

SOMMAIRE

<u>INTRODUCTION</u>	11
<u>PARTIE A - RAPPELS ET COMPLEMENTS DE THERMODYNAMIQUE DES GAZ ET DES SYSTEMES</u>	
Chapitre I - SYSTEMES ET VARIABLES CARACTERISTIQUES	14
1. Définition et classification	14
2. Equilibre d'un système	16
2.1 Etats stationnaires	16
2.2 Etats d'équilibre	16
3. Equations d'état thermique et énergétique	17
3.1 Les fonctions d'état	17
3.2 Equation caractéristique d'état thermique	18
3.3 Equation caractéristique d'état énergétique	23
3.4 Calcul analytique et numérique des propriétés thermomécaniques à haute pression et haute température	23 30
Chapitre II - FONCTIONS CARACTERISTIQUES	34
1. Fonctions caractéristiques d'état	
1.1 Rôle des fonctions caractéristiques	34
1.2 Cas de mélanges	38
2. Conditions d'équilibre thermodynamique	43
3. Application à l'étude de l'équilibre des phases	44
3.1 Enoncé des propriétés générales	44
3.1 Enthalpie et entropie de changement de phase	46
3.3 Relation de Clapeyron	46
3.4 Chaleur latente de vaporisation isochore	48
Chapitre III - LES SYSTEMES OUVERTS	49
1. Paramètres spécifiques	49
1.1 Paramètres de position et de vitesse	49
1.2 Surfaces de contrôle et échanges	51
2. Bilan de matière	53
3. Bilan d'énergie	54
3.1 Forme générale de l'énergie totale	54
3.2 Expression des travaux	55
4. Bilan d'entropie	60
5. Bilan de quantité de mouvement	62
6. Application aux écoulements dans les tuyères	63
6.1 Hypothèses	63
6.2 Théorie de la tuyère et relations thermodynamiques	63
Chapitre IV - LES DIAGRAMMES THERMODYNAMIQUES	67
1. Quel diagramme pour quelle application	67
2. Le diagramme entropique	69
3. Le diagramme h-s	75
3. Retour sur les écoulements en tuyère	77

<u>PROBLEMES DE SYNTHESE</u>	82
<u>PARTIE B - PROPRIETES DES GAZ ET SYSTEMES REACTIFS</u>	
Chapitre V - DEFINITIONS ET PROPRIETES	91
1. Principaux combustibles et comburants	91
2. Lois de bilans	91
3. Définitions	92
3.1 Stœchiométrie	92
3.2 Dilution	92
3.3 Richesse	93
3.4 Excès d'air	93
3.5 Rapport de mélange et autre paramètre caractéristique	93
3.6 Composition des produits dans l'état de référence	94
4. Effet thermique des réactions chimiques	95
4.1 Définitions	95
4.2 Calcul à priori des enthalpies de réaction	97
4.3 Facteurs de variation de l'effet thermique des réactions	98
5. Calcul pratique des pouvoirs calorifiques	100
5.1 Définition	100
5.2 Différents pouvoirs calorifiques	100
5.3 Relation entre ces grandeurs	101
5.4 Ordres de grandeur	101
5.5 Unités	101
Chapitre VI - CALCUL DE LA COMPOSITION DES PRODUITS	103
1. Notations et conventions	103
1.1 Représentation	103
1.2 Notation	103
2. Condition d'équilibre thermodynamique complet	104
2.1 Enthalpie libre de mélange	104
2.2 Degré d'avancement d'une réaction	105
2.3 Affinité d'une réaction d'équilibre	107
2.4 Conclusion et stratégie de calcul	107
3. Expression du potentiel chimique	107
4. Constante d'équilibre d'une réaction	108
4.1 Définition	108
4.2 Propriétés de la constante d'équilibre	109
4.3 Autre formulation de la constante d'équilibre	110
4.4 Calculs d'équilibre impliquant peu d'espèces	110
4.5 Généralisation des calculs d'équilibre : méthode numérique	113
Chapitre VII - PROPRIETES ENERGETIQUES DES PRODUITS DE REACTION EN EQUILIBRE COMPLET	118
1. Enthalpie des gaz brûlés en équilibre	118
2. Calcul de la température de flamme	119
2.1 Introduction	119

2.2	Température de flamme isobare adiabatique	120
2.3	Température de flamme isochoire adiabatique	123
3.	Codes de calcul et données thermochimiques	131
3.1	Les codes de calcul	131
3.2	Les sources de données	133

PROBLEMES DE SYNTHESE	134
-----------------------	-----

PARTIE C - LES SYSTEMES PROPULSIFS

Chapitre VIII - LES SYSTEMES PROPULSIFS : GENERALITES ET GRANDEURS FONDAMENTALES	143
1. Classification des propulseurs	143
1.1 Systèmes aérobies	143
1.2 Systèmes anaérobies	143
2. Poussée d'un propulseur	144
2.1 Bilan de quantité de mouvement	144
2.2 Calcul de la poussée (nette et brute)	145
2.3 L'inversion de poussée	146
2.4 Poussée, impulsion et consommation spécifiques	147
2.5 Calcul de la poussée dans une tuyère	148
3. Rendement d'un propulseur	151
3.1 Rendement thermique	151
3.2 Rendement propulsif	151
3.3 Rendement global	152

Chapitre IX - SYSTEMES PROPULSIFS ANAEROBIES : LE MOTEUR FUSEE	153
1. Caractéristiques générales des compositions propulsives	153
1.1 Les oxydants liquides	154
1.2 Les combustibles liquides	154
1.3 Les réactifs solides	156
1.4 Les systèmes hypergoliques	156
1.5 Les différentes architectures	157
2. Accélération du véhicule	157
3. Grandeurs fondamentales	159
3.1 Composition réactive	159
3.2 Consommation	159
3.3 Effet sur la masse du véhicule	159
3.4 Rapport poussée/poids	159
3.5 Exemples illustratifs	160
4. Énergie et rendements	161
5. Les étages d'accélération à poudre	162
5.1 Mode de combustion de la charge de propergol solide	162
5.2 Architecture de la charge de propergol solide	164
5.3 Les instabilités acoustiques	165
5.4 Coefficient de serrage	166
5.5 Résumé : Ariane 5 et la navette américaine	166
6. Combustion et poussée en mode cryogénique	168

6.1	Données disponibles	169
6.2	Conditions au col	170
6.3	Conditions à l'éjection	170
6.4	Poussée du propulseur	170
7.	Alimentation en ergols cryogéniques	172
7.1	Architecture générale	172
7.2	Caractéristiques des produits à la sortie du générateur de gaz	173
7.3	Dimensionnement des turbopompes	
Chapitre X - INTRODUCTION AUX SYSTEMES DE PROPULSION AEROBIE		178
1.	Introduction générale et notations	178
1.1	Le turboréacteur	180
1.2	Le turboréacteur avec postcombustion	180
1.3	Le turboréacteur à double flux avec soufflante	181
1.4	Le statoréacteur	181
1.5	Le turbopropulseur	181
2.	Caractérisation des organes	183
2.1	Entrée d'air	183
2.2	Compresseur	183
2.3	Chambre de combustion	186
2.4	Turbine	187
2.5	Tuyère	187
2.6	Intégration du système propulsif sur l'aéronef	187
3.	Technique de calcul	187
3.1	Notations	187
3.2	Analyse de cycle	188
3.3	Hypothèses de calcul	189
4.	Données initiales et outils de calcul	190
4.1	Données initiales	190
4.2	Exemple d'élaboration d'outils pour un avant-projet	190
Chapitre XI - LE TURBOREACTEUR		197
1.	Les différentes étapes de l'air	197
1.1	Entrée d'air	197
1.2	Compresseur	198
1.3	Chambre de combustion	199
1.4	Turbine	200
1.5	Tuyère	200
2.	Analyse du cycle en fonctionnement réel	201
2.1	Expression générale de la poussée	201
2.2	Vitesse d'éjection	202
2.3	Nombre de Mach et pression à l'éjection	202
2.4	Température à l'éjection	203
2.5	Calcul de la dilution	203
2.6	Equilibre turbine-compresseur	204
2.7	Reformulation de la poussée spécifique	204
2.8	Consommation spécifique	205
2.9	Rendements thermique et propulsif	205

2.1	Expression générale de la poussée	226
2.2	Vitesse d'éjection	226
2.3	Nombre de Mach et pression à l'éjection	226
2.4	Température à l'éjection	227
2.5	Calcul de la dilution	227
2.6	Equilibre turbine-compresseur	228
2.7	Reformulation de la poussée spécifique	228
2.8	Consommation spécifique	229
2.9	Rendements thermique et propulsif	229
2.10	Synthèse des données nécessaires au calcul	229
3.	Exemple de calcul	229
Chapitre XIV - L'ACCELERATEUR A EFFET STATO		231
1.	Principe de fonctionnement	231
1.1	Les régimes de fonctionnement	233
1.2	Pression et nature des mélanges mis en œuvre	235
1.3	Le lancement et le guidage du projectile	236
1.4	Facteurs limitant le fonctionnement	237
2.	Analyse monodimensionnelle du phénomène	238
3.	Evolution de la poussée	244
<u>PROBLEMES DE SYNTHESE</u>		249
<u>BIBLIOGRAPHIE</u>		261
<u>ANNEXE : DONNEES THERMOCHIMIQUES</u>		262
<u>INDEX</u>		279