

Préface

Cet ouvrage sur la conception d'entrepôts est unique dans son genre puisqu'il tient compte de l'ensemble des paramètres entrant dans la conception d'un entrepôt frigorifique, tels que : l'architecture de l'entrepôt, sa situation géographique, les denrées entreposées, la durée d'entreposage, la qualité des denrées sorties de l'entrepôt, la consommation d'énergie, le coût global de l'entrepôt et son coût d'exploitation.

Original, exhaustif, savant, il est également tenu compte de la complexité des interactions de ces différents paramètres pour aboutir « in fine » à des solutions pratiques et concrètes.

L'auteur de cet ouvrage, André Gac, Ingénieur général du Génie rural des Eaux et des Forêts, a consacré sa vie au froid ; son parcours, de la Station du Froid du CNRS à Meudon-Bellevue, en passant par la direction du Laboratoire Froid du Cemagref, ancien président de l'AFF et directeur honoraire de l'Institut International du Froid, illustre bien son attachement à la cause du froid. Ses nombreux travaux et sa grande compétence font de lui un homme reconnu bien au-delà de nos frontières.

André Gac nous transmet un ouvrage riche de connaissances et d'expériences qu'il a accumulées au cours de sa brillante carrière. Cet ouvrage, très complet, s'adresse à la fois aux étudiants, chercheurs, installateurs, concepteurs et exploitants d'entrepôts frigorifiques.

Un grand merci à André Gac d'avoir, malgré ses nombreuses activités, entrepris la rédaction de cet ouvrage.

Michel BARTH
Président de l'Association Française du Froid

Table des matières

Préface	V
Avant propos	X
Introduction	XII
Chapitre 1 – Perte de masse des denrées périssables en régime thermique stable	1
1.1. Comportement des denrées périssables en chambre froide	2
1.2. Expressions de l'humidité relative	4
1.3. Cas de l'entreposage des produits réfrigérés	5
1.3.1. Cas de l'eau pure	5
1.3.2. Cas des solutions aqueuses	6
1.3.3. Cas des produits d'origine animale	7
1.3.4. Cas des produits végétaux	9
1.3.5. Remarques concernant la perte d'eau des denrées	13
1.3.6. Le coefficient d'évaporation	13
1.3.7. Autres causes de pertes	15
1.3.8. Perte totale minimale et humidité relative optimale	17
1.4. Cas de l'entreposage des produits congelés	19
1.4.1. Perte de masse des denrées non ou imparfaitement emballées	19
1.4.2. Givrage dans les paquets ou givrage interne	20
1.5. Expressions du débit de perte de masse et du flétrissement	22
Chapitre 2 – Caractéristiques techniques d'une installation frigorifique	23
2.1. Bilans frigorifiques	25
2.1.1. Expression du bilan frigorifique d'un équipement d'entreposage	25
2.1.2. Bilan frigorifique du frigorifère d'une chambre froide	26
2.1.3. Bilans frigorifiques d'un entrepôt	26
2.2. Puissances frigorifiques	27
2.2.1. Calcul à partir des bilans journaliers	27
2.2.2. Évolution de l'air dans le frigorifère	28
2.2.3. Transfert de chaleur à la batterie froide	29
2.2.4. Temps de fonctionnement journalier	30
2.3. Bilan hydrique	30
2.3.1. Apports d'eau	30
2.3.2. Débit de transfert de la vapeur d'eau	31
2.3.3. Discussion	32

2.4. Relations de l'entreposage	33
2.4.1. Relations fondamentales	33
2.4.2. Autres relations	33
2.5. Influence du givrage	36
2.5.1. Échangeurs noyés (regorgement ou refroidissement indirect)	36
2.5.2. Évaporateurs en injection directe	37
2.5.3. Détermination des conditions de fonctionnement de la batterie froide	38
2.6. Influence de l'écart de température ($\theta - \theta_0$)	39
2.7. Influence de la performance de l'installation frigorifique	40
2.8. Estimation du taux de renouvellement de l'air	41
2.9. Estimation du coefficient d'évaporation	42
Chapitre 3 – Simulation de l'exploitation d'une chambre froide	45
3.1. Objectifs	45
3.2. Scénarios	46
3.3. Programmes d'exploitation d'une chambre froide en service	47
3.4. Étude de cas – Caractéristiques de la chambre froide en réfrigération	48
3.5. Batterie froide non givrée	50
3.5.1. Influence de l'écart de température ($\theta - \theta_0$)	50
3.5.2. Influence des conditions de l'air extérieur	55
3.5.3. Influence de l'état de chargement de la chambre froide	56
3.5.4. Influence du brassage de l'air	60
3.6. Batterie froide givrée	61
3.6.1. Échangeur noyé	61
3.6.2. Évaporateur alimenté en injection directe	62
3.6.3. Comparaison du regorgement et de l'injection directe	65
3.7. Recommandations pour minimiser les pertes de masse	66
3.7.1. Température de stockage	67
3.7.2. Réglage de la température de la batterie froide	67
3.7.3. État de chargement de la chambre froide	70
3.7.4. Brassage	70
3.7.5. Humidification de l'air	72
3.7.6. Influence des conditions extérieures chaudes	72
3.7.7. Cas des conditions extérieures froides	72
3.8. Cas d'une chambre froide neuve	73
3.8.1. Détermination de l'écart optimal de température ($\theta - \theta_0$)	73
3.8.2. Influence de la performance de l'installation	74
Chapitre 4 – Optimisation de la conception d'une chambre froide à machine autonome	79
4.1. Critères de fonctionnement	81
4.2. Investissement minimal	84
4.3. Amortissement minimal	88
4.4. Prix de revient minimal de fonctionnement	88
4.5. Charges financières	93
4.5.1. Charges financières techniques	93
4.5.2. Surcoûts spécifiques de fonctionnement	93
4.6. Sélection de l'équipement	93
4.6.1. Proposition de l'entreprise d'isolation	94
4.6.2. Définition de la puissance en chaleur sensible	94

4.6.3. Définition de la puissance en chaleur totale	94
4.6.4. Choix des installateurs	95
4.7. Scénarios et programmes de simulation	95
4.7.1. Coût des dégivrages	95
4.7.2. Valeur des pertes de masse	97
4.7.3. Programmes de simulation	97
4.8. Discussion	99
4.8.1. Perte maximale de chaleur par les parois $K\Delta\theta$	100
4.8.2. Changement d'isolant	100
4.8.3. Vieillessement de l'équipement	101
4.8.4. Temps maximal de fonctionnement	101
4.8.5. Performances des systèmes de production de froid	102
4.9. Applications – Étude de cas	103
4.9.1. Caractéristiques de la chambre froide	103
4.9.2. Cas de la réfrigération	103
4.9.3. Cas de la congélation	110
Chapitre 5 – Optimisation de la conception d'un entrepôt frigorifique	115
5.1. Calcul des bilans frigorifiques	116
5.1.1. Bilans de l'entrepôt	116
5.1.2. Bilan du frigorifère des chambres froides	117
5.2. Calcul des puissances	117
5.3. Calcul des charges financières	117
5.3.1. Optimisation de l'investissement ou des amortissements	117
5.3.2. Optimisation du prix de revient de fonctionnement	118
5.4. Application – Étude de cas	119
5.5. Réduction des entrées d'air extérieur	120
5.6. Remarques concernant la conception des entrepôts	120
5.6.1. Implantation des entrepôts	121
5.6.2. Plan de masse des entrepôts	121
Chapitre 6 – Intérêt économique de l'entreposage au froid	123
6.1. Valeur ajoutée de la conservation frigorifique	123
6.1.1. Valeur ajoutée réduite de la réfrigération	124
6.1.2. Valeur ajoutée réduite de la congélation	125
6.1.3. Recommandations pour réduire le coût de l'entreposage	125
6.2. Comparaison des performances financières de la réfrigération et de la congélation	129
6.3. Efficacité économique du froid	130
6.3.1. Intérêt financier de la conservation frigorifique	130
6.3.2. Approche microéconomique	131
6.3.3. Approche macroéconomique	133
Chapitre 7 – Choix du système frigorifique – Effet de serre	135
7.1. L'effet de serre	137
7.2. Contribution des machines frigorifiques à l'effet de serre	138
7.2.1. Le rejet de frigorigène – Effet de serre direct	139
7.2.2. Comparaison de trois frigorigènes halogénés	140
7.2.3. Le rejet d'anhydride carbonique – Effet de serre indirect	141

7.2.4. Effet de serre spécifique (tewi)	142
7.2.5. Performances de 4 machines industrielles et de 2 frigorigènes	142
7.2.6. tewi spécifique des 4 machines industrielles et des 2 frigorigènes	143
7.3. Effet de serre des entrepôts et des réfrigérateurs ménagers	144
7.4. Limitation de l'effet de serre dû aux machines frigorifiques	145
7.4.1. Les conditions de réduction de l'effet de serre	145
7.4.2. Les frigorigènes disponibles	146
7.4.3. La valorisation de certaines sources de chaleur	147
7.5. Discussion	147
Conclusion	149
Bibliographie.	151
Index	157
Annexes	161