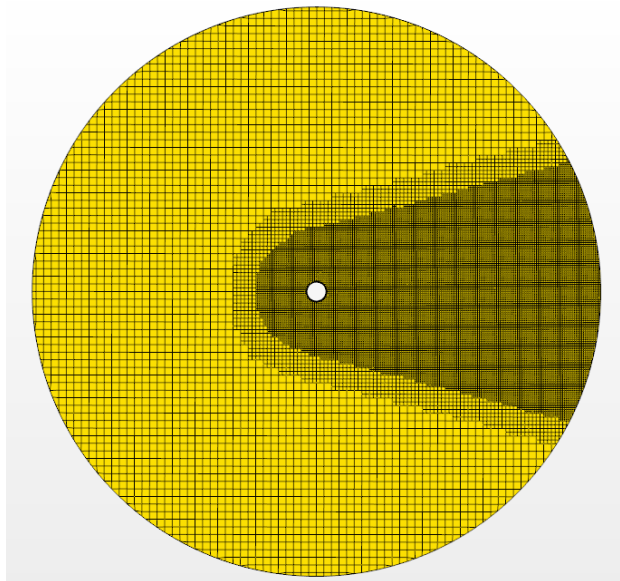


AER113 – Aéroacoustique Industrielle

TD 1 : Aéroacoustique numérique autour d'un cylindre circulaire

1. Introduction

L'objectif de ce premier TD est de simuler numériquement l'aéroacoustique autour d'un cylindre circulaire. Pour cela, le logiciel CFD (Computational Fluid Dynamics) Star CCM+ sera utilisé. Il permettra de simuler l'écoulement autour du cylindre. On peut observer ci-dessous le domaine de calcul avec son maillage (discrétisation spatiale) qui est plus fin en aval du cylindre pour mieux discrétiser le lâcher de tourbillons.



Les équations de Navier-Stokes compressibles seront résolues lors de cette simulation 2D. Le maillage pourrait être trop grossier pour réaliser une simulation numérique directe de l'acoustique. De plus, afin d'accélérer la simulation, nous utiliserons un schéma de discrétisation temporelle implicite, qui permet de définir des pas de temps plus élevés qu'un schéma explicite. En contrepartie, les ondes acoustiques seront dissipées en appliquant ce schéma implicite.

Pour résumer, les discrétisations spatiale (maillage) et temporelle (pas de temps) définies pour cette simulation ne permettront pas de propager les ondes acoustiques générées à la surface du cylindre, car elles seront « dissipées numériquement ».

Le maillage est également trop grossier dans le sillage du cylindre et il ne pourra y discrétiser que les plus grosses structures turbulentes.

A partir de cette seule simulation de l'écoulement, il sera donc impossible de :

- propager les ondes acoustiques générées à la surface du cylindre ;
- calculer les sources volumiques sonores, générées par l'ensemble des structures turbulentes dans le sillage.

Nous couplerons donc cette simulation de l'écoulement à un code de propagation acoustique. Le modèle de Ffowcs Williams-Hawkings sera utilisé. Ce modèle prend en entrée les fluctuations de pression à la surface du cylindre et calcule le rayonnement acoustique dû à ce chargement instationnaire sur le cylindre. Il s'agit d'un opérateur linéaire ; on peut donc calculer l'acoustique

rayonné en champ lointain sans avoir à discrétiser l'espace. Ce modèle fait l'hypothèse que l'écoulement est uniforme ; c'est le cas pour l'écoulement considéré, sauf à proximité du cylindre et dans son sillage.

Par contre, on ne prend pas en compte les effets du rayonnement acoustique sur l'écoulement fluide, comme lors des boucles de rétroaction aéroacoustique que vous avez vu au cours précédent.

De plus, la propagation du bruit généré par les structures turbulentes dans le sillage ne pourra pas être calculée dans son intégralité. En effet, comme la simulation de l'écoulement ne peut considérer que les plus grosses structures turbulentes, on ne pourra pas calculer les sources sonores des structures plus petites et les propager.

Cela n'est pas problématique, puisque ces sources sonores sont négligeables par rapport à celles générées à la surface du cylindre.

2. Simulation aérodynamique

Pour lancer Star CCM+ (sous Linux), il suffit de taper les deux commandes suivantes dans le terminal :

```
module load starccm/12.04
starccm
```

Une fois le Star CCM+ ouvert, charger la simulation :

File -> Load Simulation

Charger la simulation sur 8 coeurs pour accélérer le calcul

Process options = Parallel on Local Host

Compute Processes = 8

Choisir le fichier cylinderBase.sim

File = cylinderBase.sim

Ok

Pour visualiser le domaine de calcul :

Scenes -> double clic sur Geometry Scene 1

2.1 Définition des modèles

Nous allons choisir ici tous les modèles pour simuler l'écoulement, et ainsi calculer les variations de pression qui généreront les sources acoustiques :

Continua -> Physics 1 -> double clic sur Models

Une fenêtre s'ouvre, permettant alors de choisir de nombreux modèles. Choisir :

Time = Implicit Unsteady (pour un écoulement instationnaire, c'est ce schéma qui va dissiper les ondes acoustiques, mais il permet de définir des pas de temps plus grands)

Material = Gas

Flow = Segregated Flow

Equation of State = Ideal Gas (même si l'écoulement au loin est incompressible ($Mach = 0.15$), des accélérations autour du cylindre peuvent rendre l'écoulement localement compressible ($Mach > 0.3$). Il faut donc au minimum choisir « Ideal Gas » (gaz parfait) pour considérer la compressibilité de l'air).

Energy = Segregated Fluid Temperature

Désactiver « Auto-select recommended models »

Viscous Regime = Turbulent

Turbulence = Detached Eddy Simulation

Detached Eddy Simulation = SST (Menter) K-Omega Detached Eddy

K-Omega Wall Treatment = All Y+ Wall Treatment

Tous les modèles restants sont optionnels. A noter parmi ces modèles la présence d'un modèle « Aeroacoustics ». Nous y reviendrons plus tard quand nous définirons les modèles aéroacoustiques avec la seconde approche.

2.2 Définition des conditions initiales et limites

On va définir une solution initiale qui est uniforme dans tout le domaine de calcul, avec une vitesse suivant l'axe X de 50m/s :

Continua -> Physics 1 -> Initial Conditions

Laisser toutes les valeurs par défaut, sauf « Velocity » : Value à [50.0, 0.0, 0.0] m/s

On va maintenant définir les conditions limites, c'est à dire les conditions qui bornent le domaine de calcul (conditions au loin, paroi du cylindre ...):

Regions -> Body 1 -> Boundaries

Laisser les valeurs par défaut pour CylinderWall (par défaut, une paroi est fixe et adhérente)

Laisser les valeurs par défaut pour Freestream, sauf Mach Number à 0.144 (par défaut, une condition Freestream est à Mach 0.7 dans la direction de l'axe X)

Laisser tout le reste par défaut

2.3 Définition du solver

On va d'abord définir la discrétisation temporelle. Choisir le bon pas de temps est très important pour une simulation aéroacoustique. Pour cela, on considère trois critères et on retient la plus petite valeur du pas de temps :

* Nombre de Courant Convectif : les solvers implicites (on a choisi implicit Unsteady pour la discrétisation temporelle) sont souvent stables pour des nombres de Courant (également appelé CFL) localement entre 10 et 100. Mais globalement, la valeur moyenne dans le domaine doit être autour de 1. Pour ce cas, un pas de temps de $2.5e-5$ s donne un Nombre de Courant Convectif proche de 1.

* Fréquence Maximale : Par exemple, pour obtenir 10 points pour discrétiser une onde à 3 000 Hz (fréquence à laquelle l'oreille humaine est la plus sensible), le pas de temps doit être de $10 \times 3\,000 \text{ Hz} = 30\,000 \text{ Hz} = 3.33e-5 \text{ s}$. Cependant, le schéma de discrétisation temporelle implicite dissipera les ondes acoustiques. Ce critère ne sera donc pas considéré pour notre étude.

* Nombre de Strouhal : Au nombre de Reynolds étudié ici (63 800), un lâcher de tourbillons va s'opérer à un nombre de Strouhal de 0.22, c'est à dire à une fréquence de 500Hz dans notre cas. Comme pour la fréquence maximale, pour obtenir 10 points pour discrétiser une onde à 500 Hz, le pas de temps doit être de $10 \times 500 \text{ Hz} = 5\,000 \text{ Hz} = 2.0e-4 \text{ s}$

Le plus petit pas de temps est donc ici de $2.5e-5$ s.

Cependant la simulation diverge si on démarre avec ce pas de temps. Nous utiliserons donc une valeur de $=2.5e-6$ s pour les 10 premiers pas de temps. Puis on l'augmentera à $2.5e-5$ s par la suite.

Pour définir la discrétisation temporelle dans Star CCM+ :

Solvers -> Implicit Unsteady

Temporal Discretization = 2nd-order

Time-Step = $2.5e-6$ s

Pour la discrétisation spatiale, nous laisserons les paramètres par défaut puisque le logiciel a sélectionné les paramètres adéquats, lorsque l'on a sélectionné « Detached Eddy Simulation ».

2.4 Critères d'arrêt

Il est nécessaire de définir des critères d'arrêt, que l'on peut distinguer en deux catégories pour une simulation instationnaire :

* Un critère de fin de pas de temps. Une fois ce critère atteint, la simulation passe au pas de temps suivant ;

* Un critère de fin de simulation. Une fois ce critère atteint, la simulation est terminée.

Pour le critère de fin de pas de temps, nous utiliserons le nombre maximum d'itérations par pas de temps :

Stopping Criteria -> Maximum Inner Iterations

Activer Enabled

Maximum Inner Iterations = 5

Pour la fin de la simulation, nous définissons un « temps physique maximum » de 0.12s. C'est à dire que nous simulerons un écoulement sur 0.12s « réelle », à ne pas confondre avec le temps de calcul qui le temps que durera la simulation (ici 5h de calcul environ sur 8 coeurs) :

Stopping Criteria -> Maximum Physical Time

Activer Enabled

Maximum Physical Time = 0.12s

Cependant il faudra stopper le calcul après 10 pas de temps pour passer augmenter sa valeur de 2.5e-6 s à 2.5e-5 s :

Stopping Criteria -> Maximum Steps

Activer Enabled

Maximum Steps = 10

2.5 Monitors et plots

Un « monitor » est le suivi d'une variable durant la simulation. Pour un calcul instationnaire, il permet de sauvegarder l'évolution temporelle de plusieurs variables en différents points du domaine de calcul.

En aéroacoustique, les monitors peuvent être utilisés pour « mesurer » les variations de pression, ce qui permet ensuite de calculer le spectre sonore une fois la simulation terminée. Comme les ondes acoustiques seront dissipées dans notre cas, ils ne seront pas utilisés pour déterminer le spectre sonore.

Un « plot » est, quant à lui, la représentation graphique montrant l'évolution temporelle du monitor.

On va définir un point dans le sillage pour mesurer les fluctuations de vitesse :

Aller sur Derived Parts et Clic droit -> New Part -> Probe -> Point

On va pouvoir renommer le point créé :

Le choisir et clic droit -> Rename et entrer le nom « Probe-wake »

Pour le définir, dans properties :

Parts = Body 1

Entrer les coordonnées dans Point [0.05, 0.0, 1E-4] m, m, m

On peut visualiser la localisation d'un probe en le sélectionnant. Il apparait en rose sur la scène ouverte plus tôt pour visualiser le maillage.

On va maintenant créer un report pour en extraire la vitesse en ce point :

Aller sur Reports et Clic droit -> New Report -> Maximum

Pour le Renommer :

Aller sur le report créé et clic droit -> Rename et entrer « Vmag wake »

Ensuite, dans Properties :

Parts = choisir le point dans les Derived Parts

Scalar Field Function = Velocity Magnitude

On va également créer des reports pour les coefficients de traînée et de portance du cylindre :

Aller sur Reports et Clic droit -> New Report -> Force Coefficient

Pour le Renommer :

Aller sur le report créé et clic droit -> Rename et entrer « Cd »

Ensuite, dans Properties :

Direction = [1.0, 0.0, 0.0] m, m, m

Force Option = Pressure +Shear

Parts = Body 1 : Cylinderwall

Reference Area = 8.04E-4 m²

Reference Density = 1.18 kg/m^3

Reference Velocity = 50.0 m/s

Recommencer la même opération avec le coefficient de portance, en le renommant « Cl » et avec une direction [0.0, 1.0, 0.0] m, m, m

Pour sauver et visualiser l'évolution temporelle de ces 3 monitors :

Sélectionner les 3 reports -> Create Monitor and Plot from Report

Le logiciel demandera si on veut tracer les évolutions temporelles sur des graphiques différents ou sur un seul graphique. On choisira un graphique pour chaque monitor :

Choisir Multiple Plots

Trois Monitors et trois plots sont alors créés automatiquement.

Pour sauver les évolutions de la vitesse et des coefficients à chaque pas de temps :

Dans Monitors, sélectionner les 3 monitors et clic droit -> Edit

Vérifier que Enabled soit activé

Trigger = Time Step

Vérifier que Time-Step Frequency soit à 1

2.6 Sauvegarde automatique

La simulation de l'écoulement durant plusieurs heures, il est nécessaire de la sauvegarder automatiquement.

Aller dans File -> Auto Save

On laisse les paramètres déjà prédéfinis. On voit qu'une sauvegarde sera réalisée tous les 600 pas de temps.

3. Couplage avec un modèle de propagation acoustique

La simulation de l'écoulement étant prête, nous allons la coupler au modèle de propagation acoustique Ffowcs Williams-Hawkings (FW-H).

3.1 Activation du modèle FW-H

Pour activer le modèle de FW-H, on retourne dans la sélection des modèles physiques :

Continua -> Physics 1 -> Models, choisir :

Optional Models = Aeroacoustics

Aeroacoustics Model = Ffowcs Williams-Hawkings Unsteady

FW-H Unsteady Models = On-the-Fly FW-H

Il existe deux façons d'utiliser et d'analyser les résultats de ce modèle de propagation acoustique instationnaire :

- Post FW-H, les résultats de la simulation de l'écoulement sont exportés à chaque pas de temps et l'analyse acoustique est réalisée après la simulation. L'avantage est que l'on peut étudier la propagation acoustique en n'importe quel point après la simulation. Nous ne sommes pas obligés de définir tous les points avant la simulation. L'inconvénient est que beaucoup d'espace disque est nécessaire pour exporter le champ aérodynamique à chaque pas de temps, et que cela ralentit le calcul.

- On-the-Fly FW-H, les résultats sont extraits et sauvegardés, durant le calcul, aux points définis avant le lancement de la simulation. L'avantage est que cela nécessite peu d'espace sur le disque, car on n'exporte plus le champ aérodynamique à chaque pas de temps. Par contre, on obtient les résultats de la propagation acoustique seulement aux points définis avant le lancement de la simulation. Si on veut ensuite les résultats en d'autres points, il faut refaire la simulation.

3.2 Sélection de la surface imperméable pour le modèle FW-H

Lors de l'activation du modèle FW-H, deux noeuds supplémentaires sont apparus dans l'arborescence :

- FW-H Surfaces
- FW-H Receivers

On va donc définir la surface imperméable qui correspond à la surface du cylindre. On rappelle que :

- une surface imperméable est associée à une source acoustique générée par des fluctuations de pression sur une surface solide rigide ;
- une surface perméable est associée à une source acoustique générée par les fluctuations de pression au sein d'un volume fluide. Dans ce cas, cette surface perméable correspond aux surfaces délimitant ce volume fluide. Or dans notre cas, les ondes acoustiques sont dissipées par notre méthodologie de calcul et n'atteignent pas une surface perméable qui engloberait le cylindre et son sillage. Cette méthode n'est donc pas appropriée pour notre cas.

Pour définir la surface FW-H :

Aller sur FW-H Surfaces dans l'arborescence, et faire un clic droit -> New -> Impermeable Surface

Aller sur Impermeable Surface 1, Boundaries = Body 1:Cylinderwall

Nous venons donc de créer une surface qui est une source acoustique pour le modèle de propagation acoustique. Cette source acoustique sera calculée grâce à la simulation de l'écoulement, à partir des

variations de pression sur la surface du cylindre.

3.3 Définition des récepteurs pour le modèle FW-H

Maintenant que la source acoustique est créée, nous allons créer les récepteurs associés à cette source. Nous allons en placer 5 autour du cylindre.

Aller sur FW-H Receivers dans l'arborescence et définir les propriétés suivantes :

Far-Field Density = 1.18 kg/m³

Far-Field Speed of Sound = 347.2 m/s

Retourner sur FW-H Receivers dans l'arborescence et clic droit -> New Point Receiver

Recommencer cette dernière opération 4 fois pour avoir 5 récepteurs

Pour définir ces récepteurs :

FW-H Surface = Impermeable Surface 1 (on a associé ce récepteur à la source acoustique, c'est à dire le cylindre).

Position = entrer les coordonnées des récepteurs définis dans le tableau ci-dessous

Renommer = entrer les noms des récepteurs définis dans le tableau ci-dessous (Clic droit sur le récepteur -> Rename)

Nom	Position
Point Receiver bottom	[0.0, -1.01, 1.0E-4] m, m, m
Point Receiver corner bottom	[-0.714, -0.714, 1.0E-4] m,m,m
Point Receiver front	[-1.01, 0.0, 1.0E-4] m, m, m
Point Receiver corner top	[-0.714, 0.714, 1.0E-4] m,m,m
Point Receiver top	[0.0, 1.01, 1.0E-4] m, m, m

On remarquera que ces récepteurs sont situés en dehors du domaine de la simulation de l'écoulement. Mais le modèle FW-H est capable de calculer la propagation des ondes acoustiques en dehors de ce domaine. Il est donc inutile de l'étendre.

3.4 Définition du Solver FW-H

Nous n'allons pas démarrer le solver FW-H dès le départ de la simulation de l'écoulement. Il faut laisser le temps à l'écoulement de s'établir de la solution initiale (dont les champs de vitesse et de pression sont uniformes) vers le lâcher de tourbillons.

Aller dans Solvers -> FW-H Unsteady Solver, Start time = 0.015s

Le solver FW-H démarrera donc au bout de 0.015s « physique » d'écoulement.

3.5 Lancement de la simulation

Après avoir sauvegardé la simulation (File -> Save), on pourra la démarrer en cliquant sur Run (icône avec un bonhomme qui court).

La simulation stoppe au bout de dix pas de temps. Cela est normal, puisque l'on voulait démarrer la simulation avec une valeur de 2.5e-6 s pour les dix premiers pas de temps, puis l'augmenter à 2.5e-5 s :

Aller dans Solve -> Implicit Unsteady, Time Step = 2.5e-5 s

Aller dans Stopping Criteria -> Maximum Steps, désactiver Enabled

Relancer la simulation :

Cliquer sur Run

La simulation durera maintenant 5h.

Les résultats lors de la prochaine séance ...

4. Analyse des résultats

Avant de s'intéresser à l'aéroacoustique, il est important de bien comprendre l'écoulement.

On va donc commencer par afficher le champs de vitesse à partir d'une « Scalar Scene » :

Aller dans Scalar Scene 1 -> Displayers -> double clic sur Outline 1 pour le cacher, puis dans Scalar 1 -> Parts

Sélectionner Periodic 1 dans Regions -> Body 1 -> Boundaries

Puis toujours dans Scalar 1 -> Scalar field -> Function, choisir Velocity Magnitude

Le champs instantané de vitesse s'affiche alors

Questions :

- Que voit-on sur les parties supérieures et inférieures du cylindre, ainsi que dans son sillage ?
- Le maillage permet-il de simuler toutes les tailles de structures turbulentes dans ce sillage ?

Nous allons maintenant nous intéresser au champs de pression sur les parois du cylindre :

Toujours dans Scalar 1 -> Scalar field -> Function, choisir Pressure

On va également tracer la répartition de pression autour du cylindre :

Aller sur Plots et clic droit -> New Plot -> XY Plot

Clic droit sur XY Plot 1 qui vient d'être créé et choisir Rename

Renommer le tracé « Cp Profile »

Aller sur Cp Profile puis dans Parts, aller dans Regions -> Body 1 -> Boundaries et choisir Cylinderwall

Dans Y Types -> Y Type 1 -> Scalar Function, choisir Pressure Coefficient dans Field Function

Il faut définir la densité et la vitesse de référence pour le coefficient de pression :

Tout en bas de l'arborescence aller sur Tools -> Field function -> Pressure Coefficient

Reference Density = 1.177 kg/m^3

Reference Velocity = 50 m/s

Questions :

- D'après le champ de pression et le tracé de coefficient de pression sur les parois du cylindre, quelle répercussion sur la pression ont les survitesses sur les parties supérieures et inférieures du cylindre ?
- La répartition de pression sur les parois du cylindre est-elle symétrique ? Stable ?
- Que peut-on en déduire d'un point de vue aéroacoustique ?

Nous allons maintenant nous intéresser aux fréquences.

Le nombre de Reynolds étant de 63 800, le nombre de Strouhal correspondant pour le lâcher de tourbillons est de 0.22.

Question :

- D'après ce nombre de Strouhal, quelle est la fréquence du lâcher de tourbillons ? On rappelle que la vitesse au loin est de 50 m/s et que le cylindre a un diamètre de 0.02 m .

Pour vérifier si nous obtenons la même fréquence pour notre simulation, nous allons analyser les monitors des coefficients de portance et de traînée :

Dans Plots, double clic sur Cd Monitor, puis double clic sur Cl Monitor Plot

Les évolutions temporelles des coefficients de traînée et de portance s'affichent alors. On voit alors que :

- le coefficient de traînée fluctue légèrement autour d'une valeur moyenne proche de 0.9 ;
- le coefficient de portance présente de fortes amplitudes autour d'une valeur moyenne nulle.

Nous allons réaliser une analyse spectrale de ces deux signaux en utilisant des densités spectrales de puissance :

En bas de l'arborescence, aller dans Tools -> clic droit sur Data Set Functions -> New -> Point Time Fourier Transform (G[p])

Clic droit sur G(p) 1 pour le renommer « PSD Coefficients »

Toujours sur « PSD Coefficients », dans les Properties, entrer les paramètres suivants :

Amplitude Function = Power Spectral Density

Analysis Blocks = 1

Start Time = 0.02s

Cut-off time = 0.12s

Filter Type = None

Frequency Function = Frequency

Overlap Factor = 0.5

Update Interval = 1

Window Function = Hann

Dans ce « PSD Coefficients », aller sur Monitor et clic droit -> New derived data from monitor

Renommer ce Monitor tout juste créé « Cd » (clic droit et rename)

Recommencer ces deux dernières opérations pour créer un autre monitor « Cl »

Dans les Properties de Cd, Input Data 1 = Cd Monitor, puis clic droit sur Cd -> update Output

Dans les Properties de Cl, Input Data 1 = Cl Monitor, puis clic droit sur Cl -> update Output

Maintenant il faut afficher ces densités spectrales de puissance :

Dans l'arborescence, aller sur Plots puis clic droit -> New Plot -> Monitor Plot

Renommer Monitor Plot 1 qui vient d'être créé « PSD Cd »

Aller sur Data Series et clic droit -> add data, choisir Cd dans Derived Data

Refaire les trois dernières opérations pour créer une « PSD Cl », en remplaçant toujours Cd par Cl.

Questions :

- D'après ces deux transformées de Fourier, quelles sont les fréquences des signaux de Cd et Cl ?
- Comment expliquer la différence entre ces deux fréquences alors que les fluctuations de Cd et Cl ont la même origine ?
- Comparer ces fréquences à celle calculée précédemment à partir du nombre de Strouhal.
- Conclure sur les fréquences attendues pour l'analyse acoustique.

Nous allons maintenant nous intéresser aux spectres acoustiques aux 5 récepteurs FW-H :

Dans FW-H Receivers, clic droit sur « Point Receiver bottom » -> Export Surface Total et sauver dans un fichier « bottom.csv ».

Recommencer l'opération pour les 4 autres récepteurs FW-H (en changeant évidemment le nom du fichier à chaque fois).

En bas de l'arborescence, aller dans Tools -> clic droit sur Tables -> New Table -> File Table et choisir « Bottom.csv ».

Recommencer cette dernière opération pour les 4 autres fichiers correspondant aux autres récepteurs FW-H.

En bas de l'arborescence, aller dans Tools -> clic droit sur Data Set Functions -> New -> Point Time Fourier Transform (G[p])

Clic droit sur G(p) 1 pour le renommer « Power Sound Level »

Toujours sur « Power Sound Level », dans les Properties, entrer les paramètres suivants :

Amplitude Function = Sound Pressure Level

Analysis Blocks = 1

Start Time = 0.02s

Cut-off time = 0.12s

Filter Type = None
Frequency Function = Frequency
Overlap Factor = 0.5
Update Interval = 1
Window Function = Hann

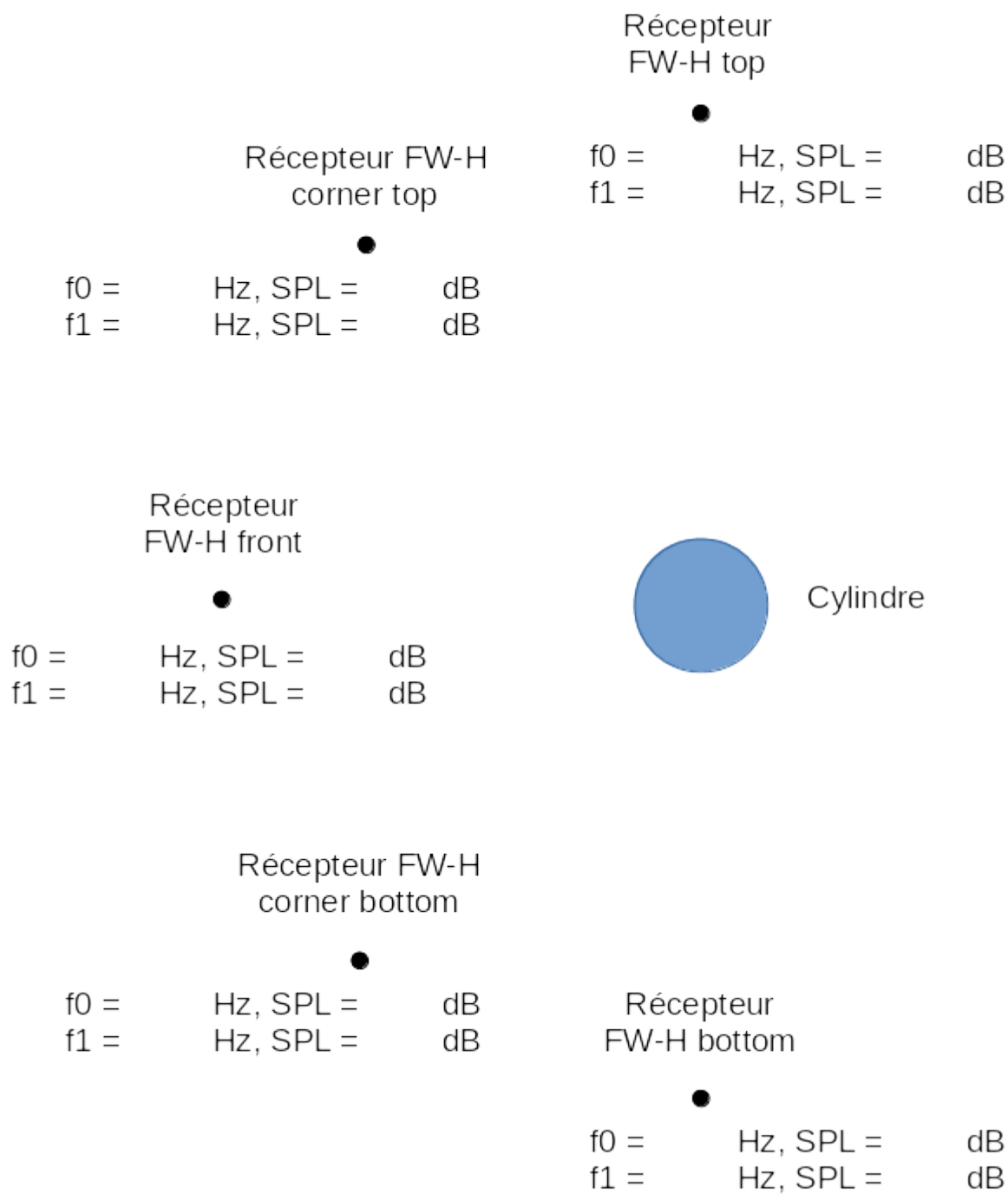
Dans ce « Power Sound Level », aller sur Tabular et clic droit -> New derived data from table
Renommer ce Tabular tout juste créé « Bottom » (clic droit et rename)
Dans les Properties, entrer les paramètres suivants :
Data Surfaces 1 = bottom
X Column 1 = Time
Y Column 1 = Point Receiver (0 -1.01 0.0001)
Clic droit sur Bottom -> Update Output
Recommencer pour les 4 autres récepteurs FW-H

Maintenant que les spectres sonores sont créés, nous allons les afficher :
Dans l'arborescence, aller sur Plots puis clic droit -> New Plot -> Monitor Plot
Renommer Monitor Plot 1 qui vient d'être créé « SPL Bottom »
Aller sur Data Series et clic droit -> add data, choisir Bottom dans Derived Data
Recommencer pour les 4 autres récepteurs FW-H

Nous avons finalement nos 5 spectres sonores.

Questions :

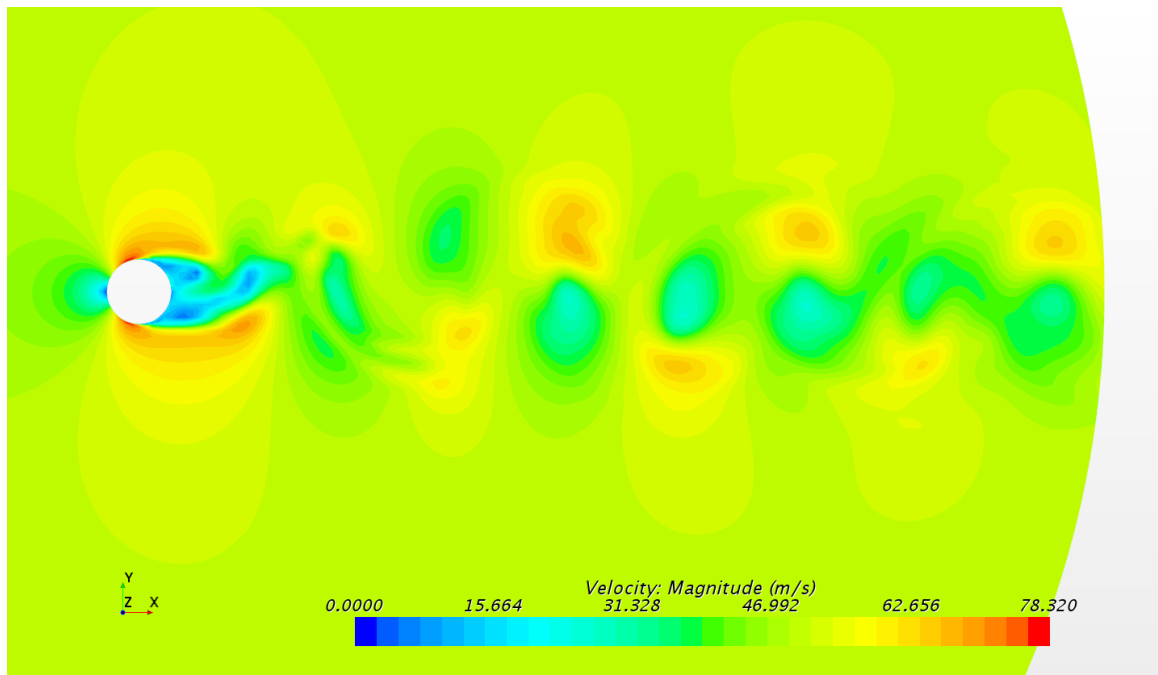
- Sur la figure suivante, pour chacun des 5 récepteurs FW-H, écrire la valeur de la fréquence fondamentale f_0 et de sa première harmonique f_1 , ainsi que le niveau de pression sonore associé à ces fréquences.
- Comment expliquer les fréquences et les niveaux sonores associés ?
- D'après ces résultats, à quel type de source sonore pourrait-on associer le cylindre ? Un Monopole, un dipole ou un quadripole ?



5. Analyse des résultats

Questions :

- Que voit-on sur les parties supérieures et inférieures du cylindre, ainsi que dans son sillage ?



Champs de vitesse instantanée

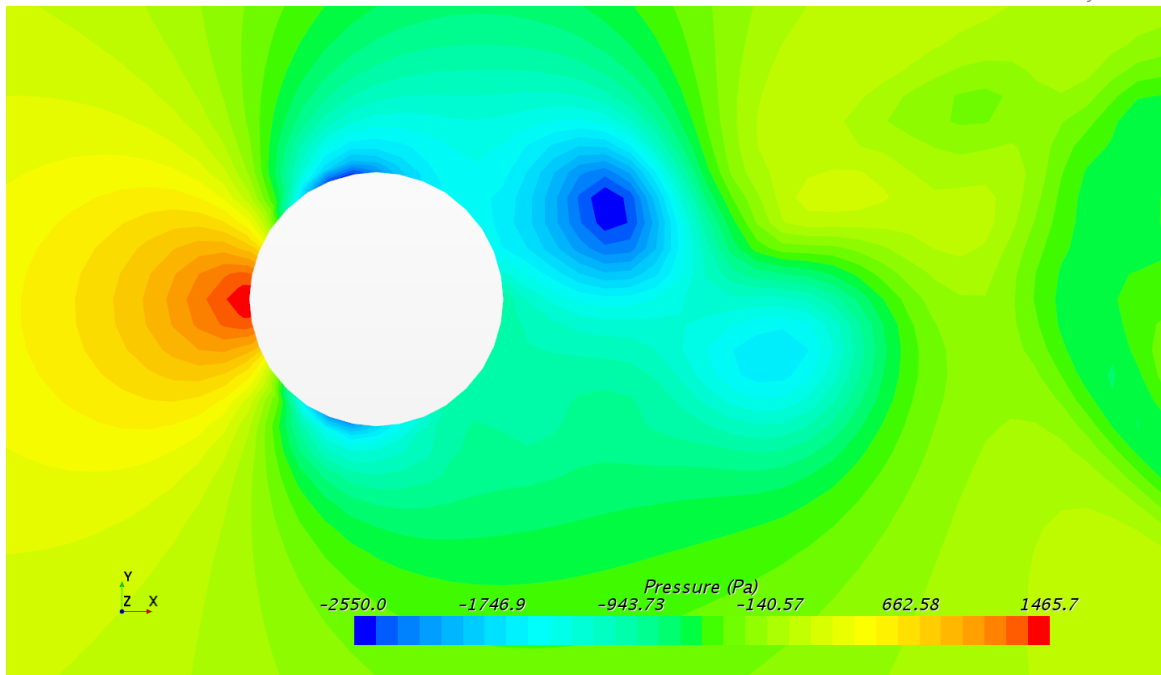
Comme on pouvait s'y attendre, des accélérations apparaissent de chaque côté du cylindre. Elles sont immédiatement suivies d'un décollement de la couche limite, engendrant des tourbillons contra-rotatifs qui sont « lâchés » alternativement entre les parties supérieure et inférieure du cylindre. Ces derniers sont convectés dans le sillage du cylindre. On devine alors qu'un lâcher de tourbillons, de type allée de Von Karman, s'établit en aval de ce cylindre.

- Le maillage permet-il de simuler toutes les tailles de structures turbulentes dans ce sillage ?

Non ! Comme on pouvait le deviner avant la simulation, seules les plus grosses structures tourbillonnaires ont pu être modélisées. Le calcul des sources sonores des structures plus petites, ainsi que leur propagation n'était donc pas possible. De toute façon, leur niveau sonore aurait été bien plus faible que celui généré par les fluctuations de pression sur la surface du cylindre.

Questions :

- D'après le champ de pression et le tracé de coefficient de pression sur les parois du cylindre, quelle répercussion sur la pression ont les survitesses sur les parties supérieures et inférieures du cylindre ?



Champs de pression instantanée

L'accélération à proximité des parois s'accompagne d'une forte diminution de la pression.

- La répartition de pression sur les parois du cylindre est-elle symétrique ? Stable ?

Le lâcher tourbillonnaire fait que les points de décollement de la couche limite, les accélérations, et donc les zones de dépression sont asymétriques et se déplacent périodiquement sur la surface du cylindre.

- Que peut-on en déduire d'un point de vue aéroacoustique ?

Ces fluctuations de pression à la surface du cylindre vont engendrer des sources acoustiques qui vont rayonner vers l'extérieur du cylindre. Ces sources sont calculées à partir de la simulation de l'écoulement et sont propagées par le modèle Ffowcs Williams-Hawkings (FW-H).

Question :

- D'après ce nombre de Strouhal, quelle est la fréquence du lâcher de tourbillons ? On rappelle que la vitesse au loin est de 50 m/s et que le cylindre a un diamètre de 0.02m.

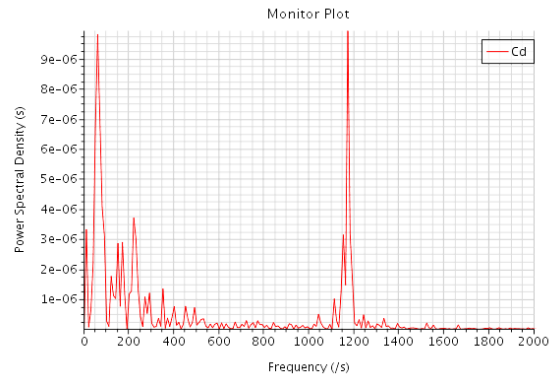
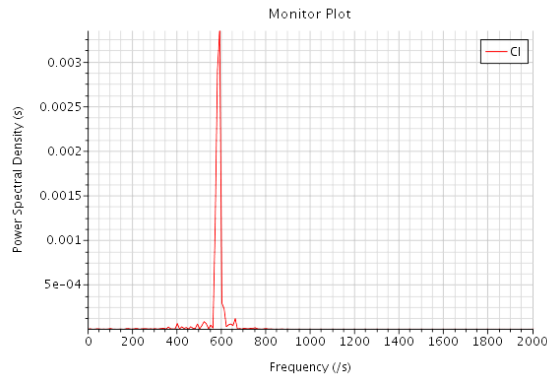
On rappelle la formule du nombre de Strouhal :

$$St = f \cdot D / V$$

avec f la fréquence du lâcher de tourbillon, D le diamètre du cylindre et V la vitesse de l'écoulement au loin. Cela donne une fréquence de 550 Hz.

Questions :

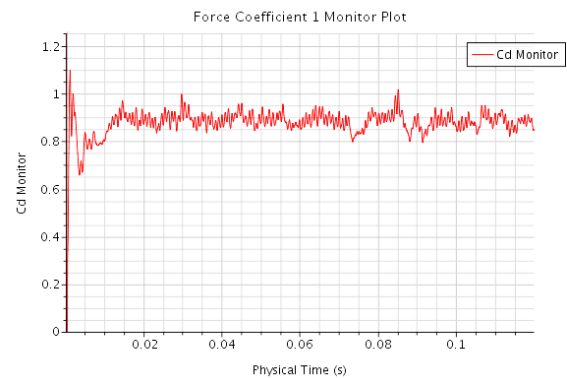
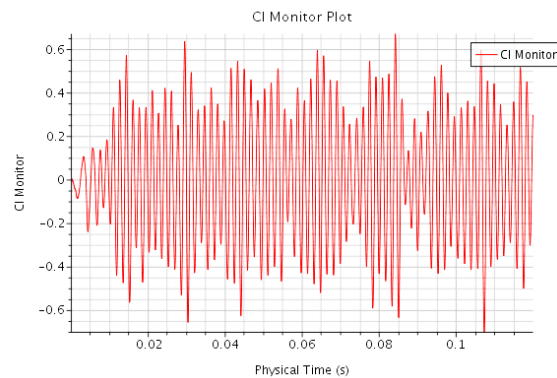
- D'après ces deux densités spectrales de puissance, quelles sont les fréquences des signaux de C_d et C_l ?



Densité spectrale de puissance pour les évolutions de Cl (à gauche) et de Cd (à droite)

Nous obtenons pour Cl une fréquence de 591 Hz, et presque le double pour Cd avec 1172 Hz.

- Comment expliquer la différence entre ces deux fréquences alors que les fluctuations de Cd et Cl ont la même origine ?



Evolutions temporelles de Cl (à gauche) et de Cd (à droite)

On peut voir sur les évolutions temporelles de Cl et de Cd ci-dessus que le coefficient de portance fluctue autour d'une valeur moyenne nulle.

Il est important de savoir que la période (et donc la fréquence) du lâcher tourbillonnaire correspond à deux lâchers de tourbillon : un depuis la partie supérieure du cylindre et un depuis la partie inférieure.

Or le coefficient de portance ne se comporte pas de la même façon suivant où il se détache. Effectivement il est positif lorsqu'il se détache depuis la partie supérieure, et puis négatif depuis la partie inférieure. Il est donc normal que la fréquence du coefficient de portance corresponde à la fréquence du lâcher de tourbillons.

Par contre, le coefficient de traînée se comporte de façon identique lorsque le tourbillon se détache de la partie supérieure ou inférieure. On obtient donc deux comportements similaires de ce coefficient durant une période de lâcher tourbillonnaire. Il est donc évident que la fréquence du coefficient de traînée soit le double de celle du lâcher tourbillonnaire.

- Comparer ces fréquences à celle calculée précédemment à partir du nombre de Strouhal.

La simulation de l'écoulement n'a pas été capable de déterminer avec précision cette fréquence du coefficient de portance (590 Hz) puisqu'elle est un peu plus grande que celle trouvée à partir du nombre de Strouhal (550Hz).

- Conclure sur les fréquences attendues pour l'analyse acoustique.

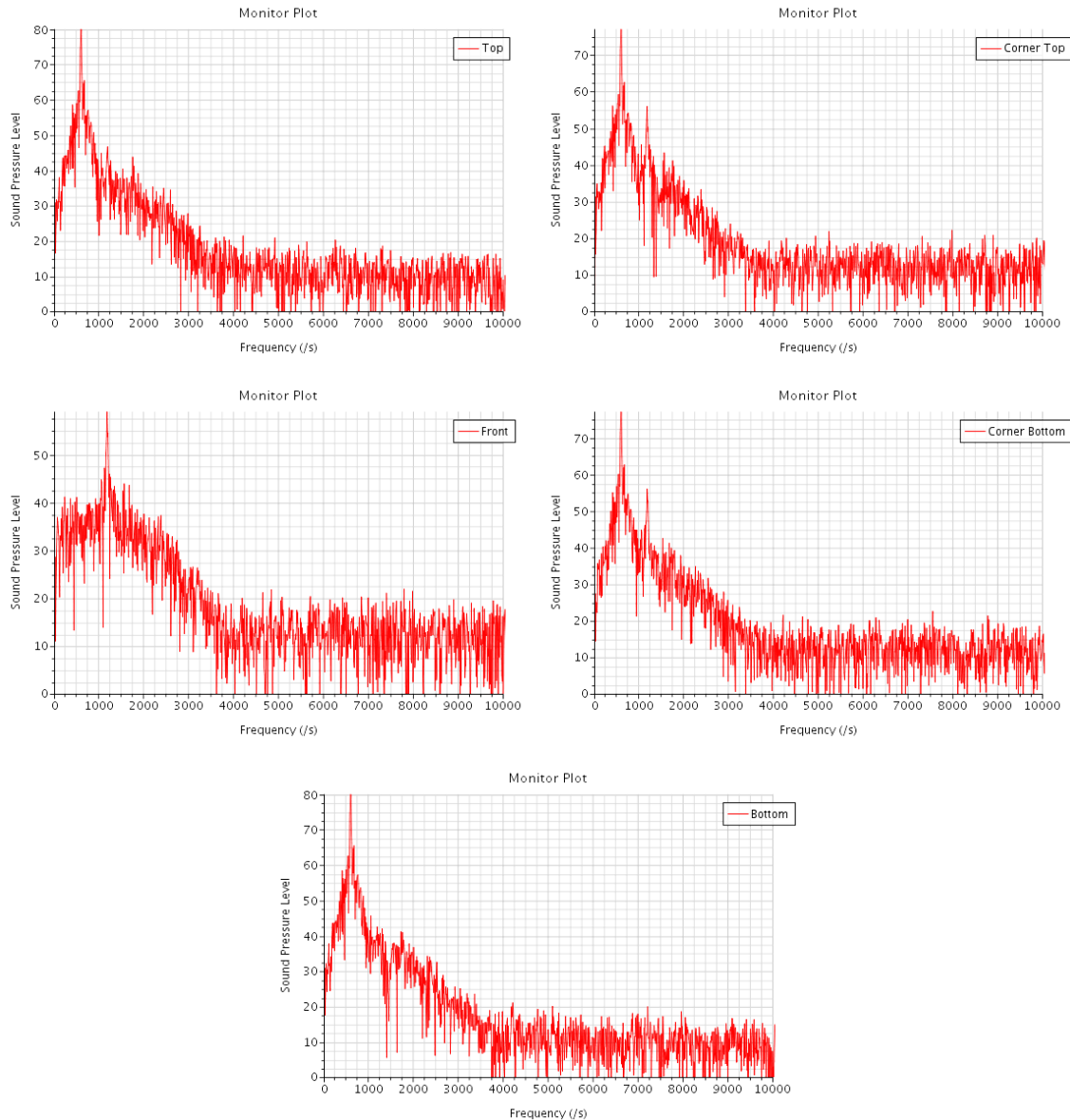
Suivant la position des récepteurs FW-H, on peut s'attendre à obtenir des maxima acoustiques pour

une fréquence fondamentale de 590 Hz et ses harmoniques.

Questions :

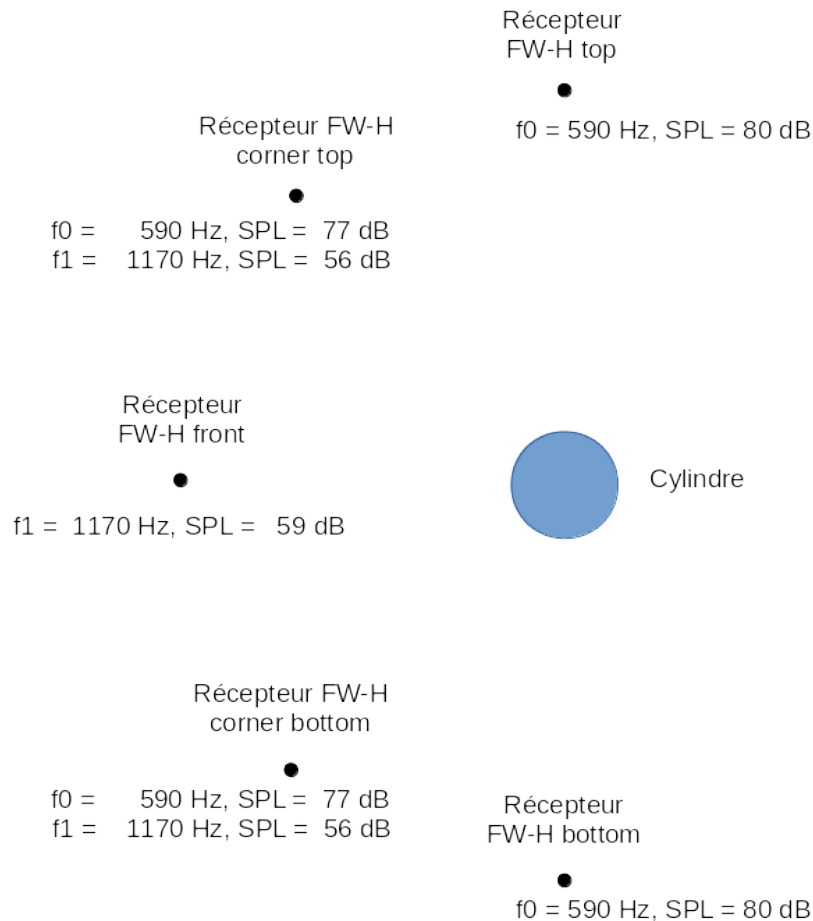
- Sur la figure suivante, pour chacun des 5 récepteurs FW-H, écrire la valeur de la fréquence fondamentale f_0 et de sa première harmonique f_1 , ainsi que le niveau de pression acoustique associé à ces fréquences.

Voici les spectres de niveau de pression acoustique pour chaque récepteur.



Niveau de pression acoustique pour le récepteurs FW-H top (en haut à gauche), corner top (en haut à droite), front (au milieu à gauche), corner bottom (au milieu à droite) et bottom (en bas)

La fréquence fondamentale f_0 et celle de sa première harmonique f_1 , ainsi que le niveau de pression acoustique associé à ces fréquences sont présentée sur la figure suivante.



Niveau de pression acoustique pour les récepteurs FW-H et fréquences associées

- Comment expliquer les fréquences et les niveaux acoustiques associés ?

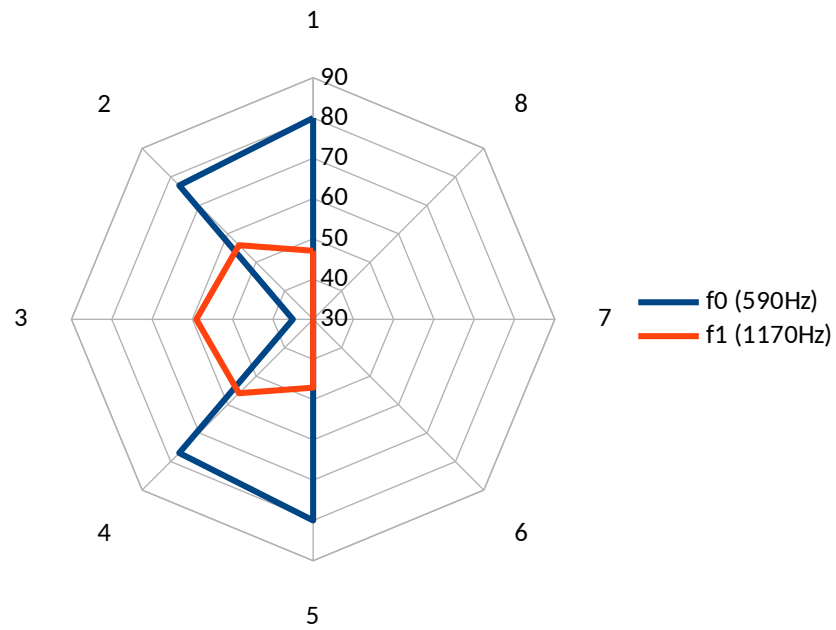
La fréquence du lâcher tourbillonnaire de 590 Hz correspond à un détachement de tourbillon de chaque côté du cylindre. Il est donc logique de retrouver cette fréquence sur les récepteurs top et bottom. Effectivement, ces récepteurs ne voient l'onde sonore que d'un seul côté du cylindre, puisque ce dernier empêche la propagation de l'onde sonore générée du côté opposé.

Par contre, le récepteur front intercepte les ondes acoustiques générées par les variations de pression sur la face amont du cylindre, où le point d'arrêt (point de pression maximale) se déplace durant la période du lâcher tourbillonnaire. Ces variations de pression étant symétriques (par rapport à la direction de l'écoulement), le récepteur intercepte deux fois la même fluctuation durant cette période. On trouve donc une fréquence deux fois plus élevée pour ce récepteur (1170 Hz). On remarque également que le niveau de pression acoustique est bien plus faible, puisque les variations de pression à proximité du point d'arrêt ont des amplitudes plus faibles que celles sur les parties supérieure et inférieure.

Enfin, les deux récepteurs corner voient les deux fréquences, car ils interceptent les ondes acoustiques générées de leur côté (supérieur ou inférieur) du cylindre et sur la face amont.

- D'après ces résultats, à quelles sources acoustiques pourrait-on associer le cylindre ? Des monopôles, des dipôles ou des quadripôles ?

Si on trace la directivité des niveaux de pression acoustique pour les deux fréquences (voir figure ci-dessous), cette source sonore peut être considérée comme deux dipôles.



Directivité des niveaux de pression acoustique pour la fréquence fondamentale et sa 1e harmonique