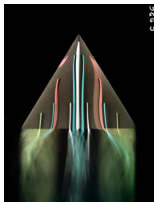


Mécanique des fluides

David FABRE

IMFT / UPS
Département de Mécanique



Lignes d'émission dans le sillage
d'une maquette d'avion de type "aile delta"



Ecoulement dans le sillage
d'une maquette d'automobile

Images : expériences en tunnel hydrodynamique, H. Werlé (ONERA)

1. Introduction – Analyse dimensionnelle

Questions de cours sur le chapitre 1

Questions de cours :

1. Donnez la définition (physique) d'un corps pur fluide et la définition (mécanique) d'un matériau fluide. Donnez trois exemples de matériaux qui ne sont pas des corps purs fluides mais se comportent mécaniquement comme des fluides.
2. Qu'appelle-t-on l'approche "milieu continu" ? Dans quelles circonstances est-elle justifiée ?
3. Énoncez le théorème "II" de l'analyse dimensionnelle.
4. Expliquez le principe de similitude permettant d'estimer les forces exercées sur un véhicule à partir d'une expérience.

Exercices de cours :

1. Par la méthode de l'analyse dimensionnelle, montrez que la période d'un pendule lâché avec une inclinaison initiale θ_0 vaut : $T = \sqrt{\frac{L}{g}} f(\theta_0)$.
2. Estimation de la force exercée sur une aile de libellule (partiel 2022).

Sommaire

1. Introduction – Analyse dimensionnelle

- Modélisation d'un fluide

 - Qu'est-ce qu'un fluide ?

 - Description microscopique et description MMC

 - Lois de comportement

 - Synthèse

- Analyse dimensionnelle

 - Principe

 - Force exercée sur un objet en mouvement dans un fluide

 - Principe de similitude

 - Exercice de cours : aile de libellule

Le milieu fluide : définition ...

Point de vue du thermodynamicien :

Pour un corps pur on appelle phases fluides les deux états fondamentaux suivants :

- gaz (vapeur) : O_2 , CO_2 , He, etc.
- liquide : H_2O , métaux liquides (Hg à température ambiante, Zn pour $T > 450^\circ C$, Fe liquide comme dans le noyau liquide de la Terre, ...)
- Plus deux états qui ne sont pas des phases bien définies :
 - Fluides supercritiques.
 - Plasmas (gaz composé d'ions et d'électrons) : haute atmosphère, étoiles (estimation : 99% de la matière de l'Univers)

Point de vue du mécanicien :

Fluide = tout matériau susceptible de s'écouler ; cad de se **déformer continument** sous l'effet de forces extérieures.

De ce point de vue un fluide être un mélange de corps purs (fluides ou non) :

- mélange de gaz (ex. air : mélange oxygène et azote principalement)
- mélange de liquides miscibles (pastis = eau+alcool,...) ou solutions (eau de mer, perrier...)
- Mélanges de liquides non miscibles (ex. eau et huile, vinaigrette)
- Suspensions (lait, etc...)
- Milieux granulaires (sable, etc...) dans certaines circonstances,
- Collection de corps célestes (anneaux de saturne, galaxies,...)

Modélisation d'un fluide :

Deux types de modélisation possibles :

1. Approche "cinétique microscopique" :

Modélisation comme un **milieu discret** à l'échelle microscopique (échelle ℓ caractéristique des interactions intermoléculaires) :

On s'intéresse à la vitesse individuelle $\vec{v}_i$ de chacune des particules (de masse m_i) constituant le fluide ($i = 1 \dots N$)

=> On peut alors écrire un système d'équations différentielles (discret), de (très) grande dimension, de la forme $m_i d\vec{v}_i/dt = \dots$

2. Approche "MMC" :

Modélisation comme un **milieu continu** à l'échelle macroscopique (échelle L) :

On s'intéresse à la "vitesse au sens de la MMC" considéré comme un champ continu $\vec{u}(\vec{x})$

=> On cherche alors à écrire un système d'équations aux dérivées partielles (continu) de la forme $\partial \vec{u} / \partial t = \dots$

Lien entre les deux approches :

La "vitesse au sens de la MMC" correspond à la vitesse moyenne des particules élémentaires occupant un volume mésoscopique de dimension L_{meso} supposée grande devant l'échelle microscopique ℓ (pour que la statistique ait un sens), et petite devant l'échelle macroscopique L (pour pouvoir considérer l'état comme "localement homogène").

L'approche MMC est donc justifiée sous l'hypothèse $\exists L_{meso} \quad t.q. \quad \ell \ll L_{meso} \ll L$;

$$\text{c.a.d : } K_n = \frac{\ell}{L} \ll 1 \quad (\text{Nombre de Knudsen})$$

Remarque : dans un gaz ℓ = libre parcours moyen $\approx 100nm$ à pression ambiante; dans un liquide ℓ = distance intermoléculaire $\approx 0.1nm$

Equations d'état

Les variables thermodynamiques ne sont pas indépendantes mais reliées par des **Equations d'état**.

En mécanique des fluides on a besoin de deux équations d'état : Celles-ci sont dérivées des principes de la thermodynamique (cf. cours Thermo L3) et/ou de la théorie cinétique (cf. cours Thermo L2).

(a) "Equation d'état mécanique" $\rho = \rho(P, T)$.

Modèles simples :

- Liquide incompressible (c.a.d ρ indépendant de p), indilatable (c.a.d ρ indépendant de T) :

$$\rho = \rho_0$$

- Gaz parfait :

$$\rho = \frac{P}{rT}; \quad r \text{ constante dépendant du gaz } (r = R/M).$$

- Fluide incompressible dilatable (cf. cours thermique, chap. convection naturelle) :

$$\rho = \rho_0(1 + \alpha(T - T_0))$$

(b) "Equation d'état énergétique" : (cf. chap. 11-12).

$e = e(T, P)$ ou $h = h(T, P)$ (avec e énergie interne massique; $h = e + P/\rho$ enthalpie massique).

Modèles simples :

- Liquide incompressible : $e = e_0 + c_v(T - T_0)$; $h = h_0 + c_p(T - T_0)$; $c_p \equiv c_v$.

- Gaz parfait : $e = c_v T$; $h = c_p T$; $c_v = r/(\gamma - 1)$; $c_p = \gamma r/(\gamma - 1)$.

Lois de comportement

En plus des équations d'état thermodynamique, il est nécessaire de se donner des lois de comportement :

- (a) Loi de comportement mécanique (ou loi rhéologique) :
Loi reliant les efforts internes aux déformations du matériau.

Formalisme MMC : $\vec{\sigma} = -p\vec{1} + \vec{\tau}$, $\vec{\tau} = \mathcal{F}(\vec{D})$ (cf. cours MMC et Chapitre 3.)

Modèle classique : fluide Newtonien

$\vec{\tau} = 2\mu\vec{D}$ où μ est la **Viscosité dynamique**.

La définition rigoureuse de la viscosité sera vue au chapitre 3.

Pour l'approche "analyse dimensionnelle" de ce chapitre on aura uniquement besoin de connaître son unité physique : $[\mu] = Pa \cdot s = kg \cdot m^{-1} \cdot s^{-1}$.

- (b) Loi de comportement thermique :
Loi reliant $\vec{q}$ (flux de chaleur) à la distribution de T .
Modèle classique : loi de Fourier $\vec{q} = -\lambda \nabla T$ (cf. cours transferts thermique).

Synthèse

$$\underbrace{\text{Equation d'état mécanique}}_{(\text{chap. 2})} + \underbrace{\text{Loi rhéologique}}_{(\text{chap. 3})} + \underbrace{\text{Elements de cinématique}}_{(\text{MMC et chap. 7})} \rightarrow \underbrace{\text{Equations de Navier-Stokes}}_{(\text{chap. 4 et 8})}$$

$$\left\{ \begin{array}{l} \rho \left[\frac{\partial \vec{u}}{\partial t} + \nabla \vec{u} \cdot \vec{u} \right] = -\nabla p + \mu \Delta \vec{u} \\ \nabla \cdot \vec{u} = 0 \end{array} \right. \quad (\text{Pour un fluide incompressible Newtonien})$$

Les équations de Navier-Stokes sont considérées comme mathématiquement redoutables...

L'existence ou non de solutions "lisses" de ces équations pour toute condition initiale est un problème mathématique considéré comme particulièrement difficile (l'un des 7 "Millennium problems" avec un prix d'1 million de dollars !)

(Cette question très théorique n'empêche pas les ingénieurs et physiciens d'utiliser ces équations tous les jours...)

Méthodes de résolution :

- Résolution exacte possible dans des cas très limités mais importants à connaître ! (TDs...)
- Résolution numérique (M1 - M2; TP numérique)
- Résolution approchée souvent possible, guidée par l'analyse dimensionnelle qui permet de simplifier les équations en ne gardant que les termes les plus importants (cf chap. 5 et chap. 7).

L'analyse dimensionnelle permet, par ailleurs, sans même écrire les équations, de "dégrossir" un problème en identifiant les paramètres importants, et d'indiquer les **conditions de similitude** permettant d'exploiter des expériences à échelle réduite.

Analyse dimensionnelle

Théorème "II" (ou Théorème De Vashy -Buckingham) :

Soit une quantité physique Y dépendant de n paramètres physiques X_i ($i = 1$ à n).

$$Y = \mathcal{F}(X_1, X_2, \dots, X_n)$$

Alors la quantité adimensionnelle $\frac{Y}{Y^*}$ où Y^* est la dimension physique de Y ne dépend que de $n - n_p$ paramètres adimensionnels, où n_p est le nombre d'unités fondamentales apparaissant dans le problème (en général en mécanique $n_p = 3$: Longueur Temps, Masse).

Méthode d'obtention de la relation adimensionnelle

- (i) Méthode des puissances (méthode non conseillée dans ce cours)

On postule une dépendance en puissance pour chacun des paramètres

$$Y \approx X_1^{\alpha_1} \cdot X_2^{\alpha_2} \cdot \dots \cdot X_n^{\alpha_n}$$

En considérant que les termes de gauche et de droite de cette expression ont même unité physique on écrit n_p relations entre ces exposants, ce qui permet d'éliminer n_p d'entre eux.

Inconvénient : il est en général faux que la dépendance vis-à-vis des paramètres est une loi de puissance.

- (ii) Méthode de ce cours : Recherche des "unités intrinsèques" du problème.

Le fait que Y dépend des variables X_i est vrai indépendamment des unités physiques choisies pour exprimer ces quantités. En notant Y^* l'unité de Y , et X_i^* l'unité de X_i :

$$\frac{Y}{Y^*} = \bar{F}\left(\frac{X_1}{X_1^*}, \frac{X_2}{X_2^*}, \dots, \frac{X_n}{X_n^*}\right)$$

Alors avec un choix judicieux d'unités "intrinsèques du problème", on peut remplacer n_p paramètres par 1 et les $n - n_p$ restant indiquent les **nombre adimensionnels** du problème.

Remarques

Remarques (importantes) :

- Souvent des constatations expérimentales et/ou des considérations géométriques et/ou l'étude de la structure des équations permettent de réduire encore plus le nombre de paramètres ou de préciser la dépendance vis-à-vis de ceux-ci.
- Si un paramètre sans dimensions est soit très petit, soit très grand, il arrive souvent que la relation devienne indépendante de ce paramètre ou devienne une loi de puissance.
(Mais ce n'est pas une règle générale ! Il faut toujours rester guidé par l'expérience et/ou l'analyse des équations.)

Exemple 1 : Période d'un pendule

(Pendule de longueur L , masse m , position angulaire initiale θ_0)

- Loi recherchée en fonction des paramètres physiques supposés pertinents :

$$T = \mathcal{F}(L, m, g, \theta_0)$$

- Mise sous forme adimensionnelle de la relation :

$$\frac{T}{T^*} = \overline{\mathcal{F}}\left(\frac{L}{L^*}, \frac{m}{m^*}, \frac{g}{L^* \cdot T^{*-2}}, \frac{\theta_0}{1}\right)$$

- Choix des unités "intrinsèques" au problème :

$$L^* = L, \quad m^* = m, \quad T^* = \sqrt{L/g}$$

Ce qui conduit à :

$$\frac{T}{\sqrt{L/g}} = \overline{\mathcal{F}}(1, 1, 1, \theta_0) \quad \text{soit } T = \sqrt{\frac{L}{g}} f(\theta_0)$$

On a bien ramené le nombre de paramètres de 4 à $4-3 = 1$!

- Simplification :

Lorsque $\theta_0 \ll 1$ la période ne dépend plus de θ_0

([Constatation expérimentale](#), justifié également par l'[étude des équations](#))

$$\longrightarrow T = \sqrt{\frac{L}{g}} \times C_{te}$$

- Remarque : la solution exacte du problème (exercice niveau L1) est $T = 2\pi \sqrt{\frac{L}{g}}$. L'analyse dimensionnelle prédit bien ce résultat (mais ne donne pas la valeur de la constante).

Exemple 2 : Flexion d'une poutre pesante

(Poutre de longueur L , épaisseur e , largeur b , masse m , module d'Young E , coef. de Poisson ν)

- Loi recherchée en fonction des paramètres physiques supposés pertinents :

$$\delta = \mathcal{F}(L, e, b, m, g, E, \nu)$$

- Mise sous forme adimensionnelle de la relation :

$$\frac{\delta}{L^*} = \overline{\mathcal{F}} \left(\frac{L}{L^*}, \frac{e}{L^*}, \frac{b}{L^*}, \frac{m}{m^*}, \frac{g}{L^* \cdot T^{*-2}}, \frac{E}{m^* L^{*-1} T^{*-2}}, \frac{\nu}{1} \right)$$

- Choix des unités "intrinsèques" au problème : $L^* = L$, $m^* = m$, $T^* = \sqrt{L/g}$
Ce qui conduit à :

$$\frac{\delta}{L} = \overline{\mathcal{F}} \left(1, \frac{e}{L}, \frac{b}{L}, 1, 1, \frac{EL^2}{mg}, \nu \right) \quad \text{soit} \quad \delta = L \times f \left(\frac{e}{L}, \frac{b}{L}, \frac{EL^2}{mg}, \nu \right)$$

- Simplifications supplémentaires :

- ▶ δ ne dépend pas de b (considération géométrique).
- ▶ δ est proportionnel à m (constatation expérimentale ; justifié également par l'étude des équations (cf. cours méca solides)).
- ▶ δ ne dépend pas de ν (constatation expérimentale ; justifié également par l'étude des équations (cf. cours méca solides)).

$$\rightarrow \frac{\delta}{L} = f(e/L) \times \frac{mg}{EL^2}$$

- Remarque : la solution exacte du problème (cf. cours Méca solides) est $\delta = \frac{3mgL^3}{2Ee^4}$ qui est bien de la forme attendue car cette expression peut s'écrire $\delta = L \times \underbrace{\frac{3}{2}(L/e)^4}_{f(e/L)} \times \frac{mg}{EL^2}$

Utilisation pratique

Méthode pratique pour appliquer la méthode d'analyse dimensionnelle :

- (i) Listez les paramètres physiques pertinents et indépendants
- (ii) Listez la dimension physique de toutes les quantités intervenant dans le problème.
- (iii) Ecrire la relation fonctionnelle sous forme adimensionnelle.
- (iv) Choisir les unités "intrinsèques",
- (v) simplifier la relation fonctionnelle adimensionnelle en conséquence, et en déduire les paramètres adimensionnels du problème.

Remarques :

- L'étape (i) est la plus difficile, car nécessite beaucoup d'expérience et une bonne "culture" de la mécanique des fluides...

- A l'étape (iv) plusieurs choix sont possibles, des choix différents amènent à des jeux de paramètres différents, tous équivalents.

Le "bon" choix (guidé par l'expérience) est celui qui fait apparaître les nombres adimensionnels "classiques" (Reynolds, Mach, Froude, Bond,).

⇒ document "Formulaire", Tableau B "Nombres sans dimensions"

- Les simplifications dues aux **constatations expérimentales**, **géométriques** ou à la **structure des équations** peuvent être invoquées durant l'étape (i), ou après l'étape (v) .

Force exercée sur un véhicule dans un **fluide homogène** (sous-marin, mais aussi voiture, etc...)

Considérons un objet de longueur L (par exemple un sous-marin) se déplaçant horizontalement à la vitesse U dans un fluide homogène de masse volumique uniforme ρ , et viscosité dynamique μ (ou de manière équivalente un objet fixe placé dans un "écoulement incident" de vitesse U).

On cherche à estimer la force de traînée F_x exercée par le fluide sur l'objet.

Listons les paramètres physiques pertinents et indépendants :

$$F_x = \mathcal{F}(U, L, \rho, \mu)$$

Remarques :

- La pression de référence p_0 n'est pas un paramètre pertinent.
Constatation expérimentale, justifié également par l'**étude des équations** (cf. chap. 8).
- La température T_0 est un paramètre pertinent mais non indépendant (car $\rho = \rho(T_0)$).
- La gravité g (force verticale) n'est pas un paramètre pertinent concernant la force de traînée (force horizontale).

Considération géométrique ; justifié également par l'**étude des équations** (cf. chap. 8).

Par application de la méthode des unités intrinsèques :

$$\frac{F_x}{\rho L^2 U^2} = \bar{\mathcal{F}} \left(1, 1, 1, \frac{\mu}{\rho U L} \right) = f \left(\frac{\rho U L}{\mu} \right)$$

Par convention on introduit une "surface de référence" (par exemple surface frontale pour un sous-marin) $S \approx L^2$, et on écrit cette relation :

$$F_x = \frac{1}{2} \rho S U^2 C_x(Re), \text{ où } C_x \text{ est le coefficient de traînée et } Re = \frac{\rho U L}{\mu} \text{ le } \mathbf{Nombre de Reynolds}.$$

Force exercée sur un véhicule dans un **gaz** (Avions, ...)

Dans le cas général (vitesse quelconque), la pression p_0 de référence (pression loin de l'objet) devient un paramètre pertinent. On part donc de la relation :

$$F_x = \mathcal{F}(U, L, \rho_0, p_0, \mu)$$

Par application de la méthode des unités intrinsèques :

$$\frac{F_x}{\rho_0 L^2 U^2} = \bar{\mathcal{F}} \left(1, 1, 1, \frac{p_0}{\rho_0 U^2}, \frac{\mu}{\rho_0 U L} \right) = f \left(\frac{U}{\sqrt{p_0/\rho_0}}, \frac{\rho_0 U L}{\mu} \right)$$

La quantité $\sqrt{p_0/\rho_0}$ définit (à une constante numérique près) une échelle de vitesse dont on verra (cf. chapitre 11) qu'il s'agit de la vitesse du son c_0 :

$$c_0 = \sqrt{\gamma p_0 / \rho_0} \quad (\text{où } \gamma \text{ est l'indice adiabatique du gaz})$$

En introduisant de nouveau une "surface de référence" $S \approx L^2$, on écrit cette relation :

$$F_x = \frac{1}{2} \rho_0 S U^2 C_x(Ma, Re)$$

$$\text{avec } Re = \frac{\rho_0 U L}{\mu_0} \equiv \frac{U L}{\nu_0} \quad \text{Nombre de Reynolds,} \quad \text{et} \quad Ma = \frac{U}{c_0} = \sqrt{\frac{\rho_0 U^2}{\gamma p_0}} \quad \text{Nombre de Mach.}$$

Remarques :

- Dans l'air (gaz parfait de constantes $r = 384 \text{ J/K/kg}$ et $\gamma = 1.4$), à température ambiante ($T_0 = 20^\circ \text{C} = 293 \text{ K}$), la vitesse du son vaut $c_0 = \sqrt{\gamma p_0 / \rho_0} = \sqrt{\gamma r T_0} \equiv 340 \text{ m/s}$
- Lorsque $Ma \lesssim 0.3$ (voitures, oiseaux, insectes...), la force de traînée ne dépend pas du nombre de Mach ([constatation expérimentale](#) ; également justifiée par l'étude de la **structure des équations** ; cf. chap. 8).

Force exercée sur un véhicule à la surface d'un liquide (Bateaux).

On montre (cf. TD) que dans le cas d'un bateau les paramètres pertinents et indépendants sont :

$$F_x = \mathcal{F}(U, L, \rho, g, \mu)$$

Par application de la méthode des unités intrinsèques :

$$\frac{F_x}{\rho L^2 U^2} = \bar{\mathcal{F}}\left(1, 1, 1, \frac{gL}{U^2}, \frac{\mu}{\rho UL}\right) = f\left(\frac{U}{\sqrt{gL}}, \frac{\rho UL}{\mu}\right)$$

La quantité $\sqrt{gL}$ définit de nouveau une échelle de vitesse dont on peut montrer (cf cours Ondes, M1) qu'il s'agit de la vitesse caractéristique des ondes de surface (vagues).

En introduisant de nouveau une "surface de référence" $S \approx L^2$, on écrit cette relation :

$$F_x = \frac{1}{2} \rho S U^2 C_x(Fr, Re)$$

$$\text{avec } Re = \frac{\rho UL}{\mu} \quad \text{Nombre de Reynolds, et} \quad Fr = \frac{U}{\sqrt{gL}} \quad \text{Nombre de Froude.}$$

Principe de similitude

Problème pratique pour un ingénieur :

Pour un véhicule de longueur L , vitesse U , dans un fluide et un environnement de caractéristiques $(\rho_0, p_0, \nu, g, \dots)$, estimez la force de traînée F_x (et/ou la portance F_z).

Méthode expérimentale :

On dispose d'une maquette à l'échelle réduite L_m , vitesse U_m .

On effectue une expérience dans un environnement de caractéristiques $(\rho_m, p_m, \nu_m, g_m, \dots)$.

On mesure une force $F_{x,m}$ sur la maquette.

Comment en déduire la force F_x sur le véhicule à échelle réelle ???

Principe de similitude : Si tous les paramètres sans dimension ont la même valeur dans les conditions réelles et dans celles de l'expérience (conditions de similitude), alors les coefficients sans dimension caractérisant les forces ($C_x, C_y, \dots$) ont la même valeur.

Exemples d'application :

- Cas d'une automobile : Un seul paramètre Re .
On peut donc être en similitude exacte. (N.B. le fluide dans l'expérience peut être différent de l'air...)
- Cas d'un avion : Deux paramètres Re, Ma .
Impossibilité d'être en similitude exacte (à moins de faire varier fortement la température...)
- Cas d'un bateau : Deux paramètres Re, Fr .
Impossibilité d'être en similitude exacte (à moins de faire l'expérience sur une autre planète...)

Dans les deux derniers cas, en pratique, on se met en similitude partielle en privilégiant le paramètre le plus important (respectivement Ma et Fr), et on corrige l'effet du nombre de Re par des méthodes semi-empiriques issues de la modélisation des effets visqueux (cf. TD, ex. 1.1).

Exercice de cours (partiel 2021)

On cherche à estimer la force de portance exercés sur une aile de libellule, de longueur $L = 5\text{cm}$ et surface $S = 5\text{cm}^2$, se déplaçant dans l'air (de propriétés ρ_a, ν_a) à la vitesse $U = 4\text{m/s}$.

On souhaite estimer la force de portance a partir d'une expérience avec une maquette à échelle augmentée d'un facteur 4 (longueur $L_m = 4 \times L = 20\text{cm}$, surface $S_m = 4^2 \times S = 80\text{cm}^2$) dans soufflerie hydraulique (le fluide est de l'eau de propriétés ρ_e, ν_e).

1. Donnez la vitesse U_M dans la soufflerie hydraulique pour être en similitude de Reynolds.

Dans la situation réelle, le nombre de Reynolds est $Re = UL/\nu_a = 1333$. Dans la soufflerie, la condition de similitude implique $Re_m = U_m L_m / \nu_e = Re$, soit $U_m = 6.67\text{cm/s}$.

2. Dans les conditions de similitude de Reynolds, on a mesuré une portance $F_{y,m} = 2.27 \cdot 10^{-2}\text{N}$. En déduire la portance F_y exercée sur l'aile de la libellule. L'ordre de grandeur de cette force vous semble-t-elle compatible avec le vol de l'insecte ?

En condition de similitude, les coefficients de portance ont la même valeur. Dans l'expérience celui-ci vaut

$$C_{y,m} = F_{y,m} / (\rho_e S_M U_M^2 / 2) = 1.275.$$

La portance dans la situation réelle est donc $F_y = 1/2 \rho_a U^2 S C_y$ avec $C_y = C_{y,m}$, soit $F_y = 0.0063\text{N}$. Ceci correspond à une force équivalente d'environ 0.6g , ce qui est comparable au poids de l'insecte.

Valeurs de $\rho_a, \nu_a, \rho_e, \nu_e$: (cf. Formulaire, section A)

Questions de cours sur le chapitre 1

Questions de cours :

1. Donnez la définition (physique) d'un corps pur fluide et la définition (mécanique) d'un matériau fluide. Donnez trois exemples de matériaux qui ne sont pas des corps purs fluides mais se comportent mécaniquement comme des fluides.
2. Qu'appelle-t-on l'approche "milieu continu" ? Dans quelles circonstances est-elle justifiée ?
3. Énoncez le théorème "II" de l'analyse dimensionnelle.
4. Expliquez le principe de similitude permettant d'estimer les forces exercées sur un véhicule à partir d'une expérience.

Exercices de cours :

1. Par la méthode de l'analyse dimensionnelle, montrez que la période d'un pendule lâché avec une inclinaison initiale θ_0 vaut : $T = \sqrt{\frac{L}{g}} f(\theta_0)$.
2. Estimation de la force exercée sur une aile de libellule (partiel 2022).