

Tsunami temporel : retournement et amplification d'ondes dans un milieu modulé ultrasonore

Contact : Emmanuel Fort, Institut Langevin, emmanuel.fort@espci.fr

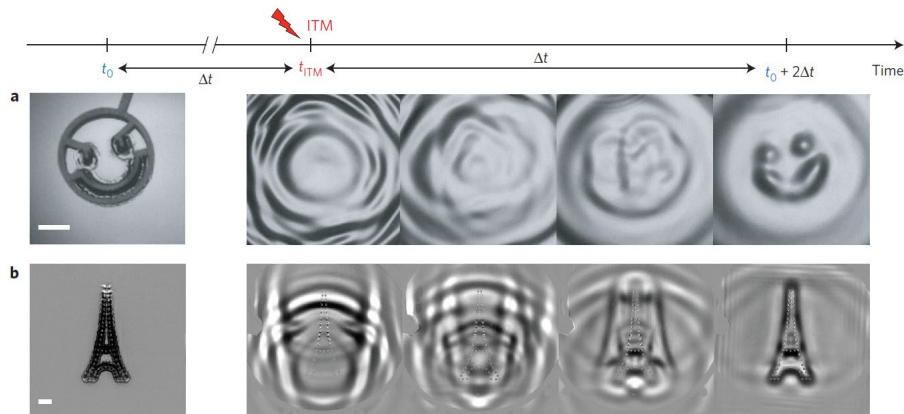


Figure : Exemple d'expériences de miroir à retournement temporel (ITM) sur une surface liquide pour une source en forme de Smiley (a) et en forme de Tour Eiffel (b) [1]. L'ITM est réalisé en modifiant subitement la gravité effective du bain liquide en donnant un choc vertical de 20g.

Le contrôle temporel des milieux constitue aujourd'hui une nouvelle approche pour manipuler la propagation des ondes. Contrairement aux dispositifs classiques fondés sur des structures spatiales (miroirs, lentilles, métamatériaux), il est possible de provoquer un retournement temporel d'une onde en modifiant brutalement les propriétés du milieu dans lequel elle se propage. Nous avons introduit ce concept sous le nom de Miroir Temporel Instantané (MTI) : une variation ultra-rapide de la vitesse de propagation des ondes génère une composante contrapropagative qui se refocalise exactement sur la source initiale. Ce principe a été démontré pour des ondes de surface hydrodynamiques par l'application d'un choc gravitaire vertical, permettant par exemple de refocaliser des fronts d'ondes ayant des formes arbitraires (voir figure).

L'objectif de ce stage est d'explorer une nouvelle implémentation de ce miroir temporel en utilisant un choc de pression de radiation ultrasonore plutôt qu'un choc gravitaire. Un transducteur ultrasonore permet en effet d'imposer, sur des temps très courts, une modification homogène des contraintes à l'interface liquide-air. L'enjeu sera de mettre en place le dispositif expérimental, de contrôler précisément la durée et l'amplitude du choc, puis d'observer et de caractériser le retournement temporel obtenu. Une attention particulière sera portée à la mesure de l'amplification associée et à l'analyse spectrale des modes générés.

Au-delà de la simple reproduction du phénomène, le stage visera à explorer un régime plus ambitieux. Lorsque la modification temporelle du milieu est suffisamment forte, la fréquence effective des modes peut transitoirement s'annuler, voire changer de signe. Les ondes passent alors d'un régime oscillatoire à un régime exponentiel, ce qui conduit à un ralentissement marqué, voire un "freezing", suivi d'une amplification contrôlée. L'étude expérimentale de ce régime constitue un enjeu central : il s'agira de caractériser les conditions d'apparition, de mesurer le gain en fonction du nombre d'onde et de comparer les observations aux prédictions théoriques.

Un tel changement brutal de paramètre dans un système d'ondes offre également une plateforme modèle pour étudier la dynamique de modes lors d'un « quenching » temporel. L'analyse des corrélations spatio-temporelles après le choc permettra d'examiner la propagation des perturbations, l'apparition éventuelle de structures spectrales, et le rôle du passage transitoire par une fréquence effective nulle. Ce système permet d'explorer expérimentalement des mécanismes analogues à ceux étudiés dans d'autres contextes physiques notamment cosmologique lorsqu'un horizon dynamique ou un changement rapide de métrique effective intervient. Cette ouverture conceptuelle pourra être approfondie en fonction du profil et des intérêts de l'étudiant(e).

Le stage comportera ainsi une dimension expérimentale forte — mise en place et optimisation du dispositif, acquisition et traitement d'images, analyse spectrale — ainsi qu'un volet théorique permettant de modéliser la dynamique des modes et d'interpréter quantitativement les observations. Il s'adresse à un(e) étudiant(e) de M1 ou M2 intéressé(e) par la physique des ondes, les milieux variables en temps et l'exploration de phénomènes dynamiques hors équilibre. Selon les résultats obtenus et l'intérêt du/de la candidat(e), le projet pourra se poursuivre en thèse consacrée au contrôle temporel des ondes et aux paysages spatio-temporels dynamiques.

Références :

Time reversal and holography with spacetime transformations V Bacot, M Labousse, A Eddi, M Fink, E Fort, Nature Physics 12, (2016).

Holding and amplifying electromagnetic waves with temporal non-foster metastructures, V Pacheco-Peña et al, Nat. Com (2025)

From Cosmology to Cold Atoms: Observation of Sakharov Oscillations in a Quenched Atomic Superfluid H Chen-Lung et al, Science (2013).