

LES BÂTIMENTS & L'ENTROPIE

Guide théorique
et pratique
de l'habitat à basse
exergie

Philippe Courtin



Table des matières

1	Préambule.....	11
1.1	Discussion sur l'énergie.....	11
1.2	La thermodynamique.....	13
1.3	Lavoisier et le malentendu de la consommation d'énergie.....	17
2	Définitions et concepts.....	21
2.1	Convention de signe.....	21
2.2	La température (T).....	21
2.2.1	Echelles de température.....	22
2.2.2	La température cinétique.....	23
2.2.3	La température thermodynamique.....	23
2.3	La matière et ses états.....	24
2.4	La chaleur latente (L).....	25
2.5	La capacité thermique (c), (c _v), (c _p).....	26
2.6	La pression (P).....	27
2.7	L'énergie d'occupation (PV).....	27
2.8	Les fluides parfaits et réels.....	28
2.8.1	Définitions.....	28
2.8.2	Les gaz parfaits.....	28
2.8.3	Les liquides réels.....	29
2.9	L'énergie interne (U).....	30
2.10	L'enthalpie (H).....	32
2.11	L'échelle mésoscopique.....	33
2.12	L'entropie (S) et la chaleur (Q).....	34
2.12.1	Transfert d'énergie.....	34
2.12.2	Entropie.....	34
2.12.3	Transferts de chaleur.....	35
2.12.4	La température thermodynamique.....	37
2.13	L'exergie (Ex).....	42
2.13.1	Définition de l'exergie.....	42
2.13.2	Expression mathématique de l'exergie.....	44
2.14	Exemples de calculs d'énergie, d'entropie et d'exergie.....	48
2.14.1	Transformation de l'eau en glace et vice-versa.....	48
2.14.2	Transfert de chaleur dans un mur.....	54
3	L'entropie : grandeur centrale de la thermodynamique.....	59
3.1	Expérience théorique : équilibre et déséquilibre.....	60
3.2	Relation variation d'entropie - température.....	63
3.3	Température logarithmique moyenne (T ^{LM}).....	64
3.4	Entropie des réservoirs.....	67
3.4.1	Température d'équilibre.....	67
3.4.2	Conversion entropie/énergie constante.....	69
3.4.3	Exemple : maison individuelle dans son environnement atmosphérique.....	69
3.4.4	Bâtiment : atmosphère et réservoir amont.....	71
3.5	Description des transformations thermodynamiques.....	72
3.5.1	Transformation isochore.....	73
3.5.2	Transformation isobare.....	73
3.5.3	Transformation isotherme.....	73
3.5.4	Transformation adiabate.....	74
3.6	Usage de l'excédent de conversion entropie/énergie.....	74
3.6.1	De l'énergie libre au moteur.....	74
3.6.2	Source chaude et source froide.....	75
3.7	Destruction de l'excédent de potentiel en bâtiment.....	76
3.8	Température-transfert (T ₀).....	77
3.8.1	Définition.....	77
3.8.2	Exemple d'un local chauffé.....	78
3.8.3	Analyse graphique.....	80

3.9 L'entropie et les principes de la thermodynamique.....	80
3.9.1 Le principe zéro.....	81
3.9.2 Le premier principe.....	82
3.9.3 Le deuxième principe.....	85
3.9.4 Le troisième principe.....	87
4 Etude des systèmes fermés.....	89
4.1 La conservation de l'énergie - stockage, déstockage.....	89
4.2 Premier principe appliqué aux systèmes fermés.....	90
4.2.1 Formulation classique.....	90
4.2.2 Equation de transformation interne (ETI).....	91
4.3 Equation de transformation interne d'un gaz parfait fermé.....	93
4.3.1 Transformation statique et isochore.....	93
4.3.2 Transformation statique et isobare parfaite.....	95
4.3.3 Transformation statique et isotherme.....	98
4.3.4 Transformation statique et adiabate.....	99
4.4 Equation de transformation interne (ETI) des gaz parfaits.....	102
4.5 Equation de transformation interne des liquides et des solides.....	103
4.6 Equation de transformation des changements de phase.....	105
4.7 Exemple : transformation eau/glace et vice versa.....	105
4.7.1 Refroidissement.....	106
4.7.2 Réchauffement.....	110
4.7.3 Comparaison par la température-transfert.....	114
4.8 Exemples d'applications aux bâtiments.....	115
4.8.1 Chute de la température d'un local.....	115
4.8.2 Chute de température d'une eau chaude sanitaire.....	117
4.8.3 Transfert de chaleur entre deux réservoirs.....	118
4.8.4 Conclusion.....	123
5 Etude des systèmes ouverts.....	125
5.1 Variation d'enthalpie particulaire.....	126
5.1.1 Enthalpie particulaire.....	126
5.1.2 Ecoulements unidirectionnels.....	126
5.1.3 Enthalpie massique.....	127
5.1.4 Entrée et sortie uniques conservatives.....	127
5.2 Conservation de l'énergie dans les systèmes ouverts.....	128
5.2.1 Formulation classique.....	128
5.2.2 Formulation par l'énergie de transvasement d'un fluide.....	129
5.2.3 Premier principe industriel (PPI).....	130
5.2.4 Enthalpie et surenthalpie.....	131
5.2.5 Formulation entropique.....	132
5.3 Bilan entropique d'un système ouvert.....	144
5.4 Rapport au temps : énergie et puissance.....	144
5.4.1 Puissance.....	144
5.4.2 Puissance énergétique.....	145
5.4.3 Bâtiments, réservoirs et puissances.....	146
5.4.4 Unités d'énergie.....	146
5.4.5 Grandeurs énergétiques.....	146
5.4.6 Débit-masse, débit-volume.....	147
5.5 Ballons et réserves : équation de conservation de l'énergie.....	148
5.5.1 Cas général.....	148
5.5.2 Primaire séparé et secondaire brassé.....	149
5.5.3 Primaire brassé et secondaire brassé.....	153
5.5.4 Constante de temps.....	154
5.5.5 Processus complet.....	154
5.6 Neutralité énergétique des systèmes ouverts stabilisés.....	155
5.7 Exemple : ballon d'eau chaude sanitaire (ECBT).....	156
5.7.1 Description de l'étude.....	156
5.7.2 Réchauffage sans puisage.....	157

5.8 Exemple : ballon d'eau chaude sanitaire électrique.....	167
5.8.1 Description de l'étude.....	167
5.8.2 Réchauffage sans puisage.....	167
5.9 Exemple : radiateur à eau chaude.....	169
5.10 Température-transfert : bilan.....	171
6 Rendement énergétique dans le bâtiment.....	173
6.1 Définition.....	173
6.2 Entropie des fuites d'énergie.....	176
6.3 "Pertes" d'énergie versus fuites d'énergie.....	176
6.4 Influence du rendement énergétique.....	177
6.5 Economie des ressources énergétiques.....	178
6.5.1 Réduire le besoin en énergie utile.....	178
6.5.2 Recycler l'énergie disponible.....	179
7 L'enveloppe des bâtiments.....	181
7.1 Energétique du bâti et de l'enveloppe.....	181
7.1.1 Le bâti.....	181
7.1.2 Inconfort et consommation des ressources énergétiques.....	181
7.1.3 Economie de ressources énergétiques et gain de confort.....	182
7.2 Energie utile et conductance thermique des parois en régime permanent.....	182
7.2.1 Equation de transfert-chaleur dans une paroi.....	183
7.2.2 Conductance thermique d'une paroi.....	186
7.2.3 Résistance thermique d'une paroi.....	187
7.2.4 Physique de la séparation des fluides par une paroi.....	193
7.2.5 Influence de l'isolation thermique sur la conductance.....	194
7.2.6 Influence de l'isolation thermique sur les coûts.....	195
8 Le renouvellement d'air des bâtiments.....	199
8.1 Nécessité et conséquences de la ventilation.....	199
8.2 Puissance-chaleur utile de ventilation.....	199
8.3 Enthalpie de l'air humide.....	200
8.3.1 Composition de l'air humide.....	200
8.3.2 Les grandeurs spécifiques, w , h , v	200
8.3.3 L'humidité spécifique w	200
8.3.4 Pression partielle de vapeur P_v	201
8.3.5 Relation w - P_v	201
8.3.6 Pression de vapeur saturante P_{vs}	201
8.3.7 Humidité relative (HR).....	202
8.3.8 L'enthalpie spécifique h	203
8.3.9 Le volume spécifique v	204
8.4 Exemple : puissance-chaleur due à la ventilation.....	205
8.4.1 Données.....	205
8.4.2 Enthalpies spécifiques.....	205
8.4.3 Calcul du débit-masse.....	206
8.4.4 Puissance-chaleur de ventilation.....	207
8.4.5 Bilan entropique.....	207
8.4.6 Chaleur volumique simplifiée de l'air humide.....	208
9 Le deuxième principe de la thermodynamique.....	211
9.1 L'irréversibilité.....	212
9.2 Relation entre chaleur, travail et entropie.....	214
9.2.1 Détente de Joule-Gay-Lussac.....	214
9.2.2 Détente adiabatique.....	215
9.2.3 Exemple.....	217
9.2.4 Equivalence chaleur-travail.....	219

9.3 Etude d'un mouvement harmonique ressort-masse.....	220
9.3.1 Description du système.....	220
9.3.2 Hypothèses.....	221
9.3.3 Problématique et résolution.....	222
9.3.4 Stabilité du processus.....	225
9.3.5 Réversibilité.....	226
9.3.6 Mise au repos.....	226
9.3.7 Paradoxe.....	228
9.4 La perfection : la conservation.....	228
9.4.1 L'énergie interne.....	228
9.4.2 Le temps, l'histoire et la mémoire.....	228
9.5 Description de l'entropie.....	229
9.5.1 Approche microscopique.....	230
9.5.2 Aspect mathématique de l'approche microscopique.....	232
9.5.3 Approche macroscopique.....	252
9.5.4 Analyse de qualité par la température-transfert.....	254
9.5.5 Le question du désordre.....	255
9.6 Enoncé du deuxième principe.....	256
10 La puissance motrice du feu.....	257
10.1 La machine de Carnot.....	259
10.1.1 Etape 1 : expansion isotherme.....	259
10.1.2 Etape 2 : expansion adiabate.....	260
10.1.3 Remarque intermédiaire.....	261
10.1.4 Etape 3 : contraction isotherme.....	261
10.1.5 Etape 4 : contraction adiabate.....	262
10.1.6 Remarque terminale.....	262
10.1.7 Bilan entropique interne.....	262
10.1.8 Bilan énergétique et entropique du processus.....	263
10.1.9 Facteur de Carnot.....	265
10.1.10 Sources à l'équilibre.....	267
10.2 Température-transfert et facteur de Carnot.....	267
10.3 Modélisation du travail par l'entropie.....	268
10.4 Influence de la source de référence.....	269
10.5 Fluides réels et machines réelles.....	272
11 Les quatre principes environnementaux.....	275
11.1 Le principe de destruction.....	276
11.2 Le principe de puissance.....	276
11.3 Le principe de valeur.....	280
11.3.1 Valeur de l'énergie.....	281
11.3.2 Valeur de l'entropie.....	289
11.4 Le principe de déplacement.....	300
11.5 Application aux bâtiments.....	301
12 Exergétique des bâtiments.....	305
12.1 L'exergie.....	305
12.1.1 Description du référentiel atmosphérique.....	306
12.1.2 Formulation de l'exergie.....	307
12.2 Rendement exergétique.....	335
12.3 Schéma entropie-exergie.....	335
12.3.1 Principe.....	336
12.3.2 Etage exergétique.....	336
12.3.3 Rendement d'étage.....	336
12.3.4 Utilité du schéma entropie-exergie.....	337
12.4 Enveloppe de bâtiment.....	338
12.4.1 Rendement d'étage.....	338
12.4.2 Bilan énergétique en hiver.....	338
12.4.3 Equation du transfert de chaleur.....	339
12.4.4 Bilan entropique.....	339
12.4.5 Bilan exergétique.....	340
12.4.6 Exemple de calcul.....	342
12.4.7 Economies d'exergie.....	343

12.4.7 Economies d'exergie.....	343
12.4.8 Précision des modèles de calcul.....	346
12.5 Radiateurs.....	347
12.5.1 Radiateur à eau chaude.....	347
12.5.2 Radiateur électrique.....	352
12.6 Chaudières.....	356
12.6.1 Chaudières électriques.....	356
12.6.2 Chaudières à combustible.....	359
12.7 Performances comparées.....	365
12.7.1 Classement selon la température-transfert.....	366
12.7.2 Classement selon l'accroissement d'entropie et l'exergie perdue.....	367
12.7.3 Classement environnemental.....	369
12.8 Pompes à chaleur électriques.....	370
12.8.1 Pompe à chaleur idéale.....	371
12.8.2 Pompe à chaleur réelle.....	373
12.8.3 Exemple 1 : PAC air/air.....	379
12.8.4 Exemple 2 : PAC air/eau.....	381
12.8.5 Impact exergetique du rendement énergétique des connexions.....	383
12.9 Performances comparées - PAC/autres systèmes.....	384
12.10 Variabilité des performances d'une pompe à chaleur réelle.....	387
12.11 Rendement exergetique en fonction de T_C, T_F, T_a et de la source exploitée.....	392
12.12 Machines frigorifiques.....	393
12.12.1 Schéma entropie-exergie.....	394
12.12.2 Coefficient d'efficacité énergétique réel - EER.....	394
12.12.3 Bilan énergétique.....	395
12.12.4 Bilan exergetique (et entropique).....	396
12.12.5 Rendement exergetique.....	397
12.12.6 Température-transfert.....	397
12.12.7 Exemple de calcul.....	398
12.13 Echangeurs de chaleur.....	399
12.13.1 Echangeur à contre courant.....	399
12.13.2 Echangeur à courants parallèles.....	407
12.13.3 Perte d'exergie à la fabrication.....	409
13 Production d'énergie électrique.....	413
13.1 Centrale thermique à vapeur.....	413
13.1.1 Centrale idéale.....	415
13.1.2 Etude d'une centrale thermique réelle.....	421
13.1.3 Schéma entropie/exergie d'une centrale réelle.....	425
13.1.4 Bilan d'usage en chauffage pour le bâtiment.....	426
13.2 Barrage hydroélectrique.....	432
13.2.1 Exergetique d'une chute libre.....	433
13.2.2 Equation du mouvement de la chute libre.....	438
13.2.3 Chute d'eau dans un barrage.....	442
14 Des bâtiments à basse entropie et à basse exergie.....	455
14.1 Basse entropie : définition.....	455
14.2 Application des quatre principes environnementaux.....	455
14.2.1 Le principe de destruction appliqué aux bâtiments à basse entropie.....	456
14.2.2 Le principe de puissance appliqué aux bâtiments à basse entropie.....	456
14.2.3 Le principe de valeur appliqué aux bâtiments à basse entropie.....	457
14.2.4 Le principe de déplacement appliqué aux bâtiments à basse entropie.....	458
14.3 Basse exergie : définition.....	458
14.4 Concevoir des bâtiments à basse entropie et à basse exergie.....	460
14.4.1 Distinction d'usage de l'électricité par le rendement exergetique.....	461
14.4.2 Pas d'usage électrique pour le chauffage ou le rafraichissement.....	461
14.4.3 Usage électrique à faible exergie (lumière, usage mécanique et électronique).....	461
14.4.4 Usage de la chaleur issue de sources à basse exergie.....	461
14.5 Et la construction elle-même ?.....	462
14.6 Conclusion.....	462
Bibliographie.....	465
Index.....	467