



POLYTECH
GRENoble

Hydraulique des terrains

Séance 5 : Comportement des liquides réels

Guilhem MOLLON

GEO3 2012-2013

Plan de la séance

A. Notion de perte de charge

1. Mise en évidence
2. Modification du théorème de Bernoulli

B. Expérience de Reynolds

1. Principes
2. Observations expérimentales
3. Nombre de Reynolds

Séance 5

A. Notion de perte de charge

A. Notion de perte de charge

1. Mise en évidence

L'approximation du fluide parfait est très commune et simplifie beaucoup la mécanique des fluides, mais elle ne permet pas de rendre compte de plusieurs phénomènes complexes communément observés pour les fluides réels.

Pour affiner la modélisation, on introduit une grandeur appelée **viscosité dynamique** et notée μ . Elle s'exprime en Pascal-Seconde (Pa.s), aussi appelé « **Poiseuille** ».

La viscosité est la capacité du fluide à résister au cisaillement. Elle est non-nulle dans le cas d'un fluide réel.

L'hypothèse la plus classique est celle du **fluide newtonien** : dans ce cas, la viscosité est considérée comme une constante absolue du fluide étudié.

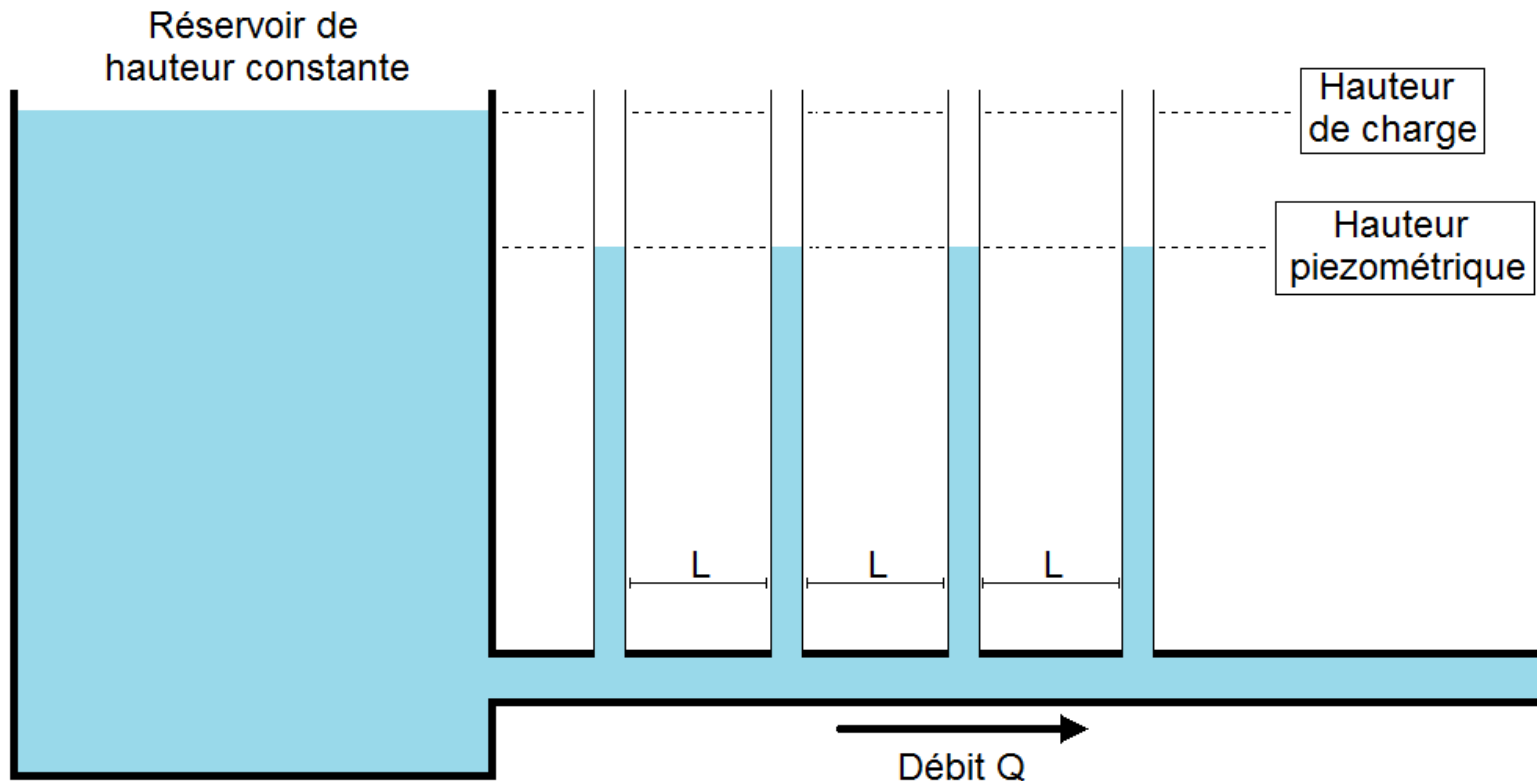
Dans le cas réel, la viscosité peut varier en fonction de plusieurs paramètres (température, vitesse de cisaillement, etc.), mais en général l'approximation du fluide newtonien est très satisfaisante.

A. Notion de perte de charge

1. Mise en évidence

Imaginons une expérience qui consiste à déverser un liquide par la partie inférieure d'un réservoir de hauteur constante, et à mesurer la hauteur piézométrique en différents points de la conduite d'échappement.

Pour un fluide parfait, on devrait avoir le comportement suivant :

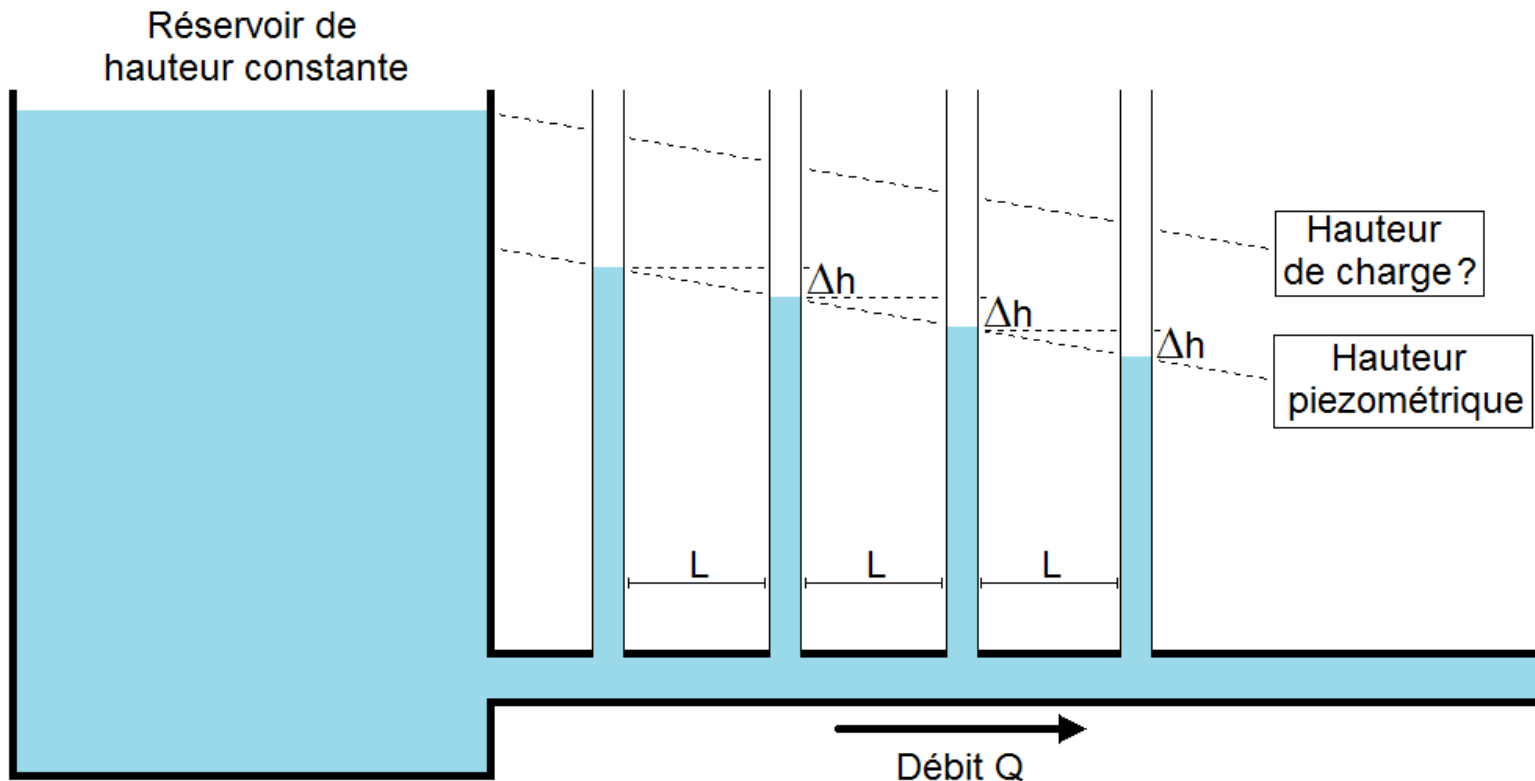


A. Notion de perte de charge

1. Mise en évidence

L'expérience menée en conditions réelles montre un comportement différent :

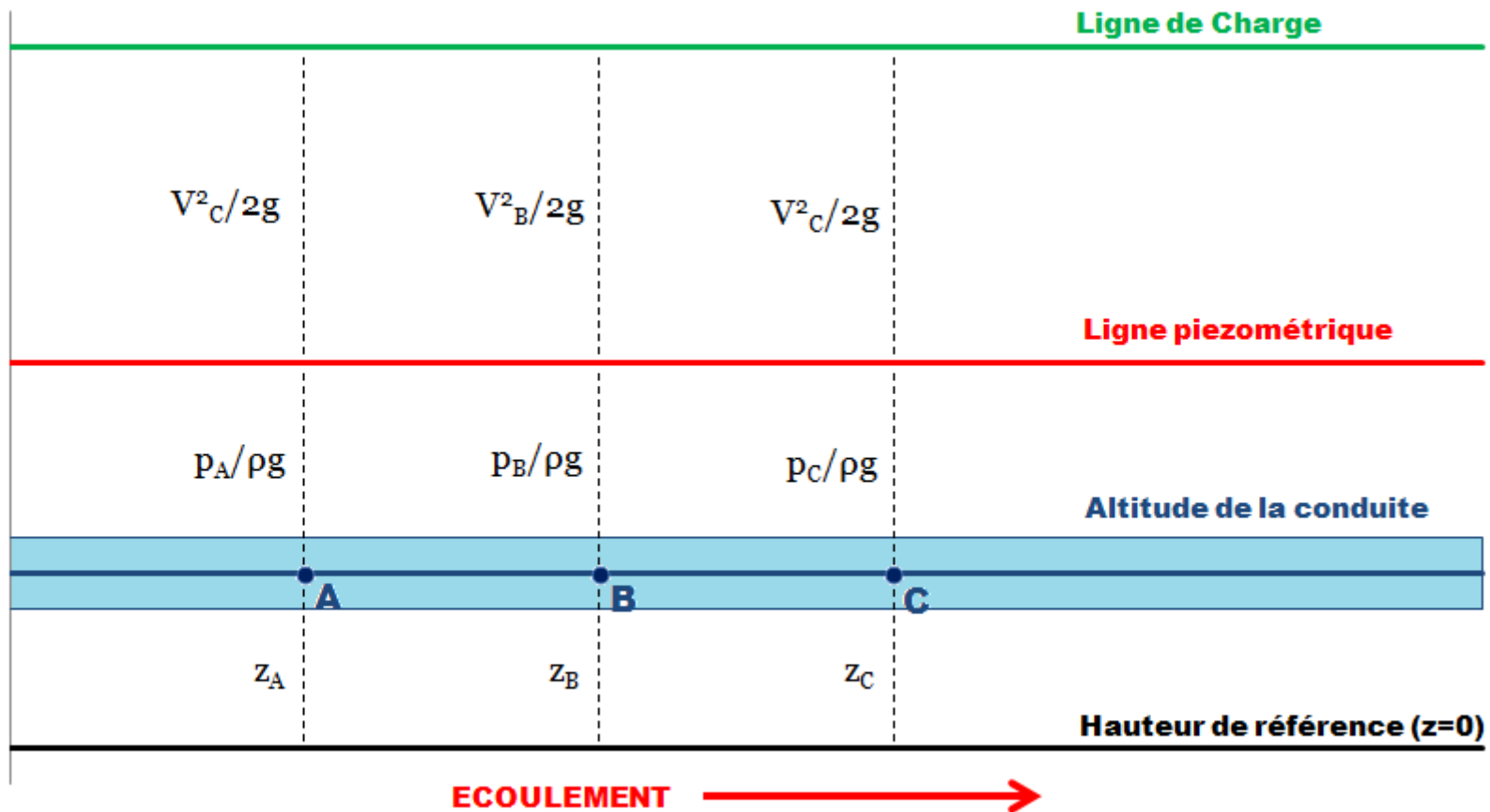
On constate une **chute progressive de la hauteur piézométrique** le long du parcours du fluide. Cette chute est par ailleurs **proportionnelle à la distance parcourue**.



A. Notion de perte de charge

1. Mise en évidence

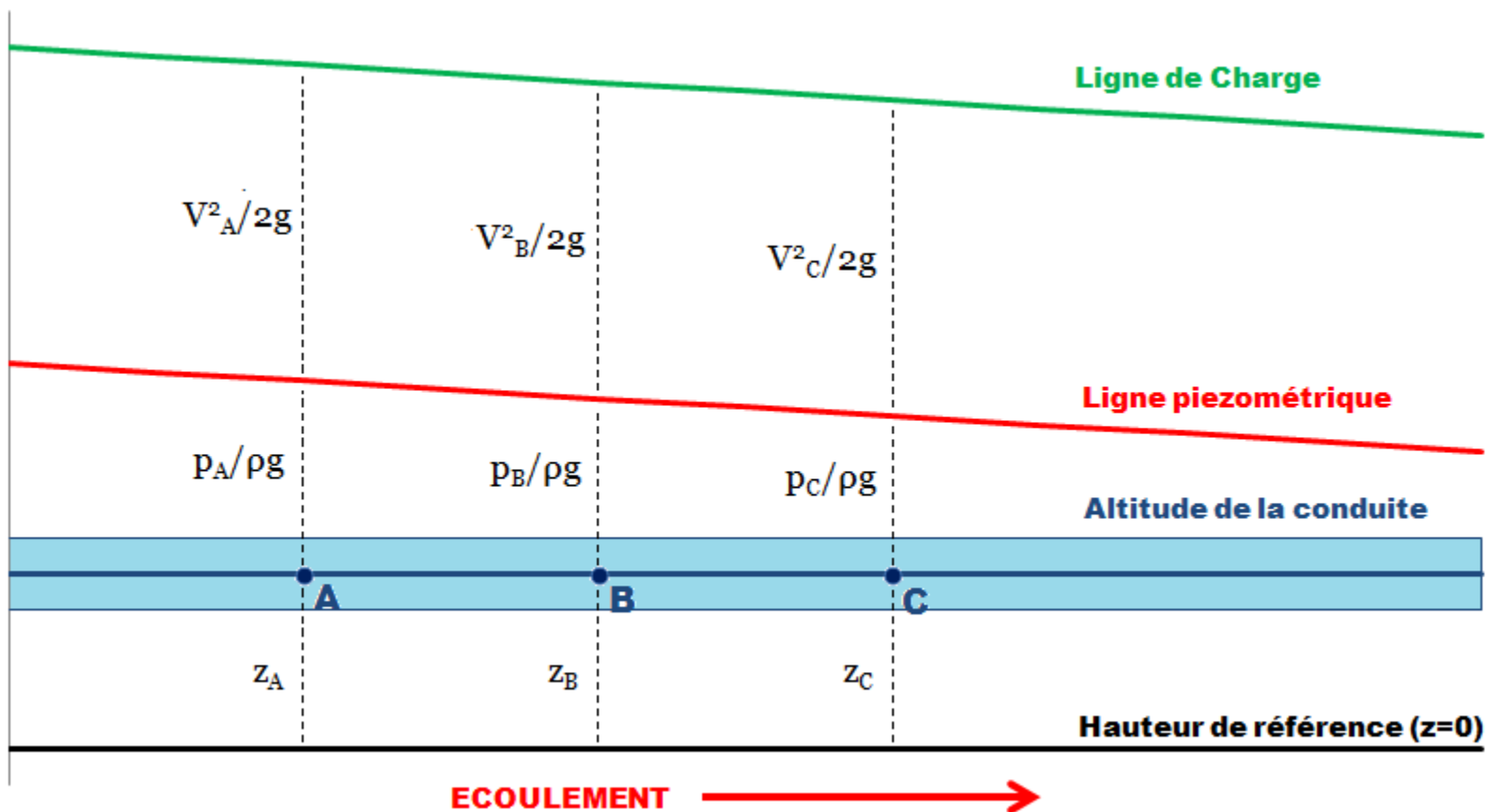
En appliquant la représentation graphique de la ligne de charge et de la ligne piézométrique, on aurait le résultat suivant sur un fluide parfait :



A. Notion de perte de charge

1. Mise en évidence

Or la réalité expérimentale est différente, puisqu'on observe clairement une **chute progressive de la ligne piézométrique** (chute de pression). La vitesse du fluide est constante, donc **la ligne de charge suit une diminution équivalente**, et on a :



A. Notion de perte de charge

2. Modification du théorème de Bernoulli

On a constaté expérimentalement que **la ligne de charge n'était pas constante** en pratique le long d'un écoulement. Ceci va à l'encontre de l'hypothèse du fluide parfait, qui énonce que l'énergie mécanique devrait se conserver entièrement au cours de l'écoulement.

Cette perte d'énergie est entièrement liée à la **viscosité** du fluide, c'est-à-dire à sa résistance à la déformation.

Il s'agit en fait d'une dissipation sous forme d'énergie thermique qui est due aux effets du frottement :

-frottement du fluide sur la paroi

-frottement au niveau de chacune des particules fluides qui « glissent » les unes sur les autres.

A. Notion de perte de charge

2. Modification du théorème de Bernoulli

Pour un fluide réel, on va devoir **modifier le théorème de Bernoulli** pour tenir compte de ces pertes énergétiques. Partons de l'écriture de ce théorème en termes énergétiques :

$$\frac{p}{\rho} + \frac{v^2}{2} + gz = \text{constante}$$

On rappelle que cette équation a la dimension d'une **énergie par unité de masse**. Si on fait un bilan d'énergie entre deux points A et B dans un **fluide parfait**, on a :

$$\frac{p_A}{\rho} + \frac{v_A^2}{2} + gz_A = \frac{p_B}{\rho} + \frac{v_B^2}{2} + gz_B$$

Dans un **fluide réel**, on va devoir ajouter un terme ΔE qui correspond à l'énergie mécanique qui a été perdue par chaque kilogramme de fluide **entre A et B** et qui a été transformée en énergie thermique :

$$\frac{p_A}{\rho} + \frac{v_A^2}{2} + gz_A = \frac{p_B}{\rho} + \frac{v_B^2}{2} + gz_B + \Delta E$$

A. Notion de perte de charge

2. Modification du théorème de Bernoulli

Si on reprend **l'interprétation en pression** du théorème de Bernoulli appliquée à un fluide réel, on peut aussi écrire :

$$p_A + \frac{\rho V_A^2}{2} + \rho g z_A = p_B + \frac{\rho V_B^2}{2} + \rho g z_B + \Delta p^*$$

Dans cette expression, Δp^* est donc la **chute de pression** entre A et B.

Enfin, selon **l'interprétation en hauteur** de fluide du théorème de Bernoulli, on peut écrire entre deux points A et B d'un fluide réel :

$$\frac{p_A}{\rho g} + \frac{v_A^2}{2g} + z_A = \frac{p_B}{\rho g} + \frac{v_B^2}{2g} + z_B + \Delta H$$

Dans cette expression, ΔH est la **perte d'énergie exprimée en hauteur** de fluide.

A. Notion de perte de charge

2. Modification du théorème de Bernoulli

Les pertes ΔE , Δp^* , et ΔH sont toutes les trois appelées communément **pertes de charge**.

Il faut néanmoins garder à l'esprit que ces trois grandeurs n'ont **pas la même unité**. Elles sont liées par l'expression :

$$\Delta H = \frac{\Delta p^*}{\rho g} = \frac{\Delta E}{g}$$

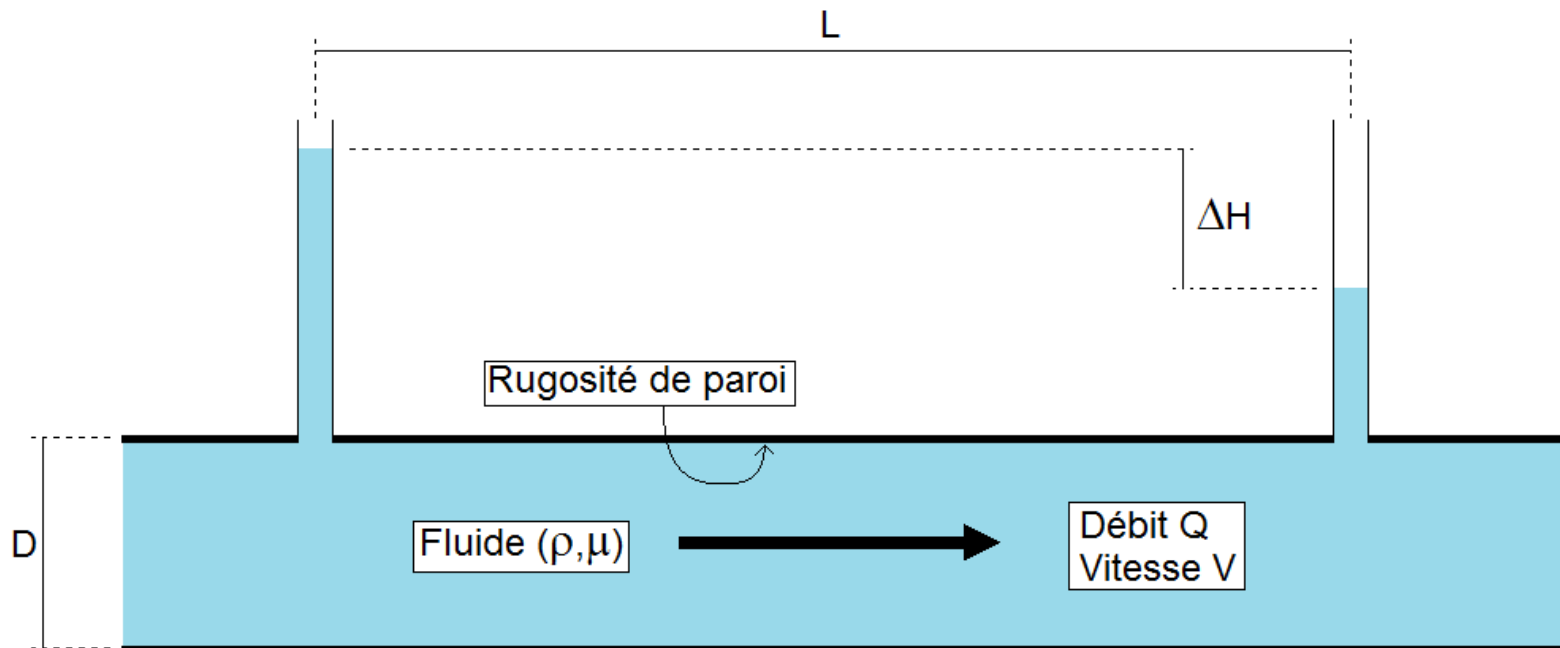
La variante la plus utilisée est ΔH , car c'est la différence de hauteur que l'on mesure directement sur les tubes piézométriques décrit dans l'expérience.

A. Notion de perte de charge

2. Modification du théorème de Bernoulli

La **quantité d'énergie perdue** (ou la perte de hauteur, ou **perte de charge**) entre deux sections d'une conduite dépend de nombreux paramètres :

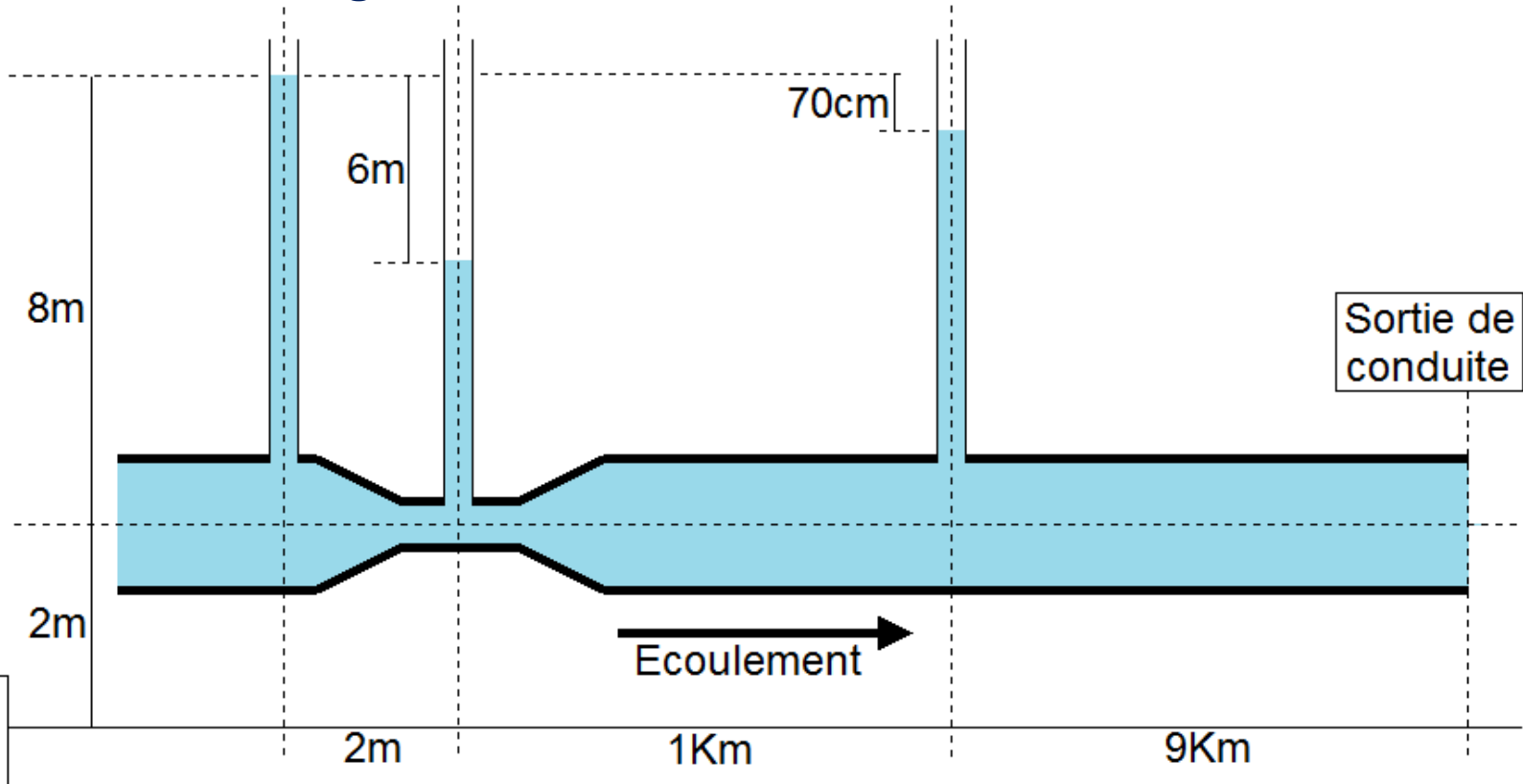
- **Distance** parcourue par le fluide entre les deux sections
- **Diamètre** de la conduite
- Propriétés du fluide (**masse volumique, viscosité**)
- **Débit** et **vitesse** d'écoulement
- **Etat de surface** de la paroi interne de la conduite



A. Notion de perte de charge

2. Modification du théorème de Bernoulli

Exercice 7 : Perte de charge linéaire.



Diamètre standard : 1m
Diamètre venturi : 80cm

Charge totale en sortie de conduite ?

Indice : la charge totale se calcule en mètres d'eau par rapport au niveau de référence

Séance 5

B. Expérience de Reynolds

B. Expérience de Reynolds

L'expérience menée par Reynolds en 1883 permet de mettre en évidence certains comportements qui ne peuvent pas être expliqués par un fluide parfait, et impliquent la présence de viscosité.

Cette expérience consiste à observer un écoulement de débit contrôlé dans une conduite transparente, en introduisant du **colorant** par l'intermédiaire d'un tube fin. En augmentant progressivement le débit, on fait apparaître plusieurs **régimes d'écoulement**.

1. Principes



Osborne Reynolds
1842-1912

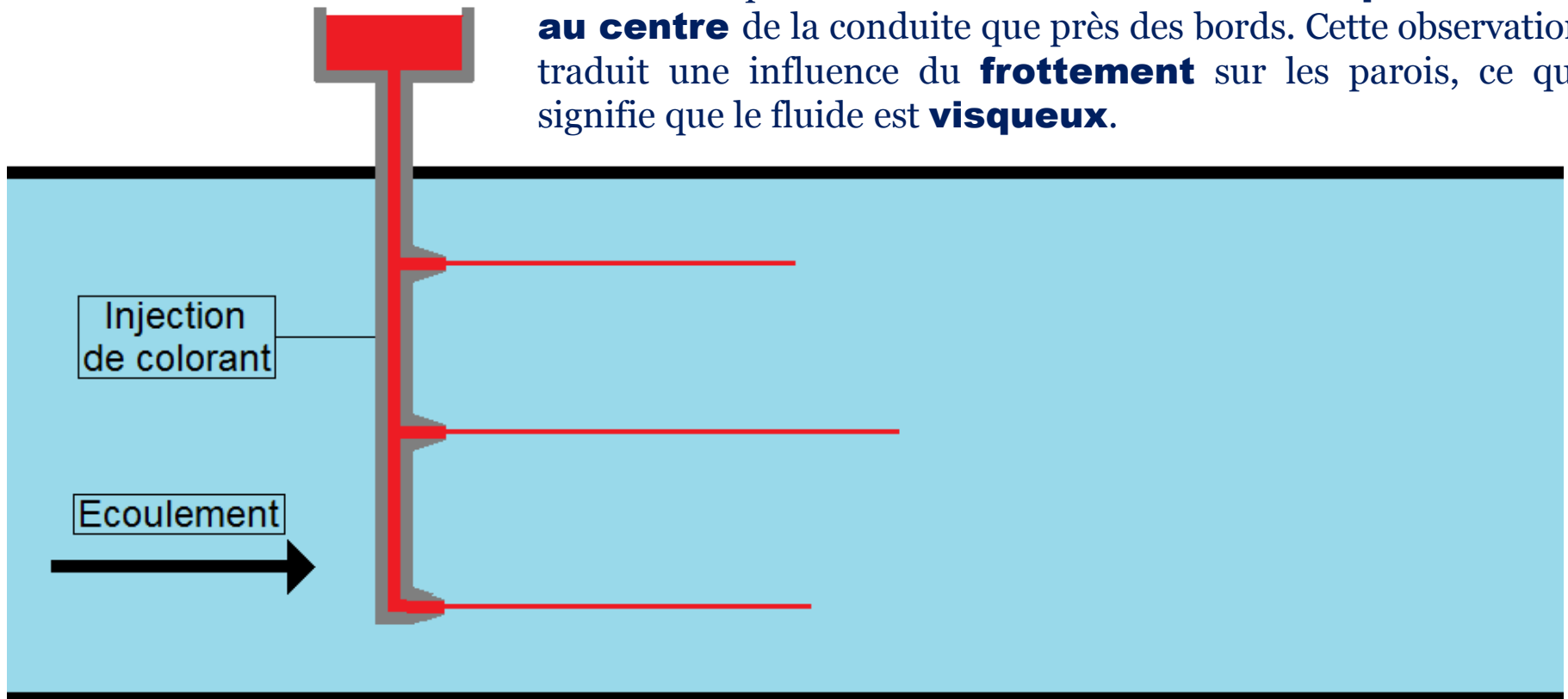


B. Expérience de Reynolds

2. Observations expérimentales

A **très faible débit**, on observe un écoulement **régulier** du fluide. Les lignes de colorant, qui correspondent ici à des trajectoires de particules (mouvement permanent) sont parfaitement **rectilignes et parallèles**.

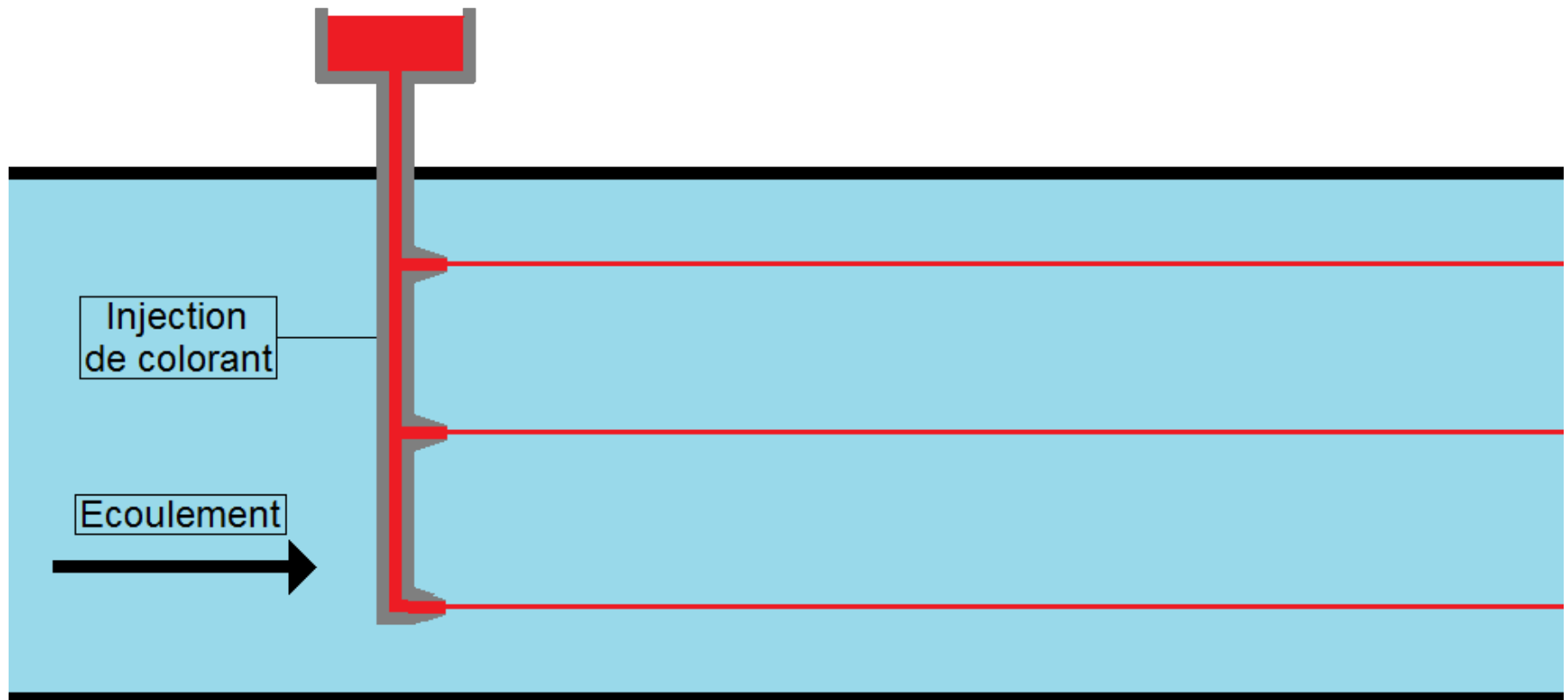
On observe que la **vitesse d'écoulement est plus élevée au centre** de la conduite que près des bords. Cette observation traduit une influence du **frottement** sur les parois, ce qui signifie que le fluide est **visqueux**.



B. Expérience de Reynolds

2. Observations expérimentales

Un tel écoulement, pour lequel les lignes de courant restent parfaitement parallèles, est appelé **écoulement laminaire**. On l'observe lorsque la **vitesse d'écoulement du fluide est très faible** (faible débit et conduite de grand diamètre), ou quand le fluide considéré est **très visqueux**.

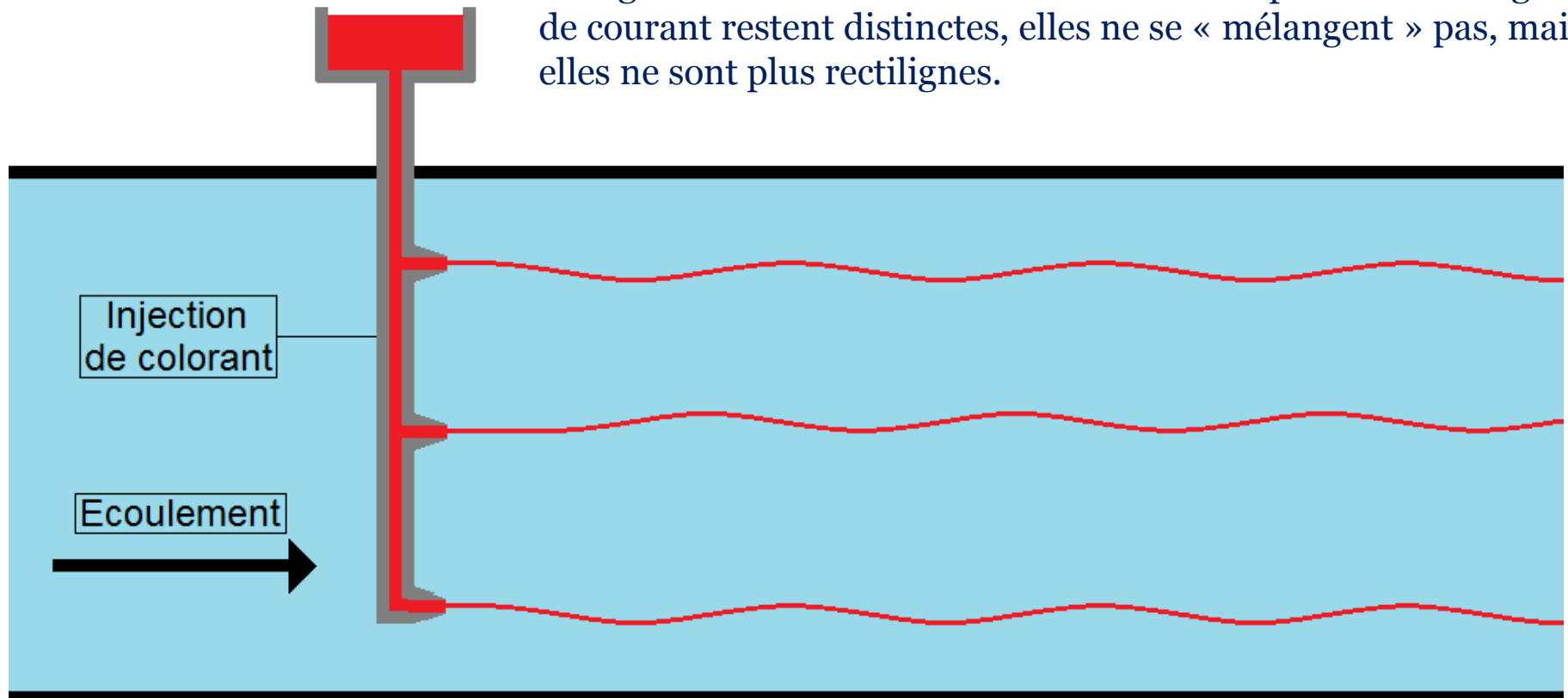


B. Expérience de Reynolds

2. Observations expérimentales

On peut augmenter le débit progressivement et continuer à observer un régime laminaire. A partir d'une certaine valeur de débit, de **premières instabilités** apparaissent.

Il s'agit d'oscillations lentes et de faibles amplitudes. Les lignes de courant restent distinctes, elles ne se « mélangent » pas, mais elles ne sont plus rectilignes.

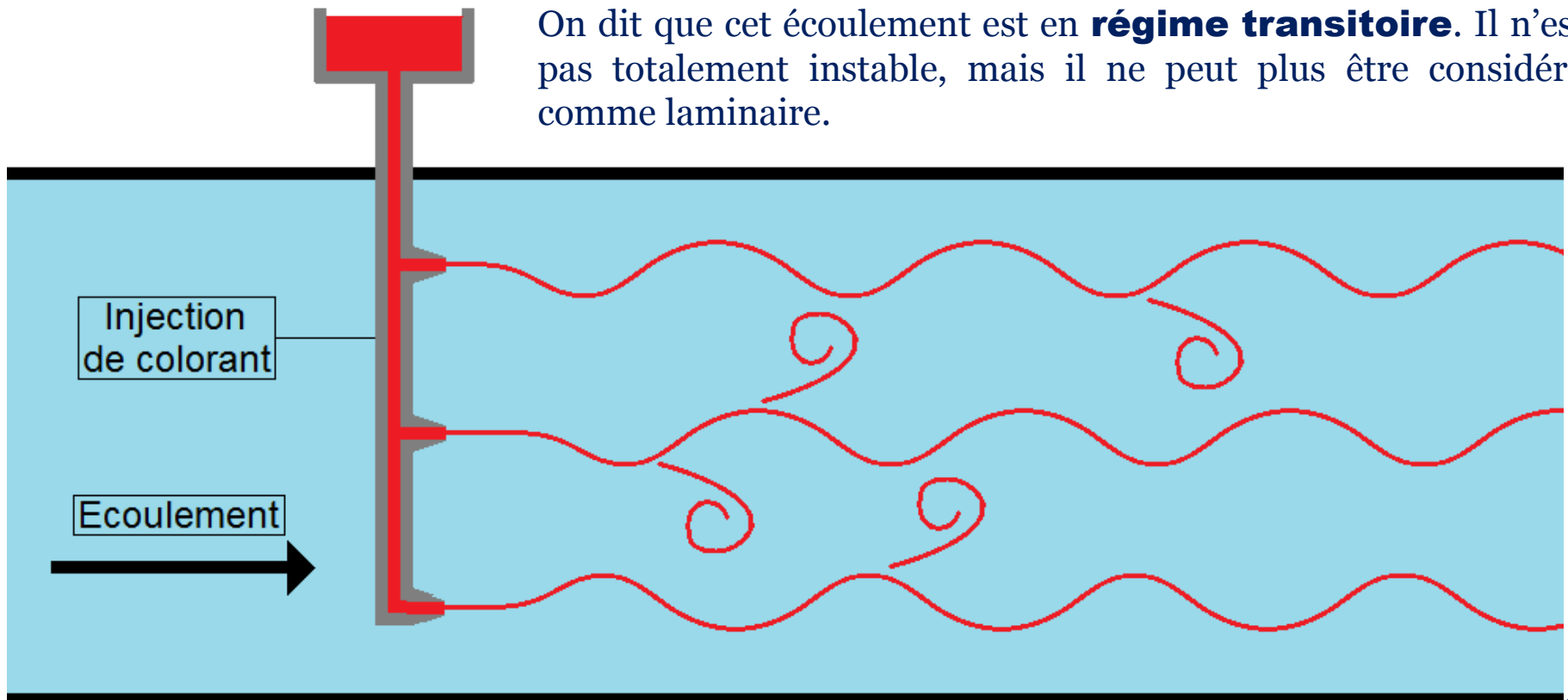


B. Expérience de Reynolds

2. Observations expérimentales

En augmentant le débit, on fait alors apparaître des **oscillations de plus en plus fréquentes** et intenses, et le régime devient de plus en plus **instable**. Parfois, quelques volumes de fluide s'échappent des lignes de courant pour former des **structures tourbillonnaires** éphémères.

On dit que cet écoulement est en **régime transitoire**. Il n'est pas totalement instable, mais il ne peut plus être considéré comme laminaire.



B. Expérience de Reynolds

2. Observations expérimentales

Enfin, à partir d'un certain débit critique, **les lignes de courant ne sont plus discernables**. Elles se recoupent, se mélangent, l'écoulement est très instable, et le **colorant se diffuse** rapidement dans toute la section d'écoulement.

Dans cette configuration, on dit que l'écoulement est en **régime turbulent**. Les particules fluides ont des trajectoires chaotiques, avec beaucoup de tourbillons à différentes échelles. Ce régime apparaît pour des **écoulements très rapides**.



B. Expérience de Reynolds

3. Nombre de Reynolds

Il apparaît de l'expérience de Reynolds que l'écoulement ne peut pas rester stable (laminaire) pour des vitesses élevées.

Par ailleurs, la viscosité joue un rôle dans ce changement de comportement car, toutes choses étant égales par ailleurs, un fluide très visqueux aura un comportement plus stable qu'un fluide peu visqueux.

Reynolds ne s'est pas arrêté à une seule expérience, il en a réalisé un très grand nombre en faisant varier les type de fluide (**viscosité, masse volumique**), le **diamètre** de la conduite, et le **débit** d'écoulement.

Il en a déduit un indicateur fiable permettant de prédire si, dans une situation donnée, on est en régime laminaire ou turbulent : le **nombre de Reynolds**.

B. Expérience de Reynolds

3. Nombre de Reynolds

Le nombre de Reynolds est un **nombre adimensionnel** qui se calcule comme suit :

$$R_e = \frac{\rho V D}{\mu}$$

Dans cette expression, on reconnaît plusieurs paramètres :

- ρ est la **masse volumique** du fluide (Kg/m^3)
- V est la **vitesse moyenne** de l'écoulement (m/s)
- D est une **longueur caractéristique** de l'écoulement (m)
- μ est la **viscosité dynamique** du fluide ($\text{Pa}\cdot\text{s}$, ou $\text{Kg}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{s}^{-1}$)

Dans une conduite circulaire, la longueur D est tout simplement le diamètre de la conduite.

B. Expérience de Reynolds

3. Nombre de Reynolds

A partir des expériences de Reynolds et d'un très grand nombre d'expériences ultérieures, on a pu mettre au point la règle suivante, valable en conduite de section circulaire :

-Si $R_e < 2000$ -> L'écoulement est laminaire

-Si $2000 < R_e < 4000$ -> L'écoulement est transitoire

-Si $R_e > 4000$ -> L'écoulement est turbulent

Cette règle n'est pas gravée dans le marbre et les valeurs 2000 et 4000 sont peu précises. Elles seront légèrement différentes pour des écoulements en sections non circulaires. Le régime dépend aussi beaucoup des conditions particulières de l'écoulement.

La plupart du temps, la valeur du nombre de Reynolds ne laisse aucune place au doute (exemples : 50, 20000, etc.)

B. Expérience de Reynolds

3. Nombre de Reynolds

Exercice 8 : Conduite encrassée.

