véhicule. Les facteurs déterminants la «contribution bruit» du réducteur sont:

- a) l'emplacement de celui-ci par rapport à la caisse,
- b) les rapports de réduction et les couples en jeu,
- c) les profils de contact, états de surface et alliages de dentures, ainsi que les désalignements d'arbres et de paliers,
- d) les caractéristiques structurelles des carters,
- e) la liaison entre le réducteur et le châssis du bogie,
- f) les caractéristiques élasto-dynamiques des organes de liaison caisse-bogie,
- g) l'isolement aux sons aériens des sous-ensembles de la caisse,
- h) le rayonnement des sous-ensembles de la caisse sous l'effet des transmissions solidiennes.

La maîtrise de la contribution du réducteur consiste donc à déterminer un arrangement optimal de ces facteurs : par exemple, les caractéristiques dynamiques des organes de liaison caisse-bogie peuvent en principe être choisies de sorte à atténuer la transmission des excitations vibratoires des réducteurs ou l'excitation de modes rayonnants de la caisse, tout en garantissant la tenue des efforts de traction et la stabilité du véhicule. En pratique, la maîtrise des points a),

p.34

e), f), g) et h) concerne exclusivement le maître d'oeuvre de la conception, tandis que les points c) et d) sont du ressort du fournisseur du réducteur uniquement. Par ailleurs, les réducteurs étant couplés aux moteurs, provenant d'un autre approvisionnement, l'optimisation de la contribution du réducteur est implicitement liée à celle de la répartition des responsabilités de conception et d'approvisionnement. La seule manière de parvenir à un résultat répondant à des performances bruit prédéfinies sans risque de sur-dimensionner toute la construction est de spécifier en amont des approvisionnements les valeurs admissibles de bruit et de vibration de chacun des composants. A défaut, la mise en conformité finale d'un développement peut contraindre à d'importantes corrections sur certains éléments, à l'ajout de nouvelles pièces, voire au remplacement complet d'un sous-ensemble avec les conséquences que cela implique.

En résumé, l'optimisation d'une contribution de bruit requiert - du point de vue technique: une analyse globale et a priori de tous les facteurs déterminants de la contribution, basée sur des données relativement imprécises (avant-projet ou début de conception), mais permettant toutefois l'identification des paramètres déterminants et des sous-ensembles correspondants concernés, ainsi que la définition des méthodes et moyens d'analyse et de validation;

- sur le plan des responsabilités: une analyse des possibilités d'actions d'optimisation propres à chacun des acteurs concernés et une appréciation des risques inhérents à l'assemblage des sous-ensembles (comportements interdépendants).

Les machines qui emballent (SIG Pack SAPAL)

Le cas des machines d'emballage illustre un autre aspect de l'optimisation bruit des équipements : dans ce domaine, il a été démontré qu'une machine optimisée du point de vue

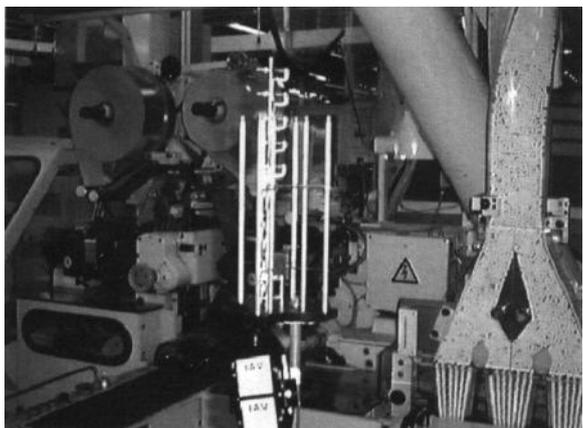


Fig. 2: Optimisation du bruit d'un métro léger: chaque roue étant entraînée par son propre ensemble moto-réducteur, un effort particulier est consenti pour réduire les nuisances et le bruit dans le véhicule

Fig. 3: Les raies dans le sonogramme révèlent les contributions du bruit des moteurs et des réducteurs dans le véhicule

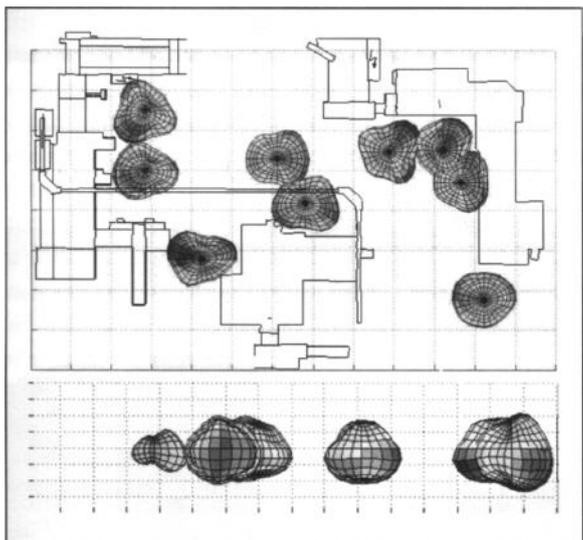
Fig. 4: Etude vibratoire et acoustique sur des machines à cames

Fig. 5: Les oscillations parasites sont des sources de bruit et de vibrations

Fig. 6: L'antenne, au centre de la photo, donne une image de l'intensité acoustique dans toutes les directions

Fig. 7: Les lobes obtenus indiquent les sources de bruit à chacun des neuf postes d'opérateur

(Photos: IAV Engineering, Lausanne)



bruit s'avère plus performante en termes de cadence de production et de fiabilité. Ce résultat s'explique par le fait que, sur ce type de machines à forte dominante mécanique (mouvements alternatifs, cadences élevées) le bruit est fortement lié au comportement vibratoire des organes en mouvement : moins de bruit signifie donc un comportement dynamique amélioré : moins de jeu, fonctions de mouvement lissées, inerties réduites. D'autre part, le bruit est souvent lié à des déperditions énergétiques, et/ou une fatigue mécanique. Dans un marché concurrentiel, exportateur et extrêmement exigeant, la maîtrise du bruit devient un atout de premier ordre.

Problématique de l'exploitant

A l'heure actuelle, les réglementations sur le bruit au travail conduisent les exploitants à considérer le port de protections auditives individuelles lorsque les niveaux de bruit dépassent la limite de 85 dBA. Pourtant, du côté des constructeurs les équipements destinés à ce type d'activité sont certifiés pour des niveaux de bruit de l'ordre de 81 à 83 dBA. Satisfaisants du point de vue de la protection de l'ouïe, les «bouchons d'oreille» n'en sont pas moins pénalisants à d'autres titres: inconfort, difficulté de communication, isolement. La véritable amélioration de l'environnement de travail.

Dans ce domaine, les bras levés au ciel ne manquent pas: renouvellement prohibitif de parcs de machines à demi-vie, constructeurs soumis aux exigences d'augmenter sans cesse les cadences des équipements tout en diminuant leurs coûts d'exploitation, faible marge de manoeuvre pour la réadaptation des enveloppes d'usines existantes, habitudes de production incluant la réserve des personnes exposées face à la perspective de manutention de capots et autres éléments additionnels sur les machines. Bras levés également parfois des spécialistes, qui se privent rarement de justifier les objectifs somme toute timides qu'ils se fixent, par le fait que la loi des décibels implique que «réduire le bruit de trois décibels, c'est diminuer la puissance sonore par deux». Vérité incontestable, mais, à l'inverse, faire deux fois moins de bruit - ce qu'est en droit d'attendre un client - équivaut bel et bien à obtenir une réduction de 10 dB et non pas de trois.

Dans ce contexte, une démarche particulièrement efficace consiste à transposer la méthode «constructeur» à la problématique «exploitant»: il s'agit en effet de considérer globalement l'exploitation comme un équipement devant satisfaire à des objectifs définis, à savoir un niveau de bruit à chaque poste de fabrication en fonction de l'occupation de ce poste. Pour cela, il est primordial de commencer par identifier parfaitement la problématique de bruit, dans chaque cas particulier: quels postes sont concernés, quelles sont les contributions dominantes à ces postes, quel est l'objectif poursuivi ? Cette dernière question appelle une réponse détaillée: sources et chemins de transmission, modes de propagation, contenus temporels et fréquentiels. Sur cette base «exhaustive», le bon diagnostic de situation pourra être posé et les meilleures solutions définies et mises en oeuvre. A défaut, le risque existe d'investir dans des solutions non prioritaires.

Un exemple: l'industrie du tabac

Le cas de l'usine des *Fabriques de Tabac Réunies* (FTR) à Neuchâtel illustre une méthode de diagnostic de situation de bruit particulièrement performante. Dans ce site de fabrication, les machines sont agencées par groupes de production. Chaque groupe fabrique et emballe les produits à des cadences très élevées (typiquement 8000 cigarettes/minute)

Fig. 8: Pluviomètre acoustique

Fig. 9: Microphones infrasonores

Fig. 10: Capteur acoustique détectant la formation de congères et de plaques de neige

(Photos : IAV Engineering, Lausanne)

au moyen de machines à forte dominante mécanique et aérolique. Plusieurs opérateurs sont nécessaires au bon fonctionnement de chaque groupe et notamment au contrôle des approvisionnements en contenants et contenus (tabac, papier, colles, films plastique et aluminium, cartons). L'analyse des contributions de bruit aux postes de travail a été réalisée sur la base d'une méthode de mesure novatrice: le *BeamForming*, qui permet de visualiser les flux sonores au lieu de travail en plaçant momentanément une antenne mobile de mesure à hauteur de l'opérateur

Les résultats obtenus (représentation tridimensionnelle de l'intensité acoustique) permettent d'identifier très rapidement les sources et chemins de transmission dominants. En particulier, le fait d'obtenir des cartographies présentant des lobes marqués démontre que le champ direct est prédominant par rapport au champ réverbéré, et révèle par ailleurs, contrairement à une idée répandue, une forte dominance des bruits provenant du bas des machines et du sol.

L'acoustique, une affaire de spécialistes?

L'image de l'acousticien sonomètre à la main au bord d'une voie de chemin de fer, ou de celui qui claque dans ses mains dans une halle apparaît aujourd'hui bien désuète : nouvelles problématiques, nouvelles technologies, nouveaux enjeux aussi. La maîtrise du bruit impose d'aller beaucoup plus loin dans l'analyse des phénomènes et la mise en oeuvre de solutions inédites . Témoin ce qui se produit dans l'automobile et qui ne manquera pas de pénétrer peu à peu d'autres domaines de l'industrie et des biens de consommation: le passage de la maîtrise des niveaux de bruit à la maîtrise qualitative du bruit, l'apparition de techniques opérationnelles de contrôle actif du bruit et des vibrations, la généralisation des outils de simulation et d'optimisation des comportements vibroacoustiques des produits. Pour sensibiliser l'industrie et répondre à ces besoins, le profil est certainement celui de l'ingénieur inventif, convaincant et réunissant des compétences multiples : mécanique, architecture, matériaux, thermique, électricité, microtechnique.

Un défi relevé par la société *IAV Engineering*¹ et... une nouvelle offre de service à l'horizon.

Remerciements à MM.

Sébastien Simon, *Bombardier Transport*

Olivier Pasche, *SIG Pack SAPAL*

J.-François André, *EEMA Engineering*

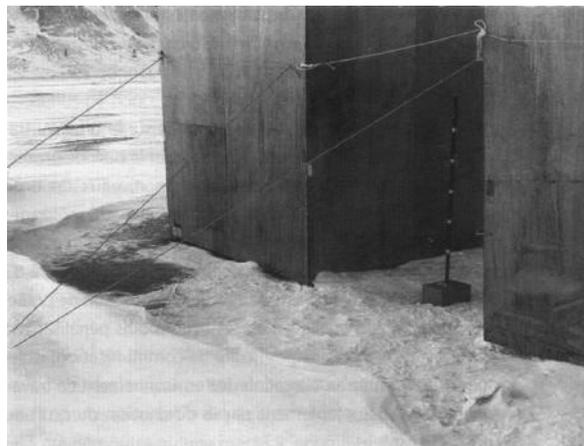
¹ Une fiche technique consacrée à cette société figure sous la rubrique «Produits nouveaux» en p. 47 de ce numéro.



8



9



10

«Start up» – fiche technique IAV Engineering Sàrl

Identité : Entreprise fondée par Vincent Chritin en 1997, IAV occupe actuellement six personnes.

Objectif : Apporter des solutions globales aux ingénieurs, architectes, industriels confrontés à un problème de bruit.

Domaine d'activité : L'acoustique.

- Acoustique industrielle : analyse des problématiques de bruit, définition des solutions, optimisation du comportement acoustique et vibratoire de machines, équipements et installations
- Développement de systèmes acoustiques dédiés.

Technologie et savoir-faire:

- Méthodes de cartographie acoustique : antenne pour la visualisation tridimensionnelle des flux sonores, goniométrie pour la localisation et la trajectographie des sources de bruit, intensimétrie pour la caractérisation de champs acoustiques
- Méthodologie de maîtrise intégrale du bruit des produits, équipements et infrastructures
- Dispositifs à couplage vibro-acoustique, dont un système breveté, pour mesurer la vitesse des fluides ou des flux de particules solides ou liquides
- Surveillance infrasonique, transducteurs piézo-électriques, acoustique sous-marine, technique de traitement du son et DSP.

Réalisations:

- Etudes acoustiques sur un métro léger (*Bombardier Transport, Matra*); réduction du bruit de machines d'emballage (*SIG Pack Sapa*), d'installations de production (*Philip Morris*), de machines d'hydro-démolition du béton (*Etter*); optimisation acoustique d'appareils d'assistance respiratoire (*Resmed, HUG*), d'appareils dentaires (EMS); qualification du bruit d'appareils de soudage (*Castolin*); études d'impact
- Développement, industrialisation et commercialisation en Suisse, France, Italie, Autriche et Norvège des produits *FlowCapt* (anémométrifomètre pour la mesure de la vitesse du vent et des flux de neige), *RainFlow* (pluviomètre dynamique), *Arfang* (système de surveillance automatique des avalanches) et *Atlantis* (module d'orientation individuel pour la plongée sous-marine).

Domaines de prédilection: Biens d'équipements, agro-alimentaire, chimie, emballage, transport, construction, environnement, tout ce qui fait du bruit.

Partenariat: Mise en oeuvre d'une méthodologie originale, élaborée durant une thèse de doctorat au Laboratoire d'électromagnétisme et d'acoustique de l'EPFL, transfert technologique d'autres réalisations du Laboratoire et collaborations avec d'autres instituts de recherche.

Distinction : IAV a reçu un prix d'innovation pour l'implantation de son capteur *FlowCapt*.

Dr. Vincent Chritin, IAV Engineering, PSE-EPFL, 1015 Lausanne, www.iav.ch.