HAL open science

Unités, dimensions et nombres adimensionnels

Marie Debacq

▶ **To cite this version:**

Marie Debacq. Unités, dimensions et nombres adimensionnels. École d'ingénieur. Cnam Paris, France. 2008. cel-02020110

HAL Id: cel-02020110

https://hal.science/cel-02020110

Submitted on 15 Feb 2019

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

Distributed under a Creative Commons Attribution - NonCommercial - ShareAlike 4.0 International License

le cnam

Unités, dimensions et nombres adimensionnels

Marie DEBACQ

BY NC SA

dernière mise à jour : février 2008

avant-propos

Ce document constitue une première approche de l'étude des UNITÉS, DIMENSIONS ET NOMBRES ADIMENSIONNELS, support de l'enseignement destiné aux auditeurs de la spécialité Génie des Procédés du Cnam.
La lecture de cette version améliorable et évolutive pourra être complétée par la consultation des ouvrages de base listés à la fin de ce document.
L'auteure sera particulièrement attentive aux remarques, suggestions et corrections susceptibles d'améliorer le fond et la forme de ce support.

attention

remarque

exercice

table des matières

introduction **1**

Chapitre 1 : systèmes d'unités **3**
1.1. système international 3
1.1.1. unités utilisées 3
1.1.1.1. unités de base 3
1.1.1.2. unités secondaires 4
1.1.1.3. unités d'usage courant 5
1.1.2. règles d'écriture 6
1.1.3. chiffres significatifs 7
1.1.3.1. définition 7
1.1.3.2. opérations 7
1.1.3.2.1. multiplications et divisions 7
1.1.3.2.2. additions et soustractions 8
1.1.3.2.3. puissances 8
1.1.4. constantes universelles utiles 8
1.2. autres systèmes 9
1.2.1. système CGS 9
1.2.2. système MTS 10
1.2.3. système MKpS 10
1.2.4. système anglo-américain 10
1.3. conversion d'unités 11

Chapitre 2 : nombres adimensionnels **15**
2.1. analyse dimensionnelle 15
2.2. nombres adimensionnels usuels 15
2.3. théorème de Buckingham 22

annexe **25**

🕮 références bibliographiques **35**

ce qu'il faut retenir… **36**

liste des exercices

- exercice 1-1 : équation aux dimensions & équivalence en unités de base 3
- exercice 1-2 : chiffres significatifs 7
- exercice 1-3 : chiffres significatifs dans une division 8
- exercice 1-4 : chiffres significatifs dans une addition 8
- exercice 1-5 : chiffres significatifs dans un calcul physico-chimique 8
- exercice 1-6 : conversion de l'unité d'une constante universelle 9
- exercice 1-7 : conversion d'unité SI/CGS 9
- exercice 1-8 : conversion de température 11
- exercice 1-9 : conversion d'unité anglo-saxonne 11
- exercice 1-10 : conversion d'une unité anglo-saxonne composite 11
- exercice 1-11 : conversion d'une unité anglo-saxonne 12
- exercice 1-12 : conversion de l'unité d'une constante dans une corrélation anglo-saxonne 12
- exercice 1-13 : conversion de l'unité d'une constante dans une corrélation anglo-saxonne 13
- exercice 2-1 : analyse dimensionnelle d'une explosion nucléaire 23
- exercice 2-2 : analyse dimensionnelle du transfert thermique par convection forcée 23

introduction

La connaissance passe souvent par un nombre, or la mesure qui fournit ce nombre ne peut se concevoir sans unités étalons et instruments de mesure.
Une grandeur est une caractéristique physique, chimique ou biologique. Elle correspond à tout ce qui peut être mesuré ou repéré (température, pression, volume, pH, force, etc.). L'expression d'une grandeur est égale au produit de deux facteurs :

nombre d'unités × unité

La ***dimension*** d'une grandeur représente sa nature. C'est une notion très générale, qui ne suppose aucun choix d'un système d'unités particulier. Ainsi une grandeur ayant la dimension d'une longueur (on dit aussi qu'elle est homogène à une longueur), peut s'exprimer en mètres, centimètres, angströms ou miles.
Une grandeur purement numérique est dite sans dimension, ou adimensionnelle.

L'angle plan est défini comme le rapport de deux longueurs, c'est donc une grandeur sans dimension, et pourtant il a une unité !

☞ plan du cours sur les unités

Le premier chapitre de ce cours permettra de faire le point sur les systèmes d'unités, les règles d'écriture et les chiffres significatifs.
Le second chapitre sera consacré aux nombres adimensionnels et au théorème de BUCKINGHAM.

Chapitre 1 : systèmes d'unités

1.1. SYSTÈME INTERNATIONAL

Le système métrique est le premier système rationnel d'unités, internationalisé par la convention du mètre, le 20 mai 1875. Ce traité instituait le Bureau International des Poids et Mesures, situé depuis cette date au Pavillon de Breteuil à Sèvre. Le système international d'unités (SI), dérivé de l'ancien système métrique GIORGI, est né officiellement en 1960 lors de la 11e conférence générale des poids et mesures.

1.1.1. unités utilisées

Un système d'unités est basé sur des unités fondamentales (ou de base) et des unités dérivées.

1.1.1.1. unités de base

Les unités de base du système S.I. sont données dans le Tableau 1.

Tableau 1 : Unités de base.

unité de	nom	symbole	symbole pour les équations aux dimensions
longueur	mètre	m	L
masse	kilogramme (et non le gramme !)	kg	M
temps	seconde	s	T
température	kelvin	K	Θ
quantité de matière	mole	mol	N
intensité de courant électrique	ampère	A	I
intensité lumineuse	candela	cd	J

Les équations aux dimensions permettent de relier chaque grandeur à ses unités de base. Par exemple pour une force, $F = m \cdot \gamma = m \cdot \frac{d^2x}{dt^2}$, donc [$F$] = M L T^{-2}. *

exercice 1-1 : équation aux dimensions & équivalence en unités de base

Donner l'équation aux dimensions de la résistance électrique et exprimer l'Ohm en unités de base.

On se souvient de la loi d'Ohm : $U = R \cdot I$, où U est la tension électrique (en Volt), R la résistance électrique (en Ohm) et I l'intensité électrique (en Ampère). On sait également que la puissance électrique $\mathcal{P}$ peut être calculée comme le produit $\mathcal{P} = U \cdot I$. Ainsi : $\text{résistance électrique} = \frac{\text{tension électrique}}{\text{intensité électrique}} = \frac{\text{puissance électrique}}{(\text{intensité électrique})^2}$.

* Plutôt que d'essayer de retenir les équivalences d'unités secondaires en unités de base, il faut utiliser les lois connues : poids (= force) = masse × accélération ; puissance = énergie / temps ; énergie ≡ travail = force × longueur ; pression = force / surface ; etc.

Comme toute puissance, la puissance électrique est le rapport d'une énergie par un temps ; le travail est une forme d'énergie, qui peut s'exprimer comme le produit d'une force par une longueur ; la pesanteur est une force, qui est le produit de la masse du système par l'accélération de la pesanteur ; enfin l'accélération a pour dimension [L T^{-2}]. Donc : $\text{puissance} = \frac{\text{énergie}}{\text{temps}} = \frac{\text{force} \times \text{longueur}}{\text{temps}} = \frac{(\text{masse} \times \text{accélération}) \times \text{longueur}}{\text{temps}}$, et la puissance a pour équation aux dimensions [L^2 M T^{-3}].
Et finalement, la résistance électrique a pour équation aux dimensions **[L^2 M T^{-3} I^{-2}]**.
Par conséquent, l'Ohm est équivalent à **m^2 kg s^{-3} A^{-2}**. (C'est bien ce qui apparaît dans le Tableau 2 ;o)

1.1.1.2. unités secondaires

Certaines unités secondaires (ou dérivées) peuvent porter des noms particuliers (Tableau 2) ; on y adjoint les unités de mesure des angles (Tableau 3). D'autres unités secondaires peuvent être exprimées en fonction des unités de base (Tableau 4) ou encore être un mélange d'unités de base et d'unités secondaires (Tableau 5).

Un système d'unités est dit cohérent lorsque les coefficients numériques reliant les unités secondaires aux unités de base sont égaux à un (c'est le cas du système international).

Tableau 2 : Unités secondaires portant des noms particuliers.*

	unités de	nom	symbole	équivalence	équation aux dimensions
temps	fréquence	hertz	Hz	s^{-1}	T^{-1}
mécanique	force	newton	N	kg m s^{-2}	M L T^{-2}
	pression ; contrainte	pascal	Pa	N m^{-2}	M L^{-1} T^{-2}
	énergie ; travail	joule	J	N m	M L^2 T^{-2}
	puissance	watt	W	J s^{-1}	M L^2 T^{-3}
électromagnétisme	quantité d'électricité ; charge	coulomb	C	A s	T I
	potentiel ; fém	volt	V	W A^{-1}	M L^2 T^{-3} I^{-1}
	capacitance	farad	F	C V^{-1}	M^{-1} L^{-2} T^4 I^2
	résistance électrique	ohm	Ω	V A^{-1}	M L^2 T^{-3} I^{-2}
	conductance	siemens	S	A V^{-1}	M^{-1} L^{-2} T^3 I^2
	flux magnétique	weber	Wb	V s	M L^2 T^{-2} I^{-1}
	densité de flux magnétique	tesla	T	Wb m^{-2}	M T^{-2} I^{-1}
	inductance	henry	H	Wb A^{-1}	M L^2 T^{-2} I^{-2}
optique	flux lumineux	lumen	lm	cd sr	J Ω
	éclairement	lux	lx	cd sr m^{-2}	J Ω L^{-2}
nucléaire	activité	becquerel	Bq	s^{-1}	T^{-1}
	dose absorbée	gray	Gy	J kg^{-1}	L^2 T^{-2}
	équivalent de dose	sievert	Sv	J kg^{-1}	L^2 T^{-2}

Tableau 3 : Unités de mesure des angles.

unité de	nom	symbole
angle plan	radian	rad
angle solide	steradian	sr

Tableau 4 : Unités secondaires exprimées en fonction des unités de base.

	unités de	nom	symbole
géométrie	aire	mètre carré	m^2
	volume	mètre cube	m^3
mécanique	vitesse	mètre par seconde	$m\ s^{-1}$
	accélération	mètre par seconde carrée	$m\ s^{-2}$
	vitesse angulaire	radian par seconde	$rad\ s^{-1}$
	accélération angulaire	radian par seconde carrée	$rad\ s^{-2}$
	nombre d'onde	par mètre	m^{-1}
	viscosité cinématique	mètre carré par seconde	$m^2\ s^{-1}$
propriété	masse volumique	kilogramme par mètre cube	$kg\ m^{-3}$
	concentration	mole par mètre cube	$mol\ m^{-3}$
	volume spécifique	mètre cube par kilogramme	$m^3\ kg^{-1}$
électromagnétisme	densité de courant	ampère par mètre carré	$A\ m^{-2}$
	champ magnétique	ampère par mètre	$A\ m^{-1}$
	activité (radioéléments)	par seconde	s^{-1}
optique	luminance	candela par mètre carré	$cd\ m^{-2}$

Tableau 5 : Unités secondaires mixtes.

	unités de	symbole
mécanique	viscosité dynamique	Pa s
	moment d'une force	N m
	tension superficielle	$N\ m^{-1}$
énergétique	densité de flux thermique	$W\ m^{-2}$
	capacité thermique ; entropie	$J\ K^{-1}$
	capacité thermique spécifique ; entropie spécifique	$J\ kg^{-1}\ K^{-1}$
	énergie spécifique	$J\ kg^{-1}$
	conductivité thermique	$W\ m^{-1}\ K^{-1}$
	densité d'énergie	$J\ m^{-3}$
	énergie molaire	$J\ mol^{-1}$
	entropie molaire ; capacité thermique molaire	$J\ mol^{-1}\ K^{-1}$
	intensité de rayonnement	$W\ sr^{-1}$
	radiance	$W\ m^{-2}\ sr^{-1}$
	champ électrique	$V\ m^{-1}$
électromagnétisme	densité de charge	$C\ m^{-3}$
	densité de flux électrique	$C\ m^{-2}$
	permittivité	$F\ m^{-1}$
	perméabilité	$H\ m^{-1}$

1.1.1.3. unités d'usage courant

Enfin il existe des unités hors système, mais d'usage courant. Certaines d'entre elles sont reconnues, et donc tolérées dans les échanges internationaux (Tableau 6), et d'autres ne le sont pas (Tableau 7).

Tableau 6 : Unités d'usage courant reconnues.

	unités	symbole	valeur en S.I.
temps	minute	min	60 s
	heure	h	$3{,}6\ 10^{3}$ s
	jour	j	$8{,}64\ 10^{4}$ s
	année	a	$3{,}1536\ 10^{7}$ s
angle plan	tour	tr	2π rad
	grade	gr	$\pi/200$ rad
	degré	°	$\pi/180$ rad
	minute	'	$\pi/10800$ rad
	seconde	"	$\pi/64800$ rad
volume	litre	L	10^{-3} m^3
température	degré Celsius	°C	T [°C] + 273,15 K
masse	tonne	t	10^{3} kg
distance	mille nautique		1852 m
vitesse	nœud		$1852/3600$ m s^{-1}
travail ; énergie	watt heure	W h	3600 J
	électron volt	eV	$1{,}602\ 10^{-19}$ J
radioactivité	activité nucléaire ; curie	Ci	$3{,}7\ 10^{10}$ s^{-1}
	roentgen	R	$2{,}58\ 10^{-4}$ C kg^{-1}

Tableau 7 : Unités d'usage courant non reconnues.

	unités	symbole	valeur en S.I.
longueur	angström	Å	$100\ 10^{-12}$ m
surface	are	a	100 m^2
	hectare	ha	10^{4} m^2
pression	bar	bar	10^{5} Pa
	torr	torr	$101325/760$ Pa
	atmosphère	atm	101325 Pa
force	dyne	dyn	10^{-5} N
	kilogramme force	kgf	9,80665 N
énergie	calorie	cal	4,1855 J
	erg	erg	10^{-7} J
viscosité	poise	P	0,1 Pa s
	stokes	St	10^{-4} m^2 s^{-1}
concentration	normalité	N	*dépend du réactif*
	molalité [mol kg^{-1}]		1 mol kg^{-1}
	molarité [mol L^{-1}]	M	10^{3} mol m^{-3}

1.1.2. règles d'écriture

Les symboles des unités **ne s'accordent pas au pluriel**.
Le produit de deux unités est marqué par un espace [Pa s] (*éviter le point*). La division est indiquée par une puissance négative [W m^{-2}] (***le signe divisé / est à proscrire***).
Il faut laisser un **espace entre la valeur numérique et l'unité**. (*Une exception d'ordre esthétique est admise pour le cas de % et °C, à condition que la présentation soit la même dans tout le document.*)
Le séparateur décimal est la **virgule** en Français, et le point en Anglais. Pour les nombres comportant de nombreux chiffres, ces chiffres peuvent être séparées par groupes de trois. (La séparation peut être marquée : par un point en Français, et par une virgule Anglais ; on peut également utiliser l'espace.) *Par conséquent une valeur qui s'écrit 1.234,567 en Français, s'écrira 1,234.567 en Anglais, et signifie "mille deux cent trente quatre unités et cinq cent soixante sept millièmes".*
On écrit les valeurs en **notation scientifique**, c'est-à-dire un chiffre avant la virgule, autant de chiffres que nécessaire après la virgule, et une puissance de 10 (*par exemple : 1,2345 10^{6} u*). On peut également utiliser des préfixes (Tableau 8), de préférence uniquement sur la première unité (*dans l'exemple précédent : 1,2345 Mu*).
Le symbole pour un nombre de moles est "mol" (sans *e*).
Dans le cas d'une grandeur sans dimension, on le précise explicitement comme suit : [-].

Si une unité est représentée par son nom (*qui s'accorde au pluriel*) et non par son symbole, la valeur numérique qui précède doit être écrite en lettres et non en chiffres. Ainsi on doit écrire : "deux minutes" ou "2 min".
Tous les symboles s'écrivent en **lettres minuscules, sauf** :

- ✓ la première lettre d'une unité provenant d'un nom propre [N, K, Pa, °C, …][*] ;
- ✓ les préfixes supérieurs à kilo ;
- ✓ le symbole de litre [L] (et non l pour éviter tout confusion avec le chiffre 1).

Il n'y a pas de point après les unités (sauf en fin de phrase).

Tableau 8 : Préfixes en S.I.

facteur	préfixe	symbole
10^{24}	yotta	Y
10^{21}	zetta	Z
10^{18}	exa	E
10^{15}	peta	P
10^{12}	téra	T
10^{9}	giga	G
10^{6}	méga	M
10^{3}	kilo	k
10^{2}	hecto	h
10^{1}	déca	da

facteur	préfixe	symbole
10^{-24}	yocto	y
10^{-21}	zepto	z
10^{-18}	atto	a
10^{-15}	femto	f
10^{-12}	pico	p
10^{-9}	nano	n
10^{-6}	micro	µ
10^{-3}	milli	m
10^{-2}	centi	c
10^{-1}	déci	d

1.1.3. chiffres significatifs

Cette notion est extrêmement importante, et il convient d'être très vigilant sur le nombre de chiffres significatifs avec lequel on fournit un résultat.

1.1.3.1. définition

Les chiffres significatifs d'un nombre sont ceux dont on est certain, plus le dernier qui peut être arrondi. Dans la pratique, les chiffres significatifs sont : des chiffres différents de zéro, des zéros placés entre d'autres chiffres, et des zéros placés à droite des autres chiffres lorsqu'ils sont le résultat d'une mesure. Le Tableau 9 donne quelques exemples, et montre que la position de la virgule n'a rien à voir avec le nombre de chiffres significatifs.

exercice 1-2 : chiffres significatifs

nombre	*nombre de chiffres significatifs*
54	2
0,35	2
0,0707	3
22 10^4	2
0,700 g (pesé sur une balance au mg)	3
environ 20700	3

Tableau 9 : Exemples de détermination du nombre de chiffres significatifs.

Pour éviter d'écrire des zéros non significatifs, on utilise les puissances de 10. *Par exemple, pour écrire "sept millions", on écrira 7 10^6 s'il s'agit d'un ordre de grandeur, et 7 000 000 ou 7,000 000 10^6 si ce nombre est exact.*

1.1.3.2. opérations

1.1.3.2.1. multiplications et divisions

Pour multiplier et/ou diviser des valeurs, il faut effectuer les opérations en conservant tous les chiffres significatifs de chaque valeur, puis arrondir le résultat avec le même nombre de chiffres significatifs que la valeur multipliée ou divisée qui en avait le moins.

[*] Si le nom d'une unité est celui d'une personne, son nom ne prend pas de majuscule initiale, mais son symbole commence par une majuscule. En outre, le symbole du kelvin est K (et non °K).

Par exemple, 12,0 kg × 9,81 m s^{-2} × 345 m, à la calculatrice, on obtient 40613,4 J, or chacune des valeurs utilisées pour le calcul a trois chiffres significatifs, donc le résultat qui doit être présenté est 40,6 kJ.

exercice 1-3 : chiffres significatifs dans une division

↳ *4,56 mol / 123,7 s = ?*

La première valeur comporte trois chiffres significatifs et la seconde quatre, il faut donc donner le résultat avec trois chiffres significatifs, soit avec l'arrondi adéquat : **3,69 10^{-2} mol s^{-1}**

1.1.3.2.2. additions et soustractions

Pour additionner et/ou soustraire des valeurs, il faut procéder comme suit :

- ✓ écrire toutes les valeurs avec la même puissance de 10 ;
- ✓ déterminer la valeur ayant le plus petit nombre de chiffres après la virgule : *n* ;
- ✓ arrondir toutes les autres valeurs à *n*+1 chiffres après la virgule ;
- ✓ effectuer l'opération ;
- ✓ arrondir le résultat à *n* chiffres après la virgule.

Par exemple, additionner 5,60224 + 1,38 + 1,6268 + 2,314 : toutes les valeurs avec la même puissance de 10 ; la valeur ayant le moins de chiffres après la virgule est 1,38 ; on arrondit 5,602 + 1,38 + 1,627 + 2,314 = 10,923 ; le résultat qui doit être présenté est 10,92.

exercice 1-4 : chiffres significatifs dans une addition

↳ *1,2 + 3,45 10^{2} + 6,7 10^{-1} + 78,9 =?*

On écrit toutes les valeurs avec la même puissance de 10 : 1,2 + 345 + 0,67 + 78,9. Les valeurs comportant le moins de chiffres significatifs est ont deux ; on arrondit donc les autres valeurs à trois chiffres significatifs (en fait elles le sont déjà) ; on additionne et on fournit le résultat avec deux chiffres significatifs : **4,3 10^{2}**

1.1.3.2.3. puissances

Dans le cas d'une puissance, il faut prendre le même nombre de chiffres significatifs pour le résultat que le nombre n de chiffres significatifs dans la grandeur ; sauf si cette puissance intervient dans une autre opération, le résultat de la puissance est alors donné à n+1 chiffres significatifs avant de poursuivre l'opération (et de donner le résultat final avec au plus n chiffres significatifs).

Les "nombres mathématiques" sont par essence infiniment précis. *Par exemple si on a dimensionné un réacteur et calculé son volume V = 1,234 L, le volume de trois réacteurs sera V' = 3,702 L.*
Notons enfin que lorsqu'on utilise π ou e ou une constante physique, il faut utiliser la valeur numérique avec suffisamment de chiffres significatifs par rapport aux autres valeurs de calcul.

exercice 1-5 : chiffres significatifs dans un calcul physico-chimique

↳ *Quelle est la masse de cinq moles de cuivre ?* (Sachant que la masse molaire du cuivre est de 63,54 g mol^{-1}.)

On peut ici considérer "cinq" comme un nombre mathématique, par conséquent on donnera le résultat avec le même nombre de chiffres significatifs que la masse molaire : **3,177 10^{2} g mol^{-1}**

↳ Si on a pesé 5,0 g de zinc (masse molaire 65,37 g mol^{-1}), *combien a-t-on de moles de zinc ?*

On peut supposer que si l'on indique "5,0 g" c'est que la balance est précise au dixième de gramme, on fournit donc le résultat avec deux chiffres significatifs : **7,6 10^{-2} mol**

> Dans le cas d'un calcul mélangeant toutes les opérations (additions, multiplications, …), le plus simple est d'effectuer le calcul avec les valeurs telles qu'elles sont disponibles, et d'arrondir le résultat final avec le même nombre de chiffres significatifs que la valeur utilisée qui en avait le moins.

En résumé, il faut surtout faire preuve de bon sens.
On a coutume de dire qu'un chiffre est significatif "si l'erreur absolue est inférieure à ½ fois l'unité du chiffre en question".

1.1.4. constantes universelles utiles

Les constantes utiles dans le système international sont données dans le Tableau 10.

Tableau 10 : Constantes utiles.

constante des gaz parfaits	R = 8,31441 J mol^{-1} K^{-1}
accélération de la pesanteur normale (45° latitude ; niveau mer)	g = 9,80665 m s^{-2}
constante d'AVOGADRO	N_A ($\mathcal{N}$) = 6,022045 10^{23} mol^{-1}
constante de FARADAY	F = 9,648456 10^{4} C mol^{-1}
constante de PLANCK	h = 6,626176 10^{-34} J s
constante de STEFAN-BOLTZMANN	σ = 5,67032 10^{-8} W m^{-2} K^{-4}
vitesse de la lumière dans le vide	c = 2,997 924 58 10^{8} m s^{-1}
charge de l'électron	e = 1,60199 10^{-19} C
volume molaire normal (0°C, 1 atm)	V = 22,4146 10^{-3} m^{3} mol^{-1}

exercice 1-6 : conversion de l'unité d'une constante universelle

La constante des gaz parfaits vaut R = 8,31441 J mol^{-1} K^{-1} lorsque la pression est exprimée en Pa, le volume en m^3, la quantité de matière en mol et la température en K.

↳ *Quelle valeur de R doit être utilisée si on exprime la pression en atm et le volume en L ?*

La loi des gaz parfaits s'écrit $P \cdot V = n \cdot R \cdot T$, avec P la pression [Pa], V le volume [m^3], n le nombre de moles [mol] et T la température [K].

Ainsi $R = \dfrac{P[\text{Pa}] \cdot V[\text{m}^3]}{n[\text{mol}] \cdot T[\text{K}]} = 8{,}31441 \ \text{Pa m}^3 \ \text{mol}^{-1} \ \text{K}^{-1} = \dfrac{8{,}31441 \ \text{Pa m}^3 \ \text{mol}^{-1} \ \text{K}^{-1}}{101325 \ \text{Pa atm}^{-1}} \times 10^3 \ \text{L m}^{-3}$

Avec six chiffres significatifs, R = **8,20568 10^{-2} atm L mol^{-1} K^{-1}**

1.2. AUTRES SYSTÈMES

Dans certains pays ou pour certaines applications, d'autres systèmes d'unités peuvent être privilégiés.

1.2.1. système CGS

Il fut créé en 1881 par Gauss, Weber et Maxwell. C'est un système pour physiciens et chimistes, peu utilisé dans l'industrie. Les unités essentielles sont données dans le Tableau 11.

Tableau 11 : Unités essentielles du système CGS.

	unité de	nom	symbole	valeur en S.I.
unités de base	longueur	centimètre	cm	10^{-2} m
	masse	gramme	g	10^{-3} kg
	temps	seconde	s	
	température	Kelvin	K	
unités secondaires	force	dyne	dyn	10^{-5} N
	travail	erg	erg	10^{-7} J
	viscosité dynamique	poise	P	0,1 Pa s
	viscosité cinématique	Stokes	St	10^{-4} m^2 s^{-1}

La pression s'exprime donc en dyne cm^{-2} (1 dyne cm^{-2} = 0,1 Pa), et la puissance en erg s^{-1} (1 erg s^{-1} = 10^{-7} W).

exercice 1-7 : conversion d'unité SI/CGS

↳ *Quel est le facteur de conversion d'unités entre SI et CGS pour la viscosité dynamique ?*

La viscosité s'exprime en Pa s en untiés SI, par conséquent l'équation aux dimensions est : $[\mu]$ = M L^{-1} T^{-1}. Donc, en unités CGS,

$$1 \text{ poise} = 1 \frac{\overset{\text{masse}}{\text{g}}}{\underset{\text{longueur}}{\text{cm}} \cdot \underset{\text{temps}}{\text{s}}} = 1 \frac{10^{-3} \text{ kg}}{10^{-2} \text{ m} \cdot \text{s}} = 10^{-1} \text{ Pa s}$$

1.2.2. système MTS

Ce système pour industriels date de 1919. Il est assez peu commode car l'unité de masse est très grande. Les unités essentielles sont données dans le Tableau 12.

Tableau 12 : Unités essentielles du système MTS.

	unité de	nom	symbole	valeur en S.I.
unités de base	longueur	mètre	m	
	masse	tonne	t	10^3 kg
	temps	seconde	s	
	température	Kelvin	K	
unités secondaires	force	sthène	sn	10^3 N
	pression	pieze	pz	10^3 Pa
	énergie ; travail	kilojoule *ou* thermie	kJ th	10^3 J 1 th = 10^3 cal = 4,1855 10^6 J
	puissance	kilowatt	kW	10^3 W

1.2.3. système MKpS

Il utilise le kilogramme force comme unité de force. Un kilogramme force correspond au poids d'un corps ayant une masse de un kilogramme masse, en un lieu où l'accélération de la pesanteur est normale (45° de latitude ; niveau de la mer). L'unité de masse n'a pas de nom.

1.2.4. système anglo-américain

Les unités essentielles du système anglo-américain sont données dans le Tableau 13.

Tableau 13 : Unités essentielles du système anglo-américain.

	unité de	nom	symbole	valeur en S.I.
unités de base	longueur	foot (feet au pluriel) yard inch mile	ft (ou ') yd in (ou '') mi	30,48 cm (= 3 feet) = 0,9144 m 2,540 cm = 5280 feet = 1609,344 m
	masse	pound	lbm	0,4536 kg
	quantité de matière	pound mole	lbmol	453,59237 mol
	température	Fahrenheit	°F	cf. Figure 1 (1°F = 5/9°C)
	force	poundal pound force	pdl lbf	(= 1 lbm ft s^{-2}) = 0,138 N 4,448 221 615 N
unités secondaires	chaleur	British thermal unit	Btu	1,055 10^3 J = quantité de chaleur nécessaire pour élever de 1°F la température de un pound d'eau à la température de 39,2°F (4°C)
	surface	acre	ac	0,404 687 3 hectare
	volume	gallon britannique gallon US baril	gal	1 Imperial gallon = 4,546 L 1 gallon US = 3,78 L 1 baril US = 158,98 L

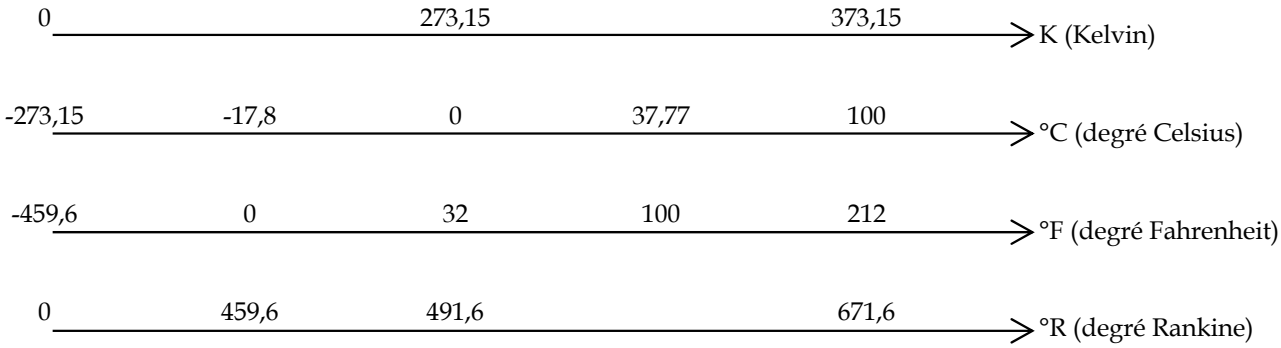


Figure 1 : Correspondance des échelles de température.

On peut également écrire les équivalences sous la forme d'équations :

$$T[°\mathrm{F}] = T[°\mathrm{C}]\cdot\frac{9}{5}+32 \quad ; \quad T[°\mathrm{C}] = (T[°\mathrm{F}]-32)\cdot\frac{5}{9} \quad ; \quad T[\mathrm{K}] = T[°\mathrm{C}]+273{,}15 \quad ; \quad T[\mathrm{K}] = T[°\mathrm{R}]\cdot\frac{5}{9}$$

Dans le cas d'une différence de température, on ne prend bien sûr en compte que le coefficient multiplicatif. Ainsi par exemple : $\Delta T[°\mathrm{F}] = \Delta T[°\mathrm{C}]\cdot\frac{9}{5}$.

exercice 1-8 : conversion de température

Combien font 13°F en °C ?

$T[°\mathrm{C}] = (T[°\mathrm{F}]-32)\cdot\frac{5}{9} = (13-32)\cdot\frac{5}{9} =$ **-11°C** (avec deux chiffres significatifs)

S'il s'agit d'une différence de température, $\Delta T[°\mathrm{F}] = \Delta T[°\mathrm{C}]\cdot\frac{9}{5} = 13\times\frac{9}{5} =$ **7,2°C**

1.3. CONVERSION D'UNITÉS

numéro du système d'unités

$$v_1 \cdot u_1 = v_2 \cdot u_2$$

v valeur numérique — u unité

La table donnée en annexe indique les facteurs de conversion de la plupart des unités que l'on est susceptible de rencontrer.

exercice 1-9 : conversion d'unité anglo-saxonne

Combien y a-t-il de ft dans un mètre ?

D'après le Tableau 13, 1 ft correspond à 30,48 cm, par conséquent il y a $\frac{1}{30{,}48\cdot 10^{-2}} =$ **3,281 ft** par mètre.

exercice 1-10 : conversion d'une unité anglo-saxonne composite

Convertir 400 in³ day⁻¹ en cm³ min⁻¹.

D'après le Tableau 13, 1 in correspond à 2,540 cm.

Donc $400\ \mathrm{in}^3\ \mathrm{day}^{-1} = \frac{400\times(2{,}540\ \mathrm{cm/in})^3}{(24\cdot 60\ \mathrm{min/day})}\ \mathrm{in}^3\ \mathrm{day}^{-1} =$ **4,55 cm³ min⁻¹**

exercice 1-11 : conversion d'une unité anglo-saxonne

On rappelle la définition d'une calorie : c'est la quantité de chaleur nécessaire pour élever la température d'1 g d'eau de 14,5 à 15,5°C (sous la pression atmosphérique normale).

Combien font (en J) 53 Btu ?

D'après le Tableau 13, 1 Btu correspond à 1,055 10^3 J ; soit pour 53 Btu, **56 kJ**

C'est aussi la quantité de chaleur nécessaire pour élever de 1°F la température de un pound d'eau à la température de 39,2°F (4°C). Sans autre information, on considèrera que la capacité calorifique de l'eau peut être considérée comme constante entre 4 et 15°C. D'après le Tableau 13, 1 lbm correspond à 453,6 g. Comme d'après le Tableau 12, 1 cal correspond à 4,1855 J, la quantité de chaleur nécessaire pour élever de 1°F la température de un pound d'eau est donc $\frac{5}{9}\cdot 453{,}6\cdot 4{,}1855 = 1054{,}7$ J ; soit pour 53 Btu, **56 kJ**

exercice 1-12 : conversion de l'unité d'une constante dans une corrélation anglo-saxonne

On a trouvé dans la littérature la corrélation suivante : $k = 4{,}386\cdot\left(\frac{\rho}{M}\right)\cdot\sqrt{\frac{D}{t_f}}$, concernant le transfert de matière lors de la formation d'une goutte de liquide A au sein d'un liquide B (immiscible avec A).

où k est le coefficient de transfert de A (en lbmol h^{-1} ft^{-2})

ρ est la masse volumique de B (en lbm ft^{-3})

M est la masse molaire de B (en lbm $lbmol^{-1}$)

D est le coefficient de diffusion de A dans B (en ft^2 h^{-1})

t_f est le temps de formation de la goutte de A (en h)

Quelle est l'unité du coefficient 4,386 ? Quelle serait la valeur de ce coefficient si toutes les grandeurs étaient en unités SI ?

k s'exprime en lbmol h^{-1} ft^{-2}. $\left(\frac{\rho}{M}\right)\cdot\sqrt{\frac{D}{t_f}}$ en $\frac{\text{lbm}/\text{ft}^3}{\text{lbm}/\text{lbmol}}\cdot\sqrt{\frac{\text{ft}^2/\text{h}}{\text{h}}} = \text{lbmol ft}^{-2}\ \text{h}^{-1}$.

Donc le coefficient est sans dimension.

On convertit chaque grandeur :

$$\underset{\text{mol s}^{-1}\text{ m}^{-2}}{k_{SI}} = \frac{453{,}59237\ \text{mol/lbmol}}{3600\ \text{s/h}\times(0{,}3048\ \text{m/ft})^2}\cdot\underset{\text{lbmol h}^{-1}\text{ ft}^{-2}}{k}$$

$$\underset{\text{kg m}^{-3}}{\rho_{SI}} = \frac{0{,}4536\ \text{kg/lbm}}{(0{,}3048\ \text{m/ft})^3}\cdot\underset{\text{lbm ft}^{-3}}{\rho}$$

$$\underset{\text{kg mol}^{-1}}{M_{SI}} = \frac{0{,}4536\ \text{kg/lbm}}{453{,}59237\ \text{mol/lbmol}}\cdot\underset{\text{lbm lbmol}^{-1}}{M}$$

$$\underset{\text{m}^2\text{ s}^{-1}}{D_{SI}} = \frac{(0{,}3048\ \text{m/ft})^2}{3600\ \text{s/h}}\cdot\underset{\text{ft}^2\text{ h}^{-1}}{D}$$

$$\underset{\text{s}}{t_{SI}} = [3600\ \text{s/h}]\cdot\underset{\text{h}}{t}$$

On remplace alors dans la corrélation :

$$\frac{3600\cdot(0{,}3048)^2}{453{,}59237}\cdot k_{SI} = 4{,}386\cdot\left(\frac{\frac{(0{,}3048)^3}{0{,}4536}\cdot\rho_{SI}}{\frac{453{,}59237}{0{,}4536}\cdot M_{SI}}\right)\cdot\sqrt{\frac{\frac{3600}{(0{,}3048)^2}\cdot D_{SI}}{\frac{1}{3600}\cdot t_{f,SI}}}$$

d'où $\boxed{k_{SI} = 4{,}386\cdot\left(\frac{\rho_{SI}}{M_{SI}}\right)\cdot\sqrt{\frac{D_{SI}}{t_{f,SI}}}}$ La valeur est identique, ce qui n'est guère étonnant puisque ce coefficient est sans dimension !

exercice 1-13 : conversion de l'unité d'une constante dans une corrélation anglo-saxonne

On a trouvé dans la littérature la corrélation suivante : $h = 0{,}026 \cdot \dfrac{v^{0,6}}{D^{0,4}}$, concernant le transfert de chaleur autour d'un tuyau dans l'air.

où h est le coefficient de transfert de chaleur par convection forcée (en Btu h^{-1} ft^{-2} °F^{-1})

v est la "vitesse massique" du courant gazeux (en lbm h^{-1} ft^{-2})

D est le diamètre extérieur du tuyau (en ft)

Quelle est l'unité du coefficient 0,026 ? Quelle serait la valeur de ce coefficient si toutes les grandeurs étaient en unités SI ?

L'équation aux dimensions de h est : $\dfrac{\mathrm{M\,L^2}}{\mathrm{T^2}} \cdot \dfrac{1}{\mathrm{T}} \cdot \dfrac{1}{\mathrm{L^2}} \cdot \dfrac{1}{\theta} = \dfrac{\mathrm{M}}{\mathrm{T^3} \cdot \theta}$.

Celle de $\dfrac{v^{0,6}}{D^{0,4}}$ est $\dfrac{\mathrm{M}^{0,6}}{\mathrm{T}^{0,6}\ \mathrm{L}^{2\times 0,6+0,4}} = \dfrac{\mathrm{M}^{0,6}}{\mathrm{T}^{0,6}\ \mathrm{L}^{1,6}}$.

Donc le coefficient a pour dimension $\dfrac{\mathrm{M}^{0,4}\ \mathrm{T}^{2,4}\ \mathrm{L}^{1,6}}{\theta}$, il vaut donc 0,026 $lbm^{0,4}$ $h^{2,4}$ $ft^{1,6}$ °F^{-1}.

On convertit chaque grandeur :

$$h_{SI} = \frac{1{,}055\ 10^3\ \mathrm{J/Btu}}{3600\ \mathrm{s/h} \times (0{,}3048\ \mathrm{m/ft})^2 \times 5/9\ \mathrm{K/°F}} \cdot h = 5{,}6780\ h$$

$\uparrow$ J s^{-1} m^{-2} K^{-1} $\qquad$ $\uparrow$ Btu h^{-1} ft^{-2} °F^{-1}

$$v_{SI} = \frac{0{,}4536\ \mathrm{kg/lbm}}{3600\ \mathrm{s/h} \times (0{,}3048\ \mathrm{m/ft})^2} \cdot v = 1{,}3563\ 10^{-3}\ v$$

$\uparrow$ kg s^{-1} m^{-2} $\qquad$ $\uparrow$ lbm h^{-1} ft^{-2}

$$D_{SI} = [0{,}3048\ \mathrm{m/ft}] \cdot D$$

$\uparrow$ m $\qquad$ $\uparrow$ ft

On remplace alors dans la corrélation : $\dfrac{h_{SI}}{5{,}6780} = 0{,}026 \dfrac{\left(\dfrac{v_{SI}}{1{,}3563\ 10^{-3}}\right)^{0,6}}{\left(\dfrac{D_{SI}}{0{,}3048}\right)^{0,4}}$

d'où $\boxed{h_{SI} = 4{,}824 \dfrac{{v_{SI}}^{0,6}}{{D_{SI}}^{0,4}}}$

Chapitre 2 : nombres adimensionnels

2.1. ANALYSE DIMENSIONNELLE

L'intérêt premier de l'analyse dimensionnelle est de ***vérifier l'homogénéité d'une expression physique***. Une équation est dite homogène lorsque ses deux membres ont la même dimension. Par conséquent toute expression non homogène est forcément fausse, et toute expression homogène est peut-être exacte. Les conséquences sont les suivantes :

- ✓ on ne peut additionner que des termes ayant la même dimension ;
- ✓ la dimension du produit de deux grandeurs est le produit des dimensions de ces deux grandeurs ;
- ✓ l'argument d'une fonction transcendante (sinus, cosinus, tangente, exponentielle, logarithme, cosinus hyperbolique, sinus hyperbolique, tangente hyperbolique) doit être sans dimension ; le résultat est lui aussi sans dimension.

2.2. NOMBRES ADIMENSIONNELS USUELS

Les nombres adimensionnels sont très usités dans diverses branches de la physique. Les plus couramment rencontrés en génie des procédés sont répertoriés dans le Tableau 14 (pages 16 à 20).

Tableau 14 : Nombres adimensionnels usuels en génie des procédés.

nombre adimensionnel	domaine	sens physique	expression
Archimède (Galilée) **Ar (Ga)**	flottaison, fluidisation, mouvement d'une particule dans un fluide	compare la force de gravité et la force visqueuse	$Ar = Ga = \frac{g \cdot \rho_f \cdot L^3}{\mu^2} \cdot (\rho_s - \rho_f)$ g : accélération de la pesanteur ρ_s : masse volumique du solide L : longueur caractéristique ρ_f : masse volumique du fluide μ : viscosité dynamique
Biot **Bi**	transfert thermique en régime instationnaire	compare la différence de température dans un solide à celle dans le milieu ambiant	$Bi = \frac{T - T_p}{T_\infty - T_p} = \frac{h \cdot L}{\lambda}$ T : température du solide T_p : température de la paroi du solide T_∞ : température du milieu loin du solide h : coefficient de transfert convectif L : longueur caractéristique (= volume / surface du solide) λ : conductivité thermique
Damköhler **Da**	absorption avec réaction chimique	compare le temps caractéristique de transfert au temps de passage du liquide dans le réacteur	$Da = \frac{\tau}{t_R}$ τ : temps de passage t : temps caractéristique de transfert
Euler **Eu**	frottement dans les conduites	compare l'énergie dissipée par frottement et l'énergie cinétique	$Eu = \frac{\Delta P_f}{\rho \cdot u^2}$ ΔP_f : perte de pression par frottement ρ : masse volumique u : vitesse

Fourier **Fo**	transfert thermique en régime instationnaire	compare la conduction et la puissance calorifique	$Fo = \frac{\lambda \cdot t}{Cp \cdot \rho \cdot L^2}$ λ : conductivité thermique t : temps caractéristique Cp : capacité calorifique ρ : masse volumique L : longueur caractéristique
Froude **Fr**	écoulements à surface libre, mouvements aux interfaces agitation	compare la force d'inertie et la force de gravité	$Fr = \frac{u^2}{g \cdot L}$ u : vitesse g : accélération de la pesanteur L : longueur caractéristique $Fr = \frac{N^2.d}{g}$ N : vitesse d'agitation d : diamètre de la cuve g : accélération de la pesanteur
Grashof **Gr**	convection naturelle	compare la force ascensionnelle et la force visqueuse	$Gr = \frac{L^3 \cdot g \cdot \beta \cdot \Delta T}{\nu^2}$ L : longueur caractéristique g : accélération de la pesanteur β : coefficient d'expansion ΔT : différence de température ν : viscosité cinématique
Hatta **Ha**	réaction et transfert gaz/liquide	compare la conversion maximale dans le film au transfert maximum dans le film	$Ha = \frac{\sqrt{k \cdot C_B{}^n \cdot D}}{k_L}$ k : constante de vitesse C_B : concentration en réactif liquide n : ordre de la réaction par rapport au réactif liquide D : coefficient de diffusion k_L : coefficient de transfert côté liquide

Nombre de puissance **N_P**	agitation	compare la puissance consommée par l'agitateur aux caractéristiques de l'agitation	$N_P = \frac{W}{\rho \cdot N^3 \cdot d_A{}^5}$ W : puissance d'agitation ρ : masse volumique N : vitesse d'agitation d_A : diamètre de l'agitateur
Nusselt **Nu**	transfert de chaleur (convection forcée)	caractérise la part convective du flux de chaleur	$Nu = \frac{h \cdot L}{\lambda}$ h : coefficient de transfert convectif L : longueur caractéristique λ : conductivité thermique
Peclet **Pe**	transfert de chaleur Distribution des Temps de Séjour	compare diffusion et convection caractérise la dispersion axiale d'un écoulement	$Pe = \frac{L \cdot u \cdot \rho \cdot Cp}{\lambda} = \frac{L \cdot u}{\alpha}$ L : longueur caractéristique u : vitesse ρ : masse volumique Cp : capacité calorifique λ : conductivité thermique α : diffusivité thermique $Pe = \frac{L \cdot u}{D}$ L : longueur caractéristique u : vitesse D : coefficient de diffusion
Prandtl **Pr**	convection	compare diffusion de quantité de mouvement et diffusion thermique	$Pr = \frac{Cp \cdot \mu}{\lambda}$ Cp : capacité calorifique μ : viscosité dynamique λ : conductivité thermique

Rayleigh **Ra**	transfert de chaleur (convection naturelle)	caractérise la convection naturelle	$Ra = \frac{L^3 \cdot g \cdot \beta \cdot Cp \cdot \mu \cdot \Delta T}{\lambda \cdot \nu^2} = Gr \cdot Pr$ L : longueur caractéristique g : accélération de la pesanteur β : coefficient d'expansion ΔT : différence de température ν : viscosité cinématique Cp : capacité calorifique μ : viscosité dynamique λ : conductivité thermique
Reynolds **Re**	mécanique des fluides, hydrodynamique, agitation, transferts de matière et de chaleur	compare la force d'inertie et la force visqueuse	$Re = \frac{\rho \cdot u \cdot L}{\mu}$ ρ : masse volumique u : vitesse L : longueur caractéristique μ : viscosité dynamique
Schmidt **Sc**	transfert de matière	compare diffusion de quantité de mouvement et diffusion de matière (équivalent au nombre de Prandtl en transfert thermique)	$Sc = \frac{\mu}{\rho \cdot D}$ μ : viscosité dynamique ρ : masse volumique D : coefficient de diffusion
Sherwood **Sh**	transfert de matière	caractérise la part convective du flux de matière (équivalent au nombre de Nusselt en transfert thermique)	$Sh = \frac{k_D \cdot L}{D}$ k_D : conductance de transfert de matière L : longueur caractéristique D : coefficient de diffusion
Stanton **St**	transfert thermique	compare le flux de chaleur transféré et la capacité calorifique du fluide	$St = \frac{h}{Cp \cdot \rho \cdot u}$ h : coefficient de transfert convectif Cp : capacité calorifique ρ : masse volumique u : vitesse

Thiele φ_S	réaction et transfert fluide/catalyseur	compare la vitesse maximale de réaction à la vitesse maximale de transfert	$\varphi_S{}^2 = \frac{r_S \cdot L^2}{D \cdot C}$ r_S : vitesse de réaction L : longueur caractéristique D : coefficient de diffusion C : concentration en réactif
Weber **We**	hydrodynamique, gouttes et bulles	compare la force d'inertie et la force de tension superficielle	$We = \frac{L \cdot u^2 \cdot \rho}{\sigma}$ L : longueur caractéristique u : vitesse ρ : masse volumique σ : tension de surface

On utilise abondamment ces nombres adimensionnels pour :

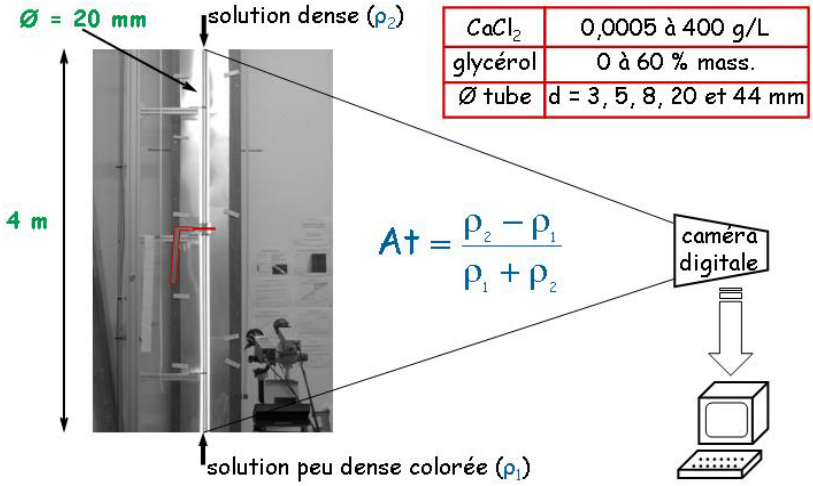
☞ définir des régimes

On donne des noms particuliers aux différents régimes d'écoulement mis en évidence sur la **Erreur ! Source du renvoi introuvable.** (de haut en bas) : régime laminaire ; régime intermédiaire (pour 2000 < Re < 3000, dans le cas de l'écoulement d'un liquide dans une conduite) ; régime turbulent.

Le nombre de Reynolds n'a pas toujours exactement la même définition selon le problème étudié, et surtout les bornes des différents régimes peuvent être très différentes.

☞ corréler des résultats expérimentaux

L'expérience décrite sur la Figure 2 a conduit aux résultats montrés sur la Figure 4. Ces résultats peuvent être représentés par une seule courbe maîtresse lorsqu'ils sont représentés à l'aide de nombres adimensionnels judicieusement choisis (Figure 5).



$CaCl_2$	0,0005 à 400 g/L
glycérol	0 à 60 % mass.
Ø tube	d = 3, 5, 8, 20 et 44 mm

Figure 2 : Dispositif pour l'étude du mélange gravitationnel instable de liquides dans un tube.

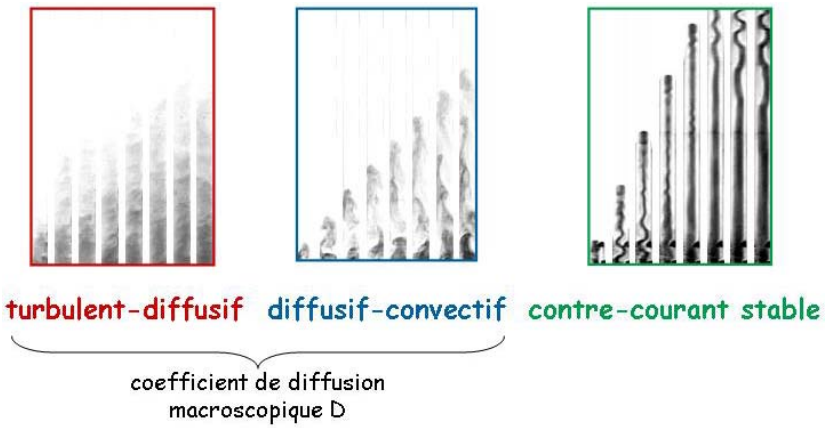


Figure 3 : Régimes de mélange gravitationnel instable.

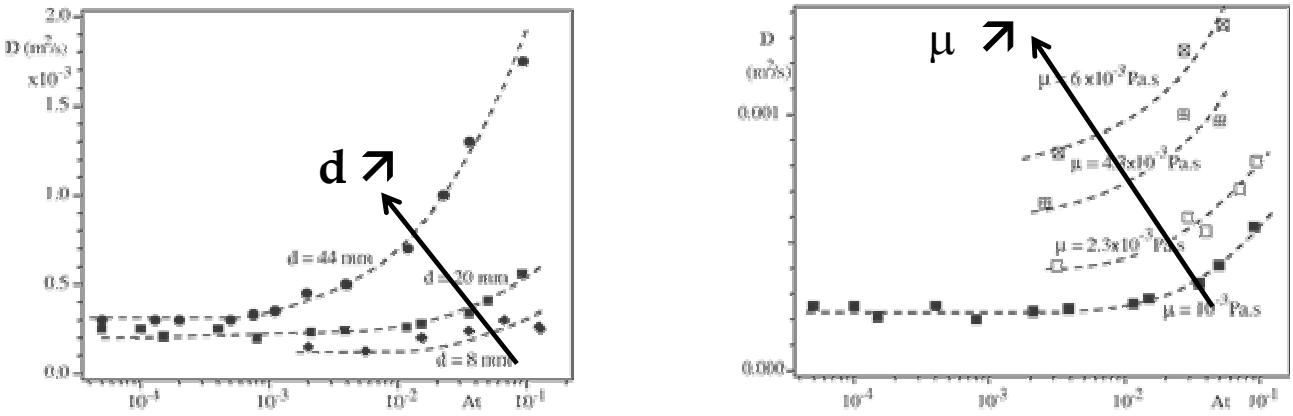


Figure 4 : Résultats de l'étude décrite sur la Figure 2.

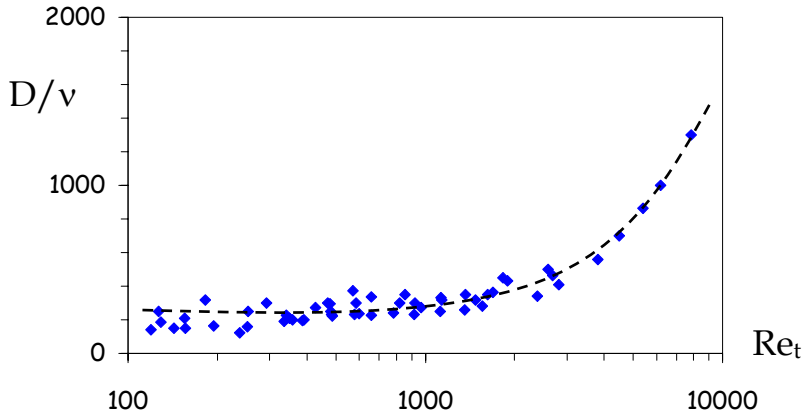


Figure 5 : Résultats de l'étude décrite sur la Figure 2 (page 21) sous forme adimensionnelle.

☞ effectuer des extrapolations

L'extrapolation consiste en un changement d'échelle : du screening (quelques mL) à l'échelle laboratoire (1 L) à l'échelle pilote (20 L) à l'échelle industrielle (40 m³). Généralement on maintiendra le rapport des dimensions du système (similitude géométrique) et conservera un (éventuellement plusieurs) nombre(s) adimensionnel(s).

Un dernier intérêt important des nombres adimensionnels est le fait de pouvoir s'affranchir du système d'unité lorsque l'on donne une corrélation (voir exercice en bas de la page 11).

2.3. THÉORÈME DE BUCKINGHAM

Le second intérêt de l'analyse dimensionnelle est de ***simplifier la représentation des problèmes physiques***. Un phénomène physique dépend en effet d'un certain nombre de paramètres. On classe ces paramètres en grandeurs fondamentales et grandeurs secondaires (Tableau 15).

Tableau 15 : Grandeurs fondamentales et secondaires en analyse dimensionnelle.

grandeur	symbole	dimension	nature
masse	m	M	fondamentale
longueur	L, D	L	
temps	t	T	
température	T	Θ	
vitesse	u	$L\,T^{-1}$	cinématique
accélération	γ	$L\,T^{-2}$	
débit volumique	Q	$L^3\,T^{-1}$	
viscosité cinématique	ν	$L^2\,T^{-1}$	
vitesse de rotation	N	T^{-1}	
masse volumique	ρ	$M\,L^{-3}$	
viscosité dynamique	μ	$M\,L^{-1}\,T^{-1}$	dynamique
tension superficielle	σ	$M\,T^{-2}$	
force	F	$M\,L\,T^{-2}$	
couple	G	$M\,L^2\,T^{-2}$	
pression	P	$M\,L^{-1}\,T^{-2}$	
puissance mécanique	$\dot{W}$	$M\,L^2\,T^{-3}$	
puissance thermique	$\dot{\phi}$	$M\,L^2\,T^{-3}$	thermique
quantité de chaleur	ϕ	$M\,L^2\,T^{-2}$	
conductivité thermique	λ	$M\,L\,T^{-3}\,\Theta^{-1}$	
diffusivité thermique	α	$L^2\,T^{-1}$	
capacité thermique	Cp	$L^2\,T^{-2}\,\Theta^{-1}$	

Si l'on a correctement recensé les paramètres dont dépend un phénomène physique, on doit pouvoir trouver une expression reliant ces paramètres et formalisant le phénomène physique. Le théorème de BUCKINGHAM indique que :

Étant donné p paramètres x_1, x_2, …, x_p reliés par un phénomène physique selon une expression $f(x_1, x_2, \ldots, x_p) = 0$, on peut mettre cette expression sous une forme plus simple $F(\Pi_1, \Pi_2, \ldots, \Pi_{p-q}) = 0$, où les Π_i sont des groupements adimensionnels indépendants, construits à partir des paramètres x_i ; q étant le nombre de dimensions fondamentales du problème.

exercice 2-1 : analyse dimensionnelle d'une explosion nucléaire

On se propose d'étudier l'évolution de la taille de la boule de feu qui grossit lors d'une explosion nucléaire. Cette taille (rayon R de la boule de feu) dépend de l'énergie E de l'explosion initiale, de la masse volumique ρ du gaz, et du temps t.

Quel est(sont) le(s) nombre(s) adimensionnel(s) caractéristiques de ce phénomène ?

Répertorions les grandeurs et les dimensions :

grandeur	équation aux dimensions	exposant
t	T	a
R	L	b
E	$M\,L^2\,T^{-2}$	c
ρ	$M\,L^{-3}$	d

Il y a quatre grandeurs et trois dimensions, donc il faut un nombre adimensionnel pour les corréler.

On écrit ensuite l'équation censée corréler ces grandeurs : $t^a \cdot R^b \cdot E^c \cdot \rho^d = cste$

Il vient donc le système d'équations :

$$\begin{cases} \text{dimension M :} & c + d = 0 & \text{(I)} \\ \text{dimension L :} & b + 2c - 3d = 0 & \text{(II)} \\ \text{dimension T :} & a - 2c = 0 & \text{(III)} \end{cases}$$

(III) donne $c = \frac{a}{2}$; (I) donne $d = -c = -\frac{a}{2}$; donc (II) fournit $b = 3d - 2c = -\frac{3a}{2} - \frac{2a}{2} = -\frac{5a}{2}$

Par conséquent $t^a \cdot R^{-\frac{5a}{2}} \cdot E^{\frac{a}{2}} \cdot \rho^{-\frac{a}{2}} = cste$, donc $\left(\frac{t \cdot E^{1/2}}{R^{5/2} \cdot \rho^{1/2}}\right)^a = cste$

On vérifie l'équation aux dimensions $\frac{T\,M^{1/2}\,L\,L^{3/2}}{T\,L^{5/2}\,M^{1/2}} = 1$

Le physicien russe Sedov, a déterminé que $R = k \cdot t^{2/5} \cdot \left(\frac{E}{\rho}\right)^{1/5}$ (k étant une constante).

De l'équation $\left(\frac{t \cdot E^{1/2}}{R^{5/2} \cdot \rho^{1/2}}\right)^a = cste$, on tire $R^{5/2} = \frac{1}{cste^{1/a}} t \cdot \left(\frac{E}{\rho}\right)^{1/2}$, soit $\underline{\underline{R = cste' \cdot t^{2/5} \cdot \left(\frac{E}{\rho}\right)^{1/5}}}$

exercice 2-2 : analyse dimensionnelle du transfert thermique par convection forcée

Le théorème de Buckingham permet aussi de retrouver la forme des corrélations permettant de calculer les coefficients de transfert de chaleur par convection forcée en régime turbulent : $Nu = k \cdot Re^n \cdot Pr^{1/3}$.

Montrez-le.

Remplaçons les nombre adimensionnels pas leurs expressions dans cette corrélation :

$$\frac{h \cdot D}{\lambda} = k \cdot \left(\frac{\rho \cdot u \cdot D}{\mu}\right)^n \cdot \left(\frac{C_p \cdot \mu}{\lambda}\right)^{1/3}$$

Répertorions les grandeurs et les dimensions :

grandeur	unité	équation aux dimensions	exposant
h	$W\,m^{-2}\,K^{-1}$	$M\,T^{-3}\,\theta^{-1}$	a
λ	$W\,m^{-1}\,K^{-1}$	$M\,L\,T^{-3}\,\theta^{-1}$	b
D	m	L	c
ρ	$kg\,m^{-3}$	$M\,L^{-3}$	d
u	$m\,s^{-1}$	$L\,T^{-1}$	e
μ	Pa s	$M\,L^{-1}\,T^{-1}$	f
Cp	$J\,kg^{-1}\,K^{-1}$	$L^2\,T^{-2}\,\theta^{-1}$	g

Il y a sept grandeurs et quatre dimensions, donc il faut trois nombres adimensionnels pour les corréler.

On écrit ensuite l'équation censée corréler ces grandeurs :

$h^a \cdot \lambda^b \cdot D^c \cdot \rho^d \cdot u^e \cdot \mu^f \cdot Cp^g = cste$

Il vient donc le système d'équations :

$$\begin{cases} \text{dimension M :} & a+b+d+f=0 & \text{(I)} \\ \text{dimension L :} & b+c-3d+e-f+2g=0 & \text{(II)} \\ \text{dimension T :} & -3a-3b-e-f-2g=0 & \text{(III)} \\ \text{dimension } \theta \text{ :} & -a-b-g=0 & \text{(IV)} \end{cases}$$

(IV) donne $g=-a-b$

(II)+(III) donne $-3a-2b+c-3d-2f=0$, soit $f=-\frac{3}{2}a-b+\frac{c}{2}-\frac{3}{2}d$

(I) donne $d=-a-b-f=-a-b-\left(-\frac{3}{2}a-b+\frac{c}{2}-\frac{3}{2}d\right)$, c'est-à-dire $\frac{a}{2}-\frac{c}{2}+\frac{d}{2}=0$, d'où $d=-a+c$

alors $f=-\frac{3}{2}a-b+\frac{c}{2}-\frac{3}{2}d=-b-c$

(III) donne $e=-3a-3b-f-2g=-3a-3b-(-b-c)-2(-a-b)=-a+c$

On peut donc écrire la corrélation :

$h^a \cdot \lambda^b \cdot D^c \cdot \rho^{-a+c} \cdot u^{-a+c} \cdot \mu^{-b-c} \cdot Cp^{-a-b} = cste$

soit $$\left(\frac{h}{\rho \cdot u \cdot Cp}\right)^a \cdot \left(\frac{\lambda}{\mu \cdot Cp}\right)^b \cdot \left(\frac{D \cdot \rho \cdot u}{\mu}\right)^c = cste$$

c'est-à-dire $\left(\frac{Nu}{Re \cdot Pr}\right)^a \cdot \left(\frac{1}{Pr}\right)^b \cdot (Re)^c = cste$

donc $Nu^a \cdot Re^{-a+c} \cdot Pr^{-a-b} = cste$

d'où $Nu = cste \cdot Re^{\frac{a-c}{a}} \cdot Pr^{\frac{a+b}{a}}$

On retrouve bien une expression similaire à celle de l'énoncé : $Nu = k \cdot Re^n \cdot Pr^{1/3}$.

annexe

La table suivante est issue du polycopié "Le système S.I." du professeur Noël MIDOUX.

Pour convertir des		en	multiplier par
A	acre	m^2	$4,046856.10^3$
	ampère (international de 1948)	A	$999,835.10^{-3}$
	ampère/cm^2	A/m^2	$10,0.10^3$
	ampère/sq.inch	A/m^2	$1,550.10^3$
	ampère.heure	C	$3,60.10^3$
	angström	m	$100,0.10^{-12}$
	année (calendrier)	s	$31,536.10^6$
	année lumière	m	$9,461.10^{15}$
	are	m^2	100,0
	atmosphère	Pa	$101,325.10^3$
	atm.cm^3/s	Pa.m^3/s	$101,325.10^{-3}$
B	bar	Pa	$100,0.10^3$
	barn	m^2	$100,0.10^{-30}$
	barye (dyne/cm^2)	Pa	$100,0.10^{-3}$
	barrel (U.S. dry)	m^3	$115,63.10^{-3}$
	barrel (U.S. liq.)	m^3	$119,24.10^{-3}$
	barrel (oil, 42 gallons)	m^3	$158,98729.10^{-3}$
	bougie	cd	1,0556
	Btu (British thermal unit)	J	$1,0550559.10^3$
	Btu/cu.ft	J/m^3	$37,258947.10^3$
	Btu/h	W	$293,07107.10^{-3}$
	Btu/min	W	17,584265
	Btu/pound	J/kg	$2,326.10^3$
	Btu/pound.°F	J/kg.K	$4,1868.10^3$
	Btu/sq.ft.h	W/m^2	3,1545907
	btu/sq.ft.mn	W/m^2	189,27544
	btu/sq.ft.h.°F	W/m^2.K	5,6782633
	btu.in/sq.ft.h.°F	W.m/m^2.K	$144,22789.10^{-3}$
	btu.ft/sq.ft.h.°F	W.m/m^2.K	1,7307346
	bushel (U.S. dry)	m^3	$35,23907.10^{-3}$
	bushel (U.K.)	m^3	$36,369.10^{-3}$
C	cable	m	219,456
	calorie (Int. Table)	J	4,1868
	calorie (thermochimique)	J	4,184
	calorie (valeur d'usage)	J	4,1855
	cal/cm^2.s	W/m^2	$41,855.10^3$
	cal/g	J/kg	$4,1855.10^3$
	cal.cm/cm^2.s.°C	W.m/m^2.K	418,55
	candela/sq.inch	cd/m^2	$1,5500031.10^3$

Pour convertir des	en	multiplier par
carat	kg	$200,0.10^{-6}$
centiare	m^2	1
Celsius (degré)	K	t + 273,15
centigrade (degré)	K	t + 273,15
centilitre	m^3	$10,0.10^{-6}$
centimètre	m	$10,0.10^{-3}$
centimètre (u.e.s)	F	$1,1111.10^{-12}$
centimètre carré	m^2	$100,0.10^{-6}$
centimètre cube	m^3	$1,0.10^{-6}$
centimètre.dyne	N.m (J)	$100,0.10^{-9}$
centimètre.gramme	N.m (J)	$98,0665.10^{-6}$
centimètre de mercure (0 °C)	Pa	$1,33322.10^{3}$
centimètre d'eau (4 °C)		98,0638
centimètre/s	m/s	$10,0.10^{-3}$
centimètre/s^2	m/s^2	$10,0.10^{-3}$
chain (engineer or ramden)		30,48
chain (surveyor or gunter)	m	20,1168
cheval (métrique)	W	735,5
cheval.heure	J	$2,6478.10^{6}$
chu (centig.heat unit)	J	$1,8991006.10^{3}$
circular mil	m^2	$506,7074.10^{-12}$
cord	m^3	3,624556
coulomb/cm^2	C/m^2	$100,0.10^{-6}$
coulomb/sq.in	C/m^2	$1,5500031.10^{-3}$
cps (cycle per sec)	Hz	1,0
cubic foot	m^3	$28,316847.10^{-3}$
cubic foot/min	m^3/s	$471,94744.10^{-6}$
cubic foot/sec	m^3/s	$28,316847.10^{-3}$
cubic inch	m^3	$16,387064.10^{-6}$
cubic yard	m^3	$764,55486.10^{-3}$
cubic yard/min	m^3/s	$12,742581.10^{-3}$
D dalton	kg	$1,679.10^{-27}$
degré (angle)	rad	$17,453292.10^{-3}$
degré/s	rad/s	$17,453292.10^{-3}$
degré Celsius (ou centigrade)	K	+ 273,15
degré Fahrenheit	K	5/9 (°F-32) + 273,15
degré Rankine	K	$555,55556.10^{-3}$
degré Fahrenheit/inch	K/m	21,872265

Pour convertir des		en	multiplier par
	dram (apothecaries, troy)	kg	$3,8879.10^{-3}$
	dram (U.S. fluid)	m^3	$3,6967.10^{-6}$
	dram (U.K. fluid)	m^3	$3,5516.10^{-6}$
	dyne	N	$10,0.10^{-6}$
	dyne.cm	N.m (J)	$100,0.10^{-9}$
	dyne/cm	N/m	$1,0.10^{-3}$
	$dyne/cm^2$	Pa	$100,0.10^{-3}$
	$dyne.s/cm^2$	Pa.s	$100,0.10^{-3}$
E	électron-volt	J	$160,21890.10^{-21}$
	erg	J	$100,0.10^{-9}$
	erg/s	W	$100,0.10^{-9}$
F	Fahrenheit (degrés)	K	5/9(°F-32)+273,15
	farad (international de 1948)	F	$999,505.10^{-3}$
	faraday	C	$96,520.10^{3}$
	faraday/s	A	$96,520.10^{3}$
	fathom	m	1,828766
	fermi (femtomètre)	m	$1,0.10^{-15}$
	foot	m	$304,80.10^{-3}$
	foot candle	lux($cd.sr/m^2$)	10,76391
	foot lambert	cd/m^2	3,426259
	foot of water (39,2 °F)	Pa	$2,98898.10^{3}$
	foot/min	m/s	$5,080.10^{-3}$
	foot/s	m/s	$304,80.10^{-3}$
	$foot/s^2$	m/s^2	$304,80.10^{-3}$
	foot.pound force	J	1,3558179
	foot.pound/min	W	$22,596965.10^{-3}$
	foot.pound/s	W	1,3558179
	frigorie	J	$4,1855.10^{3}$
	furlong	m	201,1680
G	g (accélération pesanteur ISO)	m/s^2	9,80665
	gal (galilée)	m/s^2	$10,0.10^{-3}$
	gallon U.K. (imperial)	m^3	$4,546087.10^{-3}$
	gallon U.S. (dry)		$4,404883.10^{-3}$
	gallon U.S. (liquid)	m^3	$3,7854118.10^{-3}$
	gallon (US)/min	m^3/s	$63,090196.10^{-6}$
	gamma	kg	$1,0.10^{-9}$
	gauss	T	$100,0.10^{-6}$
	gilbert	A.t	$795,7747.10^{-3}$

Pour convertir des		en	multiplier par
	gilbert/cm	A.t/m	79,57747
	gill (U.K.)	m^3	$142,0652.10^{-6}$
	gill (U.S.)	m^3	$118,2941.10^{-6}$
	grade	rad	$15,707963.10^{-3}$
	grain (avdp)	kg	$64,79891.10^{-3}$
	gramme	kg	$1,0.10^{-3}$
	gramme force	N	$9,80665.10^{-3}$
	gramme/cm	kg/m	$100,0.10^{-3}$
	gramme f/cm^2	Pa	98,0665
	gramme/cm^3	kg/m^3	$1,0.10^3$
	gramme/litre	kg/m^3	1,0
	gramme f.cm	J	$98,0665.10^{-6}$
H	hand	m	$101,60.10^{-3}$
	hectare	m^2	$10,0.10^3$
	hectobar	Pa	$10,0.10^6$
	hectopièze	Pa	$100,0.10^3$
	henry (international 1948)	H	1,000495
	heure	s	$3,60.10^3$
	hogshead (U.S.)	m^3	$238,48094.10^{-3}$
	horsepower (550 ft.lbf/s)	W	745,69987
	horsepower.h	J	$2,6845195.10^6$
	hundredweight (long)	kg	50,8023
	hundredweight (short)	kg	45,3592
I	inch	m	$25,4.10^{-3}$
	inch of Hg (32 °F)	Pa	$3,386489.10^3$
	inch of Hg (60 °F)	Pa	$3,37685.10^3$
	inch of water (39,2 °F)	Pa	249,082
	inch of water (60 °F)	Pa	248,84
	ips (inch/s)	m/s	$25,40.10^{-3}$
J	joule (international 1948)	J	1,000165
	jour (solaire moyen)	s	$86,40.10^3$
	jour (sidéral)		$86,16409.10^3$
K	kilocalorie (int. steam table)	J	$4,18674.10^3$
	kilocalorie (standard)	J	$4,1855.10^3$
	kilocalorie (thermochimique)	J	$4,184.10^3$
	kcal/h	W	1,1626388
	kcal/kg	J/kg	$4,1855.10^3$
	kcal/kg.°C	J/kg.K	$4,1855.10^3$

Pour convertir des	en	multiplier par
kcal/m^3	J/m^3	$4,1855.10^3$
kcal/m^2.h	W/m^2	1,1626388
kcal/m^2.h.°C	W/m^2.K	1,1626388
kcal.m/m^2.h.°C	W.m/m^2.K	1,1626388
kilogramme force	N	9,80665
kilogramme f/cm^2	Pa	$98,0665.10^3$
kilogramme/dm^3	kg/m^3	$1,0.10^3$
kilogramme f/m^2	Pa	9,80665
kilogramme f/mm^2	Pa	$9,80665.10^6$
kilogrammètre	J	9,80665
kilogrammètre/s	W	9,80665
kiloline	Wb	$10,0.10^{-6}$
kilomètre	m	$1,0.10^3$
kilomètre carré	m^2	$1,0.10^6$
kilomètre/h	m/s	$277,77778.10^{-3}$
kilomètre/h.s	m/s^2	$277,77778.10^{-3}$
kilowatt	W	$1,0.10^3$
kilowatt heure	J	$3,6.10^6$
kip	N	$4,448221.10^3$
knot	m/s	$514,44444.10^{-3}$
L lb (voir pound)		
line	Wb	1,0
litre	m^3	$1,0.10^{-3}$
litre/s	m^3/s	$1,0.10^{-3}$
litre.atmosphère	J	101,325
lumen/sq.foot	lx	10,764
lusec (micron Hg.l/s)	Pa.m^3/s	$133,32.10^{-6}$
M maxwell	Wb	$10,0.10^{-9}$
mégajoule	J	$1,0.10^6$
mégawatt	W	$1,0.10^6$
m^3/h	m^3/s	$277,77778.10^{-6}$
m^3/min	m^3/s	$16,666667.10^{-3}$
mètre d'eau	Pa	$9,80665.10^3$
mètre/min	m/s	$16,666667.10^{-3}$
MeV	J	$160,20.10^{-9}$
micron	m	$1,0.10^{-6}$
micron de Hg (0 °C)	Pa	$133,32237.10^{-3}$
micron.cuft/min	Pa.m^3/s	$62,920.10^{-6}$

Pour convertir des		en	multiplier par
	mil	m	$25,40.10^{-6}$
	mile (U.S. statute)	m	$1,609344.10^{3}$
	mile (U.S. ancien)	m	$1,6254.10^{3}$
	mile (U.K. nautical)	m	$1,853184.10^{3}$
	mile marin (internat.)	m	$1,8520.10^{3}$
	mph (mile/h)	m/s	$447,04.10^{-3}$
	mile marin/h (noeud)	m/s	$514,44444.10^{-3}$
	millibar	Pa	100,0
	millième (artillerie)	rd	$1,0.10^{-3}$
	milligramme	kg	$1,0.10^{-6}$
	millilitre	m^3	$1,0.10^{-6}$
	millimètre	m	$1,0.10^{-3}$
	millimètre cube	m^3	$1,0.10^{-9}$
	millimètre d'eau	Pa	9,80665
	millimètre de Hg (0 °C)	Pa	133,3224
	millimicron	m	$1,0.10^{-9}$
	minim (U.K. fluid)	m^3	$59,194.10^{-9}$
	minim (U.S. fluid)	m^3	$61,612.10^{-9}$
	minute (angle)	rd	$290,88820.10^{-6}$
N	nanomètre	m	$1,0.10^{-9}$
	nit	cd/m^2	1,0
	noeud	m/s	$514,44444.10^{-3}$
O	oersted	A.t/m	79,577
	ohm (international 1948)	Ω	1,000495
	ounce mass (av.d.p)	kg	$28,349523.10^{-3}$
	ounce (U.K. fluid)	m^3	$28,413.10^{-3}$
	ounce (U.S. fluid)	m^3	$29,57353.10^{-3}$
	ounce troy	kg	$31,1035.10^{-3}$
	ounce/sq.in	Pa	430,92
P	pace	m	762.10^{-3}
	parsec	m	$30,84.10^{15}$
	peck (U.K.)	m^3	$9,0922.10^{-3}$
	peck (U.S.)	m^3	$8,809767.10^{-3}$
	pennyweight troy	kg	$1,555173.10^{-3}$
	perch	m	5,0292
	periode/s	Hz	1,0
	phot	lux	$10,0.10^{3}$
	pica (imprimerie)	m	$4,217517.10^{-3}$

Pour convertir des	en	multiplier par
pied (foot)	m	$304,80.10^{-3}$
pint (U.K.)	m^3	$568,26.10^{-6}$
pint (U..S dry)		$550,6104.10^{-6}$
pint (U.S. liquid)	m^3	$473,17647.10^{-6}$
poise	Pa.s	$100,0.10^{-3}$
poiseuille	Pa.s	1,0
pole	m	5,0292
poncelet	W	980,665
pouce (inch)	m	$25,4.10^{-3}$
pound mass (lbm, avdp)	kg	$453,59237.10^{-3}$
pound force (lbf)	N	4,4482216
pound force.s/sq.ft	Pa.s	47,880258
pound troy	kg	$373,2417.10^{-3}$
poundal	N	$138,2549.10^{-3}$
pound force foot	m.N	1,3558179
pound mass/cu.ft	kg/m^3	16,018463
pound mass/cu.in	kg/m^3	$27,679904.10^3$
pound mass/ft	kg/m	1,4881639
pound mass/ft.s	Pa.s	1,4881639
pound mass/in	kg/m	17,857967
pound force/sq.ft	Pa	47,880258
poundal	N	$138,25495.10^{-3}$
poundal.foot	J	$42,140108.10^{-3}$
pound/sq.in (psi)	Pa	$6,8947573.10^3$
Q quadrant	rd	1,5707963
quart (dry U.S.)	m^3	$1,101220.10^{-3}$
quart (liq. U.K.)	m^3	$1,1365.10^{-3}$
quart (liq. U.S.)	m^3	$946,35295.10^{-6}$
quintal	kg	100,0
R rad	m	5,0292
S scruple	kg	$1,295978.10^{-3}$
seconde sidérale	s	$997,2695.10^{-3}$
seconde (angle)	rd	$4,8481363.10^{-6}$
shake	s	$10,0.10^{-9}$
short ton	kg	907,18474
skein	m	109,728
slug	kg	14,593903
span	m	$228,6.10^{-3}$

Pour convertir des	en	multiplier par
spat (sphère)	sr	12,566370
square foot	m^2	$92,903040.10^{-3}$
square inch	m^2	$645,160.10^{-6}$
square mil	m^2	$645,160.10^{-12}$
square mile	m^2	$2,5899881.10^{6}$
square yard	m^2	$836,12736.10^{-3}$
statampère	A	$333,5640.10^{-12}$
statfarad	F	$1,112650.10^{-12}$
stathenry	H	$898,7554.10^{9}$
statmho	S	$1,112650.10^{-12}$
statohm	Ω	$898,7554.10^{9}$
statvolt	V	299,7925
stère	m^3	1,0
sthène	N	$1,0.10^{3}$
stilb	cd/m^2	$10,0.10^{3}$
stokes	m^2/s	$100,0.10^{-6}$
T tablespoon	m^3	$14,78676.10^{-6}$
teaspoon	m^3	$4,928921.10^{-6}$
thermie	J	$4,1855.10^{6}$
ton (long)	kg	$1,0160469.10^{3}$
ton (short)	kg	907,18474
ton of ice/24 h	W	$3,517.10^{3}$
ton (équivalent nucléaire du TNT)	J	$4,20.10^{9}$
tonne	kg	$1,0.10^{3}$
tonneau (marit.)	m^3	2,8317
torr (1 mmHg, °C)	Pa	133,32237
torr litre/s	$Pa.m^3/s$	$133,32237.10^{-3}$
tour	rd	6,2831853
tour/min	rd/s	$104,71975.10^{-3}$
$tour/min^2$	rd/s^2	$1,7453292.10^{-3}$
tour/s	rd/s	6,2831853
$tour/s^2$	rd/s^2	6,2831853
V volt (international 1948)	V	1,000330
volt/cm	V/m	100,0
volt/in	V/m	39,370

Pour convertir des		en	multiplier par
W	watt (international 1948)	W	1,000165
	watt/cm^2	W/m^2	$10,0.10^3$
	watt/m^2.°C	$W/m^2.K$	1,0
	watt.heure	J	$3,60.10^3$
	weber/sq.in	T	$1,550.10^3$
Y	yard	m	$914,40.10^{-3}$

🕮 références bibliographiques

☞ unités, dimensions, nombres adimensionnels

CRC Handbook of Chemistry and Physics, 78th edition, Ed. CRC Press, New York, 1997-1998

Techniques de l'Ingénieur, articles 23 et 24, Ed. Techniques de l'Ingénieur, Paris, 1994

"COULSON & RICHARDSON's Chemical Engineering", volume 1 - chapitre 1, 6th edition, Ed. Butterworth-Heinemann, Oxford, 2000

PERRY's "Chemical Engineers' Handbook", 7th edition, Ed. McGraw-Hill, New-York, 1998

Jacques LIBOIS, "Guide des unités de mesure", 2e édition, Ed. DeBoeck Université, Paris, 1999

Noël MIDOUX, "Le système S.I.", polycopié de l'École Nationale Supérieure des Industries Chimiques, Nancy, 1994

Russ ROWLETT, "A Dictionary of Units of Measurement"
http://www.unc.edu/~rowlett/units/index.html <consulté le 14 octobre 2003, toujours actif le 29 février 2008>

Eddie SAUDRAIS, "Introduction à l'analyse dimensionnelle"
http://perso.wanadoo.fr/eddie.saudrais/prepa/anadimphy.html <consulté le 14 octobre 2003, toujours actif le 29 février 2008>

http://www.processassociates.com/process/dimen/dn_all.htm <consulté le 14 octobre 2003, site inactif le 29 février 2008>

Vincent DUGAT, "Unités et analyse dimensionnelle en physique"
http://vincent.dugat.free.fr/Bureautique03-04/TP/texte-tp8.pdf <consulté le 14 octobre 2003, document indisponible le 29 février 2008, même sur le nouveau site http://bureautiquetlse.free.fr>

Stéphanie POULIN, "Les chiffres significatifs"
http://www.geocities.com/poulinsteph/PHYS/chiffressignif.htm <consulté le 18 octobre 2002, document indisponible le 29 février 2008>

Wikipedia "Conversion des unités"
http://fr.wikipedia.org/wiki/Conversion_des_unit%C3%A9s <consulté le 29 février 2008>

☞ illustrations

Milton VAN DYKE "An Album of Fluid Motion" Ed. The Parabolic Press, Stanford, 1982

M. DEBACQ, J-P. HULIN, D. SALIN, B. PERRIN, E. J. HINCH, "Buoyant mixing of miscible fluids of varying viscosities in vertical tubes", Physics of Fluids, vol. 15 - n° 12, pp. 3846-3855, 2003

🕯 ce qu'il faut retenir…

savoirs

- règles d'écriture des nombres et unités
- facteurs de conversion des unités usuelles en génie des procédés

savoir-faire

- retrouver l'équation aux dimensions d'une grandeur en s'appuyant sur les lois physiques de base
- exprimer un résultat avec un nombre de chiffres significatifs adapté
- convertir la valeur de n'importe quelle grandeur d'une unité à l'autre
- vérifier l'homogénéité dimensionnelle d'une relation
- appliquer le théorème de BUCKINGHAM