



Acoustic noise in the Virgo gravitational wave detector

Laum research actions

F. Gautier, L. Maurin, M. Brun, S. Terrien

Collaborations

- **M. Barsuglia** (laboratoire APC, AstroParticules et Cosmologie, UMR CNRS, Paris)
- **D.Fiorucci** (INRC, Italian National Research Council, Consorzio RFX, Padua)
- I. Fiori, M. Tringali, F. Paoletti, R. Passaquieti (EGO, European Gravitational Observatory, Cascina)

Workshop Virgo/ET, 04-06 mars 2024, Institut Fresnel, Marseille









Laum = Research Lab in Acoustics Joint Unit CNRS – Le Mans Université 170 people : 60 academics, 11 CNRS, 20 technical staff

500 students per year in Acoustics Licence, Master, Engineering school



Research activities in Vibroacoustics at LAUM

Inverse problems

- Acoustic imaging Near field holography and beam forming
- Source identification
- Identification of effective material properties
- Defaults identification.

Vibroacoustic modelling

- Squeak and rattle noise
- Numerical modelling
- Mechanical junctions



Vibration control

- Periodic structures
- Damping using added granular media
- Microperforated panel
- Acoustic Black holes effect



Multi-modal combined imaging





Research lines related to GW in Laum

Axis 1: Noise from acoustic origine

- Technical noise (HVAC,...)
- Newtonian noise
- Vibroacoustic transfer path analysis

Axis 2: Analysis of acoustic noise reduction techniques

- Recommandation for sound absorption
- Recommandation for sound insulation

Axis 3 : Parametric instabilities

- Instability model and mirror modal analysis.
- Periodically attached masses on wires

Nov. 2022, Convention APC/LAUM

	IRG	LAU	M	Della Chronitere Della Chronitere		
					d'un enutz de minir peorent alimenter le modèle d'instabilité. L'utilisation d'une maquette kéchelle réduite pourrait également envinagée pour reproduies le uneglage opto-mécanique et l'instabilité paramétrique avec et laser de passance modelle. Cette liberatique first l'objet d'une collaboration	
station Laboratore d'	Acrestiga	e de l'Université	de Mars (LAUM, UMR CNRS 6413) a	ot une unité minte de	du Mano, 2022-2023) [4].	
chenche rattaché r seudien et 70	e au CNR doctorant	5 regroupant 60 5 et cherchours	enseignants chercheurs et chercheurs pers post-doctoraux. Ses activités de recherc	nasents, 20 personnels he concernent l'alto-	der 1. Gambleiten is Freedore der anne de mandet uftersonsektene dem Proteilieten Prose	
overlique, les tri	malacters	s (MEMS), los r	ndta-mathriaux, les interactions fluide-sit	nature, les essais non	and a construction of some or construction and the statement of the	
In thermo-accor orantique et vibe rge éventail de trouenditle de cor e détuctions currep loratorises currep ce projet, orient	ntique et l' ntique. L' tations im formation formation des gravit écros dans le schot l'	es vitrepions dan Université du M portant en Europ ns dans estite d ns représente plus ationnelles VIRC tops les donnaise 'ait ou plusieurs -	is las internants compresses (internants po- tions oris un centre de rechencile et de fa- ter classitut d'Acountique - Graduated SE- incipline, en Tecnoce, manier, doctorar i de 500 tituliatets chaque anniel. 20 est un grand instrument de rechercha, no de la physique. La LAXM sochaite pro- las tres mare codenoses. Ces tobinariques	ence entre granutation emailies important en toolly. Ella propose un et école d'implicience. foldétient un réseau de poset une contrôbution font suite à plasieure	in this A de tepportentes (et al ora, an dense a de traine (then par e-explicit) este invalues to the properties in the second of the temportent in the second of the properties in the second of t	
hanges nicents 6/09/2022), via boutuire (table	entre kos ite à Pire 13	laboratoirus APG 6. 27/39/28223. 1	et LAUM (visio confirmer 1307/20) Ces actions de recherche concernent p	2, visite à APC-Paris funieurs mettibres du	La antellution du Laura pournal sominer une analyse des voirs de transfort à partir des oregistraments, offectués sur l'antellution (3), Ce transforment fres toiles par as single 2000er inglature (12):2023: Objects par au qui nommer lus partitutations hiers as soutiene du condisionnerner d'aré, la possibilité de sinkane la noinneer engendaire par este solutione orbanises du voltations et par voir adviser transmortant parties, estimation du reprinter, solutions de voltations et par voir adviser transformer en partor, sellatation du reprinte estimation de solutions et par voir adviser transformer en partor, sellatation du reprinte estimation de solutions et par voir adviser transformer en partor, sellatation du reprinte estimation de solutions et par voir adviser transformer en partor, sellatation du reprinte estimation de solutions et par voir adviser transformer estimation estimation estimation estimation de solution estimation e	
au proper vittigiti	Ranation	Speciality.	Contact	mithanthe company it is wells	antipulationes basés sur l'atilisation de résonateurs) postnait être examinée à partie de messares spécifiques à menére sur cet équipement [8].	
1. Gaudier		viscontine	Parents Dauter (Paris Inners, 9	m		
A Post		Cathlen .	Peopl Poart@unix-temans.tr	-	And J. contribution out inclusions de réduction de bruit et de vibrations impliquées dans Page neut	
a, Parat	-	Approximation	April Man Share products	10 III III III III III III III III III I	Outre las pars 1 et 2, las inhanges vicores entre APC et LAUM out permis de faire inserure abasidan	
C. Peserat		Approximities	Agens, Peor of Burley Strategy S	-	thomatiques enventos, qui mumient itre discuties lore de la conception funare de Vego Newl maitrice	
W Unal-Lineard	14	hit water	Matter, boat Grantifive Share, 9	100	des braits environnementaux (fluctuations de preusion basses fitigaences - effets mêtres ou induits p	
Table 1 : porticig	unts LAU	M au projet Verp			(Ores optiques nourbles à des enclutions solidientes, disposit/s de suspensions du minor)	
ction. Accesho	nhe				[1] V.B. Braginsky, S.E. Striger, S.P. Vyskhaum, Parametric oscillatory instability in Eality-Print	
ar I ; committants		ndie der Justahilt	da parandiripun apro-automipun da mi		anterlassander, Physica Letters A, Vidiane 297, Isaan 3-4, 2001, Pages 331-338	
L'interficte relearages complege e instabilité puissance L'a été pe conditions d'instabilité conditions d'instabilité complege e dynamique	mitter Ve Ces inst netre un t dépend d'a de collec i L'affici rece le mi peut être	rgo evi le siège abilités résultant aude vibrations e condepties paras l'ancess, arende tiliser un absorb sièteur en dicat siète de l'absorbe roie. Le savait de cotinie par escolit	or particularity approximation on the sequendrive frameholicity presentations on expendence for its previous de radiation appliqués sent it un model transmité de fascicana optin metros : l'actours de qualité des moltes met de la ran de autoritat, consectément folgo cor dynamique, qui compte an missire pou- tan un mode mentat, consectément folgo cor dynamid de sa glomatoria, sa possition et "insendebilité larraque le missire noi ou nem le [1-3].	un complage optio- is par complage optio- te minute, gibi-bast an one. Le gare de cette decompar en confager, envielle come modes, most de construitier les de réduires le seuil des réduires le seuil des conglé à l'absorbeur	[2] Shous, Venuma et el Manuel MD, paramadi seva advancia prior by white el Manuel Venuma et al Manuel MD, paramadi seva advancia prior by material en al 10 et al Manuel MD, and and and Manuel MD, a	
Le Louis p	eux comitit	toer a transfyse d de Duburbeur d	t tabuebear on precisant son depensions branning: Use analyse module d'un min	ement et en attalysant		











Noise from acoustic origin

HVAC = Heating, Venting, Air Conditioning

Experimental evidence of the HVAC acoustic contribution to strain noise :









HVAC noise

- HVAC => pressure pulsation in the infrasound range => Tower or viewport vibrations => scattered light noise => Newtonian Noise
- Aim: modeling the noise transmission path between HVAC equipments and detector's sensitivity



NEB characteristics (TR60, f_s , α)



North Terminal Buildinging

•

*VIR-0673A-18



M. Falxa et al, 2018* => acoustic characterization



$$TR60 = 0.161 rac{V}{\sum_{i}^{n} S_{i} lpha_{i}}$$

$$F_s = 2000 \sqrt{\frac{160}{V}}$$

Room volume

Reverberation time TR60 = 4.7 s Schroeder frequency Fs = 50 Hz \Rightarrow Modal acoustics if f < 50Hz Average absorption coefficient α =0.1

Acoustic response of the NEB resulting from a single monopole placed in a corner



Influence of the leaks (doors, ducts, walls)



Without leaks		With leaks	
5.6091E-13		0.85763	
7.4368		7.5451	
9.9835	Appearance	10.076	
10.823	of a low	10.939	
12.136	frequency	12.289	
13.244	nequency	13.417	
13.892	Heimnöltz	13.926	
14.517	mode	14.633	
16.021		16.203	
16.231		16.233	
16.353		16.442	
18.637		18.767	
19.577		19.578	
20.178		20.206	
21.059		21.073	
21.174		21.226	
21.893		21.899	
22.581		22.649	
22.819		22.851	

A (strongly) damped acoustic mode is created by the leaks at very low frequency Importance of the leaks at very low frequency acoustic response !

Acoustic sources equivalent to the HVAC

the technical area

L_WA (dB A) réf. arbitraire Source of problems is a reverse 15 Rendement Volute blade centrifugal fan located in max 10-0+ 0,2 0,4 Sound level = power law of the air flow (or velocity) Volute tongue $L_p \propto u^n$ with n = 4;6;8 V_{out} Aeroacoustic behavior => high complexity => Represented by 2 equivalent acoustic Secondary flow zone pistons (Velocities V_{out} and V_{in}) × * $V_{in} = V_{out} = 1 \text{ m/s}$ *B. Jiang et al, Journal of Building Engineering, 2023

20

Impeller

10

 \mathbf{V}_{in}

0,6

0,8

 $q_v/q_{v \max}$

1,0

Ducts acoustic – inlets and outlets networks



Acoustic modes of the inlets ducts





First mode = $\lambda/4$ mode

12

Acoustic radiation from the inlets ducts



=> Inlets are equivalent to 2 series of acoustic monopoles

13

Acoustic radiation from the outlets ducts



Simulation and measurement of the acoustic field in the NEB



Systematic acoustic measurements in the WEB (in course)







- Microphones array by T. Bulik, M. Suchenek, University of Warsaw, Poland
- Calibration using a Bruel and Kjaer reference microphone (APC)

Application 1 : estimation of the newtonian noise from acoustic origin

Mass density is proportional to acoustic pressure:

$$\delta\rho(\mathbf{r},t) = \frac{\rho_0}{\gamma P_0} \delta P(\mathbf{r},t) = \frac{\rho_0}{\gamma P_0} \sum_{n=1}^{\infty} a_n(t)\phi_n(\mathbf{r})$$

Modal expansion

=> Perturbations of the gravity potential

$$\delta \Phi(oldsymbol{r}) = -G \int rac{\delta
ho(oldsymbol{r}')}{|oldsymbol{r}-oldsymbol{r}'|} \; \mathrm{d} V'$$

$$\delta \phi(\boldsymbol{r}) = \sum b_n(t) \psi_n(\boldsymbol{r})$$



Gravity acceleration along a horizontal direction produced by a plane infrasound wave (oblique incidence $7\pi/6$) reflecting on a rigid wall

J. Harms, Terrestrial gravity fluctuations, DOI : 10.107/s41114-019-0022-2



L. Maurin, M. Brun, D.Fiorucci, I. Fiori, M. Tringali, F. Paoletti, R. Passaquieti, S. Terrien, F. Gautier, M. Barsuglia, J. Harms, Modelling Newtonian noise of vibroacoustic origin in the Virgo gravitational wave detector, Internoise 2024, 25-29 August, Nantes, France (submitted)

Application 2 : simulation of the tower vibration induced by the acoustic field

- FEM modal analysis => first bending mode 21 Hz •
- => equivalent to a cylinder with equivalent mass and 6 • stiffness
- Damping ratio of 1% .

Mode	Frequency	(Hz)
1	20.9159	
2	21.017	
3	60.7733	
4	61.6481	
5	66.1167	
6	77.4147	
7	77.5606	
8	77.7618	
9	78.4267	
10	85.4733	



Numerical modal analysis by J.Gargiulo (2023)





Order of magnitude of the amplitude of acceleration of the tower'bottom



Chambre anéchoique



Propagation dans une maquette de rue



Grande salle Anéchoique du LNE LABORATOIRE NATIONAL DE MÉTROLOGIE ET D'ESSAIS Longueur 9 m 8 Largeur m 7 m Hauteur 5,2 m Hauteur / treillis Surface 72 m² 500 m³ Volume Anéchoïcité Fréquence de coupure de la salle ⁽¹⁾ : 70 Hz ⁽¹⁾ fréquence à partir de laquelle le son décroît dans les conditions de champs libre. Bruit de fond < 0 dB (A) < 20 dB (Lin) dB (réf 20µPa) (20Hz-20kHz) Sans ventilation Structure de béton désolidarisée du bâtiment au moyen de 42 suspensions de type boîte à STRUCTURE ressorts associées à 4 amortisseurs EN BETON époinneur d'â crit viscoélastiques. J.Am Fréquence propre MAT verticale des suspensions 2,1 Hz TOURNANT Epaisseur des parois 40 cm 2400 kg/m³ SUSPENSIONS E E 2 2 Densité du béton utilisé Masse 721 Tonnes 80 kg/m³ Densité de la laine de roche Fréquence de coupure * 70 Hz Nombre de dièdres posés 3200 Masse du revêtement 31 Tonnes * Fréquence la plus basse, à partir de laquelle le coefficient de réflexion, mesuré au tube à ondes stationnaires, d'un échantillon de dièdres (testé dans la configuration de montage) est inférieur à 0.1.

Low frequency, broadband and thin acoustic metamaterial for acoustic insulation and absorption



V. Romero-García et al., Design of acoustic metamaterials made of Helmholtz resonators for perfect absorption by using the complex frequency plane Comptes Rendus Physique, Volume 21, issue 7-8 (2020), p. 713-749. https://doi.org/10.5802/crphys.32

Metablocker



N. Aberkane-Gauthier, Soft solid subwavelength plates with periodic inclusions: Effects on acoustic Transmission Loss, Journal of Sound and Vibration Volume 571, 17 February 2024, 118005

Acoustic Black Hole effect



Merging the metablocker and the ABH 's ideas and adapting the design to low frequencies

Acoustic Modeling : some concluding remarks

1 – Acoustic field in the NEB is dominated by HVAC noise is described by 25 modes below 30Hz The mean absorption coefficient $\alpha = 0.1$ Modal acoustic model of the NEB validated The leaks plays an important role in the very low frequency range (!)

2- HVAC acoustic source

is represented by 2 equivalent pistons whose acoustic velocity is estimated from direct measurement is highly dependent on fan speed (power low). Inlets and outlets networks are equivalent to sets of acoustic monopoles

3- Recommandations

Reduction of the fan speed !!! Thermal insulation needed to reduce the HVAC activity

4- Further works

Acoustic modeling of (all) Virgo's experimental halls and ET's Caverns Application 1 : estimation of the Newtonian noise (Master thesis M. Brun) Application 2 : estimation of the viewport vibration => scattered light noise estimation Analysis of technical noises (PhD starting in Oct. 2024, Funding Le Mans University) HVAC, Air Unit, water pumps, Cryostat... Transfer Path analysis : Structure and Air borne sound, Monitoring Acoustic absorption / insulation Specific design to be defined (PhD N. Ayyash, MSCA project Metavision, PhD 2024-2027)