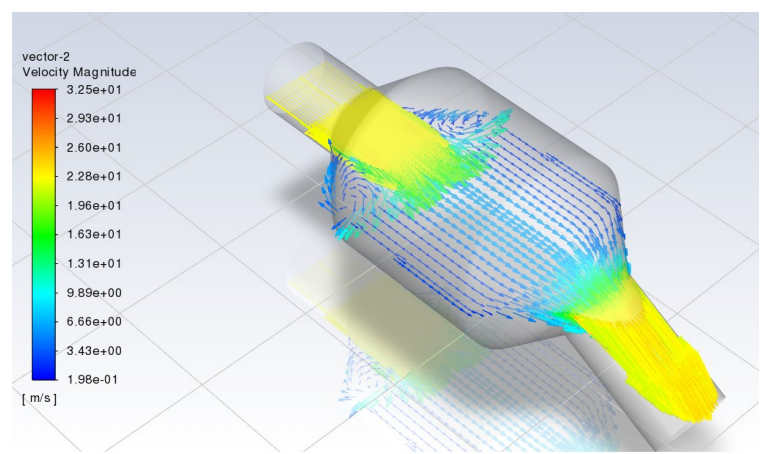
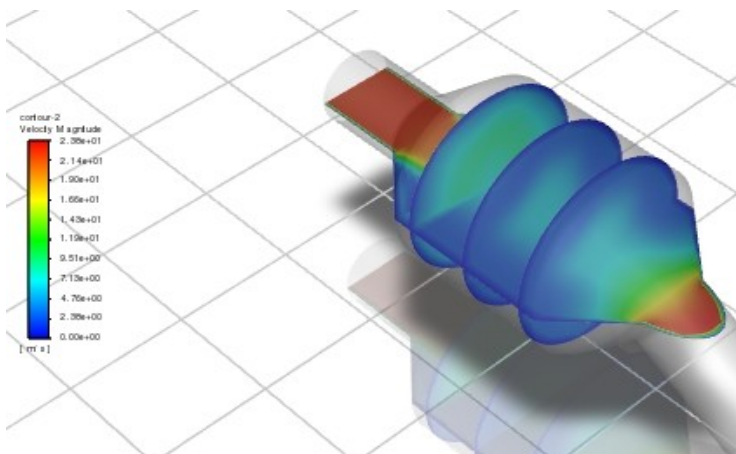


## Le fluide s'écoule dans des milieux poreux



**Etudiants :**

**Tessnim CHOURIA**

**Paul-Antoine OUVRY**

**Hassen IBRAHIM**

---

**Enseignant-responsable du projet :**

**Mostafa SAFDARI SHADLOO**



Date de remise du rapport: **12/06/2021**

Référence du projet: **STPI/P6/2021 – 34**

Intitulé du projet: **Le fluide s'écoule dans des milieux poreux.**

Type de projet: ***simulation numérique, bibliographie***

Objectifs du projet :

- modéliser numériquement des problèmes d'écoulement à travers des milieux poreux***
- travail de bibliographie***
- se familiariser avec des logiciels de simulation numériques***
- découvrir des applications concrètes aux problèmes de mécanique des fluides***

Mots-clefs du projet : ***simulation numérique, milieux poreux, écoulement, fluide***



## TABLE DES MATIÈRES

1. Introduction.....	7
2. Méthodologie / Organisation du travail.....	7
3. Travail réalisé et résultats.....	8
3.1. I- Généralités sur les fluides et propriétés.....	9
3.1.1. I-1- Le concept d'un fluide.....	9
3.1.2. I-2- La notion de fluide continu en mécanique des fluides.....	9
3.2. II- Les milieux poreux.....	15
3.2.1. II-1- Généralités et définitions sur les milieux poreux.....	15
3.2.2. II-2- Les lois et équations régissant les écoulements fluides dans les milieux poreux.....	16
3.2.3. II-3- Les applications des milieux poreux.....	18
3.3. III- Le logiciel et méthodes de simulation par MFN.....	19
3.3.1. III-1- Ansys Fluent.....	19
3.3.2. III-2- Qu'est-ce qu'une résolution de problème par MFN?.....	19
3.3.3. III-3- Les différentes méthodes de résolution par MFN.....	21
3.3.4. III-4- Limites de la méthode de résolution par MFN.....	21
3.4. IV- Simulation numérique et résultats.....	21
3.4.1. IV-1- L'écoulement des gaz dans un milieu poreux.....	21
4. Conclusions et perspectives.....	24
5. Bibliographie.....	25
6. Annexes.....	28

## NOTATIONS, ACRONYMES

Re = nombre de Reynolds

NS = Navier-Stokes

FAP = filtre à particule

MFN = mécanique des fluides numérique (équivalent à CFD en anglais)

DNS = Direct Numerical Simulations

LES = Large Eddy Simulation

SGS = SubGrid scales

RANS = Reynolds averaged Navier-Stokes equations

EDP = equations aux dérivées partielles

CIRC = centre international de recherche sur le cancer

$\nu$  = coefficient de viscosité cinématique

$\mu$  = coefficient de viscosité dynamique

$\rho$  = la masse volumique

U = vitesse de la particule fluide

Q = le débit volumique

K = la conductivité hydraulique

S = la surface

## 1. INTRODUCTION

Notre projet s'inscrit dans un domaine de la physique aussi complexe qu'intéressant: la mécanique des fluides, c'est-à-dire l'étude de l'écoulement des fluides. Cette branche de la physique est constituée de deux grandes parties: la statique des fluides et la dynamique des fluides. C'est un domaine qui suscite beaucoup d'intérêts, et ce, pour plusieurs raisons. Les applications sont omniprésentes, on peut citer entre autres l'ingénierie navale, l'aéronautique, la météorologie, ou encore l'océanographie.

C'est une science très théorique: elle satisfait les lois usuelles de la physique et fait appel à de nombreuses équations permettant la résolution de problèmes de la vie courante. Néanmoins, la théorie ne permet pas toujours de rendre compte de la réalité, c'est pourquoi l'expérience et les outils de simulations restent indispensables à l'étude complète d'écoulements complexes dans des géométries et environnements particuliers. Là est l'objectif de notre projet, étudier les écoulements de fluides dans des milieux poreux en se servant d'un outil de simulation numérique: Ansys Fluent.

## 2. MÉTHODOLOGIE / ORGANISATION DU TRAVAIL

Chaque semaine, à l'horaire dédié au projet, nous faisons une réunion avec notre professeur encadrant. Celui-ci nous donnait des directives concernant le travail à faire, nous orientait dans nos recherches et nous expliquait des notions incomprises.

En premier lieu, nous avons fait des recherches sur la mécanique des fluides en général. Ensuite nous les avons orienté vers les milieux poreux, un sujet au cœur de notre projet. Nous avons alors commencé un travail de rédaction et de bibliographie.

Enfin, sur les derniers mois, nous avons réalisés plusieurs simulations numériques à l'aide du logiciel Ansys fluent. Les deux premières nous ont permis de mieux comprendre le logiciel et les fonctionnalités. La dernière quant à elle, répondait aux objectifs initiaux de notre projet. Pour la simulation, nous avons été beaucoup guidés par notre encadrant car c'est un logiciel que nous ne connaissions pas du tout auparavant. Lors de nos premières simulations, notre professeur nous envoyait par mail des vidéos tutoriels dans lesquelles il effectuait les simulations que nous avions à reproduire tout en faisant des commentaires à chaque étape. Cela nous permettait de bien comprendre les différentes étapes de la simulation et ainsi être capable de modifier seuls, lors des dernières séances, les paramètres nécessaires afin de mieux interpréter nos résultats. On retrouve ci-dessous, en figure 1, un organigramme représentant la répartition des tâches au sein de groupe.

Voici ci-contre l'organigramme représentant la répartition du travail:

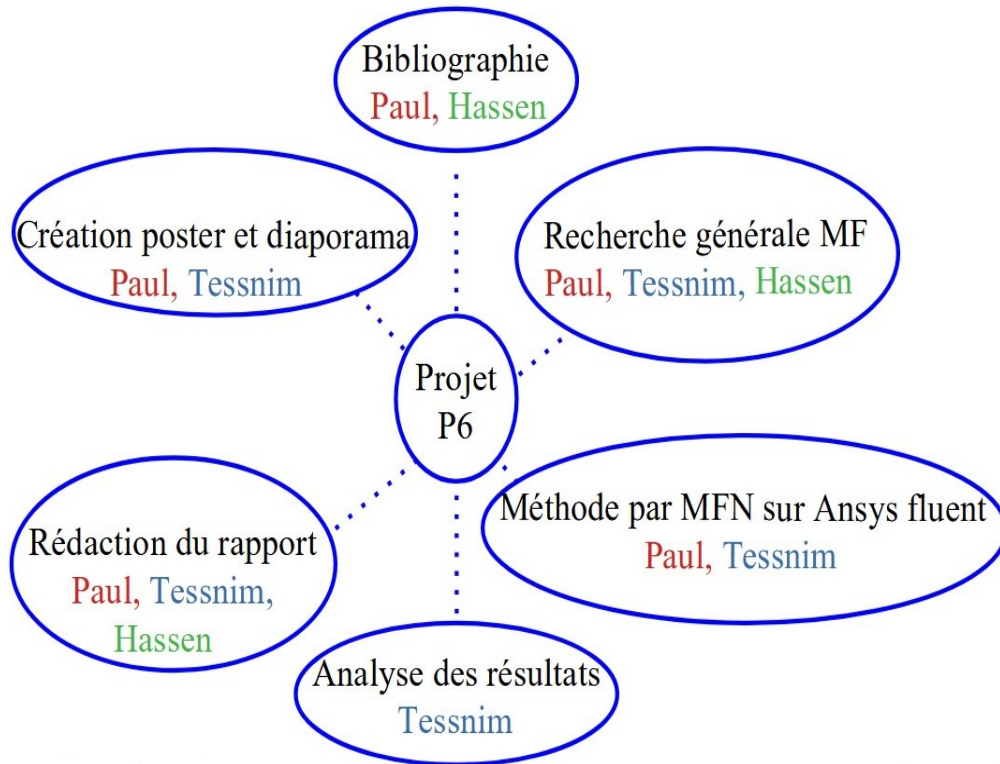


Figure 1: Organigramme de l'organisation du travail au sein du groupe.

### 3. TRAVAIL RÉALISÉ ET RÉSULTATS

La première partie de ce projet est composée essentiellement de recherches théoriques concernant les propriétés des fluides, les caractéristiques des milieux poreux et les équations de la dynamique des fluides régissant les problèmes. Nous avons dans cette partie abordé la notion de FAP en profondeur. Le but final de ces recherches étant de comprendre le fonctionnement des écoulements de fluide et les modèles utilisés.



La deuxième partie est dédiée à la partie simulation du projet. Nous avons utilisé nos résultats obtenus à l'aide du logiciel Ansys Fluent. Celui-ci nous a permis de mettre en pratique ce que nous avons étudié de façon théorique dans la première partie sur l'écoulement et le mouvement de fluides.

### **3.1. I- Généralités sur les fluides et propriétés**

Du fait de la nouveauté du sujet que nous abordions, la première partie de notre projet a été exclusivement bibliographique et composé de recherches afin de découvrir les notions théoriques liées à l'écoulement de fluides en milieux poreux. Ainsi, on présente ici les principaux points de nos recherches.

#### **3.1.1. I-1- Le concept d'un fluide**

Avant toute chose, il est important de commencer par définir la notion de fluide. Physiquement parlant, la distinction entre un fluide et un solide se traduit à l'état moléculaire, et plus précisément, au niveau des interactions. A l'échelle macroscopique, on peut dire qu'un fluide n'a pas de volume propre alors qu'un solide à quant à lui une frontière.

Il y a 2 classes de fluide : les liquides et les gaz.

-Les liquides sont des molécules compactes avec de fortes forces de cohésion.

-Les gaz sont libres de s'étendre jusqu'à ce qu'ils rencontrent une limite, ils n'ont pas de volume défini. Ils ne peuvent pas former de surface libre et sont rarement concernés par les effets de gravité.

[3] Surface libre : A une température et à une pression donnée, lorsqu'un liquide est en contact avec un gaz, les deux milieux sont nettement séparés. La surface qui les sépare s'appelle la « surface libre » du liquide.

#### **3.1.2. I-2- La notion de fluide continu en mécanique des fluides**

Les propriétés d'un fluide peuvent être définies comme variant continuellement dans l'espace.

Un fluide continu à ses propriétés qui sont des fonctions continues des variables d'espace et du temps.

### I-2-1- Quelques définitions

Pour étudier un fluide, il est important de connaître quelques propriétés et définitions car les fluides ne se comportent pas tous de la même manière.

Le premier paramètre important caractérisant un fluide est ce que l'on appelle la viscosité. C'est une grandeur qui mesure quantitativement la résistance d'écoulement d'un fluide. En effet, dans un fluide réel, les forces de contact ne sont pas perpendiculaires aux éléments de surface sur lesquelles elles s'exercent. La viscosité est due à ces frottements qui s'opposent au glissement des couches fluides les unes par rapport aux autres.

Si l'on considère par exemple un fluide newtonien qui est un fluide qui continue de s'écouler indépendamment des forces extérieures qui agissent sur lui, sa viscosité va varier avec des changements de températures et de pression. Par contre, l'augmentation de la viscosité est très petite avec la pression mais très grande avec la température. Le coefficient de viscosité augmente avec la température pour les gaz et diminue pour les liquides. [18]

Il est aussi possible de définir la viscosité cinématique par la relation suivante :

$$\nu = \mu/\rho \quad (\text{Équation 1})$$

- $\nu$  est le coefficient de viscosité cinématique, exprimé en mètres carrés par seconde ( $\text{m}^2/\text{s}$ )

- $\mu$  qui désigne le coefficient de viscosité dynamique caractérisant l'aptitude du fluide à s'écouler et s'exprime en Pa.s ou en Poiseuille (PI)

- $\rho$  qui désigne la masse volumique du fluide en  $\text{kg}/\text{m}^3$

En pratique, pour mesurer la viscosité, on utilise un viscosimètre.

L'utilisation de cet outil pratique est impliquée dans plusieurs domaines, comme le contrôle des réactions de polymérisation ou de combustion de fioul lourds par exemple.

Afin de caractériser la nature d'un écoulement, on utilise le nombre de Reynolds. [8] Celui-ci nous permettra de déterminer si un écoulement est laminaire ou turbulent. Pour cela, on se sert de l'équation qui suit:

$$\text{Re} = VL\nu^{-1} \quad (\text{Équation 2})$$

où:

- V : la vitesse caractéristique du fluide
- L : la longueur de l'objet sur laquelle le fluide s'écoule
- $\nu$  : la viscosité cinématique

Avec cette formule, on compare l'inertie, liée à la vitesse à la résistance qui est elle caractérisée par la viscosité.

Un écoulement turbulent est caractérisé par des remous avec un aspect aléatoire, la vitesse présente en tout point un caractère tourbillonnaire. Il existe aussi les écoulements tourbillonnaires mais qui ne correspondent pas à un écoulement turbulent. En effet, les turbulences sont constitués de tourbillons de tailles et formes variables qui se créent et disparaissent constamment.

Un écoulement dans lequel il n'y a pas de turbulence est dit laminaire. C'est-à-dire que l'écoulement du fluide se fait par glissement de couches de fluide les unes sur les autres sans échanges de particules entre elles. L'ensemble du fluide s'écoule plus ou moins dans la même direction.

Un écoulement turbulent est caractérisé par un nombre de Reynolds élevé. Dans ce cas, les transferts de quantité de mouvement par convection sont plus faibles que par conduction. C'est comme si la viscosité du fluide était nulle, c'est-à-dire comme si le fluide était parfait.

A l'inverse, pour un nombre de Reynolds faible, le mouvement est visqueux et les effets d'inerties sont négligés. Les écoulements ayant une grande viscosité, ils ont alors des écoulements très lents.

Enfin, une dernière notion importante à l'écoulement d'un fluide: la compressibilité. Les effets de celui-ci correspondent à des changements non négligeables de la densité causée par l'écoulement du fluide. On considère un fluide incompressible quand, pendant son déplacement, la masse volumique est considérée comme constante. La compressibilité devient importante quand la vitesse de l'écoulement atteint une fraction significative de la vitesse du son dans le milieu considéré. [11][12]

Pour étudier la compressibilité d'un fluide, on peut évaluer le nombre de Mach. Si celui-ci est faible, alors on peut faire l'hypothèse d'un fluide incompressible.

Par définition, le nombre de Mach, rapport entre la vitesse d'un fluide et la vitesse du son dans le fluide est un nombre sans dimension.

Pour savoir si un fluide est compressible ou non, il est également possible d'utiliser l'équation locale de la conservation de la masse :

$$\frac{\partial \rho}{\partial t}(M, t) + \operatorname{div}(\rho U) = 0$$

(Équation 3)

où U est la vitesse de la particule fluide.

## I-2-2- La dynamique des fluides

La dynamique des fluides, est l'étude des mouvements des fluides, qu'ils soient liquides ou gazeux. C'est une branche fondamentale de la mécanique des fluides avec la statique des fluides. La résolution d'un problème de dynamique des fluides demande en règle générale de calculer diverses propriétés des fluides comme la vitesse, la viscosité, la densité, la pression et la température comme fonctions de l'espace et du temps.

Il existe deux points de vue pour caractériser un mouvement en dynamique des fluides: la description Lagrangienne et la description Eulérienne.[4][21]

La description Lagrangienne consiste à suivre dans le temps les particules en fonction de leur trajectoire. La particule est identifiée par sa position initiale située au point  $M_0$  à l'instant  $t=0$ .  $r_0$  est le vecteur position initiale, il ne dépend pas du temps:

$$r_0 = OM(0) = (x_0, y_0, z_0)$$

(Équation 4)

On cherche à définir toutes les positions de toutes les particules à chaque instant  $t$  matérialisées par le point  $M$ .

Les inconnues de Lagrange sont les coordonnées de la position à l'instant  $t$ ,

$r(r_0, t) = OM = (x(r_0, t), y(r_0, t), z(r_0, t))$  plus simplement noté  $r = (x, y, z)$ .

Les coordonnées de Lagrange sont données par le vecteur position initiale  $r_0$  et le temps  $t$ . La seule variable est donc le temps car les équations spatiales et temporelles sont liées entre elles. Les dérivées partielles ou totales sont ainsi identiques.

La trajectoire de la particule fluide est directement fournie par la fonction  $r(r_0, t)$ .

Pour obtenir le vecteur vitesse, il suffit de faire le taux d'accroissement sur les trois coordonnées de  $OM$ . On obtient alors ceci:

$$U(r_0, t) = \left( \frac{dx}{dt}(r_0, t), \frac{dy}{dt}(r_0, t), \frac{dz}{dt}(r_0, t) \right)$$

(Équation 5)

Le champ des vitesses lagrangiennes est l'ensemble des vitesses pour les différents points de départ  $r_0$  à chaque instant  $t$ .

Par souci de clarté, nous écrirons les équations comme suit:

$$U = \frac{dr}{dt} = (U_x, U_y, U_z) = \left( \frac{dx}{dt}, \frac{dy}{dt}, \frac{dz}{dt} \right)$$

(Équation 6)

Pour obtenir l'accélération, il suffit de dériver par rapport au temps :

$$\mathbf{a} = \frac{d\mathbf{U}}{dt} = (a_x, a_y, a_z) = \left( \frac{dx^2}{dt^2}, \frac{dy^2}{dt^2}, \frac{dz^2}{dt^2} \right)$$

(Équation 7)

De manière générale, le point de vue Lagrangien est peu employé pour la résolution analytique de problème de mécanique des fluides car il s'avère souvent difficile à mettre en œuvre.[5]

Il existe une autre approche utilisée dans le domaine de la mécanique des fluides et en mécanique des milieux continus pour de grandes déformations, celle-ci se nomme la description Eulérienne. Cette méthode est plus pratique et repose sur le fait que pour une position donnée, on observe ce qui rentre et ce qui sort à chaque instant. La position de la particule fluide étudiée est caractérisée par ses coordonnées dans le système de coordonnées utilisées. Par exemple, en coordonnées cartésiennes:  $r=(x,y,z)$ . Elles sont toutes indépendantes ici ! [6]

Pour définir l'accélération en Eulérien, on a besoin de définir les lignes de courant d'un écoulement. Une ligne de courant est une courbe qui à un instant donné admet comme tangente en chacun de ses points un vecteur vitesse. [19]

Pour l'accélération en Eulérien, on peut montrer qu'elle est donnée par cette formule:

$$\mathbf{a} = \frac{d\mathbf{U}}{dt} = \frac{\partial \mathbf{U}}{\partial t} + \frac{1}{2} \text{grad}(U^2) + \text{rot}(\mathbf{U}) \wedge \mathbf{U}$$

(Équation 8)

### I-2-3- Les différentes équations et lois régissant la mécanique des fluides

Il existe beaucoup d'équations essentielles au domaine de la mécanique des fluides. Citons d'abord celles concernant les fluides dits parfaits (dont la viscosité est nulle).[16]

Lorsque l'on parle de ces types de fluide, on pense en premier lieu aux équations d'Euler. Ce sont des EDP décrivant l'écoulement des fluides dans l'approximation des milieux continus. Les écoulements sont adiabatiques sans échange de quantité de mouvement, d'énergie, et de chaleur.

Ils sont adaptés aux problèmes impliquant un fluide de faible viscosité.

Voici l'équation de continuité (équation de bilan de la masse):

$$\frac{\partial \rho}{\partial t}(M, t) + \text{div}(\rho \mathbf{U}) = 0$$

(Équation 9)

C'est une équation fondamentale de la mécanique des fluides. Elle ne nécessite pas de faire d'hypothèses en particulier. La vitesse et la densité doivent cependant être définis.

Pour les écoulements permanents des fluides compressibles, on a:

$$\nabla \cdot (\rho \times \mathbf{V}) = 0$$

(Équation 10)

Pour les fluides incompressibles, la masse volumique étant constante, on a

$$\nabla \cdot \mathbf{V} = 0$$

(Équation 11)

Voici l'équation de quantité de mouvement:

$$\rho \left( \frac{\partial}{\partial t} + \vec{v} \cdot \vec{\nabla} \right) \vec{v} = -\rho \vec{\text{grad}}(p) + \vec{j} \wedge \vec{B} + \rho \vec{g} + \vec{F}_\nu$$

(Équation 12)

- $\nu$  : la viscosité cinématique
- $\vec{j} \wedge \vec{B}$  : La force de Lorentz
- $\vec{F}_\nu$  : La force de viscosité

En outre, il existe aussi la forme différentielle de la conservation de l'énergie:

$$\frac{\partial}{\partial t} \left( \frac{1}{2} \rho v^2 \right) + \text{div} \left( \frac{1}{2} \rho v^2 \vec{v} \right) = \vec{v} \cdot (-\rho \vec{\text{grad}}(p) + \rho \vec{g} + \vec{j} \wedge \vec{B})$$

(Équation 13)

On peut également parler de la relation de Bernoulli qui est valable pour un écoulement d'un fluide parfait incompressible en régime stationnaire. Cette loi traduit le fait que la pression d'un fluide diminue lorsque sa vitesse augmente.

$$\rho \frac{v^2}{2} + \rho g z + p = cte$$

(Équation 14)

La constante dépend de la ligne de courant utilisée.

C'est une équation de conservation de l'énergie et la somme des trois termes représente l'énergie mécanique du fluide par unité de volume.

Enfin, il est important de parler des équations de NS qui sont des EDP non linéaires qui décrivent le mouvement des fluides newtoniens (donc des gaz et de la majeure partie des liquides).

La résolution de ces équations modélisant un fluide comme un milieu continu à une seule phase est difficile, et l'existence de solutions n'est pas démontrée. Elles permettent souvent par une résolution approchée, de proposer une modélisation de nombreux phénomènes. On peut par exemple citer les courants océaniques, la météo et de nombreux autres phénomènes d'écoulement de divers fluides.[17]

## **3.2. II- Les milieux poreux**

### **3.2.1. II-1- Généralités et définitions sur les milieux poreux**

Un milieu poreux est un milieu qui se compose d'un corps solide et de creux. Le (ou les) fluide(s) vont s'écouler à travers ce milieu. Les fluides qui sont contenus dans l'espace poreux peuvent être dans différents états: fluides, solide ou encore diphasique. Ces milieux poreux ont deux origines : artificielle ou naturelle. [32]

Nous définissons la perméabilité d'un milieu poreux par son aptitude à se laisser traverser par un fluide. Cette aptitude est due à une variation de pression ou bien d'un champ de gravité par exemple.

Les déplacements dans la phase fluide au cours de l'écoulement dans le milieu poreux sont irréversibles. De plus, cette irréversibilité du déplacement est accompagnée par une augmentation de l'entropie du fluide, donc de son désordre.

Lors de nos études, nous pourrions négliger l'énergie cinétique de l'écoulement. En effet, dans ces milieux, l'écoulement des fluides se fait très lentement. De ce fait, leur énergie cinétique peut être négligée.[23]

### 3.2.2. **II-2- Les lois et équations régissant les écoulements fluides dans les milieux poreux**

#### II-2-1- Loi de Darcy

Tout d'abord, il n'existe aucune loi physique valable qui permet de décrire précisément les écoulements à travers les milieux poreux. En particulier, les équations de NS étant non-linéaires, il n'est pas possible de les résoudre dans des milieux aussi complexes.

Dans cette partie, la notion de perméabilité est très importante. En effet, la perméabilité est au cœur de la loi de Darcy:

$$Q = K S \Delta H L^{-1}$$

(Équation 15)

avec :

- Q : le débit volumique (m<sup>3</sup>/s) ;
- K : la conductivité hydraulique, appelé aussi le « coefficient de perméabilité » du milieu poreux (m/s). Cette constante dépend des propriétés du milieu poreux mais aussi de la viscosité du fluide ;
- S : la surface de la section (m<sup>2</sup>) ;
- $\Delta H L^{-1}$  : le gradient hydraulique, où  $\Delta H$  est la différence des hauteurs piézométriques de part et d'autre de l'objet étudié, L est la longueur de l'objet dans lequel s'écoule le fluide.

Cette loi traduit le fait qu'un débit Q d'un fluide incompressible s'écoulant en régime stationnaire à travers un milieu poreux est relié à la longueur L, la section S sous l'effet d'une différence de charge  $\Delta H$ . Le terme K relie quant à lui la perméabilité du milieu au débit volumique. [22][24]

Pour permettre l'utilisation de cette loi, il faut que plusieurs conditions soient réunies:

- le milieu poreux traversé est homogène
- le fluide doit être incompressible (on considérera souvent les liquides comme incompressibles et les gaz comme compressibles)
- le fluide ne doit pas réagir avec le milieu poreux qu'il traverse
- le flux du fluide est à température constante
- le flux suit une variation linéaire

Cette relation est applicable à la majorité des types de flux de fluides traversant les sols puisqu'ils sont considérés comme poreux. En revanche, on ne peut plus l'appliquer si la vitesse des fluides est très élevée ou bien si la vitesse des gaz est très faible.



En outre, il existe une hypothèse classique dans ce genre de simulation, celle de Dupuit, permettant de simplifier l'étude de l'écoulement d'un fluide dans un milieu poreux. En effet, on considère ici que la répartition de la pression est hydrostatique sur toute verticale. Cela permet donc de convertir l'étude d'un écoulement 3D à l'étude d'un problème 2D donc plan. La principale hypothèse est de considérer que les écoulements à travers les milieux sont quasi-horizontaux. [31]

Le problème majeur de la loi de Darcy réside dans le fait qu'elle est valable pour un écoulement monophasique avec un fluide occupant tout l'espace du milieu.

Pour modéliser des écoulements diphasiques, on peut s'intéresser au modèle de Darcy-Brinkman.

## II-2-2- Loi de Darcy-Brinkman

Effectivement, cette loi permet à la fois de modéliser des écoulements monophasiques dans une structure poreuse mais aussi des écoulements diphasiques. Nous pouvons donc combiner le champ effectif généré par le milieu poreux et le champ hydrodynamique microscopique.

Brinkman associe donc l'équation de Stokes à celle de Darcy. (L'équation de Stokes est en fait une forme simplifiée de l'équation de la loi de conservation de la masse contenue dans l'équation de NS avec une simplification des termes non linéaires). Le lien entre le modèle de Stokes et l'équation de Darcy est rendu possible grâce à l'équation de Brinkman qui associe à l'équation de Stokes un terme de traînée volumique. [28][29]

Loi de Darcy Brinkman :

$$\mu V = -K(\nabla p - \rho(p)g) + \mu' k \nabla^2 V \quad (\text{Équation 16})$$

Nous avons 2 termes de viscosité :

- $\mu$ : le terme usuel de viscosité dans l'équation de Darcy.
- $\mu'$ : le terme de viscosité effective, similaire à celle dans l'équation de NS. [29]

### **3.2.3. II-3- Les applications des milieux poreux**

#### **II-3-1- Applications générales**

Autour de nous, la matière est bien souvent poreuse, c'est la raison pour laquelle on retrouve les milieux poreux dans différents domaines.

Premièrement, on la retrouve dans les matériaux et les bâtiments. En effet, ceux-ci sont constitués en majorité de milieux poreux. C'est aussi le cas du mobilier ou des vêtements qui sont faits de matières poreuses.

Deuxièmement, dans le domaine de la chimie, de nombreuses applications aux milieux poreux sont possibles notamment pour le dessalement de l'eau, la séparation des phases gazeuses, la purification de l'eau, mais aussi en catalyse avec l'utilisation de catalyseurs (essentiels en chimie) qui sont bien souvent des solides microporeux. On retrouve également l'écoulement en milieu poreux d'une ou plusieurs phases dans la filtration, qui est essentielle dans une grande catégorie d'activités humaines telle que l'exploitation des ressources en eau, en pétrole et en gaz naturel.

Enfin, les milieux poreux sont importants dans la structure des sols, en agronomie, en génie civil, en maîtrise des risques naturels et pour la dépollution des sols lorsque des fluides souillés percolent dans les sols. [32]

#### **II-3-2- Cas des filtres à particules**

Nous avons réalisé la plupart des simulations numériques sur des filtres, c'est pourquoi nous allons nous intéresser aux FAP dans cette partie.

Un FAP peut se résumer à un système de filtration servant à retenir les particules fines, très souvent cancérigènes pour l'homme.

La filtration est un procédé de séparation permettant de séparer les constituants d'un mélange qui possède une phase liquide et une phase solide au travers d'un milieu poreux. Quant aux fines particules, elles désignent simplement les particules en suspension qui sont toutes les particules portées par les fluides naturels, quantifiables par filtration ou d'autres procédés physiques.

Historiquement parlant, les premiers filtres à particules pour moteur diesel ont été à l'origine développés par Daimler-Benz en 1985 pour la Mercedes Classe S W126, afin de répondre aux normes strictes d'émissions américaines.

En effet, les matières particulaires sont dans leur ensemble classées cancérigènes pour l'homme par le CIRC. Celles-ci sont souvent contenues dans les gaz de combustion, notamment ceux présents dans les cheminées à bois et les moteurs diesels.

Sur les véhicules à moteurs diesels, les filtres à particules sont constitués d'alvéoles hexagonales extrudées en céramique frittée. Les canaux de ces alvéoles sont bouchés alternativement en entrée et en sortie du filtre dans le but de forcer le passage des gaz à travers les parois poreuses. Les particules restent alors coincées.

Il est également possible d'envisager différentes formes géométriques pour les canaux, couramment de section carré, mais des canaux de section triangulaire sont envisageables.

### **3.3. III- Le logiciel et méthodes de simulation par MFN**

#### **3.3.1. III-1- Ansys Fluent**

Ansys Fluent est un logiciel qui permet de faire une simulation par MFN. Il apporte des résultats rapides pour la modélisation d'écoulements de fluides, de transferts thermiques mais il peut aussi être utilisé pour l'étude de réactions chimiques. Ce logiciel est très accessible puisqu'il ne nécessite pas d'avoir des connaissances en programmation. Il est de plus, très utilisé dans un grand nombre d'industries et par de nombreuses entreprises. Le logiciel apporte la possibilité à l'utilisateur de programmer toutes les étapes de la simulation manuellement en commençant par la géométrie, le maillage, l'implémentation et la solution du problème. La simplicité de l'utilisation du logiciel ne nuit cependant pas à ses performances. Au contraire, il est très efficace et procure des résultats précis avec un temps de calcul court. (Dans le cadre de ce projet, nous avons utilisé la version gratuite disponible pour les étudiants.)

#### **3.3.2. III-2- Qu'est-ce qu'une résolution de problème par MFN?**

Le fluide est gouverné par les équations de NS et à ces équations, des termes de conservation de charges et de masse sont ajoutés. Il y a 3 façons de comprendre l'écoulement d'un fluide : analytiquement, expérimentalement et numériquement. Pour la façon analytique, nous devons faire beaucoup de simplifications pour résoudre les équations comme par exemple considérer qu'il n'y a pas de transferts thermiques et que l'écoulement est stationnaire pour transformer l'EDP en une équation ordinaire. Néanmoins, on ne peut pas obtenir de solution réaliste lorsque la géométrie du problème est très complexe. En conséquence, on utilise une méthode expérimentale plus précise qui illustre ce qui se passe dans la réalité mais à une échelle plus petite : la méthode CFD. Celle-ci est une branche de la mécanique des fluides qui utilise l'analyse numérique et la structure des données pour

analyser et résoudre des problèmes impliquant des fluides en écoulement. Cette méthode consiste à remplacer les systèmes d'EDP par un ensemble d'équations algébriques. Puis, on utilise une simulation numérique pour prévoir et anticiper le mouvement des fluides. Le logiciel donne ainsi un aperçu des schémas de flux (difficiles à résoudre à la main) et apporte une prédiction quantitative du phénomène de flux. C'est un outil très puissant puisqu'il permet aux scientifiques et ingénieurs d'effectuer des expériences numériques avec des simulations informatiques. Grâce à cette méthode, une expérience réelle peut être plus précise, plus facilement analysée et permet aux chercheurs et ingénieurs de procéder à des simulations dans de très nombreux domaines de la dynamique des fluides. Il y a de nombreux avantages à cette méthode : on peut changer la taille du domaine autant qu'on le souhaite, on a un nombre illimité de simulations possibles et enfin, cela permet de réduire les coûts de l'expérience. [33]

La procédure d'analyse par la simulation par MFN se fait en 4 étapes : l'identification du problème, le pre-processing, la simulation MFN et la phase de post-processing. Lors de la première étape, nous identifions le problème, le type d'écoulement, le problème physique et la géométrie du domaine à étudier. Nous devons aussi définir à ce moment-là l'objectif de la méthode et le degré de précision que l'on souhaite avoir. Par la suite, on met en place le modèle mathématique en isolant la pièce du système que l'on veut étudier, on définit le domaine mathématique, le modèle de flux approprié et le cadre de référence. Nous poursuivons cette étape en établissant les lois de conservation, en apportant des simplifications aux équations qui régissent le flux et enfin on fixe les conditions limites. Dans la seconde étape de preprocessing, le système d'EDP est transformé en un ensemble d'équations algébriques. On génère ensuite le maillage de la géométrie en décomposant en cellules appelées "volumes de contrôle" et en précisant le type de maillage souhaité. On finit par effectuer la discrétisation en espace et en temps.

Dans la simulation par MFN, le temps de calcul dépend de nombreux paramètres tels que le choix des algorithmes numériques, la structure des données et le langage du programme. De plus, la qualité de la simulation dépend du modèle mathématique choisi, le pas de temps et le maillage effectué dans l'étape précédente.

La dernière étape de post processing correspond à la partie d'analyse et de vérification de la simulation. Dans cette partie, on étudie les incertitudes dues à un manque de connaissances mais on évalue aussi le type d'erreur que l'on a : les erreurs connues (celles que l'on peut identifier), les erreurs qui ne sont pas connues (elles sont difficiles à identifier car elles ne proviennent pas de procédures standard), les erreurs locales (localisé à un point seulement) et les erreurs globales (dans le domaine de flux entier).

### **3.3.3. III-3- Les différentes méthodes de résolution par MFN**

Il existe 3 principaux types de simulation d'écoulements turbulents. Tout d'abord, il y a le DNS qui permet de résoudre numériquement les équations de Navier-Stokes sans passer par l'utilisation d'un modèle de turbulence. C'est-à-dire que la gamme complète des échelles spatiales et temporelles de turbulence doit être résolue.

Le deuxième type de simulation de flux est le LES qui utilise un modèle mathématique, le SGS pour les turbulences et permet de réduire les coûts liés aux calculs.

La dernière méthode est la RANS. L'idée avec ces équations est une décomposition de Reynolds qui est une technique mathématique utilisée pour séparer la valeur attendue d'une quantité de ses fluctuations. Ces équations peuvent être utilisées avec des approximations basées sur la connaissance des propriétés de turbulences du flux pour avoir des solutions moyennes dans le temps approximatives aux équations de NS. C'est une

méthode qui a l'avantage d'être assez rapide et qui engendre très peu de coûts de calculs. Elle permet aussi de modéliser toutes les échelles de longueur des turbulences.

Dans la figure 1, on peut observer les différences qu'il y a entre les 3 méthodes de simulations. En effet, on remarque que la méthode LES apporte une moins bonne précision car on néglige les valeurs qui ne passent pas le filtre et seuls les grands tourbillons sont simulés.

### **3.3.4. III-4- Limites de la méthode de résolution par MFN**

Malgré la grande efficacité de la méthode par MFN, la simulation n'est jamais totalement fiable. Cela est dû au manque de précision des résultats ou de l'imprécision des données en entrée. Même si la méthode est d'apparence très efficace en ce qui concerne l'analyse des phénomènes d'écoulements de fluides, elle peut aussi causer quelques erreurs d'incertitudes. Ces erreurs peuvent apparaître pendant les phases de modélisation, de discrétisation, d'itération ou d'implémentation. C'est pour ces raisons que les résultats de la simulation CFD ne sont jamais totalement fiables et ainsi, toutes les erreurs faites doivent être prises en considération dans l'analyse du résultat final de la simulation.

## **3.4. IV- Simulation numérique et résultats**

### **3.4.1. IV-1- L'écoulement des gaz dans un milieu poreux**

L'étude de l'écoulement des gaz en milieu poreux est très importante pour de nombreuses applications industrielles comme les filtres ou catalyseurs. La simulation effectuée concerne l'écoulement de gaz à travers un pot catalytique qui est un élément constitutif du pot d'échappement des moteurs à combustion interne. Le catalyseur est utilisé pour la purification de l'émission provenant de l'essence et du moteur diesel en convertissant les émissions dangereuses pour l'environnement à un niveau acceptable. Il y a plusieurs types de carburants hydrocarbures qui peuvent passer à travers le catalyseur, parmi eux il y

a le monoxyde de carbone et l'oxyde d'azote. L'émission de gaz est forcée dans le substrat qui comprend un catalyseur actif comme le palladium, le rhodium et le platine. Celui-ci déclenche des réactions chimiques pour convertir les polluants d'échappement en matériaux moins nocifs. Le substrat peut être métallique ou céramique et est modélisé comme un milieu poreux dans la méthode par MFN.

#### **IV-1-1- Objectifs de la simulation**

Le but de notre simulation est de déterminer la performance du catalyseur. C'est une étape très importante pour connaître la nature de l'écoulement gazeux. Dans notre cas, nous étudierons l'évolution de la pression et la distribution de vitesse à travers le substrat. Nous ferons alors une analyse par MFN pour concevoir un catalyseur efficace et effectuerons la modélisation de l'écoulement de l'azote à travers la géométrie.

#### **IV-1-2- Description des différentes étapes réalisées**

Le maillage du catalyseur nous a été fourni par notre professeur, nous avons donc pu l'importer directement dans le Ansys Workbench afin de commencer la simulation. Après avoir importé le fichier, la première chose à faire est de vérifier le maillage. C'est-à-dire s'assurer que les valeurs minimales de volume et de surface soient positives, vérifier la qualité du maillage et son échelle (dans notre cas ce sont des millimètres). Par la suite, il faut activer les modèles physiques utiles. La seule modification à faire pour nous est de sélectionner le modèle visqueux et choisir le modèle de turbulence k-epsilon car nous savons que l'écoulement est turbulent en entrée et en sortie du catalyseur. Cependant, il est laminaire dans le milieu poreux. Dans les conditions sur les cellules, pour la zone du milieu poreux il faut veiller à indiquer quelles sont les différentes directions que l'on a et assigner les résistances d'inerties et visqueuses. On fait le choix pour la résistance visqueuse d'attribuer la valeur de  $3.846e7 \text{ m}^{-2}$  dans la direction de X et des valeurs arbitraires pour Y et Z mais avec un ordre de magnitude 3 fois plus grand que pour X. On effectue la même chose pour la résistance d'inertie avec une valeur de  $20,44 \text{ m}^{-1}$  dans la direction de X. On définit la porosité en définissant les résistances visqueuses et inertielles à l'écoulement dans un milieu poreux. Cela nous renseigne sur la chute de pression totale dans le milieu.

On fixe maintenant les conditions aux limites en particulier pour l'entrée et la sortie. En ce qui concerne l'entrée, on fixe la condition limite de vitesse à  $22.6 \text{ m.s}^{-1}$ , l'intensité de turbulence à 10% car on sait que l'écoulement est très turbulent en entrée et le diamètre hydraulique à 42 mm. Pour la sortie on utilise la condition limite de pression avec le même diamètre hydraulique et une intensité de turbulence à 5% puisque la turbulence diminue en sortie.

Après avoir effectué tous les réglages, on peut maintenant passer à la partie de résolution et sélectionner un régime couplé de pression et vitesse et un régime pseudo transitoire qui permettra une convergence plus rapide. On met en marche le calcul sur 600

itérations mais après calcul on voit que l'on n'a besoin que de 447 itérations pour que cela converge en dessous du seuil qu'on a demandé.

La partie résolution étant terminée, nous passons au post-processing. Afin de mieux voir ce qu'il se passe à l'intérieur de la géométrie, on crée des iso-surfaces pour montrer les résultats. On positionne les iso-surfaces au début (à 95mm), au milieu (à 130mm) et à la fin du milieu poreux (à 165mm). Ensuite, on crée une ligne au centre poreux dans le but de mieux voir la chute de pression dans le milieu.

On active la distribution de pression pour les contours et on trace le vecteur vitesse. On obtient alors les résultats suivants: Dans la figure 2, on observe, grâce aux graphiques tracés sur le logiciel, que la baisse de pression avec les paramètres entrés est d'environ 300 Pa dans le milieu poreux.

### **IV-1-3- Études supplémentaires**

Afin de mieux comprendre l'effet des paramètres de porosité et de vitesse sur l'écoulement du fluide à travers le milieu poreux du catalyseur, nous allons effectuer 4 autres simulations sur la base de la première. Dans les 2 premiers cas, nous jouerons sur la porosité en la multipliant par 2 d'abord et ensuite en la divisant par 2 par rapport aux conditions fixées initialement. Pour évaluer l'effet de la porosité sur la distribution de pression, il nous faut modifier les paramètres de résistances inertielles et visqueuses. Nous ferons exactement la même chose avec la vitesse en entrée du milieu poreux.

Lorsque l'on compare les résultats de la distribution de pression dans le cas où l'on modifie la vitesse d'entrée, d'après les figures 5 et 8, on remarque que si celle-ci est doublée, la chute de pression est 2 fois supérieure à celle obtenue dans le cas de référence. D'autre part, quand la vitesse est divisée par 2, on voit que la chute de pression elle aussi est divisée par 2 environ comparée à la valeur de référence. Ces résultats concordent bien avec la Loi de Darcy dans les milieux poreux qui dit que pour les écoulements laminaires dans les milieux poreux, la chute de pression est généralement proportionnelle à la vitesse.

D'autre part, d'après les résultats obtenus en changeant la porosité, on retrouve des résultats assez similaires à ceux obtenus précédemment avec des modifications sur la vitesse. En effet, dans les figures 6 et 7, on remarque que lorsque la porosité est doublée, la chute de pression augmente de façon significative et diminue quand la porosité est divisée par deux. Ces résultats sont cohérents avec notre étude théorique puisque en augmentant la porosité, nous avons augmenté la résistance d'écoulement il faut alors fournir davantage de pression pour que le fluide puisse circuler à travers le milieu poreux. Par ailleurs, ces résultats nous permettent de vérifier ce qu'énonce la loi de Darcy c'est-à-dire que la chute de pression augmente lorsque la taille des pores décroît donc quand la porosité augmente.

#### **IV-1-4- Conclusion sur la simulation**

Avec les différentes simulations effectuées sur Fluent, on remarque que l'impact d'une région poreuse sur le champ d'écoulement peut être déterminé en examinant les composants de vitesses ou les valeurs de pression. De plus, on retrouve bien le fait que dans un milieu poreux, la circulation de fluide entre 2 points est déterminée par le coefficient de perméabilité du substrat mais aussi par le gradient de pression du fluide.

Nous avons réussi, grâce au logiciel Ansys Fluent à simuler l'écoulement d'un fluide (gaz) à travers le substrat, milieu poreux d'un catalyseur. Le calcul nous a montré les variations de pression et de vitesse dans le milieu poreux mais aussi mieux comprendre l'influence de la vitesse et la porosité sur celles-ci.

## **4. CONCLUSIONS ET PERSPECTIVES**

Finalement, nous avons vu que les simulations numériques constituent une véritable aide à la compréhension et la résolution d'un problème. Les différentes lois présentées dans la première partie permettent de mettre en place ces simulations. Elles ne sont pas suffisantes en elles-mêmes pour autant.

De ce fait, ce projet nous a permis de manipuler pour la première fois un logiciel de simulation numérique performant et rigoureux. Il nous a également permis de comprendre un peu mieux les écoulements à travers les milieux poreux.

En outre, ce projet a aussi été un moyen pour nous de travailler en autonomie sur un domaine inconnu et d'apprendre en conséquence. Nous avons acquis de nombreuses connaissances scientifiques mais nous avons aussi expérimenté le travail de recherche qu'il faut mener en amont pour l'étude et la résolution d'un problème.

Nous avons découvert la mécanique des fluides dans un autre contexte que celui des cours. Cette fois-ci, nous avons à faire à un problème concret sans toutes les simplifications auxquelles nous étions habitués, et cela nous a permis de mieux assimiler la complexité de phénomènes physiques que l'on aura sûrement l'occasion de rencontrer dans nos futures carrières d'ingénieurs.

Ce projet constitue pour nous une transition entre le cycle STPI et la poursuite de nos études en département de spécialité l'an prochain.

Enfin, nous tenons à remercier notre professeur encadrant M.Shadloo pour sa disponibilité et pour nous avoir aidé à mener à bien notre projet jusqu'à son terme.



## 5. BIBLIOGRAPHIE

### Éléments de mécanique des fluides

- [1] [https://fr.wikipedia.org/wiki/Contrainte\\_de\\_cisaillement](https://fr.wikipedia.org/wiki/Contrainte_de_cisaillement) (validé à la date du 28/03/2021).
- [2] [http://public.iutenligne.net/mecanique/mecanique-des-fluides/courtin/proprietes-des-fluides/co/Proprietes%20des%20fluides\\_31.html](http://public.iutenligne.net/mecanique/mecanique-des-fluides/courtin/proprietes-des-fluides/co/Proprietes%20des%20fluides_31.html) (validé à la date du 28/03/2021).
- [3] [https://fr.wikipedia.org/wiki/M%C3%A9canique\\_des\\_fluides#%C3%89coulements\\_%C3%A0\\_surface\\_libre](https://fr.wikipedia.org/wiki/M%C3%A9canique_des_fluides#%C3%89coulements_%C3%A0_surface_libre) (validé à la date du 28/03/2021).
- [4] [https://perso.univ-lyon1.fr/marc.buffat/COURS/AERO\\_HTML/node23.html](https://perso.univ-lyon1.fr/marc.buffat/COURS/AERO_HTML/node23.html) (validé à la date du 28/03/2021).
- [5] [https://fr.wikipedia.org/wiki/Description\\_lagrangienne#:~:text=Elle%20consiste%20%C3%A0%20suivre%20dans.des%20vitesses%20est%20souvent%20pr%C3%A9%C3%A9r%C3%A9e.](https://fr.wikipedia.org/wiki/Description_lagrangienne#:~:text=Elle%20consiste%20%C3%A0%20suivre%20dans.des%20vitesses%20est%20souvent%20pr%C3%A9%C3%A9r%C3%A9e.) (validé à la date du 12/04/2021).
- [6] [https://fr.wikipedia.org/wiki/Description\\_eul%C3%A9rienne](https://fr.wikipedia.org/wiki/Description_eul%C3%A9rienne) (validé à la date du 28/03/2021).
- [7] [https://fr.wikipedia.org/wiki/Fluide\\_newtonien](https://fr.wikipedia.org/wiki/Fluide_newtonien) (validé à la date du 28/03/2021).
- [8] [https://fr.wikipedia.org/wiki/Dynamique\\_des\\_fluides#%C3%89coulement\\_laminaire\\_et\\_turbulence](https://fr.wikipedia.org/wiki/Dynamique_des_fluides#%C3%89coulement_laminaire_et_turbulence) (validé à la date du 20/03/2021).
- [9] [http://ressources.unisciel.fr/sillages/physique/meca\\_flu/meca-flu.pdf](http://ressources.unisciel.fr/sillages/physique/meca_flu/meca-flu.pdf) (validé à la date du 28/03/2021).
- [10] <http://machineryequipmentonline.com/hydraulics-and-pneumatics/introduction-to-fluid-mechanicsthe-no-slip-condition#:~:text=When%20two%20bodies%20at%20different,no%2Dtemperature%2Djump%20condition.> (validé à la date du 28/03/2021).
- [11] [https://lmfteus.files.wordpress.com/2018/12/cours\\_compressible.pdf](https://lmfteus.files.wordpress.com/2018/12/cours_compressible.pdf) (validé à la date du 20/03/2021).
- [12] [https://fr.wikipedia.org/wiki/%C3%89coulement\\_incompressible#:~:text=Cas%20des%20liquides,-Cavitation%20d'une&text=Les%20liquides%20](https://fr.wikipedia.org/wiki/%C3%89coulement_incompressible#:~:text=Cas%20des%20liquides,-Cavitation%20d'une&text=Les%20liquides%20) (validé à la date du 20/03/2021).
- [13] [https://www.sciences.univ-nantes.fr/sites/claude\\_saintblanquet/synophys/45meflu/45meflu.htm](https://www.sciences.univ-nantes.fr/sites/claude_saintblanquet/synophys/45meflu/45meflu.htm) (validé à la date du 20/03/2021).
- [14] [https://perso.crans.org/mbertin/Cours\\_Mecanique\\_des\\_fluides.pdf?fbclid=IwAR1UyDydeTppqBvs6PRB2Fyfoj-tQXMzdHqUfijNFAZOV80f0\\_iBZCGSY8](https://perso.crans.org/mbertin/Cours_Mecanique_des_fluides.pdf?fbclid=IwAR1UyDydeTppqBvs6PRB2Fyfoj-tQXMzdHqUfijNFAZOV80f0_iBZCGSY8) (validé à la date du 20/04/2021).
- [15] <https://distart119.ing.unibo.it/albertold/files/Reynoldstheorem.pdf> (validé à la date du 2/04/2021).

- [16] [http://lesecsper.mines-douai.fr/ECSPER\\_MaE/res/Dynamique\\_fluides\\_parfaits.pdf](http://lesecsper.mines-douai.fr/ECSPER_MaE/res/Dynamique_fluides_parfaits.pdf) (valide à la date du 20/03/2021).
- [17] <https://studylibfr.com/doc/2269122/analyse-diff%C3%A9rentielle-des-%C3%A9coulements-de-fluides> (valide à la date du 2/04/2021).
- [18] [https://fr.wikipedia.org/wiki/Flux\\_non\\_visqueux](https://fr.wikipedia.org/wiki/Flux_non_visqueux) (valide à la date du 23/04/2021).
- [19] [https://fr.wikipedia.org/wiki/Fonction\\_de\\_courant](https://fr.wikipedia.org/wiki/Fonction_de_courant) (valide à la date du 20/04/2021).
- [20] [https://www.cartagena99.com/recursos/alumnos/apuntes/6-Potential\\_flow.pdf](https://www.cartagena99.com/recursos/alumnos/apuntes/6-Potential_flow.pdf) (valide à la date du 20/04/2021).
- [21] [http://olivier.granier.free.fr/PC-Montesquieu445072/cariboost\\_files/Mecanique-fluides-1516.pdf](http://olivier.granier.free.fr/PC-Montesquieu445072/cariboost_files/Mecanique-fluides-1516.pdf) (valide à la date du 20/03/2021).

## Éléments sur les milieux poreux

- [22] <https://www.thpanorama.com/blog/ciencia/ley-de-darcy-en-qu-consiste-experimento-y-aplicaciones.html> (valide à la date du 20/04/2021).
- [23] <http://cerig.pagora.grenoble-inp.fr/dossier/desordre-aleatoire-papier/page16.htm> (valide à la date du 5/05/2021).
- [24] <http://wanko.free.fr/COURS/COURS%20de%20STAT/Ecoulement%20monophasique%20en%20milieux%20poreux.htm> (valide à la date du 12/05/2021).
- [25] <http://dspace.univ-tlemcen.dz/bitstream/112/5091/5/Chapitre1.pdf> (valide à la date du 12/05/2021).
- [26] <https://www.shf-lhb.org/fr/articles/lhb/pdf/1967/02/lhb1967009.pdf> (valide à la date du 12/05/2021).
- [27] <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-02005883/document>  
C. M. Marle. Henry Darcy et les écoulements de fluides en milieu poreux. Oil & Gas Science and Technology - Revue d'IFP Energies nouvelles, Institut Français du Pétrole, 2006, 61 (5), pp.599-609. ff10.2516/ogst:2006001ff. Ffhal-02005883 (valide à la date du 20/03/2021).
- [28] <http://documents.irevues.inist.fr/bitstream/handle/2042/36921/301.pdf>  
Extension des lois de Darcy-Forchheimer et de BrinkmanForchheimer aux milieux poreux anisotropes et validation par CFD (valide à la date du 20/03/2021).
- [29] <https://hal.archives-ouvertes.fr/tel-01626032/document>  
Houssein Nasser El Dine. Étude mathématique et numérique pour le modèle Darcy-Brinkman pour les écoulements diphasiques en milieu poreux. Analyse numérique [math.NA]. École centrale de Nantes; Université libanaise. Faculté des Sciences (Beyrouth, Liban), 2017. Français. ffNNT : 2017ECDN0022ff. fftel-01626032v3f (valide à la date du 20/03/2021).

[30] *Etude du problème de Darcy-Brinkman dans une structure fluide/poreux*  
Fabrice GOLFIER<sup>1,2</sup>, Didier LASSEUX<sup>1</sup>, Michel QUINTARD (valide à la date du 18/05/2021).

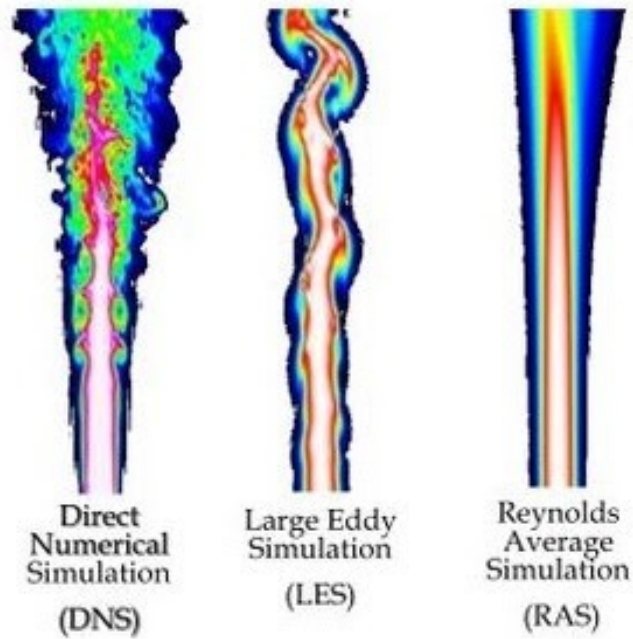
[31] <https://core.ac.uk/download/pdf/78383619.pdf> (valide à la date du 18/05/2021).

### Application des milieux poreux

[32] [https://hal.archives-ouvertes.fr/file/index/docid/452876/filename/Transferts\\_en\\_poreux\\_I.pdf](https://hal.archives-ouvertes.fr/file/index/docid/452876/filename/Transferts_en_poreux_I.pdf)  
Jean-François Daïan. Equilibre et transferts en milieux poreux I- Etats d'équilibre. 2010.  
ffhal00452876v1 (valide à la date du 28/04/2021).

[33] [https://en.wikipedia.org/wiki/Computational\\_fluid\\_dynamics](https://en.wikipedia.org/wiki/Computational_fluid_dynamics) (valide à la date du 2/05/2021).

## 6. ANNEXES



*Figure 2: Comparaison de la qualité de simulation entre les différentes méthodes.*

<https://www.slideserve.com/marisa/application-of-rans-pdf-les-fdf-methods-to-prediction-of-premixed-turbulent-flames>

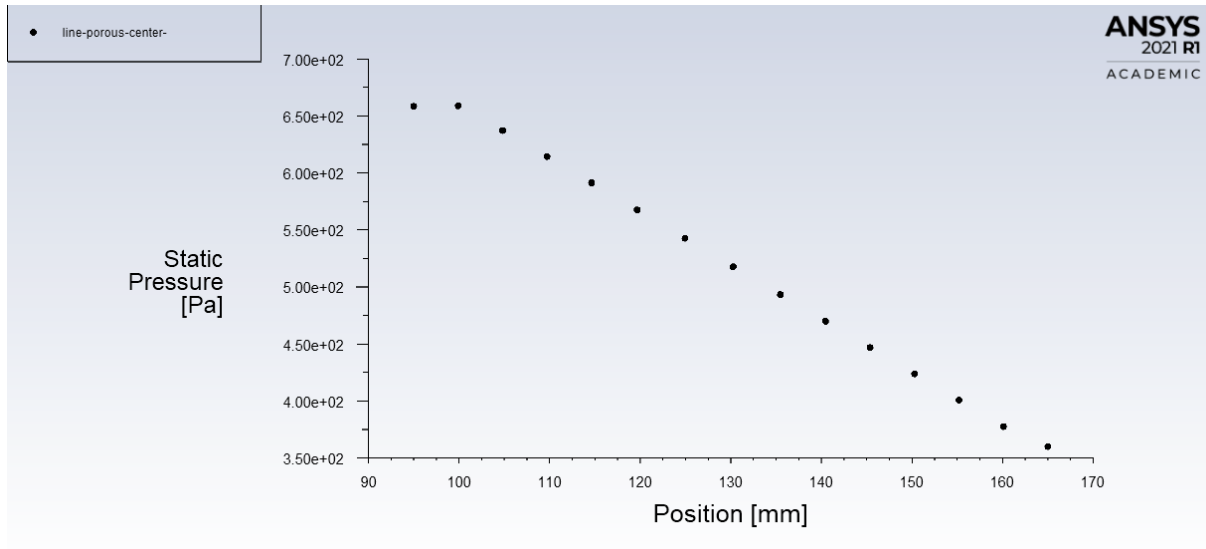


Figure 3: Graphique représentant la distribution de pression dans le milieu poreux (pour le cas de référence).

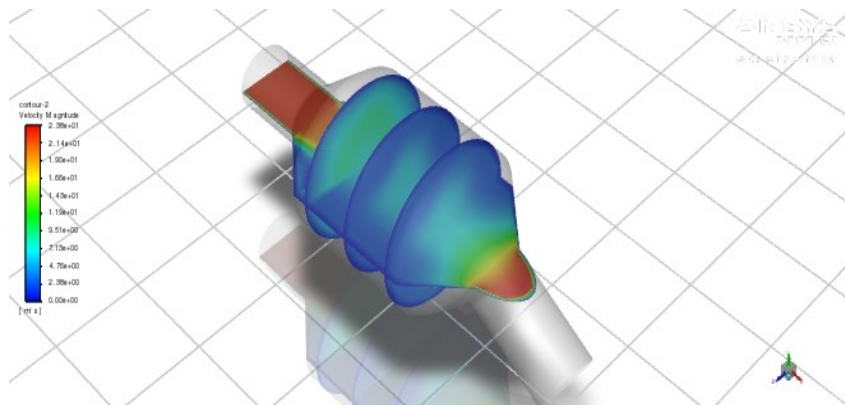


Figure 4: représentation de la distribution de vitesse (dans le cas de référence)

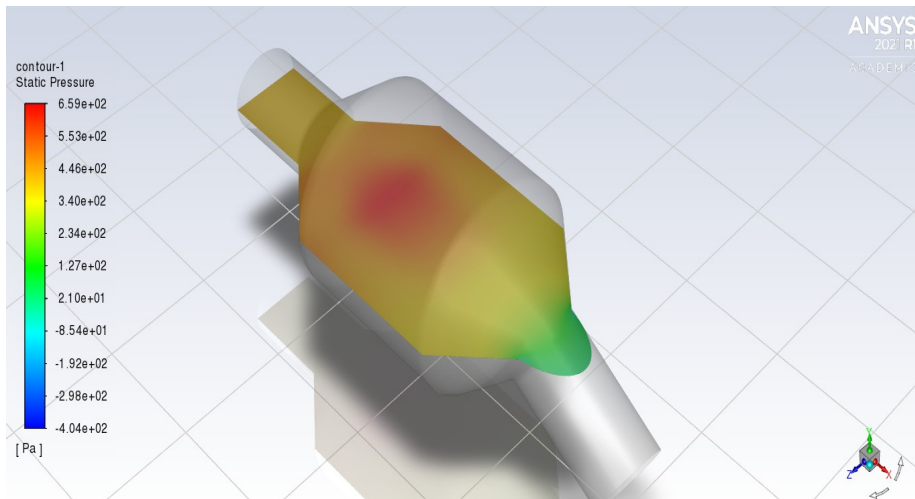


Figure 5: Représentation de la distribution de pression dans le milieu poreux (cas de référence).

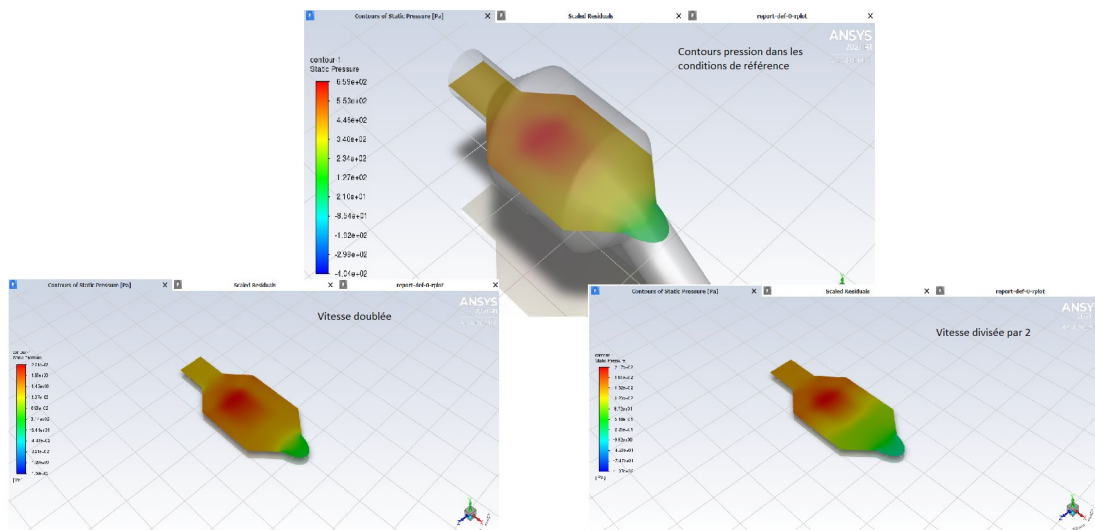


Figure 6: Comparaison de la distribution de pression dans le milieu poreux après changement des vitesses d'entrées.

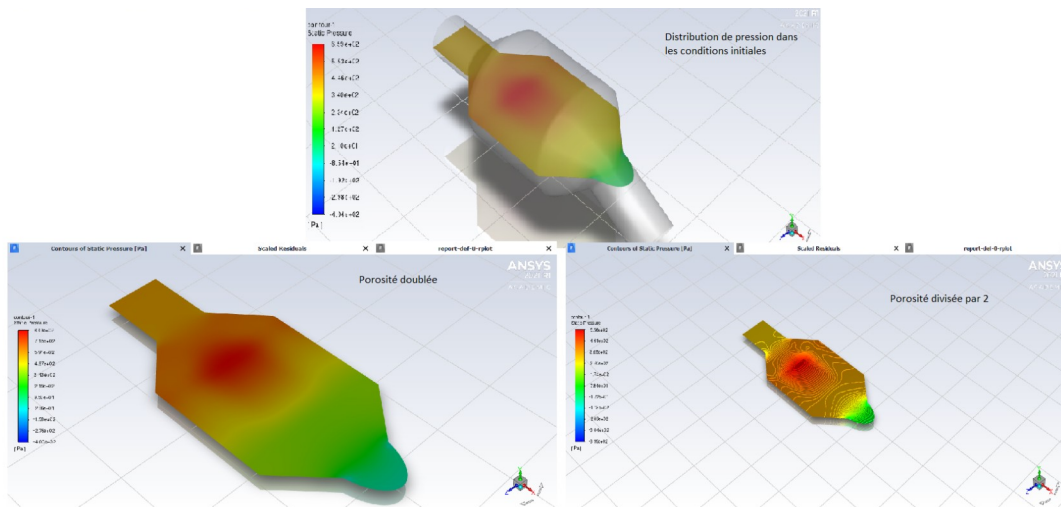


Figure 7: Comparaison de la distribution de pression dans le milieu poreux après changement des paramètres de porosité.

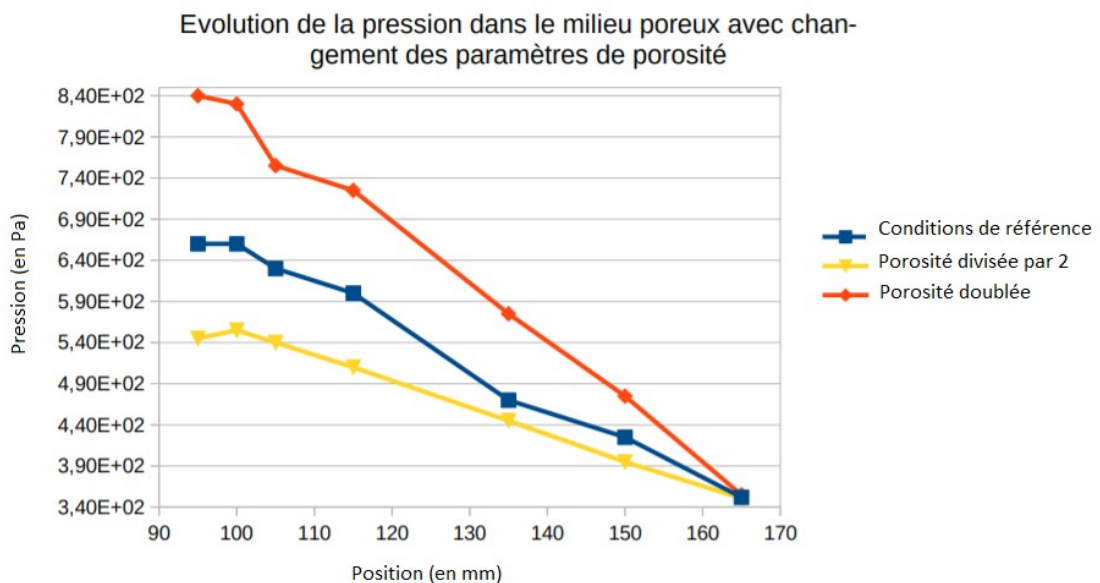
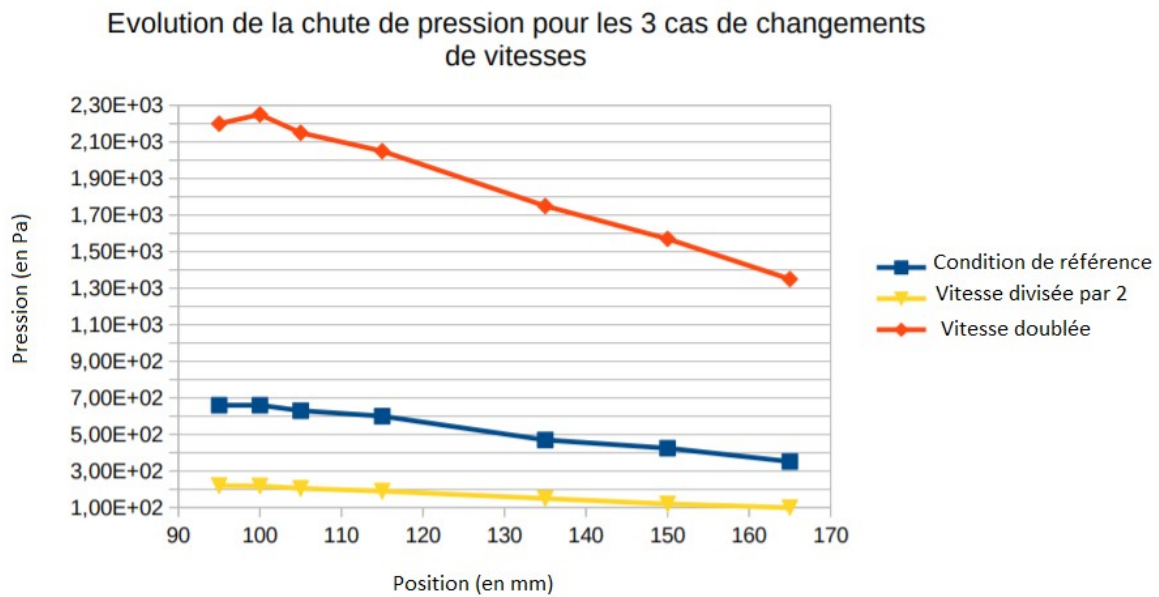


Figure 8: Graphique représentant les différences de pressions entre 3 cas de porosités différentes.



*Figure 9: Graphique représentant les différences de pressions entre 3 cas de vitesses d'entrées différentes.*



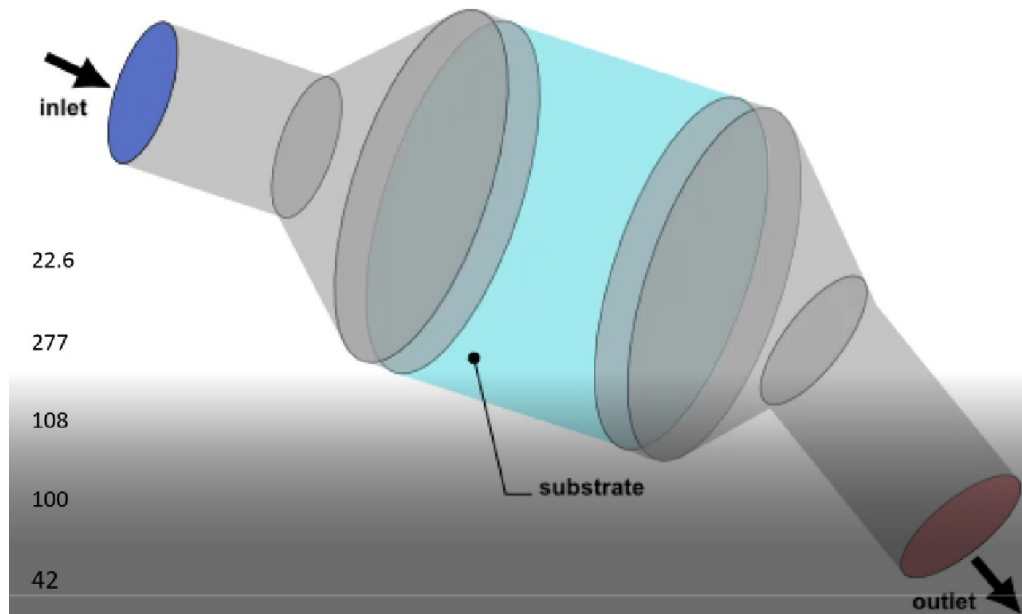


Figure 10: Schéma représentant la géométrie du catalyseur utilisée pour la simulation.

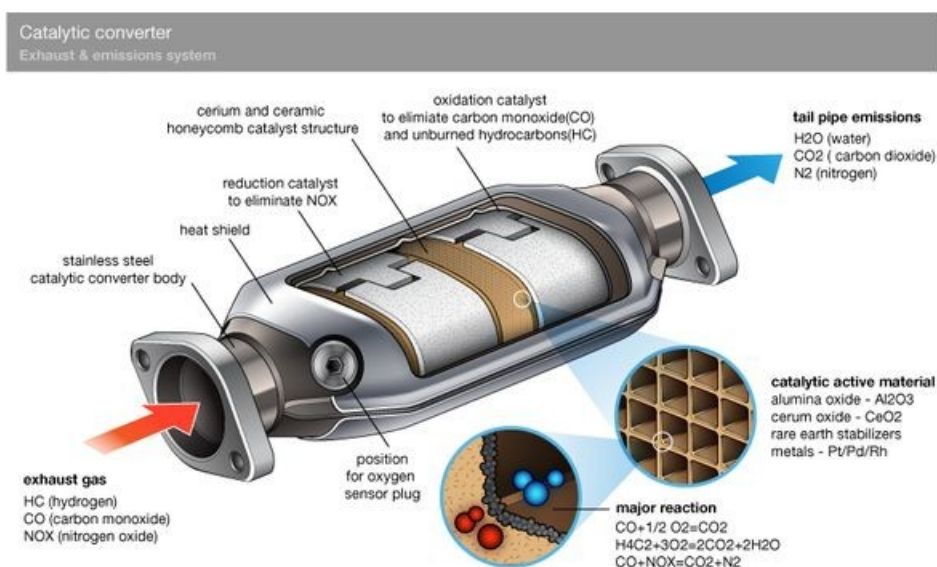


Figure 11: Représentation d'un pot catalytique de voiture et de son fonctionnement.