

Notions et contenus	Capacités exigibles	
2.4. Fluides en écoulement		
2.4.3 Ecoulement interne incompressible et homogène dans une conduite cylindrique		
Écoulements laminaire, turbulent. Vitesse débitante.	Décrire les différents régimes d'écoulement (laminaire et turbulent). Relier le débit volumique à la vitesse débitante.	
Nombre de Reynolds.	Décrire qualitativement les deux modes de transfert de quantité de mouvement : convection et diffusion. Interpréter le nombre de Reynolds comme le rapport d'un temps caractéristique de diffusion de quantité de mouvement sur un temps caractéristique de convection. Evaluer le nombre de Reynolds et l'utiliser pour caractériser le régime d'écoulement.	
Chute de pression dans une conduite horizontale. Résistance hydraulique.	Dans le cas d'un écoulement à bas nombre de Reynolds, établir la loi de Hagen-Poiseuille et en déduire la résistance hydraulique. Exploiter le graphe de la chute de pression en fonction du nombre de Reynolds, pour un régime d'écoulement quelconque. Exploiter un paramétrage adimensionné permettant de transposer des résultats expérimentaux ou numériques sur des systèmes similaires réalisés à des échelles différentes.	CdE2 : 26.11 CdE2 : 27.7
2.4.4 Ecoulement externe incompressible et homogène autour d'un obstacle		
Force de traînée subie par une sphère solide en mouvement rectiligne uniforme. Coefficient de traînée C_x ; graphe de C_x en fonction du nombre de Reynolds.	Associer une gamme de nombre de Reynolds à un modèle de traînée linéaire ou un modèle quadratique.	
Notion de couche limite.	Pour les écoulements à grand nombre de Reynolds décrire qualitativement la notion de couche limite.	
Forces de traînée et de portance d'une aile d'avion à haut Reynolds.	Définir et orienter les forces de portance et de traînée. Exploiter les graphes de C_x et C_z en fonction de l'angle d'incidence.	CdE 2 : 26.12 ; 26.13 ; 26.14

Chapitre 3 : Etudes de deux écoulements particuliers

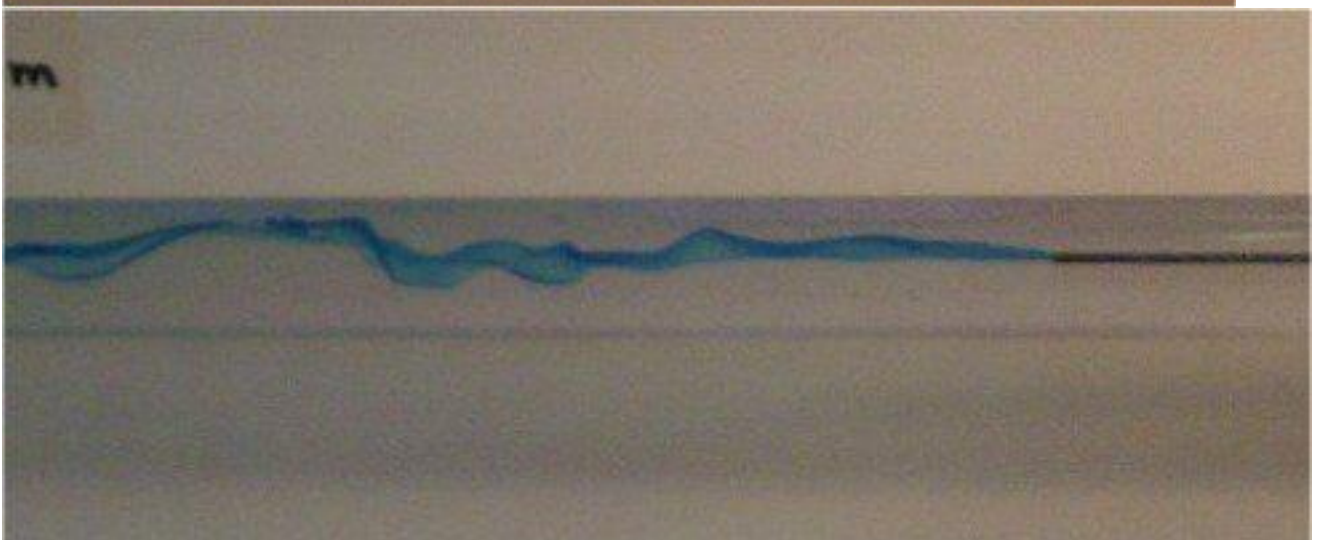
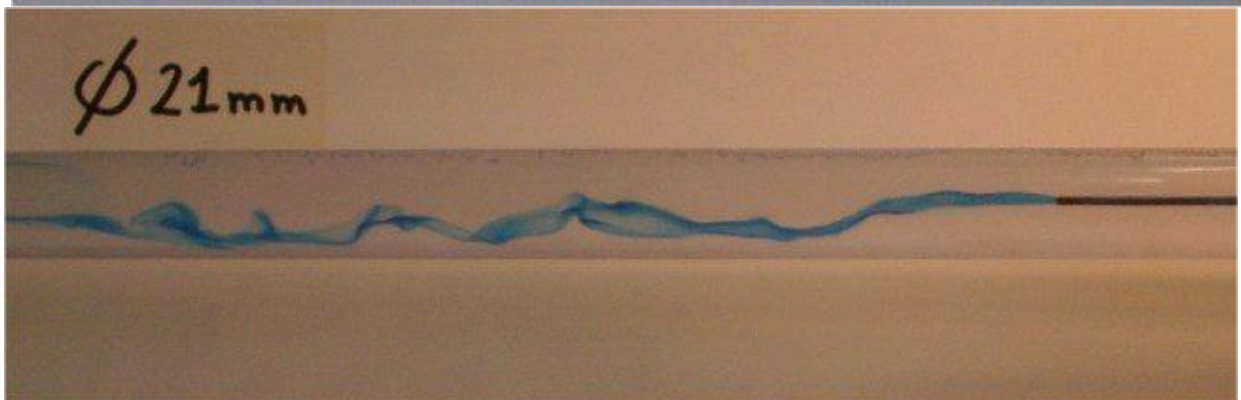
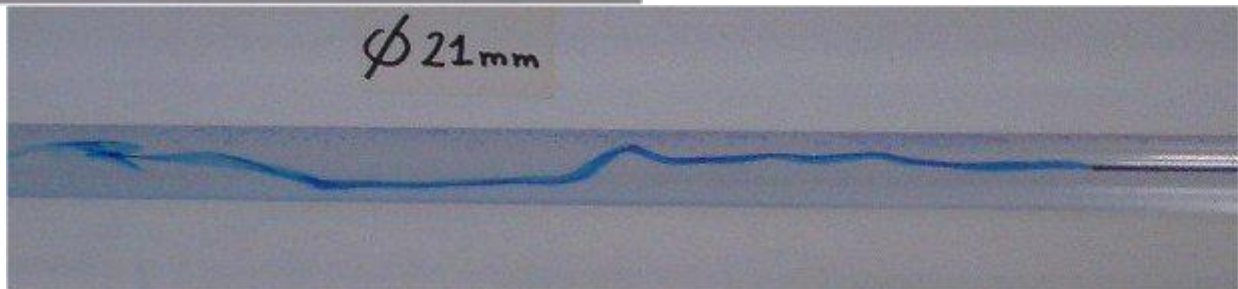
I. Ecoulement interne incompressible et homogène dans une conduite cylindrique

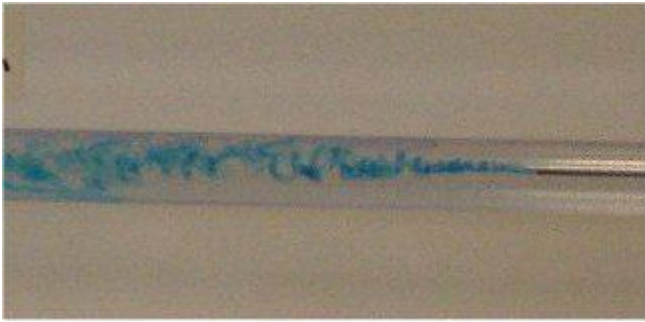
1. Les différents régimes d'écoulement

Video : liquide.avi

Expérience de Reynolds ; les différents types d'écoulement.

Images : laminaire ---> turbulent



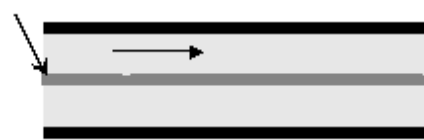


Ecoulement turbulent



Les **expériences** réalisées par **Reynolds** (1883) lors de l'écoulement d'un fluide dans une conduite cylindrique rectiligne, ont montré l'existence de deux régimes d'écoulement : **laminaire et turbulent**.

filet
coloré



écoulement laminaire



écoulement turbulent
vue instantanée



écoulement turbulent
vue en pose

Écoulement laminaire : le mouvement des particules fluides se fait de manière **régulière** et ordonnée. Les lignes de courant glissent les unes sur les autres.

Écoulement turbulent : le déplacement des particules fluide est irrégulier et que des **fluctuations aléatoires** de vitesse se superposent au mouvement moyen du fluide

2. Vitesse débitante U

Définition

$$U = \frac{Dv}{S}$$

Dv = débit volumique ; S = section de la conduite

3. Transition écoulement laminaire-turbulent

En utilisant des fluides divers (viscosité différente), en faisant varier le débit et le diamètre de la canalisation, Reynolds a montré que le paramètre qui permettait de déterminer si l'écoulement est laminaire ou turbulent est un **nombre sans dimension appelé nombre de Reynolds Re** donné par la relation :

$$R_e = \frac{\mu \cdot v \cdot D}{\eta}$$

μ = masse volumique du fluide, v = vitesse moyenne,
D = diamètre de la conduite, η = viscosité dynamique du fluide

si $Re < 2000$ le régime est LAMINAIRE

si $2000 < Re < 3000$ le régime est intermédiaire

si $Re > 3000$ le régime est TURBULENT

Ces valeurs doivent être considérées comme des ordres de grandeur, le passage d'un type d'écoulement à un autre se faisant progressivement.

Exemples :

	μ (kg.m ⁻³)	η (Pa)	D (m)	U (m.s ⁻¹)	Dv (m ³ .s ⁻¹)	Re
Transport d'eau potable	1000	10 ⁻³	1 cm			
Microfluidique (eau)	1000	10 ⁻³	1 mm	10 mm/s		
NH ₃ (l)	700	2.10 ⁻⁴	1 cm			



Écoulement d'air dans une tuyère de réacteur :

Écoulement d'huile de lubrification :

Microfluidique :

www.cea.fr/multimedia/Documents/publications/les-defis-du-cea/LES-DEFIS-DU-CEA-248.pdf

4. Transport de quantité de mouvement

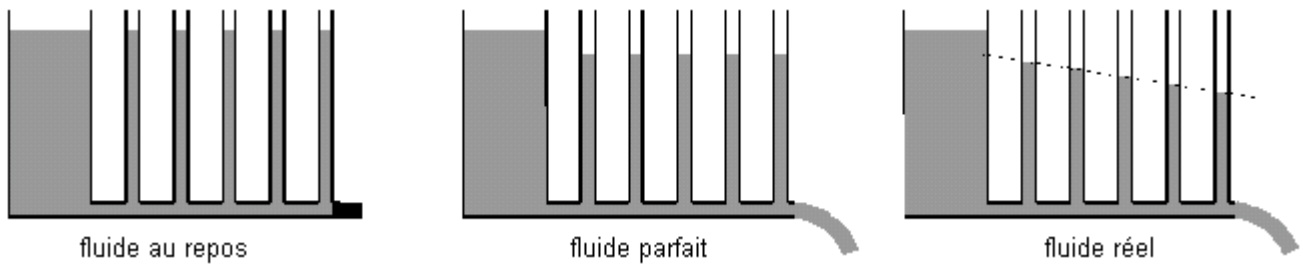
5. Chute de pression dans une conduite horizontale

a) Écoulements à faible nombre de Reynolds

Un fluide s'écoule dans une conduite horizontale de section constante avec un débit déterminé, à l'aide d'un robinet par exemple. Des colonnes verticales placées régulièrement sur la conduite repèrent les pressions à différentes abscisses.

Si le liquide était parfait, on observerait une hauteur de liquide constante dans les colonnes manométriques comme pour un liquide au repos.

Pour un liquide réel, on observe une diminution régulière de la pression tout au long de la conduite, à cause du gradient de pression horizontal dû à l'existence de la viscosité. Ce sont les pertes de charge.



Expression de la résistance hydraulique pour un écoulement de Poiseuille (Jean-Léonard-Marie 1797 (Paris) -1869 (Paris))

Vidéo : Poiseuille

Coordonnées cylindriques

$$\text{div} \vec{A} = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (r A_r) + \frac{1}{r} \frac{\partial A_\theta}{\partial \theta} + \frac{\partial A_z}{\partial z}.$$

Loi de Hagen – Poiseuille (1839)



Gotthilf Hagen
1797 - 1884



Jean Poiseuille
1797 - 1869

Remarques d'ordre expérimental :

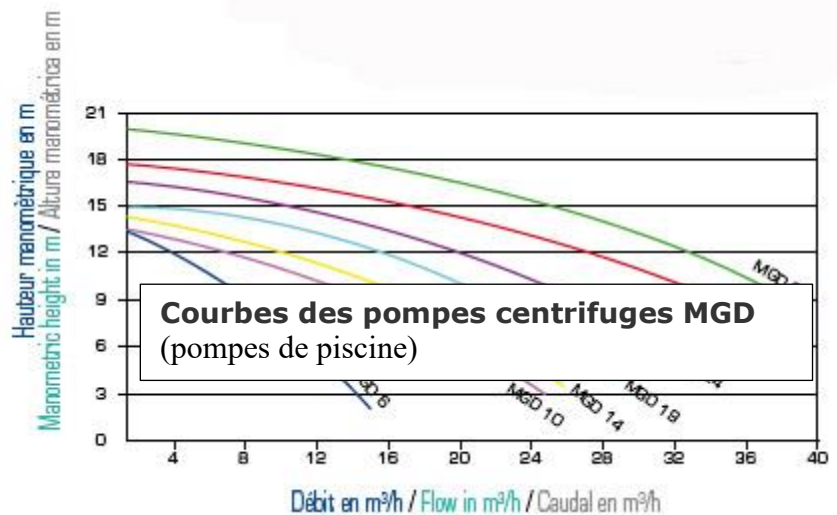
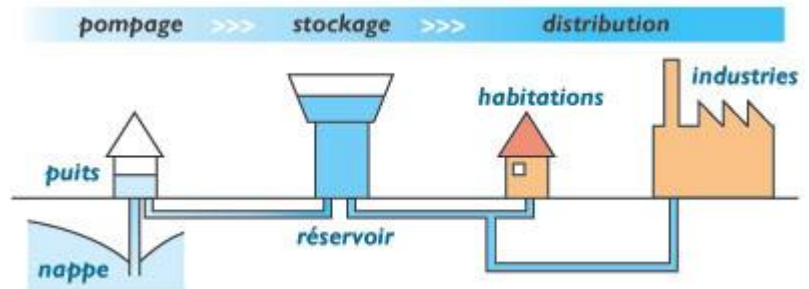
Une conduite sert généralement à transporter du fluide d'un endroit à un autre. L'expérimentateur souhaite effectuer ce transport avec un certain débit. Souvent, une des deux extrémités est à une pression fixée par l'extérieur (pression atmosphérique si cette extrémité est ouverte sur l'air ambiant), et l'expérimentateur doit se munir d'un dispositif en amont pour y fixer une pression supérieure à la pression atmosphérique, et permettant l'écoulement du fluide.

Il est clair qu'en général il doit trouver un compromis entre :

- le débit souhaité
- la pression minimale à imposer à une extrémité pour que le fluide sorte de l'autre côté
- la géométrie de la conduite (section et longueur)

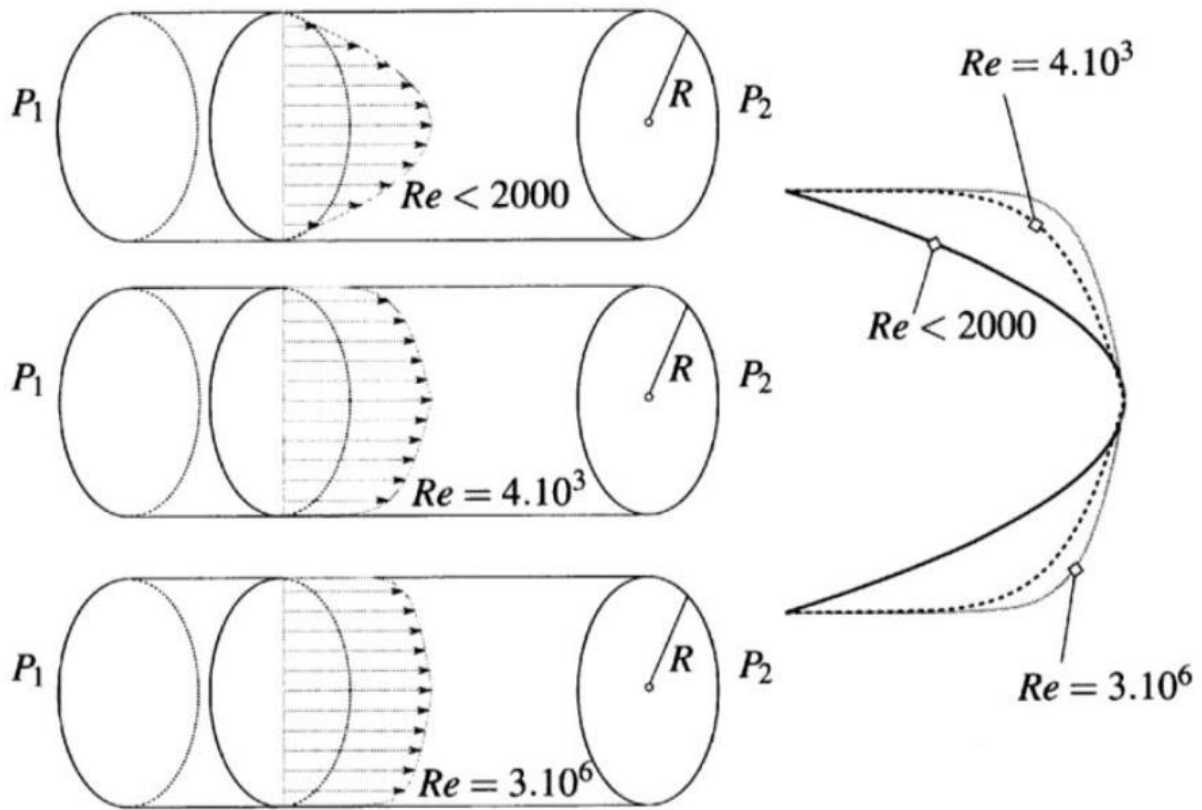
Il existe plusieurs façons d'imposer une pression à une extrémité :

- via une « grande » cuve pleine de liquide : le liquide est quasiment immobile au fond de la cuve, donc la pression à l'entrée de la conduite est donnée par l'hydrostatique. C'est un circuit hydraulique « ouvert » : la cuve se vide petit à petit (exemple du château d'eau).
- pour un gaz, le dispositif équivalent serait une bombonne où le gaz a été préalablement stocké à une pression élevée. Au fur et à mesure que la bombonne se vide, la pression diminue (cf. loi des gaz parfait)
- via une pompe dans le cas d'un circuit hydraulique fermé (liquide ou gaz). Le rôle de la pompe est équivalent à celui d'une source de tension en électricité. Elle impose une différence de pression entre ses « bornes », qui dépend du débit volumique qui la traverse (lui-même dépendant par le réseau hydraulique alimenté par la pompe, comme en élec). Cette différence de pression diminue lorsque le débit augmente : ce comportement est analogue à celui des sources de tension usuelles. En général, la courbe représentant la différence de pression en fonction du débit n'est pas affine.



b) Ecoulement quelconque

Evolution du profil des vitesses dans la conduite en fonction du nombre de Reynolds



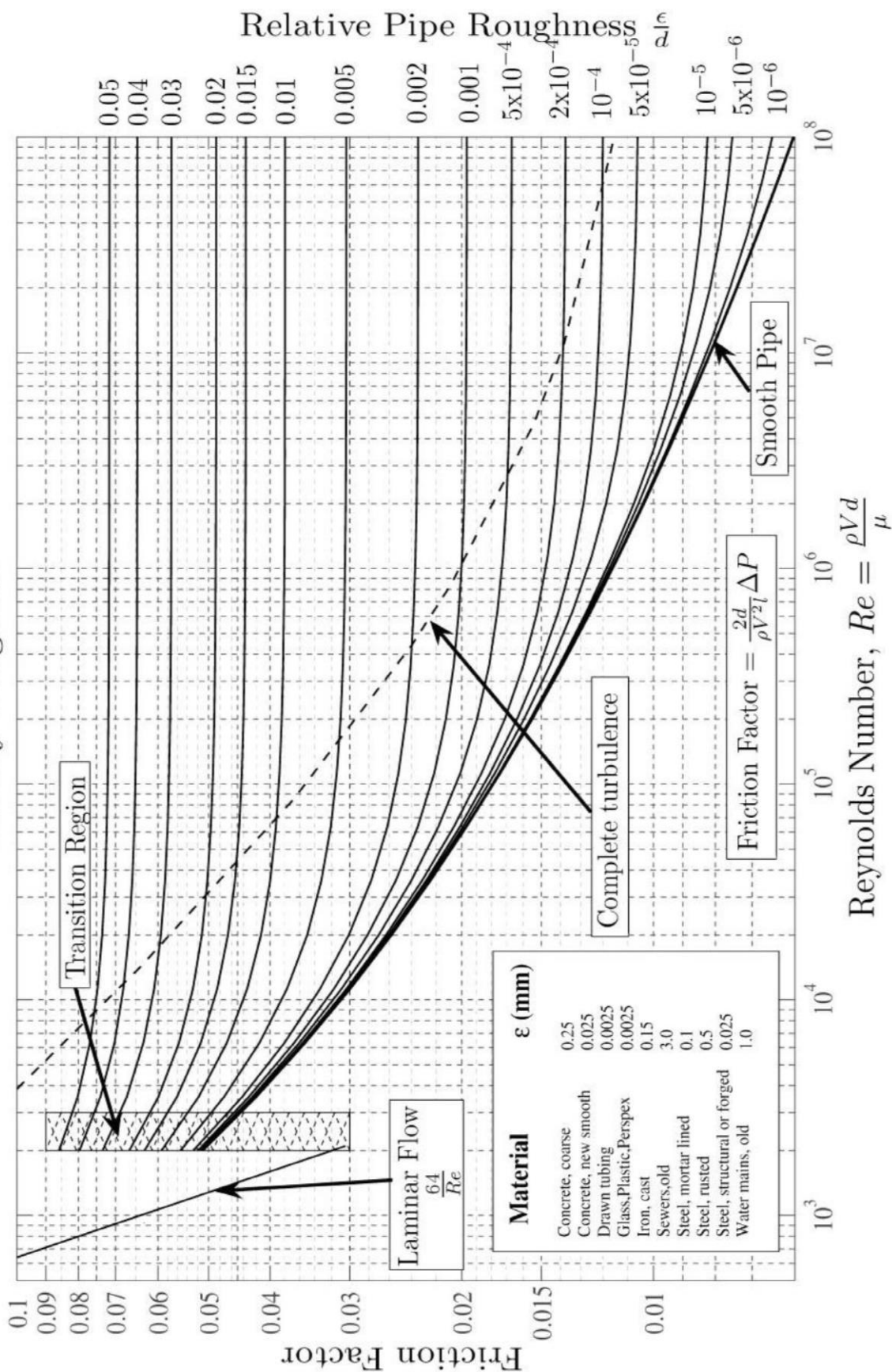
Paramètre permettant de distinguer les différentes courbes

C'est la **rugosité relative** du matériau constitutif de la conduite. La 'rugosité absolue' étant un ordre de grandeur de la profondeur des aspérités sur la surface interne de la conduite. Une fois rapportée au diamètre de la conduite, elle devient la 'rugosité relative'.



Cf cours hydraulique Polytech Grenoble

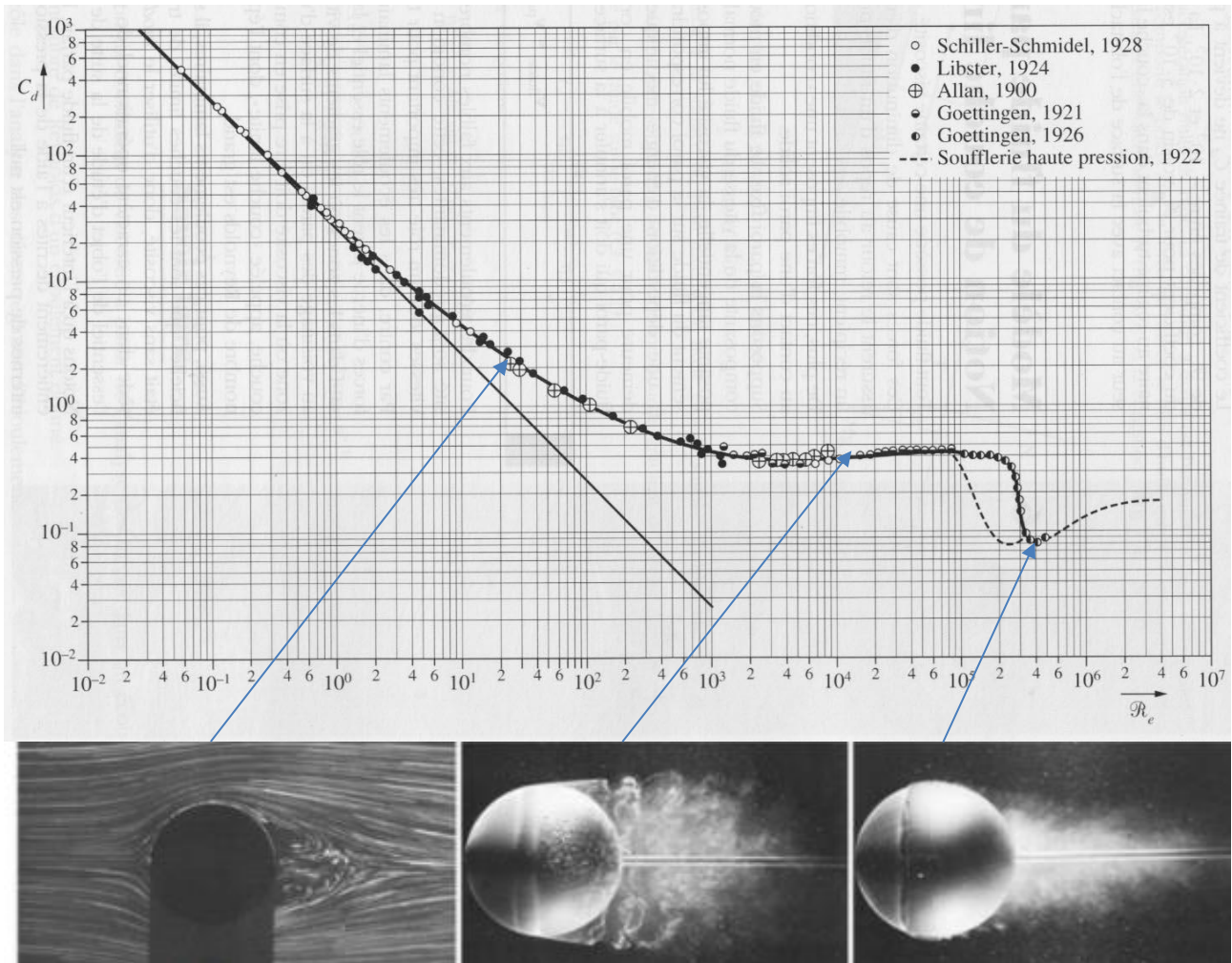
Moody Diagram



II. Ecoulement externe incompressible et homogène autour d'un obstacle

1. Trainée sur une sphère

2. Coefficient de traînée C_x d'une sphère en fonction du nombre de Reynolds



$Re = 20$

$Re = 15\,000$

$Re = 5 \cdot 10^5$

Description de l'écoulement autour d'une sphère

Pour une sphère de rayon R , le coefficient de traînée C_x est défini par :

$$F_x = C_x \frac{\rho v_\infty^2}{2} \pi R^2,$$

et le nombre de REYNOLDS Re par :

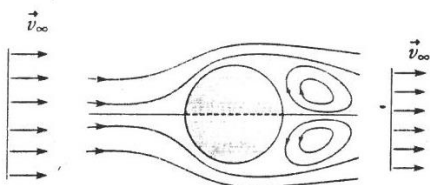
$$Re = \frac{\rho 2R v_\infty}{\eta}.$$

Rappelons la forme de l'évolution du coefficient de traînée $C_x(Re)$ d'une sphère lisse (doc. 21).

Nous pouvons observer expérimentalement les écoulements suivants.

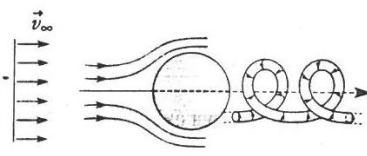
- Pour les valeurs de Re inférieures à 1, l'écoulement est laminaire et approximativement linéaire. Les lignes de courant ont l'allure représentée sur le document 22. C_x est inversement proportionnel à Re .
- Pour des valeurs de Re supérieures à 1 (de l'ordre de $Re \approx 20$), il apparaît un tourbillon torique stable derrière la sphère (doc. 23). Les dimensions de ce tourbillon augmentent avec le nombre de REYNOLDS.
- Ce tourbillon finit par occuper toute la partie arrière de la sphère, pour des nombres de REYNOLDS de l'ordre de 300 à 450 (doc. 24).
- À partir de Re voisin de 450, le tourbillon se détache, en prenant une forme hélicoïdale (doc. 25). Ce tourbillon a pour conséquence l'existence d'une force transversale « tournante » s'exerçant sur la sphère.
- Pour $Re \approx 1000$, l'écoulement n'est plus régulier : il se forme un sillage, zone turbulente et chaotique derrière la sphère (doc. 26).
- Si Re devient très grand, ($Re > 5 \cdot 10^5$), le sillage diminue d'importance. Les tourbillons évoluent de façon chaotique. Il n'est plus possible de décrire simplement l'écoulement qui devient turbulent (doc. 27). Alors que précédemment la couche limite était laminaire, elle devient turbulente.

C_x évolue rapidement au voisinage d'une valeur critique du nombre de REYNOLDS correspondant à une transition de couche limite laminaire turbulente. Le point de décollement de la couche limite change brutalement de place ; il existe donc un « saut » dans l'évolution de C_x (cf. § 8).



$Re \approx 300$

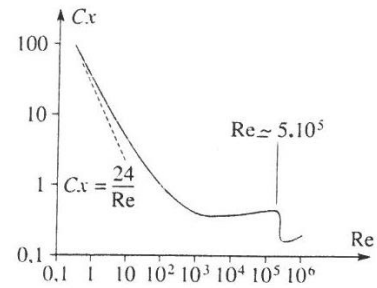
Doc. 24. Quand Re augmente, le tourbillon finit par occuper la partie aval de la sphère.



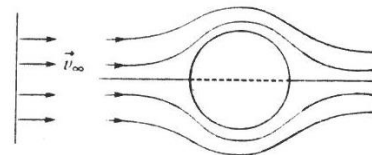
$Re \approx 450$

Doc. 25. Le tourbillon torique précédent se détache en prenant une forme hélicoïdale.

Doc. 26. L'écoulement n'est plus régulier. La couche limite est laminaire, mais une zone turbulente se développe derrière la sphère. Le point de décrochement de la couche limite est situé en « avant ».

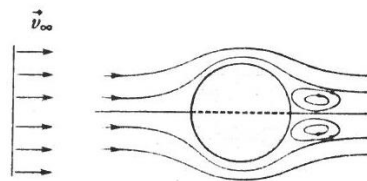


Doc. 21. Coefficient de traînée $C_x(Re)$ pour une sphère lisse.



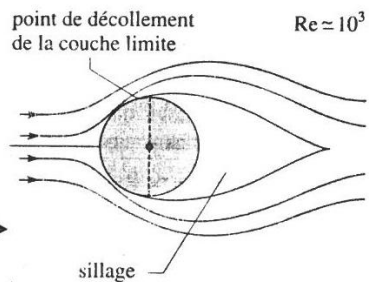
$Re < 0,5$

Doc. 22. Pour un nombre de REYNOLDS faible, l'écoulement est laminaire et quasi linéaire.

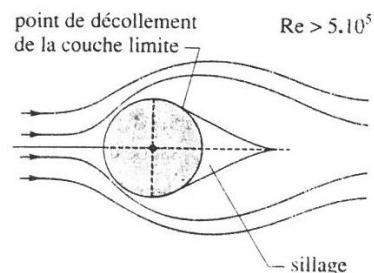


$Re \approx 20$

Doc. 23. Le tourbillon apparaissant derrière la sphère est torique.



$Re \approx 10^3$

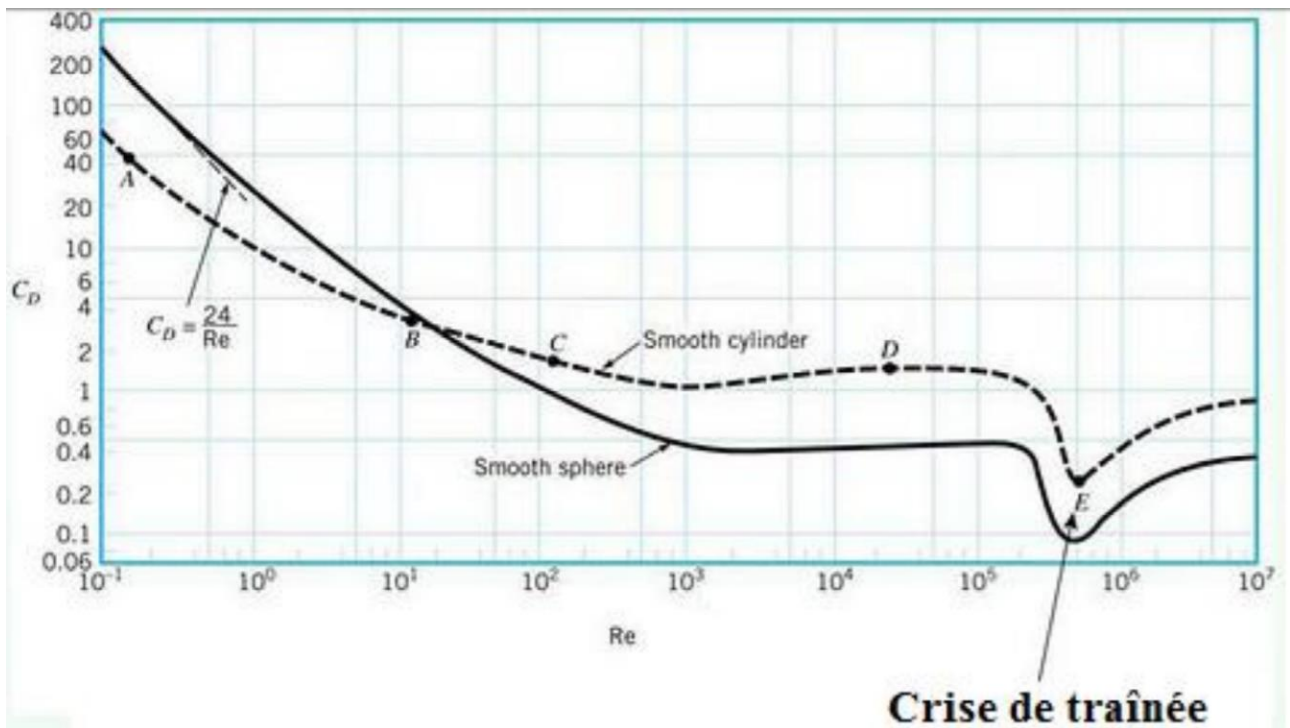


$Re > 5 \cdot 10^5$

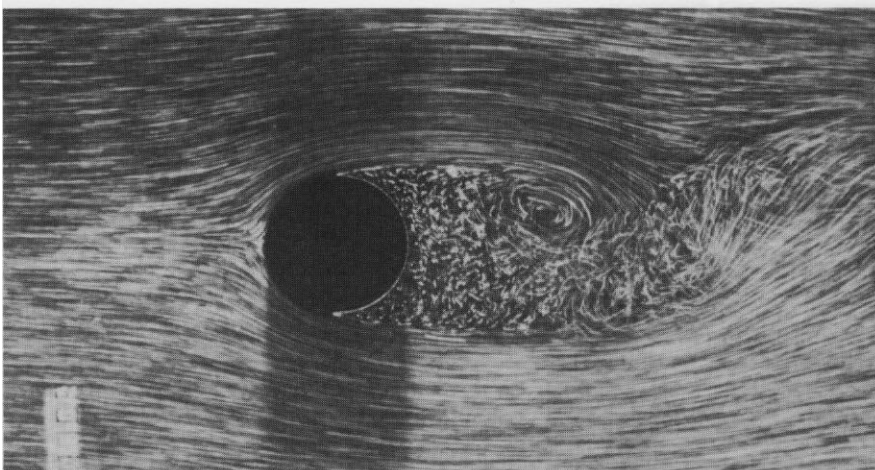
Doc. 27. La couche limite laminaire précédente est devenue turbulente : elle se décroche à l'« arrière » de la sphère.

3. Ecoulement et nombre de Reynolds autour d'un obstacle quelconque

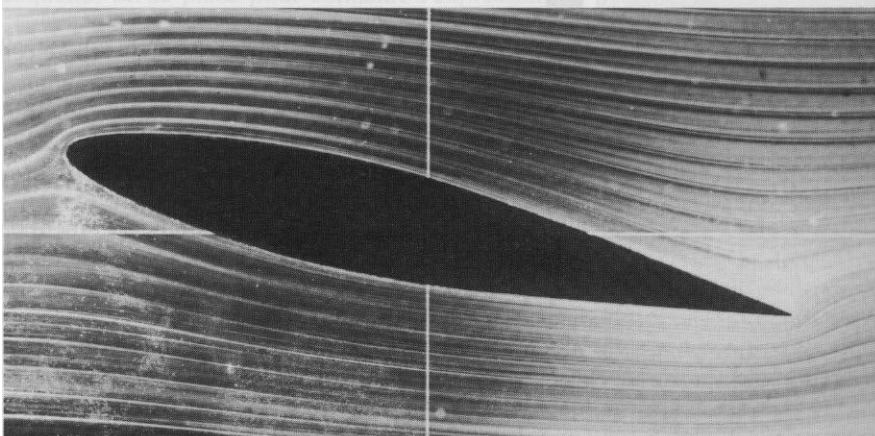
Comparaison du coefficient de trainée entre une sphère et un cylindre lisses en fonction du nombre de Reynolds



Ecoulements à l'arrière d'un obstacle



Turbulences derrière un cylindre



Ecoulement laminaire autour d'un profil



Ecoulement turbulent
autour d'un profil

Nombres de Reynolds autour d'obstacles

description	Evolution du manteau terrestre	glacier	Bactéries dans l'eau	Bille tombant dans du miel	Poisson d'aquarium	Nageur dans l'eau	Oiseau Serpent dans l'eau	Gros poisson dans l'eau
Nombre de reynolds Re	10^{-20}	10^{-11}	10^{-5}	10^{-2}	10^2	10^5	10^6	10^8



Glacier d'Aletsch (Valais, Suisse, juillet 2018)

4. Notion de couche limite

Video : [CoucheLimiteaile](#)

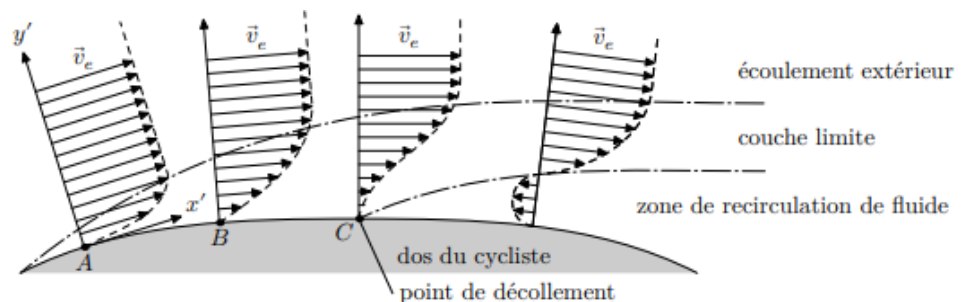
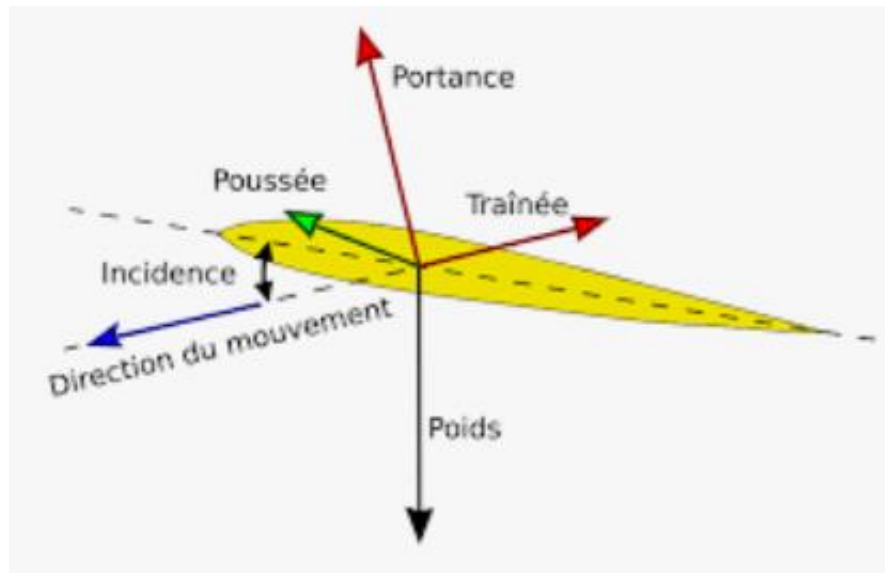
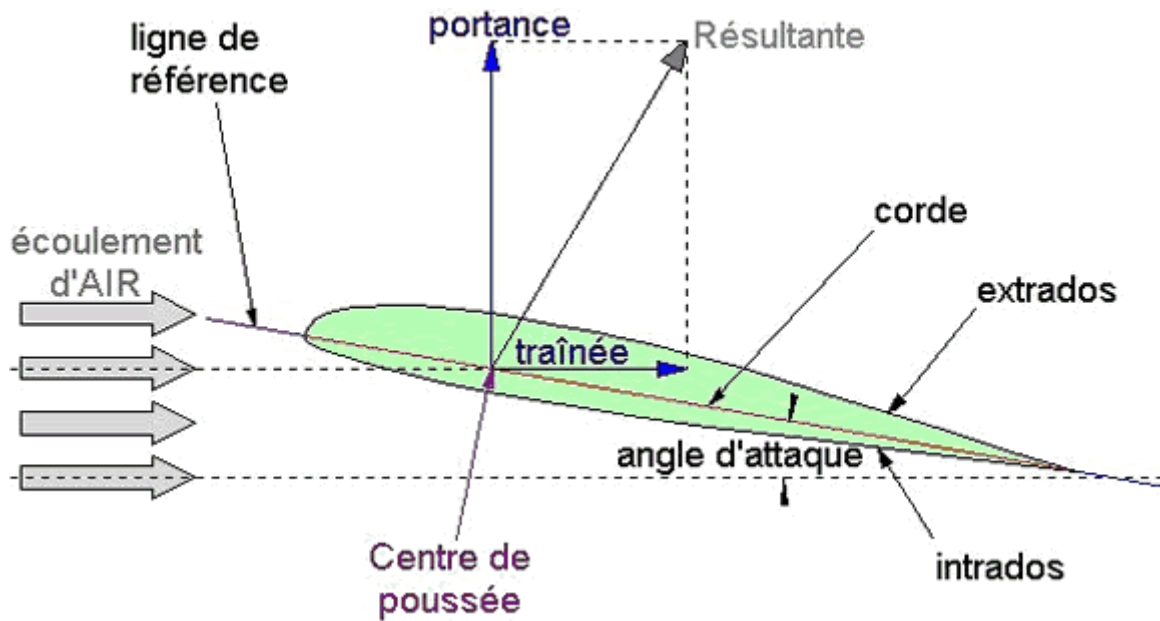


Figure 13 Évolution du champ de vitesse dans la couche limite en amont et en aval du point de décollement

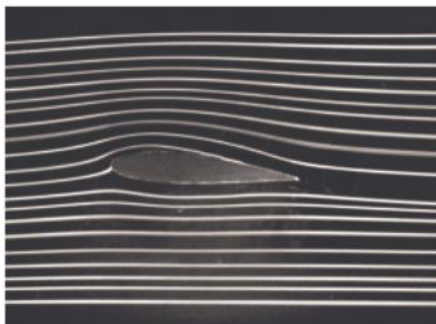
La couche limite peut se détacher à partir d'un point, dit point de décollement. Il apparaît, en aval de ce point, une zone de recirculation de fluide responsable d'une augmentation sensible de la traînée.

5. Trainée et portance d'une aile d'avion

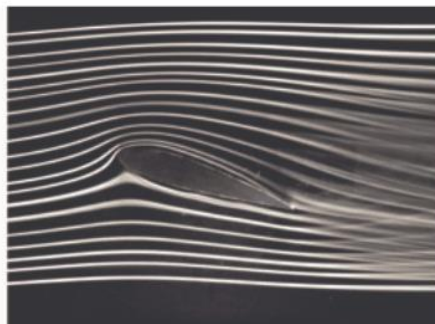


La **trainée** est la composante de la résultante des actions de l'air **parallèle à la direction de l'écoulement**.

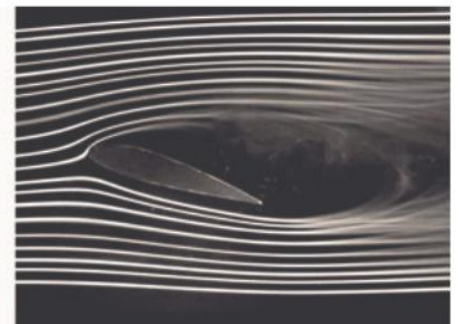
La **portance** est la composante de la résultante des actions de l'air **orthogonale à la direction de l'écoulement**.



(a) low angle of attack



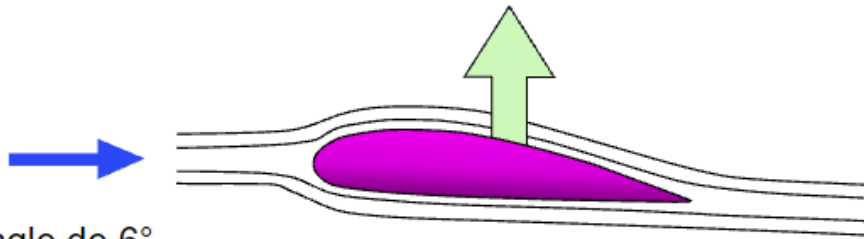
(b) high angle of attack



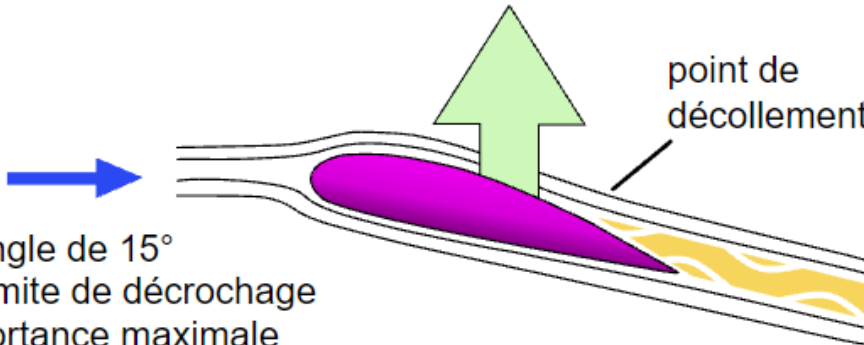
(c) stalled flow

VENT RELATIF

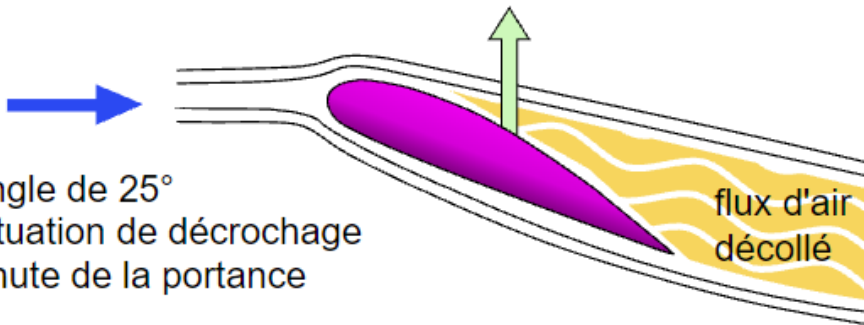
PORTANCE



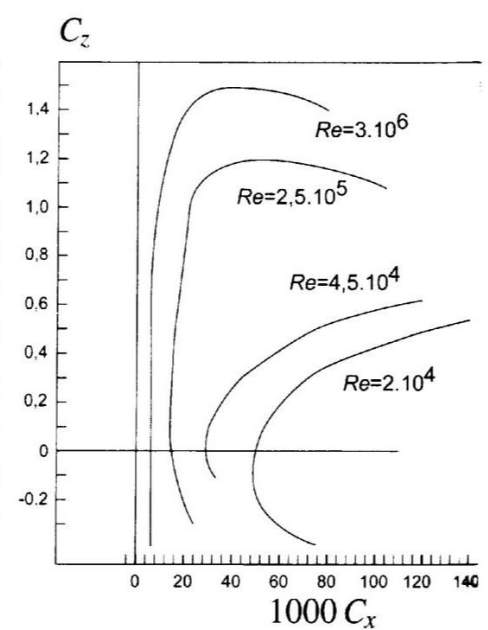
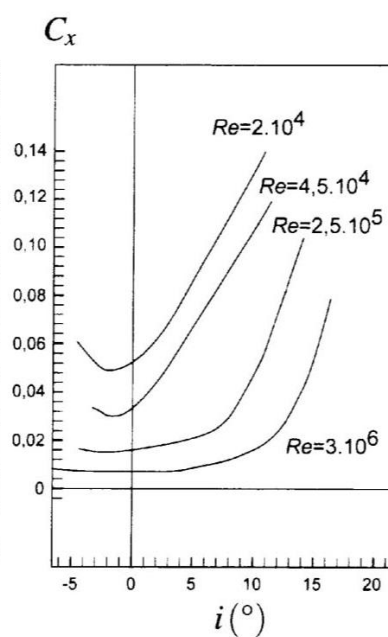
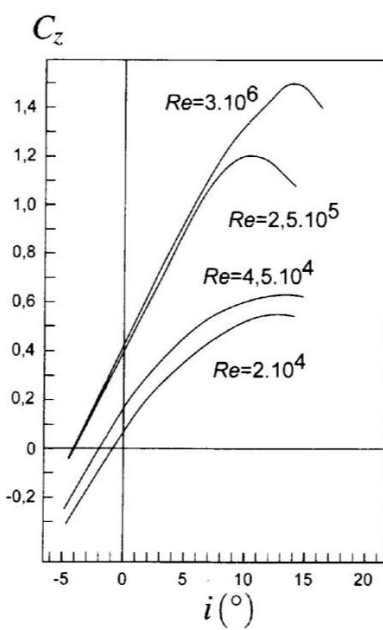
Angle de 6°
Flux d'air stationnaire

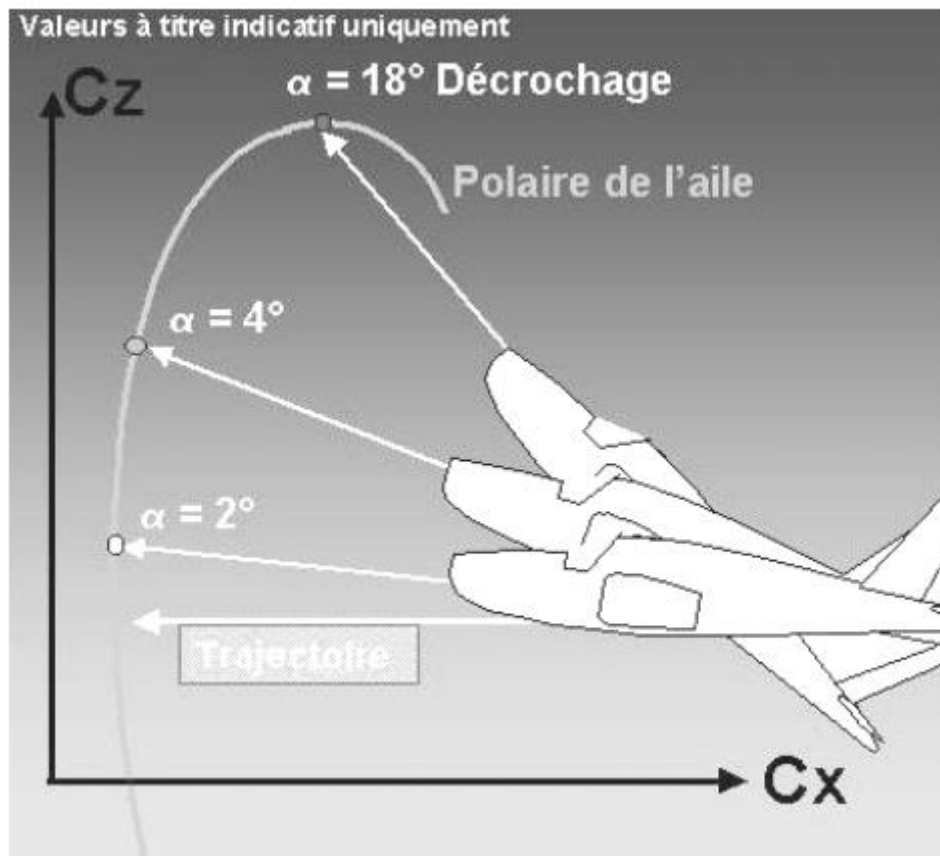


Angle de 15°
Limite de décrochage
Portance maximale



Angle de 25°
Situation de décrochage
Chute de la portance





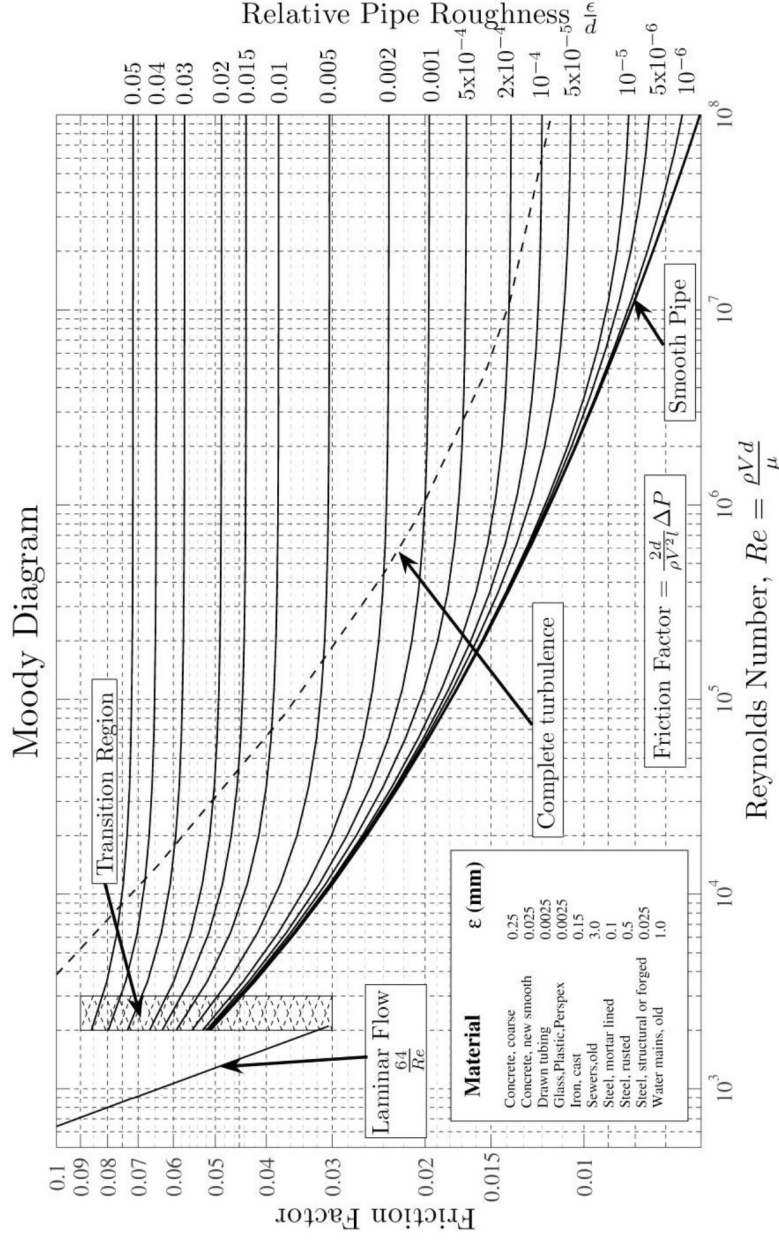
http://ffa-jeunes.ens-cachan.fr/BIA-P%C3%A9dago_files/C.pdf

B. Régime turbulent

4. Diagramme de Moody

La meilleure alternative à ce calcul itératif est d'utiliser directement le **diagramme de Moody**.

Il s'agit d'un abaque de **calcul direct du coefficient de perte de charge**, à partir du nombre de Reynolds et de la rugosité relative de la paroi interne de la conduite.



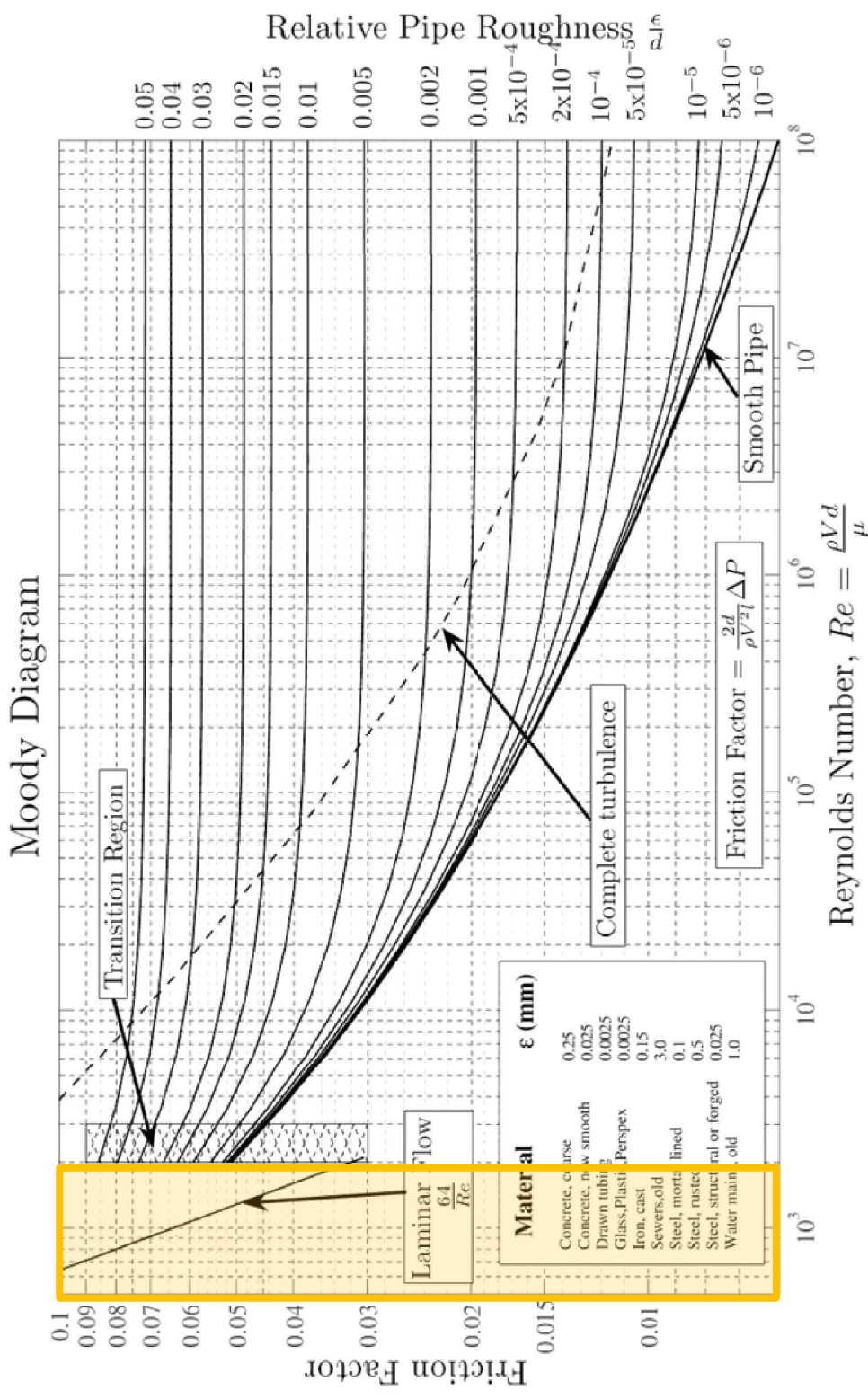
Pour s'en servir, il faut **préalablement** calculer le nombre de Reynolds et la rugosité relative.

Une fois que ces grandeurs sont connues, on peut **lire directement le coefficient de perte de charge** sur le graphique

B. Régime turbulent

4. Diagramme de Moody

Le diagramme de Moody couvre d'abord les **écoulements laminaires** (**partie gauche**, **pour des Reynolds faibles**)

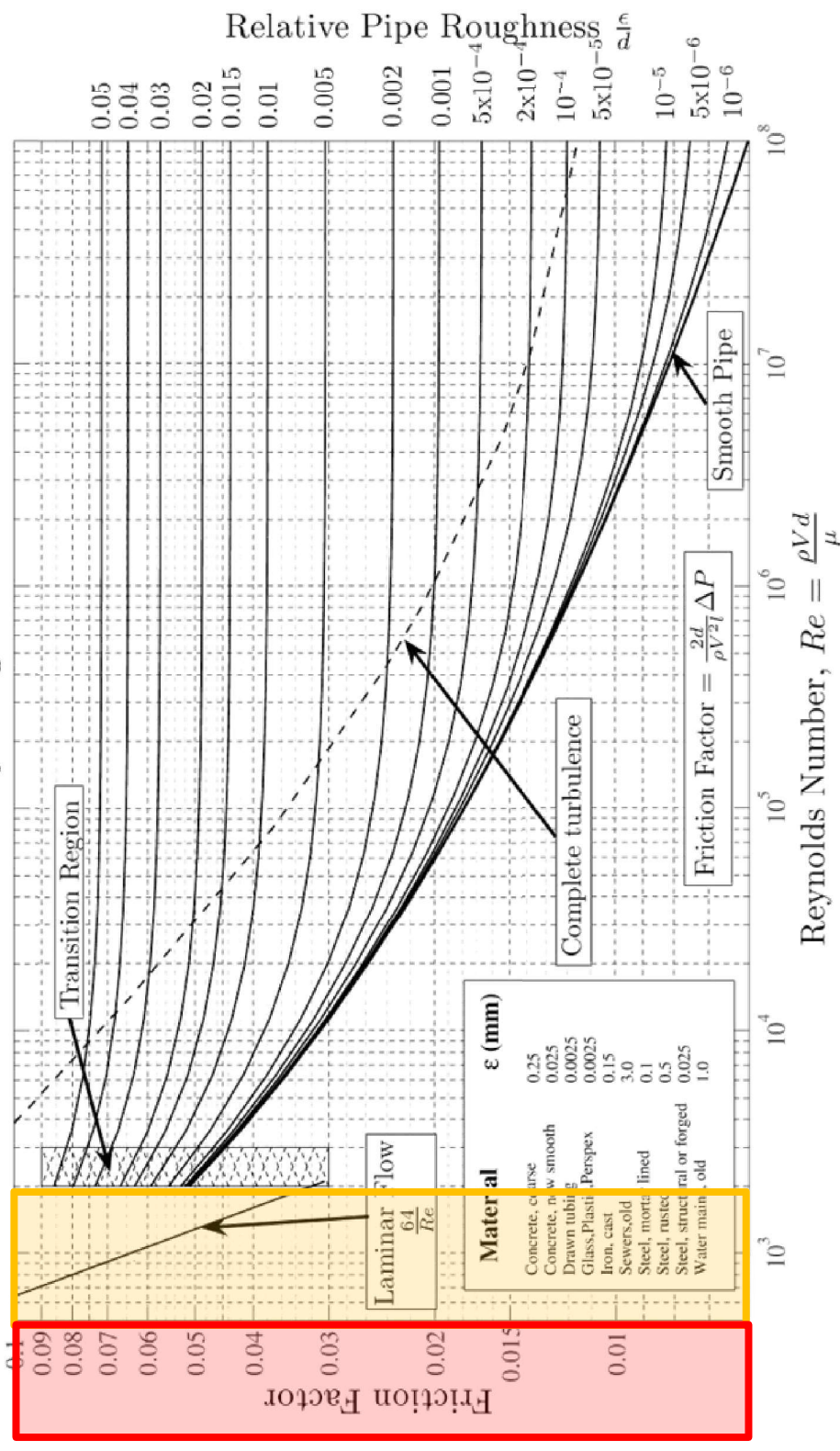


B. Régime turbulent

4. Diagramme de Moody

Dans ce cas, il n'y a qu'une droite de tracée et il suffit de lire la valeur correspondante de λ sur l'axe gradué à gauche du diagramme.

Moody Diagram



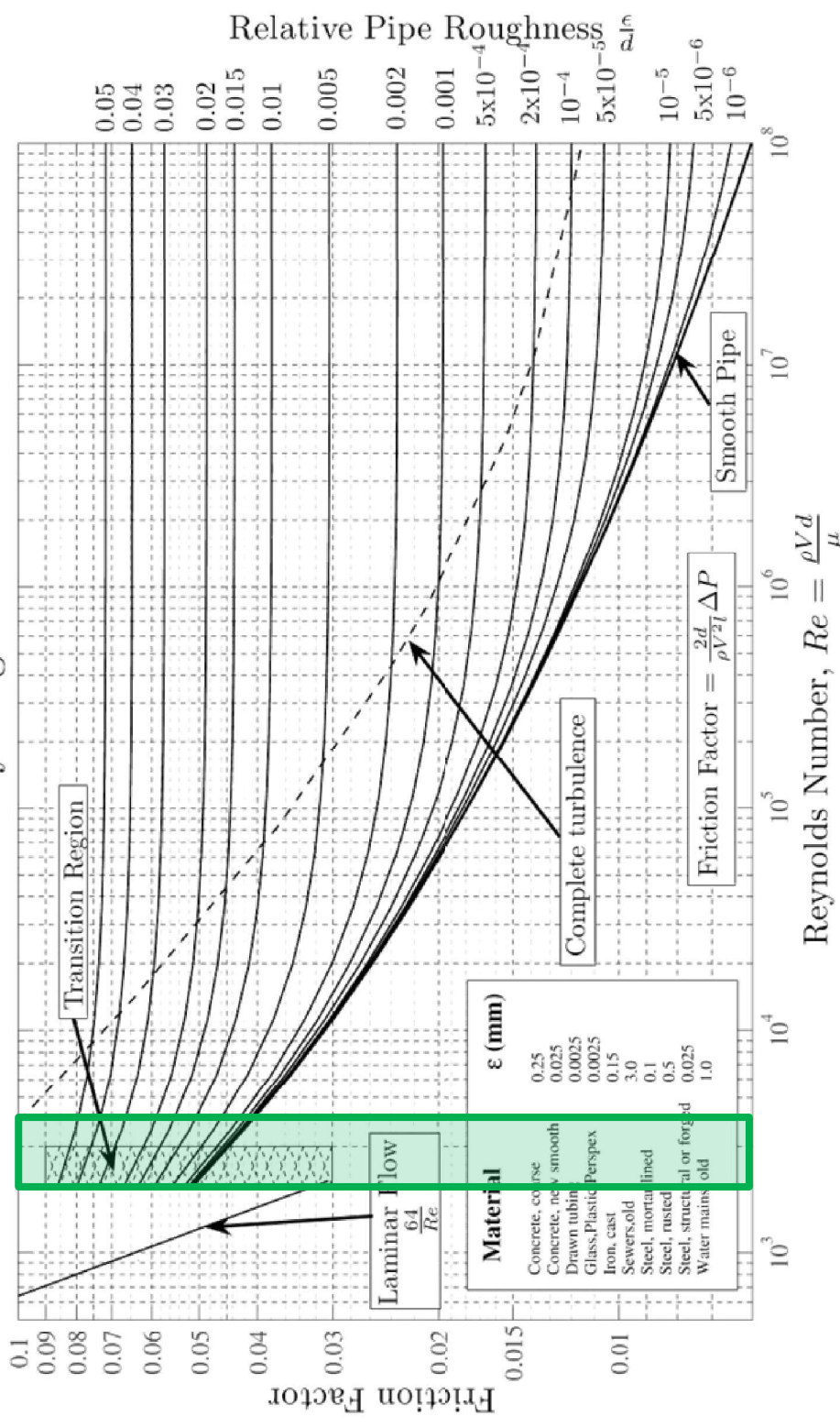
$$\text{Reynolds Number, } Re = \frac{\rho V d}{\mu}$$

B. Régime turbulent

4. Diagramme de Moody

Pour les Reynolds intermédiaires, on se situe en **régime transitoire**, et il faut utiliser les **mêmes méthodes qu'en turbulent** (sans certitude sur l'exactitude du résultat).

Moody Diagram

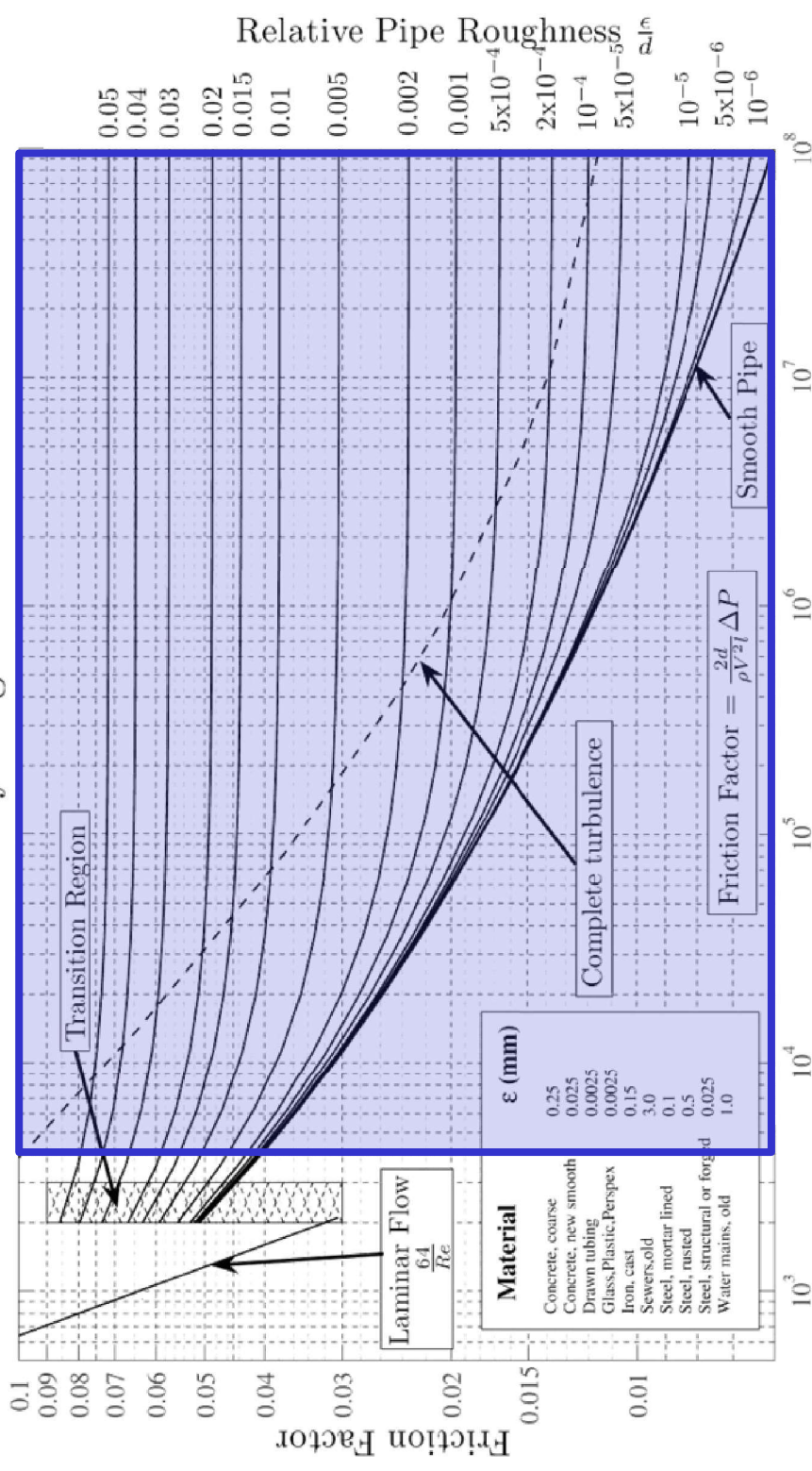


B. Régime turbulent

4. Diagramme de Moody

Pour des Reynolds suffisamment élevés, on est en régime turbulent. Il faut d'abord calculer la rugosité relative de la paroi interne de la conduite.

Moody Diagram



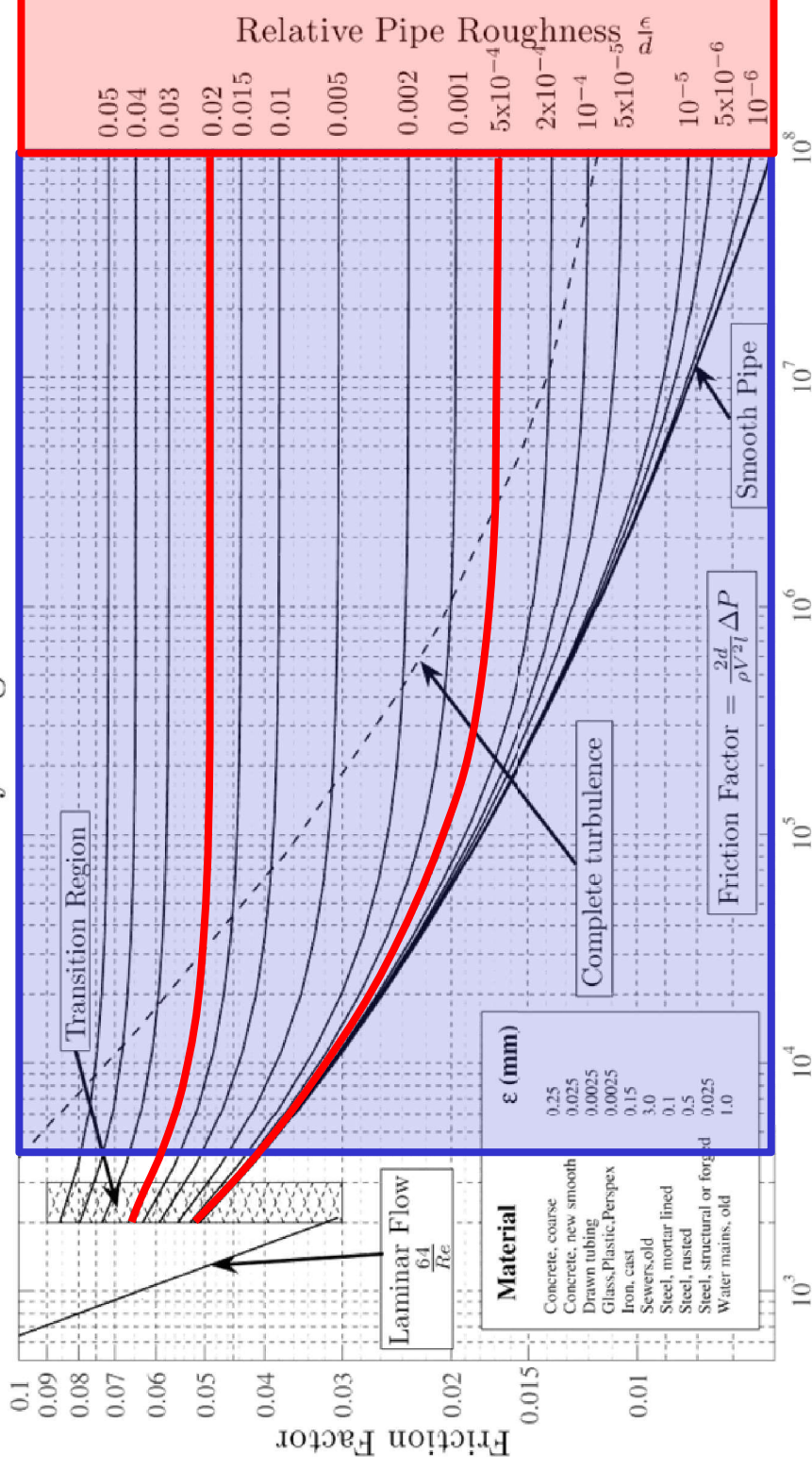
Reynolds Number, $Re = \frac{\rho V d}{\mu}$

B. Régime turbulent

4. Diagramme de Moody

En fonction de la rugosité relative, on sélectionne une ligne en partant de la droite du graphique (par exemple ici pour 0.02 ou 0.0005).

Moody Diagram



B. Régime turbulent

4. Diagramme de Moody

Pour une ligne donnée et pour un Reynolds donné, on trouve le point correspondant sur le graphique et on obtient λ sur l'axe de gauche.

Exemple : $Re=200000$

Moody Diagram

