

Table des matières

Nomenclature	xi
Avant propos	xv
étendre les capacités de ThermoOptim	xv
Introduire des composants personnalisés	xvi
Pouvoir effectuer des modélisations avancées	xix
Mettre au point des modèles simplifiés des systèmes étudiés	xxi
1 Classes externes génériques	1
1.1 Corps externes	1
1.1.1 Corps simples : exemple du Dowtherm A	1
1.1.1.1 Création de la classe	1
1.1.1.2 Méthodes de calcul des propriétés du corps	2
1.1.2 Couplage à des serveurs de propriétés thermodynamiques	3
1.1.2.1 Particularités des mélanges externes	3
1.1.2.2 Exemple de mélange externe : le système LiBr-H ₂ O	4
1.2 Capteurs solaires plans	4
1.2.1 Conception du composant externe	4
1.2.1.1 Généralités	4
1.2.1.2 Interface graphique	5
1.2.1.3 Modèle physique	5
1.2.1.4 Sauvegarde et chargement des paramètres du modèle	7
1.3 Calculs des mélanges humides dans les classes externes	8
1.3.1 Introduction	8
1.3.2 Méthodes disponibles dans les classes externes	9
1.3.2.1 Recherche de l'humidité d'un point	9
1.3.2.2 Mise à jour des propriétés humides d'un point	10
1.3.2.3 Exemple d'utilisation : modèle de saturateur	11
1.4 Combustions externes	14
1.4.1 Modèle de combustion de biomasse	14
1.4.1.1 Définition du combustible et déroulement de la combustion	14
1.4.1.2 Exemple de combustion en défaut d'air (gazéifieur)	15
1.4.1.3 Accès aux calculs de combustion à partir des classes externes	16
1.4.2 Présentation de la classe externe	17
1.5 Batteries de refroidissement avec condensation	18
1.5.1 Modélisation d'une batterie de refroidissement avec condensation	18
1.5.1.1 Modèle de la batterie de refroidissement avec condensation	19
1.5.1.2 Implémentation du modèle	20
1.5.2 Etude de la classe externe DehumidifyingCoil	21
1.6 Tours de refroidissement	23
1.6.1 Modélisation d'une tour de refroidissement à contact direct	23
1.6.1.1 Modèle de la tour de refroidissement à contact direct	23

1.6.1.2 Utilisation de la classe externe DirectCoolingTower	25
1.6.2 Etude de la classe externe DirectCoolingTower	26
1.7 Pilotes externes	28
1.7.1 Pilote de moteur Stirling	29
1.7.2 Création de la classe, interface visuelle	29
1.7.3 Reconnaissance des noms des composants	30
1.7.4 Calculs effectués et affichage	31
1.8 Gestionnaire de classes externes	31
2 Cycles de turbines à gaz avancés	33
2.1 Turbine à gaz à air humide	33
2.2 Cycles au CO ₂ supercritique	36
2.2.1 Cycle à régénération simple	39
2.2.2 Cycle à précompression	39
2.2.3 Cycle à recompression	41
2.2.4 Cycle à refroidissement partiel	42
2.3 Cycles combinés avancés	43
2.3.1 Cycle combiné à air	43
2.3.1.1 Cycle à faible rapport de compression et à basse température	45
2.3.1.2 Cycle à fort rapport de compression et à haute température	45
2.3.2 Cycle combiné à flash de vapeur	47
2.3.3 Cycle combiné à recompression de vapeur	48
2.3.4 Cycle de Kalina	50
2.4 Références	56
3 Evapoconcentration, compression mécanique de vapeur, dessalement, séchage par gaz chaud	59
3.1 Evapoconcentration	59
3.1.1 Cycle à simple effet	59
3.1.2 Cycle à effet multiple	60
3.1.3 Retard à l'ébullition	61
3.2 Compression mécanique de vapeur	62
3.2.1 Cycle évaporatif à compression mécanique de vapeur	62
3.2.2 Types de compresseurs utilisés	63
3.2.3 Paramètres de dimensionnement d'une CMV	64
3.3 Dessalement	65
3.3.1 Distillation à simple effet	66
3.3.2 Cycle de dessalement à double effet	66
3.3.3 Cycle de dessalement à compression mécanique de vapeur	67
3.3.4 Cycle de dessalement à éjecteur	68
3.3.5 Cycle de dessalement à détente successives (ou flash)	68
3.3.6 Dessalement par osmose inverse	70
3.4 Séchage par gaz chaud	73
3.5 Références	74
4 Cycles cryogéniques	75
4.1 Procédés à détente isenthalpique de Joule-Thomson	75

4.1.1 Cycle de base	75
4.1.2 Cycle de Linde	76
4.1.3 Cycles de Linde pour la liquéfaction de l'azote	78
4.2 Cycles de Brayton inverse	80
4.3 Procédés mixtes : cycle de Claude	81
4.4 Cycles en cascade	82
4.5 Références	84
5 Convertisseurs électrochimiques	85
5.1 Piles à combustible	85
5.1.1 Modélisation d'une pile SOFC	88
5.1.1.1 Modèle de la pile	88
5.1.1.2 Résultats du modèle simple	89
5.1.2 Amélioration du modèle de la pile	90
5.1.3 Prise en compte d'un thermocoupleur	91
5.1.4 Couplage d'une pile à combustible SOFC avec une turbine à gaz	93
5.1.5 Modification du modèle pour remplacer H_2 par CH_4	94
5.2 Reformage	98
5.2.1 Modélisation d'un reformeur dans ThermoOptim	98
5.2.2 Résultats obtenus	101
5.3 Electrolyseurs	101
5.3.1 Modélisation d'un électrolyseur à haute température	101
5.3.2 Résultats du modèle	103
5.4 Références	104
6 Réchauffement climatique et capture et stockage du CO_2	105
6.1 Données du problème	105
6.2 Piégeage et stockage du carbone	106
6.2.1 Introduction	106
6.2.2 Stratégies de piégeage	109
6.2.1.1 Capture post-combustion :	109
6.2.1.2 Capture pré-combustion :	109
6.2.1.3 Capture par oxycombustion :	110
6.3 Techniques mises en œuvre	110
6.3.1 Techniques post-combustion	110
6.3.1.1 Présentation du procédé de capture par anti-sublimation	111
6.3.1.2 Cascade de réfrigération	111
6.3.1.3 Représentation du cycle dans le diagramme entropique	112
6.3.1.4 Energies mises en jeu par la capture	113
6.3.1.5 Modélisation dans ThermoOptim d'une cascade séparée tri-étagée	114
6.3.2 Techniques pré-combustion	115
6.3.2.1 Réaction de conversion du CO	116
6.3.2.2 Condensation du gaz converti	119
6.3.2.3 Absorption du CO_2	120
6.3.2.4 Régénération du méthanol	123
6.3.2.5 Architecture globale, couplage avec le reste de l'IGCC	124
6.3.3. Techniques d'oxycombustion	126

6.3.3.1 Cycle à eau Water Cycle	129
6.3.3.2 Cycle de Matiant	130
6.3.3.3 Cycle à oxygène Oxy-fuel	131
6.3.3.4 Cycle de Graz	132
6.3.3.5 Cycle AZEP	133
6.3.3.6 Cycle CLC	134
6.3.3.7 Estimation du travail de séparation de l'oxygène	134
6.4 Références	136
7 Réacteurs nucléaires du futur	143
7.1 Introduction	143
7.2 Réacteurs couples à des cycles de Hirn	145
7.2.1 Réacteurs à neutrons rapides refroidis au sodium	145
7.2.2 Réacteurs à eau supercritique	146
7.3 Réacteurs couples à des cycles de Brayton	146
7.3.1 Réacteurs modulaires de faible puissance PBMR	147
7.3.2 Réacteurs GT-MHR	148
7.3.3 Réacteurs à tres haute température	149
7.3.4 Réacteurs à neutrons rapides refroidis au gaz	150
7.3.5 Réacteurs à neutrons rapides refroidis au plomb	151
7.3.6 Réacteurs à sels fondus	151
7.3.7 Cycles thermodynamiques des réacteurs à haute température	151
7.3.7.1 Cycles de Brayton	151
7.3.7.2 Cycles au CO ₂ supercritique	152
7.3.7.3 Cycles combinés HTR	153
7.4 Récapitulatif	155
7.5 Références	156
8 Cycles solaires thermodynamiques	159
8.1 Conversion thermique de l'énergie solaire	159
8.1.1 Introduction	159
8.1.2 Conversion thermique de l'énergie solaire	160
8.1.2 Cycles thermodynamiques envisages	162
8.2 Performances des capteurs solaires	162
8.2.1 Capteurs solaires plans à basse température	163
8.2.2 Modélisation des capteurs plans à basse température	163
8.2.3 Capteurs solaires plans à haute température	165
8.2.4 Modélisation des capteurs à concentration à haute température	165
8.3 Centrales à capteurs cylindro-paraboliques	167
8.3.1 Optimisation de la température de captation	167
8.3.2 Modèle de centrale	168
8.4 Systèmes à capteurs paraboliques	169
8.5 Centrales à tour	171
8.6 Systèmes hybrides	171
8.7 Références	173
9 Cycles ENR autres que solaire	175

9.1 Etangs solaires	175
9.1.1 Analyse du problème pose	176
9.1.2 Trace du cycle sur diagramme	177
9.1.3 Bilan exergétique	177
9.1.4 Consommations des auxiliaires	178
9.2 Systèmes de génération d'électricité par cycles OTEC ou ETM	178
9.2.1 Cycle fermé OTEC	179
9.2.2 Cycle ouvert OTEC	180
9.2.3 Cycle de Uehara	182
9.3 Cycles géothermiques	184
9.3.1 Centrales directes	185
9.3.2 Centrale à simple flash	186
9.3.3 Centrale à double flash	187
9.3.4 Centrale à cycle binaire	188
9.3.5 Cycle de Kalina	189
9.3.6 Cycle combiné	190
9.3.7 Cycle mixte	191
9.4 Utilisation énergétique de la biomasse	193
9.4.1 Introduction	193
9.4.1.1 Gazéificateurs à co-courant (downdraft)	194
9.4.1.2 Gazéificateurs à contre-courant (updraft)	194
9.4.1.3 Gazéificateurs à lit fluidisé dense	195
9.4.1.4 Gazéificateurs à lit fluidisé circulant	195
9.4.1.5 Gazéificateurs à lit fluidisé entraîné	195
9.4.2 Modélisation de la conversion thermochimique	195
9.4.2.1 Définition du combustible et déroulement de la combustion	196
9.4.2.2 Exemple de combustion en défaut d'air (gazéificateur)	197
9.4.2.3 Exemple de combustion en excès d'air	199
9.5 Références	200
10 Stockage thermique et pneumatique	201
10.1 Introduction	201
10.2 Aspects méthodologiques	202
10.3 Stockage de froid dans des nodules à changement de phase	203
10.4 Projet SETHER (stockage d'électricité sous forme thermique à haute température)	204
10.5 Dispositifs de stockage par air comprimé	206
10.5.1 Concept de CAES (<i>compressed air energy storage</i>)	206
10.5.2 Concept d'écrêteur (<i>peaker</i>) de la société Electricité de Marseille	207
10.5.3 Stockage hydropneumatique HPES	209
10.6 Références	211
11 Calcul des installations solaires thermodynamiques	213
11.1 Problématique spécifique des installations solaires	213
11.2 Estimation de l'ensoleillement reçu par un capteur solaire	215
11.3 Courbes de fréquences cumulées de l'ensoleillement	218
11.3.1 Obtention des courbes	218

11.3.2	<i>Lissage des courbes</i>	219
11.3.3	<i>Estimation des CFC à partir de formules empiriques</i>	220
11.3.4	<i>Interpolations sur l'inclinaison</i>	220
11.4	Modèles de simulation horaire	221
11.5	Méthodes simplifiées de dimensionnement	222
11.5.1	<i>Principe des méthodes</i>	222
11.5.2	<i>Courbes d'utilisabilité</i>	223
11.6	Références	226
12	Problématique du dimensionnement technologique et du régime non nominal	227
12.1	Introduction	227
12.2	Dimensionnement technologique des composants	229
12.2.1	<i>Echangeurs de chaleur</i>	230
12.2.1.1	Méthode de calcul	230
12.2.1.2	Echangeurs multizones	231
12.2.1.3	Paramétrage géométrique	232
12.2.1.4	Corrélations pour le calcul des coefficients d'échange thermiques	233
12.2.2	<i>Compresseurs volumétriques</i>	233
12.2.3	<i>Détendeurs</i>	234
12.2.4	<i>Exemple pratique : dimensionnement d'un cycle</i>	235
12.2.4.1	Création des écrans technologiques	235
12.2.4.2	Dimensionnement des composants	236
12.2.4.3	Recalcul global du cycle	238
12.3	Calculs en régime non nominal	239
12.3.1	<i>Principe de calcul des systèmes couples dans Thermoptim</i>	241
12.3.2	<i>Equations de la machine frigorifique en non-nominal</i>	242
12.3.3	<i>Post-traitement des résultats de simulation</i>	242
12.3.4	<i>Influence de la variation de UA</i>	244
12.3.5	<i>Mise au point d'un modèle simplifié</i>	245
12.4	Difficultés méthodologiques	247
12.5	Références	248
13	Modélisation et paramétrage des échangeurs pour le dimensionnement et le régime non-nominal	249
13.1	Introduction	249
13.1.1	<i>Généralités</i>	249
13.1.2	<i>Rappels sur la méthode du NUT</i>	249
13.2	Modélisation des transferts thermiques	251
13.2.1	<i>Surfaces étendues</i>	251
13.2.2	<i>Calcul des nombres de Reynolds et de Prandtl</i>	252
13.2.3	<i>Calcul du nombre de Nusselt</i>	252
13.2.3.1	Intérieur des tubes	252
13.2.3.2	Ecoulements perpendiculaires à des tubes	253
13.2.3.3	Batteries à ailettes	253
13.2.3.4	Echanges diphasiques	253
13.2.3.5	Echangeurs à plaques	255

13.2.4	<i>Calcul des échangeurs multizones</i>	256
13.2.4.1	équations pour les évaporateurs	256
13.2.5.2	Equations pour les condenseurs	257
13.2.5.3	Equations pour les condenseurs à entrée diphasique	257
13.2.5.4	Equations pour les condenseurs-évaporateurs à entrée diphasique	257
13.2.5.5	Calculs en dimensionnement et en régime non-nominal	258
13.2.5.6	Questions en suspens pour le régime non-nominal	258
13.3	Calcul des pertes de charge	259
13.3.1	<i>Pertes de charge à l'état gazeux ou liquide</i>	259
13.3.2	<i>Pertes de charge en régime diphasique</i>	260
13.4	Ecran technologique de l'échangeur	260
13.4.1	<i>Ecran technologique de l'échangeur</i>	260
13.4.2	<i>Corrélations utilisées dans Thermoptim</i>	262
13.5	Estimation des paramètres des modèles	263
13.5.1	<i>Paramétrage direct à partir des données géométriques</i>	263
13.5.1.1	Circulation à l'extérieur de tubes	263
13.5.1.2	Section rectangulaire	264
13.5.1.3	Cas Des échangeurs à plaques	264
13.5.1.4	Cas des échangeurs à tubes et calandre	266
13.5.2	<i>Identification des paramètres de l'échangeur</i>	266
13.6	Références	267
14	Modélisation et paramétrage des compresseurs volumétriques	269
14.1	Modèles de comportement	269
14.1.1	<i>Fonctionnement à vitesse nominale et pleine charge</i>	271
14.1.2	<i>Fonctionnement à vitesse et charge partielles</i>	273
14.2	Problèmes pratiques de modélisation	273
14.2.1	<i>Ecran technologique des compresseurs volumétriques</i>	273
14.2.3	<i>Identification des paramètres du compresseur</i>	274
14.2.4	<i>Calculs en mode dimensionnement</i>	275
14.2.5	<i>Calculs en régime non-nominal</i>	275
14.2.6	<i>Compresseurs à vis à vi fixe</i>	275
14.3	Références	276
15	Modélisation et paramétrage des turbocompresseurs et turbines	277
15.1	Compléments sur les turbomachines	277
15.1.1	<i>Analyse du triangle des vitesses</i>	277
15.1.2	<i>Degré de réaction d'un étage</i>	279
15.1.3	<i>Caractéristiques théoriques des turbomachines</i>	281
15.1.3.1	Compresseurs centrifuges	281
15.1.3.2	Compresseurs axiaux	282
15.1.3.3	Turbines	282
15.1.4	<i>Caractéristiques réelles des turbomachines</i>	283
15.1.4.1	Forme des caractéristiques réelles	283
15.1.4.2	Analyse qualitative des pertes	284
15.1.5	<i>Facteurs de similitude</i>	286

15.2 Pompes et ventilateurs	287
15.3 Turbocompresseurs	289
15.3.1 <i>Caractéristiques des turbocompresseurs</i>	289
15.3.2 <i>Analyse des caractéristiques des turbocompresseurs</i>	292
15.3.3 <i>Ecran technologique des turbocompresseurs</i>	295
15.4 Turbines	298
15.4.1 <i>Caractéristiques des turbines</i>	298
15.4.2 <i>Loi donnant le rendement isentropique</i>	299
15.4.3 <i>Règle du cône de Stodola</i>	301
15.4.4 <i>Règle de Baumann</i>	304
15.4.5 <i>Pertes par vitesse restante</i>	305
15.4.6 <i>Modélisation des turbines en régime non-nominal</i>	305
15.4.7 <i>Ecran technologique des turbines</i>	306
15.4.8 <i>Identification des paramètres de la turbine</i>	306
15.5 Tuyères	307
15.6 Références	308
16 Méthodologie d'identification des paramètres de composants	309
16.1 Importation de données expérimentales	309
16.1.1 <i>Importation de données de points et transfos</i>	310
16.1.2 <i>Cas particulier d'un évaporateur</i>	311
16.2 Automatisation des simulations de séries de fichiers de projet	312
16.2.1 <i>Macro Excel de post-traitement des fichiers de ThermoOptim</i>	312
16.2.2 <i>Modification des fichiers de projet</i>	313
16.2.3 <i>Simulation d'une série de fichiers de projet</i>	314
16.3 Analyse de l'influence des paramètres des corrélations des échangeurs	314
16.3.1 <i>Méthodologie de l'identification</i>	315
16.3.2 <i>Automatisation des simulations</i>	316
16.3.3 <i>Exploitation du fichier simul.txt</i>	317
16.3.4 <i>Méthode d'identification</i>	318
17 Etudes de cas	319
17.1 Introduction	319
17.2 Compresseur remplissant un stockage d'air comprimé	320
17.2.1 <i>Modélisation de l'échangeur de chaleur</i>	320
17.2.2 <i>Conception du pilote</i>	322
17.2.2.1 Initialisations	322
17.2.2.2 Calculs	322
17.2.3 <i>Etude du compresseur refroidi</i>	323
17.2.3.1 Résultats obtenus	324
17.2.3.2 Conception du pilote	325
17.2.4 <i>Utilisation du modèle pour simuler le remplissage d'un stockage d'air comprimé</i>	328
17.3 Centrale à vapeur	328
17.3.1 <i>Introduction, résultats obtenus</i>	328
17.3.2 <i>Présentation de la classe externe</i>	333
17.3.2.1 Organisation d'ensemble	333

17.3.2.2 Initialisations	333
17.3.2.3 Simulation	334
17.3.2.4 Mise à jour du projet et affichage des résultats	336
17.4 Machine de réfrigération	337
17.4.1 Introduction, résultats obtenus	337
17.4.2 Principe de résolution	338
17.5 Turboréacteur à simple flux	341
17.5.1 Introduction, résultats obtenus	342
17.5.2 Présentation de la classe externe	346
17.5.2.1 Organisation d'ensemble	346
17.5.2.2 Initialisations	347
17.5.2.3 Simulations	348
17.5.2.4 Mise à jour du projet et affichage des résultats	349

