

# 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

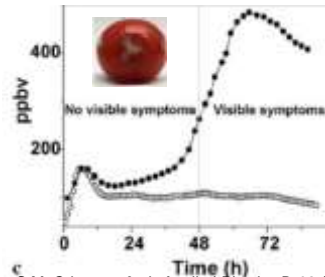


Rejets agricoles et industriels



PPB  $10^{-9}$

Sciences de la vie



Qualité de l'air intérieure

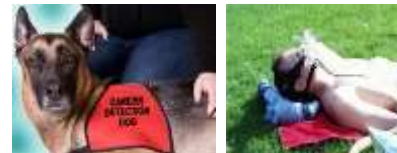


Sécurité civile - Défense



PPT  $10^{-12}$

Diagnostics médicaux



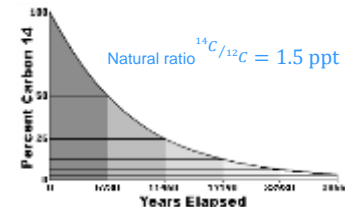
Contrôle d'odeurs



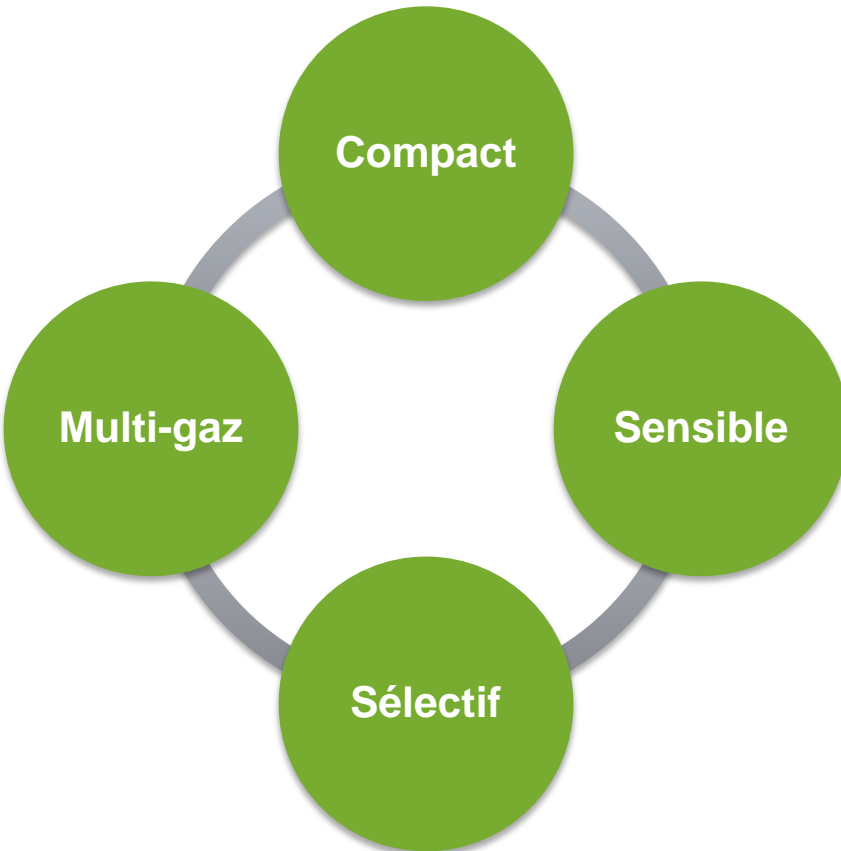
Geosmin  
("l'odeur de la pluie").

PPQ  $10^{-15}$

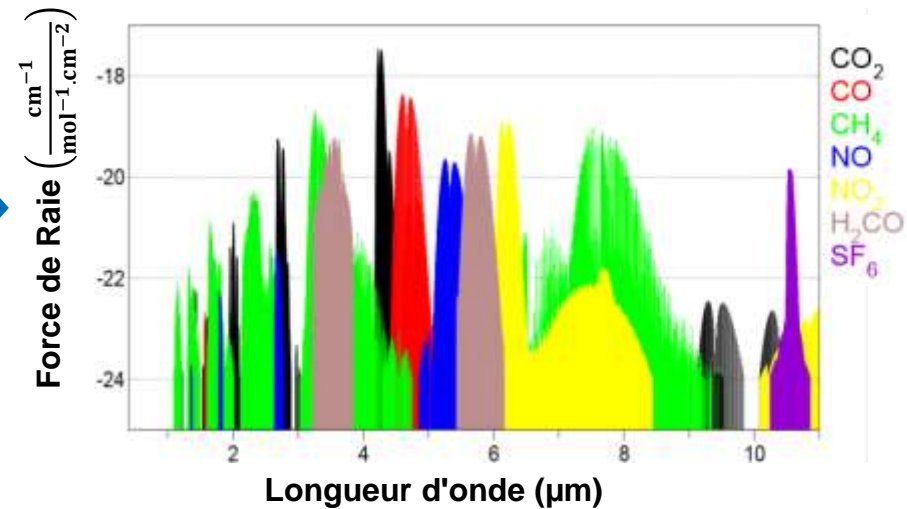
Mesures de rapports isotopiques



# Un besoin simple mais de nombreuses contraintes

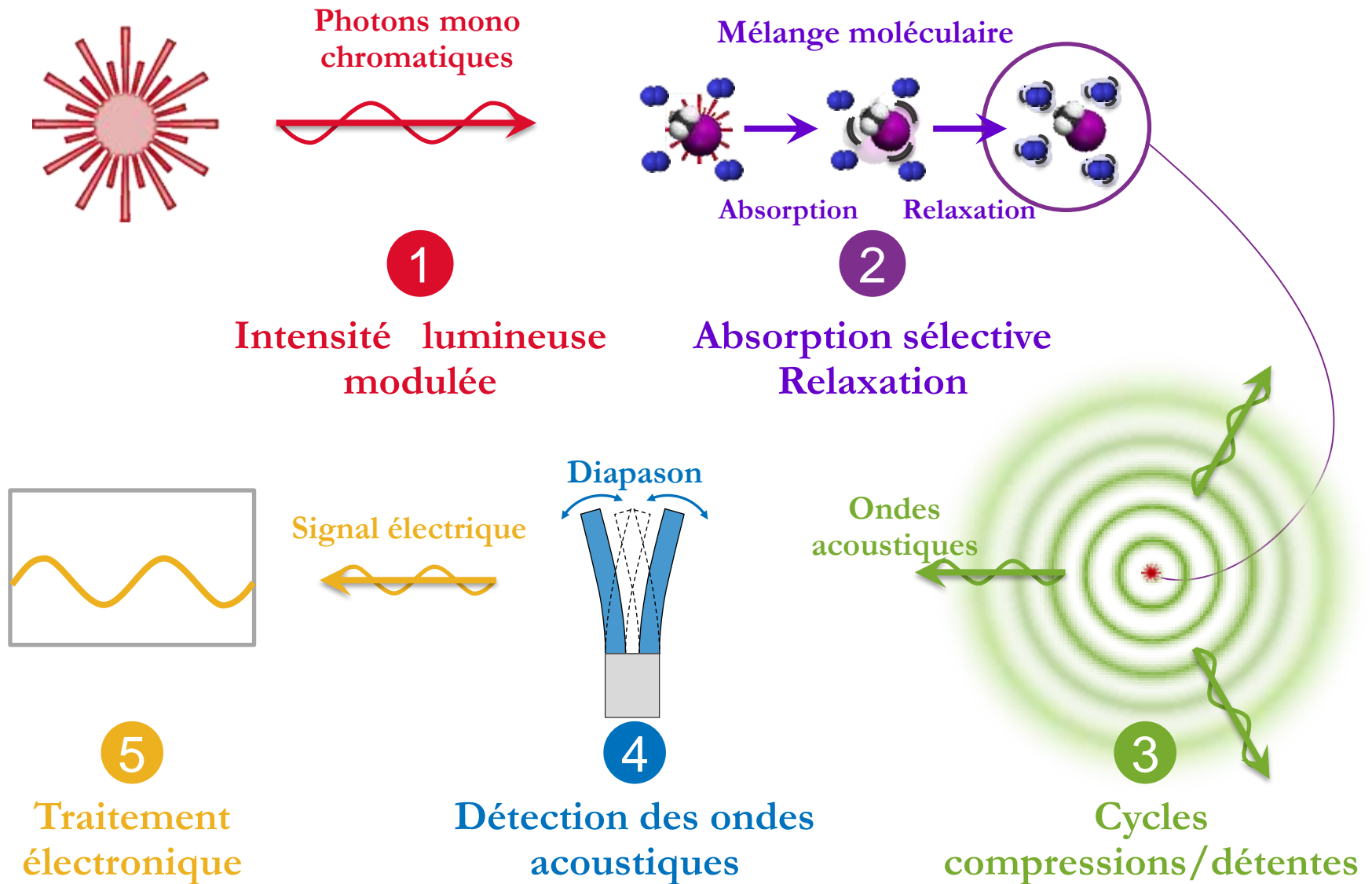


## Spectroscopie



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

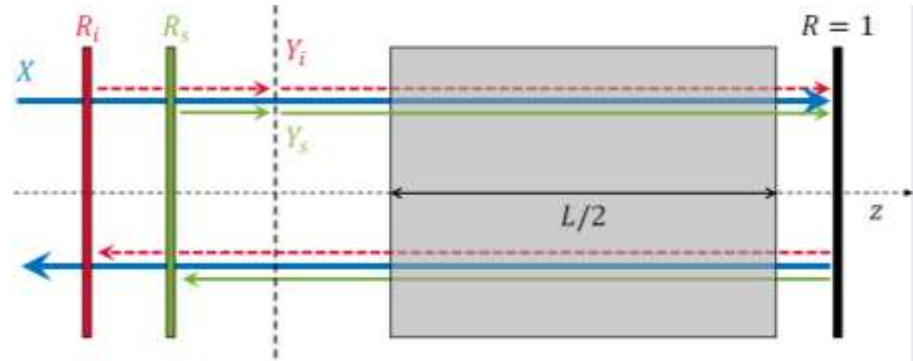
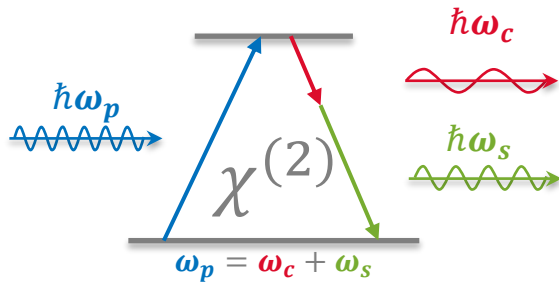
### Modélisation du diapason et design optimal

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

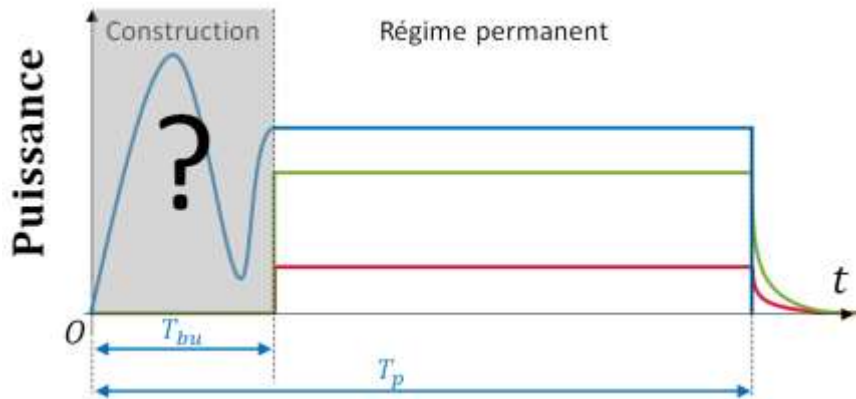
### Réalisations et expériences de détection de gaz

- 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

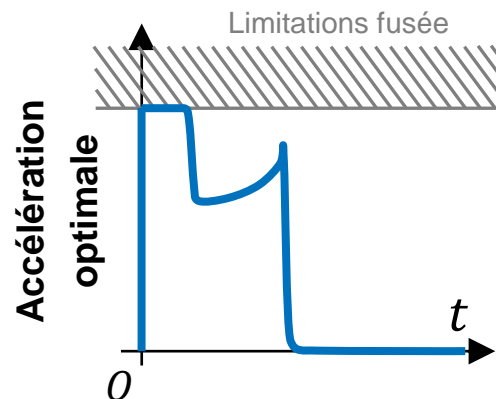


$$\begin{cases}
 \tau_s \frac{d}{dt} Y_s = R_s [\sqrt{Y_s} \cosh(\vartheta \sqrt{X}) + \sqrt{Y_i} \sinh(\vartheta \sqrt{X})]^2 - Y_s \\
 \tau_i \frac{d}{dt} Y_i = R_i [\sqrt{Y_s} \sinh(\vartheta \sqrt{X}) + \sqrt{Y_i} \cosh(\vartheta \sqrt{X})]^2 - Y_i
 \end{cases}$$

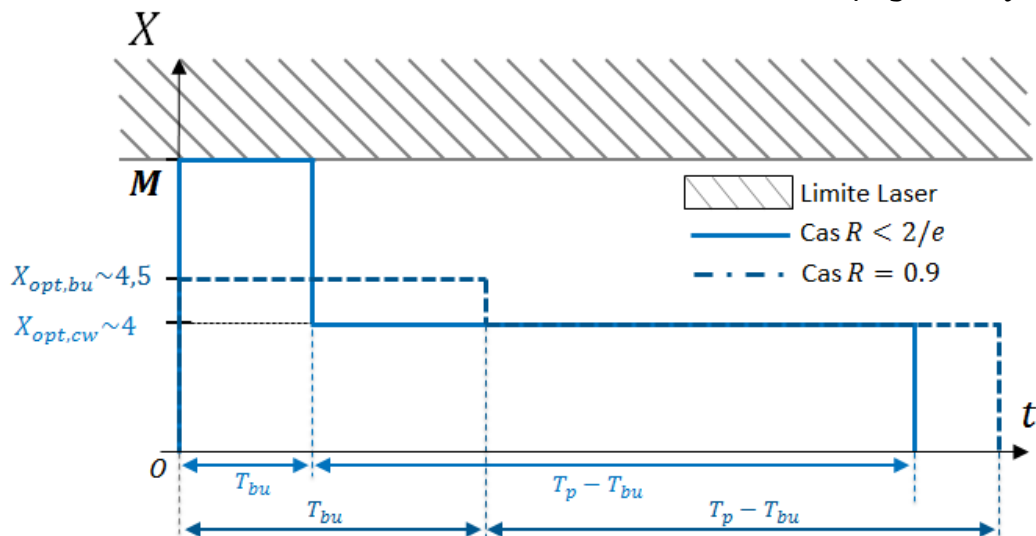
Nombre de photons Signal    Nombre de photons de Pompe  
Nombre de photons Idler

- C'est un problème de contrôle optimal

Problème de Goddard



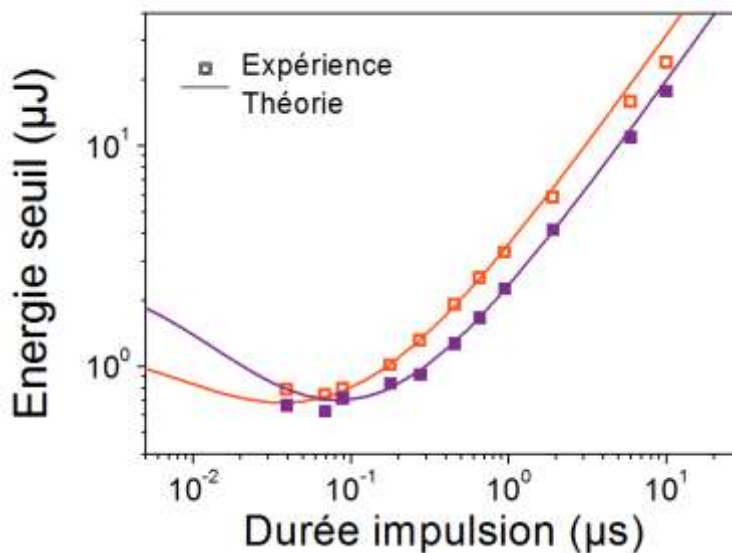
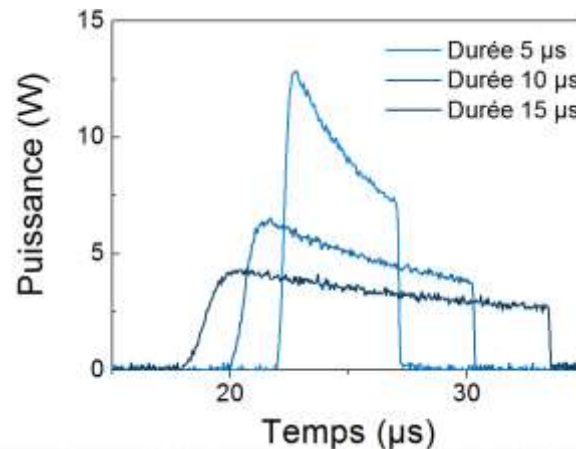
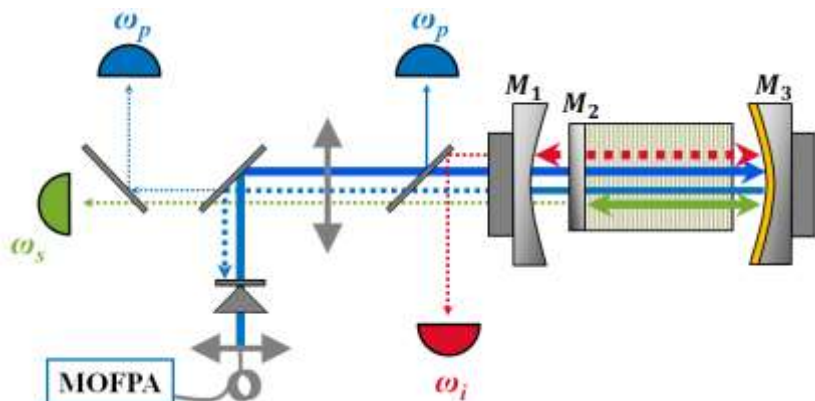
- Pour les OPOs doublement résonant ( $R_s = R_i = R$ ), l'optimum est bien défini:



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

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

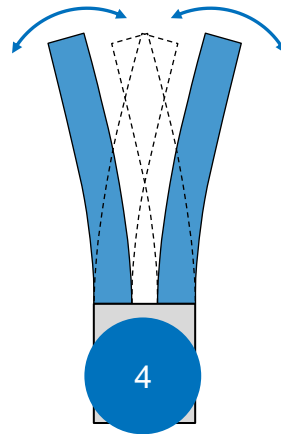


**Cas 1:**  $(R_s ; R_i) = (0.96 ; 0.93)$

**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

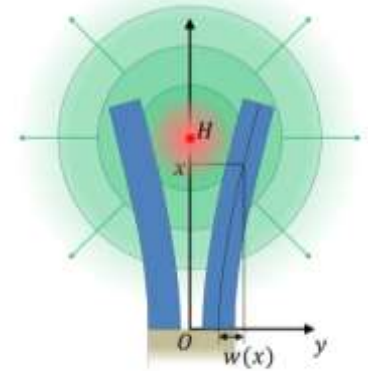
Optimisation de forme du diapason

# Comportement du diapason sous air

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

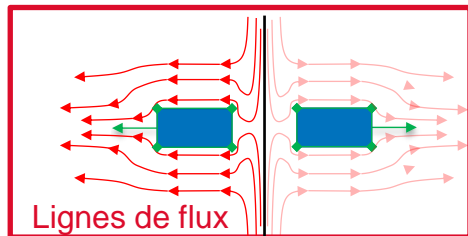
$$SnR = \frac{\sqrt{2}|F_{pA}|}{F_{bruit}\sqrt{\Delta f}}$$

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



- 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

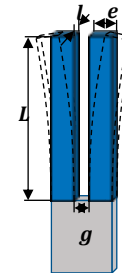
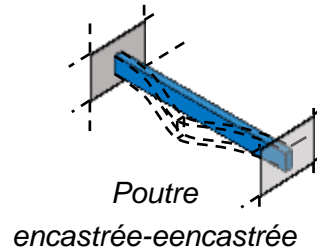
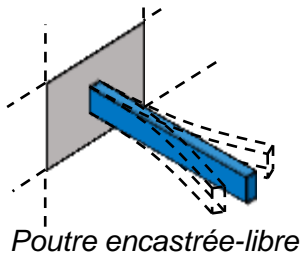
Compressibilité

# 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        |
| <b>Q expérience</b> | <b>5 529</b> | <b>2 040</b> | <b>3 076</b> |
| <b>Q théorie</b>    | <b>7 760</b> | <b>2 176</b> | <b>3 274</b> |

| 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        |
| <b>Q expérience</b> | <b>10 242</b> | <b>13 000</b> | <b>21 852</b> | <b>19 238</b> | <b>8 700</b> |
| <b>Q théorie</b>    | <b>12 277</b> | <b>14 445</b> | <b>24 860</b> | <b>19 539</b> | <b>7 186</b> |



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         |
| <b>Q total</b>   | <b>41 000</b> | <b>47 000</b> |



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

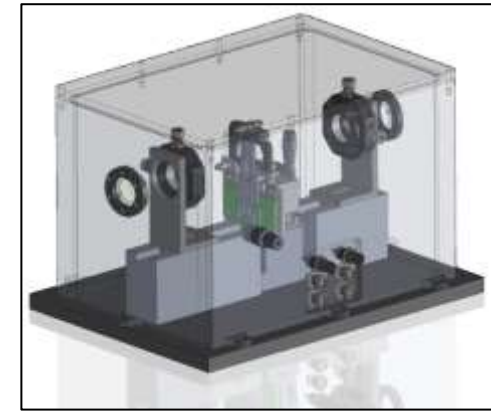
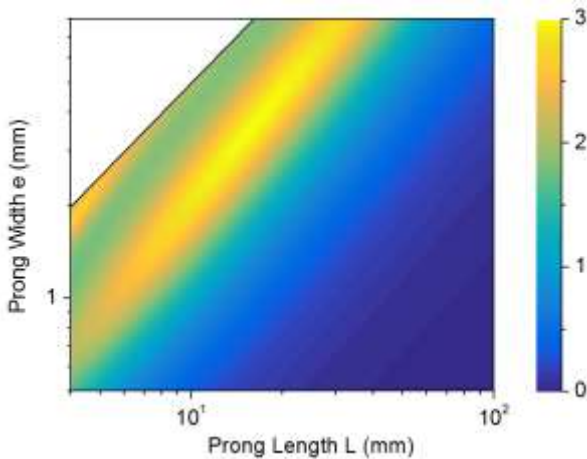
# Optimisation de forme pour la photoacoustique

- 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 |
|--|----------------------------|--|------------------------|
|--|----------------------------|--|------------------------|

|                                 |          |           |            |
|---------------------------------|----------|-----------|------------|
| <b>Rapport signal sur bruit</b> | <b>1</b> | <b>30</b> | <b>450</b> |
|---------------------------------|----------|-----------|------------|

## 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