

LES AUTEURS



**JEAN-MICHEL COURTY
ET ÉDOUARD KIERLIK**
professeurs de physique
à Sorbonne Université, à Paris

LA CAFETIÈRE QUI NE MANQUE PAS D'AIR

Le fonctionnement de la cafetière italienne paraît simple. Il n'en présente pas moins quelques subtilités dont il faut tenir compte pour obtenir un café optimal.



Machines à espresso, cafetières à filtre, à piston, à broyeur, cafetières italiennes... Le choix est vaste ! Un même café moulu donnera des résultats différents selon la température de l'eau, la pression, la durée du passage de l'eau dans la mouture, etc.

Pour les amateurs, rien ne vaut le café intense et corsé préparé avec une cafetière italienne. Inventée en 1933 par l'ingénieur italien Alfonso Bialetti, cette cafetière en aluminium est toujours commercialisée sous le nom de Moka Express, et d'autres marques l'ont imitée. Son utilisation est simplissime : remplir le réservoir inférieur d'eau, placer au-dessus le panier en forme d'entonnoir et le remplir de café moulu, visser la partie supérieure (la verseuse), placer sur le feu et attendre quelques minutes que l'eau remonte par la cheminée, traverse le café en extrayant ses arômes et vienne remplir la verseuse.

À y regarder de près, cependant, les choses ne sont pas si simples. Alors que la température idéale de l'eau pour

l'extraction est de 90 °C, on lit souvent que si l'eau remonte dans la cafetière, c'est parce qu'elle bout. Plus curieux encore : chaque modèle de cafetière italienne est conçu pour préparer un nombre précis de tasses. Il est déconseillé de préparer deux tasses avec un modèle destiné à quatre tasses. Pourquoi ?

ÉVAPORATION, MAIS PAS ÉBULLITION

Pour répondre à ces questions, voire optimiser la préparation du café, examinons plus en détail le fonctionnement de cette cafetière. Conformément à la notice, on remplit le réservoir d'eau jusqu'au niveau de la valve de sécurité. Une fois la verseuse vissée, ce qui assure l'étanchéité du dispositif, de l'eau et un

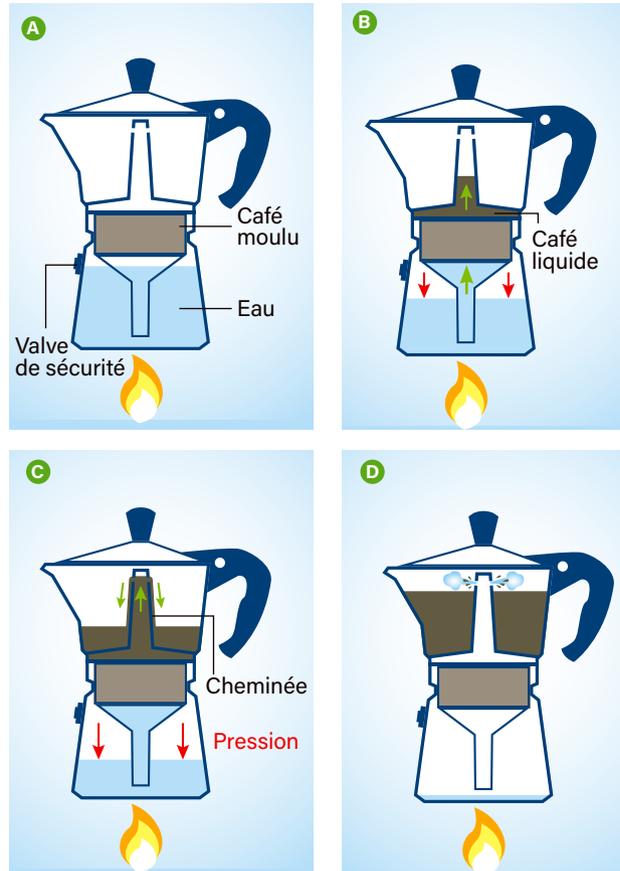
petit volume d'air sec sont enfermés dans le réservoir. Lorsque l'eau chauffe, la pression de cet air augmente progressivement, puisque l'air s'échauffe et que de l'eau s'évapore.

La pression de la vapeur d'eau ajoute à celle de l'air sec une « pression partielle » d'autant plus grande que la température est élevée. Cette pression partielle atteint 1 atmosphère (1,01 bar) lorsque la température vaut 100 °C. Autrement dit, comme la surpression nécessaire à élever une colonne d'eau de 10 centimètres ne vaut qu'un centième d'atmosphère, l'augmentation de pression fait monter dès le début l'eau du réservoir inférieur vers le réservoir supérieur.

C'est ce que confirment les mesures très précises réalisées il y a une dizaine

QUAND L'AIR ET LA VAPEUR D'EAU POUSSENT

Dans le réservoir inférieur d'une cafetière italienne posée sur le feu, l'eau chauffe et s'évapore en partie, et l'air s'échauffe aussi **A**. La pression exercée par la vapeur d'eau et l'air augmente peu à peu. Ce faisant, elle pousse l'eau dans le panier-entonnoir qui contient le café moulu **B**. Après avoir traversé la mouture, l'eau, chargée en arômes et devenue ainsi café liquide, monte dans la cheminée puis s'écoule dans la verseuse par les orifices du sommet **C**, jusqu'à épuisement du réservoir inférieur **D**.



d'années par des physiciens de l'université de Trieste et des ingénieurs de la société Illy, qui ont placé des capteurs dans une Moka Express (voir l'encadré page 90). La première goutte de café recueillie après le filtre était typiquement à une température comprise entre 60 °C et 65 °C, quand la pression dans le réservoir était à peine plus élevée que la pression atmosphérique. La dernière goutte de café extraite était à une température de 96-98 °C, avec une pression dans le réservoir dépassant 2 bars.

DE L'AIR CHAUD ET DE LA VAPEUR D'EAU

Soyons plus quantitatifs. Au départ, l'air enfermé dans le réservoir est à pression atmosphérique, soit 1,01 bar

(ou 101 kilopascals). À température ambiante, disons 20 °C, la contribution de la vapeur d'eau à la pression est très faible: 0,023 bar; la pression de l'air sec est donc d'environ 0,99 bar.

À mesure que l'on chauffe, la température de l'air sec, dont la quantité est fixée, augmente, mais le volume qu'il occupe s'accroît aussi puisque l'eau est poussée vers la verseuse; en fin d'extraction, ce volume est multiplié par 6 environ. Ainsi, quand l'air sec avoisine une température de 100 °C, à cause de l'augmentation de volume, sa contribution à la pression totale se réduit à 0,21 bar, soit un cinquième de sa valeur initiale.

En revanche, la pression de la vapeur d'eau dans de l'air à 100% d'humidité augmente très rapidement: elle atteint

0,31 bar à 70 °C, 0,70 bar à 90 °C, 1,01 bar, comme il se doit, à 100 °C, la température d'ébullition, 1,43 bar à 110 °C et près de 2 bars à 120 °C. Ces chiffres confirment ceux mentionnés plus haut: nul besoin d'atteindre l'ébullition pour créer la surpression nécessaire à l'extraction du café.

En moyenne sur la durée de l'extraction, la température de l'eau qui traverse la mouture est de l'ordre de 80 °C. On est donc loin de l'eau bouillante. Cette température est même un peu basse par rapport à celle recommandée (90 °C ± 5 °C)

Les auteurs ont récemment publié: **En avant la physique!**, une sélection de leurs chroniques (Belin, 2017).



pour obtenir un bon espresso: un peu d'acidité est possible.

C'est pour cette raison qu'il est fortement déconseillé de mettre moins d'eau que prévu. Avec davantage d'air sec et moins d'eau à faire monter, la température moyenne de l'eau sera encore plus basse et le café ne sera pas bon. Une solution parfois recommandée est alors de remplir le réservoir avec de l'eau déjà chaude (mais non bouillante); la température moyenne d'extraction sera alors plus élevée. Dans tous les cas, il faut retirer la cafetière du feu dès qu'elle gargouille: les dernières gouttes, produites à des températures dépassant 95 °C, sont amères.

BIEN CHOISIR SA MOUTURE DE CAFÉ

Comme le savent les baristas accomplis, le goût du café dépend aussi du temps d'extraction et de la qualité de la mouture. La percolation de l'eau à travers le café moulu est un processus très complexe. Au début, l'eau imbibe facilement la mouture sèche. Cette dernière est en effet constituée d'un empilement grossier de particules submillimétriques, laissant des pores et des interstices interconnectés où l'eau peut s'engouffrer. La « perméabilité » du matériau est alors relativement élevée.

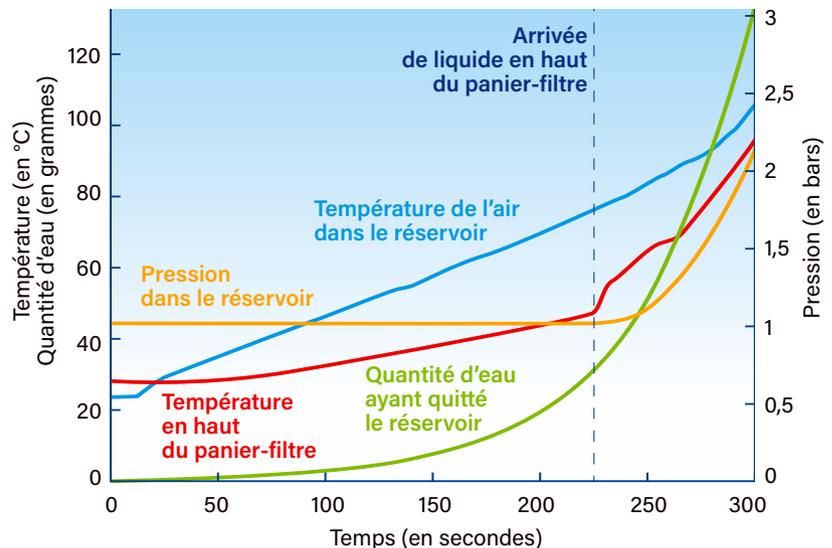
Cette grandeur représente la quantité de fluide qui peut traverser le milieu par unité de temps en fonction de la chute de pression en son sein. Sa valeur correspond ici à celle du sable très fin, et c'est pourquoi l'extraction peut débuter sans surpression notable.

Cependant, l'eau se charge progressivement en composés solubles et volatils, ce qui modifie ses propriétés rhéologiques; en outre, les particules de café se réarrangent et gonflent à cause de la présence de polysaccharides insolubles. Il s'ensuit une chute de la perméabilité (d'un facteur 4 environ pendant la durée du processus). Pour que le liquide continue de s'écouler, il faut donc des surpressions plus élevées.

En fin de compte, avec une mouture fine (des particules de 0,3 millimètre) et non tassée, on a besoin de laisser la cafetière sur le feu 5 minutes, dont environ 2 minutes correspondent au temps d'extraction. C'est bien plus que les 30 secondes recommandées pour un espresso, mais en cohérence avec une température d'extraction plus basse. Avec une mouture plus fine ou tassée, le café obtenu risque d'être trop fort...

LA CAFETIÈRE ITALIENNE AUSCULTÉE

En 2009, Luciano Navarini et ses collègues, en Italie, ont publié une étude de la thermodynamique de la cafetière italienne, réalisée en équipant celle-ci de capteurs de température et de pression. Leurs mesures, dont quelques-unes sont reproduites ici, ont notamment montré que l'eau n'a pas du tout besoin de bouillir pour commencer à monter et traverser la mouture de café.



Enfin, malgré ces bonnes pratiques, sans doute regretterez-vous que votre café, aussi délicieux soit-il, ne présente pas ou peu de mousse, comme dans un espresso! Pourquoi? Parce qu'il est extrait à trop basse pression (entre 1 et 2 bars).

Cette mousse a en effet pour origine le gaz carbonique naturellement présent dans les grains de café à la suite de leur torréfaction. Quand on prépare un espresso avec du café fraîchement moulu, le CO₂ qu'il contient se dissout, pendant l'extraction, dans de l'eau à 90 °C et à 9 bars, pression usuelle dans une machine à espresso. Mais lorsque le café jaillit du percolateur à 1 bar et se refroidit immédiatement, il devient sursaturé en CO₂. Comme avec l'effervescence du champagne, ce gaz forme des bulles, sans doute autour des particules microscopiques arrachées au café moulu par l'écoulement de l'eau et qui constituent des sites de nucléation. Ces particules donnent aussi la couleur caractéristique de la mousse de l'espresso.

C'est pourquoi Bialetti a équipé ses cafetières italiennes du modèle Brikka d'un dispositif à valve pressostatique qui retarde l'écoulement du café dans la verreuse tant qu'une pression seuil n'est pas atteinte. La Brikka fonctionne donc à une pression plus élevée, avec un temps de préparation augmenté, mais elle donnera aussi une mousse comme pour un véritable espresso. ■

BIBLIOGRAPHIE

B. Folmer (dir.), **The Craft and Science of Coffee**, Elsevier, 2017.

L. Navarini et al., **Experimental investigation of steam pressure coffee extraction in a stove-top coffee maker**, *Applied Thermal Engineering*, vol. 29, pp. 998-1004, 2009.

W. D. King, **The physics of a stove-top espresso machine**, *American Journal of Physics*, vol. 76, pp. 558-565, 2008.

E. Illy, **L'alchimie du café**, *Pour la Science*, n° 298, pp 40-45, août 2002.

Cafetière Italienne : Introduction à Code_Saturne et Salomé

Cafetière Italienne : Introduction à Code_Saturne et Salomé



(<http://www.cuisinstore.com/bialetti-cafetiere-italienne-induction-venus-prd1571.html>)

Équipe

Moreau Thibault

Vatimbella Zacharie

Yu Fangze

Encadrant

Neau Hervé

Introduction

Le but du projet est de découvrir le logiciel de maillage Salomé ainsi que du logiciel de simulation Code_Saturne. Une introduction au logiciel de maillage Xsimail lors de la création de 2ème maillage.

Le sujet étant libre, nous avons choisi d'étudier l'écoulement dans une cafetière italienne traditionnelle. Il s'agit d'un objet de tous les jours qui présente des bonnes applications dans les domaines de la thermique et de la mécanique des fluides, de la thermique et du transport de matière.

L'idée va être d'abord de poser la géométrie du problème ainsi que les hypothèses physiques qui régissent ce problème ce qui sera fait dans la prochaine partie.

Il faudra ensuite prendre en main les logiciels Salomé et Code_Saturne dans un cas simple et bien connu qui est la cavité entraînée ce qui sera fait dans la partie Tutoriel.

Après cette prise en main, seront construits deux maillages différents basés sur la géométrie de la machine à café afin de choisir celui qui est le plus approprié.

Une fois cette prise en main effectuée, nous construirons la géométrie de la machine à café et établirons deux maillages différents pour pouvoir comparer les résultats obtenus et voir lequel est le plus approprié.

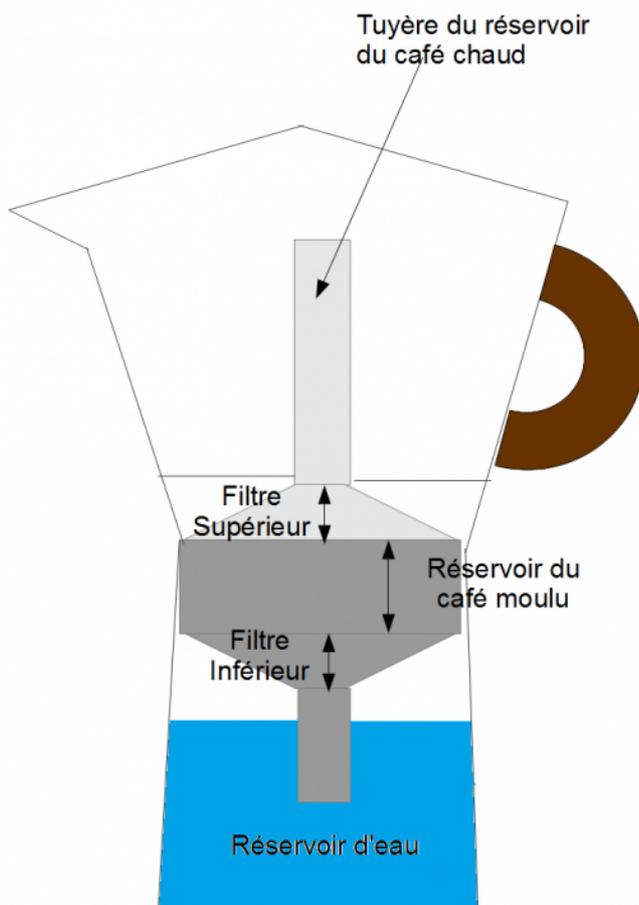
Géométrie et hypothèses

Nous allons présenter ici tout d'abord la géométrie que nous souhaitons étudier ainsi que les hypothèses physiques de base qui régissent le problème.

i) Géométrie étudiée

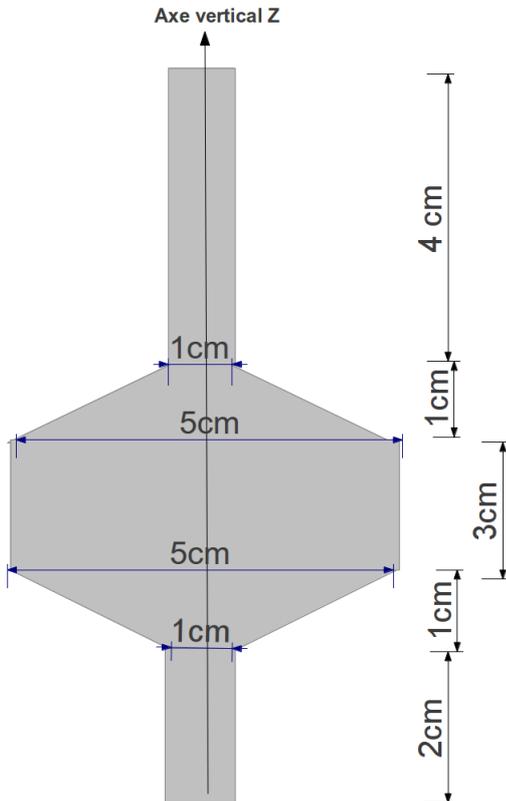
Dans ce projet ce n'est pas la cafetière entière qui est étudiée mais l'assemblage des filtres supérieur et inférieur ainsi que de la tuyère du réservoir supérieur car ce sont les éléments principaux qui régissent l'écoulement du fluide au sein de la cafetière.

Voici à quoi ressemble une coupe de la cafetière entière :



Le filtre inférieur est une plaque constituée de petits trous pour laisser passer l'eau chaude qui arrive du réservoir d'eau. Il n'est là que pour pouvoir supporter la présence des grains de café moulus. Le filtre supérieur est lui aussi constitué de petites restrictions et permet d'éviter d'avoir des grains de café dans le réservoir supérieur.

La géométrie qui sera étudiée et les dimensions correspondantes sont montrés sur la figure suivante :



Noter qu'il s'agit d'une géométrie sphérique autour de l'axe vertical z.

ii) Hypothèses pour la modélisation physique

a) Fluide étudié

Le fluide qui va être étudié est de l'eau donc les propriétés physiques sont les suivantes :

Viscosité dynamique $\mu = 1,0e - 3 \text{ Pa} \cdot \text{s}$

Masse volumique $\rho = 1000 \text{ Kg/m}^3$

Capacité Calorifique : $C_p = 4185 \text{ J/Kg/K}$

Ces valeurs seront gardées constantes dans tout le projet car les variations de température du fluide seront considérées assez faibles.

Remarque importante : le logiciel Code_Saturne ne permet pas de modéliser les écoulements diphasiques. Par conséquent la modélisation de l'écoulement sera fait en supposant que le fluide initialement présent dans la cafetière est de l'eau au repos et non pas de l'air comme c'est le cas en réalité.

b) Modèle de turbulence

Pour savoir s'il y a intérêt à mettre un modèle de turbulence, il est intéressant de calculer le nombre de

$$\text{Reynolds } R_e = \frac{\rho U D}{\mu}$$

Quel ordre de grandeur pour la vitesse ?

Une cafetière classique fait une tasse en 30 secondes. Le volume d'une tasse étant de 225mL et le diamètre des tuyères de la cafetières valant $d=0.01\text{m}=10\text{cm}$, il est facile de déduire la vitesse du fluide :

$$Q_v = 450\text{L}/\text{min} = 7,50 \cdot 10^{-6} \text{ m}^3/\text{s}$$

$$U = Q_v / S_{\text{section}} = \frac{4Q_v}{\pi D^2}$$

d'où :

$$U = \frac{4.7,50.10^{-6}}{\pi 0,01^2}$$

$$U \sim 9,55.10^{-2} \sim 10^{-1} \text{ m/s}$$

Au cours des simulations on pourra donc prendre des vitesses ayant cet ordre de grandeurs.

Pour cette valeur de la vitesse le Reynolds vaut donc :

$$R_e \sim 1000$$

On n'atteint donc pas le régime turbulent qui doit être pris en compte dans une tuyère si $R_e > 2000$. On pourra donc élever la valeur de la vitesse à 0,2 au maximum sans prendre en compte la turbulence dans les simulations. Des valeurs de vitesse inférieures seront également testées pour observer leur influence sur l'écoulement.

Conclusion:

Dans les simulations, aucun modèle de turbulence ne sera pris.

Compréhension du phénomène physique et modélisation

L'étude physique d'une machine à café comporte plusieurs problèmes liés à la mécanique des fluides et à la thermique et au transport de matière (ici le café). Sans rentrer dans les détails, sont énumérés dans cette partie les phénomènes qui vont être mis en place pour modéliser au mieux l'écoulement du fluide.

Il y a tout d'abord le problème même de l'écoulement du fluide au sein des filtres et tuyères qui constituent la cafetière avec des problèmes perte de charge singulière dus à l'élargissement ou au rétrécissement de la section de passage . Il y a ensuite le problème du à la porosité du café ainsi qu'à la présence des filtres qui imposent également une perte de charge mais qui implique une modélisation particulière. Ensuite le but de la cafetière étant de transformer de l'eau pure en eau chargée en café, une compréhension minimale des phénomènes de transport de matière semble nécessaire. Enfin la cafetière nécessitant le transport d'eau chaude pour fonctionner, l'étude des transferts de chaleur à l'intérieur de celle-ci sont également nécessaires.

i) Fonctionnement de la cafetière

De l'eau est placée dans le réservoir du bas à pression et température ambiante. La quantité d'eau qui est placée joue un rôle dans la quantité de café qui peut être extraite. Il a en effet été montré que le volume de café qui peut être extrait varie proportionnellement avec le volume initial d'air dans le réservoir. Le corps supérieur de la cafetière est ensuite vissé au réservoir et le tout est placé sur une plaque chauffante. L'eau et l'air du réservoir vont voir leur température augmenter ainsi que leur pression. Néanmoins il a été montré que la pression du réservoir augmente beaucoup moins vite que la pression de vapeur saturante. L'eau va ensuite monter le long de la tuyère pour traverser le filtre inférieur et le café moulu pour ensuite terminer sa course dans le réservoir supérieur à un débit d'environ une tasse toutes les 30sec soit 225mL toutes les 30 secondes.

Idéalement, l'eau devrait traverser le café à la température de 93 degrés et en un seul "shot" pendant environ 30 secondes. Si la température est supérieure à 95 degrés, le café risque de brûler. Au contraire si la température est très inférieurs à 95 degrés, tous les arômes ne sont pas extraits.

(d'après *The physics of a stove-top coffee machine*, Warren D.King, Am. J. Phys. 76, 558 (2008); doi: 10.1119/1.2870524)

ii) Équations générales de conservation

Équation de continuité :

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \vec{\nabla} \cdot (\rho \vec{v}) = 0$$

Équation de la conservation de la quantité de mouvement :

$$\frac{\partial(\rho \vec{v})}{\partial t} + \vec{\nabla} \cdot (\rho \vec{v} \otimes \vec{v}) = -\vec{\nabla} p + \vec{\nabla} \cdot \vec{\tau} + \rho \vec{f}$$

iii) Perte de charge singulière, régulière

L'écoulement d'eau dans une conduite est sujet à de la perte de charge, par frottements visqueux de la couche limite ou par turbulence. Dans le cadre de notre projet, aucun modèle de turbulence ne sera introduit et cela est rendu possible par les faibles valeurs du nombre de Reynolds : $Re < 2000$.

Deux types de pertes de charges sont à distinguer : les pertes de charges régulières et les pertes de charge singulière. Ces deux pertes de charges apparaissent dans l'équation de la quantité de mouvement comme cela :

$$\left(\frac{U_2^2}{2g} + \frac{P_2}{\rho g} \right) - \left(\frac{U_1^2}{2g} + \frac{P_1}{\rho g} \right) = \Delta(H_{\text{régulière}}) + \Delta H_{\text{singulière}}$$

H s'appelle la charge hydraulique.

Dans le cas de la perte de charge régulière on a :

$$\Delta H_{\text{régulière}} = \lambda \frac{U^2}{2gD_h}$$

avec D_h le diamètre hydraulique,

$\lambda = f(Re, \epsilon)$, ϵ étant la rugosité géométrique moyenne de la paroi.

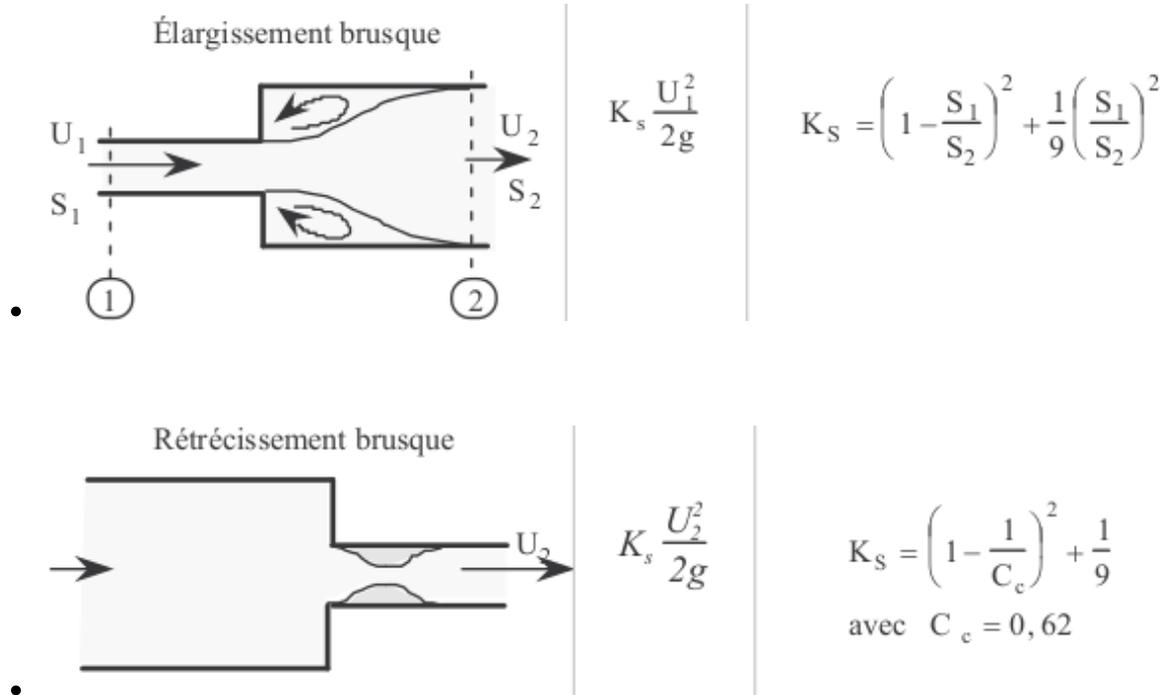
Dans le cas de la machine à café, l'écoulement étant en conduite circulaire, on peut écrire :

$$\lambda = \frac{64}{Re}$$

Les pertes de charge singulière sont dues aux ouvertures et rétrécissement de la section de passage du fluide. La charge hydraulique s'écrit dans ce cas :

$$\Delta H_{\text{singulière}} = K \frac{U^2}{2g}, \text{ le coefficient } K \text{ étant due à la géométrie de la conduite.}$$

K , coefficient de perte de charge possède deux expressions dans notre cas :



(illustrations issues du cours ENSEEIHT *Hydraulique en Charge* de Suzanne Christian)

iv) Porosité du café et perte de charge

Le café qui est placé dans le filtre est un milieu poreux. Il existe peut de résultats disponibles concernant sa modélisation. Néanmoins une première approche sera de considérer les graines de café moulues comme un milieu poreux où existe une perte de charge.

Une des caractéristiques d'un milieu poreux est sa conductivité hydraulique K_{hydrau} en m/s. On pourra prendre comme valeur ici $K_{hydrau} = 0,001 \text{ m/s}$.

Comment relier K_{hydrau} à la perte de charge ?

Comment nous le verrons dans la partie **2eme maillage -> résultats -> perte de charge**, Saturne propose d'insérer des pertes de charge de manière artificielle à travers l'expression mathématique suivante :

$$K_{ii} = 0,5\alpha_{ii}|U|$$

ou K_{ii} est la perte de charge dans une des directions x, y ou z et α_{ii} est l'inverse de la conductivité hydraulique dans une des directions x, y ou z : $\alpha_{ii} = 1/K_{hydrau}$.

Il faudra donc mettre la valeur $\alpha_{ii} = 1/0,001 = 1000 \text{ s/m}$ car nous supposons une perte de charge isotrope.

v) Transport de matière et diffusivité

L'eau qui traversera le filtre sera chargée en café ce qui lui donnera sa couleur noire. Il faut donc s'intéresser au transport du café et introduire les équations de transport de la matière :

$$\frac{\partial c}{\partial t} + \vec{u} \cdot \vec{\text{grad}}c = D_m \Delta c$$

Avec D_m la diffusivité massique.

Deux nombres adimensionnels sont intéressants à prendre en considération :

-> le nombre de Schmidt $S_c = \nu/D_{massique}$ qui représente le rapport de la diffusivité de quantité de mouvement du fluide sur la diffusivité massique ;

-> le nombre de Peclet massique $P_{e,M} = Re \cdot S_c$ qui représente le rapport du transfert par convection sur le transfert par diffusion.

vi) Transport température

L'étude de la machine à café fait également apparaître des phénomènes de transport de la chaleur puisque de l'eau chaude s'écoule du réservoir du bas jusqu'à celui du haut. On devra donc introduire dans nos modèle l'équation de transport de la chaleur.

$$\frac{\partial T}{\partial t} + \vec{u} \cdot \vec{\text{grad}} T = \alpha \Delta T$$

où

α est la diffusivité thermique (en m^2/s).

De même que pour le transport de masse, deux nombres adimensionnels ressortent :

-> le nombre de Prandtl $P_r = \frac{\nu}{\alpha}$ qui représente le rapport de la diffusivité de quantité de mouvement du fluide sur la diffusivité thermique

-> le nombre de Peclet thermique $P_{e,T} = R_e \cdot P_r$

Pour comparer l'importances des diffusivités massiques et thermiques, on utilise le nombre de Lewis :

$$L_e = \alpha / D_{\text{massique}}$$

Présentation de Code_Saturne et de Salomé

Les deux logiciels Code_Saturne et Salomé sont deux logiciels libres et leur utilisation nous a été imposée dans la réalisation de ce projet.

Dans cette partie, une rapide présentation des deux logiciels sera faite, ainsi qu'une explication de démarrage dans les salles machines de l'ENSEEIH.

Salomé

Salomé est un logiciel libre et open source offrant plusieurs services destinés à particulier à la mécanique, thermohydraulique, la mécanique des fluides et d'autres domaines.

La partie du logiciel qui nous intéresse est la création et l'exportation de maillage, en effet pour des géométries assez simples, comme la notre qui est composée d'éléments basiques en 3D, ce logiciel s'adapte parfaitement à notre demande.

Mais, comme le montre l'image ci-dessous, avec de l'expérience dans l'utilisation de Salomé, des maillages pour des géométrie bien plus complexes que la notre peuvent être créés.