

# Dossier de mise en perspective didactique de mon expérience de recherche

Concours externe spécial de l'agrégation de physique-chimie 2020

Thibault Chastel

## 1 Introduction

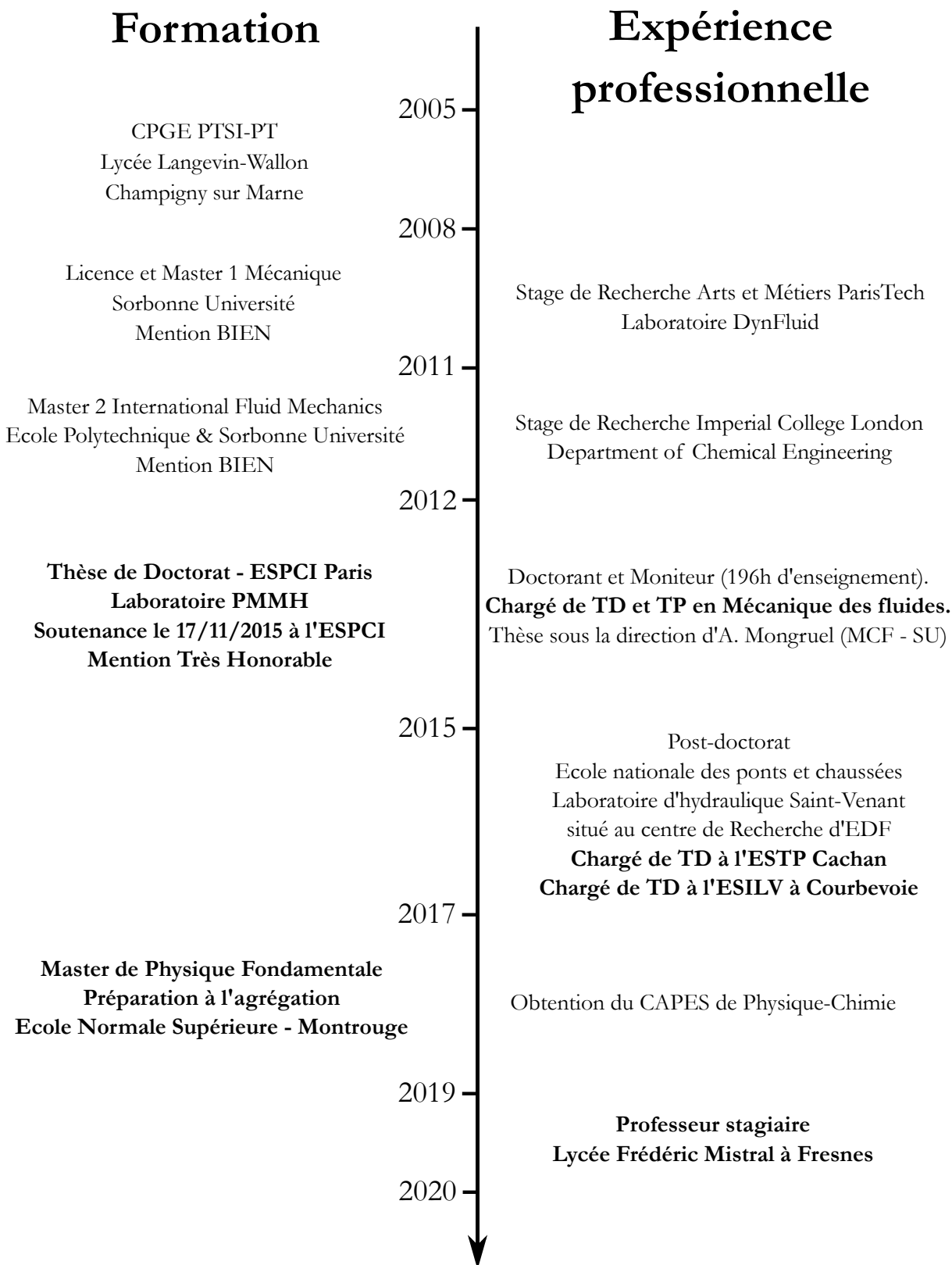
Ma volonté de devenir enseignant s'est développée tout au long de ma scolarité et s'est accentuée pendant mon doctorat lorsque j'ai assuré des Travaux Dirigés à Sorbonne Université. Le plaisir de transmettre un savoir m'a fait réaliser que je me projetais dans une carrière d'enseignement plutôt que dans la recherche. Prendre la juste mesure du niveau d'un élève et varier les méthodes pédagogiques pour assurer une transmission optimale des connaissances, sont des défis que je souhaite relever au quotidien.

Mes expériences de recherche et ma formation contribuent significativement aux qualités requises d'un professeur agrégé. J'ai ainsi pu l'apprécier durant mon année d'enseignant stagiaire au lycée Frédéric Mistral à Fresnes. Depuis le début du confinement, afin de maintenir le lien pédagogique indispensable avec mes élèves, j'ai mis en place des activités à distance (Travaux Pratiques, activités documentaires...), utilisé les Technologies de l'Information et de la Communication pour l'Enseignement dans un contexte pédagogique (Chaîne Youtube, QCM interactif) et créé des activités à niveaux différenciés pour m'adapter à la diversité des élèves. Malgré cette importante charge de travail, j'ai continué en parallèle à préparer l'agrégation de physique au centre de préparation de l'ENS à Montrouge.

Dans ce dossier de mise en perspective didactique de mes travaux de recherche, je montrerai en quoi mes différentes expériences scientifiques constituent un apport et une richesse supplémentaires pour le métier d'enseignant. À travers de nombreuses conférences, articles ou événements populaires comme la Fête de la science, j'ai appris à communiquer et à m'adapter aux différents interlocuteurs que j'ai rencontrés au cours de mon parcours professionnel.

Je présenterai tout d'abord mes travaux de recherche antérieurs à la thèse, puis je détaillerai les travaux que j'ai menés lors de mon doctorat à l'École supérieure de physique et de chimie industrielles de la ville de Paris (ESPCI Paris). Je parlerai ensuite de mes travaux post-doctoraux sous la tutelle de l'École nationale des ponts et chaussées (École des ponts ParisTech). Pour chacune de ces expériences scientifiques, je montrerai comment mes travaux de recherche s'articulent avec les programmes de lycée ou de classes préparatoires aux grandes écoles (CPGE).

## 2 Dates clés de mon parcours



### 3 Travaux de recherche antérieurs au doctorat

Mes premiers pas dans la recherche scientifique ont pris la forme de stages. Ceux-ci m'ont permis d'acquérir certaines compétences indispensables dans la perspective d'un enseignement. J'ai été amené à monter des expériences scientifiques complexes lors de mon stage de Master 2 en 2010 à l'Imperial College de Londres dans le département d'Ingénierie chimique. Pendant mon stage de M1 au sein d'un laboratoire des Arts et Métiers ParisTech, j'ai utilisé un code numérique pour simuler un écoulement au-dessus d'une rampe descendante (Figure 1). Cet écoulement est un cas-test bien connu car il s'agit d'une configuration géométrique simple qui fait apparaître le phénomène de décollement de la couche limite. Un tel décollement peut survenir par exemple lors des phases de décollage et d'atterrissage des avions et conduit à une brusque chute de la portance, connue sous le nom de décrochage. Lorsque la vitesse de l'écoulement atteint une valeur critique, des tourbillons réguliers apparaissent en aval de la rampe : c'est ce que nous souhaitions caractériser.

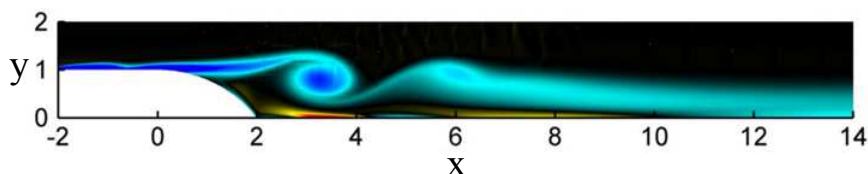


FIGURE 1 – Simulation numérique d'un écoulement de rampe descendante (champ de vorticité) située entre -2 et 0 (U.A).

#### Pour les élèves des lycées ?

L'activité expérimentale en sciences physiques et chimiques peut et doit tirer profit des technologies de l'information et de la communication : expérimentation sur ordinateur, enregistrement des mesures et traitement des données. La simulation numérique est l'une des modalités de la démarche scientifique susceptibles d'être mobilisées par le professeur. Ce stage m'a permis de développer des connaissances en programmation que j'ai consolidées par la suite. Le langage Python étant introduit dès la classe de seconde depuis la rentrée 2019, son utilisation en physique-chimie est devenue courante. En mécanique par exemple, on l'utilise pour analyser une trajectoire, tracer des vecteurs, modéliser une courbe pour en déduire un coefficient directeur. Avec le nouveau baccalauréat, de nouvelles disciplines telles que les « Numérique et sciences informatiques » mettent l'accent sur l'informatique. Dans ce contexte, l'apprentissage d'un langage de programmation me paraît opportun. Enfin, le niveau d'anglais que j'ai acquis au Royaume-Uni a été mis à profit cette année en élaborant des activités différenciées en anglais. L'interdisciplinarité donne l'occasion de faire appel à plusieurs compétences des élèves et de mettre en valeur leurs points forts dans des matières où ils pourraient avoir plus de difficultés habituellement.

### 4 Travaux de recherche doctoraux

#### 4.1 Contexte

J'ai effectué ma thèse de doctorat (2012-2015) au Laboratoire de physique et mécanique des milieux hétérogènes (PMMH) de l'ESPCI Paris sous la direction d'Anne Mongruel. Cette thèse s'inscrivait dans le prolongement d'un stage de recherche de six mois (2011) qui avait donné lieu à une publication<sup>1</sup>.

1. A. Mongruel, **T. Chastel**, E. S. Asmolov, et O. I. Vinogradova, Effective hydrodynamic boundary conditions for microtextured surfaces, *Phys. Rev. E* **87**, 011002 (2013)

Mon travail de thèse, essentiellement expérimental, apporte une contribution à **l'étude du rôle des rugosités de surface dans les interactions hydrodynamiques et les interactions de contact entre deux solides**. Plus précisément, je me suis intéressé à l'approche d'une sphère millimétrique, lisse et rigide, vers une paroi rugueuse dans un fluide visqueux newtonien (Figure 2a). Dans mes expériences, la sphère se déplace sous l'action de la gravité. Pour comprendre l'effet de la rugosité dans ces deux types d'interactions, j'ai fabriqué des surfaces texturées représentant une rugosité modèle. Ces textures, de tailles micrométriques, ont des géométries variées, par exemple un réseau de micro-piliers (Figures 2b et 2c) ou des micro-rainures. J'ai cherché à comprendre l'effet de ces textures sur la dynamique d'approche, de contact et de rebond de la sphère sur la paroi.

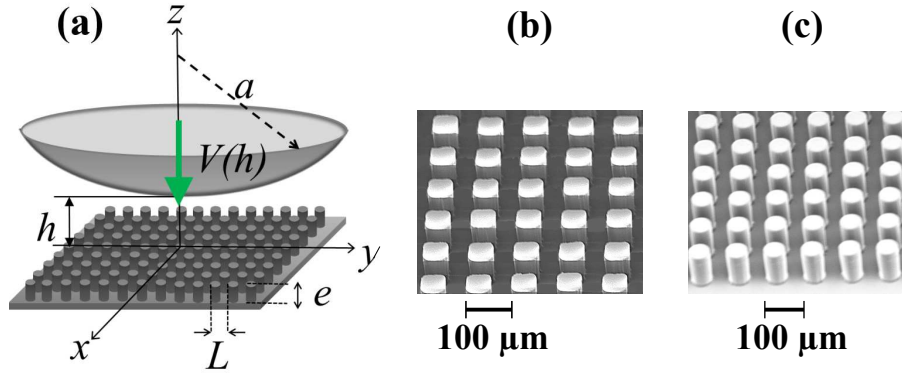


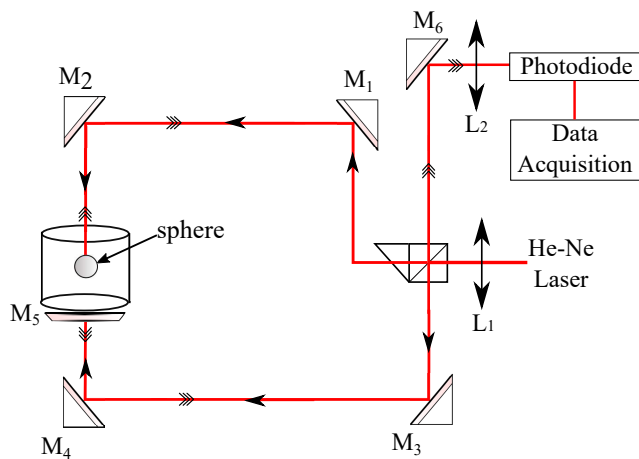
FIGURE 2 – a) sphère approchant un réseau de micro-piliers ; b) micro-piliers carrés ; c) micro-piliers cylindriques

Considérons dans un premier temps la collision entre une sphère (une balle de tennis par exemple) et une paroi (un sol en béton) dans l'air. L'expérience montre que l'énergie cinétique de la sphère est suffisante pour qu'elle rebondisse à une hauteur légèrement inférieure à sa hauteur initiale. L'énergie dissipée entre 2 rebonds successifs est caractérisée par un coefficient de restitution, dépendant uniquement de la hauteur des rebonds. Dans ce problème, les sources de dissipation d'énergie sont faibles (principalement les frottements de l'air et les vibrations).

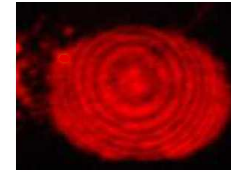
En reproduisant cette même expérience dans un fluide visqueux (collision « immergée »), la sphère communique au fluide de la quantité de mouvement tout au long de sa chute. Lorsqu'elle s'approche de la paroi, la sphère doit écraser le film liquide présent entre les deux surfaces solides ce qui représente une étape cruciale de la dissipation. Cet écoulement de film est décrit par la théorie de lubrification. Les calculs issus de cette théorie permettent de rendre compte de l'augmentation de la force de frottement visqueux au voisinage de la paroi. Si cette force est prépondérante devant l'inertie de la sphère, la collision est purement dissipative : la sphère vient se « coller » à la paroi. Au contraire, si l'inertie est suffisante pour vaincre la force de lubrification, la sphère rebondit. Lorsque la distance sphère-paroi devient très faible, les effets de rugosité jouent un rôle important. En particulier, elles ont pour effet de *diminuer la force de traînée exercée sur la sphère*. Dans les procédés de séparation chimique, cette diminution de la force de traînée est particulièrement recherchée car elle permet de diminuer sensiblement le temps de sédimentation des particules.

Dans notre dispositif expérimental, la sphère est une bille d'acier qui sédimente dans une cellule remplie d'huile de silicone (polydiméthylsiloxane). Pour explorer avec une résolution spatiale suffisante la région proche de la paroi, les déplacements de la sphère sont mesurés par interférométrie laser (Figure 3a). Cette technique reprend le principe de l'interféromètre de Michelson en lame d'air. Ici, cependant, c'est la bille elle-même qui constitue le miroir d'un des bras. Son déplacement modifie l'état d'interférence, et

### a) Montage expérimental



### b) Figure d'interférence



$$\lambda = 632,8 \text{ nm}$$

$$n = 1,404$$

### c) Signal d'approche d'une surface lisse à $Re \ll 1$

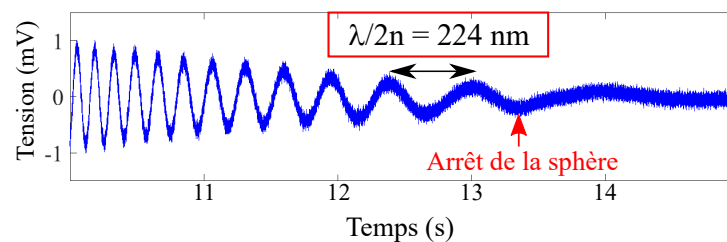
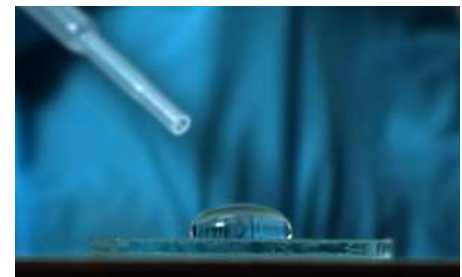


FIGURE 3 – a) montage expérimental d'interférométrie laser b) figure d'interférence obtenue avec une bille-test à l'arrêt c) exemple de signal interférométrique à l'oscilloscope.

le défilement des franges donne alors accès au déplacement de la bille en fonction du temps (Figure 3c). La résolution spatiale est déterminée à partir des maxima du signal. Elle est donc égale à l'interfrange, soit  $\lambda/2n \approx 224 \text{ nm}$ , où  $n$  est l'indice optique du liquide utilisé. Le signal lumineux est ensuite converti en signal électrique par une photodiode directement reliée à un oscilloscope. On montre un exemple de signal enregistré pour l'approche d'une sphère vers une surface lisse en Figure 3b. La lente décélération s'accompagne d'une augmentation de la période du signal. Le contact avec la paroi a lieu lorsqu'il n'y a plus d'oscillation visible. L'arrêt de la sphère est donc déterminé à une frange d'interférence près.

#### Pour les élèves des CPGE ?

Les surfaces texturées que j'ai fabriquées sont extrêmement difficiles à mouiller avec l'eau (propriété de superhydrophobie). Ces surfaces peuvent être utilisées pour définir et mesurer un angle de contact lors d'une séance de TP d'une classe de CPGE section PC (situation de mouillage partiel). Les mesures effectuées seraient à comparer avec celles obtenues pour une surface lisse (mouillage total). Les élèves devront faire preuve d'autonomie pour choisir le matériel adapté (appareil photographique, système de lentille convergente + écran, caméra + objectif grossissant...). La séance se terminerait par la modélisation de l'angle de contact par la relation de Young-Dupré.



Dans nos expériences, la paroi consiste en un réseau de micro-piliers dont nous avons fait varier les

paramètres géométriques (hauteur  $e$  et concentration surfacique  $\phi$ ) sur une large gamme ( $9\text{ }\mu\text{m} < e < 130\text{ }\mu\text{m}$ ;  $0,05 < \phi < 0,45$ ). J'ai réalisé ces surfaces texturées en salle blanche selon les techniques de micro-fabrication empruntées à la micro-électronique.

La dynamique de la sphère de masse  $m_p$  est en réalité gouvernée par un certain nombre de paramètres sans dimension, en particulier les nombres de Reynolds  $Re$  et de Stokes  $St$  particuliers construits pour une vitesse caractéristique de la sphère  $V_T$  représentant la vitesse limite atteinte par la sphère lorsqu'elle se déplace sous l'effet de sa gravité dans le fluide en l'absence d'effets de paroi. Le nombre de Reynolds permet d'évaluer l'importance des forces d'inertie du liquide par rapport aux forces de viscosité dans l'écoulement autour de la sphère. Il s'écrit  $Re = \rho_f V_T (2a) / \mu$ , où  $\rho_f$  est la densité du fluide,  $a$  le rayon de la sphère et  $\mu$  la viscosité dynamique. Lorsque  $Re \ll 1$ , les forces de viscosité sont prépondérantes et les interactions hydrodynamiques (c'est-à-dire transmises par le fluide) sont à longue portée, ce qui signifie que la perturbation engendrée dans le fluide par le déplacement de la sphère décroît très lentement quand la distance à la sphère augmente. Ainsi, la présence de parois peut dans ce régime influencer la sphère et la ralentir. Le nombre de Stokes  $St$  mesure l'importance de l'inertie de la sphère par rapport aux forces de freinage visqueux. Il est donné par l'expression  $St = (m_p V_T) / (6\pi\mu a^2)$ . Lorsque  $St \gg 1$ , le freinage visqueux est peu efficace et le mouvement de la sphère est gouverné par l'équilibre entre les forces de gravité et les forces d'inertie. Les nombres de Reynolds et de Stokes sont liés par la relation  $St = (\rho_p / 9\rho_f) Re$ .

Ma thèse comporte deux parties :

- La première concerne l'approche d'une sphère vers une paroi texturée lorsque l'inertie de la sphère est négligeable devant le freinage visqueux, c'est-à-dire lorsque  $Re \ll 1$  et  $St \ll 1$ . Dans ces conditions, la sphère se colle directement à la paroi (dynamique de collage). Le fluide utilisé dans la cellule est de l'huile silicone cent mille fois plus visqueuse que l'eau. Les textures sont des micro-piliers carrés ou cylindriques (Figures 2b et 2c). Grâce à la technique d'interférométrie employée, j'ai pu détecter et mesurer l'augmentation significative de la vitesse de la sphère du fait de la présence d'une paroi micro-texturée par rapport à la vitesse qui serait la sienne au voisinage d'une paroi lisse. J'ai mis en œuvre plusieurs modèles hydrodynamiques pour décrire cette augmentation de vitesse près de la paroi texturée.
- La seconde concerne la dynamique de la sphère proche de la paroi lorsque l'inertie est du même ordre de grandeur que le freinage visqueux ( $Re \approx 1$  et  $St \approx 1$ ). Pour cela, j'ai utilisé des fluides moins visqueux que dans la partie précédente (huile silicone de viscosité mille fois supérieure à celle de l'eau). Dans ces conditions, la sphère peut soit venir se coller sur le sommet des piliers (dynamique de collage), soit rebondir si son inertie est suffisante (dynamique de rebond). Ces deux dynamiques peuvent être modélisées en tenant compte de l'effet de la texture.

#### Pour les élèves des lycées et des CPGE ?

La notion de force et en particulier le poids d'un objet est abordée dès la classe de 2<sup>de</sup>. La chute d'une bille est un exemple élémentaire illustrant l'effet de la pesanteur terrestre. Une activité expérimentale peut être menée avec les élèves pour mesurer la vitesse de la bille et la comparer avec la valeur théorique pour un corps soumis à son seul poids. À l'aide d'une caméra et d'un logiciel de type CINERIS ou Tracker, il est possible de visualiser la trajectoire de la bille.

Les différences de vitesse observées seront discutées en classe (effet du frottement de l'air, incertitudes de mesures) et une réflexion sur les hypothèses de départ complétera l'étude. Nous pourrions finir l'activité avec une analyse de document présentant des expériences dans d'autres fluides et conclure sur l'effet de la viscosité. Une réponse quantitative à cette question sera apportée en deuxième année de CPGE (section PC) en faisant la même expérience dans un liquide visqueux comme la glycérine. Les élèves seront invités à calculer la vitesse limite de la bille lorsque celle-ci est soumise à la gravité, aux forces de viscosité et à la poussée d'Archimède. Il s'agit de la vitesse  $V_T$  que j'ai introduite plus haut pour définir les nombres de Reynolds et de Stokes. Le résultat pourrait être profitablement comparé à une valeur expérimentale obtenue lors de travaux pratiques. Une application directe est la mesure de la viscosité d'un liquide (principe du viscosimètre à bille). Cette activité expérimentale pourrait aisément s'intégrer dans un TIPE avec l'étude de l'influence de divers paramètres du problème. En modifiant la nature du fluide (mélange eau-glycérol, liquide vaisselle, maïzena), des élèves auraient la possibilité d'explorer le domaine de la rhéologie qui concerne les fluides non newtoniens. Ce domaine est particulièrement actif dans l'industrie (cosmétique, pharmaceutique, bâtiment, etc.). Un autre projet expérimental pourrait consister à étudier l'influence de la paroi frontale ou du confinement dû aux parois latérales.

### Grandes lignes d'une activité expérimentale niveau CPGE section PC : mesure de la viscosité d'un fluide visqueux newtonien à $Re \ll 1$

#### Objectifs pédagogiques :

- savoir utiliser l'expression convenable de la force de traînée pour une sphère en mouvement rectiligne newtonien (extrait du programme de PC)
- comprendre le principe d'un viscosimètre à bille

On considère une bille de rayon  $a$  dans un tube, en mouvement de translation dans du glycérol à la vitesse  $\vec{v}$

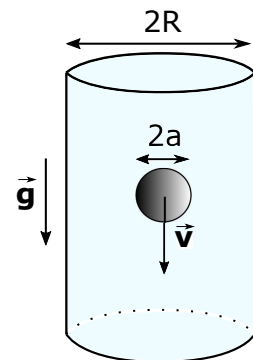
**Hypothèses :** Régime permanent atteint, pas d'influence du fond du tube, écoulement laminaire ( $Re \ll 1$ )

#### I - Travail préliminaire (s'approprier, analyser) :

- Faire un bilan des forces exercées sur la bille
- Déterminer l'équation du mouvement de la bille
- Déterminer la vitesse limite de la bille  $V_T$

#### II - Travail expérimental (réaliser) :

- tracer la vitesse de la sphère en fonction du temps pour différents rayons
- utilisation d'une caméra rapide et d'un logiciel de traitement d'image
- traçage de la courbe expérimentale  $V_T = f(a)$
- Déduire la viscosité du fluide et discuter des incertitudes (**communiquer**)



#### III - Pour aller plus loin : effet du confinement latéral. Remise en cause de l'hypothèse d'un milieu infini.

- reprendre la partie 1 en introduisant une correction à la force de traînée tenant compte de l'effet des parois latérales :

$$\vec{F} = -6\pi\mu \frac{a}{1 - 2.1 \frac{a}{R}} \vec{v}$$

- pour un TIPE : ouverture sur la rhéologie. Effet d'un fluide visqueux non-newtonien sur la dynamique de la sphère.

## 4.2 Principaux résultats

### 4.2.1 À petits nombres de Reynolds et de Stokes ( $Re \ll 1$ et $St \ll 1$ )

La figure 4 illustre l'effet des textures sur la dynamique de la sphère au voisinage de la paroi à  $Re \ll 1$ . La vitesse  $V(h)$  de la sphère, rapportée à la vitesse terminale  $V_{St}$ , est tracée en fonction de la distance  $h$ ,



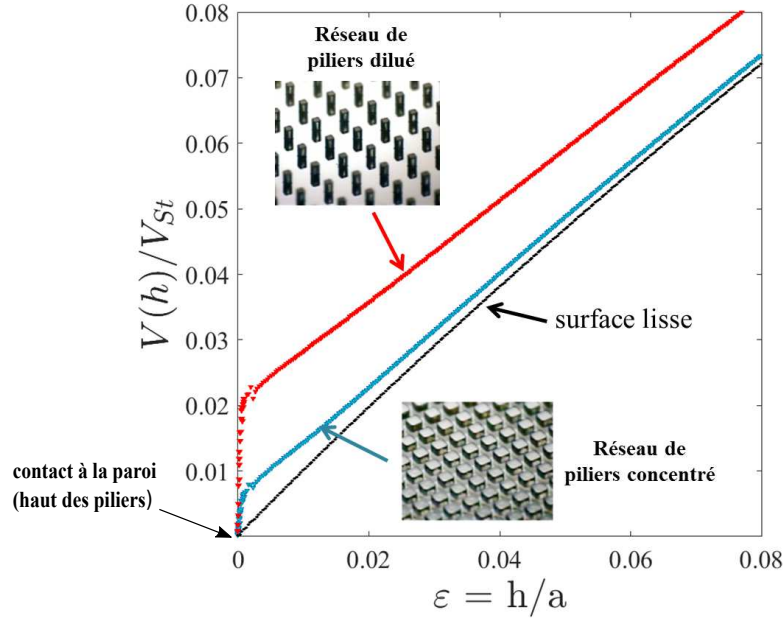


FIGURE 4 – Comparaison de l’approche d’une sphère vers une paroi lisse (courbe noire) avec l’approche vers deux parois texturées : réseau de piliers concentré ( $e = 85 \mu\text{m}$ ,  $\Phi = 0.3$ , courbe rouge) et dilué ( $e = 130 \mu\text{m}$ ,  $\Phi = 0.05$ , courbe bleue).

rapportée au rayon  $a$  de la sphère ( $\varepsilon = h/a$ ). Loin de la paroi ( $h/a \gg 1$ ), la force de traînée exercée sur la sphère est la force de traînée de Stokes  $\vec{F} = -6\pi\mu a\vec{v}$ . Pour  $h/a \ll 1$ , cette force de traînée est augmentée d’un considérable facteur  $a/h$  ce qui ralentit drastiquement la sphère : c’est la force de traînée de Taylor (force de lubrification). Lorsque cette force de lubrification est équilibrée par les forces de gravité, un régime linéaire  $V(h)/V_{st} = h/a$  est observé pour la vitesse dans le cas d’une approche vers une surface lisse.

Lorsque la surface lisse est remplacée par une surface texturée, la vitesse de la sphère est augmentée par rapport au cas d’une surface lisse puis décroît brusquement juste avant le contact. L’augmentation de vitesse est d’autant plus importante que le réseau de piliers est dilué (courbe rouge). Cette augmentation est due au fait que la surface texturée permet à l’écoulement de « s’échapper » à travers le réseau de piliers équivalent à une surface poreuse. La pression exercée sur la sphère est donc plus faible que celle qu’elle subit dans le cas d’une surface lisse située en haut des piliers.

Cet effet des textures sur la vitesse de la sphère peut être décrit par un modèle de surface lisse équivalente en considérant que la force de traînée sur la sphère est identique à celle que la sphère subirait à l’approche d’une surface lisse imaginaire, qui serait décalée d’une longueur  $s_{\text{eff}}$  à partir du haut des piliers (Figure 5a). Cette longueur de décalage est liée à la longueur de glissement effective d’un réseau de piliers<sup>2</sup>. Un autre modèle consiste à remplacer le milieu composite (piliers et fluide) par un milieu continu équivalent dont la viscosité effective est déterminée par ajustement aux courbes expérimentales (Figure 5b). Un écoulement type Poiseuille est créé par une sphère de rayon  $a$  s’approchant perpendiculairement de deux couches de fluides superposées, non miscibles et de viscosités différentes. Un fluide 1 de viscosité  $\mu_1$  baigne la sphère. Il est en contact avec un fluide 2 de viscosité  $\mu_2 = k\mu_1$  où  $k$  est une constante. Ce coefficient  $k$ , supérieur à 1, est un paramètre ajustable du modèle. Notons que  $\mu_2 > \mu_1$  est la conséquence de la présence de piliers qui augmentent la dissipation visqueuse. Ce modèle a fait l’objet d’une publication<sup>3</sup>.

2. C. Ybert, C. Barentin, C. Cottin-Bizonne, P. Joseph et L. Bocquet, Achieving large slip with superhydrophobic surfaces : Scaling laws for generic geometries, *Phys. Fluids*, **19**, 123601 (2007)

3. T. Chastel, A. Mongruel, Squeeze flow between a sphere and a textured wall, *Phys. Fluids*, **28**, 023301 (2016)



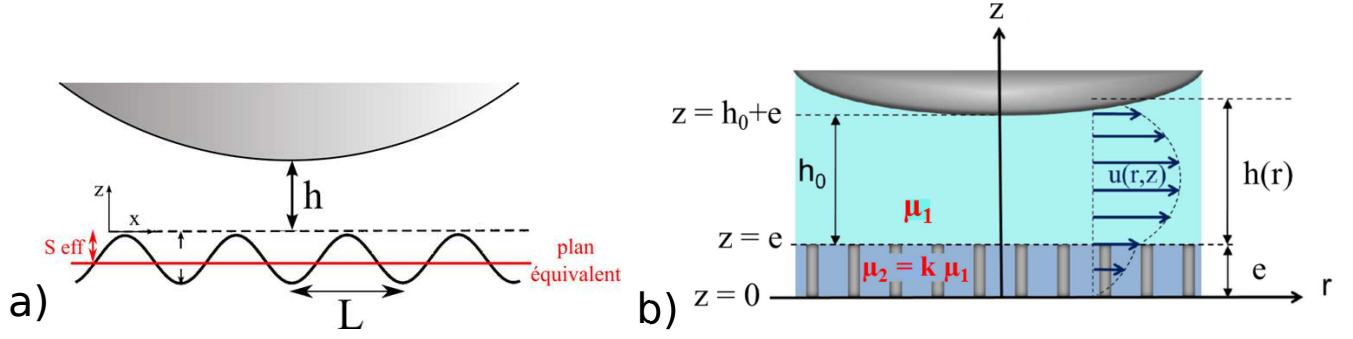


FIGURE 5 – a) Modèle de surface lisse équivalente. La paroi effective est décalée d’une distance  $s_{\text{eff}}$  depuis le sommet des rugosités ; b) modèle à deux couches de fluides de viscosité  $\mu_1$  et  $k\mu_1$ .

#### 4.2.2 À nombres de Reynolds et de Stokes modérés ( $Re \approx 1$ et $St \approx 1$ )

L’exploration de cette gamme de nombres de Reynolds et de Stokes a été permise par l’amélioration du système d’acquisition. Nous souhaitons comprendre le rôle de l’inertie de la sphère et celui des textures sur la dynamique globale. Une étude précédente avait montré, en utilisant une caméra rapide, que le nombre de Stokes critique de transition pour que la sphère rebondisse sur la paroi était de l’ordre de 10. Après une série d’expériences menées à  $2 < St < 7$ , nous avons identifié deux régimes distincts selon le nombre de Stokes et la géométrie des textures :

- Le premier est le régime de collage évoqué précédemment. L’énergie cinétique de la sphère n’est pas suffisante pour qu’elle rebondisse : la sphère vient se coller à la paroi. La dynamique de la sphère est néanmoins plus riche qu’à  $Re \ll 1$  et  $St \ll 1$  comme le montre l’évolution de la vitesse de la sphère en fonction de sa distance à la paroi Figure 6 pour  $St = 4, 7$ . Dans le cas d’une approche vers une surface lisse, l’évolution n’est plus seulement linéaire : un second régime est visible au delà d’une distance critique ( $h \approx 0,025$  mm). Ce second régime est caractéristique d’un régime inertiel. À ce jour, ces deux régimes n’ont pas été mis en évidence par d’autres techniques expérimentales. Le mouvement de la sphère peut être modélisé en utilisant la force de traînée modifiée par les textures (modification établie dans la première partie de la thèse) avec un terme correctif dû aux effets inertiels<sup>4</sup>.
- Le second régime observé est le régime de rebond de la sphère sur les piliers déformables. J’ai montré dans la première partie de la thèse que l’effet principal des textures était d’augmenter la vitesse de la sphère au voisinage de la paroi. Ainsi, **pour un nombre de Stokes fixé, il est possible d’augmenter l’énergie cinétique de la sphère en modifiant seulement la géométrie de sa surface d’approche**. Pour un réseau de piliers, plus la fraction surfacique du réseau est faible et la hauteur des piliers est grande, plus l’augmentation de la vitesse sera significative. Cette dynamique de rebond est visible sur la Figure 6 (courbe jaune) pour un réseau de piliers dilué (toujours pour  $St = 4, 7$ ). Dans cette expérience, la sphère vient heurter les piliers avec une vitesse non nulle à  $h = 0$  ( $\approx 50$  mm s<sup>-1</sup>) pour en ressortir avec une vitesse plus faible ( $\approx 15$  mm.s<sup>-1</sup>). La région  $h < 0$  correspond au milieu composite fluide-piliers. Ainsi, mes expériences donnent accès pour la première fois à la dynamique du contact sphère-piliers pendant le processus de rebond. Les piliers, de module de Young  $E = 1.4$  GPa, se déforment de quelques microns du fait de leur élasticité. Un résultat important de mon travail est que le nombre de Stokes critique de transition dépend significativement de la rugosité de la surface. En particulier, des micro-rebonds sont obtenus pour  $St = 3,8$ , valeur inférieure à celle mesurée par caméra rapide pour une surface

4. T. Chastel, A. Mongruel, Sticking collision between a sphere and a textured wall, *Phys. Rev. Fluids*, **4**, 014301 (2019)

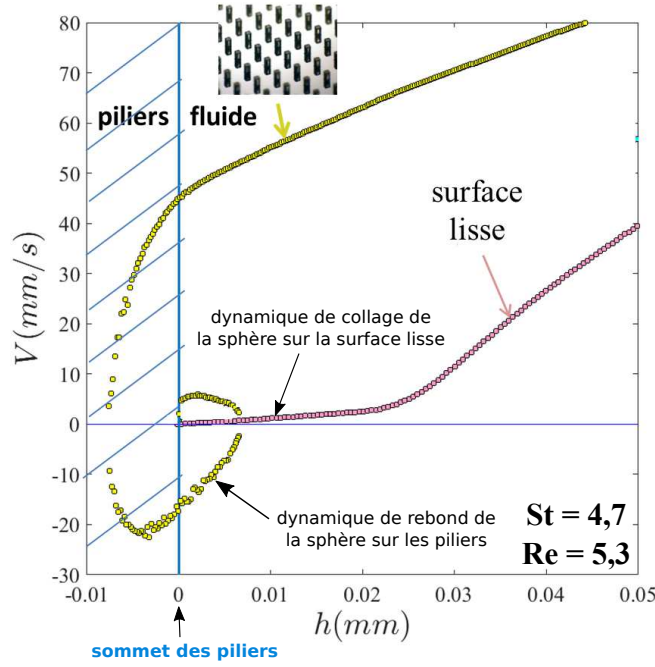


FIGURE 6 – Exemple de dynamique de collage et rebond à  $St = 4,7$ . La zone  $h < 0$  correspond à l'enfoncement de la sphère dans les piliers déformables (contact élastique).

lisse ( $\approx 10$ ). De nombreux paramètres peuvent être déduits de ces courbes de rebond, tels que l'enfoncement maximal  $\delta_{max}$  de la sphère dans les piliers, les vitesses d'impact  $V_i$  et de rebond  $V_r$ , toutes deux définies à  $h = 0$  (sommet des piliers). Cela nous a amenés à développer un modèle de contact élastique en considérant que les piliers se déforment indépendamment dans leur domaine élastique. En l'absence de dissipation pendant le contact, ceci conduit à un enfoncement maximal de la sphère dans les piliers<sup>5</sup> qui varie comme  $\delta_{max} \propto V_i^{2/3}$ . Pour rappel, la théorie de Hertz pour l'enfoncement d'une sphère dans un plan élastique montre que  $\delta_{max} \propto V_i^{4/5}$ .

## 5 Travaux de recherche post-doctoraux

J'ai effectué un post-doctorat avec une charge d'enseignement à l'École spéciale des travaux publics durant l'année qui a suivi l'obtention de mon doctorat. Plus précisément, j'ai travaillé en tant que chargé de recherche de l'École des ponts ParisTech au sein du Laboratoire d'hydraulique Saint-Venant (commun à l'École des ponts ParisTech, EDF R&D et CEREMA). Cette année m'a permis de découvrir la recherche industrielle, ses bénéfices mais aussi ses contraintes. Mon travail consistait à étudier l'amortissement des vagues dans le cadre d'un projet d'EDF sur la réhabilitation d'herbiers sous-marins (*Zostera Noltii*) dans l'étang de Berre, un site industriel majeur à l'ouest de Marseille. Les herbiers aquatiques qui y vivent subissent des contraintes hydrodynamiques importantes du fait des vagues de vent qui entraînent leur disparition progressive. J'avais pour mission de trouver une solution écologique pour redévelopper ces herbiers sous-marins, indicateurs d'une bonne qualité de l'eau. Mais auparavant, je me suis posé une question très générale : des herbiers ou des plantes aquatiques sont-ils capables de réduire eux-mêmes significativement l'énergie des vagues ?

Mon travail était essentiellement expérimental et j'ai pu profiter des installations du centre de recherche

5. **T. Chastel**, P. Gondret et A. Mongruel, Texture-driven elastohydrodynamic bouncing, *J. Fluid Mech* (2016), vol. 805, pp. 577-590

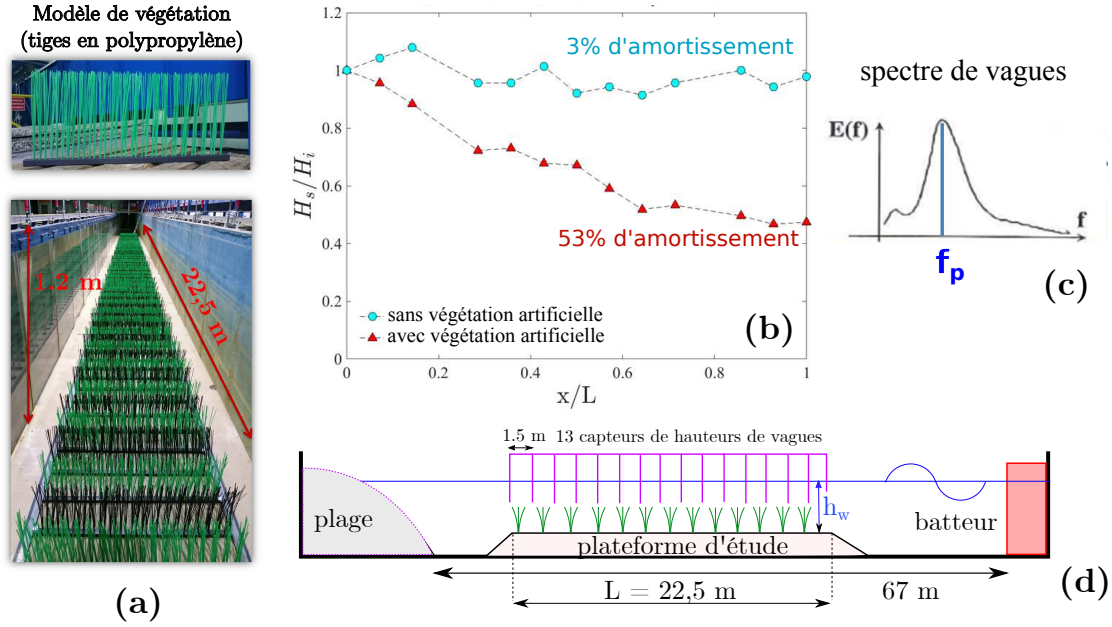


FIGURE 7 – a) Modèle de végétation artificielle et photographie du canal ; b) hauteur significative des vagues rapportée à la hauteur incidente ( $H_i = 0,15$  m) en fonction de la distance réduite (pour les treize capteurs répartis sur  $L = 22,5$  m). Comparaison entre les cas avec et sans végétation artificielle. Ici, la densité des tiges est de  $185 \text{ m}^{-2}$ , la hauteur d'eau au repos est de  $0,50$  m et la fréquence de pic des vagues est  $f_p = 0,40 \text{ s}^{-1}$  ; c) allure du spectre de vagues imposé au batteur ; d) schéma du canal hydraulique.

d'EDF. Les essais ont eu lieu dans un impressionnant canal de 80 mètres de long et 1,50 mètres de large (Figure 7a). Le principal objectif était de quantifier l'atténuation des vagues du fait de la présence d'un herbier artificiel disposé au fond d'un canal hydraulique. La végétation artificielle choisie était constituée de tiges en polypropylène de hauteur variable (Figure 7a). Ces tiges avaient l'avantage de présenter un module de Young peu éloigné de celui des herbiers naturels et une géométrie facile à modéliser.

Pour être au plus près des conditions réelles, les vagues produites par le batteur du canal sont irrégulières et engendrent un spectre classique d'état de mer qui comporte un pic en fréquence  $f_p$ . Les vagues ainsi créées sont caractérisées par une hauteur significative  $H_s$  qui représente la moyenne des hauteurs mesurées entre crête et creux du tiers des plus fortes vagues. Cette définition historique vient de l'estimation de la hauteur des vagues par l'observation visuelle : la hauteur significative est proche de celle qu'estimerait un observateur humain. Différentes conditions hydrodynamiques (hauteur d'eau initiale, paramètres des vagues) et géométriques (rapport de la hauteur des tiges à la hauteur d'eau, densité des tiges) ont été testées. Il apparaît que pour une longueur-test de 22,5 mètres, l'amortissement des vagues peut atteindre 67 % : l'atténuation des vagues par des herbiers naturels est donc très efficace. La hauteur des vagues est mesurée à l'aide de treize capteurs répartis tout le long du canal. À partir des résultats expérimentaux et d'un modèle de dissipation d'énergie<sup>6</sup>, j'ai déduit un coefficient de traînée global  $C_d$  qui dépend en particulier de deux nombres sans dimension<sup>7</sup>, le nombre de Reynolds  $Re$  et le nombre de Keulegan-Carpenter  $KC$  défini par  $KC = VT_p/D$  où  $D$  est le diamètre des tiges et  $T_p$  la période temporelle des vagues ( $T_p \propto f_p^{-1}$ ).

6. F.J. Mendez et I.J. Losada, An Empirical Model to Estimate the Propagation of Random Breaking and Nonbreaking Waves over Vegetation Fields, *Coastal Engineering*, 51 (2004)

7. T. Chastel, K. Botten, N. Durand et N. Goutal, Bulk Drag Coefficient of a subaquatic vegetation subjected to irregular waves, *La Houille Blanche* (2020)

---

## 6 Valorisation des acquis dans l'enseignement secondaire et supérieur

La physique et la chimie sont des sciences où l'expérience possède une place centrale. Mes compétences expérimentales développées dans différents domaines de la physique lors de ma thèse (mécanique, optique, sciences des matériaux) représentent un atout majeur dans le métier d'enseignant.

En mécanique, j'ai effectué cette année en classe de seconde une chronophotographie de la chute d'une bille dans un fluide visqueux pour introduire la notion de mouvement rectiligne uniforme. J'ai ensuite interrogé les élèves sur l'effet de la paroi du fond sur la vitesse de la sphère. Ces derniers ont tous observé son ralentissement et ont ainsi mis en évidence, sans le savoir, la force de lubrification ! Cette observation a ensuite été confirmée par une chronophotographie décrivant un autre type de mouvement : le mouvement décéléré.

Mes connaissances solides en mécanique des fluides m'ont également été précieuses dans l'enseignement supérieur durant mon monitorat à Sorbonne Université et lorsque j'ai été chargé de travaux dirigés dans deux écoles d'ingénieurs (ESTP à Cachan et l'ESILV à la Défense). Un des travaux pratiques consistait par exemple à déterminer la viscosité d'un liquide avec un rhéomètre constitué de deux cylindres concentriques dont un est mis en rotation (écoulement de cisaillement). Cette expérience était faite régulièrement durant ma thèse pour connaître précisément la viscosité de l'huile silicone utilisée et son évolution avec la température. Durant la séance, j'en profitais pour injecter un film d'encre dans le liquide avant de mettre en rotation le cylindre. On observait ainsi le film d'encre s'étendre depuis la surface mobile témoignant ainsi du mouvement du liquide et de l'existence des forces de viscosité.

Dans le domaine de l'optique, le réglage, l'utilisation et la compréhension de l'interféromètre de Michelson est en adéquation avec les capacités exigibles d'un professeur de CPGE. Son utilisation pour la mesure de la vitesse de sédimentation d'une particule me semble être une application originale à la base d'un sujet d'examen.

En m'inspirant des conférences confinées de Julien Bobroff, chercheur à l'université Paris-Saclay, j'ai créé une chaîne Youtube pour mettre en place des travaux pratiques à faire chez soi durant la période de confinement. J'ai, par exemple, introduit la notion de réactif limitant à mes élèves en faisant réagir du vinaigre et du bicarbonate de soude dans une bouteille fermée par un ballon de baudruche. Ces deux réactifs forment du dioxyde de carbone qui gonfle le ballon dont la taille dépend quantité de bicarbonate introduite.

Enfin, mon expérience dans la recherche scientifique me permet de parler aux élèves du métier de chercheur et de la pratique d'une démarche scientifique pouvant être à l'origine de grandes découvertes. Cette démarche d'investigation est analogue à celle attendue d'un élève confronté à une tâche complexe qui peut se présenter sous la forme d'une série de documents et d'une question unique.

### 6.1 En tant que jury de concours

De 2017 à 2019, j'ai été examinateur pour l'épreuve de TIPE (Travaux d'initiative personnelle encadrés) de la filière PSI qui se déroule à l'IUT Paris-Descartes. Les thèmes changent d'une année sur l'autre et imposent aux candidats d'exercer leur imagination. La mission de l'examineur est non seulement d'évaluer le rapport final mais aussi de juger la présentation (15 minutes) et l'aptitude de l'élève à répondre aux questions (15 minutes). Le travail, qui s'effectue en binôme avec un autre examinateur dont le profil scientifique est complémentaire du nôtre, est particulièrement enrichissant car les sujets choisis par les candidats sont très divers et peuvent être de nature expérimentale, numérique ou bibliographique. C'est souvent l'occasion pour les étudiants d'allier leur passion avec un projet de recherche. C'est un travail qui exige un grand niveau de responsabilité. Mon expérience dans la recherche, académique et industrielle, est un atout majeur pour juger nos ingénieurs de demain. Cet exercice demande un esprit critique et une grande culture scientifique que j'ai acquis durant mon parcours professionnel et lors de ma préparation à l'agrégation à l'Ecole Normale Supérieure (site de Montrouge).