



HAL
open science

Gravitation Analogue en Hydrodynamique Interfaciale

Alexis Bossard, Germain Rousseaux

► **To cite this version:**

Alexis Bossard, Germain Rousseaux. Gravitation Analogue en Hydrodynamique Interfaciale. Journée des Doctorant, Jul 2024, Poitiers, France. <hal-05525107>

HAL Id: hal-05525107

<https://hal.science/hal-05525107v1>

Submitted on 24 Feb 2026

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.



Distributed under a Creative Commons CC BY 4.0 - Attribution - International License

Présentation / Introduction

La Gravitation Analogue est un domaine initié par William Unruh en 1981 [1] qui vise à reproduire et simuler en laboratoire, dans des systèmes de matière condensée, des objets astrophysiques (comme des trous noirs) pour tester des prédictions (par exemple le processus de Hawking [2]) qui sont inobservables avec les technologies actuelles. Pour simuler un objet astrophysique (tel qu'un trou noir), l'analogie nécessite un fluide en mouvement et des ondes mécaniques (dans notre cas: des ondes de surface), voyageant dans ce fluide qui sont l'analogie de modes. Un trou noir est un objet qui possède un champ gravitationnel si intense que rien ne peut s'en échapper, pas même la lumière à partir d'une frontière, appelée l'horizon. Le processus de Hawking stipule, qu'au voisinage de cet horizon, il y a l'émergence de paires de particules d'énergie opposée : la particule d'énergie positive sort du trou noir et la particule d'énergie négative est piégée. Il est possible d'amplifier cet effet grâce à deux horizons: c'est l'effet LASER de trou noir [3]. Dans ce cas, pour construire un trou noir analogue, on utilise une bathymétrie variable (un obstacle) pour accélérer l'écoulement au-dessus de cet obstacle de fond dans un canal à surface libre.

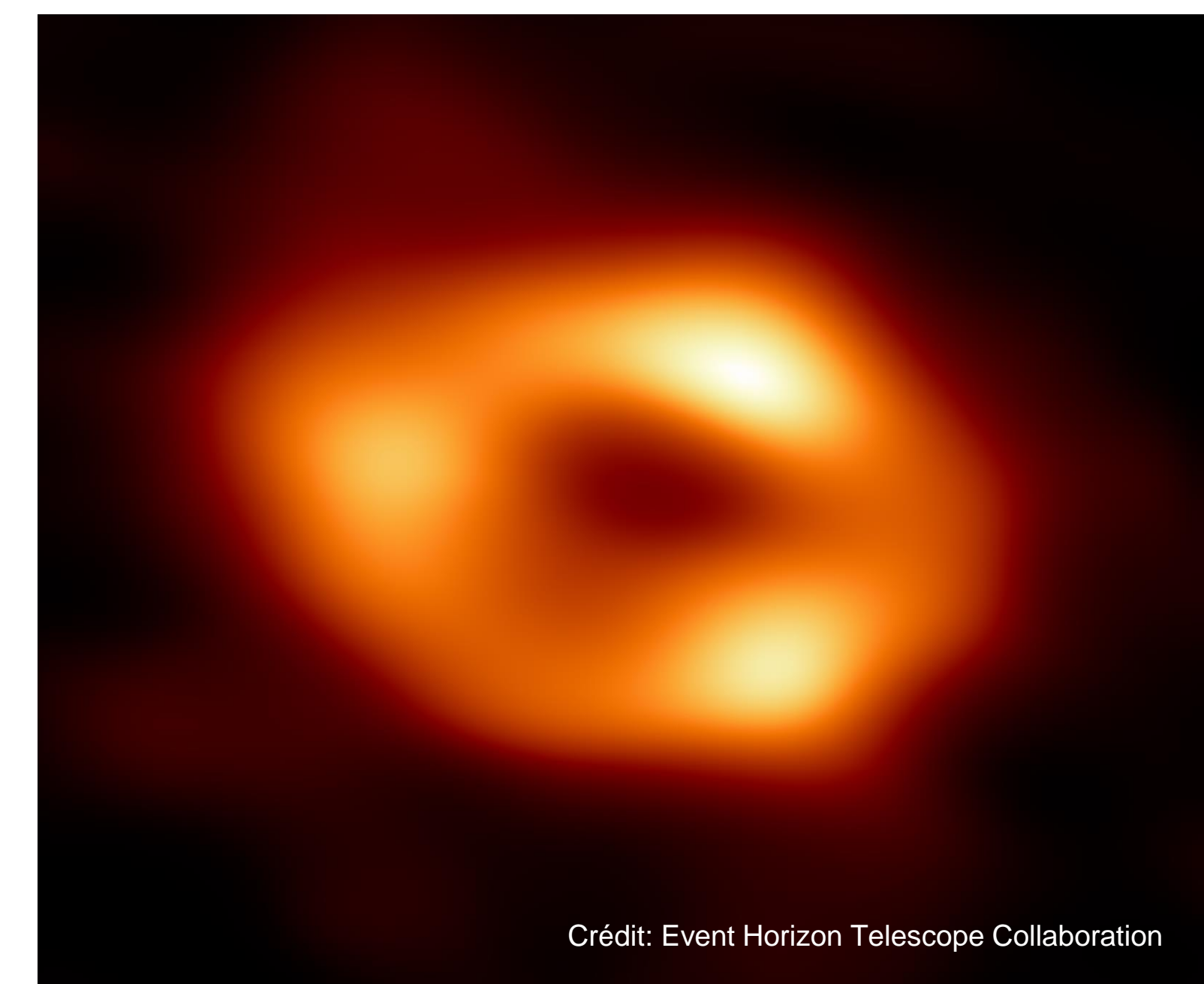


Photo du trou noir au centre de notre galaxie (Sagittarius A*)

→ Deux questions se posent alors: quels sont les régimes hydro-dispersifs adaptés pour pouvoir mesurer le rayonnement de Hawking? S'il existe de tels régimes, peut-on tester l'effet LASER analogue? Pour répondre à ces questions, nous nous sommes intéressés aux régimes à un obstacle.

MÉTHODES

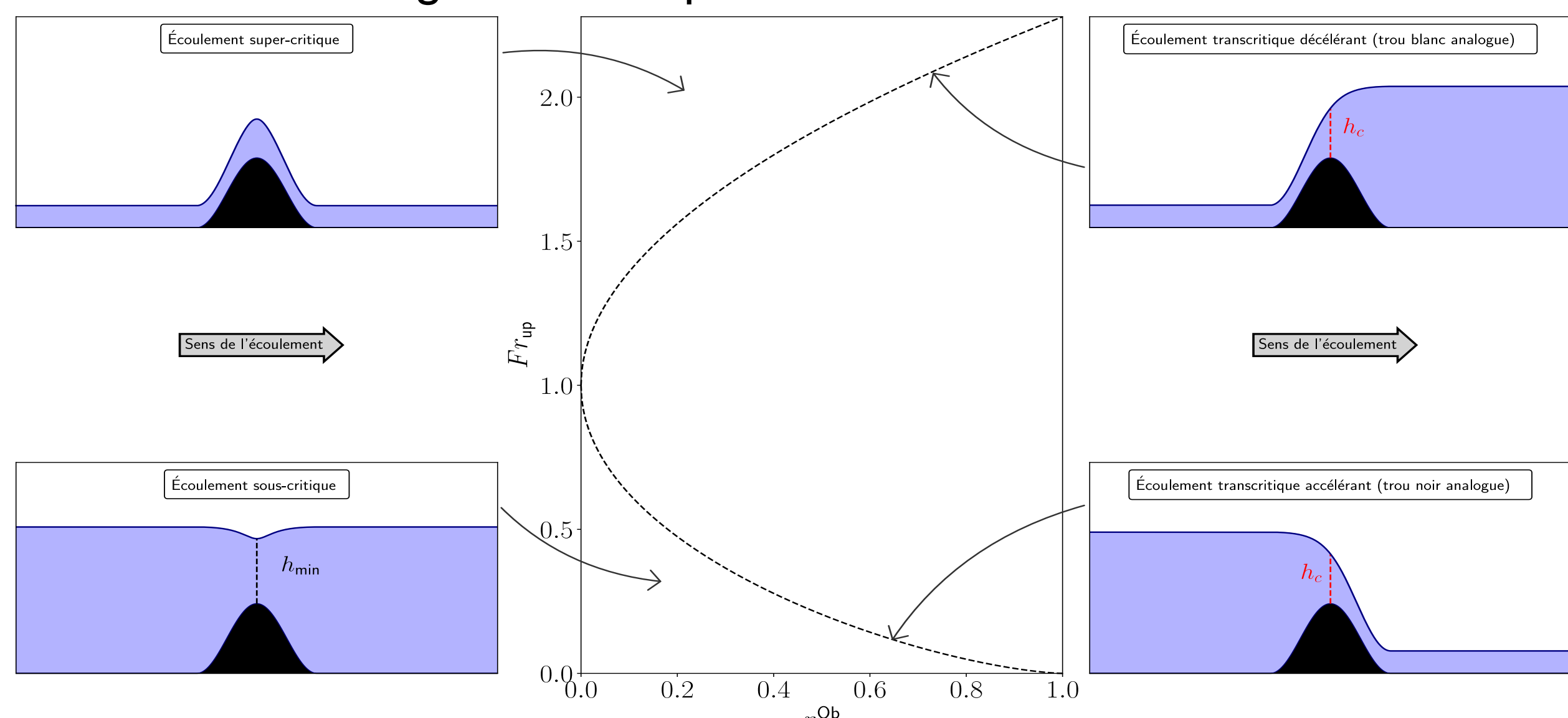
-Modèle non dispersif La Gravitation Analogue en hydrodynamique interfaciale s'appuie sur le métrique suivante qui fixe les régimes hydrauliques non dispersifs,

$$ds^2 = g_{\mu\nu} dx^\mu dx^\nu = c^2(x) [- (c^2(x) - U^2(x)) dt^2 \pm 2U(x) dt dx + dx^2]$$

avec $c(x) = \sqrt{gh(x)}$ et $U(x) = \frac{q}{h(x)}$ qui doit vérifier l'équation de conservation de la quantité de mouvement:

$$\partial_x \left(\frac{1}{2} U^2 + g(h+b) \right) = 0$$

On peut résumer tous les régimes hydrauliques obtenus à partir des équations précédentes dans le diagramme de phase suivant:



La courbe en pointillé correspond à la loi de Long:

$$r_{up}^{Ob} = \frac{b_{max}}{h_{up}} = 1 + \frac{1}{2} Fr_{up}^2 - \frac{3}{2} Fr_{up}^{\frac{2}{3}} \quad \text{avec} \quad Fr_{up} = \frac{U_{up}}{\sqrt{gh_{up}}} = \frac{q}{\sqrt{gh_{up}^{\frac{3}{2}}}}$$

-Ajout de la dispersion au modèle non dispersif: Le deuxième ingrédient est la dispersion. En effet, la rayonnement de Hawking ou l'effet LASER de trou noir dépendent de la réponse dispersive du système. La relation de dispersion pour les ondes de surfaces, dans le référentiel co-mobile, s'écrit :

$$\omega_{cm}^2 = gk \left(1 + \frac{\gamma}{\rho g} k^2 \right) \tanh(kh) \quad \text{avec} \quad \omega_{cm} = \omega - \vec{U} \cdot \vec{k}$$

Le rayonnement de Hawking dépend de la génération de son partenaire qui est d'énergie négatif. Le seuil d'apparition d'onde à énergie négative est le $\min_{k \in \mathbb{R}^+} (v_\varphi)$. Nous allons aussi nous intéresser au $\min_{k \in \mathbb{R}^+} (v_g)$, car il correspond à l'apparition du premier horizon de blocage pour les ondes [4].

RÉSULTATS ET DISCUSSIONS

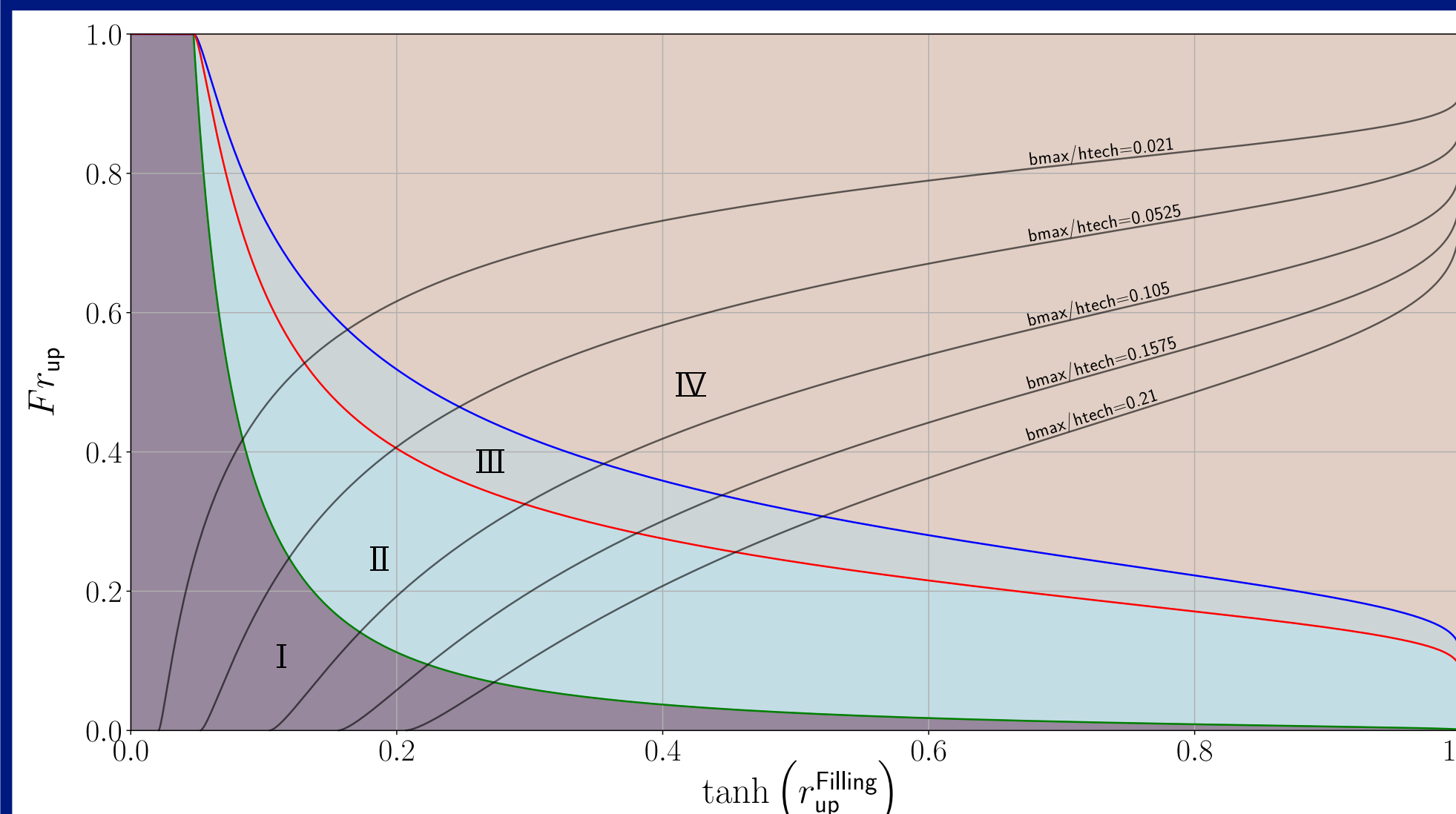


Diagramme de phase pour les régimes hydro-dispersifs transcritiques accélérant.

Courbe rouge : $U_{up} = \min_{k \in \mathbb{R}^+} (v_g)$

Courbe bleue : $U_{up} = \min_{k \in \mathbb{R}^+} (v_\varphi)$

Critère courbe verte :

$$h_c = \sqrt{3} \sqrt{\frac{\gamma}{\rho g}}$$

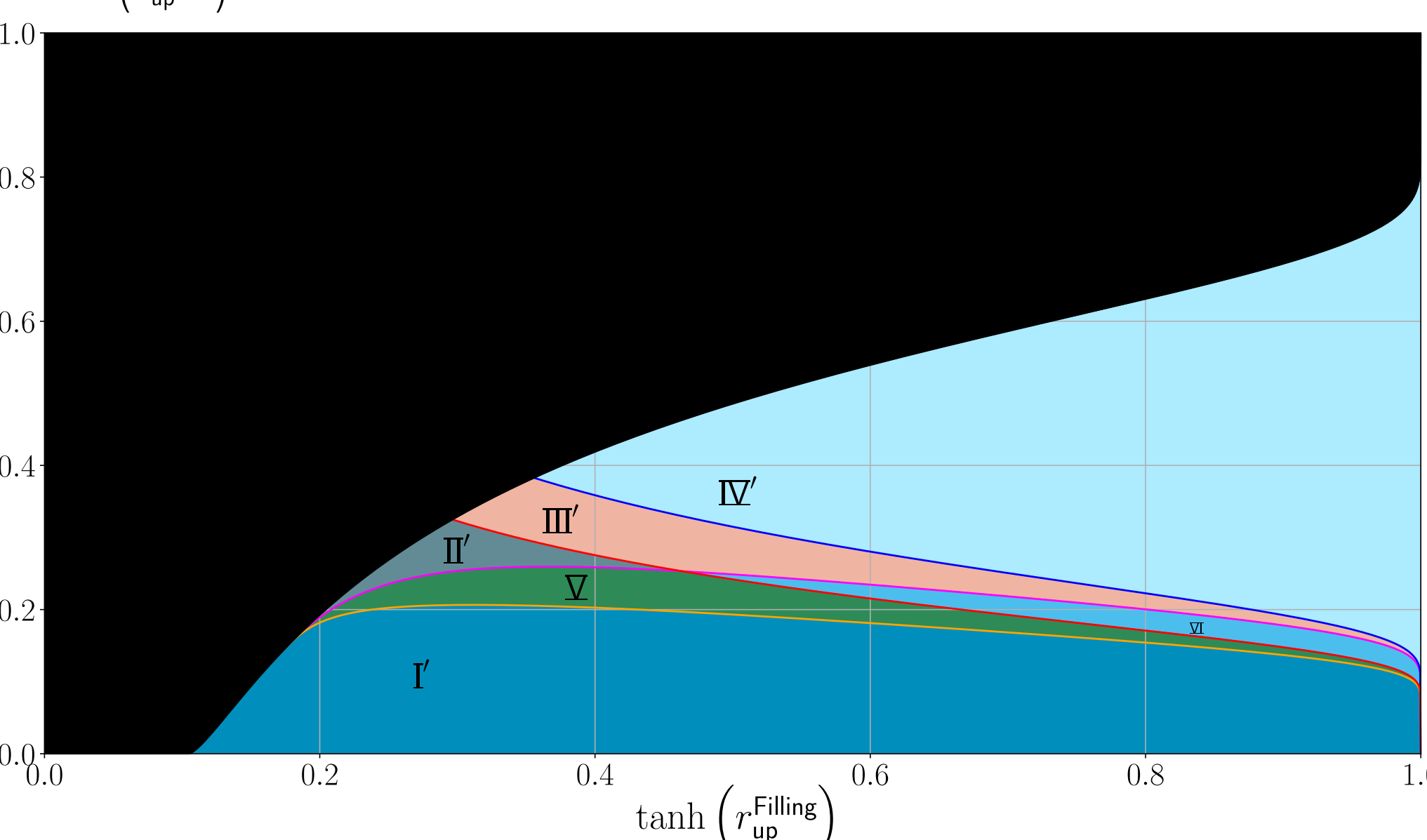
Diagramme de phase pour les régimes hydro-dispersifs sous-critiques.

Critère courbe orange :

$$\min_{k \in \mathbb{R}^+} (v_g) = \frac{q}{h_{min}}$$

Critère courbe magenta :

$$\min_{k \in \mathbb{R}^+} (v_\varphi) = \frac{q}{h_{min}}$$



- Séparation des régimes hydro-dispersifs dans 2 diagrammes de phase différents;
- 4 régimes dispersifs pour le régime transcritique et 6 régimes pour les sous-critiques
- Effet de la taille des obstacles, car on ne traverse pas les domaines pour les mêmes nombre de Froude selon la taille de l'obstacle considéré. C'est également pour cela que le r_{up}^{Ob} a été remplacé par le $r_{up}^{filling} = \frac{h_{up}}{h_{mech}}$;
- Pour avoir des ondes à énergie négative pour les sous-critiques, il suffit d'être au-dessus de la courbe magenta, c'est-à-dire les domaines II' , III' et IV'
- Pour être le plus proche de la prédictions théorique du rayonnement de Hawking, il faut se trouver sur la courbe verte pour les régimes transcritique , c'est-à-dire au débit:

$$q^* = \sqrt[3]{27} \sqrt{g} \left(\frac{\gamma}{\rho g} \right)^{\frac{3}{4}}$$

CONCLUSIONS ET PERSPECTIVES

Nous avons construit de nouveaux diagrammes de phases pour prendre en compte à la fois les effets hydrauliques mais aussi les effets dispersifs, ingrédient essentiel pour la localisation du rayonnement de Hawking ou la construction de l'effet LASER. Avec ces diagrammes, nous avons mis en évidence un effet d'échelle: la taille de l'obstacle et le dimensionnement de l'expérience influent sur les régimes dispersifs observés. Au regard de ces diagrammes, nous avons mis en place une nomenclature pour classer les différents régimes.

Ces résultats vont nous permettre de guider nos expériences à un ou deux obstacles. Par exemple, dans le cas d'un régime transcritique, on aura tendance de se placer au débit q^* pour être le plus proche possible du rayonnement de Hawking prédit théoriquement.

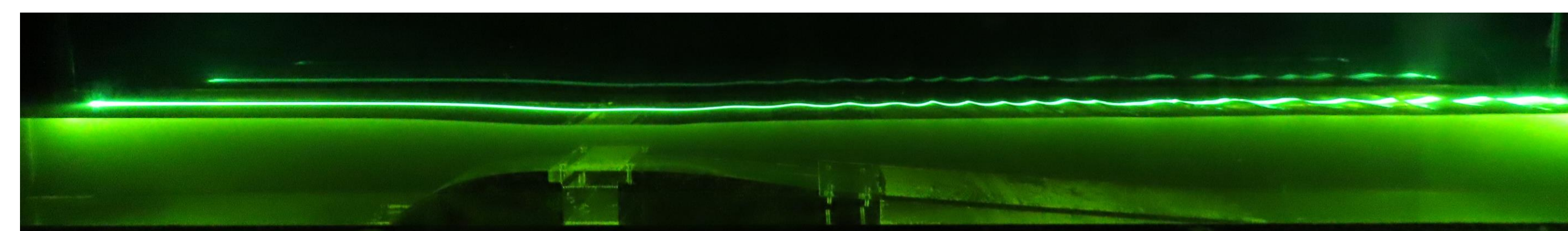


Photo d'un écoulement sous-critique dans un canal à surface libre.

CONTACTS :

alexis.bossard@univ-poitiers.fr
germain.rousseau@cnrs.fr

Références :

- [1] W. G. Unruh, "Experimental Black-Hole Evaporation?", Phys. Rev. Lett. 46, p. 1351.(1981)
- [2] S.W. Hawking, "Black hole explosions?", Nature 248, no. 5443, p. 30-31.(1974)
- [3] S. Corley and T. Jacobson, Black hole lasers, Physical Review D 59, 124011 (1999)
- [4] G. Rousseau, P. Maissa, C. Mathis, P. Couillet, T. G. Philbin, U. Leonhardt, "Horizon effects with surface waves on moving water", New Journal of Physics 12, no. 9, p. 095018.(2010)