

Projet d'études N° 29

Noms des élèves :

Samy ARABI
Solène DOUBLET
Florent HAFFNER
Lorraine GHEERBRANT
Sophie ROUSSEL
Flavien TETARD

Commanditaire :
Fête de la Science 2015

Tuteurs scientifiques :
Louis GOSTIAUX
Daniel BOURGAULT

Conseiller en communication :
Ariane PIERROU

Conseiller en gestion de projet :
Emmanuel RIGAUD

Département d'accueil :
MFAE
Mécanique des Fluides – Acoustique – Energétique

Date du rapport :
05 juin 2015

Rapport

Kelvin-Helmholtz Instabilities

Résumé

Dans un esprit de vulgarisation scientifique, le KHI Project a pour but de proposer un système de démonstration performant pour permettre l'observation d'un phénomène de mécanique des fluides appelé instabilité de Kelvin-Helmholtz. Ces instabilités, souvent désignées par leur acronyme « KHI », sont un phénomène dont l'apparition est conditionnée par une différence de densité entre deux couches de fluide se déplaçant à des vitesses différentes. Le principal obstacle à leur reproduction en laboratoire est l'important mélange généré qui empêche de réitérer l'expérience. L'objectif du KHI Project est de dépasser cette contrainte. Une forte importance a aussi été accordée aux questions pédagogiques lors du projet, et la KHI Box est donc destinée à être présentée au grand public lors d'événements tels que la Fête de la Science.

En se basant sur des travaux antérieurs, et en particulier un système expérimental existant à l'Université de Cambridge [Worster(2013)], ce projet a abouti au développement d'un dispositif de création de KHI original reposant sur une nouvelle architecture, qui a été baptisé la KHI Box. Ce dispositif est divisé en deux sous-ensembles : d'une part un couloir dans lequel apparaissent les instabilités, et d'autre part un réservoir. Cette architecture permet de limiter le mélange.

Deux systèmes de mise en mouvement des fluides ont été conçus pour la KHI Box, fonctionnant avec une ou deux pompes. Des tests ont également permis de déterminer les paramètres expérimentaux optimaux (écart de densité, hauteur des strates, puissance des pompes) pour une bonne visibilité des KHI. Ainsi pour le système de mise en mouvement à deux pompes, la KHI Box permet finalement une observation d'instabilités dont la longueur d'onde est en moyenne de $38,2 \text{ mm}$, durant jusqu'à 27 min réparties en petites séquences sur une heure ; le rapport entre la durée d'observation du phénomène et la durée totale nécessaire à la démonstration (durée de remplissage, temps d'observation et temps d'attente entre deux observations) est de $27,2\%$. Par rapport au dispositif expérimental présent à l'Université de Cambridge, cela représente une multiplication par 592 de la rentabilité du temps d'expérimentation.

Remerciements

Nous tenons à remercier les nombreuses personnes et organismes qui ont été impliqués dans le KHI Project à différents niveaux, car c'est grâce à leur concours que ce projet et le présent rapport ont pu aboutir.

En premier lieu, nous adressons nos remerciements les plus chaleureux à Louis Gostiaux, notre tuteur scientifique pour ce projet d'études, qui par sa disponibilité, son enthousiasme et ses conseils tout au long de l'année nous a aidés à avancer et à rendre notre travail passionnant. Nous avons également une pensée pour Daniel Bourgault, notre co-tuteur, qui s'est impliqué dans le projet malgré la distance géographique.

Notre reconnaissance va également à Alain Effernelli et à Horacio Correia, qui nous ont guidés dans les usinages nécessaires pour la réalisation de la KHI Box. Nous remercions également l'ensemble du LMFA (Laboratoire de Mécanique des Fluides et Acoustique) pour nous avoir accueillis dans ses locaux, mais aussi pour nous avoir prêté du matériel dont nous n'aurions pas pu nous passer.

Mais au-delà des aspects scientifiques, cette année a aussi été l'occasion de découvrir la communication et la gestion de projet, et nous remercions donc Ariane Pierrou et Emmanuel Rigaud qui ont su nous soumettre des critiques constructives, mais aussi nous témoigner une grande confiance.

De plus, la vocation pédagogique de notre projet nous à mener à participer au(x) Laboratoire(s) Arts et Sciences; nous remercions donc le pôle château de la ville de Saint-Priest pour avoir organisé l'événement et nous avoir accueilli dans un cadre magnifique. Nous avons également l'intention de participer à la Fête de la Science 2015, et nous sommes donc aussi très reconnaissants à Bérangère Dumont de nous avoir proposé de revenir au château de Saint-Priest pour cette occasion.

Nous adressons en outre nos remerciements à l'École Centrale de Lyon, et au MFAE (département de Mécanique des Fluides, Acoustique et Énergétique) dont dépend le KHI Project. Le financement initial du projet par l'École a été complété ensuite par une demande de BQP (Bonus Qualité Projet), que le jury a accepté de financer en intégralité; nous remercions donc également les membres du jury du BQP, notamment Marie-Annick Galland, Denis Mazuyer et Bertrand Vilquin.

Enfin nous sommes reconnaissants à tous ceux qui nous ont apporté une aide ponctuelle au cours du projet : Marie-Hélène Levé, Clémentine Bernon, Marie-Gabrielle Perriaux, Frédéric Durand, Guillaume Roulet, mais aussi Louis Picard et Charlotte Rostain.

Table des matières

Résumé	2
Remerciements	3
Glossaire	10
Introduction	13
1 Contextualisation de la problématique	15
1.1 Contexte historique de la découverte des instabilités de Kelvin-Helmholtz	15
1.2 Mise en perspective	15
1.3 Etat de l'art expérimental	16
1.4 Objectifs du KHI Project	17
1.5 Stratégie mise en place	18
2 Théorie et simulations numériques du phénomène des instabilités de Kelvin-Helmholtz	19
2.1 Modélisation en mécanique des fluides	19
2.1.1 Contextualisation	19
2.1.2 Apparition de la perturbation	19
2.1.3 Approximation au premier ordre	20
2.1.4 Modélisation	21
2.1.5 Interprétation de la condition d'existence	23
2.2 Simulations numériques sous Matlab	24
2.2.1 Présentation de la méthode de calcul	24
2.2.2 Paramètres importants	24
2.2.3 Influence de la gravité	25
2.2.4 Influence de la différence de densité	27
2.2.5 Influence de la différence de vitesse	28
2.2.6 Influence du nombre de Richardson	30
2.2.7 Problèmes rencontrés	31
3 Conception de la KHI Box et des protocoles expérimentaux	32
3.1 Point de départ des expérimentations	32
3.1.1 Cisaillement et mélange	32
3.1.2 L'architecture en T	33
3.1.3 Dimensionnement de la cuve	34
3.1.4 Choix des fluides utilisés pour le remplissage en stratifié	35
3.1.5 Choix du matériau des plaques de l'architecture en T	36
3.2 Usinage et montage de la KHI Box	37
3.2.1 Usinage du PVC	37
3.2.2 Assemblage	37
3.3 La préparation des manipulations	39
3.3.1 Le remplissage de la strate inférieure	39
3.3.2 Le remplissage de la strate supérieure	40
3.4 Les différents procédés de mise en mouvement des fluides	41
3.4.1 Dispositif par déplacement de volumes	41

3.4.2	Dispositif à une pompe, par génération d'une pente	42
3.4.3	Dispositif à deux pompes, par excitation des modes propres de l'interface	44
3.4.4	Quelles sont les solutions les plus pertinentes au regard du cahier des charges ?	46
4	Caractérisation du dispositif à une pompe	47
4.1	Influence des différents paramètres	47
4.1.1	Démarche expérimentale	47
4.1.2	La densité de la strate du bas	47
4.1.3	La section du couloir	49
4.1.4	Le rapport des hauteurs	51
4.1.5	Paramètres expérimentaux retenus	53
4.2	Qualification de la méthode	53
4.2.1	Résultats obtenus avec le protocole idéal	53
4.2.2	Durée de fonctionnement	53
4.2.3	Taille des KHI	54
4.3	Analyse de la performance du dispositif à une pompe	54
5	Caractérisation du dispositif à deux pompes	55
5.1	Influence des différents paramètres	55
5.1.1	Démarche expérimentale	55
5.1.2	Influence de la largeur du couloir et de la somme des hauteurs	55
5.1.3	Influence de la densité	56
5.1.4	Puissance des pompes	57
5.1.5	Paramètres expérimentaux retenus	58
5.2	Qualification de la méthode	58
5.2.1	Résultats obtenus avec le protocole idéal	58
5.2.2	Durée de fonctionnement	58
5.2.3	Taille des KHI	59
5.2.4	Période d'excitation de l'onde interne	59
5.3	Analyse de la performance du dispositif à deux pompes	61
6	Démarche pédagogique	62
6.1	Travail de communication et identité du projet	62
6.2	Accueil d'un stagiaire	62
6.3	Supports pédagogiques	62
6.3.1	Supports à destination des classes et du grand public	62
6.3.2	Vidéos à destination du grand public	63
6.4	Participation à des événements	63
6.4.1	Démonstration lors des Olympiades de Sciences de l'Ingénieur	63
6.4.2	Laboratoire(s) Arts & Sciences de Saint-Priest	63
7	Perspectives	64
7.1	Perspectives scientifiques	64
7.1.1	Perspectives d'amélioration du système à une pompe	64
7.1.2	Perspectives d'amélioration du système à deux pompes	64
7.1.3	Etude des champs de vitesse	64
7.2	Perspectives pédagogiques	65
7.2.1	Participation à la Fête de la Science 2015	65
7.2.2	Publication d'un article dans le Bulletin de l'Union des Physiciens	65

Conclusion	66
Bibliographie et sitographie	67
A Radar météorologique à effet Doppler-Fizeau	68
B Nombre de Richardson	70
C Fiche technique du bleu patenté VN 200%	71
D Densimètre	73
E Pompe de circulation centrifuge	74
F Corde vibrante et onde interne	75
G Affiche pour les Olympiades de Sciences de l'Ingénieur	78
H Affiche pour le(s) Laboratoire(s) Arts et Sciences de Saint-Priest	79
I Cahier des charges	80
J Protocole n ° 1 : Usinage des plaques de l'architecture en T et montage de la KHI Box	82
K Protocole n ° 2 : Fabrication des solutions de colorants	83
L Protocole n ° 3 : Réalisation de KHI avec le système à une pompe	84
M Protocole n ° 4 : Réalisation de KHI avec le système à deux pompes	85
N Tableaux de résultats pour le dispositif à une pompe	86
O Tableaux de résultats pour le dispositif à deux pompes	88
P Tableau des caractéristiques des mousses alvéolaires	90

Table des figures

1	Schéma de l'organisation du projet en trois pôles	13
2	Photo de KHI dans le ciel du Wyoming, visibles du fait de la présence de nuages	13
3	Photo d'un dispositif expérimental de l'Université de Cambridge	14
4	Image des températures au fond de l'océan, révélant la présence de KHI	16
5	Photo de KHI dans l'atmosphère de Saturne	17
6	Photo de KHI à la surface du soleil, à l'interface entre deux courants de plasma	17
7	Schéma de la situation initiale	19
8	Schéma de l'apparition du cisaillement	20
9	Graphe de l'évolution de la densité à $g = 9,81$	26
10	Graphe de l'évolution de la densité à $g = 39,24$	26
11	Photo de KHI à la jonction du Rio Negro et de l'Amazone	27
12	Graphe de l'évolution de la densité à $\delta.b=0,01$	27
13	Graphe de l'évolution de la densité à $\delta.b=0,1$	28
14	Graphe de l'évolution de la densité à $\delta.u = 0$	28
15	Graphe de l'évolution de la densité à $\delta.u = 1$	29
16	Graphe de l'évolution de la densité à $\delta.u = 3,5$	29
17	Graphe de l'évolution de la densité à $Ri = 0,01$	30
18	Graphe de l'évolution de la densité à $Ri = 0,25$	30
19	Graphe de l'évolution de la densité à $Ri = 0,9$	31
20	Schéma illustrant l'effet d'une variation de volume dans l'espace occupé par un fluide	32
21	Schéma de l'apparition d'une KHI, à l'origine d'un mélange	33
22	Plan de la KHI Box en vue du dessus, réalisé avec le logiciel Catia	33
23	Schéma du mouvement du fluide en l'absence de séparation des réservoirs, réalisé avec le logiciel Catia	34
24	Modèle 3D de la cuve nue, réalisé avec le logiciel Catia (dimensions en millimètres)	35
25	Photo d'un échantillon de PVC expansé Celuka	36
26	Photo de la plaque de PVC expansé Celuka de $3 \times 1,25 \text{ m}$	37
27	Photos de la scie circulaire, de la scie à ruban et de la fraiseuse	37
28	Photo des deux plaques de Celuka assemblées en T	38
29	Photos de l'opération d'application de la colle et du joint silicone	38
30	Photo de la KHI Box une fois assemblée	38
31	Photo du densimètre utilisé pour les expériences	39
32	Graphe de l'évolution du temps de remplissage normalisé au cours des expérimentations	40
33	Photo du système mis en place pour le remplissage	41
34	Schéma de la mise en mouvement des fluides par utilisation de volumes	41
35	Photo d'une KHI obtenue grâce au système par déplacement de volumes	42
36	Photo du dispositif à une pompe, avec tuyau et vanne	42
37	Photo d'une pente nette, avant apparition de KHI	43
38	Photo de KHI obtenues avec le dispositif à une pompe	44
39	Photo du dispositif à deux pompes	44
40	Photo d'une onde interne obtenue avec le dispositif à deux pompes	45
41	Photo de KHI obtenues avec le dispositif à deux pompes	45
42	Graphe de la longueur d'onde des KHI en fonction de la densité, pour le système à une pompe	48
43	Graphe de la longueur d'onde moyenne observée en fonction de la section à densité fixée à $1,0145 \pm 0,005$	49

44	Graphe de la longueur d'onde moyenne observée en fonction de la section à densité et rapport des hauteurs fixés respectivement à $1,0145 \pm 0,005$ et $1,68 \pm 0,02$. . .	50
45	Graphe de la longueur d'onde moyenne observée en fonction de la somme des hauteurs des strates à largeur du couloir et densité fixées respectivement à 20 mm et $1,0145 \pm 0,005$	51
46	Schema de la situation des différentes strates en régime permanent dans le cas parfait où le rapport est minimal.	51
47	Longueur d'onde des KHI en fonction de la densité de la strate inférieure avec un couloir à 30 mm	56
48	Longueur d'onde des KHI en fonction de la densité de la strate inférieure avec un couloir à 20 mm	57
49	Graphe de la longueur d'onde moyenne observée en fonction de la note obtenue .	60
50	Graphe de la période de commutation en fonction de la densité et de son approximation linéaire	60
51	Les trois différentes versions du logo du KHI Project	62
52	Photo de Lorraine Gheerbrant et Flavien Tétard présentant la KHI Box à Saint-Priest le 6 mai 2015	64
53	Schéma du tube de verre borosilicaté utilisé dans le densimètre électronique	73
54	Schéma de principe de fonctionnement de la pompe centrifuge.	74
55	Schéma du dispositif de la corde vibrante	75
56	Plan avec dimensions de la KHI Box en vue du dessus, réalisé avec le logiciel Catia	82

Liste des tableaux

1	Récapitulatif du choix d'aquariums nus disponibles, avec dimensions et prix	35
2	Récapitulatif des différentes méthodes de mise en mouvement envisagées	46
3	Séries de données permettant de discuter de l'influence de la densité sur les KHI	48
4	Séries de données permettant de discuter de l'influence du rapport de hauteur sur les KHI	52
5	Résultats obtenus dans les conditions les plus proches du protocole optimal pour le dispositif à une pompe	53
6	Résultat obtenu dans les conditions les plus proches du protocole optimal pour le dispositif à deux pompes	59
7	Récapitulatif des conditions optimales d'obtention des KHI	66

Table des symboles

U	Vitesse du fluide dans la strate supérieure
U_i	Vitesse du fluide dans la strate i
$U_{critique}$	Vitesse critique permettant l'apparition des instabilités
$\xi(x, t)$	Perturbation au niveau de l'interface entre les deux fluides
$\alpha(x, t)$	Angle entre l'horizontale et la tangente à l'interface à l'instant t et à l'abscisse x
v_i	Composante de la vitesse de la strate i induite par la perturbation initiale
ϕ_i	Potentiel dont la vitesse v_i dérive
ω	Pulsation des ondes
k	Vecteur d'onde associé à l'onde perturbatrice
λ	Longueur d'onde associé à l'onde perturbatrice, i.e. longueur d'onde des KHI
p_i	Pression dans la strate i
ρ_i	Masse volumique de la strate i
Q	Débit volumique
v	Vitesse débitante
d	Densité de la strate inférieure
h_i	Hauteur de la couche i
H	Hauteur intérieure de la KHI Box
H_{ext}	Hauteur extérieure de la KHI Box
L	Longueur intérieure de la KHI Box
L_{ext}	Longueur extérieure de la KHI Box
P	Profondeur intérieure de la KHI Box
P_{ext}	Profondeur extérieure de la KHI Box
δ	Largeur du couloir de la KHI Box
V	Volume d'un objet immergé dans une strate
Δt	Durée nécessaire pour retirer l'objet
$\Delta t_{observation}$	Durée totale d'observation des KHI pour un remplissage
$\Delta t_{attente}$	Durée totale d'attente entre deux expérimentations pour un remplissage
$\Delta t_{remplissage}$	Durée totale de remplissage de la cuve
Δh	Incertitude sur les hauteurs des strates
Δd	Incertitude sur la densité de la strate inférieure

Glossaire

Cisaillement

Contrainte appliquée de manière tangentielle à une couche de fluide par une autre couche de fluide, générée par une différence de vitesse dans un fluide visqueux.

Couche limite

Zone où la vitesse du fluide varie fortement, et qui se développe au contact d'une paroi lorsqu'elle est en mouvement relatif par rapport au fluide, du fait de la viscosité.

Diffusion

Phénomène irréversible de transport de matière qui a tendance à homogénéiser les concentrations.

Écoulement irrotationnel

Écoulement vérifiant la propriété mathématique suivante : $\mathbf{rot}(v) = \mathbf{0}$. Ce qui signifie que la particule fluide n'a pas de rotation propre.

Effet Doppler-Fizeau

Désigne le décalage de fréquence entre une onde électromagnétique émise et une onde électromagnétique reçue lorsque la distance entre émetteur et récepteur varie au cours du temps.

Equation d'Euler

Elle s'applique à un fluide non visqueux. Elle dérive du principe fondamentale de la dynamique appliqué à une particule fluide : $-\nabla p + \rho \mathbf{g} = \rho \mathbf{a} = \rho \frac{D\mathbf{v}}{Dt}$

Equation de Bernoulli

Elle s'applique aux fluides non visqueux et incompressibles en écoulement stationnaire soumis à des forces dérivant d'un potentiel ϕ . Elle traduit la conservation de l'énergie mécanique le long d'une ligne de courant sous la forme : $H = p + \frac{1}{2}\rho U^2 + \phi$

Equation de Navier-Stokes

Elle s'applique aux fluides visqueux et incompressibles. Elle traduit la conservation de la quantité de mouvement du fluide en écoulement sous la forme : $\rho \frac{D\mathbf{U}}{Dt} = -\mathbf{grad}(p) + \lambda \Delta \mathbf{U} + \rho \mathbf{g} + \mathbf{f}$

Equation de D'Alembert

Il s'agit de l'équation de la propagation des ondes, qui s'écrit : $\Delta U = \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 U}{\partial t^2}$. Les solutions sont toutes les fonctions s'écrivant comme suit : $U(x, t) = f(x + ct) + g(x - ct)$

Fluide stratifié

Fluide dont la densité varie avec la profondeur. En revanche, la densité est uniforme sur un plan horizontal.

Incompressible

Se dit d'un fluide dont la masse volumique ne varie pas dans le temps.

Instabilité

Etat instationnaire de l'écoulement partant d'un état d'équilibre et allant jusqu'à la turbulence, ceci à la suite d'une perturbation d'une position d'équilibre instable.

Intercorrélation

Opération mathématique effectuée à partir de deux signaux, qui permet d'évaluer leur similitude.

Interface

Surface séparant deux milieux.

KHI Box

Installation expérimentale créée par le KHI Project, elle permet l'observation du phénomène des instabilités de Kelvin-Helmholtz durant plusieurs minutes; en outre ce dispositif est transportable.

Ligne de courant

Courbe dont la tangente en tout point est parallèle aux vecteurs de vitesse.

Marbre

Bloc de marbre dont la surface a été polie au micromètre près avec une grande précision, il garantit à l'opérateur de travailler sur une surface parfaitement plane.

Mode

Etat du système où ce dernier peut osciller selon une fréquence associée. Ce mode dépend de la nature du système autant que des conditions aux limites qui lui sont imposées.

Nombre de Reynolds

$Re = \frac{UL}{\nu}$ correspond au rapport en ordre de grandeur entre le terme de convection et le terme diffusif de l'équation de Navier-Stokes. Sa valeur permet de déterminer si l'écoulement est laminaire ou turbulent.

Onde interne

Onde de déplacement se produisant au sein d'un fluide, son existence n'est possible que si la densité du fluide varie en fonction de la profondeur.

Pulsation propre

Correspond à 2π fois la fréquence propre qui est la fréquence à laquelle un système oscille sans perte d'énergie.

Régime permanent

Etat du système où toutes les grandeurs sont indépendantes du temps.

Régime stationnaire

cf. régime permanent

Résonance

Augmentation très importante de l'amplitude des oscillations d'un système lorsqu'il est soumis à une sollicitation périodique de fréquence particulière appelée fréquence de résonance.

Rétrodiffusion

Renvoi par la matière de rayonnement ou de particules suivant des angles supérieurs à 90° par rapport à leur direction d'émission.

Salinité

Correspond au taux massique de sel dissout dans l'eau.

Saturation (d'une solution)

Etat d'une solution au-delà d'une certaine concentration, où il est impossible de continuer à dissoudre du soluté.

Tension superficielle

Phénomène se produisant à la surface d'un fluide, où les molécules possèdent une énergie (tension) supérieure au reste du milieu, la tension superficielle est par exemple la raison de la forme de ménisque de l'interface eau-air.

Théorème de Lagrange

Si pour un fluide incompressible et non visqueux le rotationnel de v est nul à un instant donné, il le reste au cours du temps.

Turbulence

Etat du fluide où la vitesse en tout point présente un caractère tourbillonnaire.

Turbulences en air clair

Turbulences atmosphériques en l'absence de nuages, les KHI peuvent en faire partie.

Viscosité

Coefficient de frottement interne au fluide et entre le fluide et les parois.

Vitesse critique

Vitesse minimale nécessaire à l'obtention d'un phénomène (en l'occurrence, de cisaillement).

Introduction

Le KHI Project correspond à un projet d'études qui s'est déroulé à l'École Centrale de Lyon sur une durée de neuf mois, à raison d'environ six heures de travail hebdomadaire de la part de l'équipe du projet. Cette équipe est composée de trois pôles : le pôle gestion de projet, le pôle du livrable de la KHI Box et le pôle des livrables pédagogiques (Figure 1). Ces différents pôles ont été répartis entre les réalisateurs qui sont six élèves de première année (Appendice, Partie 1.1).

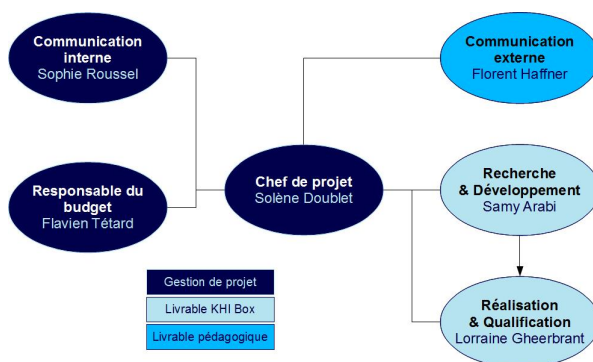


FIGURE 1 – Schéma de l'organisation du projet en trois pôles

Le thème de ce projet sont les instabilités de Kelvin-Helmholtz (en anglais Kelvin-Helmholtz Instabilities, aussi notées KHI dans la suite de ce rapport). Elles correspondent à un phénomène d'instabilité en mécanique des fluides. Les KHI peuvent apparaître à l'interface entre des fluides séparés en deux strates, car ils sont de densités différentes, dans le cas où il y a cisaillement, c'est-à-dire que les deux couches ont des vitesses différentes. Ces instabilités existent par exemple dans l'atmosphère, entre deux couches d'air de densités distinctes (Figure 2).



FIGURE 2 – Photo de KHI dans le ciel du Wyoming, visibles du fait de la présence de nuages [NOAA / Forecast Systems Laboratory(2001)]

Cependant, il est difficile de les obtenir en laboratoire de manière efficace et durable. Il existe déjà certains dispositifs expérimentaux (Figure 3) permettant l'apparition de KHI, mais ils possèdent plusieurs inconvénients, comme l'impossibilité d'être transportés, ou bien une durée très courte du phénomène. La problématique scientifique du KHI Project peut donc être formulée

comme suit : « Comment concevoir et fabriquer un dispositif expérimental pour l'apparition des KHI en laboratoire, qui améliore les caractéristiques des dispositifs existants, notamment en termes de transportabilité et de répétabilité? ».

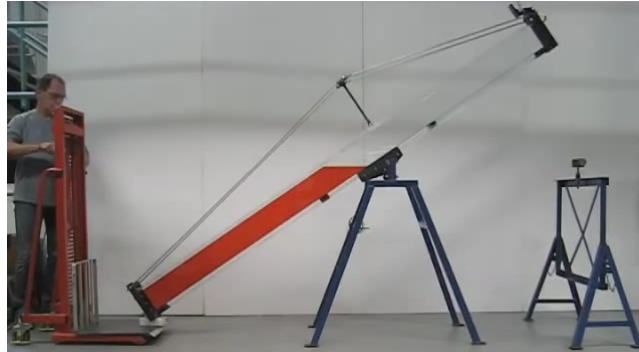


FIGURE 3 – Photo d'un dispositif expérimental de l'Université de Cambridge [Worster(2013)]

Par ailleurs, Louis Gostiaux, chercheur au LMFA et commanditaire du projet, a défini l'objectif comme étant de « créer un dispositif facilement transportable pour pouvoir proposer des séances de démonstration au grand public ». Le KHI Project devra donc répondre à une double attente : d'une part technique, afin de répondre au mieux à la problématique, et d'autre part pédagogique, afin d'être à même de proposer des démonstrations adaptées au grand public, en s'appuyant notamment sur des outils de vulgarisation tels que des vidéos, des fiches explicatives, etc. A terme, l'objectif est de pouvoir proposer un dispositif entièrement fonctionnel, et d'être présents à la Fête de la Science 2015.

Ce rapport détaillera tout d'abord le contexte dans lequel s'inscrit la problématique du projet. Le mécanisme des instabilités de Kelvin-Helmholtz sera décrit théoriquement, et de premières analyses seront tirées de la modélisation mathématique et des simulations numériques. Le présent rapport abordera ensuite les aspects expérimentaux du projet, en exposant la démarche adoptée afin de résoudre la problématique, les premiers choix techniques, et les différentes solutions testées initialement. Deux dispositifs seront plus particulièrement étudiés : le dispositif à une pompe et le dispositif à deux pompes, dont les résultats seront analysés en détails. Un autre aspect important du KHI Project sera développé ensuite : l'ensemble des actions d'ordre pédagogique menées depuis le début du projet. Enfin, les perspectives ouvertes par ce projet seront discutées, et le rapport s'achèvera sur une conclusion générale réalisant notamment le bilan des résultats obtenus.

1 Contextualisation de la problématique

1.1 Contexte historique de la découverte des instabilités de Kelvin-Helmholtz

La mécanique des fluides est « l'étude du comportement des fluides et des forces internes associées » [mec(2015)]. Elle peut être subdivisée en deux domaines d'étude : la statique des fluides, pour les fluides au repos, et la dynamique des fluides, pour les fluides en mouvement.

L'étude empirique du comportement des fluides est très ancienne, dans la mesure où de nombreux outils techniques reposant sur la mécanique des fluides datent de plusieurs milliers d'années avant l'an 0 : les arcs notamment, mais aussi les puits et les systèmes d'irrigation [Huilier(2009)]. La mécanique des fluides est étudiée au moins depuis la Grèce antique du point de vue théorique, notamment par Archimède (287-212 av JC) qui jette les bases de la statique des fluides dans son ouvrage *Des corps flottants*. Il est le premier à formuler quantitativement les forces exercées par les fluides : *tout corps plongé dans un fluide reçoit une poussée verticale dirigée vers le haut égale au poids du fluide déplacé*. Plus tard, au XV^{ème} siècle, Léonard de Vinci (1452-1519) décrit le mouvement des fluides et parle pour la première fois de turbulence (Turbolenza), génératrice d'instabilités [Alboussière(2006)]. En 1738, Daniel Bernoulli (1700-1782) présente le théorème qui porte son nom, qui traduit le bilan d'énergie d'un fluide sans viscosité le long d'une ligne de courant. Ce théorème est démontré en 1755 par Leonhard Euler (1707-1783) qui établit l'équation des fluides parfaits, aujourd'hui appelée l'équation d'Euler, dont l'équation de Bernoulli est la forme intégrale [Huilier(2009)]. C'est en s'appuyant sur le théorème de Bernoulli que les instabilités de Kelvin-Helmholtz pourront être modélisées par le calcul (Partie 2.1).

Plus tard, Georges Stokes (1819-1903) établit de façon rigoureuse l'équation des fluides visqueux, puis Henri Navier (1785-1836) regroupe l'équation d'Euler et celle fournie par Stokes, ce qui donne l'équation de Navier-Stokes. En 1883, Osborne Reynolds (1842-1912) découvre un critère d'appartition des instabilités, que l'on nomme aujourd'hui le nombre de Reynolds (Annexe U) [Alboussière(2006)]. C'est lui qui relance l'étude de la turbulence, qui avait sombré dans l'oubli depuis l'invention du concept par Léonard de Vinci, soit quatre siècles auparavant.

Les instabilités de Kelvin-Helmholtz sont théorisées au XIX^{ème} siècle par les deux physiciens dont elles portent le nom. Elles sont observées en premier lieu par Hermann von Helmholtz, et constituent le sujet de son article *Über discontinuierliche Flüssigkeitsbewegungen* publié en 1868 [Helmholtz(1868)]. La problématique explorée initialement par Helmholtz était en fait la création des vagues à la surface de l'océan. Il avait en effet remarqué que les vagues ne se formaient qu'à partir d'un vent de quatre nœuds et avait essayé d'en expliquer la raison. William Thomson, mieux connu sous le nom de Lord Kelvin, publie sa propre théorie et complète celle de son homologue en 1871, dans son ouvrage intitulé *Hydrokinetic solutions and observations* [Thomson(1871)]. Ces deux scientifiques mettent également au point un dispositif expérimental afin d'observer ces instabilités en laboratoire. Le principe de cette expérience est encore aujourd'hui utilisé pour créer des KHI en laboratoire.

1.2 Mise en perspective

Les instabilités de Kelvin-Helmholtz constituent un phénomène excessivement répandu ; on peut les observer dans la plupart des environnements fluides, aussi bien naturels qu'artificiels.

La prédiction du climat par exemple est un domaine où la compréhension de phénomènes tels que les KHI a son importance. En effet, le ciel est une zone où se forment de très nombreuses KHI à l'interface entre les courants atmosphériques, bien qu'elles ne soient visibles que lorsque le processus se produit au niveau d'un nuage (Figure 2, dans l'Introduction). Par ailleurs, il est

particulièrement important pour la bonne circulation des avions de pouvoir repérer la présence de KHI, car elles peuvent rendre un vol inconfortable pour les passagers, ou même constituer un danger pour la stabilité de l'appareil. Dans le milieu de l'aéronautique, on intègre les instabilités de Kelvin-Helmholtz dans la catégorie des turbulences en air clair, qui ne sont pas détectables visuellement car elles n'ont pas lieu dans des zones nuageuses. Il existe aujourd'hui plusieurs types de radars, notamment les radars à effet Doppler-Fizeau (Annexe A) et les profileurs de vent, capables de détecter ces instabilités à proximité des aéroports, et utilisés afin d'assurer davantage de sécurité lors des décollages et des atterrissages.

Il existe aussi des instabilités dans les océans, ainsi qu'en témoigne l'article intitulé *Familarly curved deep sea waves* [van Haren et Gostiaux(2011)], publié en 2010 par Louis Gostiaux et Hans van Haren. Celles-ci ont pu être détectées grâce à des capteurs de température à très haute résolution (Figure 4). Leur présence dans les profondeurs océaniques modifie localement les courants. Intégrer le phénomène des KHI dans certains modèles numériques de prédiction des courants marins pourrait donc permettre d'améliorer la précision des calculs. De tels modèles numériques permettent par exemple de prévoir la façon dont les polluants circulent et se dispersent dans l'océan, ou encore comment peuvent évoluer les températures océaniques.

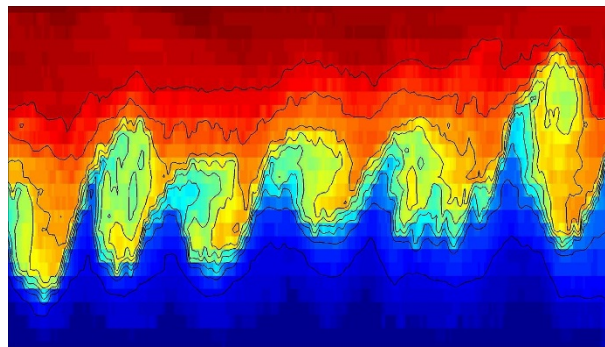


FIGURE 4 – Image des températures au fond de l'océan, révélant la présence de KHI [Gostiaux(2011)]

En outre les instabilités de Kelvin-Helmholtz sont également observables à l'échelle du système solaire : on en trouve sur Saturne (Figure 5) ou Jupiter, dont les atmosphères sont extrêmement turbulentes, ou encore à la surface du Soleil, à l'interface entre des plasmas plus ou moins denses (Figure 6). C'est donc un phénomène étudié dans le milieu de l'astronomie et de l'astrophysique, car il a possiblement une influence sur l'équilibre thermique des étoiles, ou encore sur la composition des atmosphères d'autres planètes.

Enfin, les problématiques d'instabilités dans les fluides existent très certainement dans de nombreux procédés techniques mettant en jeu des fluides, par exemple des réacteurs d'avion, des moteurs, des turbines, des barrages, etc.

1.3 Etat de l'art expérimental

Si les raisons théoriques à l'origine de l'apparition des KHI sont aujourd'hui bien comprises, il demeure en revanche difficile de les reproduire expérimentalement en laboratoire. Les protocoles existants sont longs à mettre en place (trois heures de préparation) pour une seule observation du phénomène durant moins de dix secondes. Les dispositifs expérimentaux utilisés (Figure 3 dans l'Introduction) sont également encombrants et ne peuvent pas être déplacés. Le principe de la manipulation repose sur le remplissage en stratifié d'un long tube de section rectangulaire.

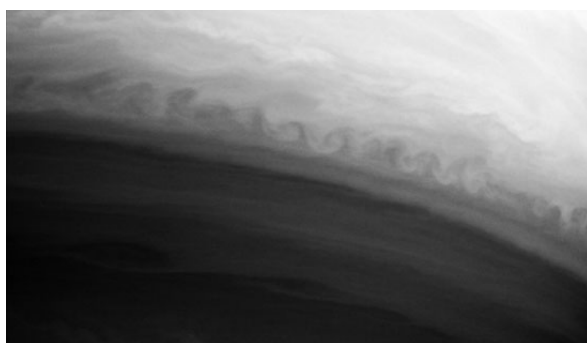


FIGURE 5 – Photo de KHI dans l’atmosphère de Saturne [NASA / JPL / Space Science Institute(2004)]

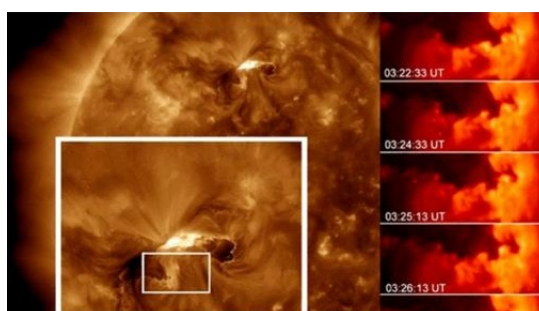


FIGURE 6 – Photo de KHI à la surface du soleil, à l’interface entre deux courants de plasma [NASA / SDO / Astrophysical Journal Letters(2011)]

La deuxième couche doit être remplie avec l’aide d’une pompe à débit très faible pour éviter tout mélange entre les deux strates. Une fois le remplissage fini, pour initier la perturbation le tube est basculé sur le côté; les deux strates sont alors mises en mouvement sous l’effet de la gravité. Si les conditions y sont propices, des KHI apparaissent à l’interface entre les deux fluides. Néanmoins, le mélange est irréversible et il faut donc vider puis remplir à nouveau le dispositif pour une nouvelle observation. Ainsi les deux principaux défauts sont la trop longue durée de remplissage par rapport à la durée du phénomène, ainsi que la taille du dispositif.

1.4 Objectifs du KHI Project

Le premier objectif du KHI Project est de concevoir et de fabriquer un nouveau dispositif expérimental de démonstration, la KHI Box. Celle-ci tente d’apporter une réponse aux deux problèmes évoqués plus haut : d’une part la durée du remplissage (qui va de pair avec la non-répétabilité du phénomène d’instabilité), et d’autre part l’absence de transportabilité. Parvenir à dépasser ces deux défauts du dispositif déjà existant permet d’obtenir un outil efficace pour présenter les instabilités de Kelvin-Helmholtz au grand public. La vocation du KHI Project est en effet pédagogique, c’est pourquoi le second objectif du KHI Project est la participation à la Fête de la Science 2015.

Ces deux objectifs généraux sont traduits par un cahier des charges, qui est décrit plus en détails en l’Annexe I. Les différentes fonctions à remplir sont toutefois résumées ici. D’une

part, le dispositif doit être assez peu encombrant, afin d'être transportable par une personne seule. D'autre part, le rapport entre temps de préparation et temps d'observation doit être fortement amélioré; actuellement il n'est que de 0,46%. Les KHI doivent donc pouvoir être déclenchées à volonté, et le phénomène doit être répétable à plusieurs reprises, afin d'atteindre finalement un rapport entre temps d'observation et temps de préparation de plus de 1%. Enfin, les préoccupations de vulgarisation entourant le KHI Project justifient la création de différents supports pédagogiques : protocoles (Annexes J à M), explicatifs papier et vidéos.

En outre, la KHI Box devra, idéalement, être reproductible par des classes de lycée par exemple, et devra donc être facile à fabriquer, fonctionner à partir de matériaux courants et ne pas représenter un coût trop important. Enfin la KHI Box est potentiellement un outil d'expérimentation utile dans la recherche, si les résultats qu'elle permet d'obtenir présentent une bonne répétabilité. En effet, elle est plus efficace que les autres dispositifs existants en termes de temps consacré aux expérimentations.

1.5 Stratégie mise en place

Pour réussir à mener à bien tous les objectifs et à répondre à la problématique, différents actions sont successivement mises en place. Le projet débute par une phase de définition : l'organisation du groupe doit être mise en place (Appendice, Partie 1.2) et traduite par un organigramme des responsabilités. Il faut de plus que chaque réalisateur se mette à niveau théoriquement, ce qui passe par des discussions avec le tuteur scientifique ainsi que par la réalisation d'un état de l'art. Il importe également d'apprendre à manipuler le matériel expérimental, comme le densimètre, et de se familiariser avec certains aspects expérimentaux fondamentaux, tels que le remplissage d'une cuve en deux phases bien nettes. Cette première approche du problème permet alors la réalisation des outils de gestion de projet, notamment le cahier des charges, la liste des tâches, et les planifications PERT et Gantt (Appendice, Partie 3.2).

Ensuite vient la phase de conception, aussi appelée phase de recherche & développement. Afin de créer la KHI Box, et qu'elle réponde bien à l'ensemble des critères fixés par le cahier des charges, il est nécessaire d'optimiser son dimensionnement ainsi que les différents paramètres expérimentaux. Pour cela, le travail sur un prototype est nécessaire. Plusieurs dispositifs de mise en mouvement doivent être testés, ainsi que différents paramètres, dont les principaux sont le différentiel de densité, la hauteur des strates de fluide et le différentiel de vitesse.

Une fois la plupart des différents paramètres fixés, la phase de réalisation de la KHI Box débute. La KHI Box est assemblée en respectant les différentes contraintes et les différents paramètres qui ont été fixés dans la phase précédente. Ceci fait, il faut vérifier que le cahier des charges défini pendant la phase de définition est bien respecté par le dispositif expérimental final. Il s'agit de la phase de qualification, durant laquelle des mesures des différentes caractéristiques de fonctionnement de la KHI Box sont réalisées, puis analysées pour permettre la production d'une critique constructive sur le travail réalisé.

Sur toute la durée du projet, diverses tâches relevant de la communication externe doivent également être menées à bien, afin de créer divers outils pédagogiques et d'assister à des événements telles que les Olympiades de Sciences de l'Ingénieur, le(s) Laboratoire(s) Arts & Sciences de Saint-Priest, ou encore la Fête de la Science 2015.

2 Théorie et simulations numériques du phénomène des instabilités de Kelvin-Helmholtz

2.1 Modélisation en mécanique des fluides

2.1.1 Contextualisation

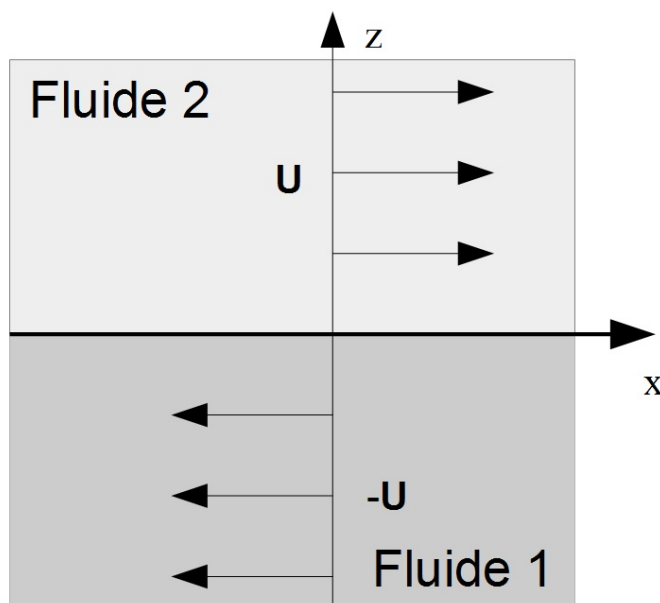


FIGURE 7 – Schéma de la situation initiale

On considère un fluide stratifié en deux couches. On suppose les fluides non visqueux et les phénomènes diffusifs négligeables, autrement dit une absence de couche limite. Les phénomènes de tension superficielle sont négligés.

Le problème est invariant par translation selon l'axe y . On peut alors se ramener au plan (Oxz) . L'interface se situe à la cote $z = 0$. On considérera le mouvement plan ainsi la composante selon l'axe y des vitesses est nulle et aucune fonction en dépend de y . Du fait de l'incompressibilité et de la non-viscosité, l'écoulement est irrotationnel initialement et le reste après l'intervention de la perturbation par théorème de Lagrange [Guyon *et al.*(2001)Guyon, Hulin, et Petit]. On note \mathbf{U} la vitesse dans la strate supérieure. On suppose que la vitesse du fluide dans la strate inférieure est l'opposé¹. Ces deux vitesses sont constantes.

Par ailleurs, \mathbf{U} dérive d'un potentiel : $\mathbf{U} = \mathbf{grad}(Ux)$ pour la partie supérieure et $-\mathbf{U} = \mathbf{grad}(-Ux)$ pour la partie inférieure.

2.1.2 Apparition de la perturbation

L'interface entre les deux fluides non miscibles subit une perturbation, notée $\xi(x, t)$. De manière générale, la perturbation initiale est engendré par le bruit comme par exemple une onde

1. Si les vitesses des deux strates ne sont pas opposées, on peut se placer dans la situation de l'étude en réalisant un changement de référentiel avec $2\mathbf{U} = \mathbf{U}_{strate1} - \mathbf{U}_{strate2}$

acoustique se propageant dans les fluides. La cote de l'interface est alors donnée par la fonction ξ . Dans la même idée, on définit $\alpha(x, t)$ l'angle entre l'horizontale et la tangente à l'interface à l'instant t et à l'abscisse x (Figure 8).

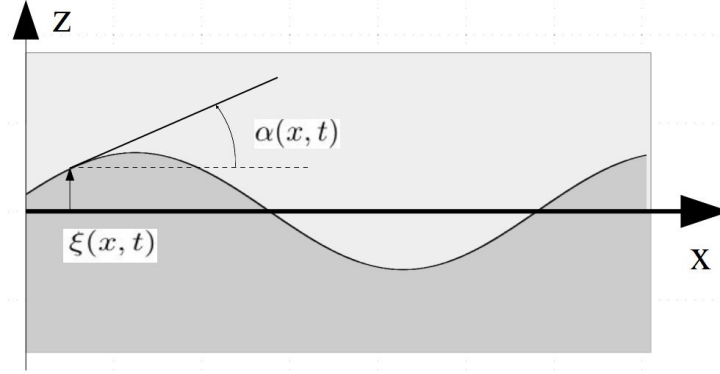


FIGURE 8 – Schéma de l'apparition du cisaillement

Du fait de la modification locale des lignes de courant, il faut superposer la situation précédente avec celle d'un écoulement perturbé au voisinage de l'interface et irrotationnel d'après ce qui précède.

La vitesse de chacune des couches est alors décomposée de cette manière :

$$\mathbf{V}_1(x, z, t) = -\mathbf{U} + \mathbf{v}_1(x, z, t) \text{ avec } \mathbf{v}_1 = \mathbf{grad}(\phi_1) \quad (1)$$

et

$$\mathbf{V}_2(x, z, t) = \mathbf{U} + \mathbf{v}_2(x, z, t) \text{ avec } \mathbf{v}_2 = \mathbf{grad}(\phi_2) \quad (2)$$

2.1.3 Approximation au premier ordre

Effectuons tout d'abord un ensemble d'approximation au premier ordre des différentes grandeurs considérées.

Dans cette optique, les hypothèses suivantes sont admises :

- $\xi(x, t)$ ainsi que ses dérivées spatiales et temporelles sont des infiniment petits d'ordre 1
- $|v_1| \ll U$ et $|v_2| \ll U$
- $|\alpha| \ll 1$
- $|\frac{\xi}{L}| \ll 1$ avec L la longueur caractéristique de l'écoulement (ce qui s'avérera plus tard être la longueur d'onde)

Par conséquent, $\sin(\alpha) \simeq \tan(\alpha) \simeq \alpha \simeq \frac{\partial \xi}{\partial x}$.

Dans l'approximation au premier ordre, le vecteur normal à l'interface s'écrit :

$$\mathbf{n}_{interface} = \cos(\alpha)\mathbf{e}_z - \sin(\alpha)\mathbf{e}_x \simeq \mathbf{e}_z - \alpha\mathbf{e}_x \quad (3)$$

Les fluides étant non miscibles, l'interface ne peut être traversée. Elle impose donc sa vitesse aux deux fluides en ce point de l'espace. Une des conditions aux limites est l'égalité des composantes normales à la surface des vitesses. Ces composantes normales étant par ailleurs égales à la dérivée temporelle de $\xi(x, t)$, la vitesse de l'interface.

$$(\mathbf{V}_1(x, \xi, t) - \mathbf{V}_2(x, \xi, t)) \cdot \mathbf{n}_{interface} = 0 \quad (4)$$

Ceci permet d'obtenir cette relation pour $j \in \{1, 2\}$:

$$v_{jz} - \alpha v_{jx} - \alpha U = \frac{\partial \xi}{\partial t} \quad (5)$$

On peut ré-écrire ceci sous cette forme :

$$\frac{\partial \phi_j}{\partial z}(x, \xi, t) - \frac{\partial \xi}{\partial x}(x, t) \frac{\partial \phi_j}{\partial x}(x, \xi, t) - \frac{\partial \xi}{\partial x}(x, t) U = \frac{\partial \xi}{\partial t}(x, t) \quad (6)$$

Le terme $\frac{\partial \xi}{\partial x}(x, t) \frac{\partial \phi_j}{\partial x}(x, \xi, t)$ est un produit de deux termes d'ordre 1 et est donc d'ordre 2. Il est négligeable devant les autres termes de l'équation. Une simplification donne alors pour $j \in \{1, 2\}$:

$$\frac{\partial \phi_j}{\partial z}(x, \xi, t) - U \frac{\partial \xi}{\partial x}(x, t) = \frac{\partial \xi}{\partial t}(x, t) \quad (7)$$

2.1.4 Modélisation

Mathématiquement, les grandeurs ϕ_1 , ϕ_2 et ξ sont modélisées dans le formalisme complexe comme suit :

- $\phi_2(x, z, t) = B_2 e^{ikx + \sigma t - kz}$
- $\phi_1(x, z, t) = B_1 e^{ikx + \sigma t + kz}$
- $\xi(x, t) = A e^{ikx + \sigma t}$

Le terme e^{ikx} représente la variation spatiale des ondes suivant l'axe x et $e^{\sigma t}$ leurs évolutions au cours du temps. Ici σ est complexe et s'écrit $\sigma = Re(\sigma) + i\omega$ avec ω la pulsation des ondes. Pour avoir des instabilités, il faut nécessairement que $Re(\sigma)$ soit non nul. En ce qui concerne les deux potentiels, le terme $e^{\pm kz}$ représente l'atténuation des ondes dès lors que l'on s'éloigne de l'interface.

Les différentes dérivées partielles sont calculées puis placées dans les deux équations du système (7) en simplifiant par $e^{ikx + \sigma t}$:

$$\begin{cases} kB_1 e^{k\xi} - AU ik = A\sigma \\ -kB_2 e^{-k\xi} - AU ik = A\sigma \end{cases} \quad (8)$$

La perturbation a été supposée très petite dans la partie précédente donc $e^{-k\xi} \simeq 1$, d'où :

$$\begin{cases} kB_1 - (\sigma - ikU)A = 0 \\ kB_2 + (\sigma + ikU)A = 0 \end{cases} \quad (9)$$

Il y a donc ici deux équations pour trois inconnues. Il faut alors obtenir une troisième égalité indépendante des deux premières. Pour cela, il faut noter que :

- Le fluide est supposé non visqueux
- Les vitesses dérivent d'un potentiel (Ceci permet de s'affranchir de la condition de stationnarité de l'écoulement)
- L'écoulement est supposé incompressible
- L'unique force massique, le poids, dérive d'un potentiel

Le théorème de Bernoulli est alors appliqué aux deux strates séparément :

$$\begin{cases} p_1 + \rho_1 \left(\frac{\partial \phi_1}{\partial t} \Big|_{z=\xi} + g\xi + \frac{V_1^2}{2} \right) = C_1 \\ p_2 + \rho_2 \left(\frac{\partial \phi_2}{\partial t} \Big|_{z=\xi} + g\xi + \frac{V_2^2}{2} \right) = C_2 \end{cases} \quad (10)$$

Les pressions sont isolées dans le système (10), qui par continuité sont nécessairement égales en $z = \xi$:

$$\rho_1 \left(\left. \frac{\partial \phi_1}{\partial t} \right|_{z=\xi} + g\xi + \frac{V_1^2}{2} \right) - \rho_2 \left(\left. \frac{\partial \phi_2}{\partial t} \right|_{z=\xi} + g\xi + \frac{V_2^2}{2} \right) = C_1 - C_2 \quad (11)$$

Pour pouvoir continuer le calcul, il faut exprimer chacune des vitesses. On rappelle que $\mathbf{V}_2 = \mathbf{U} + \mathbf{v}_2$, d'où au carré en simplifiant au premier ordre :

$$V_2^2 = U^2 + 2\langle \mathbf{U} | \mathbf{v}_2 \rangle + v_2^2 \simeq U^2 + 2U \frac{\partial \phi_2}{\partial x} \quad (12)$$

On applique la même démarche à \mathbf{V}_1 , ainsi il vient les deux égalités :

$$V_2^2 = U^2 + ikU\phi_2 \text{ et } V_1^2 = U^2 - ikU\phi_1 \quad (13)$$

D'une part, les valeurs de V_1^2 et V_2^2 sont substituées :

$$\rho_1 \left(\left. \frac{\partial \phi_1}{\partial t} \right|_{z=\xi} + \frac{U^2}{2} - U \frac{\partial \phi_1}{\partial x} \right) - \rho_2 \left(\left. \frac{\partial \phi_2}{\partial t} \right|_{z=\xi} + \frac{U^2}{2} + U \frac{\partial \phi_2}{\partial x} \right) + g(\rho_1 - \rho_2)\xi = C_1 - C_2 \quad (14)$$

D'autre part, un choix de jauge adapté sur les potentiels est effectué pour obtenir cette égalité :

$$C_1 - C_2 = \rho_1 \frac{V_1^2}{2} - \rho_2 \frac{V_2^2}{2} = (\rho_1 - \rho_2) \frac{U^2}{2} \quad (15)$$

Il faudrait alors introduire de nouveaux potentiels égaux aux précédents à une constante près. Néanmoins les notations ϕ_1 et ϕ_2 sont conservées pour ne pas alourdir les expressions. Ceci permet de simplifier l'équation (14) :

$$\rho_1 \left(\left. \frac{\partial \phi_1}{\partial t} \right|_{z=\xi} - U \frac{\partial \phi_1}{\partial x} \right) - \rho_2 \left(\left. \frac{\partial \phi_2}{\partial t} \right|_{z=\xi} + U \frac{\partial \phi_2}{\partial x} \right) + g(\rho_1 - \rho_2)\xi = 0 \quad (16)$$

Il convient alors de faire appel au modèle présenté en début de paragraphe en simplifiant tout de suite par $e^{ikx + \sigma t}$:

$$\rho_1(\sigma - ikU)B_1 - \rho_2(\sigma + ikU)B_2 + g(\rho_1 - \rho_2)A = 0 \quad (17)$$

Une troisième équation indépendante des deux premières vient d'être obtenue. Le système résultant de (9) et (17) est alors :

$$\begin{cases} kB_1 - (\sigma - ikU)A = 0 \\ kB_2 + (\sigma + ikU)A = 0 \\ \rho_1(\sigma - ikU)B_1 - \rho_2(\sigma + ikU)B_2 + g(\rho_1 - \rho_2)A = 0 \end{cases} \quad (18)$$

A partir de l'équation (9), on peut isoler B_1 et B_2 et les substituer dans l'équation (17)². Une simplification par A (bien-sûr non nul) est alors immédiate :

$$\rho_1 \frac{(\sigma - ikU)^2}{k} + \rho_2 \frac{(\sigma + ikU)^2}{k} + g(\rho_1 - \rho_2) = 0 \quad (19)$$

2. Une autre alternative aurait été d'annuler le déterminant du système. C'est la méthode employé dans l'ouvrage cité [Guyon *et al.*(2001)Guyon, Hulin, et Petit]

Une nouvelle inconnue $X = \frac{\sigma}{k}$ est posée. L'équation (19) devient :

$$X^2 + 2iU \frac{\rho_2 - \rho_1}{\rho_1 + \rho_2} X - U^2 + \frac{g}{k} \frac{\rho_1 - \rho_2}{\rho_1 + \rho_2} = 0 \quad (20)$$

L'équation précédente est un polynôme du second degré. Le déterminant réduit puis les solutions sont alors calculés :

$$\Delta' = 4U^2 \frac{\rho_2 \rho_1}{\rho_2 + \rho_1} - \frac{g}{k} \frac{\rho_1 - \rho_2}{\rho_1 + \rho_2} \quad (21)$$

$$X = \frac{\sigma}{k} = i \frac{(\rho_1 - \rho_2)U}{\rho_2 + \rho_1} \pm \sqrt{\frac{4\rho_2 \rho_1 U^2}{(\rho_1 + \rho_2)^2} - \frac{g}{k} \frac{\rho_1 - \rho_2}{\rho_1 + \rho_2}} \quad (22)$$

Les instabilités apparaissent si l'amplitude des ondes associées varient exponentiellement dans le temps. Ici cette condition est atteinte si la partie réelle de σ est non nulle. Il faut donc que le terme sous la racine soit positif.

Ainsi, on en déduit la condition d'existence des instabilités de Kelvin-Helmholtz :

$$\frac{4\rho_2 \rho_1 U^2}{(\rho_1 + \rho_2)^2} > \frac{g}{k} \frac{\rho_1 - \rho_2}{\rho_1 + \rho_2} \quad (23)$$

2.1.5 Interprétation de la condition d'existence

La seule condition nécessaire à l'apparition des instabilités est donc l'inégalité (23). Seuls trois paramètres sont moteurs du phénomène : la vitesse des fluides U et les masses volumiques de chacune des strates ρ_1 et ρ_2 .

Il est aisé de voir tout d'abord que plus le différentiel de vitesse entre les deux fluides est élevé, plus les KHI sont susceptibles d'apparaître, ce qui est intuitif. Le rôle joué par les densités est beaucoup plus difficile à déterminer. Une trop grande différence de densité entre les deux fluides demanderait une vitesse U très élevée pour vérifier l'inégalité. Dans le cas de deux fluides de densité très proche, le terme de droite est proche de 0 et le contexte est donc favorable à l'apparition des instabilités. La gravité g quant à elle est un facteur limitant pour les instabilités : sous l'effet de celle-ci, les instabilités dégénèrent rapidement, ce qui provoque alors le mélange des deux strates au niveau de l'interface. Enfin k est le vecteur d'onde associé à notre perturbation initiale et donc aux KHI. Pour mieux comprendre ce que représente cette inconnue, il faut se référer à la relation suivante :

$$k = \frac{2\pi}{\lambda} \quad (24)$$

L'inégalité (23) se réécrit donc :

$$\frac{4\rho_2 \rho_1 U^2}{(\rho_1 + \rho_2)^2} > \frac{\lambda g}{2\pi} \frac{\rho_1 - \rho_2}{\rho_1 + \rho_2} \quad (25)$$

La période spatiale λ et la taille des instabilités sont intimement liées car on ne peut avoir une KHI plus grande qu'une période spatiale. λ apparaît ici au numérateur du terme de droite. Cela signifie que si l'on fixe tous les autres paramètres, la longueur d'onde est majorée. Il est alors plus difficile de faire apparaître des instabilités de grandes longueurs d'onde.

2.2 Simulations numériques sous Matlab

2.2.1 Présentation de la méthode de calcul

Afin de valider le modèle expérimental, il a été nécessaire et naturel d'obtenir une modélisation numérique du phénomène en question, de manière à suivre la démarche en trois temps usuels en mécanique des fluides : modèle théorique, réalisation expérimentale et simulation numérique. Le code est un code Matlab qui a été réalisé par Guillaume Roulet de l'Université de Strasbourg et qui a été adapté à la situation présentée en Partie 2.1. Dans un premier temps, il a fallu déterminer la correspondance entre chaque paramètre du code et chaque paramètre expérimental nécessaire au dispositif créé pour le projet.

Les différents fichiers Matlab fournis s'attachent aux calculs de différentes grandeurs telles que la vorticité, la vitesse, la flottabilité des fluides et aussi à effectuer certaines factorisation (Cholesky) afin de diminuer le temps de calculs. Le code est construit sur un programme de base multimod qui effectue les calculs des grandeurs spécifiées précédemment à l'aide de fonctions en langage Matlab. Ce programme général permet de réaliser des simulations pour un grand nombre d'écoulements. La simulation des instabilités de Kelvin-Helmholtz est alors lancé via un autre script, appelé KHI, où les différents paramètres propres à nos instabilités sont rentrés et donnent les options d'affichages. Une perturbation initiale est entre autre introduite dans ce script. Dès lors, le code fournit un graphique bidimensionnel correspondant à la zone d'évolution du fluide et au fluide à chaque instant t , ainsi qu'une vidéo de cette évolution.

2.2.2 Paramètres importants

Les différents paramètres pertinents du problème apparaissent donc dans le script propre aux KHI. Ces paramètres apparaissent dans la relation de dispersion de la modélisation physique précédente (Partie 2, équation 23) et sont :

- la différence de vitesse, via `delta_u`
- la différence de densité, via `delta_b`
- l'accélération de la pesanteur, via `param.g`

La densité varie alors de manière linéaire entre les deux strates. D'autres paramètres peuvent être modifiés tels que :

- les tailles caractéristiques de l'espace où l'écoulement se développe
- l'épaisseur de l'interface
- la présence ou non de couche limite

Ces derniers paramètres ne seront pas pris en compte et le code se restreindra tant que possible à la situation décrite dans la modélisation du phénomène, c'est-à-dire un fluide non visqueux dans un espace infiniment grand dans toutes les directions et avec une interface d'épaisseur quasi nulle.

Cet extrait comment  du script KHI permet de voir les différentes phases de définition du problème : la taille du domaine, les paramètres de calculs et quelques conditions initiales dont la perturbation.

```
clear param %Initialisation

% Choix d'options pour multimod pour se placer dans la situation des KHI
param.model = 'nh';
param.noslip = 0;

% Constante(s) physique(s)
param.g = 9.81; % Choix de la gravite
```



```

% Resolution/Maillage
param.nx = 300;
param.ny = param.nx/2;
%Taille du domaine de la figure
param.Lx = 16;
param.Ly = 8;

%(...)

% Choix de differents parametres de multimod pour etre conforme a la situation des KHI
param.cholesky=1; % 1 signifie que la factorisation de Cholesky est utilisee
param.timestepping = 'RK3';
param.upwind = 'up5';
param.splitting='lxf';
param.fixed.dt=1;

%(...)

% Amplitude de la perturbation initiale
amp=1e-2;

z=yr-param.Ly/2-param.Ly*amp*sin(xr*2*pi/param.Lx); %Perturbation initiale sinusoidale

param.epaisseur=0.02; % epaisseur de l'interface.

param.thickness=param.epaisseur/param.dx;% Epaisseur de l'interface en nombre de points
delta_u=1; %Difference de vitesses entre les deux strates

%En fonction de ce qui est souhaite par la personne qui effectue les simulations,
%les lignes de calculs sont commentees et decommentees

%Difference de densite connue, calcul de richardson

%param.delta_b=0.02;
%richardson = param.g*param.delta_b*(param.thickness*param.dx)/(delta_u^2);

%Richardson connu, calcul de la difference de densite
richardson = 0.01;
param.delta_b = richardson*(delta_u^2)/(param.g*param.thickness*param.dx)

%(...)

%% Lancement du programme multimod :

multimod

```

Dans le but de valider le modèle proposé précédemment et de vérifier les résultats expérimentaux qui seront présentés plus loin, il est nécessaire de réaliser un certain nombre de simulations. Ces simulations visent spécifiquement à vérifier la condition d'apparition des KHI (23) ainsi que les différentes observations relevées à partir des expérimentations. Elles sont présentées dans les sous-parties suivantes.

2.2.3 Influence de la gravité

Deux situations ont été simulées ici, à savoir l'une en prenant l'accélération de la pesanteur terrestre, l'autre en prenant une accélération quatre fois supérieure. Les autres paramètres étaient

alors fixés comme suit³ :

- param.Lx = 16 ;
- param.Ly = 8 ;
- delta_u = 1 ;
- param.delta_b = 0,02 ;
- param.epaisseur = 0,02 ;

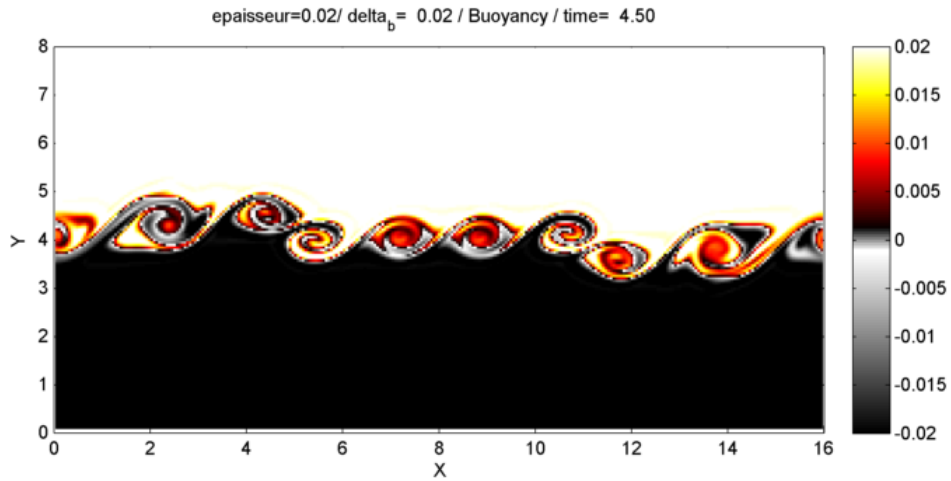


FIGURE 9 – Graphe de l'évolution de la densité à $g = 9,81$

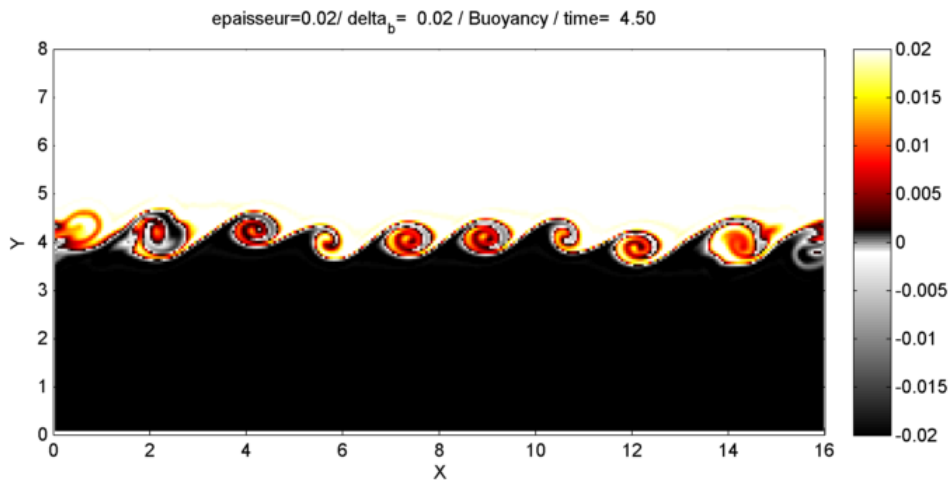


FIGURE 10 – Graphe de l'évolution de la densité à $g = 39,24$

Les simulations montrent clairement l'influence de g sur le phénomène, les deux figures 9 et 10 indiquent en effet qu'une augmentation d'un facteur quatre de la pesanteur implique une

3. les unités sont celles du système international

diminution notable de l'amplitude des instabilités, ainsi qu'un temps nécessaire à l'établissement de l'instabilité beaucoup long que pour une pesanteur normale, qui est en l'occurrence la condition dans laquelle les expériences ont été développées. Comme l'intuition le prévoit, une augmentation de g a un effet stabilisant sur l'écoulement. Ceci vient donc appuyer la relation de dispersion (22) et l'inégalité d'instabilité (23) dans lesquels g apparaît comme un facteur limitant le phénomène physique étudié.

Par ailleurs, ceci montre que pour une situation où deux fluides se superposent non plus de manière verticale mais horizontale (ce qui revient à annuler la pesanteur) induit les effets attendus par le modèle et la simulation, c'est-à-dire de plus grandes amplitudes et vitesses d'apparition pour une même échelle de longueur, comme le montre l'exemple du Rio Negro et de l'Amazone (Figure 11).



FIGURE 11 – Photo de KHI à la jonction du Rio Negro et de l'Amazone [Ariau(2013)]

2.2.4 Influence de la différence de densité

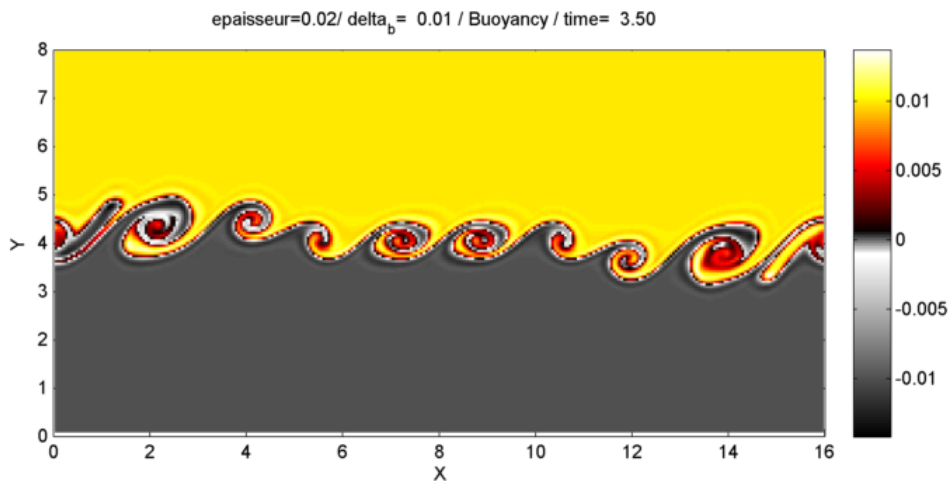


FIGURE 12 – Graphe de l'évolution de la densité à $\Delta_b=0,01$

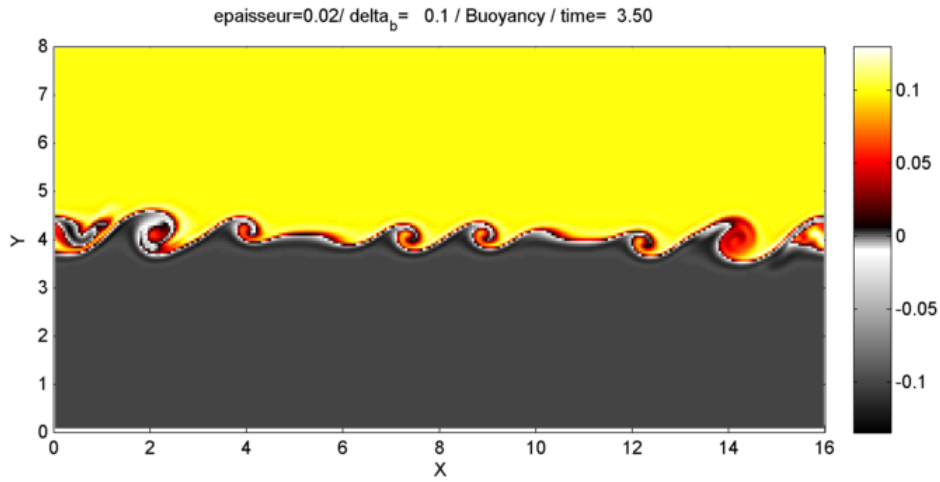


FIGURE 13 – Graphe de l'évolution de la densité à $\delta_b=0,1$

Les deux figures 12 et 13 montrent un instantané de l'évolution du fluide pour des différences de densité décroissantes. La simulation met en évidence qu'une différence de densité plus faible augmente l'amplitude des instabilités. Une faible différence de densité est donc un paramètre déstabilisant. Il est aussi visible que pour une forte différence de densité, le déclenchement du phénomène est plus lent. Ainsi la différence de densité apparaît comme un terme susceptible de rendre la racine de la relation (22) négative et donc rendre l'inégalité (23) vraie. Ceci tend aussi à appuyer l'intuition qu'un fluide un peu moins dense qu'un autre subira une poussée vers le haut d'autant plus faible que l'écart en densité est faible.

2.2.5 Influence de la différence de vitesse

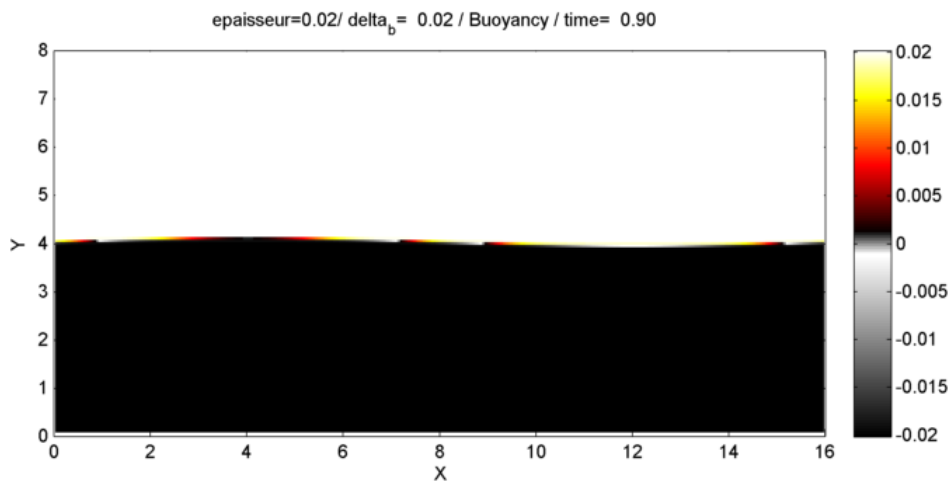


FIGURE 14 – Graphe de l'évolution de la densité à $\delta_u = 0$

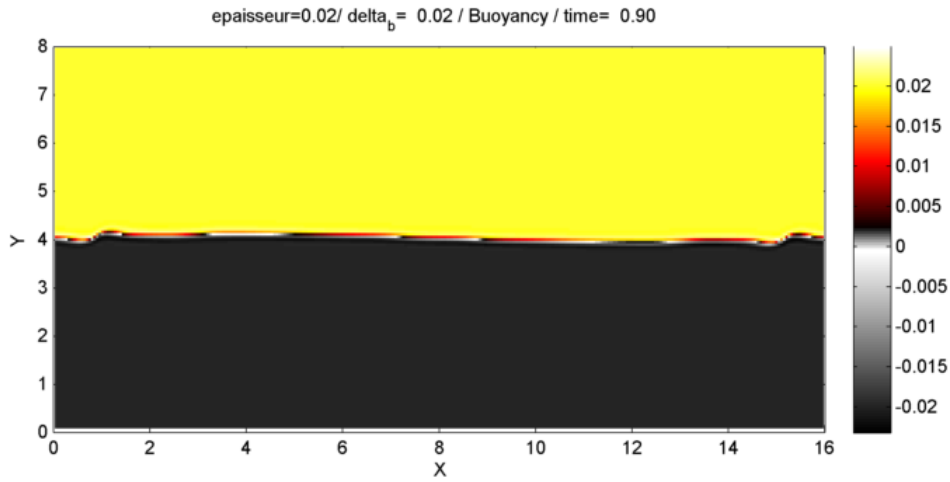


FIGURE 15 – Graphe de l'évolution de la densité à $\delta_u = 1$

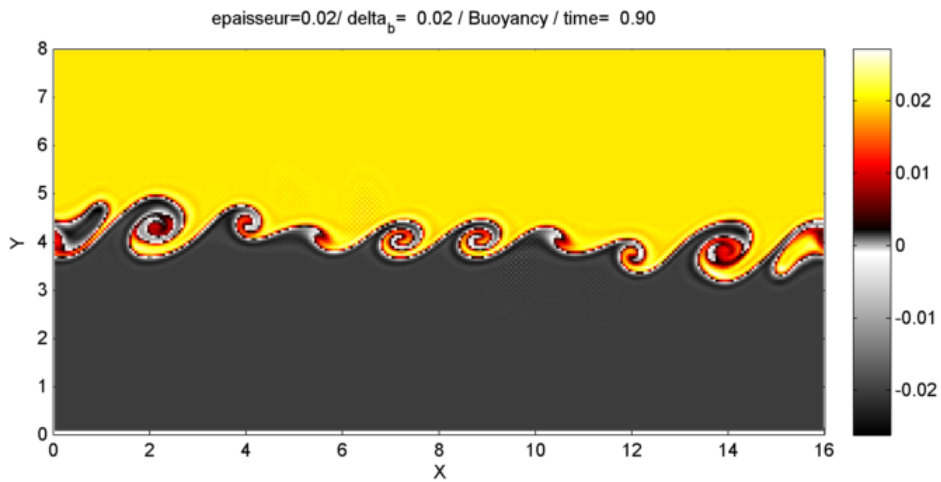


FIGURE 16 – Graphe de l'évolution de la densité à $\delta_u = 3,5$

Les trois figures 14, 15 et 16 montrent un instantané du fluide pour des différences de vitesses croissantes. La simulation laisse apparaître que pour une différence de vitesse plus grande, le déclenchement du phénomène est plus rapide et les KHI sont plus grandes. Ceci met donc en évidence qu'une grande différence de vitesse est un phénomène déstabilisant. Ce résultat conforte la modélisation du phénomène faite plus haut ainsi que l'écriture de la relation de dispersion, du fait que le différentiel de vitesse $2U$ est moteur du phénomène et est susceptible de rendre la racine de la relation (22) négative et donc rendre l'inégalité (23) vraie. Notons enfin que la légère ondulation de l'interface pour le cas d'une différence de vitesse nulle (Figure 14) est due à la perturbation initiale.

2.2.6 Influence du nombre de Richardson

Le code laisse le choix entre d'une part, un écoulement à nombre de Richardson fixé (ce qui permet de déduire la différence de densité), et d'autre part, un écoulement à différence de densité fixée (ce qui permet de déduire le nombre de Richardson). Il est possible de vérifier que pour un nombre de Richardson moyen inférieur à 0,25, le phénomène des KHI se déclenche (Annexe B).

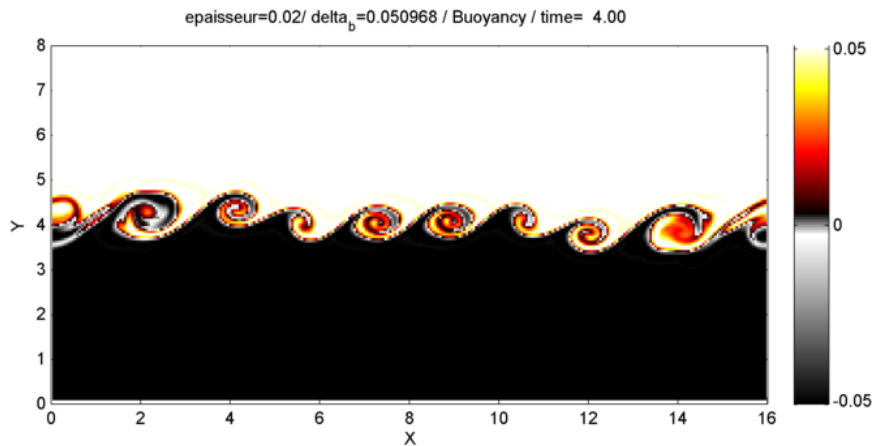


FIGURE 17 – Graphe de l'évolution de la densité à $Ri = 0,01$

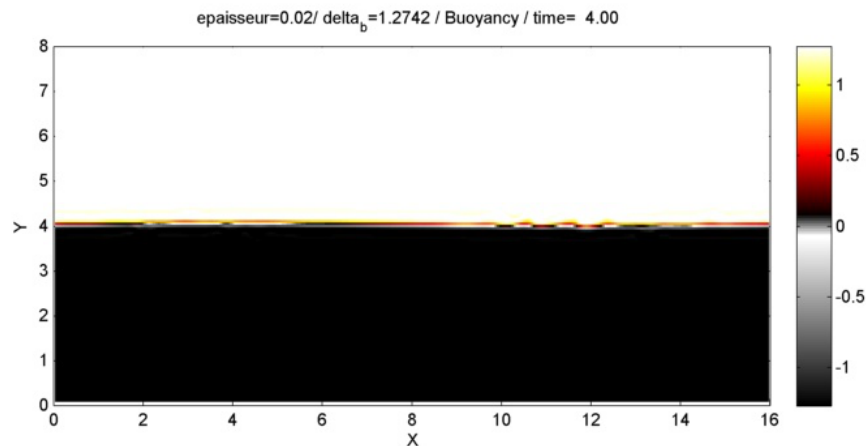


FIGURE 18 – Graphe de l'évolution de la densité à $Ri = 0,25$

Les figures 17, 18, 19 montrent l'influence du nombre de Richardson Ri . Pour un Ri inférieur à un quart, les perturbations extérieures entraînent l'apparition d'instabilités de Kelvin-Helmholtz. Inversement, pour un nombre de Richardson plus élevé, le phénomène n'apparaît pas malgré la perturbation initiale. Ainsi un grand nombre de Richardson est donc un paramètre stabilisant.

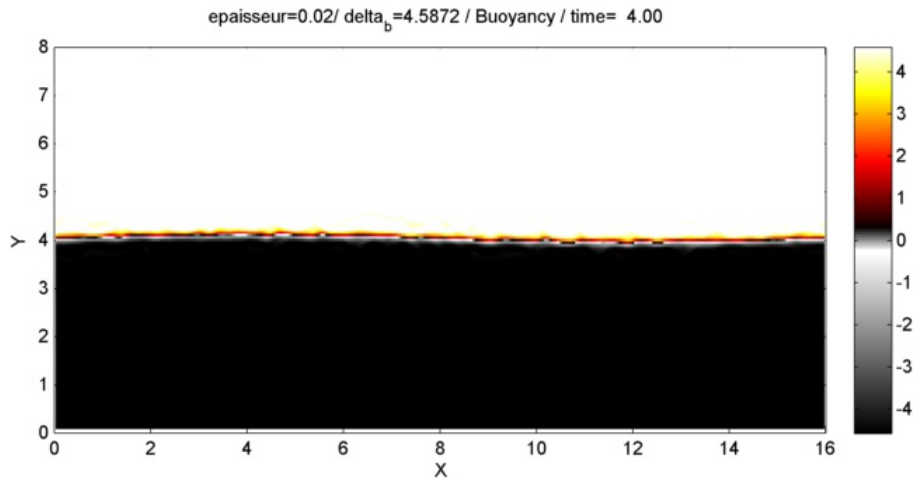


FIGURE 19 – Graphe de l'évolution de la densité à $Ri = 0,9$

2.2.7 Problèmes rencontrés

Le code pose le problème des conditions aux limites latérales. En effet le fluide sortant à droite rentre de nouveau par la gauche du fait des conditions aux limites périodiques. Ceci permet de simplifier les conditions aux limites et offre alors un gain de temps de calculs considérable. Afin de résoudre ce problème il a été nécessaire d'augmenter la longueur horizontale caractéristique de l'espace simulé de sorte à avoir plusieurs fois la longueur d'onde dans ce dernier. Cette astuce permet d'étudier l'influence des différents paramètres en négligeant la périodicité spatiale. Néanmoins le problème n'est pas entièrement résolu, et c'est cet aspect du code qui n'a pas rendu possible des simulations numériques plus proches des situations expérimentales présentées dans la suite du rapport.

Un autre problème évoqué plus haut est celui de l'épaisseur de l'interface. Dans la mesure où le modèle décrit deux fluides homogènes, il est possible d'imposer une épaisseur de l'interface infiniment fine. Le code montre que des instabilités apparaissent déjà à des densités intermédiaires entre deux couches. L'épaisseur rend donc plus facile l'apparition de ce phénomène des KHI, du fait de différences de densités locales plus faible que la moyenne, ce qui fausse la vérification de la relation de dispersion et du modèle.

3 Conception de la KHI Box et des protocoles expérimentaux

3.1 Point de départ des expérimentations

3.1.1 Cisaillement et mélange

Les instabilités de Kelvin-Helmholtz apparaissent lorsqu'il y a un cisaillement suffisamment important entre deux strates de fluides. Cela signifie que pour reproduire le phénomène expérimentalement, les fluides utilisés doivent être mis en mouvement et atteindre une vitesse critique $U_{critique}$ permettant l'apparition des instabilités. Celle-ci dépend des autres paramètres expérimentaux selon la relation :

$$U_{critique} = \sqrt{\frac{g}{k} \frac{\rho_2^2 - \rho_1^2}{4\rho_2\rho_1}} \quad (26)$$

Pour générer la vitesse nécessaire, il faut donc faire apparaître un gradient de pression dans l'une des strates, voire dans les deux. Deux solutions simples à mettre en place et peu coûteuses sont envisageables *a priori* : d'une part, générer des variations de volume dans les fluides (Figure 20), et d'autre part, recourir à une pompe (Annexe E).

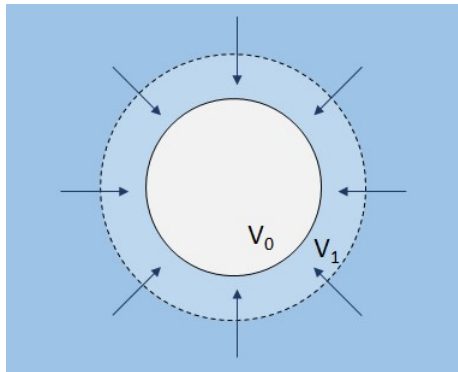


FIGURE 20 – Schéma illustrant l'effet d'une variation de volume dans l'espace occupé par un fluide

Toutefois, générer une vitesse au sein du fluide signifie lui transmettre de l'énergie, et cet apport d'énergie risque de participer au mélange des deux strates, dès lors que la vitesse du fluide n'est pas parfaitement parallèle à l'interface. Plus important encore, une fois que l'instabilité est déclenchée elle s'amplifie, et elle génère un enroulement des strates l'une dans l'autre (Figure 21). Des particules de fluides denses se trouvent alors au-dessus de particules du fluide peu denses et donc plus légères. Les KHI sont donc rendues instables par les effets de la gravité, qui entraînent leur dégénérescence et un mélange local des deux strates. L'influence de la gravité sur la dégénérescence des KHI a notamment pu être étudiée grâce aux simulations numériques sous Matlab (Partie 2.2).

Le cisaillement est donc nécessaire à l'apparition des instabilités de Kelvin-Helmholtz, et deux solutions sont envisageables afin de l'obtenir. Mais la vitesse donnée au fluide peut induire du mélange entre les deux strates, ce qui n'est pas souhaitable pour réitérer l'expérience plusieurs fois ; il faut donc trouver une solution afin de limiter le mélange.

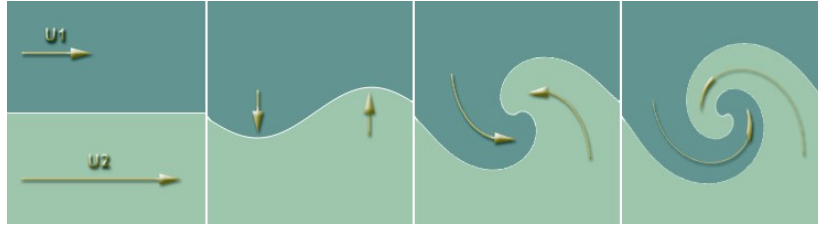


FIGURE 21 – Schéma de l'apparition d'une KHI, à l'origine d'un mélange [Paperin(2012)]

3.1.2 L'architecture en T

Le dispositif installé dans la cuve a pour objectif de réduire les mélanges et améliorer la visibilité des instabilités de Kelvin-Helmholtz générées. Ce dispositif est appelé architecture en T, du fait de la disposition des deux plaques dans la cuve vue du dessus, comme le montre la Figure 22.

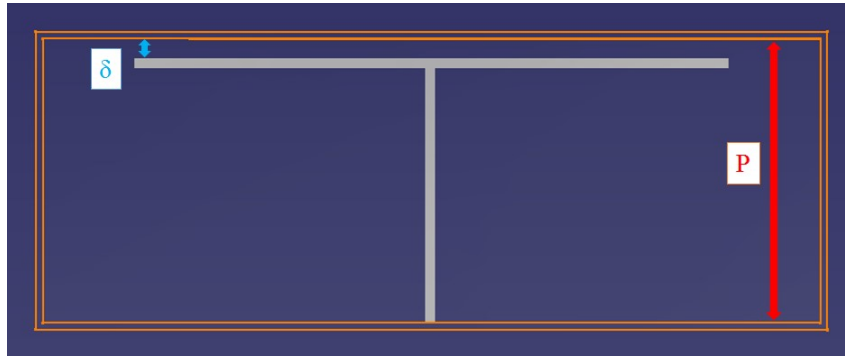


FIGURE 22 – Plan de la KHI Box en vue du dessus, réalisé avec le logiciel Catia

Le principal avantage offert par cette architecture est de favoriser la répétabilité du phénomène. En effet, les KHI sont générées dans le couloir, et c'est donc là qu'a lieu le mélange des deux fluides, sur une faible surface σ comparée à l'aire totale de l'interface S . Avec δ la largeur du couloir et P la profondeur de la KHI Box, tel qu'illustré sur la Figure 22, le rapport R entre ces aires est de :

$$R = \frac{\sigma}{S} \approx \frac{\delta}{P} \quad (27)$$

Après disparition des KHI, la densité du fluide issu du mélange est intermédiaire entre celles des fluides des strates supérieure et inférieure. Ce volume se répartit donc sur toute la surface de l'interface sous l'effet de la pesanteur. L'épaisseur de l'interface est donc réduite d'un rapport R , et devient négligeable avec un dimensionnement approprié permettant d'avoir $R \ll 1$. Les deux fluides peuvent alors être à nouveau considérés comme bien stratifiés, avec un échelon de densité à l'interface ; le processus peut être réitéré dans de bonnes conditions.

Mais l'architecture en T présente d'autres intérêts, outre la limitation du mélange. Pour un débit volumique donné Q , la vitesse débitante v dans chaque phase sera d'autant plus grande que la section de fluide est faible. En effet, avec h_i la hauteur de l'une des deux strates (h_1 ou h_2) :

$$v = \frac{Q}{h_i \delta} \quad (28)$$

Ainsi la faible largeur du couloir favorise la formation de KHI. Cela signifie que le différentiel de vitesse nécessaire pour déclencher l'apparition des instabilités sera atteint plus facilement avec un couloir étroit.

Enfin, la séparation du réservoir en deux compartiments hermétiques vise à imposer le mouvement dans le couloir ; en effet si les deux réservoirs sont reliés, plusieurs phénomènes qui ne sont pas favorables à l'apparition de KHI se produisent. D'abord, le fluide peut ne plus circuler dans le couloir, surtout si l'ouverture entre les réservoirs est très large ; il peut se produire des tourbillons dans les réservoirs, tandis que le fluide reste statique dans le couloir (Figure 23). De plus, certaines méthodes mettent également la différence de charge entre les deux extrémités du couloir à profit, et l'absence de séparation des deux réservoirs ne permet pas d'avoir cette différence.

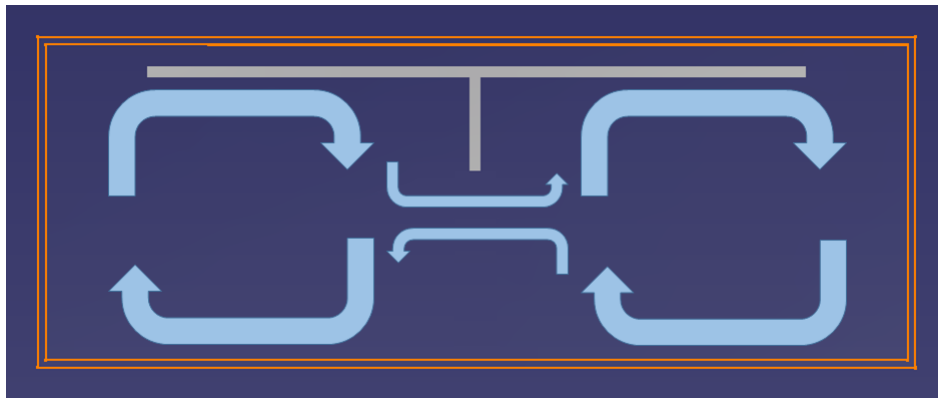


FIGURE 23 – Schéma du mouvement du fluide en l'absence de séparation des réservoirs, réalisé avec le logiciel Catia

3.1.3 Dimensionnement de la cuve

Le principal critère pour le choix de la cuve est la transportabilité, celle-ci doit pouvoir être soulevée par une personne seule. Une longueur maximale d'un mètre a donc été fixée lors de la rédaction du cahier des charges. De plus, plus la cuve est petite, moins elle est chère à l'achat, ce qui est également un critère de choix important. Néanmoins, une cuve trop petite ne possède pas une section horizontale suffisante pour obtenir des instabilités vérifiant le cahier des charges. En effet, la strate de densité intermédiaire issue du mélange aura moins d'espace pour se répartir uniformément, elle ne pourrait alors plus être négligeable et il faudrait remplir à nouveau la cuve. Il faut donc trouver un compromis pour déterminer les dimensions idéales de la cuve. Par ailleurs, le phénomène d'instabilités doit être observable par un public, d'où la nécessité que la paroi frontale (celle du couloir) soit au moins transparente.

Pour des questions de contrôle des coûts, il est préférable d'acheter la cuve auprès d'un fournisseur d'aquarium. Or les dimensions des aquariums sont standardisées, en particulier pour les cuves nues ; le fournisseur sélectionné offre donc le choix entre quatre dimensionnements différents dans la fourchette de prix acceptable. Les possibilités sont résumées dans la Table 1.

Numéro	1	2	3	4
Dimensions $L_{ext} \times P_{ext} \times H_{ext}$ (en cm)	60 x 30 x 35	80 x 30 x 40	100 x 30 x 40	100 x 40 x 50
Prix HT (en €)	69,00	79,90	99,90	139,90

TABLE 1 – Récapitulatif du choix d’aquariums nus disponibles, avec dimensions et prix

La KHI Box est construite à partir de l’aquarium numéro 2, mais d’autres solutions sont envisageables. Il faut cependant noter que dans le cadre des expérimentations, la longueur et la profondeur qui sont pertinentes sont les mesures intérieures L et P , qui définissent la surface occupée par le fluide, et non les mesures extérieures données par le vendeur L_{ext} et P_{ext} . Les dimensions de la cuve sont résumées par la Figure 24.

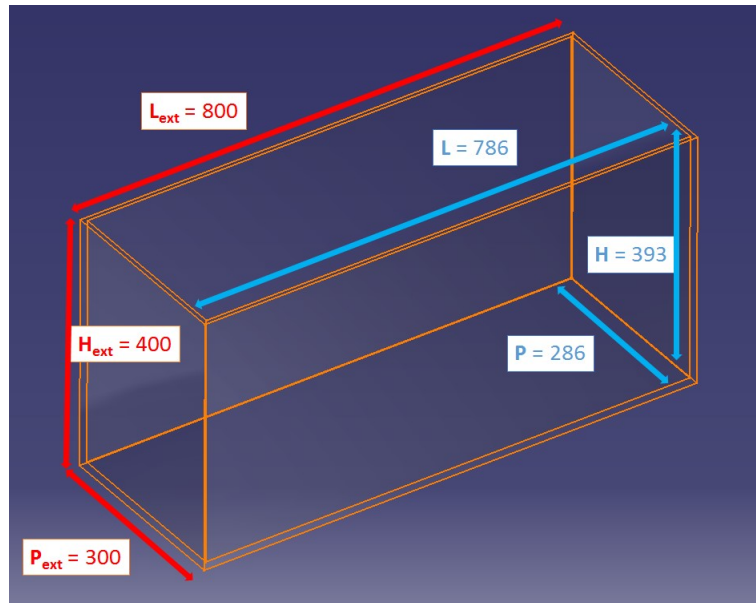


FIGURE 24 – Modèle 3D de la cuve nue, réalisé avec le logiciel Catia (dimensions en millimètres)

Par ailleurs, la question de la transparence des parois est résolue d'emblée par le choix d'acheter un aquarium.

3.1.4 Choix des fluides utilisés pour le remplissage en stratifié

Pour faire apparaître des instabilités de Kelvin-Helmholtz, il faut disposer de fluides organisés en deux strates, ce qui n'est possible que si ces fluides présentent des densités différentes. Pour les expérimentations menées avec la KHI Box, les fluides adoptés sont l'eau douce et l'eau salée, la salinité augmentant la densité de l'eau. Ces deux fluides peuvent présenter une différence de densité permettant un remplissage en deux strates, et un saut de densité au niveau de l'interface.

L'utilisation de l'eau présente de multiples avantages. En effet il s'agit d'un fluide disponible en grande quantité et en de nombreux endroits, et à un prix très modeste. Ce critère est très important pour que l'expérience puisse être réalisable facilement lors d'événements tels que la Fête de la Science, mais aussi pour que la manipulation puisse être reproduite par des personnes

extérieures au projet, par exemple des classes de lycée.

Le sel est lui aussi disponible facilement. Par ailleurs, un autre point en faveur de l'eau salée tient à la possibilité de lui donner la densité voulue en contrôlant la salinité. La concentration de l'eau en chlorure de sodium peut en effet être diminuée par un procédé de dilution, et augmentée grâce à la dissolution de sel, jusqu'à saturation de la solution. La densité de l'eau salée varie alors entre $d \simeq 1$ (pour une salinité très basse) et $d = 1,274$ (pour de l'eau saturée en sel, à 100°C [sau(2015)]).

De plus, du colorant est ajouté à l'eau salée afin de permettre la distinction des deux strates. Plusieurs colorants sont envisageables, de plusieurs couleurs différentes. Les critères de choix sont essentiellement d'opter pour un colorant assurant une bonne visibilité (le jaune par exemple n'est pas recommandé), ne tâchant pas, et non toxique, pour des raisons pratiques et de sécurité. Le colorant utilisé dans la KHI Box est du bleu patenté VN 200%, dont la fiche technique est disponible en Annexe C. Il est utilisé à des concentrations avoisinant les $0,1\text{g/L}$ afin d'obtenir une teinte assez foncée et donc un bon contraste avec la strate d'eau non colorée.

L'eau aussi bien que l'eau salée et colorée ne posent aucun problème de toxicité et peuvent être jetées au tout-à-l'égout ; en effet le bleu patenté VN 200% est un colorant alimentaire, non polluant, et les salinités utilisées ne sont pas suffisantes pour être corrosives.

3.1.5 Choix du matériau des plaques de l'architecture en T

Le matériau pour les plaques de couloir et de réservoir doit être étanche, mais également facile à usiner et à assembler. Dans la KHI Box, les plaques sont en PVC expansé Celuka (Figure 25). C'est un PVC expansé, donc très léger, mais aussi rigide et facile à découper à la scie sauteuse. En outre ce matériau a un bon comportement au collage et adhère correctement à du verre ou à lui-même avec l'utilisation de colle à PVC classique, contrairement à du PEHD par exemple. Pour faciliter le collage et l'assemblage, la plaque ne doit pas être trop mince, mais l'encombrement dans la cuve doit également être limité, une épaisseur de 10 mm suffit donc.



FIGURE 25 – Photo d'un échantillon de PVC expansé Celuka

Grâce à son procédé de fabrication spécifique, le PVC expansé Celuka est en outre bien étanche (contrairement à la majorité des PVC expansés), propriété indispensable pour assurer la durabilité de l'architecture en T dans la KHI Box. Enfin la visibilité des instabilités dépend grandement de la couleur du matériau de la plaque de couloir ; donc afin que le colorant bleu ressorte bien par contraste, le PVC expansé Celuka est choisi en blanc.

3.2 Usinage et montage de la KHI Box

3.2.1 Usinage du PVC

Pour construire le dispositif en T de la KHI Box, deux plaques rectangulaires, de dimensions $600 \times 320 \text{ mm}$ et $256 \times 320 \text{ mm}$, sont nécessaires. L'usinage de ces deux pièces se fait à partir d'une plaque $3 \times 1,25 \text{ m}$ en PVC expansé Celuka (Figure 26).



FIGURE 26 – Photo de la plaque de PVC expansé Celuka de $3 \times 1,25 \text{ m}$

Les formes des futures plaques sont dessinées sur le film protecteur de la grande plaque au stylo ou au feutre, avec une règle et une équerre afin d'assurer une perpendicularité rigoureuse ; cela permet par la suite un assemblage plus facile et de meilleure qualité. Les premières découpes sont réalisées à la scie sauteuse ou à la scie circulaire (Figure 27) ; ce dernier outil peut être dangereux, et doit être manipulé avec précaution, une fois la plaque solidement fixée à une table ou à un établi. Lorsque la plaque est réduite à des dimensions plus modestes, la découpe peut se poursuivre à la scie à ruban (Figure 27). Si les bords laissent à désirer, ils peuvent être limés, ou même lissés à la fraiseuse (Figure 27), pour plus de précision.



FIGURE 27 – Photos de la scie circulaire (à gauche), de la scie à ruban (au centre) et de la fraiseuse (à droite)

3.2.2 Assemblage

Une fois les plaques usinées, il est nécessaire de les assembler « en T ». Pour cela, trois ou quatre trous de taille un peu inférieure au diamètre de la vis sont creusés à la perceuse, au centre de la plaque, ainsi que leur équivalent dans l'épaisseur de la plaque arrière. Ces trous permettent ensuite aux vis de se loger à l'endroit désiré dans les deux plaques, sans risquer qu'elles se tordent ou se cassent. Les deux plaques sont fixées l'une à l'autre par des vis inoxydables afin d'éviter l'apparition de traces de rouille au bout de quelques semaines d'utilisation (Figure 28).

L'orthogonalité des plaques entre elles et par rapport au support est primordiale, c'est pourquoi l'utilisation d'un marbre et d'une équerre est très utile.



FIGURE 28 – Photo des deux plaques de Celuka assemblées en T

Une fois assemblées, les plaques sont fixées dans la cuve par de la colle PVC (Figure 29), la barre inférieure du T, plaquée contre l'arrière de la cuve, séparant la cuve en deux dans le sens de la longueur. Les jointures sont ensuite étanchéifiées par du joint silicone (Figure 29).



FIGURE 29 – Photos de l'opération d'application de la colle (à gauche) et du joint silicone (à droite)



FIGURE 30 – Photo de la KHI Box une fois assemblée

L'opération terminée, on obtient la KHI Box avec son architecture en T (Figure 30). Un protocole complet pour l'usinage et l'assemblage de la KHI Box est présenté en Annexe J. L'en-

semble pèse 18 *kg*, le cahier des charges n'est donc pas respecté sur ce critère car une valeur maximale de 10 *kg* avait été fixée en début de projet. Mais avec du recul, ce critère est sévère. Il reste possible de la déplacer seul ; 18 *kg* est donc un poids acceptable.

3.3 La préparation des manipulations

3.3.1 Le remplissage de la strate inférieure

Pour remplir la KHI Box, il faut d'abord ajouter le fluide le plus dense pour former la première strate. Ce remplissage se fait à partir d'eau du robinet pour atteindre la hauteur désirée, puis de la saumure est ajoutée ; sa densité est un peu supérieure à 1,2, il suffit donc d'en ajouter de petites quantités afin d'obtenir la densité voulue. Lors de cette première partie, il est nécessaire de maîtriser à la fois la hauteur h_1 et la densité d de la couche de fluide. La hauteur est contrôlée lors du remplissage grâce à une règle graduée jusqu'au demi-millimètre. La règle est placée sur la paroi extérieure de la cuve. Il faut donc prendre garde à soustraire l'épaisseur du fond de la cuve à la hauteur mesurée, afin d'atteindre la véritable hauteur de fluide. L'erreur commise sur la mesure de la hauteur est essentiellement une erreur de lecture, soit $\Delta h \simeq \pm 1 \text{ mm}$. La densité quant à elle, est contrôlée grâce à un densimètre (Figure 31). Cet appareil, dont le fonctionnement est décrit en Annexe D, est très simple d'utilisation et permet d'obtenir de façon rapide et efficace la valeur de la densité du fluide considéré à tout moment. La précision d'affichage du densimètre électronique utilisé est de 10^{-4} .



FIGURE 31 – Photo du densimètre utilisé pour les expériences

La plus grande difficulté lors du remplissage de la première strate de fluide est d'atteindre la densité souhaitée, et ceci pour deux raisons. D'une part, la salinité de la saumure est très grande, donc de toutes petites quantités ajoutées dans l'eau du robinet génèrent une augmentation de densité notable ; dépasser la valeur de densité souhaitée par inadvertance n'est donc rare. D'autre part, la salinité ne s'homogénéise que très lentement par diffusion. Afin de relever la même valeur de densité partout dans la couche de fluide, il faut donc attendre longtemps, ou bien générer de la convection : l'utilisation d'une pompe peut alors s'avérer très utile. Cependant, même en prenant soin d'agiter le fluide, des écarts de densité entre les deux réservoirs sont presque toujours observables. Pour mesurer la densité globale du mélange, il faut donc faire en sorte que ce différentiel de densité atteigne un niveau assez faible, inférieur à 10^{-3} , et la valeur retenue est alors la moyenne des densités mesurées dans les deux réservoirs. L'erreur commise sur la mesure est alors principalement due au problème d'homogénéisation, et est de $\Delta d \simeq \pm 5.10^{-4}$.

3.3.2 Le remplissage de la strate supérieure

Le remplissage de la couche supérieure soulève de nombreuses difficultés. En effet, l'eau du robinet et l'eau salée sont très miscibles, même pour des concentrations assez élevées en sel. Or pour obtenir des KHI, il faut une interface la plus nette possible, et donc un mélange minimal lors du remplissage.

Afin de former cette seconde couche, une mousse alvéolée est mise en place dans chaque réservoir. Celle-ci flotte et reçoit un débit d'eau par un tuyau de faible section. La mousse absorbe l'eau jusqu'à en être saturée, ce qui assure une répartition du fluide sur la surface de la mousse. L'eau commence ensuite à traverser la mousse, mais sa vitesse débitante est alors très faible et ne génère donc pas de mélange. En effet, avec une section du tuyau de l'ordre de 2 mm^2 , et une surface de mousse utile d'environ 100 cm^2 , la vitesse débitante est réduite d'un facteur 5 000 grâce à l'utilisation de la mousse.

Toutefois le comportement des mousses peut être imprévisible, et certains types de mousse absorbent parfois très mal l'eau apportée par le tuyau. Ce problème génère des durées de remplissage très importantes, jusqu'à deux heures. Après une série de tests sur des mousses dont les caractéristiques sont présentées dans le tableau en Annexe P, il s'est avéré que la mousse Eco-Line une fois percée avec une aiguille chauffée permet le meilleur remplissage. Avec cette solution, le temps de remplissage est de l'ordre d'une quarantaine de minutes. La Figure 32 montre l'évolution du temps de remplissage au cours du projet, des changements de cuves et de méthodes.

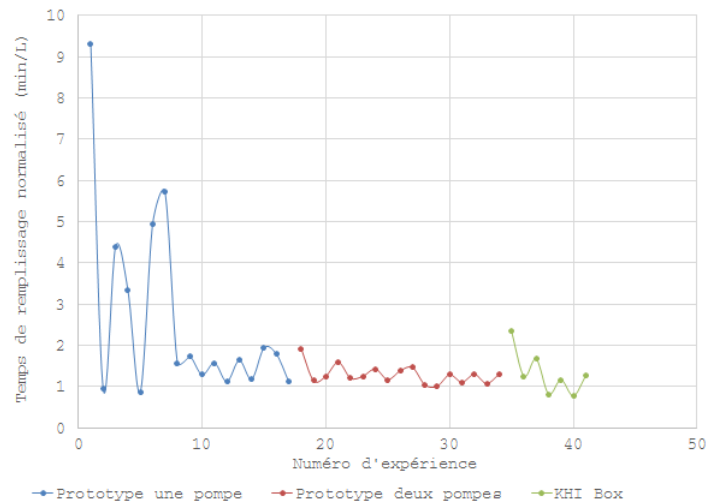


FIGURE 32 – Graphique de l'évolution du temps de remplissage normalisé au cours des expérimentations

Par ailleurs, une nourrice permet de répartir le débit entre les deux réservoirs (Figure 33), afin que ceux-ci se remplissent au même rythme. Ainsi, il n'y a pas d'apparition de pente dans le couloir entre les deux réservoirs au moment du remplissage, et donc pas de mise en mouvement indésirée du fluide qui générerait du mélange avant même le début des expérimentations.

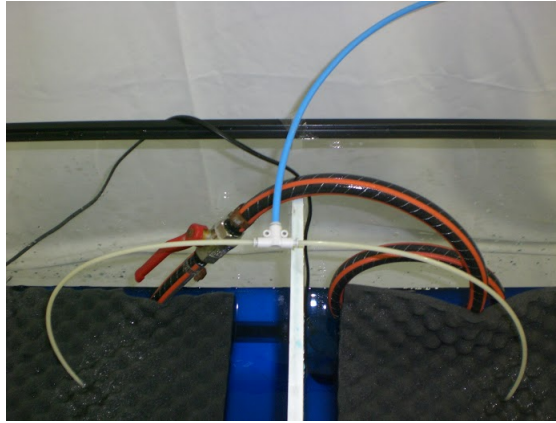


FIGURE 33 – Photo du système mis en place pour le remplissage

3.4 Les différents procédés de mise en mouvement des fluides

3.4.1 Dispositif par déplacement de volumes

Le principe de fonctionnement de cette méthode est de faire varier le volume immergé d'objets placés dans chacune des strates, afin de générer des dépressions ou des surpressions, et de mettre en mouvement le fluide. Avec des variations de volume de l'ordre du litre, les vitesses de cisaillement obtenues sont théoriquement suffisantes pour générer une vitesse de cisaillement critique et permettre l'apparition des KHI. En effet, en retirant un volume V en l'espace d'une durée Δt , la vitesse U générée dans un couloir de largeur δ , pour une hauteur d'eau h , est donnée par la relation :

$$U = \frac{V}{\Delta t \delta h} \quad (29)$$

Donc pour des valeurs $V = 1 \text{ L}$, $\Delta t = 3 \text{ s}$, $\delta = 2 \text{ cm}$ et $h = 10 \text{ cm}$, la vitesse atteinte par le fluide est de $U = 0,167 \text{ m.s}^{-1}$. Or avec l'équation (23) établie en Partie 2.1.4, avec une densité $d = 1,02$, pour obtenir des KHI dont la longueur d'onde est de $\lambda = 4 \text{ cm}$, la vitesse critique à atteindre est de $U_{critique} = 0,025 \text{ m.s}^{-1}$. On remplit donc bien le critère mathématique :

$$U > U_{critique} \quad (30)$$

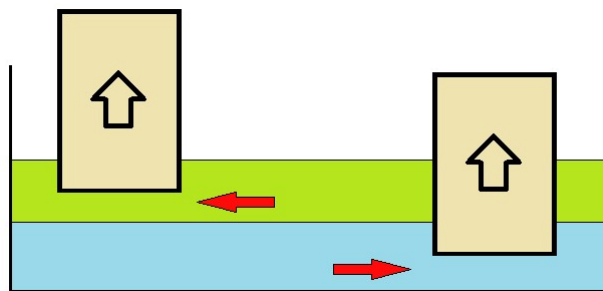


FIGURE 34 – Schéma de la mise en mouvement des fluides par utilisation de volumes

Pour réaliser cette méthode de façon pratique, deux objets de volume suffisamment grand sont soulevés simultanément, comme le montre la Figure 34. Dans le cadre du KHI Project, ce sont des bidons de 25 L qui sont utilisés; outre leur volume important, ceux-ci présentent l'avantage d'être très courants dans les laboratoires et les lycées, ce qui est un point positif pour permettre la reproduction du dispositif.

Cette méthode permet l'obtention de KHI (Figure 35), mais mobilise deux personnes pour fonctionner. De plus, il est difficile de repositionner les objets une fois qu'ils ont été retirés, pour pouvoir réitérer l'expérience. Le principal problème avec cette méthode réside en effet dans les dégâts souvent occasionnés au niveau l'interface lorsque le mouvement est mal contrôlé, et que l'objet traverse l'interface.

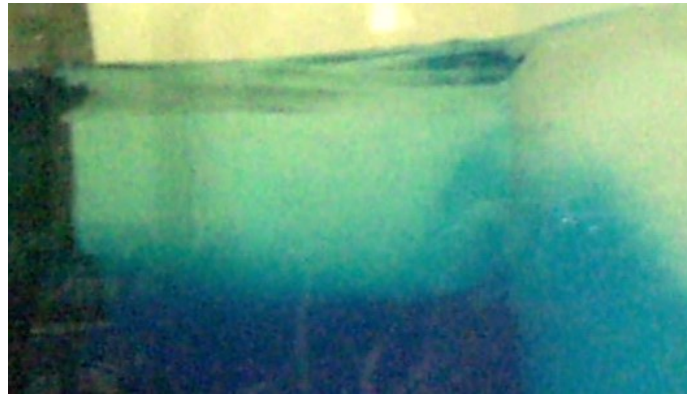


FIGURE 35 – Photo d'une KHI obtenue grâce au système par déplacement de volumes

Pour mieux contrôler le dispositif, il faudrait mettre en place un système mécanique permettant de régler le mouvement, et ainsi réduire le mélange occasionné. Plusieurs pistes sont envisageables : on peut par exemple recourir à un support élévateur, ou bien adapter un système poulie-manivelle.

3.4.2 Dispositif à une pompe, par génération d'une pente



FIGURE 36 – Photo du dispositif à une pompe, avec tuyau et vanne

Avec ce système, seule la couche inférieure du fluide stratifié est mise en mouvement, et ceci en pompant le fluide dense d'un des réservoirs et en le transférant dans l'autre. Le tuyau reliant les deux réservoirs est muni d'une vanne (Figure 36) qui permet d'augmenter le débit de sortie

progressivement et éviter le mélange qui peut survenir lors de l'allumage de la pompe. Celle-ci a en effet un débit de sortie maximal de $1350 L.h^{-1}$, ce qui est important au regard de la taille de la KHI Box, qui n'a qu'un volume d'environ $70 L$. Le mélange entre les deux strates peut devenir important en quelques secondes, si aucune précaution n'est prise.

Lorsque la pompe est mise en marche, la strate inférieure est mise en mouvement. On observe alors une phase de régime transitoire, durant lequel la différence de charge au sein du fluide conduit à l'apparition d'une pente (Figure 37).

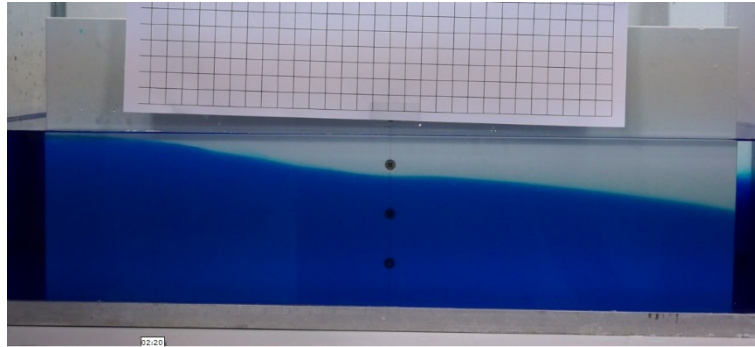


FIGURE 37 – Photo d'une pente nette, avant apparition de KHI

Le régime stationnaire est atteint lorsque l'avancée de la pente s'arrête et se stabilise. Dans le couloir de la KHI Box, la strate inférieure de fluide a alors une vitesse U_1 . En revanche, la strate supérieure a *a priori* une vitesse sinon nulle, du moins assez faible. Cette vitesse ne pouvant pas être évaluée précisément, elle sera supposée nulle pour la vérification de la condition mathématique d'apparition des instabilités. Avec un débit volumique de la pompe Q , pour une hauteur h_1 moyenne de la strate inférieure, la vitesse U_1 dans le couloir d'une largeur δ s'exprime :

$$U_1 = \frac{Q}{\delta h_1} \quad (31)$$

Donc en prenant $Q = Q_{max} = 1350 L.h^{-1}$, et avec $\delta = 2 cm$ et $h_1 = 10 cm$, la valeur numérique de la vitesse dans la strate inférieure est de $U_1 = 0,188 m.s^{-1}$. Or, toujours avec une densité d'eau salée $d = 1,02$, pour faire apparaître des KHI de longueur d'onde $\lambda = 4 cm$, la valeur de la vitesse critique est de $U_{critique} = 0,025 m.s^{-1}$. Par conséquent, le différentiel de vitesse atteint entre les deux couches de fluide est suffisant, puisque la vitesse U_1 vérifie :

$$U_1 > 2U_{critique} \quad (32)$$

Le calcul théorique, avec quelques simplifications, prédit donc que le dispositif à une pompe fonctionne ; et en pratique des instabilités de Kelvin-Helmholtz apparaissent en effet de façon continue une fois le régime permanent établi (Figure 38).

Par rapport au dispositif précédent, cette méthode présente l'avantage de permettre le maintien du phénomène dans le temps pendant plusieurs minutes, ce qui est un point très positif pour une démonstration du phénomène à un public de non spécialistes. En effet, avec cette méthode, les KHI peuvent être présentées au public environ une dizaine de minutes. En revanche, il se produit un mélange relativement important lors de l'écoulement, notamment dans le réservoir d'arrivée du tuyau. Toutefois si l'on interrompt la pompe, que l'on laisse le fluide revenir à un nouvel équilibre, puis que l'on déclenche à nouveau le système, il est possible d'observer les KHI une seconde, voire une troisième fois.



FIGURE 38 – Photo de KHI obtenues avec le dispositif à une pompe

3.4.3 Dispositif à deux pompes, par excitation des modes propres de l'interface

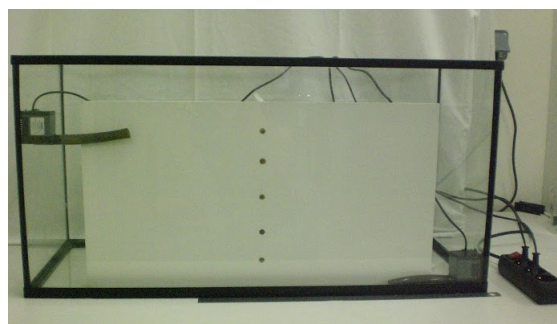


FIGURE 39 – Photo du dispositif à deux pompes

Cette méthode de mise en mouvement des fluides nécessite deux pompes. Celles-ci sont placées dans la cuve de façon à ce que l'une soit située à l'entrée droite du couloir dans la strate inférieure et la seconde à l'entrée gauche dans la strate supérieure (Figure 39). Ainsi au moment du démarrage des pompes, les deux strates sont mises en mouvement dans des directions opposées. En admettant qu'il n'y ait pas de phénomène de retour, chacun des réservoirs se remplirait alors complètement avec l'eau de l'une des deux phases.

Toutefois, deux phénomènes peuvent être à l'origine d'un retour des fluides. Le premier est le différentiel de densité, qui implique que la position d'équilibre de l'interface est la position horizontale, et pousse donc les fluides à revenir vers cet état d'origine. Le second phénomène est lié à la géométrie de la cuve. Etant rectangulaire, en bout de course les fluides viennent frapper perpendiculairement les parois latérales de la cuve, lorsqu'ils circulent dans le couloir avec une vitesse importante. Il se produit alors un rebond, comme pour un objet solide qui heurte un mur, et le fluide peut avoir tendance à repartir dans le couloir en sens opposé.

Un retour est effectivement observable, mais aucun indice ne permet de savoir lequel des deux mécanismes présentés ci-dessus est prépondérant pour ce phénomène. Pour empêcher le mélange, les pompes sont utilisées par intermittence : elles sont éteintes quelques instants pour que puisse se produire le phénomène de retour, puis elles sont rallumées, et ainsi de suite. Ce procédé provoque l'apparition d'une onde interne à l'interface entre les fluides : celle-ci est excitée de façon analogue à ce que l'on peut observer avec un dispositif de corde vibrante (Annexe F). En allumant et éteignant les pompes au rythme de la pulsation propre, l'onde interne à l'interface

devient une onde stationnaire avec une période spatiale correspondant à la longueur de la cuve (Figure 40).

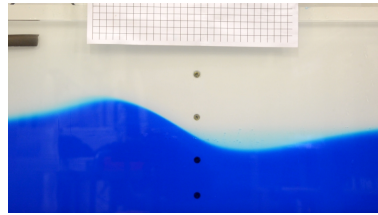


FIGURE 40 – Photo d’une onde interne obtenue avec le dispositif à deux pompes

Lorsque la période de commutation imposée pour l’allumage des pompes est correcte, les fluides sont mis en mouvement, mais avec un comportement bien plus complexe que pour le procédé précédent (aucun régime stationnaire n’est atteint); il y a alors génération périodique d’un différentiel de vitesse important à l’interface des deux strates. Ici, la vérification de la possibilité théorique de générer des KHI est difficile car le champ de vitesse dans le fluide est manifestement complexe. Cependant, un ordre de grandeur de la vitesse du fluide U dans une strate peut être estimé, en utilisant encore la relation :

$$U = \frac{Q}{\delta h} \quad (33)$$

Avec $Q = Q_{max} = 350 \text{ L.h}^{-1}$, $\delta = 2 \text{ cm}$ et $h = 10 \text{ cm}$, la valeur numérique obtenue est de $U = 0,049 \text{ m.s}^{-1}$. Là encore, pour une densité de $d = 1,02$ et des KHI de longueur d’onde $\lambda = 4 \text{ cm}$, $U_{critique} = 0,025 \text{ m.s}^{-1}$, et donc le critère mathématique établi en Partie 2.1.4 est bien vérifié :

$$U > U_{critique} \quad (34)$$

L’écart entre U et $U_{critique}$ est toutefois faible, et des approximations importantes sont réalisées dans ce calcul. Cependant en pratique, des KHI apparaissent effectivement (Figure 41).

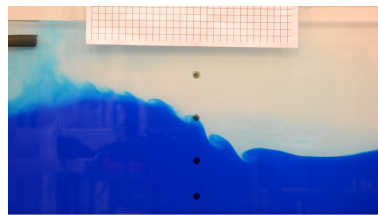


FIGURE 41 – Photo de KHI obtenues avec le dispositif à deux pompes

L’avantage principal de ce dispositif est qu’il permet de maintenir le phénomène d’instabilités dans le temps. En effet, lorsque la période de commutation de l’interrupteur est bien maîtrisée, on obtient très peu de mélange. Ce procédé ouvre en outre de nouvelles perspectives, car il fait intervenir un phénomène d’onde interne très intéressant, qui peut également être mis en évidence et commenté lors d’une démonstration au grand public. Mais l’inconvénient de ce système est qu’il doit être contrôlé manuellement; la personne qui s’occupe de la commutation des pompes doit estimer à chaque fois le moment propice pour allumer et éteindre les pompes, ce qui réclame

un peu d'entraînement. Idéalement, il faudrait automatiser ce procédé afin qu'il soit utilisable par le plus grand nombre.

3.4.4 Quelles sont les solutions les plus pertinentes au regard du cahier des charges ?

	Système par déplacement de volumes	Système à une pompe	Système à deux pompes
Présence de KHI	Oui	Oui	Oui
Mode d'apparition	Ponctuel	Continu	Périodique
Nb de personnes mobilisées	2	Aucune	1
Matériel	Deux objets rigides	1 pompe de 1350 L.h^{-1}	2 pompes de 350 L.h^{-1}

TABLE 2 – Récapitulatif des différentes méthodes de mise en mouvement envisagées

Concernant le système de mise en mouvement des fluides, le cahier des charges impose tout d'abord au système d'être facilement transportable, rapide et facile à mettre en place dans la KHI Box, et il doit évidemment permettre la génération d'instabilités de Kelvin-Helmholtz. Tous les systèmes présentés vérifient cet aspect du cahier des charges.

Néanmoins, le cahier des charges indique également que la KHI Box dans son ensemble doit être adaptée pour des démonstrations au grand public. Notamment, les KHI créées doivent être d'amplitude suffisante, doivent pouvoir être visibles sur une durée assez longue, et le nombre de répétitions possibles de la manipulation doit être le plus important possible. L'amplitude des instabilités ne pose pas vraiment problème. En revanche, le dispositif par déplacement de volumes ne crée des KHI que de façon ponctuelle dans le temps, et détruit très rapidement l'interface, ce qui réduit drastiquement le nombre d'expériences qu'il est possible d'effectuer. Créer un système mécanique pourrait permettre de palier à cet inconvénient ; toutefois ce n'est pas le choix qui a été fait, car la conception et l'achat (ou la fabrication) d'un tel système aurait demandé plus de temps et d'argent que de simplement exploiter les dispositifs de mise en mouvement reposant sur des pompes.

Le système à deux pompes et celui à une pompe semblent pour leur part répondre d'emblée au cahier des charges, après de premières expérimentations. Le système à deux pompes permet un nombre d'occurrences d'expériences plus grand que celui à une pompe, mais ce dernier présente l'avantage de créer des KHI de façon continue, et fonctionne sans contrôle manuel, contrairement au système à deux pompes qui impose que quelqu'un assure la commutation des pompes. Ces deux systèmes sont conservés, et des tests systématiques sont menés pour pouvoir analyser l'influence des différents paramètres expérimentaux sur l'apparition des KHI.

4 Caractérisation du dispositif à une pompe

4.1 Influence des différents paramètres

4.1.1 Démarche expérimentale

Cette partie a pour objectif de dégager la meilleure configuration possible pour obtenir des instabilités conformes à notre cahier des charges avec le dispositif à une pompe. Les tests effectués sont l'occasion de faire varier la densité de la strate du bas, la hauteur de chacune des strates et la largeur du couloir. Chaque expérience reçoit une note comprise entre 0 et 3. Un 0 signifie qu'aucune instabilité n'apparaît. Un 1 signifie que des KHI sont observables mais qu'elles ne vérifient presque en aucun point le cahier des charges et/ou qu'elles apparaissent trop rarement. Un 2 signifie que les KHI observées sont de longueur d'onde acceptable, ou bien suffisamment nettes, mais pas les deux à la fois. Enfin, un 3 indique que les instabilités vérifient le cahier des charges en tout point. Notons enfin que des longueurs d'onde élevées signifient que les KHI sont espacées entre elles. En général, cet espacement améliore grandement la visibilité, notamment car les KHI qui dégénèrent perturbent moins celles qui n'ont pas encore dégénéré. Ainsi, chercher à obtenir la plus grande longueur d'onde possible est l'un des objectifs de ces tests.

Rappelons que deux paramètres sont primordiaux pour l'apparition des KHI comme cela a été vu en Partie 2.1.5 : la vitesse du fluide, et la densité de la strate du bas. La vitesse du fluide est directement liée au débit délivré par les pompes et à la section du couloir. L'influence de la densité de la strate du bas puis de la section du couloir seront donc discutées dans cet ordre. Enfin, une étude de l'influence du rapport des hauteurs des strates sera faite. Ce paramètre n'est pas déterminant pour l'apparition des KHI mais est important car le cahier des charges prend en compte l'aspect visuel du phénomène étudié (netteté, notamment). Dans chacun de ces paragraphes, il sera d'abord discuté brièvement de l'influence d'un paramètre à partir de l'ensemble des expériences réalisées. Certains résultats seront alors ensuite mis en avant afin d'étudier plus précisément l'influence de cet unique paramètre.

Il ne faut pas oublier que les expérimentations comportent toujours une part de hasard, due à des paramètres secondaires que l'on ne peut pas contrôler, et il est fréquent que produire deux fois la même expérience mènent à des résultats différents ; cela peut rendre difficile l'interprétation de certains résultats.

4.1.2 La densité de la strate du bas

Comme cela a été vu dans la partie théorique, la densité est le paramètre intervenant dans la condition mathématique d'apparition des KHI (Equation (23), Partie 2.1.4) dont l'influence est la plus difficile à déterminer. Il est cependant possible de la prédire de façon intuitive. Une densité proche de 1 permet d'obtenir théoriquement de grandes KHI, néanmoins la miscibilité des deux fluides est alors trop élevée : à la moindre perturbation à l'interface, le mélange est conséquent. Il ne faut pas oublier que la répétabilité des instabilités est un critère du cahier des charges. Une densité minimale est donc fixée à 1,01. Mais il a pu être constaté que même pour des densités de 1,01, les mélanges sont toujours assez importants.

A l'inverse, pour des densités trop grandes, les fluides ne sont alors pas assez miscibles, et l'interface est plus difficile à perturber. Pour de petites perturbations, l'interface se déforme sans qu'il y ait véritablement de mélange : il n'y a donc pas d'instabilité. Il est aussi plus difficile d'obtenir de grandes longueurs d'onde avec une densité élevée. Ainsi, une densité maximale est fixée à 1,025 après quelques tests préliminaires. La quasi-totalité des tests ont ainsi été effectués avec des densités comprises entre 1,01 et 1,025.

Tout d'abord, observons la Figure 42 représentant la longueur d'onde moyenne observée en fonction de la densité, chaque point correspondant à une expérience.

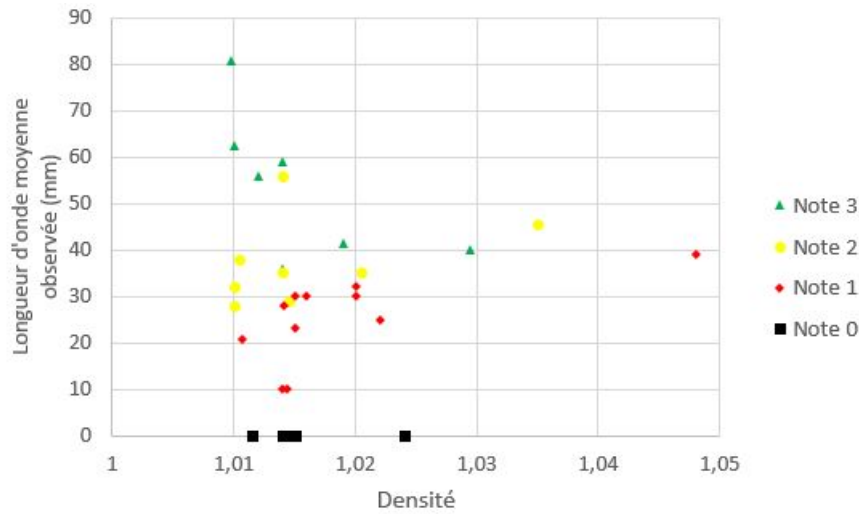


FIGURE 42 – Graphe de la longueur d'onde des KHI en fonction de la densité, pour le système à une pompe

Globalement, les plus hautes longueurs d'onde relevées sont pour les expériences ayant une densité proche de 1,01. Des résultats satisfaisants le cahier des charges ont aussi été obtenus pour des densités d'environ 1,02. Néanmoins, de très nombreux essais dans cette gamme de densité ont abouti à des résultats beaucoup moins convaincants. Cela est dû au fait que les autres paramètres (hauteurs des deux strates et largeur du couloir) n'étaient pas fixes. Afin de compléter cette première analyse, certains résultats vont donc être mis en avant dans la Table 3 ci-dessous.

Date	11/02/15 (2)	17/12/14	27/05/15 (1)	27/05/15 (2)	27/05/15 (3)	29/04/15	13/05/15 (1)
Rapport h_1/h_2	1,804	1,841	2,021	2	1,958	1,383	1,383
Section du couloir (mm ²)	2580	2500	2840	2820	2840	4290	4290
Longueur d'onde (mm)	80,6	45,5	36	38	32	28	30
Note	3	2	3	3	1	2	1

TABLE 3 – Séries de données permettant de discuter de l'influence de la densité sur les KHI

Trois comparaisons de différents résultats où seule la densité change entre chaque essai sont effectuées. La première série compare des expériences aux densités très différentes. On constate ici que pour deux expériences particulièrement satisfaisante, celle à la densité la plus élevée offre des longueurs d'onde presque deux fois plus grandes que l'autre essai. La deuxième série indique qu'il est possible d'obtenir des longueurs d'onde équivalentes pour des densités comprises en 1,01 et 1,02. Néanmoins le cahier des charges n'était pas vérifié dans celle à 1,0201, comme l'atteste la note de 1. Enfin la troisième série confirme une nouvelle fois que ce qui différencie les densités

de 1,01 des densités de 1,015 est davantage la visibilité des KHI que leur taille, les notes étant de 1 et de 2 avec des longueurs d'onde presque égales.

De manière générale, plus la densité est faible plus la note est élevée. Cependant, se placer à une densité d'environ 1,014 ou 1,02 peut être aussi satisfaisant. Pour les tests traitant de la somme et du rapport des hauteurs, il a été décidé de fixer la densité à 1,014. Cette décision résulte d'un compromis entre la visibilité des KHI et la vitesse du mélange. Cette densité est aussi celle adoptée pour le protocole final.

4.1.3 La section du couloir

Comme cela a été brièvement expliqué dans l'introduction de la partie, les trois paramètres que sont la hauteur h_1 , la hauteur h_2 et la largeur du couloir δ peuvent être synthétisés dans l'étude d'un seul paramètre, la section du couloir. En effet, la section du couloir est le produit entre la largeur du couloir et la somme des hauteurs (Equation (35)). Elle peut être reliée à la vitesse du fluide en entrée du couloir. Or cette vitesse est déterminante quant à l'existence ou non d'instabilités. Une réflexion sur la section permet alors de regrouper les résultats obtenus sur des couloirs de 20 mm et 30 mm.

$$S = \delta(h_1 + h_2) \quad (35)$$

La section est essentielle car elle détermine la vitesse de la strate d'eau salée. En effet, le débit de la pompe est de 600 L/h et demeure fixé. Il faut donc que la surface d'entrée dans le couloir ne soit pas trop grande pour espérer avoir une vitesse acceptable. Une somme des hauteurs faible est très intéressante car elle permet d'avoir une grande vitesse dans le couloir et donc une situation favorable à l'apparition des KHI. Néanmoins, une somme des hauteurs trop faible rend les instabilités trop petites pour vérifier notre cahier des charges. Ainsi, une somme des hauteurs minimale est fixée à 100 mm. Ce choix a été fait car des hauteurs vérifiant cette somme ne permettraient pas d'avoir des KHI respectant le cahier des charges en termes de visibilité. Les tests ayant été réalisés avec des couloirs de largeur 20 mm et 30 mm, la section est donc au minimum de 2000 mm².

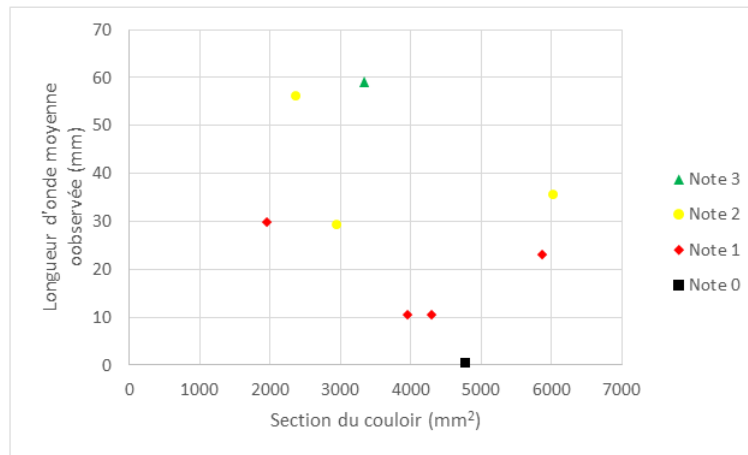


FIGURE 43 – Graphe de la longueur d'onde moyenne observée en fonction de la section à densité fixée à $1,0145 \pm 0,005$

La Figure 43 ci-dessus représente la longueur d'onde moyenne mesurée en fonction de la section pour les quatorze essais à une densité de $1,0145 \pm 0,005$. Il semble exister une section maximale au-delà de laquelle il est peu probable que des KHI respectant le cahier des charges apparaissent. Précisons encore plus l'étude en fixant aussi le rapport des hauteurs à $1,68 \pm 0,02^4$.

Les résultats présentés par la Figure 44 confirment bien qu'une section plus faible semble être plus propice à l'apparition de KHI. Une section relativement grande n'empêche pas la formation d'instabilités, toutefois pour une section de plus de 4000 mm^2 , il est peu vraisemblable d'obtenir des instabilités qui respectent le cahier des charges.

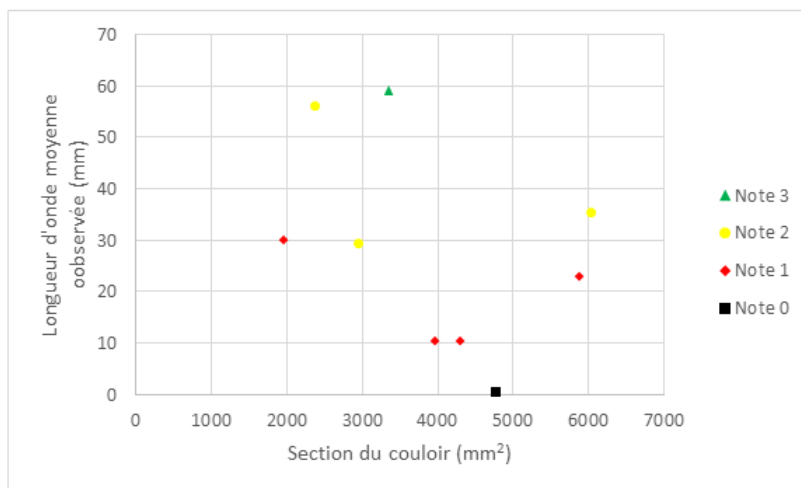


FIGURE 44 – Graphe de la longueur d'onde moyenne observée en fonction de la section à densité et rapport des hauteurs fixés respectivement à $1,0145 \pm 0,005$ et $1,68 \pm 0,02$

Par ailleurs, des tests sont réalisés avec une largeur de couloir de 20 mm ou 30 mm . L'intérêt du 20 mm est le gain en vitesse, celui du 30 mm est un possible gain en visibilité ; en effet la plus grande largeur du couloir implique un rendu plus sombre du fluide coloré, et donc éventuellement une meilleure visibilité de l'interface. Néanmoins, aucune amélioration de la netteté des KHI n'est relevée avec un couloir de 30 mm , le couloir de 20 mm est donc à privilégier pour les expérimentations à une pompe. Ceci permet de remplir la KHI Box avec une plus grande hauteur totale sans dépasser la section maximale.

Ainsi, la section doit être comprise entre 2000 mm^2 et 4000 mm^2 , et la largeur δ du couloir est choisie égale à 20 mm , la somme des hauteurs doit donc être comprises entre 100 mm et 200 mm d'après la relation :

$$h_1 + h_2 = \frac{S}{e} \quad (36)$$

En sélectionnant les expériences présentées dans la Figure 44 ayant la bonne largeur de couloir et une section comprise dans l'intervalle sélectionné précédemment, le tracé de la longueur d'onde en fonction de la somme des hauteurs permet de vérifier la validité du critère établi par le calcul pour la somme des hauteurs. Malgré le faible nombre de points, la Figure 45 confirme en effet qu'une somme des hauteurs inférieure à 200 mm donne de bien meilleures KHI. Les deux meilleurs résultats sont obtenus pour une somme des hauteurs comprises entre 120 mm et 160 mm .

4. Ce choix de rapport sera justifié dans la sous-partie suivante

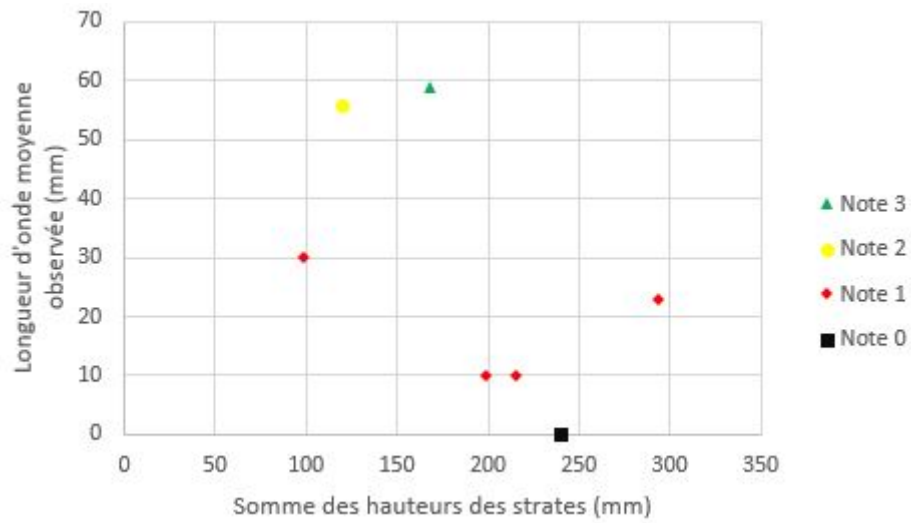


FIGURE 45 – Graphe de la longueur d'onde moyenne observée en fonction de la somme des hauteurs des strates à largeur du couloir et densité fixées respectivement à 20 mm et 1,0145 ± 0,005

4.1.4 Le rapport des hauteurs

Le rapport des hauteurs est un paramètre moins important car ce terme n'apparaît pas dans la condition d'existence des instabilités de Kelvin-Helmholtz. Cela se ressent dans le fait qu'il a été possible de faire apparaître des KHI pour des rapports allant de 1 à plus de 3. Néanmoins, ce paramètre a une grande importance pour la netteté et la visibilité des KHI. Il convient donc aussi de déterminer le meilleur rapport possible, ou du moins son ordre de grandeur. Calculons les rapports minimum et maximum en se plaçant aux limites des cas permettant de satisfaire le cahier des charges.

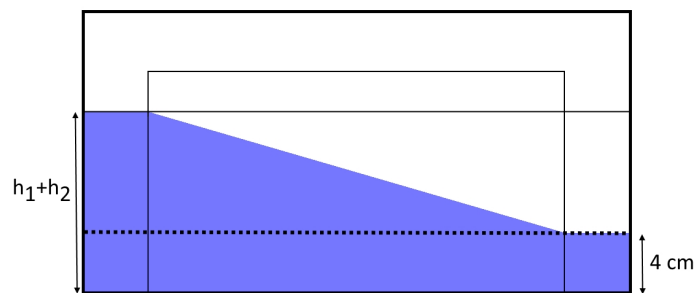


FIGURE 46 – Schema de la situation des différentes strates en régime permanent dans le cas parfait où le rapport est minimal.

On suppose d'abord que la pente s'est établie sur toute la longueur du couloir. La hauteur d'eau salée dans le réservoir de droite est fixée à 4 cm pour le régime stationnaire ; il s'agit de la hauteur minimale acceptable pour que la pompe absorbe uniquement du fluide salé. Sur la Figure

46, il y a le même volume d'eau douce et d'eau salée dans la partie au-dessus des pointillés. En effet, les réservoirs sont de mêmes tailles et totalement symétriques. Il suffit donc juste d'avoir 4 cm de hauteur d'eau salée de plus pour pouvoir se placer dans cette situation.

Ainsi, il est établi qu'idéalement la relation à vérifier est :

$$h_1 + h_2 = 4\text{cm} \quad (37)$$

Précédemment, il a été déterminé que la somme des hauteurs devait être comprise entre 100 mm et 200 mm. Cela revient donc avec cette nouvelle équation à un rapport de hauteur minimum compris entre 1,5 et 2,3.

Pour le cas maximum, on peut demander qu'il n'y ait qu'une couche de 4 cm d'eau douce dans le réservoir de droite en régime stationnaire. Avec une approximation, cela donne une couche du haut d'environ 2,5 cm, soit un rapport maximum compris entre 3 et 7, en fonction de la hauteur totale choisie.

Ainsi, il est difficile de dire quel serait le meilleur rapport à première vue ; l'analyse peut toutefois être affinée en sélectionnant quelques séries de données pertinentes. Les mesures présentées dans la Table 4 permettent d'analyser l'influence du seul paramètre du rapport entre les hauteurs de fluide. En effet, la densité et la section du couloir sont fixées dans les intervalles qui ont été discutés précédemment. L'influence de la densité et de la section sur la longueur d'onde est bien plus forte que celle du rapport entre les deux hauteurs de fluide, tracer la longueur d'onde en fonction du rapport des hauteurs pour l'ensemble des expérimentations réalisées n'aurait donc aucun sens.

Date	30/04/15 (1)	25/03/15 (3)	27/05/15 (1)	27/05/15 (4)	28/01/15 (2)	27/05/15 (5)
Densité	1,0107	1,01	1,01	1,0145	1,014	1,0142
Rapport h_1/h_2	2,758	1,804	2,021	1,675	1,671	2,026
Section du couloir S (mm ²)	3720	3870	2840	2970	3360	3540
Longueur d'onde λ (mm)	20,8	62,4	33	29	59	28
Note	1	3	3	2	3	1

TABLE 4 – Séries de données permettant de discuter de l'influence du rapport de hauteur sur les KHI

La première série de résultats suggère qu'un rapport de hauteur supérieur à 2,5 (ici 2,758) n'est pas souhaitable. Les deux autres séries de résultats montrent qu'il est très difficile de dire quel est le meilleur rapport. Les deux expériences ont à chaque fois des rapports d'environ 1,67 et 2,02 mais dans le premier cas, les KHI sont de meilleure qualité avec le rapport de 2,02 et c'est l'inverse dans le second cas.

Ainsi, il est très difficile de donner un rapport de hauteur précis. Il a été décidé d'adopter un rapport de hauteur plutôt faible afin de parer au problème de mélange. La grande majorité des essais ont été effectués avec des rapports de hauteur compris entre 1,65 et 2,20. Ces rapports permettent théoriquement l'établissement d'une pente sur une grande partie du couloir sans devoir prendre en compte le mélange à l'allumage. Et en cas de mélange, il restera néanmoins suffisamment d'eau douce pour espérer obtenir des KHI. Il est donc décidé d'adopter comme rapport de référence 1,68 pour les raisons énoncées précédemment.

4.1.5 Paramètres expérimentaux retenus

Ainsi à l'issue de l'analyse de l'influence des paramètres, des valeurs optimales peuvent être retenues pour chacun :

- Débit de la pompe $Q = 600\text{L/h}$;
- Largeur du couloir $\delta = 20\text{ mm}$;
- Densité de la strate du bas $d = 1,014$;
- Somme des hauteur $h_1 + h_2 = 150\text{ mm}$;
- Rapport des hauteur $\frac{h_1}{h_2} = 1,68$;
- Hauteur de la strate du bas $h_1 = 94\text{ mm}$;
- Hauteur de la strate du haut $h_2 = 56\text{ mm}$.

Le protocole définitif (Annexe L) pour faire apparaître des instabilités de Kelvin-Helmholtz dans la KHI Box avec le dispositif à une pompe est écrit sur la base de ces paramètres idéaux.

4.2 Qualification de la méthode

4.2.1 Résultats obtenus avec le protocole idéal

Les deux expériences se rapprochant le plus du cas idéal déterminé dans la partie précédente sont présentées dans la Table 5. Ces deux résultats sont satisfaisants de par leur longueur d'onde. L'un des deux a obtenu la note maximale tandis que le second a reçu un 2. Ainsi même dans un cas proche du protocole optimisé, la visibilité des instabilités peut ne pas être optimale.

Date	28/01/2015 (2)	11/02/2015 (1)
Largeur du couloir (mm)	20	20
Densité	1,014	1,014
Hauteur bas h_1 (mm)	105,3	75
Hauteur haut h_2 (mm)	63	44
$h_1 + h_2$	168,3	119
Rapport h_1/h_2	1,67142857	1,70454545
Section du couloir S (mm ²)	3366	2380
Longueur d'onde δ (mm)	59	55,9
Note	3	2

TABLE 5 – Résultats obtenus dans les conditions les plus proches du protocole optimal pour le dispositif à une pompe

4.2.2 Durée de fonctionnement

Le choix d'une densité égale à 1,014 permet au phénomène d'être répéter davantage, et donc de durer plus longtemps que si la densité avait été de 1,010. Au final, cette méthode permet l'apparition d'instabilités pendant un peu plus de dix minutes, sans interruptions. En revanche, l'allumage et l'extinction de la pompe causent à chaque fois des mélanges importants. Ainsi, il n'est pas possible de réaliser des séquences de démonstration courtes mais nombreuses : actuellement le dispositif ne peut pas supporter plus de trois allumages. La durée de fonctionnement totale la plus longue atteinte avec le protocole idéal est de quinze minutes (réparties en trois séquences de cinq minutes, avec un temps d'attente entre deux séquences de quatre minutes). Pour quantifier la rentabilité du dispositif en terme de temps, il est possible de calculer

le rapport r entre la durée d'observation $\Delta t_{\text{observation}}$ des KHI et la durée d'expérimentation totale (temps de remplissage $\Delta t_{\text{remplissage}}$, temps d'attente $\Delta t_{\text{attente}}$ et temps d'observation) :

$$r = \frac{\Delta t_{\text{observation}}}{\Delta t_{\text{remplissage}} + \Delta t_{\text{attente}} + \Delta t_{\text{observation}}}$$

Finalement, $r_{\text{max}} = 23,8\%$. Par rapport aux performances du dispositif de l'Université de Cambridge, qui atteint $r = 0,46\%$, la KHI Box avec le dispositif à une pompe fait 518 fois mieux.

4.2.3 Taille des KHI

Théoriquement, il est possible obtenir des KHI de très grandes longueurs d'onde; en effet avec les valeurs optimales retenues, en utilisant l'équation (23), il s'avère que la longueur d'onde maximale accessible soit de $\lambda = 181 \text{ mm}$. En pratique, les longueurs d'ondes obtenues sont bien plus faibles, en moyenne $\lambda = 57,5 \text{ mm}$; mais cela reste bien suffisant pour satisfaire le critère du cahier des charges, qui exige $\lambda > 30 \text{ mm}$. Il faut toutefois souligner que le dispositif de l'Université de Cambridge permet l'obtention de KHI dont la longueur d'onde est environ 3 fois supérieure. L'avantage de la méthode à une pompe dans la KHI Box est par ailleurs d'offrir globalement des KHI très nettes et bien distantes les unes des autres. Une fois le régime permanent atteint, les KHI défilent sans aucune intervention humaine, et la longueur d'onde reste globalement constante; ceci offre alors de belles successions d'instabilités. Ainsi, les KHI obtenues sont totalement satisfaisantes vis-à-vis de notre cahier des charges.

4.3 Analyse de la performance du dispositif à une pompe

Il faut tout d'abord rester conscient que les paramètres sont tous liés. L'analyse a été développée dans l'ordre jugé le plus logique (du paramètre ayant le plus d'influence à celui en ayant le moins) mais ce n'est pas parfait. Il n'a pas été possible pour des questions de temps de réaliser des séries de valeurs où un seul des paramètres changeait à chaque fois. Ceci explique entre autre l'incertitude qui entoure le rapport des hauteurs ou la section. Il aurait fallu aussi essayer les différentes configurations au moins deux ou trois fois car il y a sûrement d'autres paramètres en jeu qui expliquent pourquoi certains résultats sont inattendus.

Le dispositif à une pompe tel qu'il a été optimisé ici fournit quoi qu'il en soit de belles performances, et satisfait bien le cahier des charges, tant du point de vue de la durée de fonctionnement qui a été très fortement améliorée par rapport aux anciens dispositifs, que du point de vue de la taille des KHI qui est proche de 6 cm et permet donc une bonne visibilité.

Dans l'objectif de présenter le dispositif au public, la méthode à une pompe n'est néanmoins pas entièrement satisfaisante. Dans les conditions optimales d'usage, elle permet de bien mettre en évidence le phénomène, mais elle ne permet pas un usage répété sans devoir effectuer le remplissage en stratifié à nouveau.

5 Caractérisation du dispositif à deux pompes

5.1 Influence des différents paramètres

5.1.1 Démarche expérimentale

Cette partie a pour but de déterminer les paramètres expérimentaux adéquats pour l'apparition des KHI avec le système à deux pompes. Pour ces séries d'expériences, les hauteurs des deux strates sont toujours prises identiques. En effet, la position des pompes ainsi que leur débit laisse à prévoir une excitation symétrique de la strate du bas et du haut. De ce constat, il est facile de déduire que l'excitation de l'onde interne sera plus aisée si les deux hauteurs de strate sont identiques. De la même manière, il a été décidé que la hauteur totale de fluide lors de ces expériences devrait être maximale. Les débits des pompes permettant de créer des instabilités même lorsque le volume de fluide est important, augmenter la hauteur de fluide permet alors d'augmenter la taille des KHI observables. Ainsi, h_1 et h_2 sont toujours pris égaux à 110 mm ou égaux à 150 mm , selon la cuve dans laquelle l'expérience a lieu. Il faut noter que les tests avec $h_1 + h_2 = 220\text{ mm}$ n'ont été menés qu'avec une largeur de couloir égale à 30 mm et les tests à $h_1 + h_2 = 300\text{ mm}$ avec un couloir de 20 mm . Cela rend plus compliqué l'étude de cette méthode de mise en mouvement, car il n'est pas possible d'isoler l'influence d'un unique paramètre.

Les tests sont donc effectués avec un rapport des hauteurs de strates fixe égal à 1 et permettent d'étudier l'influence de la densité de la strate inférieure ainsi que de la largeur du couloir sur l'apparition des KHI. Chaque expérience reçoit une note comprise entre 0 et 3, cette note étant attribuée grâce aux mêmes critères qu'exposés en Partie 4.1.1.

Cette partie s'attardera sur l'influence de la densité de la strate inférieure sur la qualité des KHI d'une part, et sur l'influence de la largeur du couloir d'autre part. Il sera aussi étudié la période d'excitation de l'onde interne. Maîtriser ce dernier paramètre revient à maîtriser les pentes où sont présents les gradients de vitesse nécessaire à l'apparition des KHI, et c'est donc un paramètre important dans le fonctionnement du dispositif à deux pompes. Les différents choix considérés comme optimum des autres paramètres seront également expliqués, en s'appuyant sur l'étude de plusieurs petites séries de mesures autour de points de fonctionnement particuliers de la KHI Box.

Comme précédemment, il est important de noter que ces expérimentations comporte une part de hasard. Le comportement présenté ici est donc un comportement global et la configuration dite « optimale » n'est bien évidemment pas un gage de réussite d'apparition des KHI mais uniquement la configuration empirique où l'apparition des KHI est la plus probable. Enfin, il faut également remarquer qu'avec ce dispositif, l'hypothèse d'une vitesse uniforme dans chacune des strates n'est plus valable.

5.1.2 Influence de la largeur du couloir et de la somme des hauteurs

Le système à deux pompes est testé avec deux largeurs de couloirs différentes. Les différents essais ne donnent de résultats permettant d'affirmer la supériorité d'une largeur sur l'autre. En effet, chacune des largeurs de couloir a des avantages. Une étude en séparant les deux cas est donc préférable pour ne pas avancer de conclusions erronées.

Le couloir de 3 cm permet l'apparition des KHI pour une somme des hauteurs plus faible que le couloir de 2 cm , et rend le remplissage plus rapide. Le gain de visibilité en revanche est à nouveau assez faible. De plus, un couloir de 3 cm rend le mélange des deux strates plus rapide que son homologue de largeur 2 cm . Il apparaît finalement que le couloir de 2 cm mis en place dans la KHI Box est bien dimensionné pour l'apparition des KHI via le système à deux pompes. En jugeant sur la base des longueurs d'onde mesurées, le problème se complique : la longueur

d'onde moyenne obtenue avec un couloir de 20 mm est de 37,9 et de 38,7 pour un couloir de 30 mm. En outre, les plus hautes longueurs d'onde sont toutes obtenues sur le dispositif avec un couloir de 30 mm. Les longueurs d'onde sont donc un peu plus satisfaisantes avec un couloir de 30 mm de large.

En conclusion, l'influence de la largeur du couloir est difficile à quantifier ici, mais sa variation n'influence que très peu la qualité des KHI, par rapport à l'impact qu'a la densité par exemple. La largeur du couloir de la KHI Box est donc fixée à 2 cm pour adopter la même largeur de couloir que le premier dispositif.

5.1.3 Influence de la densité

Paramètre déterminant pour l'apparition des KHI mais dont l'influence reste très difficile à étudier, la densité de la strate inférieure est importante à maîtriser. La théorie appliquée ici étant en partie identique à ce qui est applicable pour le système à une pompe, les résultats attendus peuvent être estimés *a priori*. Une densité proche de 1 permet d'obtenir théoriquement de grandes KHI mais la miscibilité des deux fluides est alors trop élevée. Cet argument est d'autant plus valable ici que l'excitation de l'onde interne perturbe nécessairement l'interface et crée donc du mélange. La répétabilité du phénomène préconisée par le cahier des charges ne peut donc pas être vérifiée avec des densités trop basses. Expérimentalement, le mélange reste trop important pour des densités allant jusqu'à 1,02.

Une densité trop grande ne permet pas de perturber suffisamment l'interface, condition nécessaire à l'apparition des KHI. Néanmoins, la vitesse obtenue localement à l'interface avec ce système étant généralement plus élevée qu'avec le système à une pompe, la densité de la strate inférieure n'a pas été soumise à une valeur plafond car même une grande densité permet d'observer des KHI de qualité acceptable. Cette étude préliminaire est en grande partie confirmée par l'expérience pour un couloir de 30 mm, comme le montre la Figure 47.

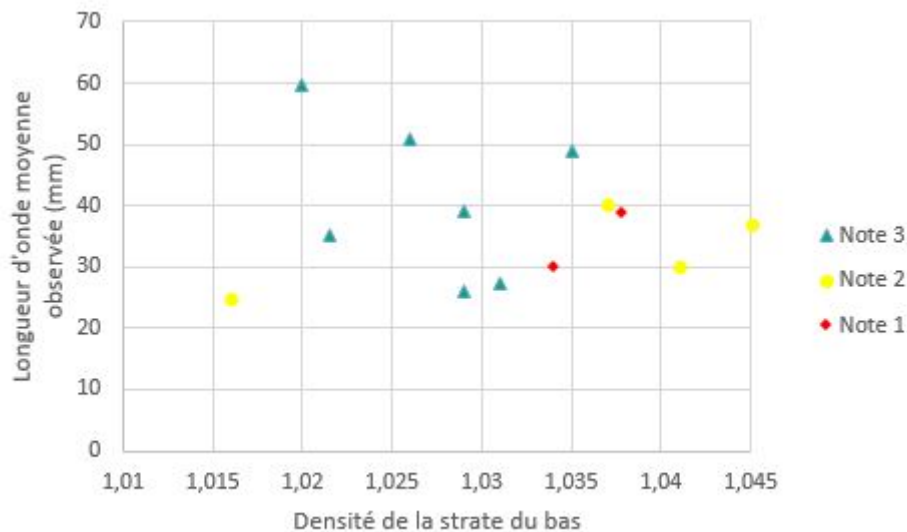


FIGURE 47 – Longueur d'onde des KHI en fonction de la densité de la strate inférieure avec un couloir à 30 mm

Pour des densités faibles et élevées, les résultats sont moins bons. Ainsi, il semble se dégager une plage de densité pour laquelle il est le plus probable d'obtenir des KHI vérifiant notre cahier des charges : [1, 2 ; 1, 32].

Cependant, malgré le faible nombre d'expérience à 20 mm, il est possible de faire quelques conclusions pour cette disposition. La longueur d'onde maximale a été obtenue pour une densité proche de 1,04 (Figure 48). En effet, cette densité relativement élevée s'oppose au phénomène dans le sens où elle régule ce dernier plus qu'elle ne l'empêche. De très grandes ondes internes sans mélange peuvent être obtenues avec des densités proches de 1,04 et les différentiels de vitesses élevés lors de l'extinction des deux pompes permettent l'amorçage du phénomène. Adopter une somme des hauteurs très faible est néanmoins impossible avec ce dispositif car le mélange est trop important lorsque l'onde interne s'établit. Les tests avec un couloir de 20 mm ont tous été fait avec une somme des hauteurs de 300 mm, ce qui permet l'apparition d'onde interne de grandes amplitudes.

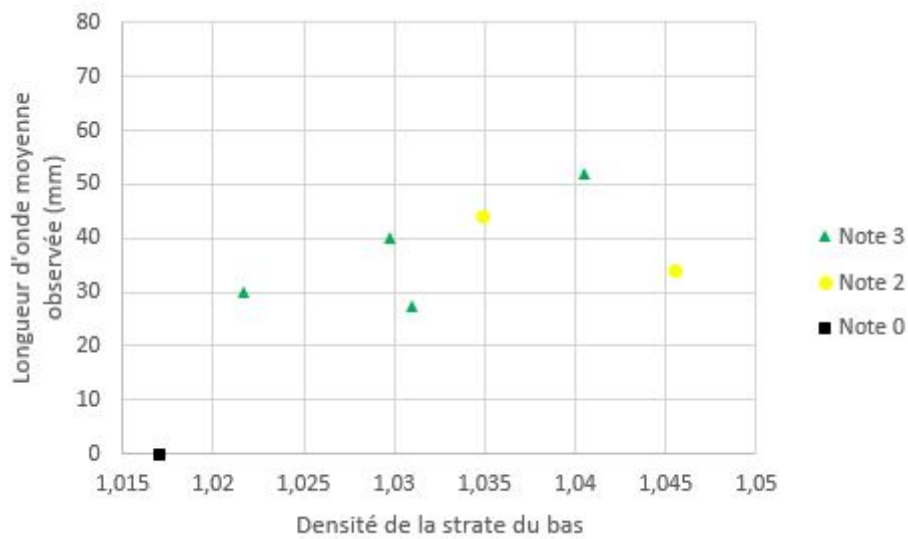


FIGURE 48 – Longueur d'onde des KHI en fonction de la densité de la strate inférieure avec un couloir à 20 mm

Ainsi l'étude de la densité permet de bien comprendre la divergence de résultats entre les deux largeurs de couloirs possibles. D'une part, ces expériences permettent de déterminer une plage de densité adéquate à l'apparition des KHI pour un couloir de 30 mm, à savoir l'intervalle [1, 02 ; 1, 032] avec vraisemblablement un optimum autour de 1,028 pour le 30 mm. D'autre part, la situation où la largeur est de 20 mm (avec une somme des hauteurs des fluides toujours égale à 300 mm), la meilleure densité semble être 1,04.

5.1.4 Puissance des pompes

Les pompes utilisées dans ce dispositif ont été réglées avec un débit nominal de sortie de 116 L/h. En effet, la molette de réglage des débits ne donne accès qu'à des valeurs discrètes de débit pour ces pompes ; or des essais ont montré que la valeur de débit directement inférieure à 116 L/h n'est pas suffisante pour mettre le fluide de la KHI Box en mouvement, tandis que

le débit directement supérieur est trop élevé et occasionne un mélange trop important des deux strates dès la mise en marche du dispositif, ce qui empêche l'apparition de l'onde interne sur laquelle se créent les KHI.

Néanmoins, ces pompes ont la possibilité d'augmenter leur débit jusqu'à 400 L/h. Augmenter la hauteur d'eau dans la cuve serait très intéressant car l'onde interne pourrait gagner en amplitude. En effet, les pompes peuvent entraîner un bien plus grand volume de fluide dans le même intervalle de temps. Or, augmenter la hauteur de fluide permettrait théoriquement d'augmenter la taille des KHI observables. Il serait donc intéressant de créer une KHI Box au moins 3 fois plus haute que l'actuelle, sans rien changer au protocole si ce n'est le débit des pompes, afin d'observer des KHI de taille conséquentes. Ceci présente une piste à approfondir afin de créer des instabilités observables de plus loin ; cependant un tel changement des dimensions de la KHI Box la rendrait moins transportable.

5.1.5 Paramètres expérimentaux retenus

Les essais réalisés permettent de dégager les paramètres optimaux, à partir desquels est rédigé le protocole pour le système à deux pompes (Annexe M). Les paramètres retenus sont les suivants :

- Débit de la pompe $Q = 116 \text{ L/h}$;
- Largeur du couloir $\delta = 20 \text{ mm}$;
- Densité de la strate du bas $d = 1,04$;
- Hauteur de la strate du bas $h_1 = 150 \text{ mm}$;
- Hauteur de la strate du haut $h_2 = 150 \text{ mm}$.

Des paramètres pour un couloir de 30 mm peuvent aussi être proposés, car bien que ce ne soit pas la solution adoptée, il s'agit d'un dispositif performant :

- Débit de la pompe $Q = 116 \text{ L/h}$;
- Largeur du couloir $\delta = 30 \text{ mm}$;
- Densité de la strate du bas $d = 1,028$;
- Hauteur de la strate du bas $h_1 = 110 \text{ mm}$;
- Hauteur de la strate du haut $h_2 = 110 \text{ mm}$.

5.2 Qualification de la méthode

5.2.1 Résultats obtenus avec le protocole idéal

L'expérience se rapprochant le plus du protocole idéal est présentée dans la Table 6. Satisfaisante de par sa longueur d'onde et sa visibilité, ce test est tout à fait présentable au grand public.

5.2.2 Durée de fonctionnement

En fonctionnement continu, le système à deux pompes avec le protocole idéal permet d'observer des KHI pendant près d'une vingtaine de minutes. De plus, contrairement au système à une pompe, l'arrêt et le redémarrage ne pose pas problème : il est donc possible d'augmenter la durée de fonctionnement totale du dispositif de façon importante en l'utilisant par courtes séquences de trois minutes. En une heure, il est possible de réaliser jusqu'à vingt-sept minutes d'observation (réparties en neuf séquences de trois minutes, avec un temps d'attente entre deux séquences de quatre minutes).

Date	21/05/2015 (1)
Largeur du couloir (mm)	20
Densité	1,0405
Hauteur bas h1 (mm)	149
Hauteur haut h2 (mm)	149
h1+h2	298
rapport h1/h2	1
Section S (mm ²)	5960
Longueur d'onde (mm)	52
note sur 3	3

TABLE 6 – Résultat obtenu dans les conditions les plus proches du protocole optimal pour le dispositif à deux pompes

La rentabilité r du dispositif en terme de temps d'observation peut à nouveau être calculé, comme en Partie 4.2.2 : ce système atteint $r_{max} = 27,2\%$. L'ordre de grandeur est le même que pour le dispositif à une pompe, avec une légère amélioration toutefois ; les performances du dispositif à deux pompes sont 592 fois meilleures que celles du dispositif expérimental de l'Université de Cambridge. De plus, permettre de répartir les démonstrations sur une heure ou même plus est sans nul doute la plus grande qualité du dispositif à deux pompes.

5.2.3 Taille des KHI

La longueur d'onde des KHI observées pour le protocole idéal est de $\lambda = 52 \text{ mm}$. La taille des KHI obtenues serait évidemment légèrement différente avec une autre expérimentation réalisée avec les mêmes paramètres, mais il est vraisemblable que la longueur d'onde moyenne serait quoi qu'il en soit supérieur à 50 mm . Le cahier des charge est donc bien vérifié, puisqu'il exige $\lambda > 30 \text{ mm}$.

Par ailleurs, le graphe présenté en Figure 49 présente les longueurs d'ondes obtenues lors de toutes les expériences, en fonction de leur note. Il est à noter que même sur l'ensemble des expériences, la moyenne des longueurs d'ondes est de $\lambda = 38,2 \text{ mm}$, ce qui vérifie encore le cahier des charges, et fait du système à deux pompes un dispositif très fiable et adapté à la génération de KHI de grande taille.

5.2.4 Période d'excitation de l'onde interne

La période d'excitation correspond à la durée moyenne nécessaire pour que le fluide revienne à la même configuration qu'au lancement du chronomètre. Pendant chaque période, les pompes sont allumées puis éteintes. Il est assez intuitif de penser que la période de résonance est imposée par les paramètres d'expérimentations. Ceci est d'ailleurs confirmé par le tracé de la période de commutation en fonction de la densité (Figure 50) : l'ensemble des points semble former une droite, il y a donc une relation linéaire entre densité et période de résonance de l'onde interne.

Lors des expériences, l'objectif est d'exciter le mode 2 de l'onde interne, notamment car c'est le plus simple à exciter manuellement. Les moments de déclenchement des pompes sont visibles et déterminables à l'œil sans grandes difficultés. De plus le mode 2 présente l'avantage de générer un maximum de différence de vitesse au niveau du centre de la KHI Box, ce qui donne un résultat plus visuel que si des KHI apparaissaient à droite et à gauche de la cuve.

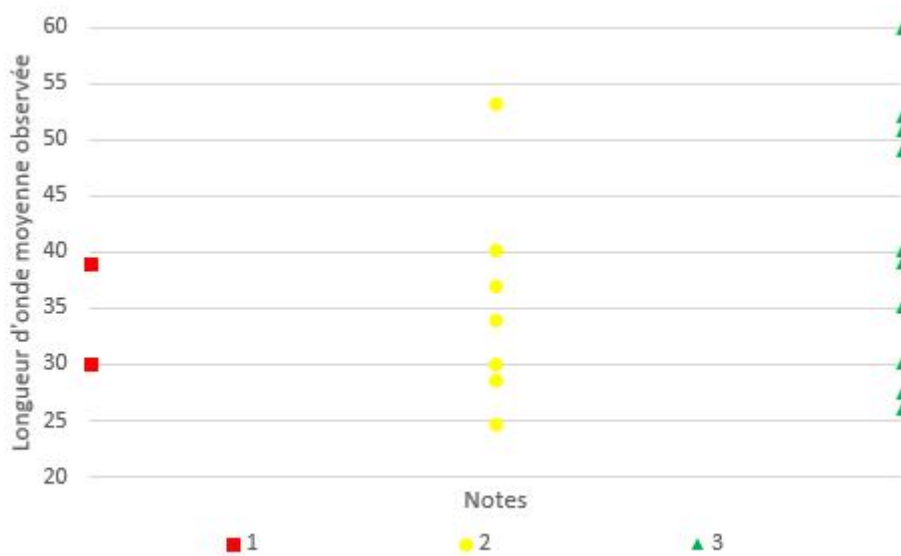


FIGURE 49 – Graphe de la longueur d'onde moyenne observée en fonction de la note obtenue

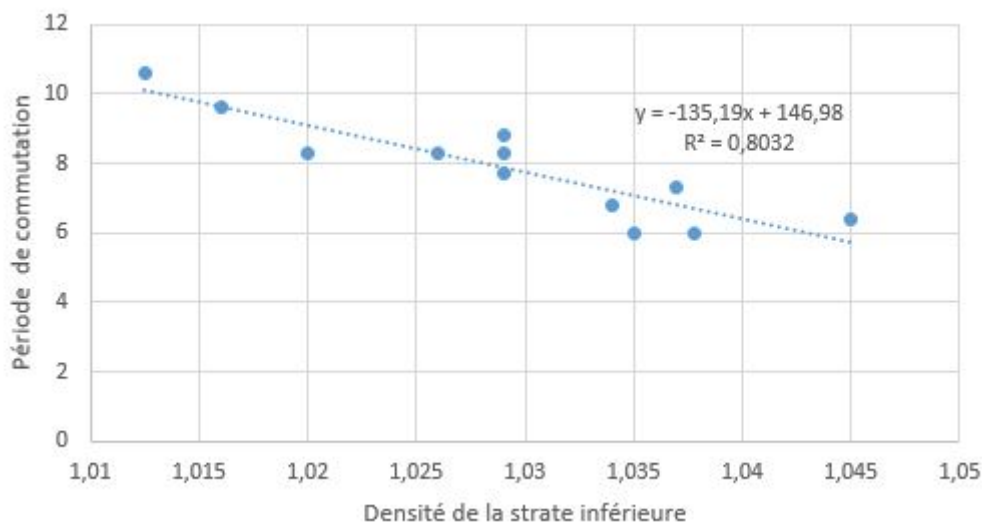


FIGURE 50 – Graphe de la période de commutation en fonction de la densité et de son approximation linéaire

L'excitation de l'onde se fait donc de façon complètement empirique. Il pourrait être intéressant de mener une étude plus poussée de l'influence des différents paramètres expérimentaux sur la période de résonance, afin d'être capable d'évaluer la période de commutation en amont des expériences. C'est une perspective intéressante pour ce système de mise en mouvement des fluides, mais cela reste en dehors du périmètre de travail du KHI Project.

5.3 Analyse de la performance du dispositif à deux pompes

A la vue des expériences réalisées, le système de mise en mouvement des fluides à deux pompes est fiable dans son ensemble. Sur vingt-quatre expériences à deux pompes réalisées en laboratoire, dix vérifient complètement le cahier des charges, huit le vérifient en quasi-totalité, deux ne le vérifient que partiellement, et deux autres ne le vérifient pas. Ces performances sont d'autant plus encourageantes que lors du festival de Saint-Priest, la KHI Box a fonctionné suivant le protocole établi avec les paramètres de la Partie 5.1.5 pendant quatre demi-journées, soit une très bonne durée d'observation, et a produit des KHI vérifiant en tout point le cahier des charges, bien visibles. Un remplissage n'a été nécessaire qu'à l'heure du midi. La configuration optimale du système est extrêmement fiable, et de plus ce système tolère assez bien les écarts au protocole idéal.

Le système à deux pompes n'est cependant pas exempt de défauts. Il faut tout d'abord rester conscient que les paramètres sont tous liés, ce qui rend parfois difficile la détermination des meilleurs paramètres. De plus, les expérimentations comportent une part de hasard qui peut aussi venir enrayer le phénomène de création des KHI de façon inattendue.

Enfin, l'excitation du mode propre reste quelque chose de peu aisé et demande un minimum d'entraînement à l'expérimentateur en amont d'une présentation, afin d'apprendre à reconnaître l'allure de l'onde interne propice à la mise en marche des pompes et à leur arrêt. Ce système ne peut donc être mis dans les mains du grand public sans une formation préalable. Il semblerait cependant que la période de résonance suive une loi linéaire par rapport à la densité ; évaluer une période de commutation approximative avant le début de l'expérimentation permettrait de trouver rapidement la résonance, et de rendre le système à deux pompes plus facile d'accès.

6 Démarche pédagogique

6.1 Travail de communication et identité du projet

La vulgarisation scientifique est l'un des éléments centraux du KHI Project. Or c'est une démarche qui demande la mise en place d'une communication externe efficace, pour remplir un double objectif : d'une part toucher un public, et d'autre part bénéficier d'une certaine crédibilité lors des interactions avec des organismes qui accueillent des événements pour la vulgarisation scientifique (Laboratoire(s) Arts & Sciences, Fête de la Science, etc.), d'où la nécessité de créer une identité propre au projet.

Cette identité se décline en plusieurs aspects. Il y a tout d'abord le nom du projet, le KHI Project, et le nom pour le dispositif expérimental conçu et réalisé par le groupe, la KHI Box. A ces deux noms est associée une charte graphique : le projet a ses couleurs officielles, le bleu sombre R0 V0 B74, et le bleu pâle R181 V228 B240. Enfin, un logo complète le tout, en reprenant les couleurs du projet. Il en existe trois versions différentes (Figure 51). La forme du logo rappelle la lettre grecque khi, qui correspond parfaitement à l'acronyme KHI, pour Kelvin Helmholtz Instabilities. Les extrémités bleues sombre du logo reprennent en outre la forme des instabilités, et une autre KHI est visible dans la lettre « O » de « Project » et « Box ».



FIGURE 51 – Les trois différentes versions du logo du KHI Project

6.2 Accueil d'un stagiaire

Louis Gostiaux, tuteur du projet, a accueilli un élève, Louis Picard, en stage de découverte de troisième du 25 au 27 février 2015. Sachant que le projet requiert de réaliser un grand nombre d'expériences, et que celles-ci sont longues à mettre en place, Louis Gostiaux a proposé de faire participer Louis Picard au KHI Project. L'équipe du KHI Project l'a donc encadré pendant deux après-midi. Il a découvert le but du projet, le principe d'apparition des KHI ainsi que l'intérêt du dispositif de la KHI Box ; il a aussi appris de quelle façon gérer les différentes phases des manipulations. Il a finalement pu travailler sur la réalisation d'une dizaine d'expériences en l'espace de trois jours, qui ont été très utiles au projet dans son ensemble.

6.3 Supports pédagogiques

6.3.1 Supports à destination des classes et du grand public

Ce livrable pédagogique a vocation à accompagner des démonstrations de la KHI Box face à des personnes ayant peu, ou pas de connaissances en mécanique des fluides. Il s'agit d'explications accompagnées de photos, qui peuvent être distribuées aux spectateurs. Deux types de public sont distingués, d'où la réalisation de deux supports différents. Le premier s'adresse aux élèves

de primaire à partir du CM1 et aux élèves au collège, qui ne disposent d'aucunes bases en mécanique. Il s'agit donc d'une fiche illustrée, avec peu de textes et d'explications, rédigée sur une feuille recto-verso. Cette fiche a été testée et approuvée par un élève en classe de sixième. Le second support est à destination des lycéens et du grand public, qui possèdent quelques notions de physique.

6.3.2 Vidéos à destination du grand public

Les vidéos peuvent être un excellent vecteur de communication, notamment pour faire découvrir les instabilités de Kelvin-Helmholtz qui sont très visuelles. Un petit film de 2 min 09 s retraçant le contexte du KHI Project ainsi que ses objectifs a donc été réalisé, avec une voix-off explicative qui est assurée par un membre du groupe de projet. Une seconde vidéo, qui dure 1 min 10 s, a été montée pour servir de support silencieux qu'il est possible de faire tourner pendant des explications orales. Il s'agit d'une série de belles photos sur lesquelles sont visibles des KHI, qui démontre bien la diversité des contextes dans lesquels ce phénomène se manifeste.

6.4 Participation à des événements

6.4.1 Démonstration lors des Olympiades de Sciences de l'Ingénieur

L'Ecole Centrale de Lyon a accueilli le 8 avril 2015 la finale des Olympiades des lycées en Sciences de l'Ingénieur. Bertrand Vilquin, le responsable des projets d'études, a demandé à l'équipe du KHI Project d'être présente à cette occasion afin de faire découvrir son travail aux lycéens participants à l'événement. Puisque la communication pédagogique est depuis le début l'un des principaux objectifs du KHI Project, nous avons accepté. Pour le bon déroulement de cette démonstration, une affiche de taille A1 a notamment été réalisée (Annexe G).

Le public était essentiellement constitué de lycéens, mais également de quelques professeurs de lycée et de l'Ecole Centrale de Lyon. En l'espace de deux heures, ce sont environ quatre-vingts personnes qui sont passées sur le stand.

6.4.2 Laboratoire(s) Arts & Sciences de Saint-Priest

Le groupe a également participé au Laboratoire(s) Arts & Sciences organisé par la ville de Saint-Priest les 6 et 7 mai, afin de se forger une première expérience des rencontres avec le grand public avant la Fête de la Science 2015. La KHI Box a été présentée pendant deux jours à un public composé de classes de primaire et de collège, de professeurs et de curieux. En plus de la KHI Box, nous disposions d'une affiche A1 (Annexe H), d'une vidéo explicative et d'un diaporama de photos de KHI (Figure 52).

Deux ou trois membres du groupe était chaque fois présents sur place, ce qui permettait de plus facilement gérer en simultané l'aspect technique de la démonstration, et l'accueil du public. En tout sur les deux jours de présentation, ce sont environ cent-cinquante personnes qui sont passées à notre stand. La KHI Box, montée avec le système à deux pompes, a correctement fonctionné sur toute la durée de l'événement, permettant au public de visualiser facilement les instabilités. Un autre élément satisfaisant est le nombre de remplissages nécessaires, puisque deux remplissages par jour ont suffi pour assurer un bon fonctionnement de la KHI Box.



FIGURE 52 – Photo de Lorraine Gheerbrant et Flavien Tétard présentant la KHI Box à Saint-Priest le 6 mai 2015

7 Perspectives

7.1 Perspectives scientifiques

7.1.1 Perspectives d'amélioration du système à une pompe

La puissance de la pompe a été fixée à $600 L/h$ pour l'ensemble des expérimentations. Par extrapolation des constats établis précédemment, on peut espérer obtenir des bons résultats si le débit de la pompe et la somme des hauteurs sont augmentés de manière logique.

Par ailleurs, une vanne est montée sur la pompe pour que le débit puisse être augmenté progressivement en début d'expérience. Ainsi l'état transitoire est plus long mais moins brutal. Le mélange est bien réduit grâce à ce système, mais ce n'est pas une solution complètement satisfaisante. Il serait intéressant de trouver un système plus pratique permettant de commencer l'expérience sans à-coups.

7.1.2 Perspectives d'amélioration du système à deux pompes

Pour faire apparaître des KHI avec cette méthode de mise en mouvement, il faut qu'une personne se charge manuellement de l'allumage par intermittence des pompes. Une automatisation de ce basculement peut être envisagée et donnerait plus d'aisance à celui qui présente le phénomène au grand public. En effet, un système automatisé de commutation des pompes pourrait par exemple fonctionner à l'aide de transistors, en imposant des temps de commutations de l'ordre de plusieurs secondes.

Par ailleurs, la fréquence de basculement dépend de plusieurs paramètres, la densité de la couche inférieure de fluide notamment. Il faudrait donc parvenir à créer un système automatisé de commutation des pompes dont la période serait réglable, afin d'être adaptée à chaque expérimentation. Déterminer le lien entre la fréquence des différents modes de l'onde interne et les divers paramètres de l'expérience serait également très utile pour exploiter un tel système automatisé : la période pourrait être fixée en amont de l'expérience, et non pas déterminée de façon empirique à chaque essai.

7.1.3 Etude des champs de vitesse

Afin de compléter l'étude du fonctionnement des dispositifs à une et à deux pompes, il pourrait être très intéressant d'étudier les champs de vitesse au sein du fluide lors de l'apparition des

instabilités de Kelvin-Helmholtz. Il serait ainsi possible de déterminer la vitesse critique nécessaire à l'apparition des KHI expérimentalement, et ainsi confronter le modèle théorique à la réalité expérimentale.

Plusieurs types de mesures pourraient permettre d'évaluer le champ de vitesse dans le fluide. Le premier d'entre eux est l'utilisation de petites particules plongées dans le fluide, dont on peut suivre le déplacement grâce à un film ; l'analyse de la trajectoire des particules permet d'accéder à la vitesse du fluide en différents points, et de tracer les lignes de courant dans le fluide. Une seconde option réside dans l'utilisation d'une méthode de vélocimétrie laser.

7.2 Perspectives pédagogiques

7.2.1 Participation à la Fête de la Science 2015

La Fête de la Science est un événement annuel, créé en 1991 et dirigé par le ministère de l'Enseignement supérieur et de la Recherche. Cet événement « favorise les échanges entre la communauté scientifique et le grand public » [Danmanville(2012)]. L'édition 2015 de la Fête de la Science se tiendra du mercredi 7 octobre au dimanche 11 octobre 2015, et aura notamment pour thème la Lumière, mais aussi les sols et les changements climatiques. Participer à cet événement est l'un des objectifs premiers du KHI Project, car il s'agit d'une belle occasion de partager avec un public non spécialiste les connaissances qui ont été acquises au cours de l'année.

A la suite de notre présentation à Saint-Priest, Bérangère Dumont nous propose d'accueillir une nouvelle fois le KHI Project au Château de Saint-Priest. Toutefois la Fête de la Science 2015 est abordée à Saint-Priest dans la thématique de la Lumière, la KHI Box doit donc intégrer une dimension lumineuse. Une réflexion est menée à ce sujet ; une option envisageable est le recours à un colorant fluorescent, mais d'autres pistes sont également explorées.

7.2.2 Publication d'un article dans le Bulletin de l'Union des Physiciens

Louis Gostiaux a proposé au groupe projet la rédaction d'un article sur le développement de la nouvelle méthode expérimentale qu'est la KHI Box, afin de le publier dans le Bulletin de l'Union des Physiciens (BUP). Il s'agit d'une revue scientifique dont la publication est mensuelle. Elle a été créée en 1907. Elle est éditée par l'Union des professeurs de physique et de chimie, une association qui a pour but d'« étudier et [d'] améliorer les conditions de l'enseignement des sciences physiques » mais également de « rassembler et diffuser toutes informations d'ordre pédagogique ou technique relatives à cet enseignement » [UdPPC(2015)]. La politique de rédaction du BUP est donc en adéquation avec les objectifs pédagogiques du KHI Project, et publier un article dans une revue scientifique reconnue dans son domaine constitue une excellente opportunité de valoriser nos travaux. Le travail de rédaction de l'article est en cours et sa version définitive doit être soumise au comité de rédaction du BUP début septembre 2015.

Conclusion

Le principal objectif du KHI Project en construisant la KHI Box était de dépasser les contraintes d'encombrement et de mélange qui posent problème dans les dispositifs existants permettant de créer des KHI, pour ainsi obtenir une installation portative où l'on puisse répéter le phénomène. Pour atteindre cet objectif, une étude théorique et numérique des instabilités de Kelvin-Helmholtz a été nécessaire, ainsi que la conception d'une nouvelle architecture de dispositif expérimental.

Une série de tests sur un prototype et sur la KHI Box ont permis de déterminer les conditions optimales d'obtention des instabilités pour les deux systèmes de mise en mouvement ; celles-ci sont résumés dans le tableau ci-dessous (Table 7) :

	Système à une pompe	Système à deux pompes
d	1,014	1,04
h_1 (mm)	94	150
h_2 (mm)	56	150
Q (L/h)	600	116
δ (mm)	20	20

TABLE 7 – Récapitulatif des conditions optimales d'obtention des KHI

Grâce à ces batteries de tests, la KHI Box respecte bien le cahier des charges défini d'après les objectifs du projet sur le volet des instabilités : celles-ci sont bien visibles, et la KHI Box peut fonctionner en démonstration une demi-journée entière avec un seul remplissage, en utilisant le système à deux pompes et en attendant entre deux manifestations du phénomène. Les KHI ont ainsi été présentées au grand public de façon concluante au cours de deux événements de vulgarisation scientifique.

Quelques critères du cahier des charges initial n'ont pas été respectés : par exemple, le coût de fabrication de la KHI Box est un peu supérieur à 300€, le remplissage dure 40 *min* en moyenne et non 30 *min*, la KHI Box pèse 18 *kg* et non 10 *kg* ; mais ces écarts ne sont pas significatifs dans la mesure où en début de projet, de nombreux critères quantifiés doivent être fixés avec peu d'informations à disposition, et donc quelque peu arbitrairement. Ces différents manquements prouvent que des voies d'amélioration existent, mais ne remettent pas en cause la réussite globale du KHI Project, qui a su répondre aux deux objectifs majeurs (scientifique et pédagogique) qui lui avaient été fixés.

Le travail du KHI Project n'est cependant pas encore terminé ; il reste encore à achever la rédaction de l'article pour le Bulletin de l'Union des Physiciens, ainsi qu'à présenter la KHI Box lors de la Fête de la Science 2015.

Enfin on peut envisager plusieurs pistes d'amélioration au système de la KHI Box. Il serait par exemple envisageable de remplir la totalité des critères du cahier des charges, mais également d'améliorer le système générant les KHI ; pour cela, on pourrait chercher à ajouter un système automatisé de commande des pompes pour le système à deux pompes, ou bien étudier le comportement du champ de vitesse dans le couloir de la KHI Box. Autant de perspectives qui pourront être explorées l'année prochaine, puisque un projet d'études dans la continuité du KHI Project sera probablement proposé par Louis Gostiaux en septembre.

Bibliographie et sitographie

- [mec(2015)] Mécanique des fluides, mars 2015. URL http://fr.wikipedia.org/w/index.php?title=M%C3%A9canique_des_fluides&oldid=112521321. Page Version ID : 112521321.
- [sau(2015)] Saumure, avr. 2015. URL <http://fr.wikipedia.org/wiki/Saumure>.
- [Alboussière(2006)] T. ALBOUSSIÈRE : La mécanique des fluides, juin 2006. URL <http://perso.ens-lyon.fr/nathalie.revol/ED/TAlboussiere06.pdf>.
- [Ariau(2013)] P. ARIAU : Ariau Amazon Towers Hotel : Amazon River meets Rio Negro river near Manaus, mars 2013. URL <http://ariau2014.blogspot.fr/2013/03/amazon-river-meets-rio-negro-river-near.html>.
- [Danmanville(2012)] P. DANMANVILLE : Historique de la Fête de la science - Fête de la science, 2012. URL <http://www.fetedelascience.fr/pid25798/historique-de-la-fete-de-la-science.html>.
- [Gostiaux(2011)] L. GOSTIAUX : Deep Oceanic Kelvin-Helmholtz billows, déc. 2011. URL http://commons.wikimedia.org/wiki/File:Deep_Oceanic_Kelvin-Helmholtz_billows.jpg.
- [Guyon *et al.*(2001)] Guyon, Hulin, et Petit] E. GUYON, J.-P. HULIN et L. PETIT : *Hydrodynamique physique*. EDP Sciences; CNRS Editions, Les Ulis (France); Paris, 2001. ISBN 2868835023 9782868835024 2271056357 9782271056351.
- [Helmholtz(1868)] H. L. F. HELMHOLTZ : Über diskontinuierliche Flüssigkeitsbewegungen. *Monatsberichte der Königlich Preussische Akademie der Wissenschaften zu Berlin*, 23:215, 1868.
- [Huilier(2009)] D. HUILIER : Un peu d'Histoire de la Mécanique des Fluides, 2009. URL http://www.daniel-huilier.fr/Enseignement/Histoire_Sciences/Histoire.pdf.
- [NASA / JPL / Space Science Institute(2004)] NASA / JPL / SPACE SCIENCE INSTITUTE : PIA06502 : Rough Around the Edges, oct. 2004. URL <http://photojournal.jpl.nasa.gov/catalog/PIA06502>.
- [NASA / SDO / Astrophysical Journal Letters(2011)] NASA / SDO / ASTROPHYSICAL JOURNAL LETTERS : Sun Has Giant Supersonic Waves Bigger Than Earth, juin 2011. URL <http://www.sott.net/article/230165-Sun-Has-Giant-Supersonic-Waves-Bigger-Than-Earth>.
- [NOAA / Forecast Systems Laboratory(2001)] NOAA / FORECAST SYSTEMS LABORATORY : Scatcat 2001 : Severe Clear Air Turbulence Colliding with Aircraft Traffic, 2001. URL <http://www-frd.fsl.noaa.gov/mab/scatcat/>.
- [Paperin(2012)] M. PAPERIN : 'Kelvin-Helmholtz Instability' Structure, 2012. URL <http://www.brockmann-consult.de/CloudStructures/kelvin-helmholtz-instability-description.htm>.
- [Thomson(1871)] W. THOMSON : Hydrokinetic solutions and observations. 42:362–377, 1871.
- [UdPPC(2015)] UdPPC : Les objectifs, 2015. URL <http://www.udppc.asso.fr/national/index.php/quest-ce-que-ludppc?id=66:les-objectifs&catid=1>.
- [van Haren et Gostiaux(2011)] H. van HAREN et L. GOSTIAUX : Annual Report 2010 - Familiarly curved deep sea waves. *Royal Netherlands Institute for Sea Research*, p. 25, juin 2011. ISSN 0165 - 9162. URL <http://www.nioz.nl/files/Docs%20website%20editor/Het%20Instituut/jaarverslagen/2010%20jaarverslag.pdf>.
- [Worster(2013)] G. WORSTER : Kelvin Helmholtz, sept. 2013. URL <https://www.youtube.com/watch?v=UbAfvcaYr00>.

A Radar météorologique à effet Doppler-Fizeau

Le cisaillement des vents à proximité des zones d'atterrissage est un danger permanent pour les pilotes et les aéroports, c'est pourquoi les détecter est devenu une priorité depuis les années 80. Les aéroports et les avions sont donc équipés de systèmes de détection de ces cisaillements qu'il est possible de séparer en deux types : les cisaillements horizontaux peuvent se rencontrer à proximité des côtes et des fronts de perturbations, tandis que les cisaillements verticaux apparaissent généralement près du sol et des jets de tropopause [1]. Ces cisaillements engendrent différents types d'instabilités et entre autre des instabilités de Kelvin-Helmholtz. La détection se fait à partir de la détection de leur phénomène moteur, c'est-à-dire le cisaillement des vitesses, et ceci à l'aide de l'effet Doppler-Fizeau. Il sera traité ici principalement des radars aéroportuaires comme par exemple le radar météorologique TDWR (Terminal Doppler Weather Radar) dont tous les aéroports américains sont équipés [2]. Ces radars sont équipés d'une part d'émetteurs d'impulsions électromagnétiques, généralement un magnétron ou un klystron, et d'autre part de récepteurs, qui détectent le retour des ondes qui ont été réfléchies ; la durée d'émission τ et la largeur du faisceau des ondes électromagnétiques émises influencent la résolution du radar. L'onde peut être réfléchi de deux façons différentes pour être récupérée par le radar. Soit le cisaillement engendre un gradient d'indice qui réfléchit partiellement l'onde, soit le cisaillement porte des gouttes, issues des précipitations, qui rétrodiffusent l'impulsion. La puissance rétrodiffusée suit l'équation du radar suivante :

$$P_r = (P_t \tau G^2 \lambda^2 \theta^2) \left(\frac{c}{512\pi^2} \right) \frac{c\eta}{R^2} \quad (38)$$

Où

- P_r et P_t puissances reçue et transmise (W) ;
- G gain de l'antenne émettrice/réceptrice (dBi) ;
- λ longueur d'onde du radar (m) ;
- θ largeur angulaire du faisceau radar ($^\circ$) ;
- c vitesse de la lumière dans l'air (m.s^{-1}) ;
- η réflectivité des cibles par unité de volume (dBz.m^{-3}) ;
- R distance cible-radar émetteur (m).

Après calcul de l'intercorrélation, il est possible de déduire le temps d'aller-retour de l'impulsion qui permet à son tour d'en déduire la distance à l'instabilité. L'intercorrélation est calculée via l'expression suivante :

$$\langle s, r \rangle (t) = \int_{t=0}^{+\infty} s(t') \cdot r(t+t') dt' \quad (39)$$

La plupart des radars aéroportuaires ont une longueur d'onde de l'ordre du centimètre pour des durées d'impulsion de l'ordre de la microseconde. Leur portée est d'environ 500 km pour une précision d'une centaine de mètres. Leur développement autour de 1985 a permis la détection d'instabilités bien connues, mais dont les équipements embarqués et au sol ne pouvaient pas détecter la présence, et notamment les microrafales, qui sont des instabilités hydrodynamiques voisines de celles de Kelvin-Helmholtz, plus connues sous le nom d'instabilités de Rayleigh-Taylor ; elles sont la conséquence de la superposition d'une couche moins dense sur une autre plus dense, et créent des courant verticaux puissants déstabilisant les pilotes [3].

- [1] Radar météorologique, mai 2015a. URL http://fr.wikipedia.org/w/index.php?title=Radar_m%C3%A9t%C3%A9orologique&oldid=115398229. Page Version ID : 115398229.
- [2] Radar météorologique d'aéroport TDWR, mars 2015b. URL http://fr.wikipedia.org/w/index.php?title=Radar_m%C3%A9t%C3%A9orologique_d%27a%C3%A9roport_TDWR&oldid=112336933. Page Version ID : 112336933.
- [3] B. D. MATHEWS, P. D. MOUNTCASTLE et W. W. PATTERSON : Windshear radar system with upper and lower elevation radar scans, mai 1994. URL <http://www.google.com/patents/US5311183>. Classification aux États-Unis 342/26.00B ; Classification internationale G01S13/95 ; Classification coopérative G01S13/953 ; Classification européenne G01S13/95B.

B Nombre de Richardson

Le nombre de Richardson est un nombre adimensionné. Sa valeur est déterminante quant à la possible existence ou non des KHI. Il s'écrit comme suit :

$$Ri = \frac{-g}{\rho_0} \frac{\partial f}{\partial z} \frac{1}{\left(\frac{du}{dz}\right)^2} \quad (40)$$

Ri est la mesure relative du gradient de densité dans un écoulement stratifié de cisaillement. Mais il peut être constaté que Ri apparaît comme le rapport de l'énergie potentielle de pesanteur et de son énergie cinétique.

$$Ri \simeq \frac{gH}{U^2} \frac{\Delta\rho}{\rho_0} \quad (41)$$

Des résultats expérimentaux montrent que dans le cas d'un écoulement bidimensionnel, il faut :

- $Ri > \frac{1}{4}$ pour que l'écoulement soit stable.
- $Ri < 1$ pour conserver un fluide stratifié et donc pour éviter la miscion des deux strates dans le cas d'un écoulement permanent.

Le mouvement des fluides est moteur des instabilités tandis que la gravité provoque la fin des KHI. L'écoulement est instable pour Ri inférieur à 0,25, soit pour une énergie cinétique prépondérante devant l'énergie potentielle. Une vitesse U tendant vers l'infini revient à un nombre de Richardson Ri très proche de 0, soit inférieur à 0,25. Les instabilités apparaissent donc comme la théorie le prédit. Si la différence de densité est trop élevée, le nombre de Richardson est alors supérieur à 0,25 et il n'y a pas de KHI. Inversement une différence de densité très faible rend Ri petit. Il est alors plus probable d'être à $Ri < \frac{1}{4}$ et ainsi d'observer les instabilités.

C Fiche technique du bleu patenté VN 200%

FICHE TECHNIQUE

BLEU PATENTE VN 200%

ART E'COLOR
777 rue Louis Arnal
ZAC Les Prés Secs
F-69380 LOZANNE (France)
Tél. : 33.(0)4.78.57.88.82
Fax : 33.(0)4.78.57.88.84
E-Mail : contact@artecolor.fr

Nature Chimique :

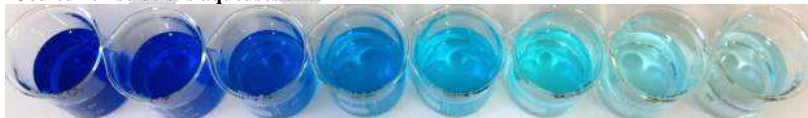
- Nom Chimique : hydrogéné [4-[4-(diéthylamino)-2',4'-disulfonatobenzhydrylidène] cyclohexa-2,5-diène-1-ylidène] diéthylammonium, sel de sodium
- Formule Chimique : $C_{27}H_{32}N_2O_6S_2 \cdot Na$
- Classe : Triarylméthane
- Masse Molaire : 567,68 g/mol

Nomenclature :

- COLOR INDEX : Acid Blue 1
 - N° de Constitution : 42045
 - EINECS N° : 204-934-1
 - CAS N° : 129-17-9
 - Colorant admis pour la coloration de produits cosmétiques : N° INCI : C.I. 42045
- ⚠** Ne pas utiliser dans les produits destinés aux muqueuses.

Principales Caractéristiques :

- Aspect : poudre brun-vert foncé
- Couleur en solutions aqueuses :



(Illustrations réalisées à partir d'une solution mère à 0.1%, diluée entre 3% et 0.03%)

- Solubilité dans l'eau : environ 60 g/l à 80°C
- pH (à 20°C) : environ 3-5 en solution aqueuse à 10 g/l
- Solubilité dans les solvants :
 - Alcools / glycols : Légèrement soluble (teinte bleu turquoise clair)
 - Autres solvants organiques : Insoluble
 - Essence de Térébenthine : Insoluble
 - White Spirit : Insoluble
- Solidité à la lumière (sur textile) :
 - (échelle des Bleus, de 1 à 8) Ton pastel : 2
 - Ton moyen : 2
 - Ton foncé : 3
- Solidité aux acides :
 - Acide sulfurique concentré : solution jaune-moutarde
 - Acide sulfurique dilué : solution jaune d'or
- Solidité aux bases : 3-4 (échelle de 1 à 5) → résistance moyenne à bonne
 - Soude diluée : solution bleue

BLEU PATENTE VN 200%

- Décoloration des solutions :

En milieu oxydant : 5 ml/l d'eau de Javel suffisent à décolorer totalement une solution de colorant à 0,1 g/l, en quelques heures.

En milieu réducteur : la coloration d'une solution à 0,1 g/l de colorant n'est que légèrement altérée par ajout d'hydrosulfite de soude (jusqu'à 10 g/l).

- **Altération au lavage (textile) :** 2 (échelle de 1 à 5)

- **Altération alcaline (textile) :** 1-2 (échelle de 1 à 5)

- **Altération acide (textile) :** 1 (échelle de 1 à 5)

- **Rongeabilité (textile) :** modérée

- **Action des métaux (textile) :**

Cuivre : nuance plus verte, plus terne

Chrome : léger ternissement

Fer : nuance plus verte, plus terne

- **Résistance thermique :** Température de décomposition > 100°C

- **Maximum d'absorption :** 645 nm

- **Délai de péremption :** 5 ans minimum, en emballages hermétiquement clos, à l'abri de la lumière, de l'humidité, du gel et de la chaleur.

Principaux domaines d'application :

- Textile : teinture (soie, laine, polyamide : *ton pastel* : 0,5% - *ton foncé* : 2%) et impression

- Cuirs et peaux

- Plumes

- Encres (aqueuses)

- Papier

- Coloration de produits cosmétiques... (0,001 à 1 g/l)

- Coloration de produits chimiques / d'entretien, lave-glaces ... (0,1 à 2 g/l)

- Coloration de la caséine dans la masse

- Poudres à mouler (phénoformaldéhyde)

Date : 24 février 2011

D Densimètre

La différence de masse volumique entre les deux couches de fluide est un paramètre qui joue un rôle important dans l'apparition des KHI. En effet celle-ci exerce une forte influence sur le phénomène par le biais des phénomènes de gravité et de flottabilité. Dans ce contexte, une mesure précise de la densité est donc essentielle.

La mesure de la densité est réalisée à l'aide d'un densimètre électronique Anton Paar. Le fonctionnement de ce densimètre est basé sur l'excitation d'un tube de verre borosilicaté en U, dont la fréquence d'oscillation résultante est en lien direct avec la masse volumique du liquide ou gaz injecté [2]. Le fluide est soumis à une excitation électromagnétique orthogonale au tube en U, ce qui induit une vibration du tube en réponse, à la fois en flexion et en torsion. De la période de ces oscillations, il est possible de déduire la masse volumique du fluide.

$$T = 2\pi\sqrt{\frac{M + V\rho}{k}} \quad (42)$$

avec :

- T = période de la vibration induite
- M = masse du tube vide
- V = volume de l'échantillon en vibration
- k = constante de rappel
- ρ = masse volumique de l'échantillon

L'apparition du fluide dans le tube influence la période des oscillations comme la formule le montre, les tiges de fixation du tube sont à l'origine de la force de rappel et sont connues. La loi donnant la densité est donc :

$$\rho = AT^2 + B \quad (43)$$

Avec A et B deux constantes caractéristiques du tube que l'on obtient à partir d'un étalonnage. La résolution du système est réalisée automatiquement par le densimètre électronique. De plus, l'étalonnage n'est pas forcément nécessaire si les valeurs de A et B sont enregistrées comme pour les modèles les plus récents.

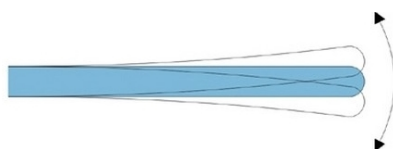


FIGURE 53 – Schéma du tube de verre borosilicaté utilisé dans le densimètre électronique [1]

- [1] OENOLAB DIAGNOSTICS : Densimètre électronique, mai 2015. URL <http://www.oenolab.com/densite.html>.
- [2] OIV : Masse volumique des alcools et boissons spiritueuses Méthode de détermination par densimétrie électronique. *In Recueil des méthodes internationales d'analyse des boissons spiritueuses d'origine vitivinicole*. OIV, 2014. ISBN 979-10-91799-25-6. URL www.oiv.int/oiv/files/Recueil_BS_2014_pdf_complet_FR.pdf.

E Pompe de circulation centrifuge

Les deux systèmes de mise en mouvement des fluides retenus nécessitent l'utilisation des pompes. Les pompes sélectionnées pour le KHI Project sont des modèles courants appelés « pompe de circulation » [1], souvent utilisés par les aquariophiles. Elles sont donc submersibles et peu coûteuses, tout en proposant une large gamme de débit possible et une bonne fiabilité. Ce type de pompe a un fonctionnement dit « centrifuge ». Il est composé, entre autre, d'un moteur électrique dont le rotor entraîne une hélice. Le système étant complètement immergé, l'hélice tourne donc dans l'eau, fournit une certaine puissance hydraulique au fluide qui est alors expulsé dans le refoulement. Le principe général est résumé sur la Figure 54.

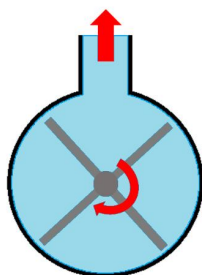


FIGURE 54 – Schéma de principe de fonctionnement de la pompe centrifuge.

Les moteurs électriques sont des moteurs synchrones, donc la vitesse du rotor et l'énergie fournie au fluide sont toujours les mêmes. Le débit n'est réglable que via une vanne incluse en sortie de pompe. Le débit de la pompe varie donc en fonction de la section d'ouverture de la vanne, mais la vitesse à laquelle est entraîné le fluide demeure toujours identique.

Les données fournies par le constructeur lors de l'achat d'une pompe sont la hauteur de refoulement maximale H_m , le débit maximal, ainsi que la caractéristique de la hauteur manométrique en fonction du débit (pour une vanne complètement ouverte). La constante de la pesanteur g est également connue, et la masse volumique du fluide ρ peut être mesurée grâce à un densimètre ; en ayant accès au rendement η et à la puissance du moteur P_{moteur} , la valeur du débit Q est théoriquement accessible quelle que soit la section ouverte grâce à la relation suivante [2] :

$$\rho \cdot g \cdot Q \cdot H_m = \eta \cdot P_{moteur} \quad (44)$$

En pratique, le débit des pompes a été mesuré de façon expérimentale, à l'aide d'un chronomètre, en mesurant la durée δt nécessaire pour le remplir un volume connu V_0 .

$$Q = \frac{V_0}{\delta t} \quad (45)$$

[1] AQUAMALIN : La pompe à eau en aquarium, 2015. URL <http://www.aquamalin.com/p73-la-pompe-a-eau-en-aquarium>.

[2] ECL / MFAE : Caractéristique d'une pompe centrifuge, nov. 2009. URL https://pedagogie.ec-lyon.fr/claroline/document/document.php?cmd=exChDir&file=L1Jlc3NvdXJjZXM%3D&cidReset=true&cidReq=S6_11454.

F Corde vibrante et onde interne

Le problème de la corde vibrante finie et fixe en ses deux extrémités est un problème essentiel de la physique. Par ailleurs, on constate que l'onde interne qui apparaît à l'interface entre les deux fluides dans le cas du système à deux pompes (Partie 3.4.3) adopte un comportement analogue à celui de la corde vibrante à plusieurs égards. Cette annexe présente donc la théorie du problème de la corde vibrante afin de mieux éclairer le phénomène d'oscillation de l'onde interne observé expérimentalement.

Dans la situation présentée dans le corps du rapport, les oscillations apparaissent au niveau d'une interface bidimensionnelle horizontale subissant une perturbation verticale dans une cuve de longueur horizontale finie; la composante horizontale de la vitesse des fluides est imposée nulle aux extrémités par la présence d'une paroi indéformable. Tout se passe comme si l'interface se comportait comme une corde vibrante finie, fixée en ses deux extrémités, siège d'ondes stationnaires.

Il est ici considéré une corde infiniment souple (c'est-à-dire qui n'est pas soumise à des forces de tension interne), ne subissant que de faibles torsions et n'ayant qu'un mouvement transversal.

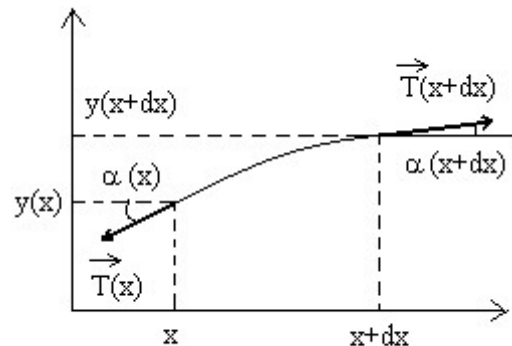


FIGURE 55 – Schéma du dispositif de la corde vibrante

Dans ces hypothèses la portion de corde entre les abscisses x et $x + dx$ subit en x et en $x + dx$ des forces de tension tangentielles de la forme :

$$\begin{cases} \mathbf{T}(x) = -T (\cos(\alpha(x))\mathbf{e}_x + \sin(\alpha(x))\mathbf{e}_y) \\ \mathbf{T}(x + dx) = +T (\cos(\alpha(x + dx))\mathbf{e}_x + \sin(\alpha(x + dx))\mathbf{e}_y) \end{cases} \quad (46)$$

Dans l'hypothèse de faible torsion, l'angle α entre l'horizontale et la tangente à la corde en x est un infiniment petit, donc le développement des fonctions harmoniques est limité à l'ordre 1. Les fonctions trigonométriques vont pouvoir être simplifiées.

$$\cos(\alpha) \simeq 1 \text{ et } \sin(\alpha) \simeq \tan(\alpha) \simeq \frac{\partial y}{\partial x}(x, t) \quad (47)$$

Ces simplifications reportées dans le système (46) donnent :

$$\begin{cases} \mathbf{T}(x) = -T \left(\mathbf{e}_x + \frac{\partial y}{\partial x}(x, t)\mathbf{e}_y \right) \\ \mathbf{T}(x + dx) = +T \left(\mathbf{e}_x + \frac{\partial y}{\partial x}(x + dx, t)\mathbf{e}_y \right) \end{cases} \quad (48)$$

D'où l'expression de la résultante des forces appliquée à la portion de corde de longueur dx après un développement limité à l'ordre 1, en négligeant le poids compte-tenu de la faible masse de la corde :

$$\mathbf{T}(x) + \mathbf{T}(x + dx) = T \left(\frac{\partial y}{\partial x}(x + dx, t) - \frac{\partial y}{\partial x}(x, t) \right) \mathbf{e}_y \quad (49)$$

Soit encore :

$$\mathbf{T}(x) + \mathbf{T}(x + dx) = T \frac{\partial^2 y}{\partial x^2}(x, t) dx \mathbf{e}_y \quad (50)$$

L'application du théorème de la dynamique newtonienne sur une portion de la corde comprise entre x et $x + dx$ donne :

$$dm \frac{\partial \mathbf{v}}{\partial t} = T \frac{\partial^2 y}{\partial x^2}(x, t) dx \mathbf{e}_y \quad (51)$$

Or \mathbf{v} s'écrit comme suit :

$$\mathbf{v} = \frac{\partial y}{\partial t}(x, t) \mathbf{e}_y \quad (52)$$

La masse linéique de la corde est notée comme suit $\mu = \frac{dm}{dx}$. Ceci permet d'obtenir une équation de D'Alembert avec $v = \sqrt{\frac{T}{\mu}}$:

$$\frac{\partial^2 y}{\partial t^2} = \frac{1}{v^2} \frac{\partial^2 y}{\partial x^2} \quad (53)$$

Cela permet de déduire l'expression de la célérité des ondes au sein d'une corde, ainsi que la forme générale des solutions ; celles-ci correspondent à la superposition de deux ondes progressives se dirigeant dans des sens opposés, et qui ici sont prises planes et harmoniques avec $k = \frac{\omega}{v}$:

$$y(x, t) = A \cos(kx - \omega t) \quad (54)$$

Les conditions aux limites de la corde fixée en ses deux extrémités imposent que la position verticale y est nulle en ces deux points, qui auront pour abscisse 0 et L, où L est la longueur de la corde au repos.

$$u(x) = A \cos kx + B \sin kx \quad (55)$$

L'application des conditions aux limites énoncées précédemment donnent :

$$A = 0 \text{ et } B \sin(kL) = 0 \quad (56)$$

On en déduit donc :

$$L = \frac{n\pi}{k} = \frac{n\pi v}{\omega} \quad (57)$$

Les ondes stationnaires au sein de la corde n'existent donc que pour certains modes, c'est-à-dire pour certaines pulsations ω de la forme :

$$\omega = n\pi \frac{v}{L} \quad (58)$$

Ceci est dû aux réflexions en bout de corde et à la superposition entre onde réfléchie et onde incidente.

La solution générale correspond à la somme des différents modes, car la solution de ce problème linéaire est la superposition de toutes les solutions harmoniques qui peuvent apparaître dans la cavité.

$$y(x, t) = B_n \sin\left(n\pi \frac{x}{L}\right) \cos\left(n\pi \frac{vt}{L}\right) \quad (59)$$

La résolution du problème de la corde vibrante montre que la vitesse d'oscillation de l'interface est maximale au niveau des ventres d'oscillation, zone de début d'apparition des instabilités, qui vont ensuite prendre de la vitesse en descendant le ventre d'oscillation pour enfin déferler au niveau des nœuds d'oscillation.

Ceci permet de supposer que dans le cas d'une interface oscillante entre les deux fluides en cisaillement, le plus grand différentiel de vitesse sera atteint au niveau des nœuds d'oscillation, de façon analogue à ce qui se produit pour la corde.

Dans la situation à deux pompes, les pompes allumées de manière périodique peuvent être modélisées du point de vue de la mécanique du solide par un exciteur sinusoïdal en extrémité de corde. Dès lors la situation est assez proche de ce qui a été fait précédemment, une nouvelle condition aux limites est imposée en bout de corde à savoir une évolution sinusoïdale, avec la même méthode l'on aboutit à l'équation suivante :

$$y(x, t) = \frac{a}{\sin kL} \sin(k(L - x)) \quad (60)$$

avec a l'amplitude de l'excitation, $k = \frac{\omega}{c}$ et $\omega_p = p\pi \frac{c}{L}$

Les résultats ont montré que p vaut 2 ou 3. Par ailleurs, du fait de la limite de débit que l'on peut atteindre avec le système utilisé, il est peu probable d'obtenir des ordres supérieurs. Cependant, l'expérimentateur impose ω en choisissant la période d'enclenchement des pompes. Ainsi deux types d'onde se propagent au sein de la cuve : les premières sont les ondes stationnaires qui du fait du mouvement quelles imposent engendrent les instabilités recherchées.

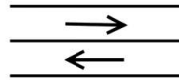
G Affiche pour les Olympiades de Sciences de l'Ingénieur

KHI Project



Les Instabilités de Kelvin Helmholtz :

- Découvertes au XIXème siècle



- Théorie maîtrisée

$$\frac{4\rho_1\rho_2U^2}{(\rho_2 + \rho_1)^2} - \frac{g}{k} \frac{\rho_2 - \rho_1}{\rho_2 + \rho_1} > 0$$

- Des simulations numériques



→ Aucun dispositif permettant la formation du phénomène rapidement

Notre solution : La KHI Box

Remplissage rapide et
répétabilité de l'expérience



Sophie Roussel
Solène Doublet
Lorraine Gheerbrant

Flavien Tetard
Samy Arabi
Florent Haffner



LMFA
ÉCOLE
CENTRALE LYON



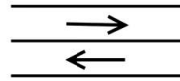
H Affiche pour le(s) Laboratoire(s) Arts et Sciences de Saint-Priest

KHI Project



Les Instabilités de Kelvin Helmholtz :

- Découvertes au XIXème siècle



- Théorie maîtrisée

$$\frac{4\rho_1\rho_2U^2}{(\rho_2 + \rho_1)^2} - \frac{g}{k} \frac{\rho_2 - \rho_1}{\rho_2 + \rho_1} > 0$$

- Des simulations numériques



➔ Aucun dispositif permettant la formation du phénomène rapidement

- Projet d'un an
- A l'Ecole Centrale de Lyon
- Encadré par un chercheur

Notre solution : La KHI Box



Sophie Roussel
Solène Doublet
Lorraine Gheerbrant

Flavien Tetard
Samy Arabi
Florent Haffner

ÉCOLE CENTRALE LYON

LMFA



I Cahier des charges

Livrable	Subdivisions du livrable	Critères	Critères plus spécifiques	Normes
KHI Box	Cuve	Étanche	Transparente sur la face de devant	Pas de fuites
		Transportable	Résistance	< 10 kg
	Installation en T	Transportable	Poids	$L < 1300mm$
			Volume	$P < 500mm$ $H < 300mm$
		Étanche	Étanchéité des plaques	Pas de fuites
		Facile à installer	Étanchéité de la fixation	Pas de fuites
			Facilité de fixation	< 4 heures
		Solidité	Facilité d'usinage	< 4 heures
	Deux fluides	Transportables		
		Facilement accessibles	Délais de commande	< 1 mois
		Utilisables sans précaution contraignante	Facilité de fabrication	
			Toxicité	Non toxique
			Noxivité	Non nocif
	Colorés	Propreté	Ne tachant pas	
		Esthétique		
De densités spécifiques	Visibilité			
	Facilité de mise en oeuvre			
Système de mise en mouvement des fluides	Transportable	Mesure de la densité des fluides		
		Écart entre la densité des deux fluides		
	Poids	Volume	Reentre dans la cuve	
	Rapide à mettre en place	Poids	< 3 kg	
	Facile à utiliser	Rapide à mettre en place	< 5 min	
	Efficace pour l'apparition des KHI	Pas de perturbation de l'interface		
		Différentiel de vitesse suffisant		
		Contrôle de la vitesse des fluides		
	Mesure de la vitesse donnée au fluide			
	Système de remplissage	Transportable		Reentre dans la cuve
Rapide			< 30 min	
Système de vidage	Adaptable à la source de fluide			
	Transportable		Reentre dans la cuve	
Adapté au grand public	Rapide		< 30 min	
	Répétabilité du phénomène	Nombre d'occurrences sur une heure	> 6 fois	
	Visibilité du phénomène	Durée	> 3 s	
	Utilisable par des classes (professeurs, lycéens, étudiants)	Amplitude des KHI		> 3 cm
		Coût d'achat faible		< 300€
		Reproduction du dispositif possible	Compréhension du phénomène possible	Prise en main facile

Livrable	Destinataires	Subdivisions du livrable
Livrable pédagogique	Primaire & collège	Fiche explicative illustrée
	Lycée & grand public	Fête de la Science 2015
		Film explicatif
		Explication théorique adaptée
	Etudiants, professeurs, chercheurs	Protocoles d'utilisation de la maquette
		Protocole de réalisation des fluides
		Protocole de fabrication de la maquette
Explication théorique détaillée		

J Protocole n ° 1 : Usinage des plaques de l'architecture en T et montage de la KHI Box

Matériel

- Aquarium de dimensions 80 x 30 x 40 cm
- Visseuse
- Plaque de PVC expansé Celuka
- 3 vis
- Scie circulaire
- Régllet ou mètre
- Scie à ruban
- Equerre
- Fraiseuse
- Colle PVC
- Perceuse
- Joint silicone

Précautions à prendre

- Faire attention aux scies, surtout à la scie circulaire
- Ne pas enlever le plastique qui protège le PVC pour avoir un rendu propre

Protocole

- Dessiner sur la plaque de PVC le contour des plaques, deux rectangles de dimensions 600 x 320 mm et 254 x 320 mm
- Couper les côtés à l'aide de la scie circulaire, ou à la scie à ruban si c'est possible
- Utiliser la fraiseuse pour obtenir des surfaces vraiment lisses sur les bords
- Tracer un trait au centre de la plaque de 600 x 320 mm, qui la divise en deux dans le sens de la longueur
- Percer trois trous alignés sur ce trait, de diamètre légèrement inférieur à celui des vis
- Percer la continuité de ces trous dans l'épaisseur de la plaque de 254 x 320 mm
- Assembler les deux pièces perpendiculairement en insérant une vis dans chaque trou à l'aide de la visseuse (idéalement sur un marbre)
- Rajouter du joint silicone à la jonction entre les plaques de chaque côté, pour l'étanchéité
- Tracer au marqueur des repères au fond de l'aquarium afin de placer l'installation en T au centre de l'aquarium dans le sens de la longueur, et en buté côté réservoirs (Figure 56)
- Appliquer de la colle PVC au pinceau sur l'une des tranches de l'installation en T
- Poser l'installation en T dans l'aquarium, comme indiqué par les marques, et appuyer
- Appliquer du joint silicone au pied de l'installation en T, pour l'étanchéité

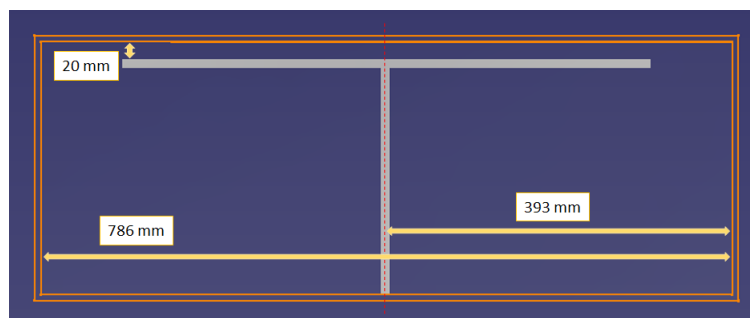


FIGURE 56 – Plan avec dimensions de la KHI Box en vue du dessus, réalisé avec le logiciel Catia

K Protocole n ° 2 : Fabrication des solutions de colorants

Matériel

- Fiole jaugée à 1 L
- Colorant en poudre (Bleu patenté VN 200%)
- Balance de précision
- Spatule
- Gants
- Blouse

Précautions à prendre

Porter des gants et une blouse.

Protocole

- Mettre la fiole jaugée vide sur la balance de précision
- Tarer la balance
- Verser 10 g de colorant en poudre dans la fiole à l'aide de la spatule
- Remplir la fiole d'eau jusqu'au trait de jauge
- Agiter la solution pour l'homogénéiser

L Protocole n ° 3 : Réalisation de KHI avec le système à une pompe

Matériel

- KHI Box
- Eau salée saturée
- Densimètre électronique
- Pompe de débit 600 *L/h* muni d'un tuyau et d'une vanne
- 2 tuyaux de 2 *mm*² de section reliés à une arrivée d'eau
- 2 plaques de mousse alvéolaire Eco-line de 20 x 230 x 300 mm
- Seau ou autre récipient de grande contenance
- Bécher de 250 *mL*
- Solution de bleu patenté VN 200% (voir Protocole n°2)

Protocole

- Placer la pompe au fond de la KHI Box dans l'un des deux réservoirs, de sorte que le tuyau débouche dans l'autre
- Verser 250 *mL* de solution colorée dans la KHI Box
- Remplir la KHI Box d'eau du robinet jusqu'à 94 *mm* de hauteur
- Ajouter une petite quantité d'eau salée saturée en sel
- Ouvrir la vanne et déclencher la pompe et attendre afin d'homogénéiser la salinité de l'eau
- Mesurer la densité de l'eau à l'aide du densimètre électronique
- Ajouter à nouveau une petite quantité d'eau salée saturée en sel, et répéter l'homogénéisation et la mesure jusqu'à atteindre une densité de 1,014
- Arrêter la pompe et fermer la vanne
- Humidifier légèrement les deux plaques de mousse
- Placer une plaque de mousse sur l'eau dans chacun des deux réservoirs (côté lisse de la mousse vers le bas)
- Placer un tuyau de section 2 *mm*² sur chaque mousse
- Ouvrir l'arrivée d'eau afin que l'eau coule lentement sur les mousses et les traverse, sans déborder par les côtés
- Augmenter le débit en sortie des tuyaux une fois que la strate supérieure de fluide mesure plus de 2 *cm*
- Couper l'arrivée d'eau lorsque la strate supérieure de fluide mesure 56 *mm* de hauteur
- Retirer les tuyaux et les mousses avec précaution
- Allumer la pompe
- Ouvrir progressivement la vanne, en trois ou quatre temps
- Observer

M Protocole n ° 4 : Réalisation de KHI avec le système à deux pompes

Matériel

- KHI Box
- Eau salée saturée
- Densimètre électronique
- Pompe de débit 600 *L/h* muni d'un tuyau et d'une vanne
- 2 pompes de débit 116 *L/h*
- 2 tuyaux de 2 *mm*² de section reliés à une arrivée d'eau
- 2 plaques de mousse alvéolaire Eco-line de 20 x 230 x 300 mm
- Seau ou autre récipient de grande contenance
- Bécher de 250 *mL*
- Solution de bleu patenté VN 200% (voir Protocole n°2)

Protocole

- Placer la pompe au fond de la KHI Box dans l'un des deux réservoirs, de sorte que le tuyau débouche dans l'autre
- Fixer les deux pompes de 116 *L/h* sur les parois latérales de la KHI Box, contre la paroi du devant afin que la sortie d'eau soit dirigée dans l'alignement du couloir ; la pompe de droite est placée en bas de la KHI Box, et celle de gauche vers 270 *mm* de hauteur
- Verser 360 *mL* de solution colorée dans la KHI Box
- Remplir la KHI Box d'eau du robinet jusqu'à 150 *mm* de hauteur
- Ajouter une petite quantité d'eau salée saturée en sel
- Déclencher la pompe de 600 *L/h* et attendre afin d'homogénéiser la salinité de l'eau
- Mesurer la densité de l'eau à l'aide du densimètre électronique
- Ajouter à nouveau une petite quantité d'eau salée saturée en sel, et répéter l'homogénéisation et la mesure jusqu'à atteindre une densité de 1,04
- Arrêter la pompe de 600 *L/h* et la retirer de la KHI Box
- Humidifier légèrement les deux plaques de mousse
- Placer une plaque de mousse sur l'eau dans chacun des deux réservoirs (côté lisse de la mousse vers le bas)
- Placer un tuyau de section 2 *mm*² sur chaque mousse
- Ouvrir l'arrivée d'eau afin que l'eau coule lentement sur les mousses et les traverse, sans déborder par les côtés
- Augmenter le débit en sortie des tuyaux une fois que la strate supérieure de fluide mesure plus de 2 *cm*
- Couper l'arrivée d'eau lorsque la strate supérieure de fluide mesure 150 *mm* de hauteur
- Retirer les tuyaux et les mousses avec précaution
- Allumer et éteindre les pompes par intermittence de telle sorte qu'apparaisse une onde interne à l'interface entre les deux strates
- Observer

N Tableaux de résultats pour le dispositif à une pompe

Date	27/05/2015 (6)	27/05/2015 (5)	27/05/2015 (4)	27/05/2015 (3)	27/05/2015 (2)
Densité	1,01	1,0142	1,0145	1,0201	1,0104
Hauteur bas h_1 (mm)	77	79	62	94	94
Hauteur haut h_2 (mm)	38	39	37	48	47
Somme des hauteurs $h_1 + h_2$	115	118	99	142	141
Rapport h_1/h_2	2,026	2,026	1,676	1,958	2,000
Largeur du couloir δ (mm)	30	30	30	20	20
Section du couloir S	3450	3540	2970	2840	2820
Longueur d'onde λ (mm)	32	28	29	32	38
Temps de remplissage (minutes)	31	31	35	-	30
Note sur 3	2	1	2	1	3

Date	27/05/2015 (1)	21/05/2015 (2)	21/05/2015 (1)	20/05/2015 (3)	20/05/2015 (2)
Densité	1,014	1,0144	1,0141	1,014	1,014
Hauteur bas h_1 (mm)	95	125	144	135	150
Hauteur haut h_2 (mm)	47	74	63	80	90
Somme des hauteurs $h_1 + h_2$	142	199	207	215	240
Rapport h_1/h_2	2,021	1,689	2,286	1,688	1,667
Largeur du couloir δ (mm)	20	20	30	20	20
Section du couloir S	2840	3980	6210	4300	4800
Longueur d'onde λ (mm)	36	10	0	10	0
Temps de remplissage (minutes)	36	-	45	25	42
Note sur 3	3	1	0	1	0

Date	20/05/2015 (1)	13/05/2015 (2)	13/05/2015 (1)	30/04/2015 (2)	30/04/2015 (1)
Densité	1,015	1,022	1,015	1,014	1,0107
Hauteur bas h_1 (mm)	184	80	83	126	91
Hauteur haut h_2 (mm)	110	56	60	76	33
Somme des hauteurs $h_1 + h_2$	294	136	143	202	124
Rapport h_1/h_2	1,673	1,429	1,383	1,658	2,758
Largeur du couloir δ (mm)	20	30	30	30	30
Section du couloir S	5880	4080	4290	6060	3720
Longueur d'onde λ (mm)	23	25	30	35,1	20,8
Temps de remplissage (minutes)	36	40	45	-	-
Note sur 3	1	1	1	2	1

Date	29/04/2015	25/03/2015 (3)	25/03/2015 (2)	25/03/2015 (1)	26/02/2015 (3)	26/02/2015 (2)
Densité	1,01	1,01	1,015	1,024	1,0115	1,0201
Hauteur bas h_1 (mm)	83	83	100	100	155	84
Hauteur haut h_2 (mm)	60	46	66	66	52	70
Somme des hauteurs $h_1 + h_2$	143	129	166	166	207	154
Rapport h_1/h_2	1,383	1,804	1,515	1,515	2,981	1,200
Largeur du couloir δ (mm)	30	30	30	30	30	30
Section du couloir S	4290	3870	4980	4980	6210	4620
Longueur d'onde λ (mm)	28	62,4	0	0	0	30
Temps de remplissage (minutes)	38	26	44	36	75	37
Note sur 3	2	3	0	0	0	1

Date	26/02/2015 (1)	25/02/2015	11/02/2015 (2nde)	11/02/2015 (1)	04/02/2015	28/01/2015 (2)
Densité	1,0205	1,012	1,0098	1,014	1,019	1,014
Hauteur bas h_1 (mm)	75	130	83	75	57	105,3
Hauteur haut h_2 (mm)	60	40	46	44	57	63
Somme des hauteurs $h_1 + h_2$	135	170	129	119	114	168,3
Rapport h_1/h_2	1,250	3,250	1,804	1,705	1,000	1,671
Largeur du couloir δ (mm)	30	30	20	20	20	20
Section du couloir S	4050	5100	2580	2380	2280	3366
Longueur d'onde λ (mm)	35,1	55,9	80,6	55,9	41,6	59
Temps de remplissage (minutes)	120	180	20	70	70	28
Note sur 3	2	3	3	2	3	3

Date	28/01/2015 (1)	07/01/2015 (2)	07/01/2015 (1)	17/12/2014
Densité	1,0295	1,016	1,048	1,035
Hauteur bas h_1 (mm)	48	62	79	81
Hauteur haut h_2 (mm)	109,5	37	36	44
Somme des hauteurs $h_1 + h_2$	157,5	99	115	125
Rapport h_1/h_2	0,438	1,676	2,194	1,841
Largeur du couloir (mm)	20	20	20	20
Section du couloir	3150	1980	2300	2500
Longueur d'onde exacte (mm)	40	29,9	39	45,5
Temps de remplissage (minutes)	125	-	-	-
note sur 3	3	1	1	2

O Tableaux de résultats pour le dispositif à deux pompes

Date	27/05/2015	27/05/2015	27/05/2015	27/05/2015	27/05/2015
Densité	1,0378	1,034	1,045	1,0348	1,0455
Hauteur bas h_1 (mm)	110	110	110	149	150
Hauteur haut h_2 (mm)	112	110	110	150	150
Somme des hauteurs $h_1 + h_2$ (mm)	222	220	220	299	300
Rapport des hauteurs h_1/h_2	0,982	1,000	1,000	0,993	1,000
Largeur du couloir δ (mm)	30	30	30	20	20
Section du couloir S (mm ²)	6660	6600	6600	5980	6000
Longueur d'onde λ (mm)	39	30	37	44	34
Temps de remplissage (minutes)	35	56	46	43	66
Note sur 3	1	1	2	2	2
Période on/off pompes (s)	6	6,8	6,4	7,6	6,2

Date	21/05/2015 (1)	20/05/2015 (3)	20/05/2015 (2)	20/05/2015 (1)	13/05/2015 (2)
Densité	1,0405	1,035	1,041	1,0215	1,0297
Hauteur bas h_1 (mm)	149	110	110	110	150
Hauteur haut h_2 (mm)	149	110	110	110	153
Somme des hauteurs $h_1 + h_2$ (mm)	298	220	220	220	303
Rapport des hauteurs h_1/h_2	1,000	1,000	1,000	1,000	0,980
Largeur du couloir δ (mm)	20	30	30	30	20
Section du couloir S (mm ²)	5960	6600	6600	6600	6060
Longueur d'onde λ (mm)	52	49	30	35	40
Temps de remplissage (minutes)	45	40	33	40	60
Note sur 3	3	3	2,5	2,5	3
Période on/off pompes (s)		3	-	-	-

Date	13/05/2015 (1)	30/04/2015	29/04/2015	08/04/2015	01/04/2015
Densité	1,017	1,0217	1,031	1,021	1,026
Hauteur bas h_1 (mm)	150	148	146	110	110
Hauteur haut h_2 (mm)	150	149	146	105	110
Somme des hauteurs $h_1 + h_2$ (mm)	300	297	292	215	220
Rapport des hauteurs h_1/h_2	1,000	0,993	1,000	1,048	1,000
Largeur du couloir δ (mm)	20	20	20	30	30
Section du couloir S (mm ²)	6000	5940	5840	6450	6600
Longueur d'onde λ (mm)	0	30	-	-	50,7
Temps de remplissage (minutes)	45	-	-	-	34
Note sur 3	0	3	3	1	3
Période on/off pompes (s)	-	-	-	-	8,3

Date	25/03/2015 (1)	18/03/2015 (3)	18/03/2015 (2)	18/03/2015 (1)	04/03/2015 (4)
Densité	1,037	1,016	1,029	1,029	1,02
Hauteur bas h_1 (mm)	111	110	110	110	110
Hauteur haut h_2 (mm)	111	110	110	110	112
Somme des hauteurs $h_1 + h_2$ (mm)	222	220	220	220	222
Rapport h_1/h_2	1,000	1,000	1,000	1,000	0,982
Largeur du couloir δ (mm)	30	30	30	30	30
Section du couloir S (mm ²)	6660	6600	6600	6600	6660
Longueur d'onde λ (mm)	40,3	24,7	53,3	26	59,8
Temps de remplissage (minutes)	40	31	32	45	49
note sur 3	2	2	2	3	3
Période on/off pompes	7,3	9,6	8,3	7,7	8,3

Date	04/03/15 (3)	04/03/15 (2)	04/03/15 (1)
Densité	1,0125	1,028	1,029
Hauteur bas h_1 (mm)	97	78	78
Hauteur haut h_2 (mm)	93	99	64
Somme des hauteurs $h_1 + h_2$ (mm)	190	177	142
Rapport des hauteurs h_1/h_2	1,043	0,788	1,219
Largeur du couloir δ (mm)	30	30	30
Section du couloir S (mm ²)	5700	5310	4260
Longueur d'onde λ (mm)	28,6	39	0
Temps de remplissage (minutes)	34	25	42
Note sur 3	2	3	0
Période on/off pompes (s)	10,6	8,8	-

P Tableau des caractéristiques des mousses alvéolaires

Numéro	Nom	Masse (g)	Coule?	Densité (kg/m ³)	débit moyen (L/min)
1	Eco-line	35,5	Non	25	0,164
2	Mousse à l'ester	68,2	Non	35	0,0137
3	MicorPor	49,5	Oui	30	0
4	Basotect	12,5	Oui	9	0
PE1	Eco-line percée	35,5	Non	25	1,067
PE2	Mousse à l'ester percée	68,2	Non	35	0,151
PE3	MicorPor percée	49,5	Oui	30	0
PE4	Basotect percée	12,5	Oui	9	0
G	Mousse du labo	51,6	Non	33	0,123

Check-list de rapport de Projet d'Etudes
A remplir par les rédacteurs (élèves)
et à insérer en dernière page du rapport

A développer

Renseigner la case par le nom du responsable, ou la date ou une simple croix lorsque la vérification a été faite.

	Vérification présence	Vérification qualité
--	-----------------------	----------------------

Contenu

Table des matières	X	X
Introduction	X	X
Conclusion générale	X	X
Bibliographie	X	X
Résumé	X	X
Table des figures	X	X

Forme

Vérification orthographe		X
Pagination		X
Homogénéité de la mise en page		X