

---

# BUREAU D'ÉTUDES INDUSTRIELLES

---

*Intégration du système KIOS dans un avion de ligne*

---

Samuel ATLAN



# Table des matières

<b>1</b>	<b>Introduction</b>	<b>2</b>
1.1	Objectif . . . . .	2
1.2	Contexte . . . . .	2
1.3	Problématique . . . . .	3
<b>2</b>	<b>Recherche &amp; Technologie</b>	<b>5</b>
2.1	Taux de recouvrement . . . . .	5
2.2	Technologie de largage . . . . .	6
2.3	Conception du système . . . . .	6
<b>3</b>	<b>Théorie de la vidange</b>	<b>8</b>
3.1	Hypothèses . . . . .	8
3.2	Approche stationnaire . . . . .	9
3.3	Approche instationnaire . . . . .	10
<b>4</b>	<b>Simulation de la vidange</b>	<b>14</b>
4.1	Preprocessing . . . . .	14
4.2	Modèle et conditions aux limites . . . . .	14
4.3	Sensibilité au maillage . . . . .	15
4.4	Pertes de charge simulées . . . . .	16
4.5	Résultats . . . . .	18
<b>5</b>	<b>Conclusion</b>	<b>20</b>
<b>6</b>	<b>Bibliographie</b>	<b>21</b>

# 1. Introduction

## 1.1 Objectif

Le Bureau d'Etudes Industrielles (BEI) est conçu pour intégrer les étudiants au coeur de projets complexes menés par des industriels dans une thématique précise. Pendant plus d'un mois, le groupe d'étudiants collabore sur une problématique technique sous la tutelle de son project leader (le professeur) et du partenaire industriel (l'entreprise).

L'objectif de mon BEI est d'étudier théoriquement puis numériquement le système KIOS développé par la start-up Kepplair Evolution en partenariat avec l'Institut de Mécanique des Fluides de Toulouse (IMFT). Ce système de largage innovant a pour vocation de transformer n'importe quel avion de ligne classique en un bombardier d'eau pour la lutte anti-incendie.

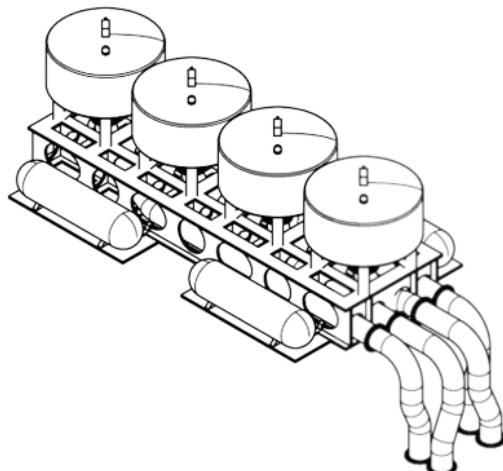


FIGURE 1.1 – Croquis du système KIOS

## 1.2 Contexte

En Décembre 2013, l'Union Européenne (UE) met en place un plan de protection civile d'urgence dans le but de protéger rapidement les citoyens européens en cas de sinistre. Ce plan, basé sur la mise à disposition volontaire de matériels et d'hommes par les pays membres, intègre la réponse aux incendies de grande ampleur.

Cependant, l'augmentation de la fréquence et de l'intensité des incendies, causée en grande partie par le réchauffement climatique, a mis en lumière un manque d'homogénéité vis à vis des moyens disponibles pour chaque pays dans la lutte contre le feu. En particulier, le coût élevé de la possession ou de la location d'un Canadair pousse bon nombre de pays (surtout les moins exposés) à ne pas se munir de bombardiers d'eau.

Afin de pallier à cette hétérogénéité de la flotte, l'Union européenne a constitué une réserve d'avions et d'hélicoptères bombardiers d'eau disponible en cas d'urgence (une douzaine d'aéronefs fournis par la France, l'Espagne, l'Italie, la Grèce et la Croatie dans le cadre du mécanisme de protection civile RescEU créé en 2019)

Néanmoins, la multiplication des feux de forêts dans des zones auparavant épargnées (Europe centrale) et les chiffres records de superficie brûlée atteints durant ces dernières années (plus de 785 000 hectares en 2022) ont montré que les moyens engagés n'étaient pas encore suffisants. C'est pourquoi l'UE désire renouveler et renforcer sa flotte vieillissante de Canadairs tout en investissant dans la recherche et l'innovation pour la surveillance et la protection renforcée de l'environnement.

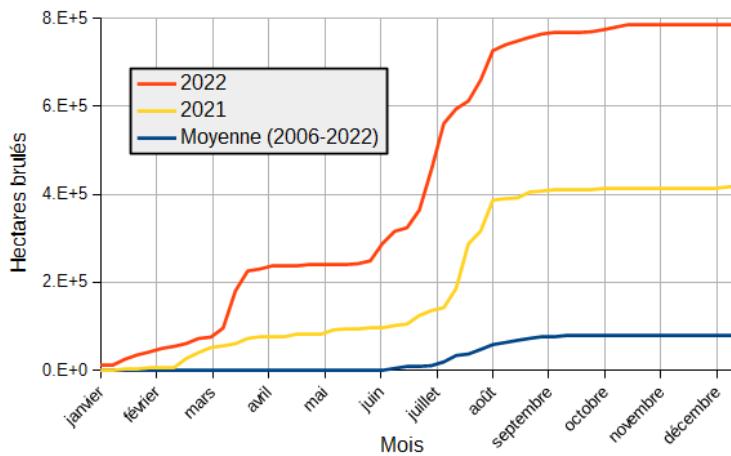


FIGURE 1.2 – Surface de forêt brûlée dans l'UE en 2021 et 2022 selon l'EFFIS

C'est dans ce contexte qu'est naît le Projet Kepplair Evolution. Celui-ci vise à mettre à la disposition de l'Union Européenne un avion bombardier d'eau à très grande capacité de largage. Pour ce faire, la start-up souhaite équiper les nouvelles générations de Large Air Tanker (LAT) et Very Large Air Tanker (VLAT) en concevant un système de largage innovant.

Cependant, la conception d'un tel système, capable de s'intégrer à des avions de ligne pour stocker et larguer une importante quantité de liquide, fait l'objet d'une recherche pointue, de tests et d'études d'optimisation.

### 1.3 Problématique

Dans la lutte anti-incendie, il est clair que “plus la réponse est rapide et conséquente, plus le feu peut être maîtrisé” (parole de pompier).

Toutefois, pour combattre efficacement un feu important, il est nécessaire à la fois de le contenir (ralentir voire stopper sa propagation) et à la fois de l'atténuer (diminuer sa température ou étouffer les flammes).

Il existe plusieurs façons, qu'il est souvent nécessaire de combiner, d'éteindre un incendie. La technique qui nous intéresse est de larguer du liquide (de l'eau ou un mélange d'eau et de retardant en général) par les airs à l'aide d'un aéronef.

En ce sens, les Canadairs ont prouvé leur efficacité pour agir rapidement et à répétition sur le feu. Cependant, ils ne peuvent contenir que jusqu'à 10 tonnes de liquide (10 000 litres) donc il est souvent nécessaire de passer à proximité (à suffisamment basse altitude) et plusieurs fois sur la zone incendiée pour avoir un impact significatif, ce qui rend les missions d'autant plus périlleuses. De plus, le coût et l'ancienneté de la flotte de Canadairs sont souvent pointés du doigt.

En complément, l'objectif du Kepplair est alors d'agir en appui des Canadairs pour un largage rapide et massif de liquide (capacité de 35 tonnes) sur des zones clés de l'incendie. Pour optimiser l'impact du largage, le système KIOS doit fournir une empreinte au sol dense et régulière tout en répondant aux contraintes liées à la dynamique des fluides et aux contraintes liées à la structure et les performances de l'avion.



FIGURE 1.3 – Caractéristiques des Canadairs (à gauche) et du Kepplair (à droite)

## 2. Recherche & Technologie

### 2.1 Taux de recouvrement

Les performances d'un système de largage sont principalement liées à sa capacité à produire une empreinte au sol la plus dense et régulière possible.

En ce sens, le Service des Forêts des Etats-Unis (USDA Forest Service) et le Centre d'Essais et de Recherches de l'ENTente pour la forêt méditerranéenne (CEREN) expérimentent et valident les performances des bombardiers d'eau américains et européens. Ces tests utilisent la méthode Cup & Grid (mesure grâce à la collecte du retardant dans des pots placés au sol à équidistance les uns des autres) qui permet de déterminer le taux de couverture au sol d'un système de largage dans différentes conditions d'opération (vitesse et hauteur de l'avion, vent...). Ces taux de couverture exprimés en  $\text{L/m}^2$  ou en GPC (1 GPC = 0,4  $\text{L/m}^2$ ) sont présentés sous forme de contours où chaque couleur correspond à un niveau de recouvrement :

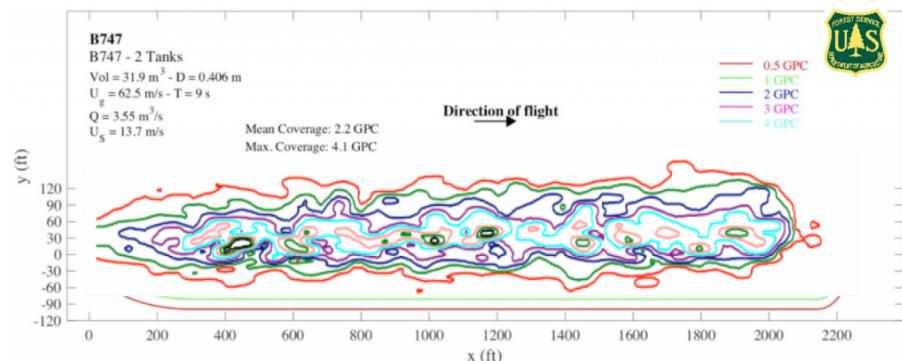


FIGURE 2.1 – Exemple de résultat obtenu lors d'un test du boeing 747 evergreen

A partir des données de l'USDA Forest Service, Dominique Legendre, chercheur à l'IMFT, a développé un logiciel (nommé NaSCa) qui permet de prédire, grâce à une loi physique liant le taux de couverture à la surface et la vitesse de sortie du liquide et la vitesse de l'avion, l'empreinte au sol de n'importe quel système de largage.

Ce logiciel, qui donne des résultats proches des tests en conditions réelles a alors permis de dimensionner les éléments principaux du système KIOS. Cependant, pour obtenir une empreinte au sol optimale correspondant aux résultats obtenus par le logiciel, la vitesse d'éjection du fluide doit être constante.

## 2.2 Technologie de largage

Dans la lutte anti-incendie aérienne, il existe deux principaux types de largage communément utilisés par les bombardiers d'eau actuels. Le système KIOS s'inspire alors de ces deux technologies pour en extraire leurs avantages et limiter leurs inconvénients.

La première méthode connue pour larguer un liquide dans les airs consiste à utiliser la gravité (principe utilisé par les canadairs ou le McDonnell Douglas DC-10 Air Tanker par exemple). Cette méthode simple (ouverture d'une trappe qui laisse se déverser le fluide par gravité) a certains inconvénients. D'une part, la vitesse de sortie du fluide est variable puisqu'elle diminue avec la hauteur d'eau dans le réservoir selon la loi de Torricelli. D'autre part, les performances de l'avion sont altérées car les réservoirs, souvent placés à l'extérieur, augmentent la trainée de celui-ci.

La deuxième méthode repose quant à elle sur la forte pressurisation (de 7 à 8 bar) des réservoirs (dispositif notamment mis en place dans le Boeing 747 Evergreen). Cette technique permet de contrôler le débit et la vitesse de sortie du fluide mais est difficile à intégrer dans les avions commerciaux de part les variations de pression dus aux changements d'altitude. De plus, des essais ont démontré une moins bonne concentration de l'empreinte au sol par rapport au largage par gravité.

La solution retenue pour le système KIOS est alors une combinaison de ces deux techniques : pour compenser la perte de hauteur d'eau du largage par gravité, le système procède à une légère pressurisation des réservoirs (0,2 bar maximum) qui s'ajuste automatiquement au fur et à mesure que le réservoir se vide et permet donc de réguler la vitesse d'éjection. En ce sens, un modèle à l'échelle 1/3 a validé cette méthode à l'IMFT.



FIGURE 2.2 – Inspirations de la technologie du système KIOS

## 2.3 Conception du système

La conception et la validation d'un tel système est un processus long et complexe. En effet, pour allier l'innovation technologique utilisée à la faisabilité et l'efficacité du système, il est nécessaire de répondre à certains critères de performance et d'intégration fixés par le cahier des charges industriel.

Vis-à-vis des performances attendues par l'industriel, la volonté de larguer massivement et de façon homogène semble primordiale :

1. le système doit pouvoir stocker  $35 \text{ m}^2$  de liquide
2. le taux de couverture au sol doit être compris entre 1 et 8 GPC (entre  $0,4$  et  $3,2 \text{ L/m}^2$ )
3. la vitesse d'éjection du liquide doit être constante (empreinte au sol régulière)

Concernant son intégration dans un avion de ligne, tout le challenge réside dans la recherche de compromis entre les contraintes liées au comportement du liquide et les contraintes liées à l'avion :

1. l'architecture fonctionnelle de l'avion ne doit pas être changée (en particulier l'emplacement du train d'atterrissement et du réservoir de carburant)
2. la localisation du centre de gravité de l'avion doit se trouver proche du centre de gravité de l'avion à vide, et ce pendant toute la durée du largage (répartition des masses)
3. la traînée aérodynamique, la consommation de carburant et les coûts de transformation supplémentaires doivent être limités

De plus, afin de s'intégrer à n'importe quel avion, le système doit être modulaire, c'est à dire composé de plusieurs pièces s'emboîtant les unes aux autres pour permettre le démontage et le remontage du système dans son ensemble.

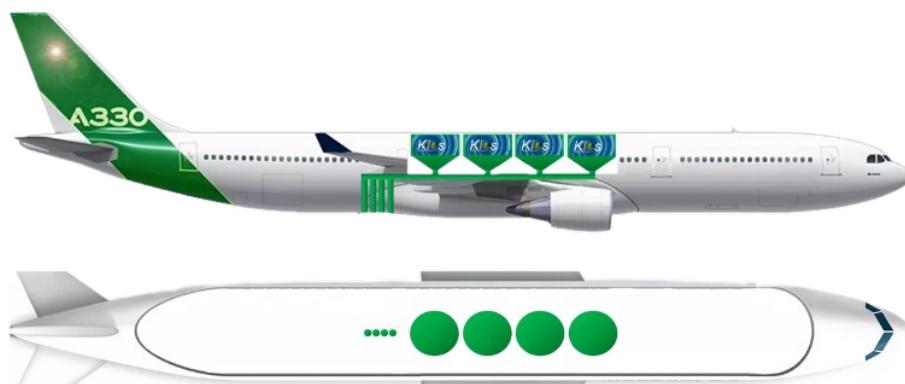


FIGURE 2.3 – Intégration du système KIOS dans un A330

# 3. Théorie de la vidange

## 3.1 Hypothèses

Pour réaliser une étude théorique de la vidange du système, il est préférable de commencer par simplifier le problème en se plaçant dans le référentiel du système (on suppose alors le système fixe dans l'espace sans prendre en compte le déplacement de l'avion).

Dans cette étude, nous allons nous concentrer sur la vidange d'un seul réservoir (sur les 4 présents dans le système complet), dont les dimensions sont spécifiés sur la figure ci-dessous :

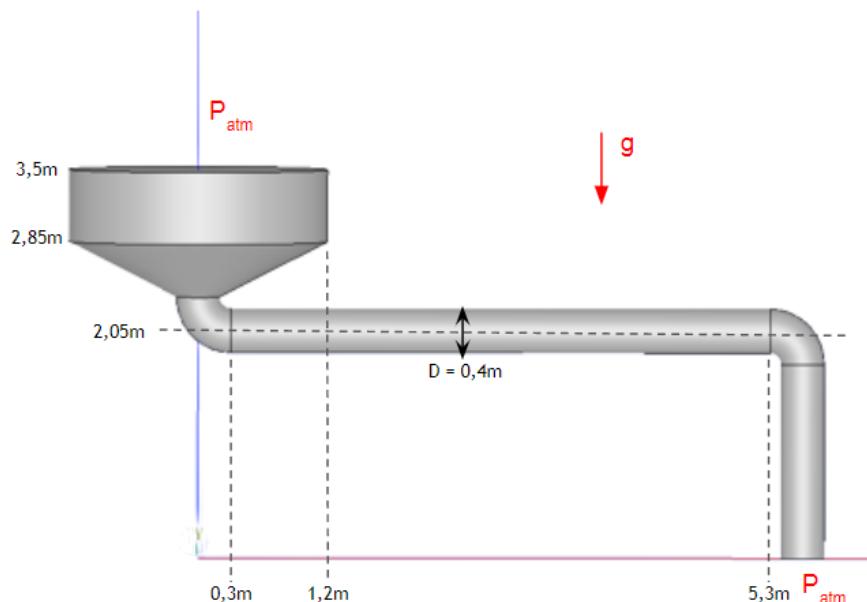


FIGURE 3.1 – Schéma du système étudié

On note  $D_1$  le diamètre initial de la conduite et  $D_2$  le diamètre de sortie de la conduite. La hauteur maximale du système sera notée  $H$  et la longueur linéaire totale (horizontale + verticale) de la conduite de diamètre  $D_2 < D_1$  sera notée  $L$  :

$D_1$	$D_2$	$H$	$L$
2,4 m	0,4 m	3,5 m	6,95 m

Le fluide, contenu dans tout le système à l'état initial, sera considéré dans un premier temps incompressible et monophasique. On lui donne alors les propriétés suivantes :

- masse volumique :  $\rho = 1000 \text{ kg.s}^{-1}$
- viscosité dynamique :  $\mu = 0,05 \text{ Pa.s}$

La pression à l'entrée et à la sortie du système, notées respectivement  $P_e$  et  $P_s$  seront prises égales à la pression atmosphérique :  $P_e = P_s = P_{atm} = 1,013$  bar et l'accélération de la pesanteur vaut :  $g = 9,81$  m.s<sup>-2</sup>.

On peut alors calculer la vitesse caractéristique du système en utilisant la loi de Toricelli :

$$U = \sqrt{2gH} \approx 8,29 \text{ m.s}^{-1}$$

A l'aide de cette vitesse, on calcule le nombre de Reynolds de l'écoulement :

$$Re = \frac{\rho UD}{\mu} \approx 6,63 \cdot 10^4$$

Cette valeur du nombre de Reynolds (comprise entre  $2 \cdot 10^3$  et  $10^5$ ) correspond à un régime d'écoulement turbulent lisse. Cette information va nous permettre de définir des lois physiques dans la suite de l'étude et le fluide pourra être considéré comme parfait (les effets visqueux sont négligés par rapport aux effets inertIELS).

## 3.2 Approche stationnaire

Nous allons décomposer l'étude théorique en deux parties en considérant premièrement une approche stationnaire (sans prise en compte du temps de vidange) puis instationnaire (dépendance en temps).

Pour l'approche stationnaire, nous n'allons pas prendre en compte la variation de hauteur du réservoir en imaginant une réalimentation continue de liquide en entrée :  $z_e = H$ . Dans ce cas, la vidange est infinie et la vitesse reste constante au cours du temps.

La relation de Bernoulli entre l'entrée et la sortie du système s'écrit :

$$P_e + \rho g z_e + \frac{1}{2} \rho U_e^2 = P_s + \rho g z_s + \frac{1}{2} \rho U_s^2 + \frac{1}{2} \rho K_{tot} U_s^2$$

où :

- $P_e = P_s = P_{atm}$
- $z_e = H$  et  $z_s = 0$
- $U_e = 0$
- $K_{tot}$  est la somme des coefficients de pertes de charge internes au système

En simplifiant par  $\rho$ , on obtient alors une relation sur la vitesse de sortie :

$$gH = \frac{1}{2} U_s^2 (1 + K_{tot})$$

qui nous donne :  $U_s = \sqrt{\frac{2gH}{K_{tot}+1}}$

Afin de connaître cette vitesse, il nous reste donc plus qu'à calculer les coefficients de pertes de charge internes du système.

Nous commençons par calculer les coefficients de pertes de charges singulières, c'est-à-dire dans les coudes et le convergent.

Pour un coude d'angle  $\phi = 90^\circ$  et de rayon de courbure  $r_c = 0,3\text{m}$ , ce coefficient  $K_1$  vaut :

$$K_1 = 0,131 + 1,847 \left( \frac{2r_c}{D} \right)^{-3,5} \approx 0,578$$

Pour un rétrécissement brusque de la section de l'écoulement tel que celui provoqué par le convergent, le coefficient de pertes de charge vaut :

$$K_2 = 0,5 \left( 1 - \left( \frac{D_2}{D_1} \right)^2 \right) \approx 0,486$$

Pour calculer le coefficient de pertes de charge linéaires (sur la longueur  $L = 6,75\text{ m}$ ), on détermine d'abord le coefficient de frottement donné par la formule de Blasius dans le cas du régime turbulent lisse :  $\lambda = \frac{0,316}{Re^{0,25}} \approx 0,020$  (lisible également sur le diagramme de Moody). La formule de Colebrook nous donne alors :

$$K_3 = \lambda \frac{L}{D} \approx 0,332$$

Nous pouvons alors déduire le coefficient total des pertes de charges internes de notre système :

$$K_{tot} = 2K_1 + K_2 + K_3 \approx 1,974$$

En utilisant la relation de la vitesse de sortie obtenue précédemment, on calcule la valeur de la vitesse d'éjection stationnaire :

$$U_s = \sqrt{\frac{2gH}{K_{tot} + 1}} \approx 4,81 \text{ m.s}^{-1}$$

### 3.3 Approche instationnaire

En réalité, la vitesse de sortie n'est pas constante au cours du temps. Elle passe progressivement d'une valeur nulle à sa valeur stationnaire (régime transitoire puis régime permanent).

Pour rendre compte de cette instationnarité, nous allons prendre en compte la variation de hauteur dans le réservoir en écrivant l'équation de Bernouilli généralisée en instationnaire :

$$P_e + \rho g z_e + \frac{1}{2} \rho U_e^2 = P_s + \rho g z_s + \frac{1}{2} \rho U_s^2 + \frac{1}{2} \rho K_{tot} U_s^2 + \int_e^s \rho \frac{\partial U}{\partial t} ds$$

où :

- $P_e = P_s = P_{atm}$
- $z_e = H$  et  $z_s = 0$

- $U_e = 0$
- $K_{tot} \approx 1,974$  est la somme des coefficients de pertes de charge internes au système calculé en approche stationnaire
- $ds$  est un petit élément d'une ligne de courant

Comme pour l'approche stationnaire, des termes se simplifient et l'on obtient une équation qui dépend de la vitesse et des coefficients de pertes de charge :

$$gH = \frac{1}{2} U_s^2 (1 + K_{tot}) + \int_e^s \frac{\partial U}{\partial t} ds$$

Cependant, elle fait apparaître cette fois une intégrale que l'on va chercher à simplifier en la décomposant le long d'une ligne de courant traversant l'ensemble de notre système (de e à s) :  $\int_e^s \frac{\partial U}{\partial t} ds = \int_e^1 \frac{\partial U}{\partial t} ds + \int_1^2 \frac{\partial U}{\partial t} ds + \int_2^3 \frac{\partial U}{\partial t} ds + \int_3^4 \frac{\partial U}{\partial t} ds + \int_4^5 \frac{\partial U}{\partial t} ds + \int_5^s \frac{\partial U}{\partial t} ds$

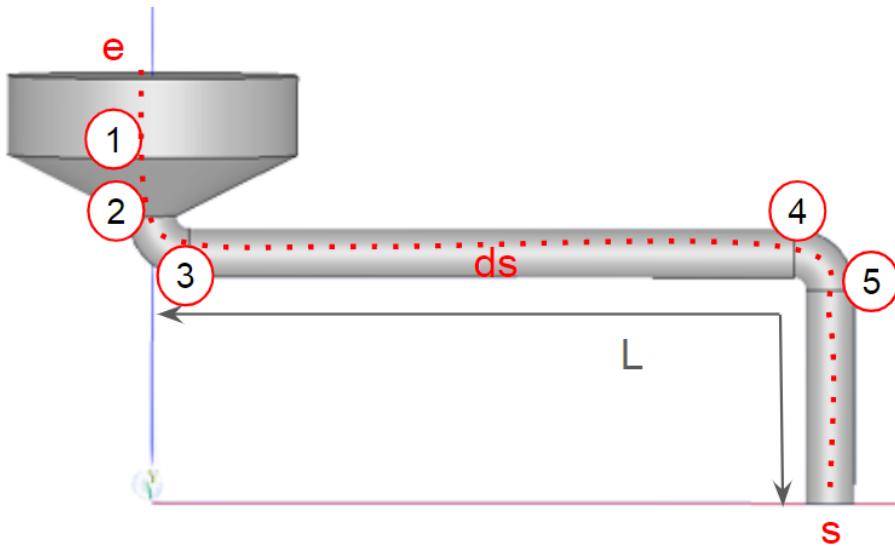


FIGURE 3.2 – Décomposition d'une ligne de courant entre l'entrée et la sortie du système

Le système étant composé de six parties, il convient de négliger certains termes :

- dans le cylindre de diamètre  $D_1 > D_2$ , la vitesse varie peu au cours du temps  $\Rightarrow \frac{\partial U}{\partial t} \sim 0$
- dans le convergent (1 → 2) et dans les coude (2 → 3 et 4 → 5), la distance parcourue par une particule fluide est petite par rapport à celle dans les conduites ( $L = 6,75$  m) :  $\Rightarrow ds \sim 0$

Il reste donc :  $\int_e^s \frac{\partial U}{\partial t} ds \sim \int_3^4 \frac{\partial U}{\partial t} ds + \int_5^s \frac{\partial U}{\partial t} ds$  que l'on peut intégrer (en admettant que la dérivée temporelle de la vitesse est invariante le long de  $ds$ ) afin d'obtenir :  $\int_e^s \frac{\partial U}{\partial t} ds \sim \frac{dU_s}{dt} L$

On intègre alors ce résultat dans l'équation obtenue précédemment :

$$gH = \frac{1}{2} U_s^2 (1 + K_{tot}) + \frac{dU_s}{dt} L$$

En séparant les variables, on obtient :

$$\frac{dU_s}{2gH - U_s^2 (1 + K_{tot})} = \frac{dt}{2L}$$

On peut alors faire apparaître une intégrale usuelle :

$$\frac{1}{2} \sqrt{\frac{1+K_{tot}}{2gH(1+K_{tot})}} \int_0^{U_s} \left( \frac{1}{\sqrt{\frac{2gH}{1+K_{tot}}} + U_s} + \frac{1}{\sqrt{\frac{2gH}{1+K_{tot}}} - U_s} \right) dU_s = \int_0^t \frac{dt}{2L}$$

En notant  $\tau = L \sqrt{\frac{1+K_{tot}}{2gH}}$ , on obtient finalement :

$$U_s = \frac{L}{\tau} \tanh\left(\frac{t}{\tau}\right)$$

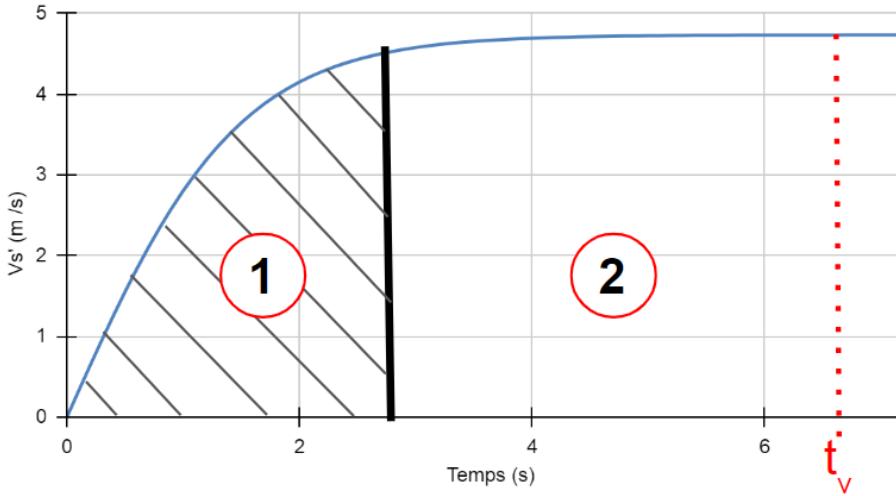


FIGURE 3.3 – Évolution de la vitesse de sortie au cours du temps

On distingue effectivement les deux régimes de vidange : le régime transitoire (hachuré 1 sur la figure) durant lequel la vitesse augmente pendant environ 3 secondes et le régime permanent durant lequel la vitesse de sortie reste constante égale à sa valeur calculée avec l'approche stationnaire (environ  $4,81 \text{ m.s}^{-1}$ ).

On peut alors calculer le temps de vidange  $t_v$  du système, c'est-à-dire le temps que met le fluide à s'évacuer totalement du système. Pour cela, on utilise la conservation du débit entre l'entrée et la sortie du système :

$$-S_1 \frac{dz}{dt} = S_2 U_s(t)$$

où  $\frac{dz}{dt}$  est la vitesse d'écoulement du fluide à l'entrée du système (variation de hauteur de fluide dans le réservoir).

En injectant l'expression de  $U_s(t)$  qu'on vient de trouver, on a :  $-\pi \frac{D_1^2}{4} dz = \pi \frac{D_2^2}{4} \frac{L}{\tau} \tanh\left(\frac{t}{\tau}\right) dt$ .

Or la hauteur de liquide ne varie pas linéairement dans le temps donc on introduit  $z_{eq} < H$ , la hauteur d'un réservoir cylindrique équivalent de diamètre  $D_1$  et de volume égal au volume total du système :  $z_{eq} = \frac{4V_{tot}}{\pi D_1^2} \approx 0,86 \text{ m}$ .

On obtient donc l'expression suivante en intégrant entre  $t = 0$  ( $z = z_{eq}$ ) et  $t = t_v$  ( $z = 0$ ) :

$$D_1^2 z_{eq} = \frac{D_2^2 L}{\tau} \ln(\cosh(\frac{t_v}{\tau}))$$

On en déduit alors le temps de vidange :

$$t_v = \tau \cosh^{-1}(\exp(\frac{D_1^2 z_{eq} \tau}{D_2^2 L})) \approx 9,80 \text{ s}$$

Cette valeur de la durée de vidange totale du système nous permettra ensuite de définir les durées de nos simulations. De plus, elle semble pertinente pour un largage rapide et massif : un avion équipé de ce système survolant une zone incendiée à  $300 \text{ km/h}^{-1}$  pourra larguer la totalité de ce réservoir sur une distance de plus de 800 m.

## 4. Simulation de la vidange

### 4.1 Preprocessing

Pour réaliser nos simulations, nous créons notre géométrie (CAO) ainsi que nos maillages sur le logiciel Salome. Les calculs seront effectués via la méthode Volumes finis implémenté sous Code\_Saturne. Nous pourrons alors visualiser l'écoulement sur Paraview et afficher des résultats via Excel.

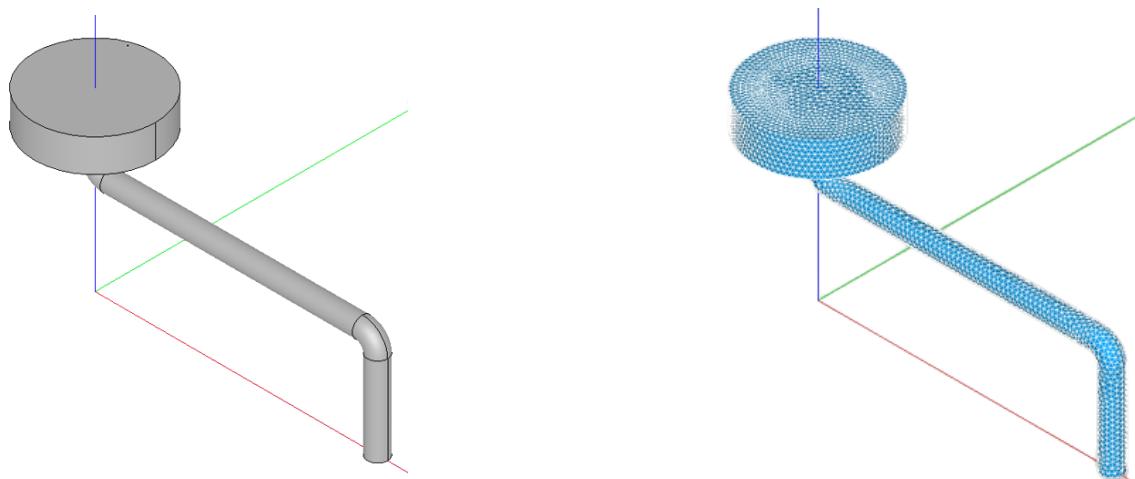


FIGURE 4.1 – CAO et maillage effectuées sous Salome

Après avoir créer notre géométrie, nous réalisons différents maillages tétraédriques plus ou moins raffinés (de 7500 à 1 million de mailles) que nous allons utiliser en fonction des résultats que l'on souhaite obtenir en sachant que les calculs prendront plus de temps et de ressource avec un maillage comportant plus de cellules.

Afin d'obtenir des résultats rapides, nous utiliserons l'approche RANS (Reynolds-averaged Navier-Stokes) pour nos simulations que l'on va effectuer sur des durées de 10 à 20 secondes.

### 4.2 Modèle et conditions aux limites

Pour simuler la turbulence efficacement, nous utiliserons le modèle  $k - \omega$  SST (Shear Stress Transport Model) qui est un modèle à deux équations de transport qui s'inspire des deux modèles de turbulence les plus connus ( $k - \epsilon$  et  $k - \omega$ ). Il utilise le modèle  $k - \epsilon$  dans les zones d'écoulement libre (loin des parois) et le modèle  $k - \omega$  dans les zones de fort gradient présentes dans la couche limite (proche des parois). Le modèle  $k - \epsilon$  de Code\_Saturne donne également de bons résultats et pourra être utilisé dans certains cas.

En ce qui concerne les conditions aux limites, nous testons pour un maillage de 15 000 cellules deux cas de conditions aux limites :

- des conditions de pression en entrée et en sortie (cas 1)
- une condition de pression en entrée avec une sortie libre (cas 2)

Pour le premier cas, nous calculons la différence de pression entre l'entrée et la sortie en fonction de nos résultats théoriques :  $\Delta P = P_s + \frac{1}{2}\rho U_s^2 - (P_e + \rho g H) \approx -2.28 \cdot 10^4 \text{ Pa}$

Pour le deuxième cas, nous imposons la pression d'entrée  $P_e = P_{atm} = 101300 \text{ Pa}$  et fixons un coefficient de perte de charge externe en sortie du système égal à 1.

Par conséquent, nous effectuons une première simulation sur un maillage de 15 000 cellules avec la différence de pression calculée précédemment (cas 1) et définissons dans une deuxième simulation la pression d'entrée ainsi que le coefficient de perte de charge externes en sortie :

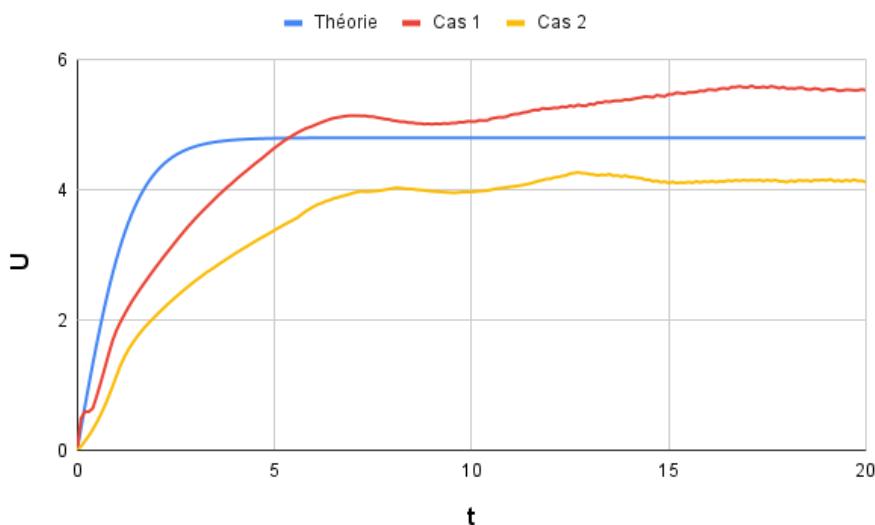


FIGURE 4.2 – Évolution de la vitesse de sortie pour le cas 1 ( $\Delta P$ ) et le cas 2 (sortie libre)

Nous remarquons que le calcul converge mieux pour le cas 2 avec une sortie libre bien que les conditions de pression en entrée et sortie nous donne des valeurs plus proches de la théorie.

Dans la suite de l'étude, nous imposerons une pression  $P_e = P_{atm} = 101300 \text{ Pa}$  à l'entrée et une condition de sortie libre afin de comparer nos simulations numériques à nos résultats théoriques.

### 4.3 Sensibilité au maillage

Nous souhaitons à présent connaître la dépendance de notre solution au maillage utilisé.

Nous effectuons alors plusieurs simulations pour des maillages allant de 7500 à 1 million de mailles et observons en particulier la vitesse de sortie du fluide pour 3 nombres de mailles (50 000, 200 000 et 1 million) :

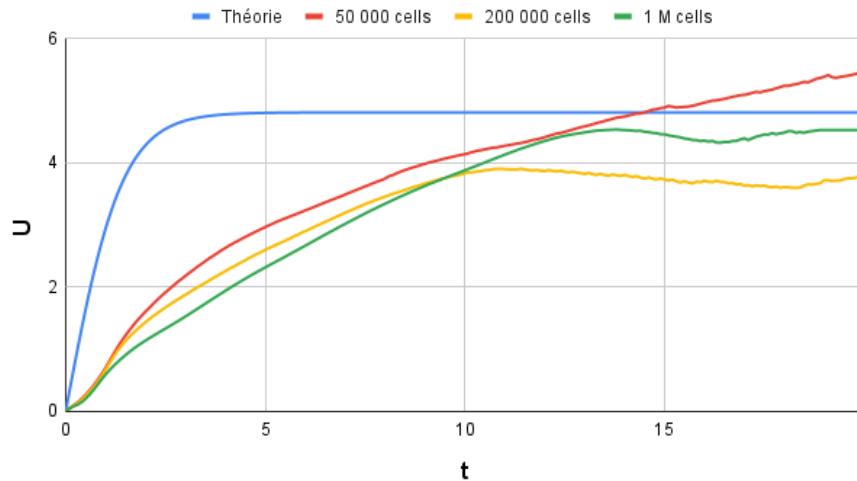


FIGURE 4.3 – Évolution de la vitesse de sortie pour différents nombres de mailles

Nos résultats semblent s'éloigner de la théorie pour un maillage composé de 50 000 cellules car la vitesse augmente continuellement alors que pour des maillages plus précis (200 000 et 1 million de cellules), la vitesse atteint une valeur finale à peu près constante comme le veut la théorie. Nous voyons également que cette valeur finale est proche de la valeur souhaitée pour un maillage d'un million de mailles (moins de  $0,3 \text{ m.s}^{-1}$  au bout de 12 secondes).

Cependant, le régime transitoire est à priori beaucoup plus long que dans notre théorie. Nous observons notamment un léger retardement au début de vidange qui peut s'expliquer par la mise en mouvement initial du fluide qui est ralenti par les effets de rugosité que l'on a pas pas prise en compte dans notre théorie (régime turbulent lisse).

## 4.4 Pertes de charge simulées

Nous allons à présent analyser l'évolution des pertes de charge dans notre système et les comparer aux valeurs des coefficients de pertes de charge calculées théoriquement (partie 3.1).

Pour cela, nous traçons l'évolution de la pression à différents endroits de notre système : à l'entrée, après le convergent, après le premier coude, après la conduite horizontale et après le deuxième coude. Nous effectuons ce calcul avec le modèle  $k - \epsilon$  pour 300 000 mailles.

A noter qu'on regarde ici la pression spécifique liée aux pertes de charge internes et externes et non la pression totale.

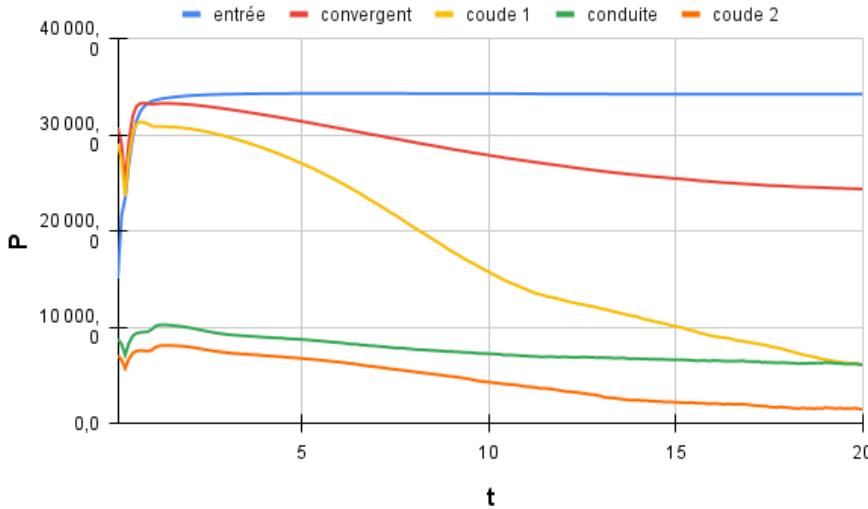


FIGURE 4.4 – Évolution de la pression à différents endroits du système

Nous constatons tout d'abord que la pression à l'entrée du système reste constante après que l'écoulement se soit établi. La valeur finale vaut environ  $P \approx 34273$  Pa. Nous pouvons alors recalculer le coefficient de pertes de charge total du système en utilisant la valeur finale de la vitesse théorique ( $U_s \approx 4,81$  m.s<sup>-1</sup>) avec la relation :  $P = \frac{1}{2}\rho U_s^2 K$  où  $K$  est la somme des coefficients de pertes de charge interne et externe. On obtient :

$$K = \frac{2P}{\rho U_s^2} \approx 2,963$$

Pour obtenir le coefficient de pertes de charge internes simulé, il suffit alors de soustraire à ce résultat le coefficient de pertes de charge externe initialisé en condition de sortie ( $K_{ext} = 1$  ici) :

$$K_{int} = K - K_{ext} \approx 1,963$$

La valeur théorique de ce coefficient vaut environ 1,974, ce qui est proche de la valeur obtenue numériquement. L'écart entre la valeur théorique et simulé vaut alors  $1 - \frac{1,963}{1,974} \approx 0,56\%$ , ce qui est très satisfaisant.

Nous pouvons également observer l'écart de pression entre les différents endroits du système pour identifier où sont localisées les pertes de charge.

Par exemple, si on regarde à 5 secondes, nous voyons que le plus grand écart de pression se situe entre la sortie du premier coude et la sortie de la conduite horizontale : c'est donc dans la conduite horizontale que les pertes de charge sont les plus importantes. Ce constat semble contraire à la théorie puisque les coefficients calculées dans la partie 3.2 sont plus grands pour les coudues et le convergent que pour les conduites.

Par contre, si on regarde plus loin, au bout de 15 secondes par exemple, nous voyons bien que les pertes de charge singulières prennent le dessus sur les pertes de charge linéaires avec une prédominance dans le convergent et le premier coude. On se rapproche alors de la théorie bien qu'il serait nécessaire de calculer exactement la valeur de ces coefficients en fonction de la vitesse d'entrée de chaque composants pour s'en assurer.

## 4.5 Résultats

Nous souhaitons désormais afficher nos résultats en 3D sous Paraview. Nous choisissons d'afficher nos résultats de la simulation avec 1 million de mailles après 10 secondes de vidange.

Nous visualisons dans un premier temps la pression totale dans le système :

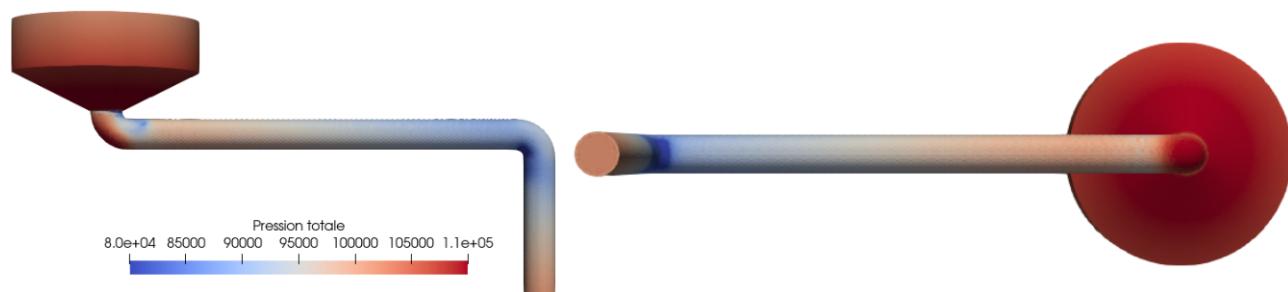


FIGURE 4.5 – Pression totale dans le système (vue de coté et de dessous)

Nous observons des zones de fort gradient de pression au niveau des coude du fait du changement de direction de l'écoulement et des effets des parois et de la gravité. Dans le premier coude, c'est la partie basse du coude (paroi de plus grand rayon) qui empêche le fluide de s'écouler vers le bas par gravité et qui entraîne l'augmentation de pression. Dans le deuxième coude, la pression diminue sur la paroi de plus faible rayon grâce à l'inertie du fluide qui va s'écraser et engendrer une surpression sur la paroi de plus grand rayon (à droite).

Nous visualisons maintenant la vitesse verticale du fluide dans notre système :

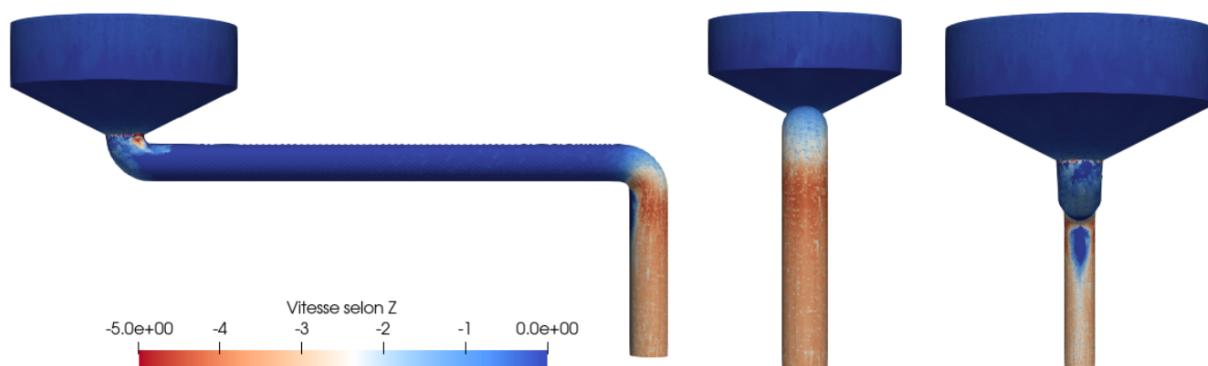


FIGURE 4.6 – Vitesse verticale dans le système (vue de coté, de derrière et de devant)

La vitesse verticale affichée semble cohérente avec l'écoulement attendu du fluide, c'est-à-dire plus importante dans la conduite verticale en sortie que dans les autres parties du système. Toutefois, nous observons une zone de forte vitesse au niveau du premier coude. En effet, le rétrécissement brusque permis par le convergent accélère le fluide dans la direction de la gravité.

Nous vérifions également ces résultats concernant la vitesse horizontale dans notre système :

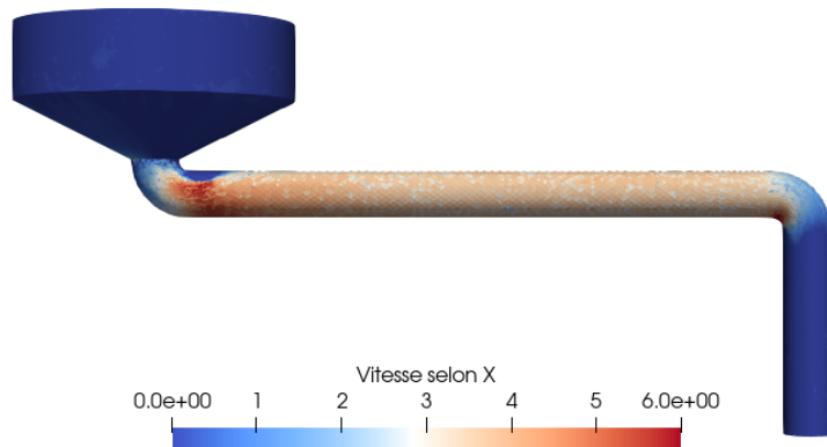


FIGURE 4.7 – Vitesse horizontale dans le système (vue de coté)

Là aussi, les colorations constatées sont cohérentes avec la théorie physique avec des vitesses horizontales plus élevées dans la conduite horizontale que partout ailleurs. Nous distinguons également une accélération du fluide en sortie du premier coude due à l'inertie entraînée par le changement de direction de l'écoulement.

## 5. Conclusion

Ces études théoriques et numériques préliminaires laissent tout à penser que le système KIOS pourra être performant quant à la lutte anti-incendie. En effet, nos résultats montrent une vitesse d'éjection presque constante qu'il sera judicieux de réguler par la pressurisation envisagée.

Cependant, des recherches d'optimisation de ces résultats par la prise en compte du mélange eau/retardant (proportions, type de produit retardant utilisé...) ou encore par la simulation des 4 réservoirs (système complet) doivent notamment être menées.

D'autant que selon Météo France, le risque d'occurrence d'un feu de forêt pourrait progresser de 30% à 75% par rapport à la période 1961-2000 à l'horizon 2060. Il semble donc important d'anticiper cette généralisation des feux de forêt par la conception d'un tel système pour se munir face à cet enjeu important.

## 6. Bibliographie

Kepplair evolution : <https://keplair-evolution.com/>

IMFT : <https://www.imft.fr/>

Techniques de l'Ingénieur : <https://www.techniques-ingenieur.fr/actualite/articles/un-dispositif-innovant-pour-transformer-des-avions-de-ligne-en-bombardiers-deau-83959/>

Olivier Thual : "Hydraulique pour l'Ingénieur généraliste", Cépaduès-Editions, 2018

Saad Bennis : "Hydraulique et hydrologie", Presse de l'Université de Québec, 2009

The European Forest Fire Information System : <https://effis.jrc.ec.europa.eu/>

Météo France : <https://meteofrance.com/>