

Enseignement supérieur

---

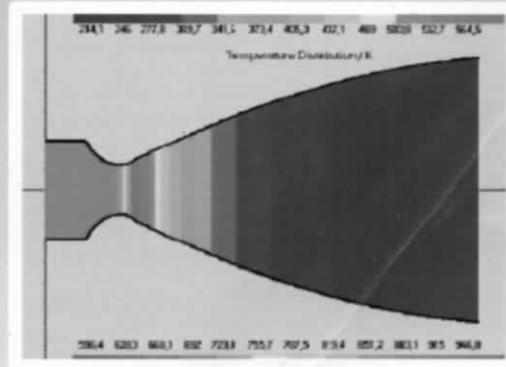
# DYNAMIQUE DES GAZ

Ecoulements compressibles

---

Cours et exercices  
(Niveau Ingénieur et Master)

Par : Rabah HAOUI



# TABLE DES MATIERES

|                                                      |                                                                  |    |
|------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------|----|
| <b>Chapitre.1</b>                                    |                                                                  |    |
| <b>GENERALITES</b>                                   |                                                                  |    |
| 1.1                                                  | Domaine scientifique                                             | 9  |
| 1.2                                                  | La mécanique des milieux continus                                | 9  |
| 1.3                                                  | Propriétés physiques des gaz                                     | 10 |
| 1.3.1                                                | Compressibilité                                                  | 10 |
| 1.3.2                                                | Viscosité                                                        | 11 |
| 1.4                                                  | Equations de base                                                | 13 |
| 1.5                                                  | Gaz parfait                                                      | 14 |
| 1.5.1                                                | Premier principe de la thermodynamique                           | 15 |
| 1.5.2                                                | Enthalpie                                                        | 16 |
| 1.5.3                                                | Chaleurs spécifiques                                             | 16 |
| 1.5.4                                                | Deuxième principe et entropie                                    | 16 |
| 1.6                                                  | Changement d'état isentropique                                   | 17 |
| 1.7                                                  | Vitesse du son                                                   | 18 |
| 1.8                                                  | Nombre de Mach                                                   | 21 |
| 1.9                                                  | Différence physique entre écoulements subsonique et supersonique | 22 |
|                                                      | Exercices                                                        | 24 |
| <b>Chapitre 2</b>                                    |                                                                  |    |
| <b>ECOULEMENT ISENTROPIQUE QUASI-UNIDIMENSIONNEL</b> |                                                                  |    |
| 2.1                                                  | Définition                                                       | 27 |
| 2.2                                                  | Equation de continuité                                           | 28 |
| 2.2.1                                                | Cas particulier                                                  | 28 |
| 2.2.2                                                | Cas général                                                      | 29 |
| 2.3                                                  | Equation de quantité de mouvement                                | 31 |
| 2.4                                                  | Equation d'énergie                                               | 35 |
| 2.5                                                  | Lois générales de l'écoulement isentropique                      | 39 |
| 2.6                                                  | Écoulement isentropique dans une canalisation                    | 41 |
| 2.7                                                  | Comparaison avec les fluides incompressibles                     | 43 |
| 2.8                                                  | Vitesse critique                                                 | 45 |

|                                                                               |                                                                    |     |
|-------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------|-----|
| 2.9                                                                           | Théorème d'Hugoniot                                                | 48  |
| 2.10                                                                          | Relation entre la pression et la vitesse                           | 50  |
| 2.11                                                                          | Profils des tuyères                                                | 50  |
| 2.12                                                                          | Tuyère convergente                                                 | 52  |
| 2.13                                                                          | Calcul du débit                                                    | 53  |
| 2.14                                                                          | Variation du débit en fonction de $(P/P_0)$                        | 55  |
| 2.15                                                                          | Fonctionnement des tuyères avec rapport de pression variable       | 56  |
| 2.15.1                                                                        | Tuyère convergente                                                 | 56  |
| 2.15.2                                                                        | Tuyère convergente divergente                                      | 58  |
| 2.16                                                                          | Performances des tuyères réelles                                   | 62  |
| 2.16.1                                                                        | L'efficacité                                                       | 62  |
| 2.16.2                                                                        | Le coefficient de décharge                                         | 63  |
| 2.17                                                                          | Exercices                                                          | 65  |
| <b>Chapitre 3</b>                                                             |                                                                    |     |
| <b>ONDE DE CHOC NORMALE</b>                                                   |                                                                    |     |
| 3.1                                                                           | Introduction                                                       | 71  |
| 3.2                                                                           | Détermination des paramètres de l'écoulement                       | 71  |
| 3.3                                                                           | Calcul de la variation d'entropie                                  | 78  |
| 3.4                                                                           | Pressions et températures totales                                  | 80  |
| 3.5                                                                           | Mesures de pression et de vitesse dans un écoulement compressible. | 81  |
| 3.6                                                                           | Rendement isentropique au travers l'onde de choc                   | 85  |
| 3.7                                                                           | Evolution dans un diagramme (T-S)                                  | 86  |
| 3.8                                                                           | Onde de choc bidimensionnelle                                      | 88  |
| Exercice                                                                      |                                                                    | 90  |
| <b>Chapitre 4</b>                                                             |                                                                    |     |
| <b>ÉCOULEMENT ADIABATIQUE DANS LES CONDUITES (Écoulement avec frottement)</b> |                                                                    |     |
| 4.1                                                                           | Introduction et remarque                                           | 93  |
| 4.2                                                                           | Écoulement d'un gaz parfait dans une conduite à section constante  | 93  |
| 4.3                                                                           | Second principe de la thermodynamique                              | 98  |
| 4.4                                                                           | Comportement d'une conduite avec rapport de pression variable      | 105 |

|          |              |
|----------|--------------|
| 4.4.1    | Calcul       |
| 4.4.2    | Calcul       |
| 4.5      | Résumé       |
| 4.6      | Préliminaire |
| Exercice |              |
|          |              |
|          |              |
|          |              |
|          |              |
| 5.1      | Equation     |
| 5.2      | Résumé       |
| 5.3      | Application  |
| Exercice |              |
|          |              |
|          |              |
|          |              |
|          |              |
|          |              |
| 6.1      | Résumé       |
| 6.1.1    |              |
| 6.1.2    |              |
| 6.2      | Conduite     |
| 6.3      | Conduite     |
| 6.4      | Les          |
| 6.5      | Conduite     |
| 6.6      | Conduite     |

|   |                                                   |     |
|---|---------------------------------------------------|-----|
| 8 | 4.4.1 Cas d'un convergent (fig.4.5)               | 106 |
| 0 | 4.4.2 Cas d'un convergent divergent               | 107 |
| 2 | 4.5 Représentation dans le diagramme entropique   | 108 |
| 3 | 4.6 Présence des ondes de choc dans les conduites | 109 |
| 5 | Exercice                                          | 116 |
| 6 |                                                   |     |

**Chapitre 5**  
**ÉCOULEMENT AVEC CHAUFFAGE OU**  
**REFROIDISSEMENT**

|    |                                      |     |
|----|--------------------------------------|-----|
| 56 | 5.1 Equations de base                | 119 |
| 58 | 5.2 Résolution du système d'équation | 120 |
| 62 | 5.3 Application                      | 126 |
| 62 | Exercices                            | 127 |
| 63 |                                      |     |
| 65 |                                      |     |

**Chapitre 6**  
**ANNEXES**

|     |                                                                                                                                                                                                                        |     |
|-----|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| 71  | 6.1 Relations mathématiques                                                                                                                                                                                            | 129 |
| 71  | 6.1.1 Passage d'une intégrale surfacique à une surface volumique                                                                                                                                                       | 129 |
| 78  | 6.1.2 Théorème de Gauss                                                                                                                                                                                                | 129 |
| 80  | 6.2 Caractéristique de l'atmosphère standard en fonction de l'altitude (NASA).                                                                                                                                         | 129 |
| 81  | 6.3 Grandeurs thermodynamiques et le rapport de sections en fonction du nombre de Mach pour un écoulement unidimensionnel et isentropique ( $\gamma = 1.4$ ).                                                          | 130 |
| 85  | 6.4 Les rapports des grandeurs thermodynamiques en fonction du nombre de Mach $M_1$ au travers une onde de choc normale ( $\gamma = 1.4$ ).                                                                            | 136 |
| 86  | 6.5 Grandeurs $4fL^*/D$ , $P/P^*$ , $T/T^*$ , $\rho/\rho^*$ et $P_0/P_0^*$ en fonction de $M$ d'un écoulement avec frottement dans une conduite à section constante ( $\gamma = 1.4$ ), Courbe de FANNO.               | 140 |
| 88  | 6.6 Grandeurs $T_0/T_0^*$ , $P/P^*$ , $T/T^*$ , $\rho/\rho^*$ et $P_0/P_0^*$ en fonction de $M$ d'un écoulement avec échange de chaleur dans une conduite à section constante ( $\gamma = 1.4$ ), Courbes de RAYLEIGH. | 142 |
| 90  |                                                                                                                                                                                                                        |     |
| 93  |                                                                                                                                                                                                                        |     |
| 93  |                                                                                                                                                                                                                        |     |
| 98  |                                                                                                                                                                                                                        |     |
| 105 |                                                                                                                                                                                                                        |     |

# DYNAMIQUE DES GAZ

## Écoulements compressibles

Cet ouvrage constitue une base indispensable pour les étudiants en deuxième cycle universitaire et aux ingénieurs en vue de préparer le diplôme d'ingénieur ou le Master en Génie Mécanique, option thermoénergétique.

Le premier chapitre donne une généralité sur les écoulements compressibles et leurs caractéristiques. Le deuxième chapitre traite les écoulements isentropiques dans les tuyères. Le troisième traite l'écoulement au travers une onde de choc normale. Le quatrième fait l'objet d'un écoulement compressible avec frottement dans une conduite et enfin le cinquième chapitre tient compte de l'échange de chaleur entre l'écoulement et le milieu extérieur. En annexe on trouve les tables nécessaires qui peuvent être utilisés pour faciliter les calculs.

L'auteur est enseignant à l'université des sciences et de la technologie Houari Boumediene. Il est maître de conférences au département de thermoénergétique et il assure les modules de dynamique des gaz et turbomachines aux étudiants qui préparent l'ingénieur ou le Master. Ingénieur polytechnicien en mécanique, il a obtenu son Magister et son doctorat d'état en énergétique à l'école nationale polytechnique.



Actuellement il persévère dans ses recherches dans les écoulements compressibles à hautes températures dans les tuyères et autour d'obstacles dont les résultats ont été publiés dans des conférences internationales.

L'éditeur



Prix : 300 DA

حي 360 ميسكن شارع الأخوة عيسو عمارة C 25  
بن عكنون - الجزائر العاصمة  
الهاتف : 0770.82.28.85 - 0790.87.72.97  
هاتف / فاكس : 021.94.50.48  
site web : [www.daressabil.com](http://www.daressabil.com)  
email : [daressabil@hotmail.fr](mailto:daressabil@hotmail.fr)

