

TECHNOSUP

Les FILIÈRES TECHNOLOGIQUES des ENSEIGNEMENTS SUPÉRIEURS

PROPULSION

La propulsion par fusée

Technologie des fusées
Du moteur à l'architecture

Pascal BAUER

Adam BRUCKNER

Handwritten-style text in a cursive script, likely bleed-through from the reverse side of the page.

ellipses

Sommaire

PARTIE A - CONCEPTS GÉNÉRAUX ET OUTILS THERMODYNAMIQUES	9
CHAPITRE I – ASPECTS FONDAMENTAUX DE LA PROPULSION ANAÉROBIE	10
1. Classification des propulseurs	10
2. Poussée d'un propulseur	10
2.1 Bilan de quantité de mouvement	10
2.2 Calcul de la poussée nette	13
2.3 Evolution de la vitesse	14
3. Paramètres spécifiques à la propulsion par fusée.....	16
3.1 Le paramètre impulsion	16
3.2 Divers rapports de masse	18
3.3 Vol vertical d'une fusée en présence de forces de gravité	20
4. Énergie et rendements.....	23
Chapitre II – CLASSIFICATION ET PARAMÈTRES TECHNOLOGIQUES	25
1. Les compositions propulsives	25
2. Les différentes configurations	27
3. Les différentes technologies de moteurs	28
3.1 Les gaz comprimés	28
3.2 Les moteurs à base de monergol liquide : cas de l'hydrazine.....	28
3.3 Les moteurs à base de propergols liquides	29
3.4 Les moteurs à base de propergols solides.....	29
3.5 Les moteurs hybrides.....	30
4. Architectures et grandeurs spécifiques	31
4.1 Fonctionnement en étages	31
4.2 Configuration en mode série	31
4.3 Configuration en mode parallèle	33
Chapitre III – LES TUYÈRES : ÉQUATIONS GÉNÉRALES ET OPTIMISATION DES EFFETS PROPULSIFS	36
1. Configuration générale et hypothèses de calcul	36
2. Hypothèses et aspects analytiques.....	38
2.1 Bilan énergétique	38
2.2 Bilan massique	40
2.3 Corrections susceptibles d'être apportées.....	41
3. Optimisation des performances propulsives	43
3.1 Reformulation de la poussée	43

3.2 Le coefficient de poussée	44
3.3 Optimisation de la géométrie de la tuyère	46
4. Comportement de la tuyère	49
4.1 Les caractéristiques de l'atmosphère	49
4.2 Le mécanisme de séparation du jet.....	52
4.3 Les différentes configurations géométriques et les profils de référence	55
4.4 L'adaptation des tuyères à l'altitude	56
4.5 Prise en compte et modélisation de l'écoulement diphasique	59
Chapitre IV – DONNÉES SYNTHÉTIQUES SUR LES COMBUSTIBLES ET OXYDANTS LIQUIDES	62
1. Caractéristiques thermodynamiques des agents propulsifs	62
2. Les combustibles liquides	62
2.1 Les combustibles cryogéniques	62
2.2 Les combustibles non-cryogéniques.....	67
3. Les oxydants liquides	75
3.1 L'oxygène liquide et ses composés azotés	75
3.2 L'acide nitrique fumant	76
3.3 Le peroxyde d'hydrogène	78
3.4 L'oxyde nitrique	78
3.5 Le Fluor liquide et ses composés	79
3.6 L'ozone liquide	80
Chapitre V – CALCULS THERMOCHIMIQUES DES COMPOSITIONS PROPULSIVES	82
1. Définitions et propriétés	82
2. Lois de bilans	82
3. Définitions	83
3.1 Stœchiométrie.....	83
3.2 Dilution (rapport de mélange)	84
3.3 Richesse	84
3.4 Composition des produits à la température de référence ($T^* = 298\text{ K}$)	85
4. Effet thermique des réactions chimiques.....	86
4.1 Définitions	86
4.2 Calcul à priori des enthalpies de réaction	88
4.3 Facteurs de variation de l'effet thermique des réactions	90
5. Calcul pratique des pouvoirs calorifiques	93
5.1 Définition	93
5.2 Différents pouvoirs calorifiques et relation entre ces grandeurs	94
5.3 Ordres de grandeur.....	94
5.4 Unités	94
6. Composition des produits de réaction en équilibre complet	95
6.1 Réaction vive et réactions d'équilibre.....	95
6.2 Notations et conventions	96
6.3 Condition d'équilibre thermodynamique complet	97
6.4 Expression du potentiel chimique	100

6.5 Constante d'équilibre d'une réaction	101
6.6 Calculs d'équilibre dans des situations impliquant peu d'espèces.....	103
6.7 Généralisation des calculs d'équilibre : méthode numérique.....	106
7. Enthalpie des gaz brulés en équilibre.....	112
8. Calcul de la température de flamme.....	114
8.1 Objectif.....	114
8.2 Température de flamme isobare adiabatique.....	114
8.3. Intensité de combustion isobare	115
Chapitre VI – CODES DE CALCULS THERMOCHIMIQUES	116
1. Panorama des codes existants	116
1.1 Code STANJAN	116
1.2 Code QUARTET	117
1.3 Code CEA de NASA.....	117
1.4 code CANTERA	118
1.5 Autres codes	118
2. Les sources de données	119
3. Calculs appliqués au moteur Vulcain (ARIANE V).....	119
3.1 Remarques préalables sur les spécificités pour les calculs de propulsion	119
3.2 Les données et le mode de calcul	120
PARTIE B – LES MOTEURS.....	125
Chapitre VII – LES MOTEURS À PROPULSIFS LIQUIDES	126
1. Les classes de moteurs	127
2. Longueur caractéristique de chambre	128
3. Les systèmes d'alimentation	128
3.1 Choix du système	129
3.2 Alimentation par gaz pressurisé	131
3.3 Alimentation par turbopompe	136
3.4 Calcul et dimensionnement des turbopompes.....	141
4. Configuration des réservoirs d'ergols	143
5. Aspect thermique : le refroidissement de la chambre et de la tuyère	146
Chapitre VIII – LES MOTEURS À PROPERGOL SOLIDE	146
1. Mode de combustion de la charge de propergol solide	146
2. Différentes classes de propergol solide	146
2.1 Configuration hétérogène (composite)	146
2.2 Configuration homogène (double – base)	146
2.3 Substances complémentaires	147
3. Architecture de la charge.....	147
4. Bilan massique	149
5. Détermination de la géométrie de tuyère et de la pression dans la chambre.....	151
6. Lois de variations de la vitesse de combustion en fonction de la température.....	154
7. Les propergols composites et les additifs.....	155

7.1 Les oxydants	155
7.2 Les liants (combustibles)	157
7.3 Les additifs solides	157
8. Les propergols à double base et les additifs	157
9. Critères de conception de la chambre de combustion et de la tuyère	159
10. Les facteurs influents	159
10.1 La combustion érosive	159
10.2 L'accélération	160
10.3 Les effets thermiques	161
11. Les instabilités acoustiques	163
12. Quelques données chiffrées	164
13. Sur les caractéristiques propulsives de la tuyère	165
Chapitre IX – LES MOTEURS HYBRIDES.....	167
1. Présentation générale	167
2. Les différentes options en termes de fluide propulsif	168
3. Modalités d'allumage des compositions propulsives	169
4. Ecoulement dans le moteur et processus de combustion	169
5. Equations générales en écoulement stationnaire et performances de combustion	172
6. Les instabilités acoustiques	174
7. Les améliorations attendues	176
PARTIE C – PROBLÈMES DE SYNTHÈSE	177
THERMOCHIMIE	178
PROPULSION	186
BIBLIOGRAPHIE	192
ANNEXE : DONNÉES THERMOCHIMIQUES.....	194
1. Grandeurs thermodynamiques usuelles pour les constituants les plus fréquemment rencontrés dans les produits de réaction	194
2. Caractéristiques thermochimiques de quelques réactifs usuels (gazeux et liquides)	200
3. Constantes d'équilibre thermochimique des réactions les plus courantes.....	201
4 Enthalpies de dissociation (δH_p) de quelques réactions.....	209
INDEX	210