

Développement de sources infrarouges et de résonateurs en quartz pour la spectroscopie photoacoustique

Guillaume Aoust
DMPH / SLM & DMPH / CMT

Directeur de Thèse: Michel LEFEBVRE
Encadrants ONERA: Myriam RAYBAUT, Raphaël LEVY



retour sur innovation

Problématique de la détection de gaz

PPM 10^{-6}

Gaz à effet de serre



Qualité de l'air extérieur

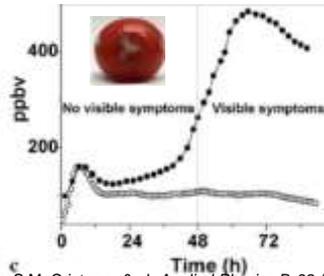


Rejets agricoles et industriels



PPB 10^{-9}

Sciences de la vie



S.M. Cristescu & al. *Applied Physics B*, 92 (2008)

Qualité de l'air intérieure



Sécurité civile - Défense



PPT 10^{-12}

Diagnostics médicaux



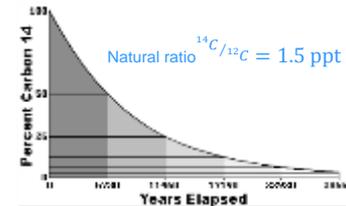
Contrôle d'odeurs



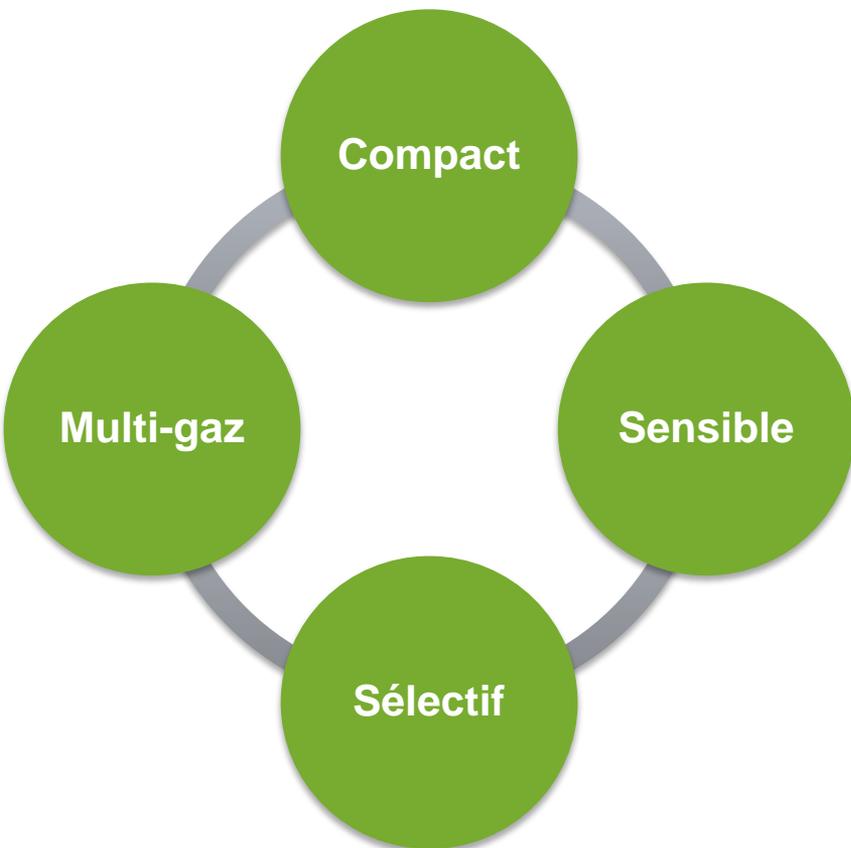
Geosmin
("l'odeur de la pluie").

PPQ 10^{-15}

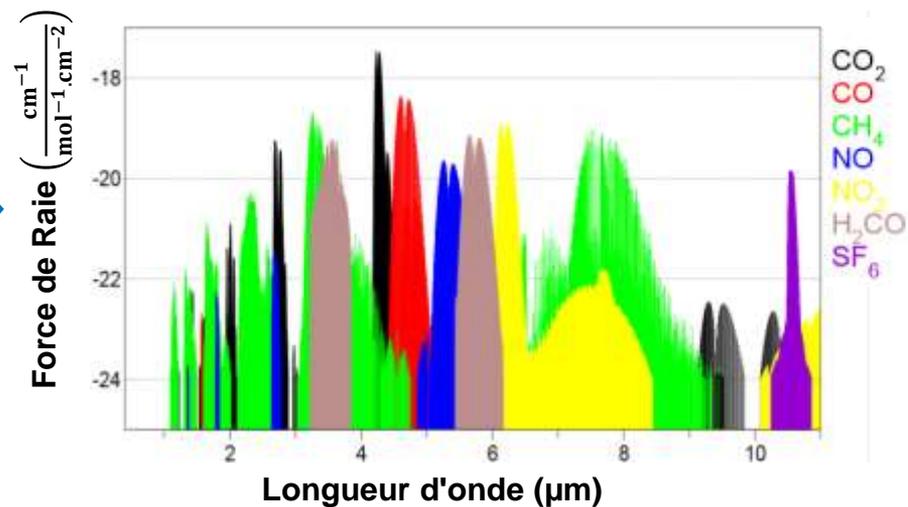
Mesures de rapports isotopiques



Un besoin simple mais de nombreuses contraintes

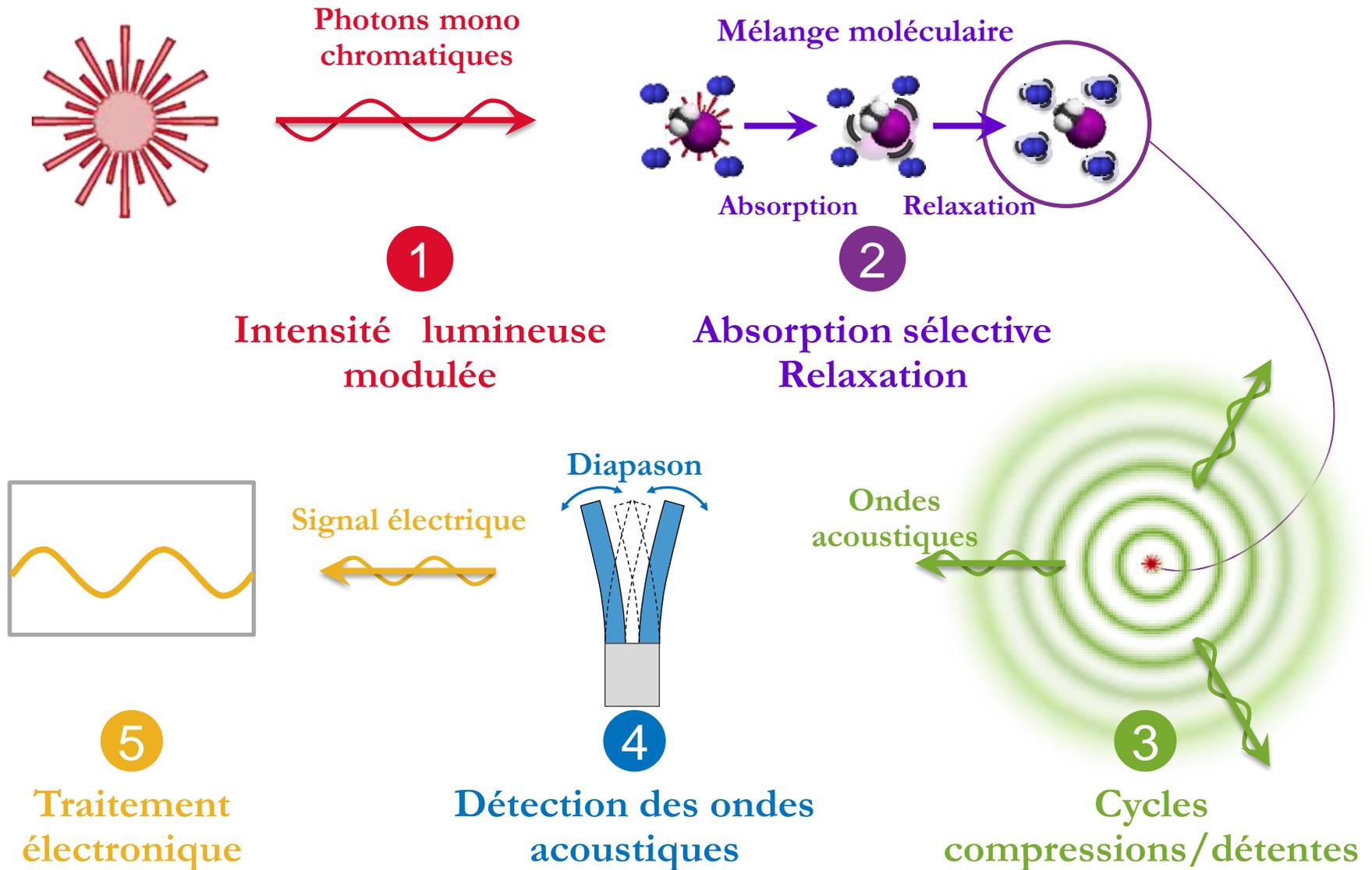


Spectroscopie



Source: HITRAN
2008 database

La spectrométrie photoacoustique QEPAS





Développement de sources infrarouges

Lasers à cascade quantique (QCL)

- Collaboration de 8 mois au Capasso Group (Harvard)
- Modélisation et réalisation d'un QCL multi longueurs d'onde
- Amélioration de l'accordabilité

Optimisation des oscillateurs paramétriques optiques (OPO)

- Modélisation et optimisation de l'efficacité
- Obtention d'une nouvelle formule analytique
- Vérification expérimentale des prédictions



Modélisation complète du QEPAS

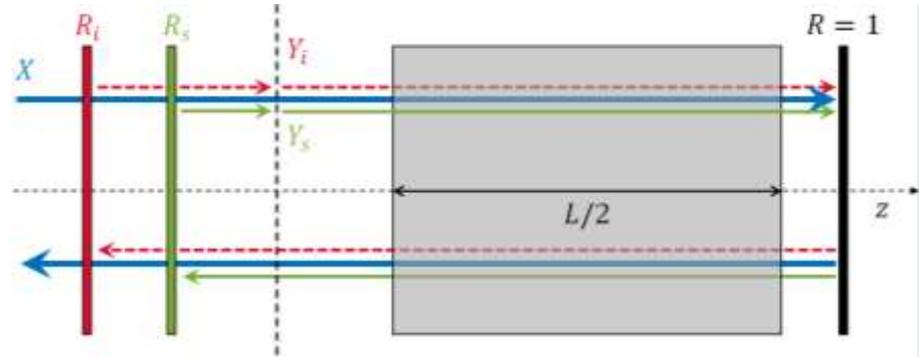
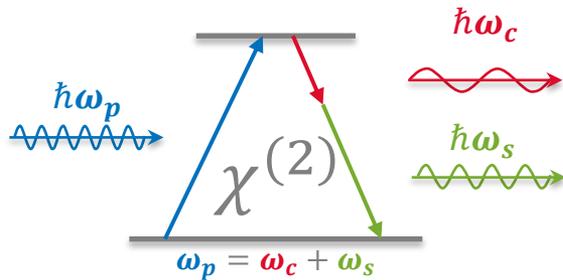
Modélisation du diapason et design optimal

- Modélisation analytiques pour optimisation
- Utilisation des éléments finis pour affiner les prédictions

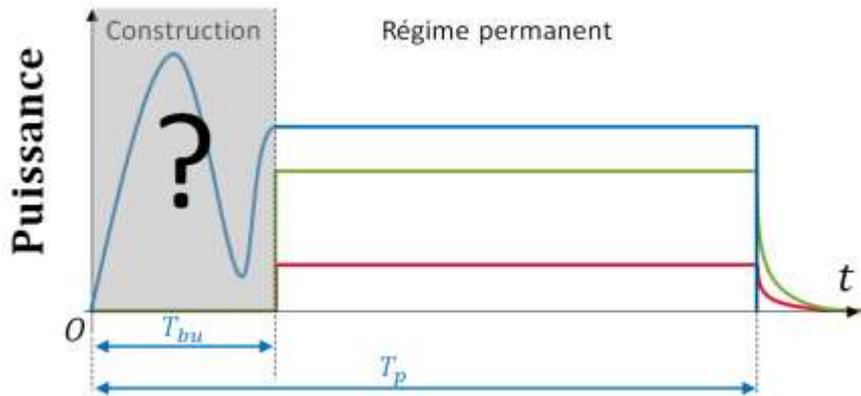
Réalisations et expériences de détection de gaz

- Réalisation des diapasons optimaux en quartz
- Détections multi-gaz en perspective

- L'OPO : un convertisseur de photons



- Les équations de taux appliquées aux OPO ont été résolues

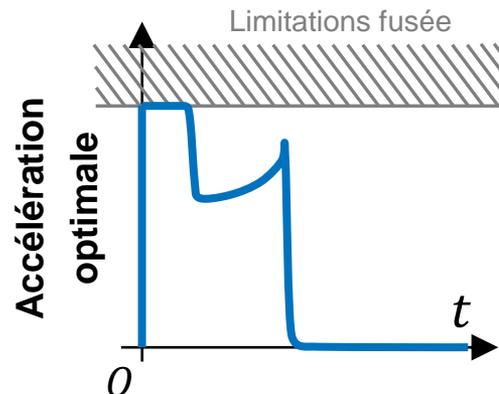


$$\begin{cases}
 \tau_s \frac{d}{dt} Y_s = R_s [\sqrt{Y_s} \cosh(\vartheta\sqrt{X}) + \sqrt{Y_i} \sinh(\vartheta\sqrt{X})]^2 - Y_s \\
 \tau_i \frac{d}{dt} Y_i = R_i [\sqrt{Y_s} \sinh(\vartheta\sqrt{X}) + \sqrt{Y_i} \cosh(\vartheta\sqrt{X})]^2 - Y_i
 \end{cases}$$

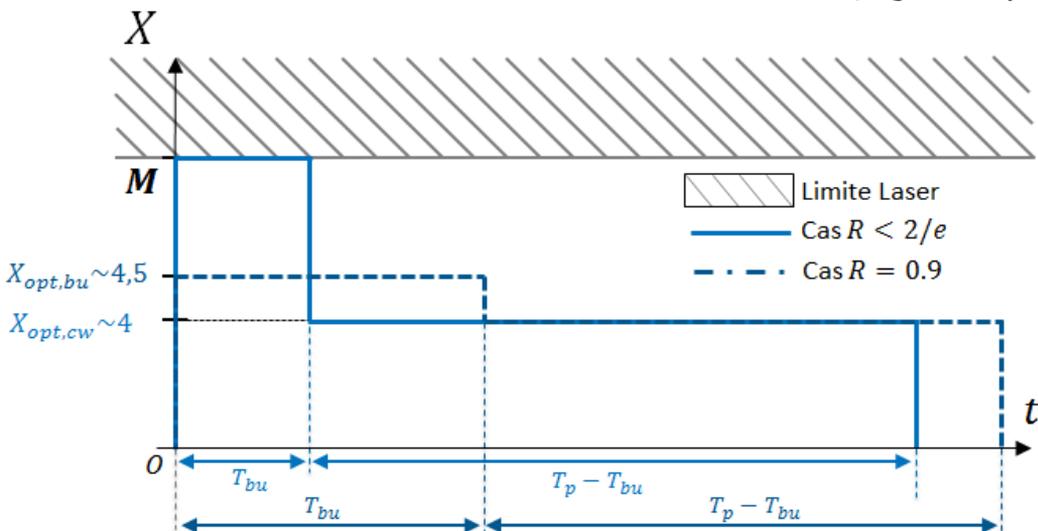
Nombre de photons Signal Nombre de photons de Pompe
Nombre de photons Idler

- C'est un problème de contrôle optimal

Problème de Goddard



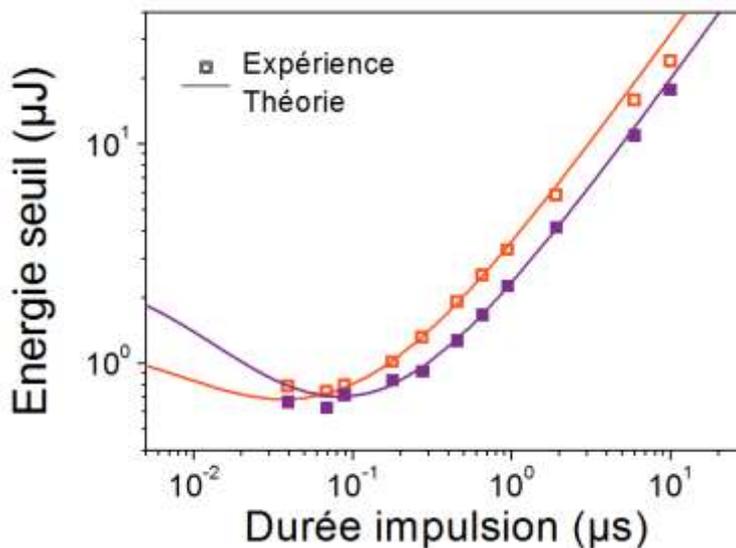
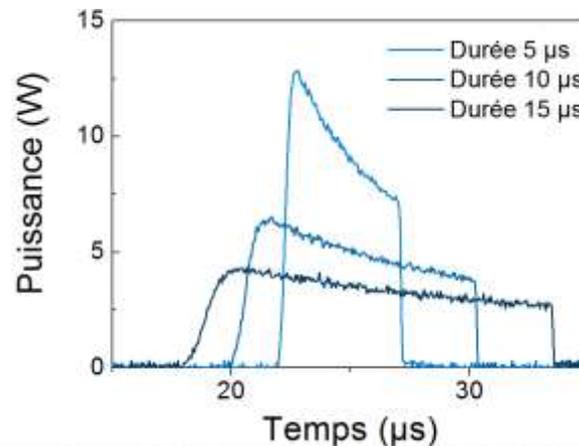
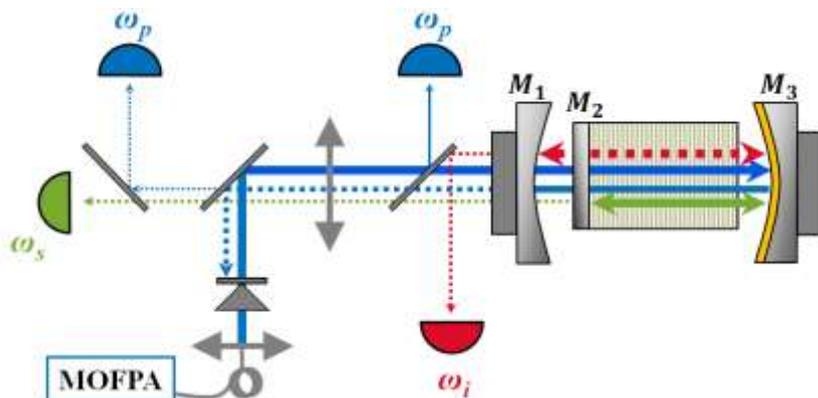
- Pour les OPOs doublement résonant ($R_s = R_i = R$), l'optimum est bien défini:



$$X_{opt} = \left[\frac{1}{\ln R} \left(2 + W \left(-\frac{2}{Re^2} \right) \right) \right]^2$$

G. Aoust et al., "Optimal Pump Pulse Shapes for OPOs," J. Opt. Soc. Am. B, 2016 (En cours de soumission).

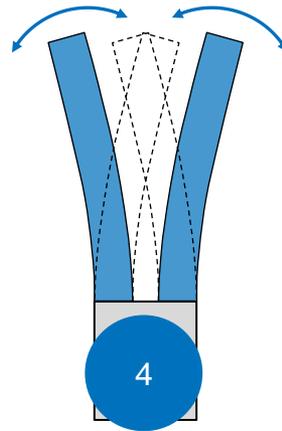
- L'existence de cet optimum a été démontrée expérimentalement



Cas 1: $(R_s ; R_i) = (0.96 ; 0.93)$

Cas 2: $(R_s ; R_i) = (0.96 ; 0.76)$

G. Aoust et al., "Pump duration optimization for optical parametric oscillators," *J. Opt. Soc. Am. B*, Nov. 2014



Amélioration de la détection acoustique

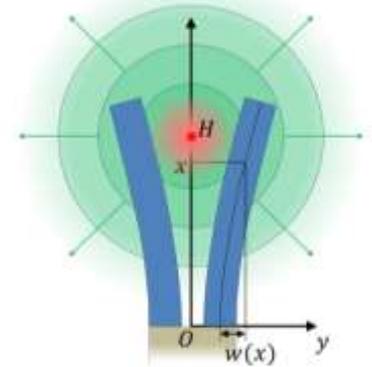
Optimisation de forme du diapason

Comportement du diapason sous air

- Développement d'un modèle analytique complet pour le QEPAS:

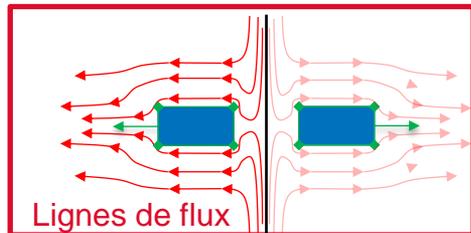
$$SnR = \frac{\sqrt{2}|F_{pA}|}{F_{bruit}\sqrt{\Delta f}}$$

$$F_{pA} = \int_{-\frac{l}{2}}^{\frac{l}{2}} \int_0^L [p(r_{in}) - p(r_{ext})]\phi(x)dx \quad F_{bruit} = \sqrt{4k_B T \frac{M\omega_0}{Q_{tot}}}$$



- Les performances du capteur dépendent du facteur de qualité

$$\frac{1}{Q_{tot}} = \frac{1}{Q_{struct}} + \frac{1}{Q_{visqueux}} + \frac{1}{Q_{acoustique}}$$



Vue de dessus

Viscosité

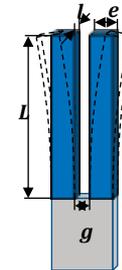
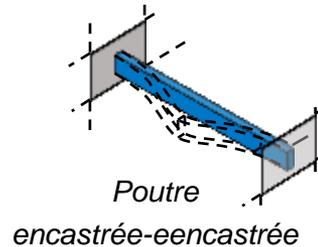
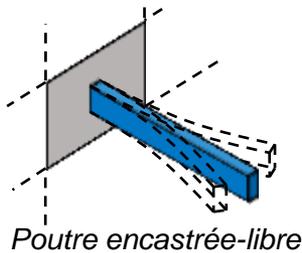
Compressibilité

Forme optimale du diapason

- Vérifications de la modélisation du facteur de qualité

Diapason	Reflex	VIA	VIA x 1.8
Longueur L (mm)	4	2.26	4.07
Largeur e (mm)	0.2	0.06	0.11
Epaisseur l (mm)	0.6	0.03	0.054
Fréquence f (Hz)	69950	61780	36090
Q expérience	5 529	2 040	3 076
Q théorie	7 760	2 176	3 274

Diapason	Raltron	VIG	VIG x 4	M1	C1
Longueur L	3,12	4,15	16	20	6,8
Largeur e	0,4	0,45	1,8	5	4
Epaisseur l	0,33	0,5	2	0,2	1
Gap g	0,2	0,5	2	0,5	1
Fréquence f	32768	22941	5616	26207	42744
Q expérience	10 242	13 000	21 852	19 238	8 700
Q théorie	12 277	14 445	24 860	19 539	7 186



G. Aoust et al., "Viscous damping on flexural mechanical resonators," *Sensors Actuators A Phys.*, vol. 230, pp. 126–135, 2015.

G. Aoust et al., "Acoustic damping on flexural mechanical resonators," *Sensors Actuators A Phys.*, vol. 238, pp. 158–166, 2016.

- Validation de la modélisation du facteur de qualité: optimisation



	Expérience	Théorie
Largeur e (mm)	7	7
Epaisseur l (mm)	2	2
Longueur L (mm)	30	30
Fréquence (Hz)	5 500	6 800
Q total	41 000	47 000



G. Aoust et al., "Optimal Q factor for Tuning Forks in a Fluid Media", *Sensors and Actuators B*, 2016. (En cours de soumission)

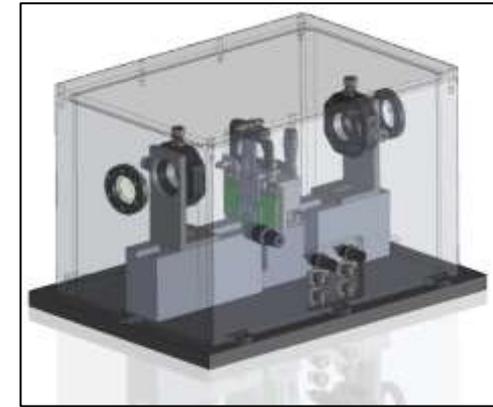
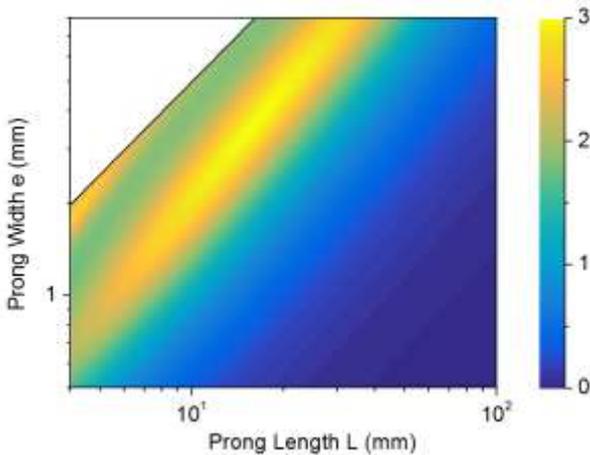
Optimisation de forme pour la photoacoustique

- On peut définir le diapason optimal pour la photoacoustique

Optimisation analytique de la géométrie

Validation des performances par éléments finis

Réalisations et tests en cours



- Un ordre de grandeur par rapport à l'état de l'art attendu

	Diapason horloger standard	Diapason horloger, meilleure configuration	Notre diapason optimal
Rapport signal sur bruit	1	30	450

Brevet en cours de dépôt

Brevet déposé à DCV pour un dispositif innovant (cas 2641)



- Un premier record de détectivité a déjà été atteint

	Diapason horloger standard	Diapason horloger, meilleure configuration	Expérience
Rapport signal sur bruit	1	30	150

- D'autres améliorations restent à venir, un ordre de grandeur semble très raisonnable:

	Diapason horloger standard	Diapason horloger, meilleure configuration	Expérience
Rapport signal sur bruit	1	30	300

Publications et conférences

- **Propriétés intellectuelles :**

- Enveloppe SOLEAU le 15/09/2014 pour le résonateur C.
- Logiciel de simulation d'optique gaussienne GOSS.
- Brevet n° FR3 025 673 du 11 mars 2016.
- Brevet déposé à DCV pour un circuit de détection (cas 2640)
- Brevet déposé à DCV pour un dispositif innovant (cas 2641)

- **Publications (journaux à comité de lecture):**

- G. Aoust et al., "Pump duration optimization for optical parametric oscillators," *J. Opt. Soc. Am. B*, Nov. 2014
- G. Aoust et al., "Viscous damping on flexural mechanical resonators," *Sensors Actuators A Phys.*, vol. 230, pp. 126–135, 2015.
- G. Aoust et al., "Acoustic damping on flexural mechanical resonators," *Sensors Actuators A Phys.*, vol. 238, pp. 158–166, 2016.
- G. Aoust et al., "Optimal Q factor for Tuning Forks in a Fluid Media", *Sensors Actuators A Phys.*, vol. 243, pp. 134–138, 2016.
- G. Aoust et al., "Optimal Pump Pulse Shapes for OPOs," *J. Opt. Soc. Am. B*, 2016 (*En cours de publication J. Opt. Soc. Am. B*).
- G. Aoust et al., "Wavelength Engineering using spatial hole burning", 2016 (*En cours de rédaction*).
- G. Aoust et al., "The theory of QEPAS with micro-resonator," 2016 (*En cours de rédaction*).

- **Conférences:**

- G. Aoust et al., in *2nd Conference on photoacoustic and photothermal theory and applications (CPPTA)*, Varsovie 2013 (oral)
- G. Aoust, et al., "Influence of Pump Pulse Duration on Doubly Resonant Optical Parametric Oscillators Build-up Time," in *Conference on Lasers and Electro-Optics (CLEO)*, 2014.(oral)
- G. Aoust et al., in *LACSEA*, 2014.(oral)
- G. Aoust et al., "Experimental and Numerical Analysis of Commercial and Homemade Tuning Forks for QEPAS .," in *Conference on Lasers and Electro-Optics (CLEO)*, San José USA 2015.(poster)
- C. Couvin; X. Délen; G. Aoust et al. "Singly Resonant OPO Pumped by a Pulsewidth-Tunable Hybrid MOPA Source ", *Mid-Infrared Coherence Sources (MICS)*, 2016