





Table des matières


| | |
|---|-----------|
| Nomenclature | ix |
| 1 Introduction | 1 |
| 1.1 Une démarche méthodologique à deux niveaux | 1 |
| 1.2 Objectifs poursuivis, contenu de l'ouvrage | 4 |
| 1.3 Démarche méthodologique | 6 |
| 1.3.1 Modélisation systémique : le système général | 6 |
| 1.3.2 Analyse-système des technologies énergétiques | 8 |
| 1.3.3 Modélisation des composants | 9 |
| 1.3.4 Les types primitifs de Thermoptim | 9 |
| 1.3.4.1 Propriétés thermodynamiques des corps | 10 |
| 1.3.4.2 État d'une masse fluide : les points | 11 |
| 1.3.4.3 Transformations | 11 |
| 1.3.4.4 Noeuds | 11 |
| 1.3.4.5 Échangeurs | 12 |
| 1.3.4.6 Composants de l'éditeur de schémas | 12 |
| 1.3.4.7 Projets | 13 |
| 1.3.5 Atouts de Thermoptim | 14 |
| 1.3.6 Principe de construction des modèles | 15 |
| 2 Bases de thermodynamique | 17 |
| 2.1 Notions fondamentales, définitions | 18 |
| 2.1.1 Systèmes ouverts et fermés | 18 |
| 2.1.2 État d'un système, grandeurs intensives et extensives | 19 |
| 2.1.3 Phase, corps purs, mélanges | 20 |
| 2.1.4 Équilibre, transformation réversible | 21 |
| 2.1.5 Température | 21 |
| 2.1.6 Notations | 21 |
| 2.2 Échanges d'énergie au cours d'une transformation | 22 |
| 2.2.1 Travail δw des forces externes sur un système fermé | 22 |
| 2.2.2 Transferts de chaleur | 24 |
| 2.3 Premier principe de la thermodynamique | 25 |
| 2.3.1 Définition de l'énergie interne u (systèmes fermés) | 25 |
| 2.3.2 Application à une masse fluide | 26 |
| 2.3.3 Travail fourni, travail utile τ | 27 |
| 2.3.3.1 Démonstration | 28 |
| 2.3.3.2 Cas particulier d'une transformation réversible | 29 |
| 2.3.4 Travail utile et enthalpie (systèmes ouverts) | 29 |
| 2.3.5 Établissement des bilans enthalpiques | 30 |
| 2.3.6 Application aux processus industriels | 31 |
| 2.4 Deuxième principe de la thermodynamique | 32 |
| 2.4.1 Définition de l'entropie | 33 |

| | | |
|---------|---|----|
| 2.4.2 | Irréversibilités | 34 |
| 2.4.2.1 | Irréversibilités mécaniques | 35 |
| 2.4.2.2 | Irréversibilités par hétérogénéité de température | 36 |
| 2.4.3 | Efficacité de Carnot des machines thermiques | 36 |
| 2.4.4 | Relations fondamentales pour une phase | 38 |
| 2.4.5 | Potentiels thermodynamiques | 38 |
| 2.4.5.1 | Énergie libre et enthalpie libre | 38 |
| 2.4.5.2 | Relations d'équilibre pour les réactions chimiques | 39 |
| 2.5 | Exergie | 40 |
| 2.5.1 | Présentation de l'exergie pour un système monotherme ouvert en régime permanent | 40 |
| 2.5.2 | Système ouvert multitherme en régime permanent | 42 |
| 2.5.3 | Application à une machine ditherme réversible | 43 |
| 2.5.4 | Cas particulier : échanges thermiques sans production de travail | 43 |
| 2.5.5 | Rendement exergetique | 43 |
| 2.6 | Représentation des propriétés des corps | 44 |
| 2.6.1 | Phases solide, liquide, gazeuse | 44 |
| 2.6.2 | Gaz parfaits et idéaux | 45 |
| 2.6.2.1 | Équation d'état des gaz idéaux | 46 |
| 2.6.2.2 | Détermination pratique de l'état d'un gaz parfait | 47 |
| 2.6.2.3 | Détermination pratique de l'état d'un gaz idéal | 48 |
| 2.6.2.4 | Équation des isentropiques | 50 |
| 2.6.3 | Mélanges de gaz idéaux | 50 |
| 2.6.3.1 | Fractions molaires et fractions massiques | 50 |
| 2.6.3.2 | Loi de Dalton des gaz idéaux | 51 |
| 2.6.3.3 | Propriétés énergétiques des mélanges de gaz idéaux | 52 |
| 2.6.4 | Les liquides et les solides | 53 |
| 2.6.5 | Équilibre liquide - vapeur d'un corps pur | 53 |
| 2.6.5.1 | Loi de pression saturante | 54 |
| 2.6.5.2 | Titre en vapeur | 54 |
| 2.6.5.3 | Enthalpie de vaporisation | 54 |
| 2.6.5.4 | Calcul des propriétés du mélange | 55 |
| 2.6.6 | Représentations des fluides réels | 55 |
| 2.6.6.1 | Diagrammes thermodynamiques | 56 |
| 2.6.6.2 | Équations des gaz réels | 62 |
| 2.6.6.3 | Tables thermodynamiques | 65 |
| 2.6.6.4 | Équations d'état retenues dans Thermoptim | 65 |
| 2.6.7 | Mélanges humides | 68 |
| 2.6.7.1 | Définitions et conventions | 69 |
| 2.6.7.2 | Principes de calcul | 69 |
| 2.6.7.3 | Principales relations | 70 |
| 2.6.7.4 | Températures utilisées pour les mélanges humides | 72 |
| 2.6.7.5 | Diagrammes des mélanges humides (diagrammes psychrométriques) | 73 |

| | |
|---|-----|
| 3 Présentation de ThermoOptim | 75 |
| 3.1 Généralités | 75 |
| 3.1.1 Les modules d'initiation | 76 |
| 3.1.2 Les diagrammes interactifs | 77 |
| 3.1.3 Les quatre environnements de travail de ThermoOptim | 79 |
| 3.2 Éditeur de schémas | 81 |
| 3.2.1 Présentation de l'éditeur | 81 |
| 3.2.2 Propriétés des composants graphiques | 81 |
| 3.2.2.1 Éditeur de propriétés | 81 |
| 3.2.2.2 Placement d'un composant | 82 |
| 3.2.2.3 Connexions entre les composants | 83 |
| 3.2.3 Liaisons entre le simulateur et les schémas | 83 |
| 3.2.3.1 Création et mise à jour des éléments du simulateur | 84 |
| 3.2.3.2 Création d'un schéma à partir du simulateur | 85 |
| 3.2.3.3 Connexions entre deux nœuds | 85 |
| 3.3 Environnement de simulation | 86 |
| 3.3.1 Écran principal | 86 |
| 3.3.2 Principaux menus | 87 |
| 3.3.3 Exportation des résultats sous forme de fichier texte | 88 |
| 3.3.4 Écran de définition et d'évaluation des points | 88 |
| 3.3.4.1 Systèmes ouverts | 89 |
| 3.3.4.2 Systèmes fermés | 91 |
| 3.3.5 Calcul des propriétés humides d'un point | 91 |
| 3.3.5.1 Représentation par un mélange humide | 91 |
| 3.3.5.2 Calcul des caractéristiques humides | 92 |
| 3.3.5.3 Imposer l'humidité relative | 93 |
| 3.3.5.4 Représentation par un gaz sec | 93 |
| 3.3.6 Écrans des nœuds | 94 |
| 3.3.6.1 Mélangeur  | 94 |
| 3.3.6.2 Diviseur  | 94 |
| 3.3.6.3 Séparateur (ou sécheur)  | 95 |
| 4 Composants et transformations élémentaires | 97 |
| 4.1 Compressions | 97 |
| 4.1.1 Thermodynamique de la compression | 98 |
| 4.1.2 Compressions de référence | 98 |
| 4.1.2.1 Compression isotherme réversible | 98 |
| 4.1.2.2 Compression adiabatique réversible | 99 |
| 4.1.3 Compressions réelles | 99 |
| 4.1.3.1 Adiabatique réelle | 99 |
| 4.1.3.2 Polytropique de la compression adiabatique | 100 |
| 4.1.3.2.1 Approche différentielle de la polytropique | 100 |
| 4.1.3.2.2 Approche intégrale de la polytropique | 101 |
| 4.1.3.2.3 Équivalence entre les deux approches pour les gaz parfaits | 101 |
| 4.1.3.2.4 Formulations pour les gaz idéaux | 103 |

| | | |
|-----------|--|-----|
| 4.1.3.3 | Polytropique de la compression non adiabatique | 104 |
| 4.1.3.3.1 | Calcul pratique | 106 |
| 4.1.3.3.2 | Cas limite de la compression isotherme | 107 |
| 4.1.4 | Compressions étagées | 107 |
| 4.1.5 | Calcul d'une compression \triangleright dans ThermoOptim | 108 |
| 4.2 | Compresseurs volumétriques | 110 |
| 4.2.1 | Compresseur à pistons | 110 |
| 4.2.1.1 | Bilan énergétique théorique | 111 |
| 4.2.1.2 | Cycle réel du compresseur à pistons | 112 |
| 4.2.1.3 | Détermination du travail par cycle | 113 |
| 4.2.1.4 | Rendement volumétrique λ | 114 |
| 4.2.1.5 | Rendement de compression η | 114 |
| 4.2.1.6 | Calcul pratique d'un compresseur à pistons | 115 |
| 4.2.2 | Compresseurs hélicoïdaux | 116 |
| 4.2.2.1 | Rendement de compression | 117 |
| 4.2.2.2 | Rendement volumétrique | 118 |
| 4.2.3 | Critères de choix entre les compresseurs volumétriques | 119 |
| 4.3 | Turbocompresseurs | 119 |
| 4.3.1 | Généralités | 119 |
| 4.3.2 | Thermodynamique des écoulements permanents | 121 |
| 4.3.2.1 | Fluide compressible parfait en régime permanent | 121 |
| 4.3.2.2 | Fluide compressible visqueux en régime permanent | 122 |
| 4.3.2.3 | Écoulements adiabatiques | 122 |
| 4.3.2.4 | Variations de la pression et de la vitesse du fluide dans un compresseur | 125 |
| 4.3.3 | Performances et similitude des turbomachines | 127 |
| 4.3.3.1 | Caractéristiques des turbocompresseurs | 129 |
| 4.3.3.2 | Pompage des turbocompresseurs | 131 |
| 4.3.4 | Calcul pratique d'un turbocompresseur | 133 |
| 4.4 | Comparaison entre les divers types de compresseurs | 134 |
| 4.4.1 | Comparaison des turbocompresseurs et compresseurs volumétriques | 134 |
| 4.4.2 | Comparaison entre les turbocompresseurs | 136 |
| 4.5 | Détentes | 136 |
| 4.5.1 | Thermodynamique de la détente | 136 |
| 4.5.1.1 | Détente irréversible | 137 |
| 4.5.1.2 | Détente polytropique | 137 |
| 4.5.1.3 | Calcul d'une polytropique réchauffée pour un système ouvert | 137 |
| 4.5.2 | Calcul d'une détente \triangleleft dans ThermoOptim | 138 |
| 4.5.3 | Turbines | 138 |
| 4.5.4 | Caractéristiques des turbines | 139 |
| 4.5.5 | Degré de réaction d'un étage | 140 |
| 4.6 | Combustions | 141 |
| 4.6.1 | Phénomènes de combustion, mécanismes de base | 142 |
| 4.6.1.1 | Réactions complètes, dissociation | 142 |
| 4.6.1.2 | Combustion des mélanges combustibles gazeux | 143 |

| | |
|--|-----|
| 4.6.1.3 Combustion des combustibles liquides | 145 |
| 4.6.1.4 Thermodynamique de la combustion à l'équilibre | 146 |
| 4.6.1.5 Éléments de cinétique chimique | 148 |
| 4.6.1.6 Température de figeage | 149 |
| 4.6.2 Étude des combustions complètes | 150 |
| 4.6.2.1 Composition de l'air | 150 |
| 4.6.2.2 Composition du combustible | 150 |
| 4.6.2.3 Combustion stœchiométrique | 151 |
| 4.6.2.4 Combustion non stœchiométrique | 152 |
| 4.6.3 Étude des combustions incomplètes | 153 |
| 4.6.3.1 Mécanismes de formation des imbrûlés | 154 |
| 4.6.3.2 Composition des fumées sans suies ni hydrocarbures imbrûlés | 155 |
| 4.6.3.3 Composition des fumées avec suie et sans co ni hc | 160 |
| 4.6.3.4 Composition des fumées sans suies et avec co et hc | 160 |
| 4.6.3.5 Analyses des fumées | 161 |
| 4.6.4 Propriétés énergétiques des réactions de combustion | 162 |
| 4.6.4.1 Propriétés thermodynamiques des espèces en réaction | 162 |
| 4.6.4.2 Enthalpies de formation | 163 |
| 4.6.4.3 Entropies de référence | 164 |
| 4.6.4.4 Chaleurs de réaction | 164 |
| 4.6.4.5 Pouvoirs calorifiques supérieur et inférieur | 165 |
| 4.6.4.6 Température adiabatique de flamme | 166 |
| 4.6.4.7 Combustion dans les chaudières | 167 |
| 4.6.4.7.1 Pouvoirs comburivore et fumigène | 167 |
| 4.6.4.7.2 Relations avec l'excès d'air et la composition des fumées | 168 |
| 4.6.4.7.3 Tableaux récapitulatifs de combustion | 170 |
| 4.6.4.8 Rendement de combustion | 170 |
| 4.6.5 Émissions de polluants gazeux | 171 |
| 4.6.6 Calcul des combustions  dans Thermoptim | 173 |
| 4.6.6.1 Déclaration du combustible | 173 |
| 4.6.6.2 Systèmes ouverts et systèmes fermés | 175 |
| 4.6.6.3 Caractéristiques de la combustion | 175 |
| 4.6.6.4 Options de calcul | 176 |
| 4.6.6.5 Cas particulier d'un mélange combustible seul | 176 |
| 4.6.7 Aspects technologiques | 177 |
| 4.6.7.1 Chambres de combustion | 177 |
| 4.6.7.2 Chaudières | 178 |
| 4.7 Laminages | 179 |
| 4.8 Transformations humides | 180 |
| 4.8.1 Ecrans des transfos humides | 180 |
| 4.8.2 Mélangeurs humides | 182 |
| 4.8.2.1 Principe et équations mises en jeu | 182 |
| 4.8.2.2 Calcul d'un mélange dans Thermoptim | 183 |
| 4.8.3 Chauffage d'un mélange humide | 183 |
| 4.8.3.1 Principe et équations mises en jeu | 183 |

| | | |
|----------|--|------------|
| 4.8.3.2 | Calcul d'un chauffage dans Thermoptim | 184 |
| 4.8.4 | Refroidissement d'un mélange humide | 185 |
| 4.8.4.1 | Principe et équations mises en jeu | 185 |
| 4.8.4.2 | Calcul d'un refroidissement dans Thermoptim | 186 |
| 4.8.5 | Humidification d'un gaz | 186 |
| 4.8.5.1 | Principe et équations mises en jeu | 186 |
| 4.8.5.2 | Calcul d'une humidification dans Thermoptim | 188 |
| 4.8.6 | Déshumidification d'un mélange par dessiccation | 189 |
| 4.8.6.1 | Principe et équations mises en jeu | 189 |
| 4.8.6.2 | Calcul d'une dessiccation dans Thermoptim | 190 |
| 4.8.7 | Détermination des conditions de soufflage | 190 |
| 4.8.7.1 | Principe et équations mises en jeu | 190 |
| 4.8.7.2 | Calcul des conditions de soufflage dans Thermoptim | 192 |
| 5 | Échangeurs de chaleur | 193 |
| 5.1 | Principes de fonctionnement d'un échangeur | 193 |
| 5.1.1 | Flux de chaleur échangé | 194 |
| 5.1.2 | Coefficient d'échange thermique u | 195 |
| 5.1.3 | Efficacité des ailettes | 196 |
| 5.1.4 | Valeurs des coefficients de convection h | 196 |
| 5.2 | Calcul des échangeurs | 197 |
| 5.2.1 | Méthode du nombre d'unités de transfert | 197 |
| 5.2.2 | Relations entre ε et NUT | 199 |
| 5.2.2.1 | Échangeur à contre-courant | 199 |
| 5.2.2.2 | Échangeur à co-courant | 199 |
| 5.2.2.3 | Échangeurs à courants croisés | 200 |
| 5.2.2.4 | Échangeurs à tubes et calandre | 202 |
| 5.2.3 | Formulation matricielle | 203 |
| 5.2.4 | Assemblages d'échangeurs | 204 |
| 5.2.4.1 | Assemblages en série | 204 |
| 5.2.4.2 | Assemblage en série-parallèle | 206 |
| 5.2.5 | Lien avec la méthode de l'écart moyen logarithmique | 208 |
| 5.2.6 | Pincement d'un échangeur | 208 |
| 5.3 | Calcul des échangeurs dans Thermoptim | 209 |
| 5.3.1 | Transfos "échange"  | 209 |
| 5.3.2 | Création d'un échangeur dans l'éditeur de schémas | 210 |
| 5.3.3 | Écran des échangeurs | 210 |
| 5.3.4 | Dimensionnement des échangeurs simples | 211 |
| 5.3.5 | Liquide générique | 212 |
| 5.3.6 | Résolution des échangeurs en régime non nominal | 213 |
| 5.4 | Aspects technologiques | 213 |
| 5.4.1 | Échangeurs tubulaires | 213 |
| 5.4.1.1 | Échangeurs à tubes et calandre | 213 |
| 5.4.1.2 | Échangeurs à ailettes | 214 |
| 5.4.2 | Échangeurs à plaques | 214 |

| | |
|---|------------|
| 5.4.3 Autres types d'échangeurs | 214 |
| 6 Exemples d'applications | 215 |
| 6.1 Cycle de centrale électrique à vapeur | 215 |
| 6.1.1 Principe de la machine et données du problème | 215 |
| 6.1.2 Création du schéma | 216 |
| 6.1.3 Création des éléments du simulateur | 219 |
| 6.1.4 Paramétrage des points | 220 |
| 6.1.5 Paramétrage des transfos | 221 |
| 6.1.6 Tracé du cycle sur diagramme thermodynamique | 223 |
| 6.1.7 Dimensionnement du condenseur | 224 |
| 6.1.8 Améliorations du cycle | 228 |
| 6.1.8.1 Cycle avec resurchauffe | 228 |
| 6.1.8.2 Cycle avec prélèvement | 228 |
| 6.1.9 Modification du modèle | 229 |
| 6.2 Cycle de réfrigération mono-étagé à compression | 231 |
| 6.2.1 Principe de la machine et données du problème | 231 |
| 6.2.2 Création du schéma | 232 |
| 6.2.3 Création des éléments du simulateur | 234 |
| 6.2.4 Paramétrage des points | 236 |
| 6.2.5 Paramétrage des transfos | 237 |
| 6.3 Cycle de turbine à gaz | 239 |
| 6.3.1 Principe de la machine et données du problème | 239 |
| 6.3.2 Création du schéma | 239 |
| 6.3.3 Création des éléments du simulateur | 242 |
| 6.3.4 Paramétrage des points | 243 |
| 6.3.5 Paramétrage des transfos | 244 |
| 6.4 Installation de conditionnement d'air | 246 |
| 6.4.1 Principe de l'installation et données du problème | 246 |
| 6.4.2 Conditions de soufflage | 248 |
| 6.4.3 Propriétés du mélange (air extérieur / air recyclé) | 249 |
| 6.4.4 Traitement de l'air | 250 |
| 6.4.5 Représentation sur diagramme psychrométrique | 251 |
| Bibliographie sommaire | 253 |
| Ouvrages généraux | 253 |
| Bases de thermodynamique | 253 |
| Propriétés des corps | 254 |
| Combustion | 254 |
| Compresseurs volumétriques | 255 |
| Turbomachines | 255 |
| Échangeurs de chaleur | 255 |
| Annexe : tableaux | 257 |
| Index | 262 |