



**HAL**  
open science

## Accrochage de fréquence dans un laser à fibre à respiration : observation de l'arbre de Farey et de l'escalier du diable

Xiuqi Wu, Ying Zhang, Junsong Peng, Sonia Boscolo, Christophe Finot,  
Heping Zeng

### ► To cite this version:

Xiuqi Wu, Ying Zhang, Junsong Peng, Sonia Boscolo, Christophe Finot, et al.. Accrochage de fréquence dans un laser à fibre à respiration : observation de l'arbre de Farey et de l'escalier du diable. 26ème congrès général de la Société Française de Physique, Jul 2023, Paris, France. hal-04123549

**HAL Id: hal-04123549**

**<https://hal.science/hal-04123549v1>**

Submitted on 9 Jun 2023

**HAL** is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

# Accrochage de fréquence dans un laser à fibre à respiration : observation de l'arbre de Farey et de l'escalier du diable

Xiuqi WU <sup>①</sup>, Ying ZHANG <sup>①</sup>, Junsong PENG <sup>①②④</sup>, Sonia BOSCOLO <sup>③</sup>, Christophe FINOT <sup>④</sup> and Heping ZENG <sup>①⑤⑥</sup>

<sup>①</sup> State Key Laboratory of Precision Spectroscopy, East China Normal University, 200241 Shanghai, China

<sup>②</sup> Collaborative Innovation Center of Extreme Optics, Shanxi University, 030006 Taiyuan, Shanxi, China.

<sup>③</sup> Aston Institute of Photonic Technologies, Aston University, Birmingham B4 7ET, United Kingdom

<sup>④</sup> Laboratoire Interdisciplinaire Carnot de Bourgogne, UMR 6303 CNRS-Université de Bourgogne Franche-Comté, 9 avenue. Alain Savary, Dijon, France

<sup>⑤</sup> Chongqing Key Laboratory of Precision Optics, Chongqing Institute of East China Normal University, 401120 Chongqing, China

<sup>⑥</sup> Shanghai Research Center for Quantum Sciences, 201315 Shanghai, China

[jspeng@lps.ecnu.edu.cn](mailto:jspeng@lps.ecnu.edu.cn)



## INTRODUCTION

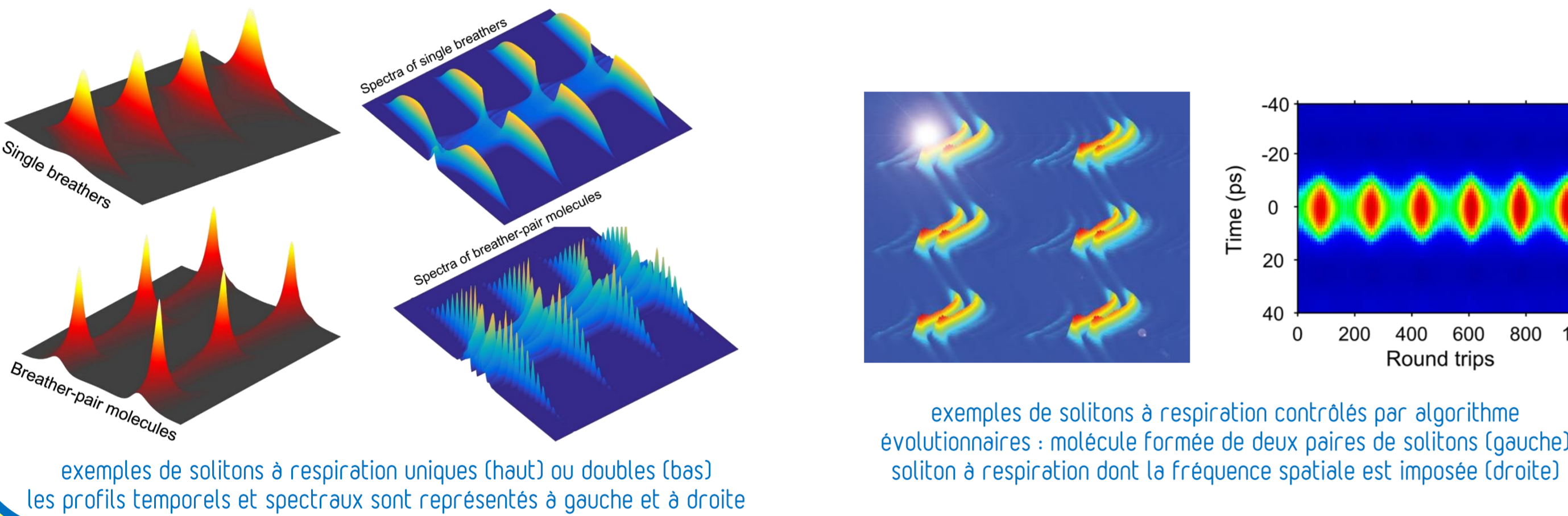
Grâce aux techniques de détection en temps réel, les cavités laser à fibre à modes bloqués offrent une plateforme extrêmement intéressante pour l'étude des solitons. Dans le contexte des lasers ultrarapides la génération d'impulsions à respiration constitue un mode de fonctionnement alternatif [1,2] au cas bien répandu où une impulsion aux propriétés toujours identiques est émise à chaque tour de cavité. L'excitation de ce régime déclenche donc spontanément l'émergence d'une seconde fréquence caractéristique dans le système. Cette deuxième fréquence sera plus faible que la fréquence associée à la cavité, i.e. la fréquence de répétition. Or les systèmes non linéaires à deux fréquences concurrentes peuvent conduire à un verrouillage de fréquence, conduisant à une réponse périodique résonante avec un rapport de fréquence rationnel [3].

Dans le domaine de l'optique, les recherches menées jusqu'à présent concernent essentiellement des systèmes dans lesquels une modulation externe, contrôlable avec précision, ajoute une nouvelle fréquence caractéristique au système. Le cas d'une seconde fréquence émergeant naturellement a par contre été très peu discuté en raison de la difficulté expérimentale de contrôler ce régime. Pour simplifier cette tâche laborieuse, nous avons mis en place une approche d'apprentissage automatique basée sur l'utilisation d'un algorithme évolutionnaire [4]. Nous démontrons alors qu'un laser à fibre verrouillé par un mode de respiration est un système montrant un verrouillage de fréquence [5]. Ces états sont caractérisés par une robustesse à la variation des paramètres (puissance de pompage et polarisation) et un rapport signal/bruit nettement amélioré. Ils se produisent dans l'ordre où ils apparaissent dans l'arbre de Farey et dans un intervalle de puissance de pompage donné par la largeur de la marche correspondante dans l'escalier du diable.

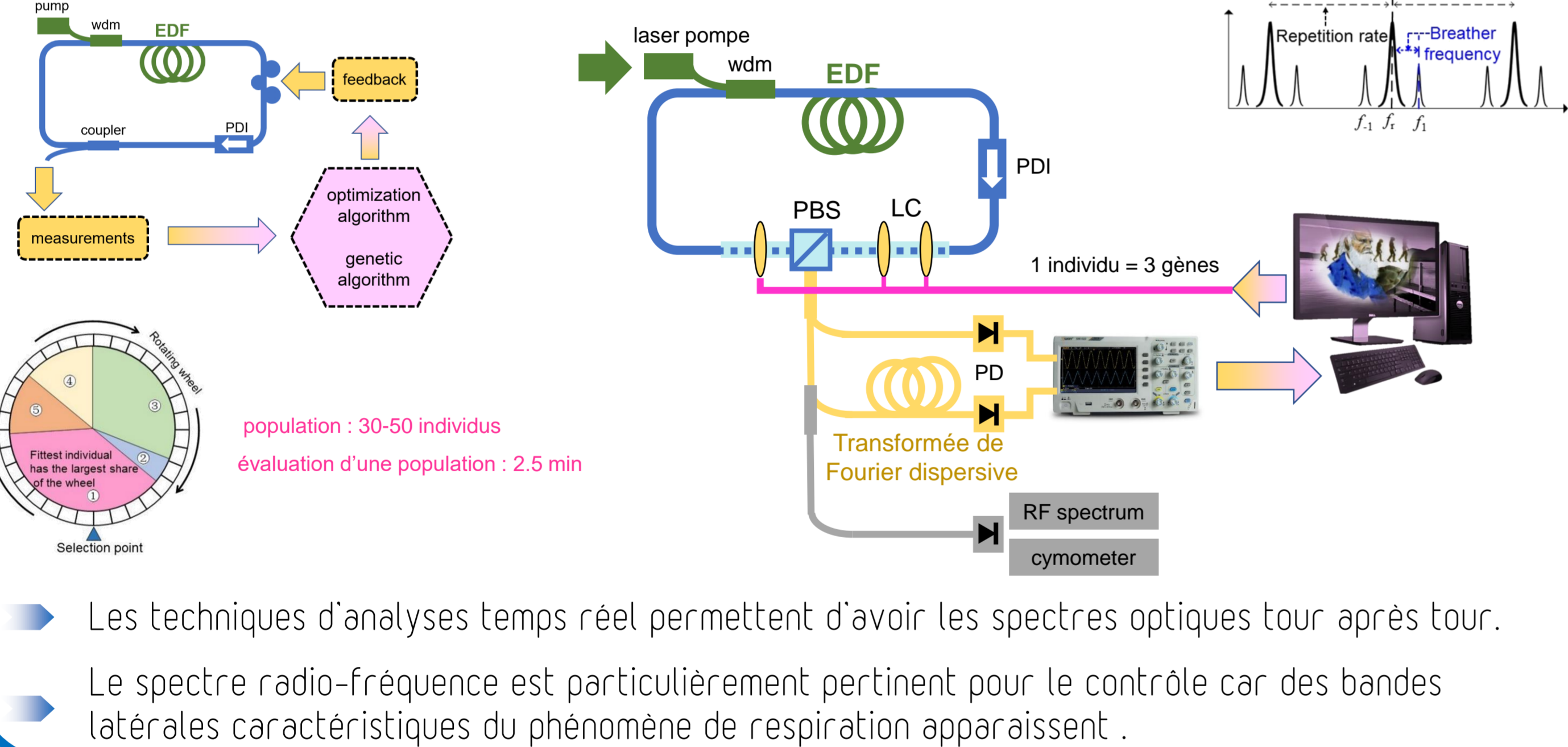
## MONTAGE EXPÉRIMENTAL

### LASER À RESPIRATION ET LASER INTELLIGENT

- Les lasers à respiration génèrent des impulsions ultrabrèves dont les propriétés temporelles et spectrales (largeurs caractéristiques, amplitudes) évoluent périodiquement lors de leur propagation.
- Ils sont généralement obtenus de manière empirique par ajustement manuel des paramètres de la cavité laser fibrée. Leur étude systématique est donc délicate.
- En mettant en œuvre une stratégie basée sur l'apprentissage machine et un algorithme évolutionnaire, nous pouvons contrôler avec bien plus de précision le fonctionnement de la cavité.



### CONFIGURATION RETENUE

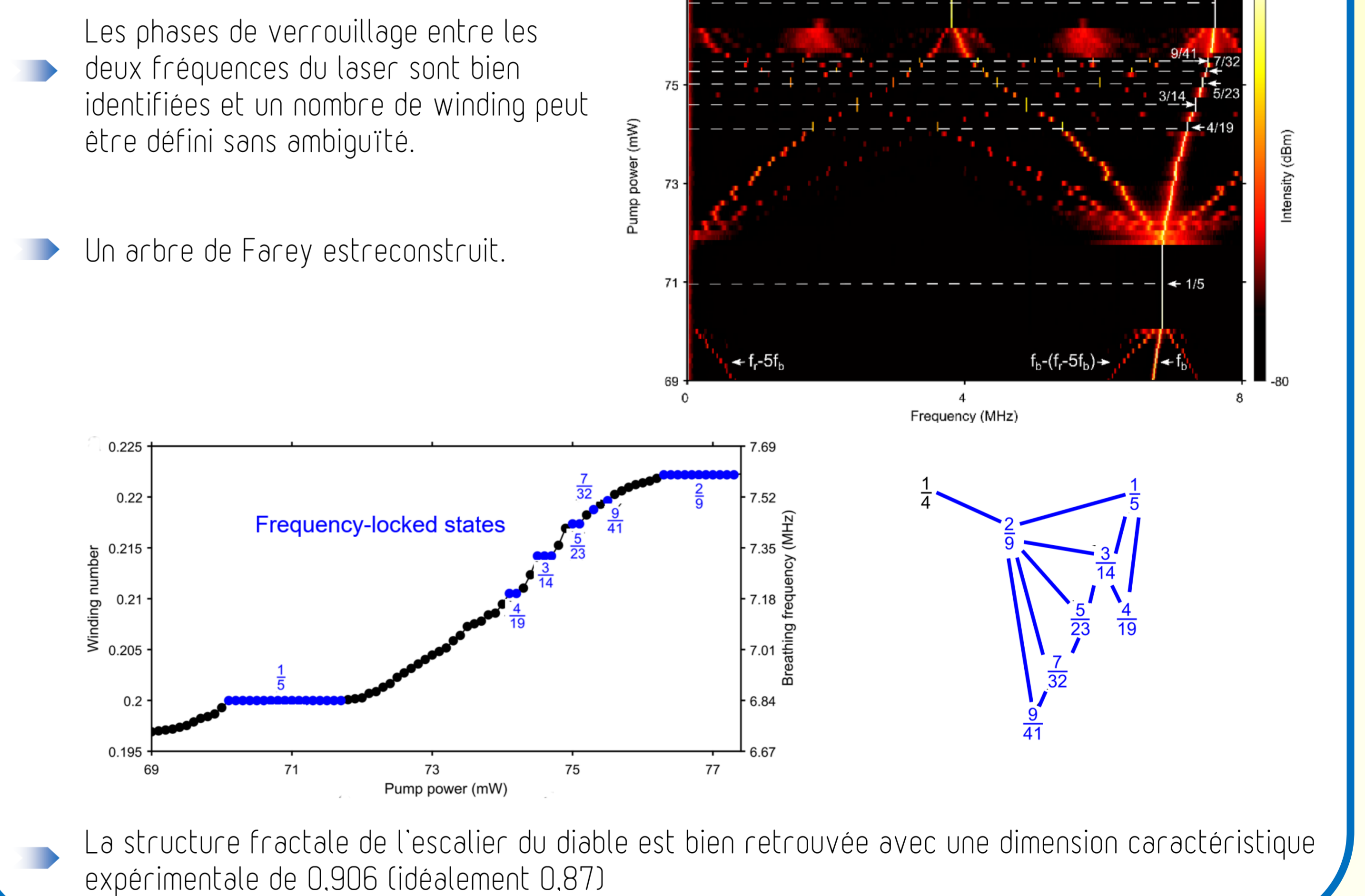


## ESCALIER DU DIABLE ET ARBRE DE FAREY

### PRINCIPE

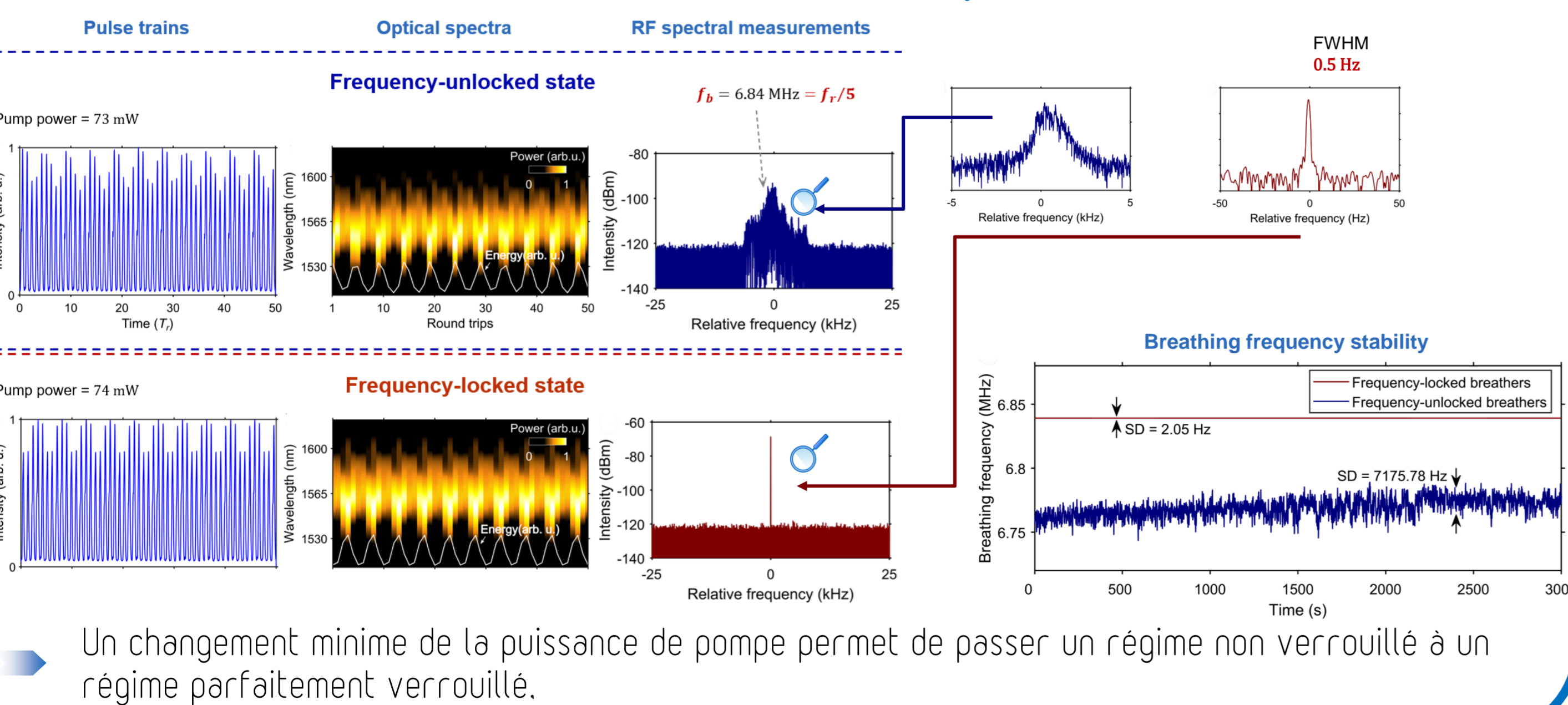
- Les nombres de winding ne s'enchaînent pas de manière aléatoire. Ils suivent une séquence d'arbre de Farey. Un nouveau nombre est créé à partir de deux précédents : 
$$\frac{m}{n} \oplus \frac{p}{q} = \frac{m+p}{n+q}$$
- Entre deux paliers verrouillés, on a un palier non-verrouillé. La taille des paliers suit une structure fractale, l'escalier du diable avec des marches de plus en plus courtes.

### RESULTATS EXPERIMENTAUX

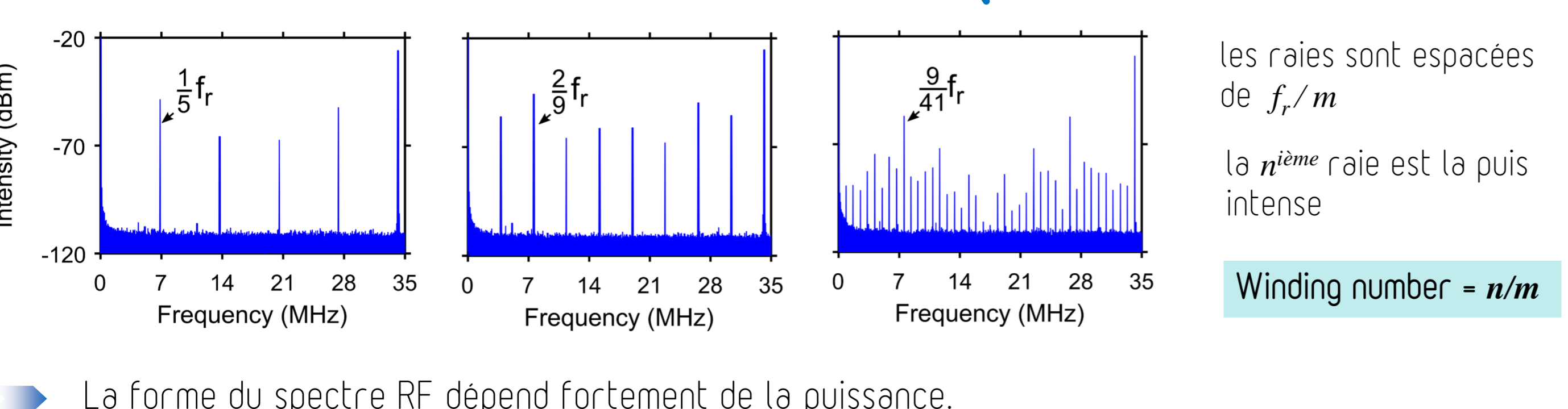


## RÉGIMES DE FONCTIONNEMENT

### ACCROCHAGE DE FRÉQUENCE

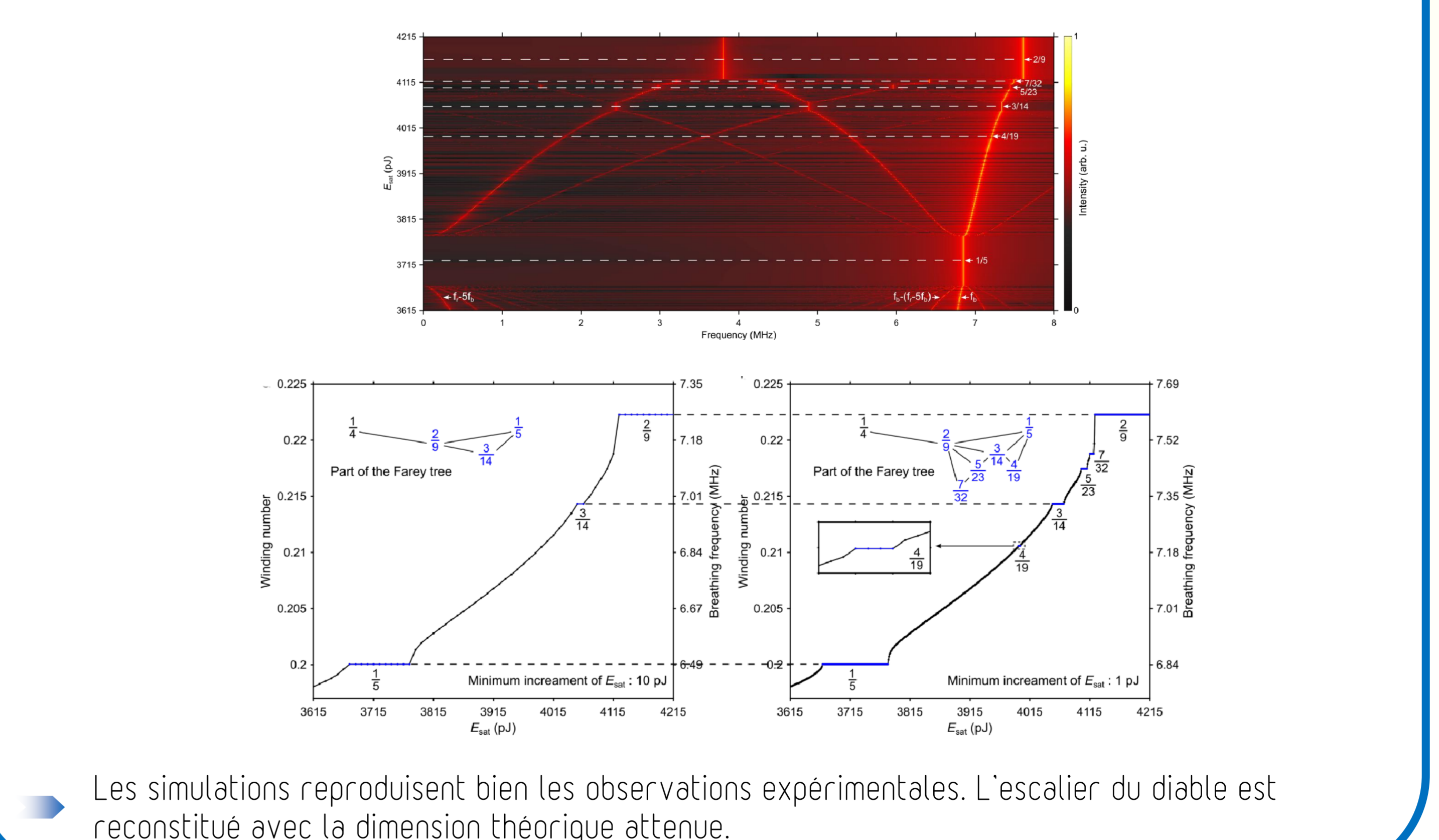


### SPECTRE RADIO-FRÉQUENCE



## CONFIRMATION NUMÉRIQUE

- On utilise un modèle scalaire de propagation où chaque élément fibré est décrit individuellement par l'équation de Schrödinger non-linéaire qui inclue les effets dispersifs et non-linéaires, ainsi que le gain éventuel. Un absorbant saturable discret est également utilisé.



## REFERENCES

[1] J. Peng, S. Boscolo, Z. Zhao, and H. Zeng, "Breathing dissipative solitons in mode-locked fiber lasers," *Science Advances* 5, eaax1110 (2019).  
 [2] J. Peng, Z. Zhao, S. Boscolo, C. Finot, S. Sugavanam, D. V. Churkin, and H. Zeng, "Breather Molecular Complexes in a Passively Mode-Locked Fiber Laser," *Laser Photonics Rev.* 15, 2000132 (2021).  
 [3] M. H. Jensen, P. Bak, and T. Bohr, "Complete Devil's Staircase, Fractal Dimension, and Universality of Mode-Locking Structure in the Circle Map," *Phys. Rev. Lett.* 50, 1637-1639 (1983).  
 [4] X. Wu, J. Peng, S. Boscolo, Y. Zhang, C. Finot, and H. Zeng, "Intelligent Breathing Soliton Generation in Ultrafast Fiber Lasers," *Laser & Photonics Reviews* 16, 2100191 (2021).  
 [5] X. Wu, Y. Zhang, J. Peng, S. Boscolo, C. Finot, and H. Zeng, "Farey tree and devil's staircase of frequency-locked breathers in ultrafast lasers," *Nature Communications* 13, 5784 (2022).

