

Annexes de l'ouvrage

Transport et stockage des fluides dans l'industrie

A – Notions de rhéologie (fluides non newtoniens)

B – Notions de similitude et analyse dimensionnelle

C – Notions de thermodynamique des écoulements (écoulements gazeux à masse volumique variable)

D – Unités de mesure – Facteurs de conversion – Constantes fondamentales

E – Tableaux récapitulatifs : Propriétés physiques de l'eau sur la courbe de saturation. Propriétés physiques de l'air sec à 760 mm Hg ($1,01 \times 10^5$ Pa). Tension de la vapeur d'eau à la saturation (domaine du vide). Tension de la vapeur d'eau à la saturation (domaine de pressions de 1 à 70 bar). Température de la vapeur d'eau à la saturation (domaine du vide). Température de la vapeur d'eau à la saturation (domaine de températures de 100 à 300 °C).

A

Notions de rhéologie (fluides non newtoniens)

A.1 Définitions

L'étude de la viscosité permet de distinguer différents types de fluides. Toutes les substances fluides à caractère moléculaire simple (gaz, vapeur, liquides chimiquement simples) sont des *fluides newtoniens*.

Les fluides à structure moléculaire complexe, c'est-à-dire les fluides dont la viscosité ne suit pas la *loi de Newton* exprimée par la relation :

$$\tau = F/A = -\mu(dw/dy) \quad (\text{A.1})$$

constituent la classe des *fluides non newtoniens* dont l'étude du comportement fait l'objet de la *rhéologie*.

Dans le cas d'un fluide non newtonien, le *coefficient de viscosité apparente* μ n'est pas uniquement fonction de l'état thermodynamique local mais peut aussi dépendre du gradient de vitesse ou taux de glissement (dw/dy) et, éventuellement, de la contrainte τ au point considéré et du temps. L'étude des fluides non newtoniens est d'une importance considérable pour les industries chimique, alimentaire, papetière, textile, etc.

La corrélation entre le gradient de vitesse et la contrainte tangentielle τ définit la capacité d'écoulement d'un fluide. Celle-ci est exprimée sur un diagramme (figure A.1a), dit *courbe d'écoulement*, dans lequel la contrainte tangentielle est portée en ordonnée et le gradient de vitesse en abscisse.

Un autre diagramme (figure A.1b), également très utilisé, est la *courbe de viscosité*, où la viscosité dynamique (en ordonnée) est représentée en fonction du gradient de vitesse (dw/dy en abscisse).

Figure A.1 – Courbes (a) d'écoulement et (b) de viscosité d'un fluide newtonien.

A.2 Fluides non newtoniens dont la viscosité est indépendante du temps

Suivant la façon dont varie le rapport $\tau/(dw/dy)$, on distingue plusieurs types de fluides, dont le comportement est décrit par des relations approchées, contrairement aux fluides newtoniens pour lesquels l'équation A.1 est exacte.

Fluides pseudo-plastiques ou rhéofluidisants (ou rhéofluidifiants)

La viscosité des fluides pseudo-plastiques diminue quand la contrainte de cisaillement croît. Autrement dit, plus l'agitation est importante, plus la viscosité est faible. Ce phénomène s'explique par des modifications de la structure du fluide entre les états de repos et d'écoulement. Au repos, l'ordre interne irrégulier de ces fluides provoque une résistance interne importante ce qui implique une viscosité élevée. À la suite de l'augmentation de la contrainte de cisaillement, les particules en suspension se positionnent dans le sens de l'écoulement, d'où un meilleur glissement et donc une baisse de la viscosité. Les fluides reviennent à leur viscosité initiale (réversibilité) si l'effet de cisaillement s'arrête ou diminue.

Parmi les fluides pseudo-plastiques, on rencontre, par exemple : les solutions et les suspensions aqueuses concentrées (solutions d'alginate de sodium, de certains polymères, jus de fruits concentrés...), les pétroles, latex de caoutchouc, pâte à papier, colles, savon, certaines peintures, purées (de bananes, de pommes de terre), mayonnaise, sang humain, etc.

Fluides dilatants ou rhéo-épaississants

À l'inverse des fluides pseudo-plastiques, les fluides dilatants ont une viscosité apparente qui croît quand la contrainte de cisaillement augmente. Ce comportement, moins fréquent que celui des fluides pseudo-plastiques, se rencontre dans les suspensions fortement concentrées, dans lesquelles la phase liquide n'occupe pratiquement que les interstices entre les particules solides. Dans ce cas, quand le taux de glissement croît, les particules solides tendent à freiner le déplacement d'une couche par rapport à l'autre. L'accroissement des frottements, dû à la disparition du liquide interstitiel lors de la mise en mouvement du milieu, fait apparaître des cavités et la viscosité dynamique apparente augmente. On observe ce type de comportement, par exemple, avec des solutions aqueuses d'amidon ou avec du sable et du quartz dans l'eau.

Fluides rhéoplastiques (viscoplastiques)

Un fluide viscoélastique est un fluide qui possède à la fois des propriétés de viscosité et d'élasticité. Ainsi, après la suppression des contraintes, ce fluide peut récupérer une partie de sa déformation.

Avec les fluides rhéoplastiques, l'écoulement ne se produit qu'à partir d'un seuil minimal de contrainte τ_{cr} , appelé *seuil de plasticité*, au-delà duquel on peut retrouver – suivant le fluide – les comportements newtoniens, pseudo-plastiques ou dilatants. Dans le cas de ces fluides, la courbe d'écoulement coupe l'ordonnée en un point définissant la *contrainte critique*. Le phénomène est réversible. Il est possible d'expliquer qualitativement ce comportement en supposant que ce dernier présente au repos une structure tridimensionnelle rigide, qui rend les substances assimilables à un solide, susceptible de résister à des contraintes inférieures à τ_{cr} . Dès que l'on dépasse cette contrainte, la structure se détruit complètement et le comportement du fluide devient newtonien (*fluide de Bingham*). Pour un écoulement laminaire en conduite cylindrique circulaire d'un

fluide de Bingham, la vitesse est constante dans la zone centrale, pour laquelle τ est inférieure à τ_{cr} .

Dans cette catégorie de fluides, on peut citer, par exemple : les pâtes de fruits et de chocolat, les peintures à l'huile, les graisses, les pommades, le dentifrice, la pâte à papier, les boues de forage, le ciment frais, etc.

La figure A.2 donne les courbes de viscosité des fluides non newtoniens dont la viscosité est indépendante du temps.

Figure A.2 – Courbes de viscosité : (a) fluide rhéofluidifiant ; (b) fluide rhéo-épaississant ; (c) fluide plastique.

Modèles de représentation

Les comportements « pseudo-plastiques » et « dilatants » peuvent être représentés par une loi de type « puissance » ou *loi d'Ostwald de Waele* :

$$\tau = k \left| \frac{dw}{dy} \right|^n \quad (\text{A.2})$$

dans laquelle les coefficients k et n , appelés respectivement *indice de consistance* (ou de comportement) et *indice d'écoulement*, sont des constantes déterminées expérimentalement dans le domaine d'utilisation. De façon générale, en fonction de la température, n varie peu et k varie selon les mêmes lois que μ .

Cette loi permet, par des calculs analogues à ceux utilisés pour l'étude des fluides newtoniens, d'étudier l'écoulement laminaire en conduite de fluides pseudo-plastiques ($n < 1$) ou dilatants ($n > 1$). Selon que le fluide est pseudo-plastique ou dilatant, la vitesse maximale est inférieure ou supérieure à celle du fluide newtonien. À la limite, si l'exposant n tend vers ∞ , la distribution des vitesses tend vers un cône, la vitesse maximale devenant égale à 3 fois la vitesse moyenne.

La figure A.3 récapitule, sur un diagramme représentant la contrainte de cisaillement τ en fonction du taux de glissement, le comportement des principaux types de fluides (sauf ceux dont la viscosité dynamique apparente dépend du temps). Un fluide non visqueux, ou pascalien, pour lequel μ est toujours nulle, est représenté par l'axe horizontal. L'axe vertical correspond à un solide élastique. Le fluide newtonien est représenté par une droite de pente μ .

Figure A.3 – Comportement des fluides non newtoniens indépendants du temps.

A.3 Fluides non newtoniens dont la viscosité dépend du temps

Certains fluides peuvent présenter des caractéristiques d'écoulement dépendant des traitements antérieurs qu'ils ont subis (figure A.4).

Figure A.4 – Comportement des fluides non newtoniens dont la viscosité dépend du temps.

Fluides thixotropes

Les *fluides thixotropes* ont, pour un gradient de vitesse constant, une viscosité qui diminue avec la durée de cisaillement. Ils admettent un seuil de contrainte comme les fluides rhéoplastiques, mais ce seuil augmente avec le temps quand le fluide est au repos et s'abaisse après agitation. Ce comportement s'observe quand les phénomènes d'alignement ou de formation de cavités, décrits respectivement pour les fluides pseudo-plastiques et dilatants, se déroulent lentement, de telle sorte que, même dans un écoulement permanent, on constate une diminution ou une augmentation de la contrainte τ .

La thixotropie est un phénomène rhéologique de grande importance industrielle car il peut être soit néfaste dans le cas du démarrage d'installations de pompage, soit recherché lorsqu'on souhaite disposer d'un matériau qui se liquéfie quand on le met en œuvre et qui se raidit quand on le stocke. C'est le cas des encres d'imprimerie, des mélanges eau-alcool, des sels de penta-oxyde de vanadium, des gels, de la mayonnaise, du blanc d'œuf frais, etc. Ces fluides sont en règle générale pseudo-plastiques.

Fluides rhéopexes

Extrêmement complexe, le phénomène de *rhéopexie* n'a été que très peu étudié. Il apparaît que, dans ce type de fluides, un faible cisaillement est susceptible de favoriser la restructuration du produit.

On peut observer la rhéopexie dans les émulsions d'eau dans de l'huile ou la cristallisation du plâtre à faible cisaillement.

Pour les fluides thixotropes et rhéopexes, les phénomènes observés sont réversibles. Ainsi l'agitation d'un gel peut le fluidifier mais, au bout d'un certain temps, l'agitation ayant cessé, le gel se reforme.

Remarque

Il faut noter que la classification présentée ici est schématique et qu'il existe des fluides de nature complexe qui présentent simultanément un comportement pseudo-plastique, viscoplastique et thixotropique.

B

Notions de similitude et analyse dimensionnelle

B.1 Principe de l'analyse dimensionnelle

L'étude théorique de nombreux phénomènes est, en raison de leur complexité, difficilement abordable à partir du système d'équations fixées par les principes de conservation, qui exigent pour être utilisées des hypothèses simplificatrices.

En règle générale, il est possible de faire des approximations en négligeant l'influence de certains facteurs (grandeurs physiques secondaires) mais il est absolument nécessaire que ces approximations soient justifiées. On doit cependant recourir à un modèle expérimental (maquette). Ainsi, on doit effectuer des essais sur maquettes et adopter ensuite les résultats obtenus au modèle en vraie grandeur (prototype). La transposition (ou extrapolation) des résultats obtenus à l'aide du modèle expérimental, à l'échelle industrielle se réalise au moyen de la théorie de la similitude et de la modélisation des processus.

Grâce à l'analyse dimensionnelle, fondement de la théorie de la similitude, qui a pour objet l'étude des dimensions des grandeurs physiques, on peut, d'une part, vérifier les calculs et, d'autre part, prévoir le comportement de certains systèmes physiques de réalisation délicate.

Selon la théorie de la similitude, les phénomènes d'écoulement des fluides sont similaires si l'on peut les représenter par la même équation critérielle et si les lois de similitude hydrodynamique déterminantes ont la même valeur numérique.

Reprenons par exemple l'expérience de Reynolds décrite auparavant. Soient L la longueur du tube rectiligne et Δp_c la perte de charge, autrement dit, la différence de pression qu'il faut maintenir entre les extrémités du tube pour permettre l'écoulement du fluide. On comprend donc que la perte de charge par unité de longueur de conduite $\Delta p_c/L$ n'est autre que le gradient de pression qui fait avancer le fluide.

Le problème est de trouver la loi qui relie ce « gradient moteur » aux différentes variables susceptibles de jouer un rôle dans l'écoulement.

B.2 Similitude hydrodynamique

Il existe des cas où l'analyse théorique ne permet pas de définir complètement une unité de transformation industrielle à partir de résultats de laboratoire. On se réfère alors à une étude faite sur une installation pilote, qui doit être considérée comme une réduction de l'unité finale de production et non pas comme une extrapolation de l'équipement de laboratoire. Une étape délicate consiste ensuite à

extrapoler les résultats obtenus sur l'installation pilote pour construire l'installation à l'échelle industrielle.

Ces échelles ne sont pas indépendantes les unes des autres, mais sont réalisées entre elles par un certain nombre de conditions, appelées conditions de similitude, qui s'expriment mathématiquement sous forme de nombres sans dimension.

La difficulté réside dans la synthèse des résultats obtenus, plus particulièrement quand le nombre des grandeurs variables est élevé.

Il est possible de déduire les critères de similitude hydrodynamique par deux méthodes, à savoir :

- les équations décrivant le mouvement des fluides (Bernoulli et Navier-Stokes) ;
- l'analyse dimensionnelle, en utilisant la méthode Buckingham ;

L'équation de Bernoulli pour l'écoulement isotherme des fluides newtoniens, adimensionnelle et dans laquelle on a négligé les constantes et l'apport W d'énergie de l'extérieur, est :

$$gz + w^2 + p/\rho - F = 0 \quad (\text{B.1})$$

En rapportant les termes représentant des énergies spécifiques (J/kg) de l'équation, on obtient les critères adimensionnels :

- nombre de Froude (Fr) :

$$\text{Fr} = gz/w^2 \quad (\text{B.2})$$

Fr = énergie potentielle/énergie cinétique

- nombre d'Euler (Eu) :

$$\text{Eu} = p/\rho w^2 = (p/\rho)/w^2 \quad (\text{B.3})$$

Eu = énergie de pression/énergie cinétique

Remarque

Le plus souvent, on préfère utiliser le rapport :

$\text{Eu} = \Delta p/\rho w^2 =$ différence de pression entre deux points/énergie cinétique

- nombre de Reynolds (Re) :

$$\text{Re} = w^2/F = w^2/(\mu w/\rho l^*) = w\rho l^*/\mu = wl^*/\nu \quad (\text{B.4})$$

Re = énergie cinétique/énergie de frottement

- avec, du point de vue dimensionnel, $F = \mu w/\rho l^*$. La signification des symboles est celle déjà donnée dans l'équation de Bernoulli et où l^* est la longueur, dimension géométrique sur la direction du transport de quantité de mouvement.

La signification physique des nombres de similitude hydrodynamique obtenus Fr, Eu, Re est donc représentée par le rapport des forces s'exerçant sur le fluide en

écoulement. La nature semblable de l'écoulement des fluides est déterminée par le rapport des forces agissant sur le fluide, en déterminant le mouvement de ceux-ci. Le nombre de Reynolds, très important pour l'écoulement des fluides, traduit le rapport entre la pression dynamique et la pression servant à vaincre les frottements ; il correspond donc aussi au rapport entre les forces d'inertie et les forces de frottement visqueux : lorsque les frottements sont prépondérants, l'écoulement est laminaire et lorsque les forces d'inertie dominant – du fait d'une grande énergie cinétique due à une vitesse élevée –, l'écoulement est turbulent.

Remarque

Dans le cas de l'écoulement des fluides présentant d'autres types de forces, par exemple la force de la tension superficielle (pulvérisation des liquides) et les forces élastiques (écoulement des fluides visco-élastiques), on définit les *nombres de Weber et de Cauchy*.

Pour l'écoulement des gaz, le nombre de Cauchy est connu sous le nom *nombre de Mach* (Ma) :

$$\text{Ma} = w/(\epsilon/\rho)^{1/2} = w/c \quad (\text{B.5})$$

avec $c = (\chi p/\rho)^{1/2}$ la vitesse de propagation du son dans le fluide et $\chi = c_p/c_v$ la constante adiabatique.

B.3 Modélisation des processus hydrodynamiques

Il est possible, grâce à la théorie de similitude, de modéliser les processus hydrodynamiques afin de tester et de concevoir des équipements industriels.

L'exemple suivant montre bien l'utilité de la modélisation. Ainsi on réalise un modèle expérimental, dans le but de calculer la chute de pression d'un liquide qui s'écoule à une vitesse w dans une conduite de diamètre d et de longueur L . D'après les lois de l'analyse dimensionnelle, la relation permettant de déterminer la chute de pression dans la conduite se présente sous la forme :

$$f(\text{Eu}, \text{Re}, d/L) = 0 \quad (\text{B.6})$$

ou en appliquant le théorème de π :

$$(\Delta p/w^2\rho)(d/L) = f(\text{Re}) \quad (\text{B.7})$$

Selon la théorie de similitude, il faut que le processus se déroulant dans le modèle soit analogue, donc soit décrit par une relation semblable qui portera l'indice m :

$$(\Delta p_m/w_m^2\rho_m)(d_m/L_m) = f(\text{Re})_m \quad (\text{B.8})$$

tandis que les similitudes doivent avoir des valeurs identiques :

$$\text{Re}_m = \text{Re}$$

ou

$$w_m d_m/\nu = wd/\nu \quad (\text{B.9})$$

et

$$(\Delta p_m / w_m^2 \rho_m)(d_m / L_m) = (\Delta p / w^2 \rho)(d / L) \quad (\text{B.10})$$

Puisque w , d et v sont des données caractérisant le liquide industriel et compte tenu qu'il est plus commode de faire l'expérience avec un autre liquide (de l'eau, par exemple), on a :

$$v_m \neq v \text{ et } \rho_m \neq \rho$$

La relation B.9 entraîne deux possibilités :

- soit on adopte une vitesse w_m du liquide utilisé dans le modèle et on détermine le diamètre d_m de la conduite du modèle ;
- soit on choisit une valeur pour d_m et on calcule la vitesse w_m .

La condition B.9 est respectée, il s'ensuit que la valeur de la chute de pression Δp est une fonction de Δp_m mesurée sur le modèle :

$$\Delta p = \Delta p_m (L/L_m)(d_m/d)(w/w_m)^2(\rho/\rho_m) \quad (\text{B.11})$$

Pour le cas particulier où le fluide utilisé dans le modèle et dans l'installation industrielle est le même, donc $v_m = v$ et $\rho_m = \rho$, la relation B.11 devient :

$$\Delta p = \Delta p_m (L/L_m)(w/w_m)^3 \quad (\text{B.12})$$

ou encore :

$$\Delta p = \Delta p_m (L/L_m)(d_m/d)^3 \quad (\text{B.13})$$

C

Notions de thermodynamique des écoulements (écoulements gazeux à masse volumique variable)

C.1 Définitions

La thermodynamique utilise une terminologie spécifique dont le sens est clairement défini. L'état thermodynamique d'un système est caractérisé par diverses grandeurs nommées *fonctions d'état*. Parmi celles-ci, la thermodynamique technique utilise usuellement :

- la pression absolue P
- la température absolue T
- le volume V ou le volume massique v
- l'énergie interne U ou l'énergie interne massique u
- l'enthalpie H ou l'enthalpie massique h
- l'entropie S ou l'entropie massique s

L'état thermodynamique d'un système est entièrement déterminé lorsque deux des six fonctions d'état sont connues. Les quatre autres fonctions d'état peuvent alors être déterminées par l'un des moyens à disposition (calcul, tables, diagrammes, etc.).

Une transformation thermodynamique est l'opération au cours de laquelle l'état thermodynamique d'un système se modifie en passant d'un *état initial* à un *état final*.

Un système peut subir une seule transformation [de (1) à (2)] ou parcourir une suite de transformations [(1) \rightarrow (2), (2) \rightarrow (3), (3) \rightarrow (4), etc.].

Les transformations thermodynamiques sont caractérisées par des dénominations précisant leur nature.

Selon la variation des fonctions d'état

Cas général : la transformation est telle que les six fonctions d'état changent simultanément de valeur ; elle est alors appelée *polytropicque*.

Cas particuliers : la transformation est telle que l'une des six fonctions d'état reste constante ; elle porte alors une dénomination indiquant quelle est la fonction d'état restée constante :

- à pression constante : transformation *isobare* ;

- à température constante : transformation *isotherme* ;
- à volume constant : transformation *isochore* ;
- à énergie interne constante : transformation *isoénergétique* ;
- à enthalpie constante : transformation *isenthalpique* ;
- à entropie constante : transformation *isentropique*.

Selon l'échange de chaleur avec le milieu extérieur

Si la transformation s'effectue sans échange de chaleur entre le système et le milieu extérieur, elle est dite *adiabatique*.

Si, de plus, une transformation adiabatique est réversible, elle est dite *isentropique* (c'est-à-dire à entropie constante).

Les transformations thermodynamiques peuvent s'effectuer avec ou sans transvasement.

Sans transvasement :

- le système évolue en vase clos, c'est-à-dire qu'il se trouve à l'intérieur du dispositif avant la transformation et qu'il y reste après celle-ci ;
- il n'y a donc pas d'échange de masse entre le système et le milieu extérieur.

Avec transvasement :

- avant la transformation, le système (fluide) doit être introduit dans le dispositif ;
- après la transformation, le système doit être extrait du dispositif, il y a donc un écoulement de fluide à travers le dispositif.

C.2 Équation générale des transformations

C'est la relation de portée générale permettant de calculer les valeurs des fonctions d'état lors des transformations subies par un système. Elle s'établit à partir des équations explicitant le premier principe (principe d'équivalence) :

$$Pv^n = Cte \quad (C.1)$$

avec n l'exposant polytropique caractérisant la transformation subie par le système.

L'exposant n peut prendre toute valeur comprise entre $-\infty$ et $+\infty$ (en fonction de la transformation). Toutefois, pour les transformations au cours desquelles une fonction d'état reste constante, l'exposant n prend des valeurs bien définies :

- transformation isobare : $n = 0$;
- transformation isotherme : $n = 1$;
- transformation isentropique : $n = \chi$;
- transformation isochore : $n = \infty$.

Pour tous les autres cas (transformations polytropiques), l'exposant n prend une valeur dépendant directement de l'évolution effectivement subie par le système.

Relations d'Helmholtz

À partir de la relation de Laplace $Pv^n = \text{Cte}$, il est possible d'établir une série de relations groupant les fonctions d'état P , T , v deux par deux. Par exemple, transformation de (1) à (2) :

$$P_1 v_1^n = P_2 v_2^n = \text{Cte} \Rightarrow (P_1/P_2) = (v_2/v_1)^n$$

Les trois relations d'Helmholtz sont les suivantes :

$$T_2/T_1 = (P_2/P_1)^{(n-1)/n} = (v_1/v_2)^{n-1} \quad (\text{C.2})$$

$$P_2/P_1 = (T_2/T_1)^{n/(n-1)} = (v_1/v_2)^n \quad (\text{C.3})$$

$$v_2/v_1 = (P_1/P_2)^{1/n} = (T_1/T_2)^{1/(n-1)} \quad (\text{C.4})$$

Ces relations sont fondamentales car elles permettent de calculer les valeurs des fonctions d'état lors de n'importe quelle transformation puisque l'exposant n caractérise l'évolution effectivement subie par le système.

C.3 Équation générale des transformations thermodynamiques

La déduction de cette loi est entièrement basée sur les relations établies dans tous les cours de thermodynamique. Ainsi la variable totale de l'enthalpie d'un système peut être décomposée en plusieurs termes, correspondant chacun à la variation d'une forme particulière de l'énergie :

$$dh_i \equiv \delta e + \delta q = dh + dw^2/2 + gdz \quad (\text{C.5})$$

Sous sa forme intégrée, elle s'exprime par la relation :

$$\Delta h_i \equiv e_{1-2} + q_{1-2} = \Delta_{1-2}h + (w_2^2 - w_1^2)/2 + g(z_2 - z_1) \quad (\text{C.6})$$

qui est l'équation générale des transformations thermodynamiques avec transvasement, qu'elles soient réversibles ou irréversibles.

Remarque

Les notations de la relation C.5 s'expliquent par le fait qu'il faut faire une distinction entre une propriété thermodynamique telle que h et les quantités e et q . La première a toujours une valeur qui ne dépend que de l'état du système, tandis que e et q ne sont pas des propriétés thermodynamiques du système et dépendent du « chemin » décrit par le processus ; c'est la raison pour laquelle δ est utilisé pour désigner une quantité infinitésimale.

À partir de la relation C.5, on obtient :

$$dh = \delta e + \delta q - dw^2/2 - gdz \quad (\text{C.7})$$

Dans cette relation, on peut introduire δe selon sa propre expression de définition, à savoir :

$$\delta e = v dp + dw^2/2 + g dz + \delta r$$

La relation C.7 devient alors :

$$dh = v dp + dw^2/2 + g dz + \delta r + \delta q - dw^2/2 - g dz$$

d'où, en notant $\delta r + \delta q = \delta q_t$ la chaleur totale, on a :

$$dh = v dp + \delta r + \delta q = v dp + \delta q_t \quad (C.8)$$

en se rappelant que δq est la chaleur échangée avec l'extérieur durant la transformation et δr la chaleur de dissipation, c'est-à-dire la chaleur résultant des frottements internes durant cette même transformation et restant dans le système.

Les relations C.7 et C.8 sont valables pour tous les types d'écoulement, qu'il y ait dissipation (écoulement irréversible) ou non (écoulement réversible).

Dans le cas d'un écoulement horizontal et sans échange de travail, $dz = 0$ et $\delta e = 0$, ce qui conduit à écrire la relation C.5 sous la forme :

$$\delta q = \delta h + dw^2/2 \quad (C.9)$$

qui montre que la chaleur échangée avec l'extérieur (δq) par le fluide en mouvement (écoulement) est « utilisée » pour faire varier l'enthalpie de ce fluide (δh) et sa vitesse d'écoulement ($dw^2/2$).

Il est bien évident que le terme « chaleur échangée avec l'extérieur » signifie que cet échange peut avoir lieu avec $\delta q > 0$; $\delta q < 0$; $\delta q = 0$.

C.4 Équation de Hugoniot

Cette équation donne, pour un canal où s'effectue la détente d'un fluide compressible, une relation entre la variation de la section de ce canal et celle de la vitesse.

Selon l'équation de continuité $G = wAp = \text{Cte}$. En prenant le logarithme de cette expression puis en le différenciant, on obtient :

$$\ln A + \ln w + \ln \rho = \text{Cte}$$

d'où :

$$(dA/A) + (dw/w) + (d\rho/\rho) = 0 \quad (C.10)$$

D'autre part, l'équation générale des transformations thermodynamiques avec transvasement peut s'écrire aussi :

$$\delta e + \delta q = dh + w dw + g dz$$

Par ailleurs, compte tenu de l'équation C.8, on aboutit à la forme :

$$\delta e = v dp + dr + w dw + g dz$$

dans laquelle, pour les écoulements envisagés ici, on a :

- pas d'échange de travail technique $\Rightarrow \delta e \equiv 0$
- réversible $\Rightarrow \delta r \equiv 0$

- canal horizontal $\Rightarrow \delta z \equiv 0$

Il reste donc :

$$vdp + dw/w = 0$$

ou en remplaçant $v = 1/\rho$:

$$dp/\rho + wdw = 0 \quad (\text{C.11})$$

En effectuant un petit artifice d'écriture dans la relation C.11 :

$$(dp/d\rho)(d\rho/\rho) + wdw = 0$$

$$(d\rho/\rho)(dp/d\rho) + wdw = 0$$

or comme $(dp/d\rho)^{1/2} = c$ (célérité du son), on en déduit :

$$(d\rho/\rho) = -wdw/c^2$$

En portant (C.12) dans (C.10), on aboutit à l'équation :

$$(dA/A) = (dw/w) - (w/c^2)dw$$

et puisque $Ma = w/c$:

$$(dA/A) = (dw/w)[Ma^2 - 1] \quad (\text{C.13})$$

qui est l'équation de Hugoniot donnant la relation entre les variations de vitesse et les variations de section droite pour un écoulement quelconque.

D

Unités de mesure Facteurs de conversion Constantes fondamentales

D.1 Unités de mesure

Le Système international d'unités (SI) comporte trois classes d'unités :

- les unités de base,
- les unités supplémentaires,
- les unités dérivées.

Tableau D.1 – Les sept unités de base.

Grandeur	Nom	Symbole
Longueur	Mètre	m
Masse	Kilogramme	kg
Temps	Seconde	s
Intensité de courant électrique	Ampère	A
Température	Kelvin	K
Intensité lumineuse	Candela	cd
Quantité de matière	Mole	mol

Les *unités supplémentaires* sont le radian pour l'angle plan et le stéradian pour l'angle solide.

Les *unités dérivées* sont exprimées en fonction des unités de base ou des unités supplémentaires.

Tableau D.2 – Unités dérivées.

Grandeur	Nom	Symbole	Expression en unités de base
Force	Newton	N	$1 \text{ N} = 1 \text{ kg.m/s}^2$

Pression, contrainte	Pascal	Pa	1 Pa = 1 N/m ²
Travail, énergie, quantité de chaleur	Joule	J	1 J = 1 N.m
Puissance	Watt	W	1 W = 1 J/s
Tension électrique	Volt	V	1 V = 1 W/A
Fréquence	Hertz	Hz	1 Hz = 1/s

La température thermodynamique en kelvin est l'unité recommandée par le SI. Cependant, en raison de son importance pratique, l'échelle en degrés Celsius (°C) est autorisée. La relation de définition est :

$$T (\text{K}) = T (^\circ\text{C}) + 273,15$$

Les préfixes suivants sont utilisés pour former les noms et les symboles des multiples des unités SI.

Tableau D.3 – Préfixes.

Symbole	Préfixe	Facteur de multiplication
T	téra	10 ¹²
G	giga	10 ⁹
M	méga	10 ⁶
k	kilo	10 ³
h	hecto	10 ²
da	déca	10 ¹
d	déci	10 ⁻¹
c	centi	10 ⁻²
m	milli	10 ⁻³
μ	micro	10 ⁻⁶
n	nano	10 ⁻⁹
p	pico	10 ⁻¹²

D.2 Facteurs de conversion

Pression

$$1 \text{ bar} = 1 \times 10^5 \text{ Pa} = 1 \times 10^5 \text{ N/m}^2$$

$$1 \text{ atm} = 760 \text{ mm Hg à } 0 \text{ }^\circ\text{C} = 1,01325 \times 10^5 \text{ Pa} = 1,01325 \text{ bar}$$

$$1 \text{ mm Hg (0 } ^\circ\text{C)} = 1,333224 \times 10^2 \text{ N/m}^2 = 0,1333224 \text{ kPa}$$

Puissance

$$1 \text{ CV} = 0,7457 \text{ kW}$$

$$1 \text{ W} = 1 \text{ J/s} = 14,340 \text{ cal/min}$$

Travail et énergie

$$1 \text{ J} = 1 \text{ N.m} = 1 \text{ kg.m}^2/\text{s}^2$$

$$1 \text{ kcal} = 4,1840 \text{ kJ}$$

$$1 \text{ CV.h} = 0,7457 \text{ kW.h}$$

Viscosité

$$1 \text{ Pa.s} = 1 \text{ N.s/m}^2 = 1 \text{ kg/m.s} = 1 \text{ 000 cp}$$

$$1 \text{ cp} = 10^{-2} \text{ g/cm.s (poise)} = 10^{-3} \text{ Pa.s}$$

Flux de chaleur

$$1 \text{ cal/h} = 1,1622 \times 10^{-3} \text{ W}$$

D.3 Constantes fondamentales

Constante universelle des gaz :

$$R = 8 \text{ 314,34 J/kmol.K}$$

Accélération de la pesanteur :

$$g = 9,80665 \text{ m/s}^2$$

Volumes :

- pour 1 gmol de gaz idéal à 0 °C et 760 mmHg :

$$V = 22,414 \text{ l}$$

- pour 1 kmol de gaz idéal :

$$V = 22,414 \text{ m}^3$$

Densités :

- air sec à 0 °C et 760 mm Hg :

$$\rho = 1,2929 \text{ g/l}$$

- poids moléculaire de l'air :

$$\gamma = 28,97 \text{ g/gmol}$$

E

Tableaux récapitulatifs

Tableau E.1 – Propriétés physiques de l'eau sur la courbe de saturation.

T (°C)	p (bar)	ρ (kg/m ³)	h (kJ/kg)	c_p (J/kg.°C)	λ (W/m.°C)	$\mu \times 10^4$ (Pa.s)	$\nu \times 10^4$ (m ² /s)	$\beta \times 10^4$ (1/°C)	$\sigma \times 10^4$ (N/m)
0	1,013	999,9	0	4 212	0,551	1 788	1,789	-0,63	756,4
10	1,013	999,7	42,04	4 191	0,574	1 306	1,306	+0,70	741,6
20	1,013	998,2	83,91	4 183	0,599	1 004	1,006	1,82	726,9
30	1,013	995,7	125,7	4 174	0,618	801,5	0,805	3,21	712,2
40	1,013	992,2	167,5	4 174	0,635	653,3	0,659	3,87	696,5
50	1,013	988,1	209,3	4 174	0,648	549,4	0,556	4,49	676,9
60	1,013	983,1	251,1	4 179	0,659	469,9	0,478	5,11	662,2
70	1,013	977,8	293,0	4 187	0,668	406,1	0,415	5,70	643,5
80	1,013	971,8	355,0	4 195	0,674	355,1	0,365	6,32	625,9
90	1,013	965,3	377,0	4 208	0,680	314,9	0,326	6,95	607,2
100	1,013	958,4	419,1	4 220	0,683	282,5	0,295	7,52	588,6
110	1,43	951,0	461,4	4 233	0,685	259,0	0,272	8,08	569,0
120	1,98	943,1	503,7	4 250	0,686	237,4	0,252	8,64	548,4
130	2,70	934,8	546,4	4 266	0,686	217,8	0,233	9,19	528,8
140	3,61	926,1	589,1	4 287	0,685	201,1	0,217	9,72	507,2
150	4,76	917,0	632,2	4 313	0,684	186,4	0,203	10,3	486,6
160	6,18	907,0	675,4	4 346	0,683	173,6	0,191	10,7	466,0
170	7,92	897,3	719,3	4 380	0,679	162,8	0,181	11,3	443,4

Tableau E.2 – Propriétés physiques de l'air sec à 760 mm Hg ($1,01 \times 10^5$ Pa).

T (°C)	ρ (kg/m ³)	c_p (J/kg.°C)	λ (W/m.°C)	$\mu \times 10^6$ (Pa.s)	$\nu \times 10^6$ (m ² /s)
-50	1,584	1 013	0,0204	14,6	9,23
-40	1,515	1 013	0,0212	15,2	10,04
-30	1,453	1 013	0,0220	15,7	10,80
-20	1,395	1 009	0,0228	16,2	12,79
-10	1,342	1 009	0,0226	16,7	12,93
0	1,293	1 005	0,0244	17,2	13,28
10	1,247	1 005	0,0251	17,6	14,16
20	1,205	1 005	0,0259	18,1	15,06
30	1,165	1 005	0,0267	18,6	16,00
40	1,128	1 005	0,0276	19,1	16,96
50	1,093	1 005	0,0283	19,6	17,95
60	1,060	1 005	0,0290	20,1	18,97
70	1,029	1 009	0,0296	20,6	20,02
80	1,000	1 009	0,0305	21,1	21,09
90	0,972	1 009	0,0313	21,5	22,10
100	0,946	1 009	0,0321	21,9	23,13
120	0,898	1 009	0,0334	22,8	25,45
140	0,854	1 013	0,0349	23,7	27,80
160	0,815	1 017	0,0364	24,5	30,09
180	0,779	1 022	0,0378	25,3	32,49
200	0,746	1 026	0,0393	26,0	34,85
250	0,674	1 038	0,0427	27,4	40,61
300	0,615	1 047	0,0460	29,7	48,33
350	0,566	1 059	0,0491	31,4	55,46
400	0,524	1 068	0,0521	33,0	63,09
500	0,456	1 093	0,0574	36,2	79,38
600	0,4504	1 114	0,0622	39,1	96,89
700	0,362	1 135	0,0671	41,8	115,40
800	0,329	1 156	0,0718	44,3	134,80
900	0,301	1 172	0,0763	46,7	155,10

1 000	0,277	1 185	0,0807	49,0	177,10
1 100	0,257	1 197	0,0850	51,2	199,30
1 200	0,239	1 210	0,0915	53,5	233,70

Tableau E.3 – Tension de la vapeur d'eau à la saturation (domaine du vide).

p (mbar)	T (°C)	v (m ³ /kg)	h (kJ/kg)	q_v (kJ/kg)	p (mbar)	T (°C)	v (m ³ /kg)	h (kJ/kg)	q_v (kJ/kg)
0,001	-76,19	909 000	2 344	2 852	35	26,69	39,5	2 551	2 439
0,002	-71,74	465 000	2 355	2 851	36	27,17	38,5	2 551	2 438
0,003	-69,04	314 000	2 361	2 850	37	27,64	37,5	2 552	2 437
0,004	-67,08	238 000	2 365	2 850	38	28,10	36,6	2 553	2 435
0,005	-65,53	192 000	2 368	2 849	40	28,98	34,8	2 554	2 434
0,006	-64,25	160 700	2 371	2 849	42	29,83	33,3	2 555	2 433
0,007	-63,15	138 500	2 374	2 849	44	30,64	31,8	2 556	2 431
0,008	-62,19	121 700	2 376	2 848	46	31,42	30,5	2 558	2 429
0,009	-61,34	108 600	2 377	2 848	48	32,17	29,3	2 559	2 428
0,01	-60,57	98 110	2 379	2 848	50	32,90	28,2	2 560	2 426
0,02	-55,37	50 250	2 390	2 847	52	33,60	27,2	2 563	2 422
0,03	-52,20	33 990	2 397	2 846	54	34,27	26,2	2 564	2 421
0,04	-49,90	25 760	2 402	2 845	56	34,93	25,4	2 565	2 419
0,05	-48,08	20 770	2 405	2 844	58	35,57	24,5	2 567	2 418
0,06	-46,57	17 430	2 408	2 844	60	36,18	23,8	2 568	2 416
0,07	-45,28	15 020	2 411	2 844	62	36,78	23,0	2 569	2 415
0,08	-44,14	13 210	2 413	2 843	64	37,37	22,4	2 570	2 413
0,09	-43,14	11 790	2 415	2 843	66	37,93	21,7	2 571	2 412
0,1	-42,23	10 660	2 417	2 843	68	38,49	21,1	2 572	2 411
0,2	-36,06	5 471	2 430	2 841	70	39,03	20,5	2 573	2 409
0,3	-32,29	3 705	2 437	2 840	72	39,55	20,0	2 574	2 408
0,4	-29,55	2 811	2 442	2 839	74	40,06	19,5	2 575	2 407
0,5	-27,38	2 269	2 447	2 838	76	40,57	19,0	2 575	2 406
0,6	-25,57	1 904	2 450	2 838	78	41,06	18,6	2 576	2 404
0,7	-24,02	1 643	2 453	2 838	80	41,54	18,1	2 577	2 403
0,8	-22,67	1 445	2 456	2 837	85	42,69	17,1	2 579	2 401
0,9	-21,46	1 291	2 458	2 837	90	43,79	16,2	2 581	2 398
1	-20,36	1 167	2 460	2 837	95	44,84	15,4	2 583	2 395

1,5	-16,07	791	2 469	2 836	100	45,84	14,7	2 585	2 393
2	-12,94	600	2 475	2 835	110	47,71	13,4	2 588	2 388
2,5	-10,45	485	2 479	2 834	120	49,45	12,4	2 591	2 384
3	-8,38	407	2 483	2 834	130	51,06	11,5	2 594	2 380
3,5	-6,61	351	2 487	2 833	140	52,58	10,7	2 597	2 377
4	-5,06	309	2 490	2 833	150	54,00	10,0	2 599	2 373
4,5	-3,67	276	2 492	2 833	160	55,34	9,44	2 602	2 370
5	-2,42	250	2 495	2 833	170	56,62	8,92	2 604	2 367
5,5	-1,27	228	2 497	2 832	180	57,83	8,45	2 606	2 364
6	-0,22	210	2 499	2 832	190	58,99	8,03	2 608	2 361
7	1,89	181	2 505	2 497	200	60,09	7,65	2 610	2 358
8	3,77	160	2 509	2 493	220	62,17	7,00	2 613	2 353
9	5,46	143	2 512	2 489	240	64,09	6,45	2 617	2 348
10	6,98	129	2 515	2 485	260	65,88	5,98	2 620	2 344
11	8,38	118	2 517	2 482	280	67,55	5,58	2 623	2 340
12	9,66	109	2 519	2 479	300	69,13	5,23	2 625	2 336
13	10,86	101	2 522	2 476	320	70,62	4,93	2 628	2 332
14	11,98	94,0	2 524	2 474	340	72,03	4,65	2 630	2 329
15	13,03	88,0	2 526	2 471	360	73,38	4,41	2 633	2 325
16	14,02	82,8	2 527	2 469	380	74,66	4,19	2 635	2 322
17	14,96	78,2	2 529	2 467	400	75,89	4,00	2 637	2 319
18	15,85	74,1	2 531	2 464	420	77,07	3,82	2 639	2 316
19	16,70	70,4	2 532	2 462	440	78,20	3,65	2 641	2 313
20	17,51	67,1	2 534	2 460	460	79,29	3,51	2 642	2 311
21	18,28	64,0	2 535	2 459	480	80,33	3,37	2 644	2 308
22	19,03	61,3	2 537	2 457	500	81,35	3,24	2 646	2 305
23	19,74	58,7	2 538	2 455	550	83,74	2,97	2 650	2 299
24	20,43	56,4	2 539	2 454	600	85,96	2,73	2 653	2 294
25	21,09	54,3	2 540	2 452	650	88,02	2,54	2 657	2 288
26	21,73	52,3	2 542	2 451	700	89,96	2,37	2 660	2 283
27	22,35	50,5	2 543	2 449	750	91,78	2,22	2 663	2 279
28	22,95	48,8	2 544	2 448	800	93,51	2,09	2 666	2 274
29	23,53	47,2	2 545	2 446	850	95,15	1,97	2 668	2 270

30	24,10	45,7	2 546	2 445	900	96,71	1,87	2 671	2 266
31	24,64	44,3	2 547	2 444	950	98,20	1,78	2 673	2 262
32	25,18	43,0	2 548	2 442	1 000	99,63	1,70	2 675	2 258
33	25,69	41,8	2 549	2 441					
34	26,20	40,6	2 550	2 440					

Tableau E.4 – Tension de la vapeur d'eau à la saturation (domaine de pressions de 1 à 70 bar).

P_{abs} (bar)	T (°C)	v (m ³ /kg)	h (kJ/kg)	q_v (kJ/kg)	P_{abs} (bar)	T (°C)	v (m ³ /kg)	h (kJ/kg)	q_v (kJ/kg)
1,0	99,63	1,694	2 675,4	2 257,9	20	212,37	0,09954	2 797,2	1 888,6
1,1	102,32	1,549	2 679,6	2 250,8	21	214,85	0,09489	2 798,2	1 878,2
1,2	104,81	1,428	2 683,4	2 244,1	22	217,24	0,09065	2 799,1	1 868,1
1,3	107,13	1,325	2 687,0	2 237,8	23	219,55	0,08677	2 799,8	1 858,2
1,4	109,32	1,236	2 690,3	2 231,9	24	221,78	0,08320	2 800,4	1 848,5
1,5	111,37	1,159	2 693,4	2 226,2	25	223,94	0,07991	2 800,9	1 839,0
1,6	113,32	1,091	2 696,2	2 220,9	26	226,04	0,07686	2 801,4	1 829,6
1,7	115,17	1,031	2 699,0	2 215,7	27	228,07	0,07402	2 801,7	1 820,5
1,8	116,93	0,9772	2 701,5	2 210,8	28	230,05	0,07139	2 802,0	1 811,5
1,9	118,62	0,9290	2 704,0	2 206,1	29	231,97	0,06893	2 802,2	1 802,6
2,0	120,23	0,8854	2 706,3	2 201,6	30	233,84	0,06663	2 802,3	1 793,9
2,1	121,78	0,8459	2 708,5	2 197,2	31	235,67	0,06447	2 802,3	1 785,4
2,2	123,27	0,8098	2 710,6	2 193,0	32	237,45	0,06244	2 802,3	1 776,9
2,3	124,71	0,7768	2 712,6	2 188,9	33	239,18	0,06053	2 802,3	1 768,6
2,4	126,09	0,7465	2 714,5	2 184,9	34	240,88	0,05873	2 802,2	1 760,3
2,5	127,43	0,7184	2 716,4	2 181,0	35	242,54	0,05703	2 802,0	1 752,2
2,6	128,73	0,6925	2 718,2	2 177,3	36	244,16	0,05541	2 801,7	1 744,2
2,7	129,98	0,6684	2 719,9	2 173,6	37	245,75	0,05389	2 801,4	1 736,2
2,8	131,20	0,6460	2 721,5	2 170,1	38	247,31	0,05244	2 801,1	1 728,4
2,9	132,39	0,6251	2 723,1	2 166,6	39	248,84	0,05106	2 800,8	1 720,6
3,0	133,54	0,6056	2 724,7	2 163,2	40	250,33	0,04975	2 800,3	1 712,9
3,2	135,75	0,5700	2 727,6	2 156,7	41	251,80	0,04850	2 799,9	1 705,3
3,4	137,86	0,5385	2 730,3	2 150,4	42	253,24	0,04731	2 799,4	1 697,8
3,6	139,86	0,5103	2 732,9	2 144,4	43	254,66	0,04617	2 798,9	1 690,3
3,8	141,78	0,4851	2 735,3	2 138,6	44	256,05	0,04508	2 798,3	1 682,9
4,0	143,62	0,4622	2 737,6	2 133,0	45	257,41	0,04404	2 797,7	1 975,6
4,2	145,39	0,4415	2 739,8	2 127,5	46	258,75	0,04304	2 797,0	1 668,3
4,4	147,09	0,4226	2 741,9	2 122,3	47	260,07	0,04208	2 796,4	1 661,1
4,6	148,73	0,4053	2 743,9	2 117,2	48	261,37	0,04116	2 795,7	1 653,9

4,8	150,31	0,3894	2 745,7	2 112,2	49	262,65	0,04028	2 794,9	1 646,8
5,0	151,84	0,3747	2 747,5	2 107,4	50	263,91	0,03943	2 794,2	1 639,7
5,5	155,46	0,3425	2 751,6	2 096,0	51	265,15	0,03861	2 793,4	1 632,7
6,0	158,84	0,3155	2 755,5	2 085,0	52	266,37	0,03782	2 792,6	1 625,7
6,5	161,99	0,2925	2 758,8	2 074,7	53	267,58	0,03707	2 791,7	1 918,8
7,0	164,96	0,2727	2 762,0	2 064,9	54	268,76	0,03633	2 790,8	1 611,9
7,5	167,76	0,2555	2 764,9	2 055,5	55	269,93	0,03563	2 789,9	1 605,0
8,0	170,41	0,2403	2 767,5	2 046,5	56	271,09	0,03495	2 789,0	1 598,2
8,5	172,93	0,2268	2 769,9	2 037,8	57	272,22	0,03429	2 788,0	1 591,4
9,0	175,36	0,2148	2 772,1	2 029,5	58	273,35	0,03365	2 787,0	1 584,7
9,5	177,66	0,2040	2 774,2	2 021,4	59	274,46	0,03303	2 786,0	1 578,0
10	179,88	0,1943	2 776,2	2 013,6	60	275,55	0,03244	2 785,0	1 571,3
11	184,07	0,1774	2 779,7	1 998,5	61	276,63	0,03186	2 784,0	1 564,7
12	187,96	0,1632	2 782,7	1 984,3	62	277,70	0,03130	2 782,9	1 558,0
13	191,61	0,1511	2 785,4	1 970,7	63	278,75	0,03076	2 781,8	1 551,5
14	195,04	0,1407	2 787,8	1 957,7	64	279,79	0,03023	2 780,6	1 544,9
15	198,29	0,1317	2 789,9	1 945,2	65	280,82	0,02972	2 779,5	1 538,4
16	201,37	0,1237	2 791,7	1 933,2	66	281,84	0,02922	2 778,3	1 531,9
17	204,31	0,1166	2 793,4	1 921,5	67	282,84	0,02874	2 777,1	1 525,4
18	207,11	0,1103	2 794,8	1 910,3	68	283,84	0,02827	2 775,9	1 518,9
19	209,80	0,1047	2 796,1	1 899,3	69	284,82	0,02782	2 774,7	1 512,5
					70	285,79	0,02737	2 773,5	1 506,0

Tableau E.5 – Température de la vapeur d'eau à la saturation (domaine du vide).

T (°C)	p (mbar)	v (m ³ /kg)	h (kJ/kg)	q_v (kJ/kg)	T (°C)	p (mbar)	v (m ³ /kg)	h (kJ/kg)	q_v (kJ/kg)
-74	0,00141 1	651 700	2 349,3	2 851,2	1	6,566	192,6	2 503,4	2 499,2
-73	0,00164 7	561 000	2 351,6	2 851,0	2	7,045	179,9	2 505,2	2 496,8
-72	0,00192 0	483 600	2 353,9	2 850,7	3	7,574	168,2	2 507,1	2 494,5
-71	0,00223 6	417 500	2 356,1	2 850,5	4	8,128	157,3	2 508,9	2 492,1
-70	0,00259 8	361 100	2 358,4	2 850,3	5	8,718	147,2	2 510,7	2 489,7
-69	0,00301 5	312 600	2 360,6	2 850,0	6	9,345	137,8	2 512,6	2 487,4
-68	0,00349 5	271 100	2 362,8	2 849,8	7	10,01	129,1	2 514,4	2 485,0
-67	0,00404 4	235 400	2 365,0	2 849,6	8	10,71	121,0	2 516,2	2 482,6
-66	0,00467 2	204 700	2 367,2	2 849,3	9	11,47	113,4	2 518,1	2 480,3
-65	0,00539 1	178 300	2 369,4	2 849,1	10	12,27	106,4	2 519,9	2 477,9
-64	0,00621 2	155 500	2 371,6	2 848,8	11	13,11	99,91	2 521,7	2 475,5
-63	0,00714 9	135 800	2 373,8	2 848,5	12	14,01	93,84	2 523,6	2 473,2
-62	0,00821 5	118 700	2 376,0	2 848,3	13	14,96	88,18	2 525,4	2 470,8
-61	0,00942 9	103 900	2 378,1	2 848,0	14	15,97	82,90	2 527,2	2 468,5
-60	0,01080	91100	2 380,3	2 847,7	15	17,03	77,98	2 529,1	2 466,1
-59	0,01237	79900	2 382,4	2 845,5	16	18,16	73,38	2 530,9	2 468,8
-58	0,01414	70300	2 384,5	2 847,2	17	19,36	69,09	2 532,7	2 461,4
-57	0,01614	61800	2 386,7	2 846,9	18	20,62	65,09	2 534,5	2 459,0
-56	0,01841	54500	2 388,8	2 846,6	19	21,95	61,34	2 536,4	2 456,7
-55	0,02097	48000	2 390,9	2 846,4	20	23,36	57,84	2 538,2	2 454,3
-54	0,02385	42400	2 393,0	2 486,1	21	24,85	54,56	2 540,0	2 452,0

-53	0,02711	37500	2 395,1	2 845,8	22	26,41	51,59	2 541,8	2 449,6
-52	0,03077	33200	2 397,2	2 845,5	23	28,07	48,62	2 543,6	2 447,2
-51	0,03488	29400	2 399,3	2 845,2	24	29,82	45,93	2 545,5	2 444,9
-50	0,03949	26100	2 401,3	2 844,9	25	31,65	43,40	2 547,3	2 442,5
-49	0,04467	23200	2 403,4	2 844,6	26	33,59	41,08	2 549,1	2 440,2
-48	0,05047	20600	2 405,5	2 844,4	27	35,63	38,81	2 550,9	2 437,8
-47	0,05696	18300	2 407,5	2 844,1	28	37,78	36,73	2 552,7	2 435,4
-46	0,06422	16300	2 409,6	2 843,8	29	40,04	34,77	2 554,5	2 433,1
-45	0,07232	14600	2 411,6	2 843,5	30	42,41	32,93	2 556,4	2 430,7
-44	0,08136	13000	2 413,6	2 843,2	31	44,91	31,20	2 558,2	2 428,3
-43	0,09144	11600	2 415,7	2 842,9	32	47,53	29,57	2 560,0	2 425,9
-42	0,1026	10400	2 417,7	2 842,6	33	50,28	28,04	2 561,8	2 423,6
-41	0,1151	9 312	2 419,7	2 842,3	34	53,18	26,60	2 563,6	2 421,2
-40	0,1289	8 347	2 419,7	2 842,0	35	56,21	25,24	2 565,4	2 418,3
-39	0,1443	7 489	2 421,7	2 841,7	36	59,39	23,97	2 567,2	2 416,4
-38	0,1614	6 726	2 423,7	2 841,4	37	62,74	22,76	2 569,0	2 414,1
-37	0,1803	6 046	2 425,7	2 841,1	38	66,24	21,63	2 570,8	2 411,7
-36	0,2012	5 441	2 427,7	2 840,8	39	69,91	20,56	2 572,6	2 409,3
-35	0,2244	4 900	2 429,7	2 840,6	40	73,74	19,55	2 574,4	2 406,9
-34	0,2500	4 416	2 431,7	2 840,3	41	77,77	18,59	2 576,2	2 404,5
-33	0,2783	3 985	2 433,7	2 840,0	42	81,98	17,69	2 577,9	2 402,1
-32	0,3095	3 598	2 435,7	2 839,7	43	86,38	16,84	2 579,7	2 399,7
-31	0,3438	3 252	2 439,6	2 839,4	44	90,99	16,04	2 581,5	2 397,3
-30	0,03816	2 942	2 441,6	2 839,1	45	95,32	15,25	2 583,3	2 394,9
-29	0,4233	2 663	2 443,5	2 838,8	46	100,8	14,56	2 585,1	2 392,5
-28	0,4691	2 413	2 445,5	2 838,6	47	106,1	13,88	2 586,9	2 390,1
-27	0,5194	2 188	2 447,4	2 838,3	48	111,6	13,23	2 588,6	2 387,7
-26	0,5746	1 986	2 449,4	2 838,0	49	117,3	12,62	2 590,4	2 385,3
-25	0,6351	1 804	2 451,3	2 837,7	50	123,3	12,05	2 592,2	2 382,9
-24	0,7014	1 640	2 453,3	2 837,5	52	136,1	10,98	2 595,7	2 378,1
-23	0,7741	1 492	2 455,2	2 837,2	54	150,0	10,02	2 599,2	2 373,2
-22	0,8536	1 358	2 457,1	2 836,9	56	165,1	9,159	2 602,7	2 368,4
-21	0,9407	1 237	2 459,1	2 836,7	58	181,4	8,381	2 606,2	2 363,5

-20	1,035	1 129	2 461,0	2 836,4	60	199,2	7,659	2 609,7	2 358,6
-19	1,139	1 030	2 462,9	2 836,2	62	218,3	7,044	2 613,2	2 353,7
-18	1,252	940,9	2 464,8	2 835,9	64	239,0	6,469	2 616,6	2 348,8
-17	1,375	859,9	2 466,8	2 835,7	66	261,5	5,948	2 620,1	2 343,9
-16	1,509	786,5	2 468,7	2 835,4	68	285,6	5,476	2 623,5	2 338,9
-15	1,656	719,8	2 470,6	2 835,2	70	311,6	5,046	2 626,9	2 334,0
-14	1,815	659,3	2 472,5	2 835,0	72	339,6	4,656	2 630,3	2 329,0
-13	1,988	604,2	2 474,4	2 834,7	74	369,6	4,300	2 633,7	2 324,0
-12	2,176	554,2	2 476,3	2 834,5	76	401,8	3,976	2 637,1	2 318,9
-11	2,380	508,6	2 478,3	2 834,3	78	436,4	3,680	2 640,4	2 313,9
-10	2,601	467,1	2 480,2	2 834,1	80	473,5	3,409	2 643,8	2 308,8
-9	2,841	429,3	2 482,1	2 833,9	82	513,2	3,162	2 647,1	2 303,8
-8	3,101	394,8	2 484,0	2 833,7	84	555,7	2,935	2 650,4	2 298,7
-7	3,383	363,3	2 485,9	2 833,5	86	601,0	2,727	2 653,6	2 293,1
-6	3,688	334,5	2 487,8	2 833,3	88	649,4	2,536	2 656,9	2 288,4
-5	4,017	308,2	2 489,7	2 833,1	90	701,0	2,361	2 660,1	2 283,2
-4	4,373	284,2	2 491,6	2 832,9	92	756,0	2,200	2 663,4	2 278,0
-3	4,758	262,1	2 493,5	2 832,7	94	814,6	2,052	2 666,6	2 272,8
-2	5,173	242,0	2 495,4	2 832,5	96	876,8	1,915	2 669,7	2 267,5
-1	5,622	223,5	2 497,3	2 832,4	98	943,0	1,789	2 672,9	2 262,2
0	6,105	206,6	2 501,6	2 501,6	100	1 013,2	1,673	2 676,0	2 256,9

Tableau E.6 – Température de la vapeur d'eau à la saturation
(domaine de températures de 100 à 300 °C).

T (°C)	T (K)	p (bar)	v (m ³ /kg)	h (kJ/kg)	q_v (kJ/kg)	T (°C)	T (K)	p (bar)	v (m ³ /kg)	h (kJ/kg)	q_v (kJ/kg)
100	373,15	1,0133	1,673	2 676,0	2 256,9	170	443,15	7,920	0,2426	2 767,1	2 047,9
101	374,15	1,0500	1,618	2 677,6	2 254,3	172	445,15	8,311	0,2317	2 769,0	2 041,1
102	375,15	1,0878	1,566	2 679,1	2 251,6	174	447,15	8,716	0,2215	2 770,9	2 034,2
103	376,15	1,1267	1,515	2 680,7	2 248,9	176	449,15	9,137	0,2117	2 772,7	2 027,3
104	377,15	1,1668	1,466	2 682,2	2 246,3	178	451,15	9,574	0,2025	2 774,5	2 020,2
105	378,15	1,2080	1,419	2 683,7	2 243,6	180	453,15	10,027	0,1938	2 776,3	2 013,1
106	379,15	1,2504	1,374	2 685,3	2 240,9	182	455,15	10,496	0,1855	2 778,0	2 006,0
107	380,15	1,2941	1,331	2 686,8	2 238,2	184	457,15	10,983	0,1776	2 779,6	1 998,8
108	381,15	1,3390	1,289	2 688,3	2 235,4	186	459,15	11,488	0,1702	2 781,2	1 991,5
109	382,15	1,3852	1,249	2 689,8	2 232,7	188	461,15	12,010	0,1631	2 782,8	1 984,2
110	383,15	1,4327	1,210	2 691,3	2 230,0	190	463,15	12,551	0,1563	2 784,3	1 976,7
111	384,15	1,4815	1,173	2 692,8	2 227,3	192	465,15	13,111	0,1499	2 785,7	1 969,3
112	385,15	1,5316	1,137	2 694,3	2 224,5	194	467,15	13,690	0,1438	2 787,1	1 961,7
113	386,15	1,5832	1,102	2 695,8	2 221,8	196	469,15	14,289	0,1380	2 788,4	1 954,1
114	387,15	1,6362	1,069	2 697,2	2 219,0	198	471,15	14,909	0,1324	2 789,7	1 946,4
115	388,15	1,6906	1,036	2 698,7	2 216,2	200	473,15	15,549	0,1272	2 790,9	1 938,6
116	389,15	1,7465	1,005	2 700,2	2 213,4	202	475,15	16,210	0,1221	2 792,1	1 930,7
117	390,15	1,8039	0,9753	2 701,6	2 210,7	204	477,15	16,893	0,1173	2 793,2	1 922,3
118	391,15	1,8628	0,9463	2 703,1	2 207,9	206	479,15	17,598	0,1128	2 794,3	1 914,7
119	392,15	1,9233	0,9184	2 704,5	2 205,1	208	481,15	18,326	0,1084	2 795,3	1 906,6
120	393,15	1,9854	0,8915	2 706,0	2 202,2	210	483,15	19,077	0,1042	2 796,2	1 898,5
121	394,15	2,0492	0,8655	2 707,4	2 199,4	212	485,15	19,852	0,1003	2 797,1	1 890,2
122	395,15	2,1145	0,8405	2 708,8	2 196,6	214	487,15	20,651	0,09646	2 797,9	1 881,8
123	396,15	2,1816	0,8162	2 710,2	2 193,7	216	489,15	21,475	0,09283	2 798,6	1 873,4
124	397,15	2,2504	0,7928	2 711,6	2 190,9	218	491,15	22,324	0,08936	2 799,3	1 864,9
125	398,15	2,3210	0,7702	2 713,0	2 188,0	220	493,15	23,198	0,08604	2 799,9	1 856,2
126	399,15	2,3933	0,7484	2 714,4	2 185,2	222	495,15	24,099	0,08286	2 800,5	1 847,5
127	400,15	2,4675	0,7273	2 715,8	2 182,3	224	497,15	25,027	0,07982	2 800,9	1 838,7
128	401,15	2,5435	0,7069	2 717,2	2 179,4	226	499,15	25,982	0,07691	2 801,4	1 829,8

129	402,15	2,6215	0,6872	2 718,5	2 176,5	228	501,15	26,965	0,07412	2 801,7	1 820,8
130	403,15	2,7013	0,6681	2 719,9	2 173,6	230	503,15	27,976	0,07145	2 802,0	1 811,7
131	404,15	2,7831	0,6497	2 721,3	2 170,7	232	505,15	29,016	0,06889	2 802,2	1 802,5
132	405,15	2,8670	0,6319	2 722,6	2 167,8	234	507,15	30,086	0,06643	2 802,3	1 793,2
133	406,15	2,9528	0,6146	2 723,9	2 164,8	236	509,15	31,186	0,06408	2 802,3	1 783,8
134	407,15	3,041	0,5980	2 725,3	2 161,9	238	511,15	32,317	0,06182	2 802,3	1 774,2
135	408,15	3,131	0,5818	2 726,6	2 158,9	240	513,15	33,478	0,05965	2 802,2	1 764,6
136	409,15	3,223	0,5662	2 727,9	2 155,9	242	515,15	34,672	0,05757	2 802,2	1 754,9
137	410,15	3,317	0,5511	2 729,2	2 153,0	244	517,15	35,898	0,05558	2 801,8	1 745,0
138	411,15	3,414	0,5364	2 730,5	2 150,0	246	519,15	37,157	0,05366	2 800,4	1 735,0
139	412,15	3,513	0,5222	2 731,8	2 147,0	248	521,15	38,449	0,05181	2 801,0	1 724,9
140	413,15	3,614	0,5085	2 733,1	2 144,0	250	523,15	39,776	0,05004	2 800,4	1 714,6
142	415,15	3,823	0,4823	2 735,6	2 137,9	252	525,15	41,137	0,04833	2 799,8	1 704,3
144	417,15	4,042	0,4577	2 738,1	2 131,8	254	527,15	42,534	0,04669	2 799,1	1 693,8
146	419,15	4,271	0,4346	2 740,6	2 125,7	256	529,15	43,967	0,04511	2 798,3	1 683,2
148	421,15	4,510	0,4129	2 743,0	2 119,5	258	531,15	45,437	0,04360	2 797,4	1 672,4
150	423,15	4,760	0,3924	2 745,4	2 113,2	260	533,15	46,943	0,04213	2 796,4	1 661,5
152	425,15	5,021	0,3732	2 747,7	2 106,9	265	538,15	50,877	0,03871	2 793,5	1 633,6
154	427,15	5,293	0,3551	2 750,0	2 100,6	270	543,15	55,058	0,03559	2 789,9	1 604,6
156	429,15	5,577	0,3380	2 752,3	2 094,2	275	548,15	59,496	0,03274	2 785,5	1 574,7
158	431,15	5,872	0,3219	2 754,5	2 087,7	280	553,15	64,202	0,03013	2 780,4	1 543,6
160	433,15	6,181	0,3068	2 756,7	2 081,3	285	558,15	69,186	0,02773	2 774,5	1 511,3
162	435,15	6,502	0,2924	2 758,9	2 074,7	290	563,15	74,461	0,02554	2 767,6	1 477,6
164	437,15	6,836	0,2789	2 761,0	2 068,1	295	568,15	80,037	0,02351	2 759,8	1 443,6
166	439,15	7,183	0,2661	2 763,1	2 061,4	300	573,15	85,927	0,02166	2 751,0	1 406,0
			168	441,15	7,545	0,2540	2 765,1	2 054,7			