

# Dossier scientifique - Agrégation Externe Spéciale

Charlotte SAVERNA

Mai 2022

# Table des matières

<b>1</b>	<b>Introduction</b>	<b>1</b>
<b>2</b>	<b>Parcours universitaire</b>	<b>1</b>
2.1	Double licence Sciences et Musicologie . . . . .	1
2.2	Master Recherche en Acoustique . . . . .	2
2.3	Formations doctorales . . . . .	2
<b>3</b>	<b>Travaux de recherche</b>	<b>3</b>
3.1	Mise en contexte des travaux de thèse . . . . .	3
3.2	Acoustique en écoulement : généralités . . . . .	3
3.3	Effets d'une couche de cisaillement constant . . . . .	5
3.3.1	Introduction . . . . .	5
3.3.2	Description mathématique et géométrie du problème . . . . .	5
3.3.3	Réflexion / transmission entre deux milieux en mouvement uniforme . . . . .	5
3.3.4	Réflexion sur une paroi d'admittance uniforme . . . . .	6
3.3.5	Réflexion sur une paroi d'admittance périodique . . . . .	8
3.4	Effets d'un écoulement localisé en guide d'onde . . . . .	9
3.4.1	Effets sur la transmission / réflexion d'une onde plane . . . . .	9
3.4.2	Effets de périodisation . . . . .	10
3.5	Compétences acquises dans la formation à et par la recherche . . . . .	10
<b>4</b>	<b>Communication, valorisation et dissémination de la recherche</b>	<b>10</b>
4.1	Communications scientifiques . . . . .	10
4.2	Vulgarisation des travaux de recherche . . . . .	11
4.3	Chaîne YouTube "La Science s'Honore" . . . . .	11
<b>5</b>	<b>Missions d'enseignement</b>	<b>11</b>
5.1	Expériences de tutorat . . . . .	11
5.2	Missions de monitorat et CTER . . . . .	11
5.3	Vacations à l'institut technique européen des métiers de la musique (ITEMM) . . . . .	12
5.4	Enseignement secondaire . . . . .	12

## 1 Introduction

Le présent dossier a pour vocation la mise en perspective didactique de mon parcours afin d'accéder au rang d'agrégée. Il s'articule autour de deux grands axes : ma formation universitaire et mon parcours professionnel. À la conjonction de ces deux mondes, celui du doctorat sera largement évoqué, avec une présentation succincte des travaux de recherche que j'ai menés au Laboratoire d'Acoustique de l'Université du Mans (LAUM) entre 2017 et 2021. Autour de ces problématiques, je m'attacherai également à présenter mes activités passées et présentes de dissémination et d'enseignement.

## 2 Parcours universitaire

### 2.1 Double licence Sciences et Musicologie

Après un baccalauréat scientifique obtenu avec mention très bien et mention européenne au lycée Eugène Freyssinet de Saint-Brieuc (22) en Juin 2012, j'intègre la double-licence *Sciences et Musicologie* des Universités Pierre et Marie Curie (Paris 6) et Paris-Sorbonne (Paris 4). Sélectionnée en 2014 par le programme d'échange *MICEFA*, j'effectue un trimestre à la San Francisco State University. C'est finalement en 2015, que je sors diplômée de deux licences :

- une licence de Musique et Musicologie, parcours Sciences et Musicologie, obtenue avec mention bien en Juin 2015 à l'Université Paris-Sorbonne,

- et une licence de Sciences et Technologie, parcours Sciences et Musicologie, obtenue avec mention bien en Juin 2015 à l’Université Pierre et Marie Curie.

## 2.2 Master Recherche en Acoustique

Ayant découvert l’acoustique en licence, je décide d’en faire ma matière de prédilection, et intègre en septembre 2015 le Master *Recherche en Acoustique* de l’Université du Maine (aujourd’hui Le Mans Université). En seconde année de master, je choisis les spécialités aéroacoustique, optoacoustique et acoustique non-linéaire. Recrutée pour un stage de fin de master au MIT pour travailler sur les instabilités paramétriques dans les miroirs du détecteur d’ondes gravitationnelles LIGO, je suis finalement privée de ma bourse de mobilité au dernier moment par un dysfonctionnement administratif. Je demeure donc au Mans pour un stage au Laboratoire d’Acoustique de l’Université du Mans encadré par MM. Guillaume Penelet (MCF) et Olivier Richoux (DR CNRS). Ce stage porte sur le dimensionnement et la réalisation expérimentale d’un système  $\mathcal{PT}$ -symétrique thermoacoustique. Cette première approche de la recherche en laboratoire au sein du LAUM est très complète, car elle fait intervenir :

- des travaux bibliographiques sur la notion de  $\mathcal{PT}$ -symétrie,
- des travaux analytiques pour le dimensionnement d’une cellule de gain thermoacoustique et d’une cellule de pertes passive (résonateur de Helmholtz),
- des travaux expérimentaux de conception du banc de mesure et de réalisation des mesures sur le système,
- des travaux numériques de simulation des résultats théoriques et de traitements des mesures.

À l’issu de ce stage, j’obtiens en Juillet 2015 mon master avec mention bien.

## 2.3 Formations doctorales

Convaincue par cette première expérience de la recherche, j’accepte l’offre de thèse formulée par MM. Yves Aurégan (DR CNRS) et Vincent Pagneux (DR CNRS), avec qui j’avais pu collaborer lors de mon stage de master. Je commence en octobre 2017 mes travaux de recherche pour la thèse de doctorat intitulée "*Effets d’écoulements non-uniformes sur la transmission et la réflexion d’ondes acoustiques*". Au cours de cette formation à la recherche dont je détaille le contenu dans la section suivante, j’ai eu l’occasion de suivre des formations proposées par le Pôle doctoral de l’Université du Mans ainsi que par l’École Doctorale et l’École des Docteurs de la COMUE Université Bretagne-Loire (UBL). Le tableau 1 regroupe la liste de ces formations.

Formations transversales	Volume horaire
Ressources documentaires	3h
Droit des contrats	6h
Propriété intellectuelle et stratégies de publication	6h
Éthique de la recherche et intégrité scientifique	6h
Publier et diffuser	2h
Illustrator	6h
Formations pédagogiques	Volume horaire
La pédagogie dans l’enseignement supérieur	16h
La voix et le corps, instruments privilégiés de l’enseignant en situation	16h
Gestion des relations difficiles	12h
Formations scientifiques	Volume horaire
Python pour les scientifiques	10h
Non-linear Waves and Solitons	10h
Ecole d’hiver <i>Numerical Methods for Acoustics</i> , Le Mans 2018	20h
Ecole d’été <i>Waves in Complex Media</i> , Cargèse 2019	20h

TABLE 1 – Liste des formations doctorales effectuées.

### 3 Travaux de recherche

La présente section présente un résumé des travaux de ma thèse, soutenue le 2 juillet 2021 au LAUM (Le Mans). Dans cette optique, le jury trouvera d’abord des généralités sur l’acoustique avec écoulement puis une description plus détaillée des différents travaux menés. J’ai choisi d’adopter ici une approche phénoménologique et je passerai donc sous silence la majorité des calculs effectués, les méthodes de résolution numérique employées ou encore les études paramétriques permettant d’aboutir aux résultats remarquables présentés ici.

#### 3.1 Mise en contexte des travaux de thèse

Cette thèse s’intitulait au départ "*Analogie Gravitation / Acoustique avec Écoulement : Trous Noirs Acoustiques et Rayonnement de Hawking Équivalent*". Ce contrat doctoral fait suite à plusieurs articles de MM. Yves Aurégan et Vincent Pagneux concernant cette analogie, et notamment l’observation expérimentale de trous noirs acoustiques. Le but de cette expérience était d’observer à terme un rayonnement de Hawking analogue<sup>1</sup> sous la forme d’un flux thermique. Le dispositif expérimental utilisé impliquait un écoulement d’air constant, et un ralentissement progressif des ondes acoustiques à l’aide de résonateurs en paroi<sup>2</sup>. Cependant, la grande précision métrologique attendue demandait la connaissance préalable des éventuels échanges énergétiques proches de la paroi. La première tâche de ma thèse a donc été de trancher quant à la conservation ou non de l’énergie acoustique dans une couche de cisaillement à proximité d’une paroi admettante. Et, les résultats obtenus en appelant d’autres, nous avons finalement creusé la question de la conservation de l’énergie et des phénomènes exotiques de réflexion et transmission dans plusieurs configurations différentes, et à un niveau très fondamental, sans jamais revenir au dispositif expérimental initial, jugé finalement moins intéressant.

Une question demeure donc en fil rouge de tous ces travaux : quelle est la condition minimale à la brisure de la conservation de l’énergie acoustique lors de la propagation en écoulement non-uniforme ? Cette question a été traitée de manière très fondamentale, avec la chance d’avoir une vraie liberté de creuser les phénomènes jugés "rigolos" par mes encadrants ou moi-même. Elle a notamment permis d’aboutir analytiquement à plusieurs relations de conservation de l’énergie via des développements mathématiques à notre connaissance absents de la littérature. Toutes les simulations numériques ont été menées entièrement par moi, en Matlab, mis à part la résolution via élément finis du problème en guide d’onde, qui est un code Python pré-existant que je n’ai fait qu’adapter.

#### 3.2 Acoustique en écoulement : généralités

La propagation du son en écoulement est aujourd’hui encore largement étudiée, notamment pour ses applications en aéronautique. Elle est cependant très souvent abordée sous l’angle de la résolution numérique du problème (éléments finis, éléments de frontières particulièrement), alors que certaines hypothèses fondamentales ne sont pas encore démontrées. Nous nous attacherons ici à des modèles très simples de propagation en écoulement. L’écoulement nous intéresse par le caractère non-réciproque qu’il insuffle au problème (brisure de l’invariabilité par échange de la source et du récepteur acoustique). Le premier paramètre impacté par la présence d’un écoulement est la célérité  $c$  des ondes acoustiques. En effet, pour un écoulement de vitesse uniforme  $U$ , celle-ci verra augmenter d’un facteur  $1 + \frac{U}{c}$  si elle se propage avec l’écoulement et diminuer d’un facteur  $1 - \frac{U}{c}$  contre l’écoulement. En conséquence, comme illustré en Fig. 1), une onde acoustique de fréquence donnée verra sa longueur d’onde augmenter si elle se propage dans le sens de l’écoulement ou diminuer si elle se propage contre l’écoulement.

Ce phénomène, lorsqu’on le transpose à un écoulement non-uniforme, se traduit par une déviation du front d’onde, comme illustré en Fig. 2.

Plusieurs modèles permettent de décrire la propagation d’ondes acoustiques en écoulement. L’établissement de ces modèles suppose les lois de conservation listées ci-après.

- la conservation de la quantité de mouvement,
- la conservation de la masse,

---

1. Unruh, W. G. (1995) ‘Sonic analogue of black holes and the effects of high frequencies on black hole evaporation’, *Physical Review D*, 51(6), pp. 2827–2838. doi : 10.1103/PhysRevD.51.2827.

2. Aurégan, Y. et al. (2015) ‘Slow sound in a duct , effective transonic flows , and analog black holes’, *Physical Review D*, 081503(M), pp. 1–5. doi : 10.1103/PhysRevD.92.081503.

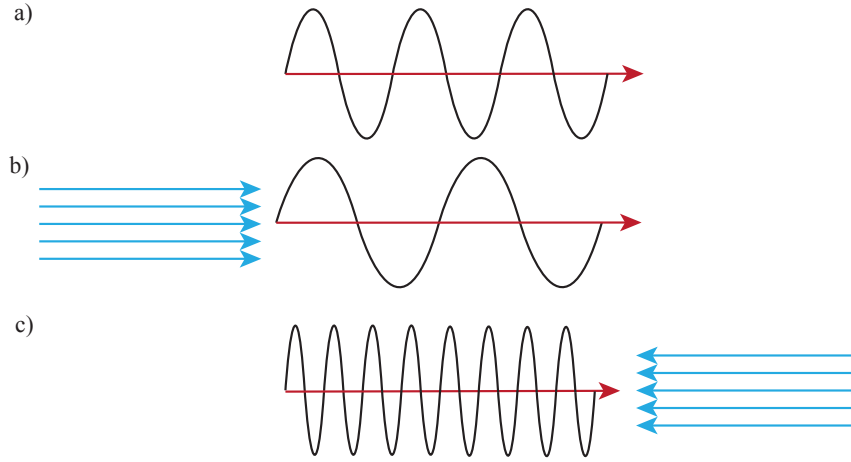


FIGURE 1 – Illustration de la propagation d'une onde acoustique de fréquence donnée se propageant : a) sans écoulement ; b) dans le sens d'un écoulement uniforme ; c) contre un écoulement uniforme.

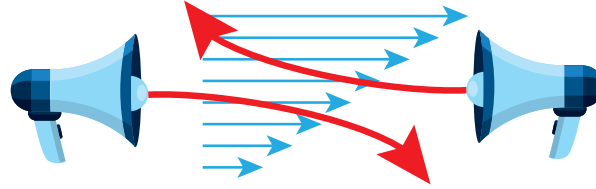


FIGURE 2 – Illustration de la déflexion subie par un faisceau d'ondes acoustique dans un milieu avec un écoulement cisailé, selon qu'il se propage dans le sens de l'écoulement ou contre celui-ci.

- la conservation de l'énergie,
- le premier principe de la thermodynamique,
- le second principe de la thermodynamique,

auxquelles on vient ajouter les hypothèses :

- d'isentropie,
- de gaz parfait,
- d'écoulement non-visqueux et non-conductif,
- d'absence de sources de masse, de chaleur ou de quantité de mouvement.

On aboutit ainsi aux équations d'Euler sur les champs de pression  $\tilde{p}$ , de vitesse  $\tilde{\mathbf{u}}$  et de masse volumique  $\tilde{\rho}$ , données par :

$$\begin{cases} \frac{\partial \tilde{p}}{\partial t} + \nabla \cdot (\tilde{\rho} \tilde{\mathbf{u}}) = 0 \\ \frac{\partial \tilde{\rho} \tilde{\mathbf{u}}}{\partial t} + \nabla \cdot (\tilde{\rho} \tilde{\mathbf{u}} \otimes \tilde{\mathbf{u}}) = 0 \\ \frac{1}{c_0^2} \frac{\partial \tilde{p}}{\partial t} + \tilde{\rho} \nabla \cdot \tilde{\mathbf{u}} = 0, \end{cases} \quad (1)$$

où  $c_0$ , la célérité du son, est définie par le rapport des chaleurs spécifiques  $c_p/c_v$ . On procède à une linéarisation de ces équations en supposant que toute grandeur  $\tilde{\phi}(\mathbf{x}, t)$  est constituée d'une partie stationnaire  $\phi_0(\mathbf{x})$  dépendant uniquement des variables spatiales et d'une partie liée à la perturbation acoustique  $\phi(\mathbf{x}, t)$  de moindre amplitude. On obtient le système d'équation suivant :

$$\begin{cases} \frac{D\rho}{Dt} + \rho_0 \nabla \cdot \mathbf{u} + \mathbf{u} \cdot \nabla \rho_0 + \rho \nabla \cdot \mathbf{u}_0 = 0, \\ \rho_0 \frac{D\mathbf{u}}{Dt} + \nabla p + \rho_0 (\mathbf{u} \cdot \nabla) \mathbf{u}_0 + \rho (\mathbf{u}_0 \cdot \nabla) \mathbf{u} = 0 \\ \frac{Dp}{Dt} + \rho_0 c_0^2 \nabla \cdot \mathbf{u} + \mathbf{u} \cdot \nabla \rho_0 + c_0^2 \rho \nabla \cdot \mathbf{u}_0 - \mathbf{u}_0 \cdot \nabla p_0 \left( \frac{p}{p_0} - \frac{\rho}{\rho_0} \right) = 0, \end{cases} \quad (2)$$

où  $D/Dt = \partial/\partial t + \mathbf{u}_0 \cdot \nabla$  désigne la dérivée convective qui porte déjà le caractère non-réciproque de la

propagation acoustique en écoulement. Finalement, des hypothèses sur l'écoulement (uniforme, parallèle, potentiel...) permettront d'aboutir aux équations de propagation qui seront utilisées ici.

### 3.3 Effets d'une couche de cisaillement constant

#### 3.3.1 Introduction

Une couche de cisaillement constant donne lieu à un profil de vitesse d'écoulement linéaire sur une épaisseur  $\delta$  donnée. Un front d'onde incident sur une telle couche sera dévié par la variation de la composante transverse de son vecteur d'onde. Ici, cette propriété est mise à profit pour observer des phénomènes tels que :

- une réfraction négative (Fig. 3a)
- une absorption parfaite (Fig. 3b)
- un décalage latéral (Fig. 3c)

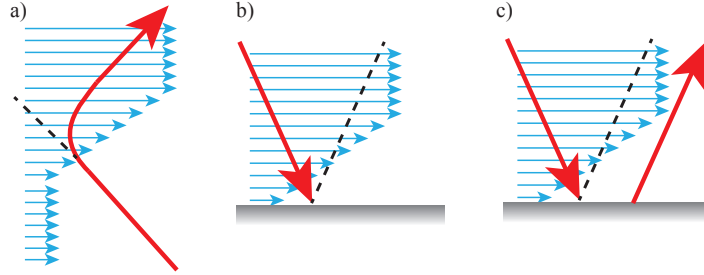


FIGURE 3 – Illustration des phénomènes a) de réfraction négative b) d'absorption parfaite c) de décalage latéral

#### 3.3.2 Description mathématique et géométrie du problème

On suppose un écoulement plan, dirigé selon  $x$  et variant seulement selon  $y$  que l'on note  $U(y)$ . Les hypothèses d'un problème plan et d'un écoulement parallèle permettent de simplifier les équations d'Euler linéarisées (Eq. 2) et on obtient une équation de propagation sur le champs de pression donnée par :

$$D_t[(\partial_x^2 + \partial_y^2)p - \frac{1}{c_0^2}D_t^2 p] - 2\partial_y U(y)\partial_{x,y}^2 p = 0, \quad (3)$$

avec  $c_0$  la célérité du son dans ce milieu. On ajoute une hypothèse d'harmonicité tel que  $p(x, y, t) = \Re[P(y)e^{-i(\omega t - \alpha x)}]$  avec  $\omega$  la pulsation ( $\omega = 2\pi f$ ) et finalement l'évolution de  $P(y)$  est régie par une équation de Pridmore-Brown<sup>3</sup> :

$$P''(y) + \frac{2\alpha M'(y)}{k - M(y)\alpha}P'(y) + [(K - M(y)\alpha)^2 - \alpha^2]P(y) = 0, \quad (4)$$

où  $M(y)$  est le nombre de Mach de l'écoulement ( $M(y) = U(y)/c_0$ ),  $K = \omega/c_0$  le nombre d'onde, et  $\alpha = (K \sin \theta_i)/(1 + M(y) \sin(\theta_i))$  la composante horizontale du nombre d'onde avec  $\theta_i$  l'angle d'incidence de l'onde plane considérée.

#### 3.3.3 Réflexion / transmission entre deux milieux en mouvement uniforme

Le premier problème que nous avons traité a été celui de la transmission/réflexion entre deux milieux connaissant des écoulements uniformes de nombre de Mach respectif  $M_1$  et  $M_2$ , séparés par une couche de cisaillement linéaire de hauteur  $\delta$  (Fig. 4).

En écrivant les conditions de conservation de l'énergie à travers une telle couche de cisaillement, nous avons été intéressés par un premier résultat : si les valeurs des coefficients de transmission et de réflexion

3. Pridmore-Brown, D. C. (1958) 'Sound propagation in a fluid flowing through an attenuating duct', Journal of Fluid Mechanics, 4(4), pp. 393–406. doi : 10.1017/S0022112058000537.

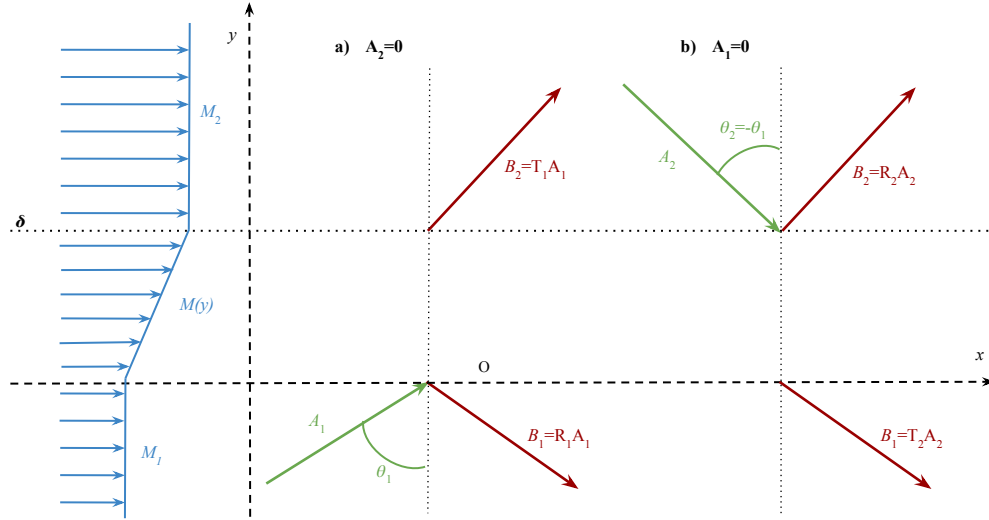


FIGURE 4 – Géométrie du problème en transmission a) pour une onde incidente venant du milieu 1 b) pour une onde incidente venant du milieu 2 (d'après *Saverna et al, 2019*)

dépendent bien de  $M_1$ ,  $M_2$  et  $\delta$ , ce n'était pas le cas des relations entre eux. En d'autres termes, avec une normalisation adaptée de ces coefficients, on peut retrouver la relation sur les matrices de diffusions obtenue sans écoulement.

Un cas particulier de cette géométrie a attiré notre attention : celui d'une réfraction négative. En effet, lorsque la différence entre  $M_1$  et  $M_2$  est assez grande, il peut arriver qu'une onde plane arrivant contre l'écoulement subisse une réfraction la faisant changer de direction une fois dans le milieu 2, comme c'est le cas pour un faisceau d'ondes planes en Fig.5.

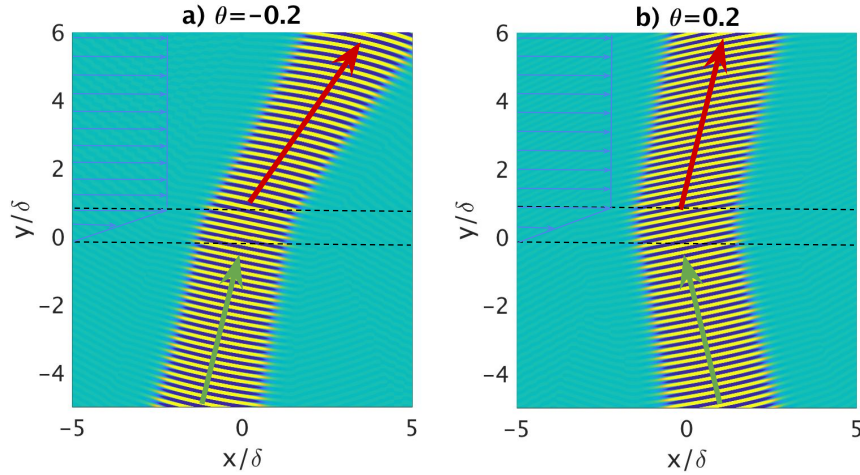


FIGURE 5 – Champs de pression pour un faisceau d'ondes planes arrivant a) avec l'écoulement b) contre l'écoulement (d'après *Saverna et al, 2019*)

### 3.3.4 Réflexion sur une paroi d'admittance uniforme

Après l'étude du problème en milieu infini, nous sommes revenus à la problématique de départ : l'énergie est-elle conservée à travers une couche de cisaillement à proximité d'une paroi absorbante ? Pour ce faire, nous avons défini le problème illustré en Fig. 6, dans lequel la paroi est décrite par son admittance  $Y$ , dont la partie imaginaire décrit un phénomène réactif et la partie réelle un phénomène résistif ( $\Re(Y) < 0$  indique la

présence de pertes en paroi). On impose un écoulement nul en paroi, ce qui facilite l'expression des conditions aux limites de ce problème. On a en effet une relation entre pression et vitesse qui est alors donnée par :  $u(x, y = 0, t) = Yp(x, y = 0, t)$ .

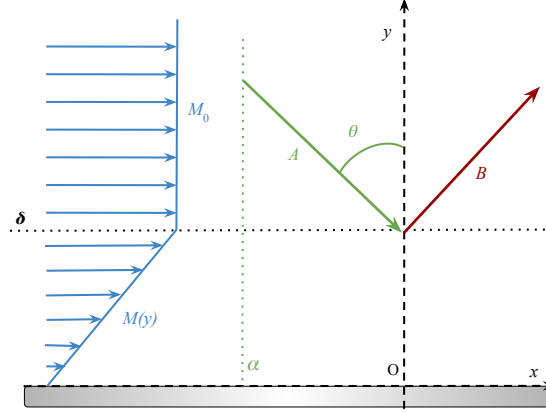


FIGURE 6 – Géométrie du problème en réflexion (d'après *Saverna et al, 2019*)

Là encore, la dérivation de la relation de conservation de l'énergie a pu être surprenante de par sa simplicité. On y remarque en effet que la valeur de l'amplitude du coefficient de réflexion  $R$  est directement liée à la partie résistive de l'admittance  $\Re(Y)$  via :

$$|R|^2 = 1 + C|P(0)|^2\Re[Y], \quad (5)$$

où  $C$  est une constante positive dépendant uniquement du nombre d'onde et de l'angle d'incidence de l'onde incidente. On remarque donc que, quel que soit l'écoulement et quelle que soit l'épaisseur de la couche de cisaillement, l'énergie sera conservée et les seules pertes seront apportées par la paroi. En particulier, l'absence de perte en paroi résultera toujours en une réflexion parfaite. Toutefois, cette relation nous indique aussi que la valeur du coefficient de réflexion dépend de l'écoulement à travers la valeur de la pression en paroi. Cette propriété nous a permis de réaliser plusieurs études paramétriques en faisant varier la hauteur de la couche de cisaillement et la vitesse de l'écoulement, et de mettre en valeur la présence d'une combinaison de paramètres permettant l'absorption parfaite d'une onde d'angle d'incidence donné et ce quelle que soit la paroi de départ. Ce phénomène, illustré en Fig. 7, peut s'expliquer "avec les mains" par une réfraction

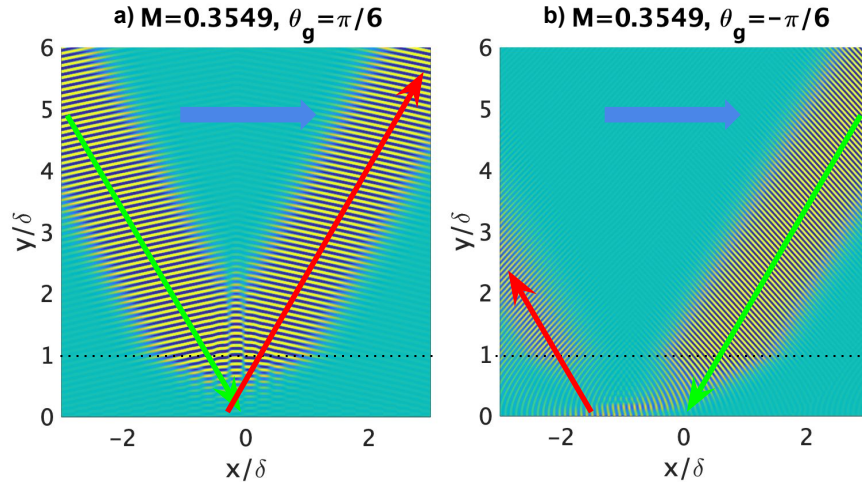


FIGURE 7 – Champs de pression dans un milieu avec écoulement pour un faisceau d'ondes planes incident dans le sens de l'écoulement (a) ou contre l'écoulement (b) (d'après *Saverna et al, 2019*)

optimale de l'onde incidente. Celle-ci se propage longtemps contre la paroi et toute son énergie finit par



y être dissipée. Il s'accompagne d'un autre effet, celui du décalage latéral de l'onde réfléchie. Connue sous le nom d'effet Schoch<sup>4</sup> en ultrasons ou de décalage de Goos-Hänchen<sup>5</sup> en optique, il est particulièrement visible lors de la modélisation de faisceaux gaussiens tel que c'est le cas en Fig. 7 : si toute la partie centrale du faisceau est parfaitement absorbée en paroi, il demeure une partie des incidences qui se trouve réfléchie, mais de manière décalée par rapport à la réflexion parfaitement spéculaire que l'on aurait pu attendre. Cette prévision d'un décalage de faisceau causé par la présence d'un écoulement constitue à notre connaissance un élément particulièrement nouveau de cette thèse.

### 3.3.5 Réflexion sur une paroi d'admittance périodique

La conservation de l'énergie dans une couche de cisaillement linéaire étant relativement surprenante à nos yeux, nous avons voulu tester l'ajout d'un petit élément qui pourraient briser cette conservation. Pour cela, nous brisons l'invariance du problème selon la direction  $x$ , en définissant une paroi dont l'admittance varie périodiquement (Fig. 8). Ce type de paroi, appelée "métasurface" pour ses propriétés particulières, possède la particularité de provoquer la diffraction de l'onde réfléchie en une infinité de directions discrètes. Les composantes horizontales des nombres d'ondes de ces ondes réfléchies sont liées entre elles par une suite arithmétique de la forme :  $\alpha_n = \alpha_0 + nd$ , où  $n$  est le numéro de la direction considérée et  $d$  la périodicité de la paroi. En particulier, on peut constater que toutes ces ondes ne peuvent être propagatives. Certaines d'entre elles font intervenir des nombres d'onde imaginaires et sont donc évanescentes. Celles-ci n'interviendront pas dans le champs lointain mais créeront un champs très complexe proche de la paroi. En particulier, elles auront la capacité d'interagir avec les couches critiques<sup>6</sup>, singularités de l'équation de propagation pouvant mener au développement de modes hydrodynamiques et donc à la brisure de la conservation de l'énergie acoustique.

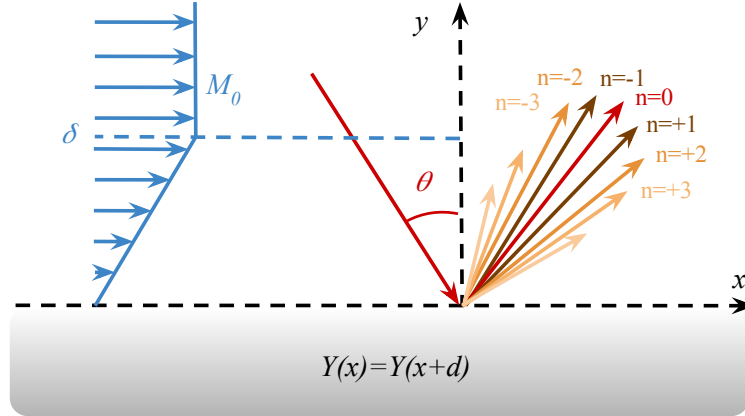


FIGURE 8 – Géométrie du problème en réflexion sur une paroi d'admittance périodique

Pour conclure sur les effets exacts de ces couches critiques, j'ai mené une étude asymptotique à leur voisinage afin de déterminer la forme des solutions attendues. Nous avons été surpris de constater que les solutions obtenues faisaient apparaître le cas d'un cisaillement constant comme un cas particulier menant effectivement à la conservation de l'énergie acoustique. Tout profil d'écoulement décrit par un polynôme d'ordre deux ou plus ne permet en revanche pas de conclure sur cette conservation.

L'obtention d'un modèle numérique concluant m'a occupée pendant plusieurs semaines, justement à cause de la présence de ces singularités. J'ai finalement opté pour un algorithme me permettant l'intégration de l'équation de Pridmore-Brown selon un chemin complexe afin d'éviter les singularités (réelles) de l'équation. Les simulations numériques finalement effectuées ont montré un effet de l'écoulement sur les amplitudes

4. Tamir, T. and Berton, H. L. (1971) 'Lateral Displacement of Optical Beams at Multilayered and Periodic Structures', Journal of the Optical Society of America, 61(10), pp. 1397–1413. doi : 10.1364/JOSA.61.001397.

5. Snyder, A. W. and Love, J. D. (1976) 'Goos-Hänchen shift', Applied Optics, 15(1), pp. 3–5.

6. Maslowe, S. (1986) 'Critical Layers in Shear Flows', Annual Review of Fluid Mechanics, 18(1), pp. 405–432. doi : 10.1146/annurev.fluid.18.1.405.

relatives des ordres de diffraction du champs réfléchi. En Fig. 9 par exemple, on constate que l'ajout d'écoulement modifie l'aspect du champs réfléchi : si la réflexion spéculaire était majoritaire sans écoulement, un écoulement avec un grand nombre de Mach fait passer l'ordre -1 majoritaire.

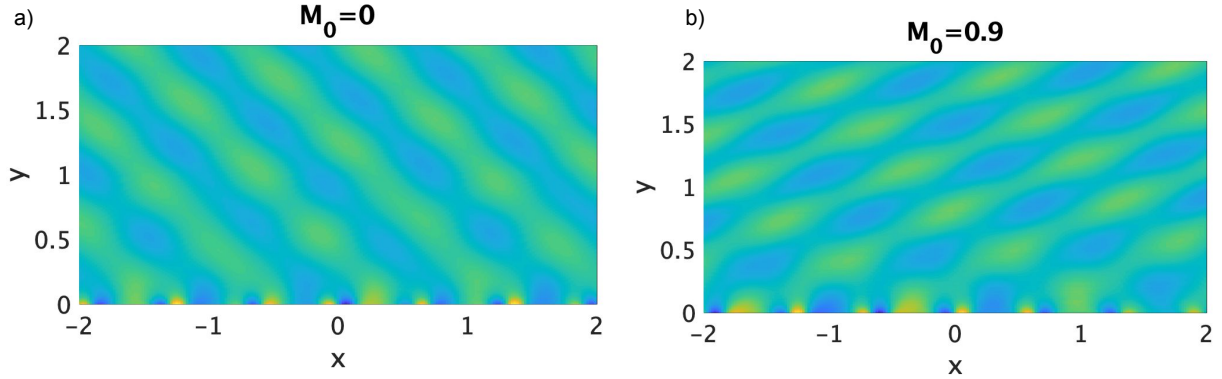


FIGURE 9 – Champs de pression réfléchi pour une onde plane incidente sur une métasurface purement réactive (sans pertes) a) sans écoulement b) avec écoulement

Les possibilités de manipulation du champs réfléchi qu'offraient déjà les métasurfaces se voient ici multipliées par l'ajout d'un écoulement parallèle à la métasurface.

### 3.4 Effets d'un écoulement localisé en guide d'onde

Cette dernière partie de mes recherches sera évoquée ici très brièvement : elle est en effet la moins facilement transposable à mes activités d'enseignement actuelles de par sa difficulté théorique et technique, et me paraît donc moins adaptée à une mise en perspective didactique.

Là encore, la question de la conservation de l'énergie s'est posée, mais dans un cas où celle-ci peut connaître une répartition inégale dans l'espace. Toujours dans l'idée de faire usage du caractère non-réciproque d'un écoulement, on définit un cylindre placé de manière transverse dans un guide d'onde à deux dimensions. En tournant, celui-ci crée par entraînement un écoulement circulant autour de lui.

#### 3.4.1 Effets sur la transmission / réflexion d'une onde plane

On considère le guide d'onde comme infini selon  $x$ . Une onde plane incidente (on se place en dessous de la première fréquence de coupure des modes transverses) sera alors en partie réfléchi et en partie transmise (Fig. 10). On résout numériquement les équations au potentiel linéarisées via un calcul par éléments finis.

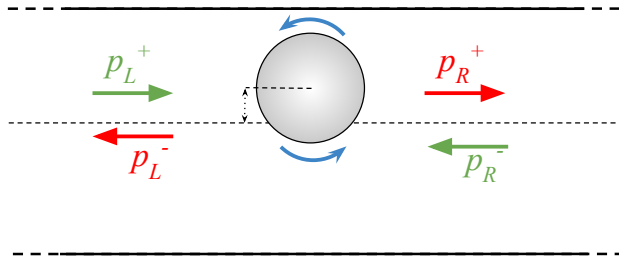


FIGURE 10 – Géométrie du problème en transmission / réflexion

La non-réciprocité du problème s'exprime ici d'une manière inattendue. En effet, les coefficients de transmission et de réflexion liant les ondes incidente, réfléchi et transmise sont parfaitement égaux en amplitude, mais les phases des coefficients de transmission viennent différer l'une de l'autre dans un cas très précis : celui où l'écoulement est non-nul et où le cylindre est décalé de l'axe du cylindre. De plus, cette différence de phase n'apparaît qu'autour d'une fréquence très précise : avant cela elles sont parfaitement égales, après

cela elles connaissent une différence de  $2\pi$  et redeviennent donc égales. L'identification de cette fréquence particulière a pu être réalisée en observant les résonances du système : elle correspond en fait à la fréquence du premier mode quasi-piégé (ou mode fuyant), pour lequel l'énergie est largement localisée autour du cylindre. Une hypothèse que nous avons pu formuler pour expliquer ce phénomène est le caractère tournant du mode quasi-piégé. Ainsi, les ondes venant de la gauche ou de la droite du cylindre ne subiraient pas le même déphasage selon le temps qu'elles passent autour de celui-ci.

### 3.4.2 Effets de périodisation

Devant ce caractère non-réciproque assez unique, nous avons eu envie de tester plusieurs réseaux périodiques faisant intervenir ces cellules, en décalant plus ou moins les cylindres les uns par rapport aux autres ou en inversant les sens d'écoulements par exemple. Ces études ont été très enrichissantes de par leur caractère très nouveau à mes yeux et ont permis la mise en lumière de comportements liés à la topologie du système, tels que des transmissions parfaites liées à des modes d'interface (énergie localisée à la jonction entre deux types de cellules) ou des modes de peau (énergie localisée sur les bords du réseau périodique).

## 3.5 Compétences acquises dans la formation à et par la recherche

Cette expérience de recherche et de formation m'a permis l'acquisition ou le renforcement de compétences variées que je suis aujourd'hui heureuse de pouvoir valoriser dans ma pratique de l'enseignement.

La première de ces compétences est sans doute la gestion du temps de travail notamment dans l'équilibre avec le temps personnel. En effet, chercheurs comme enseignants font souvent face à des deadlines serrées et où l'on cède parfois à la tentation de ramener chez soi du travail à terminer. J'ai appris au cours de ces quatre années de recherche à me préserver de ce trop plein de travail et à compartimenter ma vie personnelle et ma vie professionnelle, si bien que je sais maintenant dans mon travail d'enseignante prioriser mes actions (corrections de copies, bulletins, préparation de cours...) pour gagner en efficacité. Cette efficacité m'a également permis cette année de me former rapidement dans les domaines qui m'étaient jusqu'alors étrangers, et tout particulièrement en chimie.

Outre ces compétences humaines et organisationnelles, j'ai le sentiment d'avoir acquis une technicité mathématique et informatique qui me permet de dédramatiser auprès des élèves ces deux compétences transverses. En effet, le fait d'avoir pu passer des journées entières pour dériver une expression analytique ou pour déboguer un programme me permet aujourd'hui non seulement de détecter beaucoup plus rapidement les éventuelles erreurs des élèves, mais également de leur faire passer l'idée selon laquelle il doit s'agir pour eux d'outils. Ayant remarqué la réticence complète de certains élèves à toute application numérique, y compris ceux ayant des spécialités de type maths-SPC-NSI, je m'emploie en effet maintenant beaucoup plus à valoriser les compétences qu'ils possèdent : un algorithme n'est rien de plus qu'une recette de cuisine, une longue opération n'est rien de plus qu'une histoire dont on cherche la fin.

Enfin, bien sûr, mes études m'ont apporté un champs d'expertise relativement large sur les chapitres de mécanique et particulièrement sur le formalisme d'onde. Cela m'offre un recul que je constate nécessaire pour répondre à des interrogations plus fines. L'assurance que j'en retire me permet de plus grandes libertés pédagogiques et une adaptabilité aux situations d'apprentissages accrue. De plus, j'ai pu remarquer que mon double parcours de licence en sciences et musicologie m'a laissé une sensibilité à l'Histoire particulièrement utile dans les ouvertures transdisciplinaires et dans l'initiation à l'histoire des sciences et à l'épistémologie.

## 4 Communication, valorisation et dissémination de la recherche

### 4.1 Communications scientifiques

Les travaux de thèse présentés ci-dessus ont donné lieu à deux communications écrites :

- Saverna, C., Auréan, Y. and Pagneux, V. (2019) 'Non-reciprocal scattering in shear flow', *Journal of the Acoustical Society of America*, 146(August), pp. 1051–1060. doi : 10.1121/1.5120523,
- Saverna C., Auréan Y. and Pagneux V. (2019) 'Assymetric Improvement by a Shear Flow of the Absorption of an Acoustic Wall', 25th AIAA/CEAS Aeroacoustics Conference, p. 2504.

Ils ont par ailleurs été présentés à plusieurs conférences, nationales ou internationales, parmi lesquelles :

- Journées Jeunes Chercheurs en Acoustique, Vibrations et Bruit (JJCAB), Le Mans, 15/16 Novembre 2018, "*Phénomènes non-réciproques en écoulements cisailés*"
- Séminaire de l'école doctorale Sciences pour l'Ingénieur UBL, Nantes, 4/5 Avril 2019,
- Workshop on meta-materials : from Optics to Geophysics, Marseille, 15-17 Avril 2019, *Reflection of Gaussian beams on an impedance wall in a shear flow : lateral displacement and perfect absorption.*
- 25th AIAA/CEAS Aeroacoustics Conference, Delft (Pays-Bas), 21-25 Mai 2019, *Asymmetric Improvement by a Shear Flow of the Absorption of an Acoustic Wall.*

## 4.2 Vulgarisation des travaux de recherche

Croyant fermement à la nécessité de la dissémination de la connaissance auprès du grand public, j'ai eu l'occasion de présenter à de multiples reprises mon travail de thèse de manière vulgarisée. Secrétaire de l'Association des Doctorants de l'Université du Mans (ADoUM), j'ai eu l'occasion d'intervenir à leur côté en milieu scolaire, notamment au lycée Montesquieu du Mans, pour présenter ce qu'est la thèse et les diverses manières d'y arriver. Toujours en milieu scolaire, j'ai également été sollicitée pour encadrer un Passeport Recherche avec une classe de seconde du lycée Le Mans Sud, action malheureusement écourtée par la pandémie de Covid-19 après seulement deux rencontres avec les élèves.

J'ai également pu participer à des concours de vulgarisation, notamment le concours *Expose ta Thèse* organisé par le Pôle Doctoral de l'Université du Mans dont j'ai décroché le premier prix du jury ainsi que le prix du public pour mon poster intitulé *Singin' in the Wind*. J'ai également participé à l'édition 2020 du concours *Ma Thèse en 180 secondes*, pour lequel je termine troisième de la finale locale.

## 4.3 Chaîne YouTube "La Science s'Honore"

Toujours dans cette optique de vulgarisation, j'ai créé en 2019 avec mon compagnon chercheur en acoustique la chaîne YouTube de vulgarisation en acoustique *La Science s'Honore*<sup>7</sup>. Sur cette chaîne, nous avons publié entre juin 2019 et juin 2021 une vingtaine de vidéos, parmi lesquelles des formats longs sur un sujet de recherche actuel et des formats courts sur les fondamentaux de l'acoustique. Totalisant aujourd'hui environ 1200 abonnés malgré sa mise en veille depuis un peu plus d'un an, la chaîne a pu susciter un intérêt dans la communauté de Youtubeurs vulgarisateurs, ce qui nous a notamment permis de rejoindre l'association *Café des Sciences*, gage d'une éthique de diffusion de la science. Elle a ainsi obtenu une petite notoriété, qui nous on valu au niveau local une invitation à donner une conférence à l'occasion de la biennale du son "Le Mans Sonore", et au niveau national deux articles dans le magazine *Télérama* signés Manon Boquen<sup>8</sup> ainsi qu'une sélection au concours *e-Toiles de Science* du festival Pariscience en 2019.

# 5 Missions d'enseignement

## 5.1 Expériences de tutorat

Mes premières expériences d'enseignement sont celles réalisées en tant que job étudiant. J'intègre en effet en 2015 une agence *Academia* à Paris XVIIème, avant de faire transférer mon dossier à l'agence du Mans. Sur l'année scolaire 2016-2017, ma plus active, je participe au suivi à raison de 9h par semaine de 7 élèves de la cinquième à la première année de CPGE MPSI. A l'issue de cette année, j'encadre un stage de préparation au baccalauréat scientifique en maths et physique-chimie pour des groupes d'une douzaine d'élèves. En 2018, je suis nommée référente CNED pour le suivi en mathématiques et physique-chimie d'un tennisman de haut niveau en terminale S, qui obtient en juin 2019 son baccalauréat avec mention bien. J'abandonne cette activité très formatrice lors de l'obtention de mon contrat doctoral.

## 5.2 Missions de monitorat et CTER

Pendant mes trois années de thèse, je bénéficie au sein du Département d'Acoustique de l'Université du Mans (DAUM) d'une mission de monitorat de 64h annuelles. Au total, j'ai eu l'occasion d'enseigner ou

7. <https://www.youtube.com/channel/UCF8x7JE40NndFiCd9IvT-ng>

8. <https://www.telerama.fr/ecrans/sur-youtube-aux-origines-de-la-signature-sonore-6878105.php>

d'encadrer les cours suivants :

- TP de résistance des matériaux en première année de DUT génie des matériaux,
- TP d'acoustique en L1 et L2 Acoustique,
- TP d'instrumentation en L1 Acoustique.

Ces premières expériences face à des groupes classe sont celles qui, de par leur diversité, m'ont confortée dans mon projet alors naissant de faire de l'enseignement mon métier. Aussi, lorsqu'il m'a été offert un Contrat Temporaire d'Enseignement et de Recherche par le DAUM afin de finir la rédaction de ma thèse tout en enseignant l'équivalent de 115h (95h équivalent TD), j'ai été ravie de pouvoir accepter. Je me suis alors vue confier plusieurs missions d'enseignement en licences et master d'acoustique et de mécanique.

- TP de Matlab / Simulink en L3 Mécanique,
- TD de méthodes numériques sous Python en L2 et L3 Acoustique et M1 mécanique,
- TP de vibration en M1 de master international d'électroacoustique,
- CM d'acoustique fondamentale sur l'emploi de la fonction de Green en M2 de master international d'électroacoustique.

Ce dernier cours, qui a occupé presque un quart de mon service, m'a été confié sans syllabus et j'ai pu le monter de toutes pièces seule. Cette première expérience de réalisation d'une séquence pédagogique a été chamboulée par les mesures contre la pandémie de Covid-19 forçant un passage anticipé à l'enseignement en distanciel et la mise en place pour moi de nouvelles techniques pédagogiques prenant en compte les contraintes et difficultés de chaque étudiant.

### 5.3 Vacations à l'institut technique européen des métiers de la musique (ITEMM)

En parallèle de mon doctorat, j'ai eu l'occasion d'exercer en tant que formatrice vacataire en acoustique à l'Institut Technique Européen des Métiers de la Musique (ITEMM). Ces vacations, de l'ordre de 300h sur 4 ans ont concerné les CAP ATIM (Assistant Technique en Instruments de Musique) options vents, guitare et accordéon de piano, pour les CAP 1 et 2 en alternance ainsi que pour les CAP temps-plein. J'ai également encadré les projets de recherche d'élèves en BMA 1 guitare, que j'ai présenté aux côtés du pôle recherche et développement de l'ITEMM aux Internationales de la Guitare de Toulouse. Au sein de cette petite structure d'enseignement, je me suis très vite entendue avec l'équipe de direction, l'équipe pédagogique, et l'équipe support, si bien que j'ai pu monter de toute pièce le cours d'acoustique dans le respect des programmes du bulletin officiel, mettre en place des séances expérimentales pour l'observation phénoménologique d'ondes stationnaires dans une corde, un tube et une plaque. Cette expérience avec des élèves pour certains plus jeunes que ceux auxquels j'étais habituée dans le supérieur, quoique très différente, a été pour moi très formatrice, notamment en termes de tenue de classe.

### 5.4 Enseignement secondaire

Après la soutenance de ma thèse de doctorat en Juillet 2021, je déménage à Tahiti pour raisons familiales. C'est alors que j'entre dans l'enseignement secondaire privé catholique en tant que Maître Auxiliaire, en délégation annuelle au collège/lycée La Mennais de Papeete. Je m'y vois confier un service de 21,95h composé de : une classe de quatrième, quatre classes de troisième, une classe de seconde, un groupe de seconde en option Sciences et Laboratoire, trois classes de première en enseignement scientifique. Cette expérience me persuade définitivement de faire de l'enseignement mon métier. J'y trouve en effet l'humain qui me manquait dans la recherche, tant auprès de l'équipe pédagogique que des élèves, ainsi qu'une valorisation directe de mon travail. Je m'y suis formée tout au long de l'année, notamment au temps et aux rituels de la classe ou encore aux méthodes d'évaluation par compétences. J'ai de plus la chance d'exercer dans un établissement où le contact est très vite passé avec les équipes, ce qui m'a permis de porter des projets tels que la création d'une chorale dès les premières semaines après la rentrée.

Admise en Avril au CAPES CAER interne, je suis heureuse de me voir offrir l'opportunité de faire de l'enseignement ma carrière. L'accession au rang d'agrégée me permettrait de m'engager plus encore auprès des élèves et de leur réalisation complète en tant qu'adultes en devenir, tout en portant auprès d'eux les valeurs de la République, mes compétences disciplinaires et mon bagage professionnel et en évoluant au sein d'équipes passionnées et investies.