

**L** Comment améliorer la performance énergétique des bâtiments résidentiels et commerciaux ? Comment réduire leurs coûts d'exploitation ?

Ce guide technique d'audit énergétique offre une approche systématique et propose des outils et procédures efficaces pour effectuer les analyses énergétiques pour des bâtiments nouveaux et existants :

- analyse économique,
- modèles de simulation énergétique,
- méthodes pour la conception des bâtiments à haute performance énergétique,
- approches générales pour l'audit énergétique des bâtiments existants.

Il donne des exemples concrets pour calculer l'efficacité énergétique selon plusieurs techniques et technologies qui permettront d'améliorer les performances du bâti, des systèmes électriques, du système de chauffage et de climatisation. Par ailleurs, il propose des méthodes de gestion des bâtiments ainsi que des protocoles pour mesurer et vérifier les performances réelles des bâtiments.

**Moncef Krarti** est professeur à l'Université du Colorado au College of Engineering and Applied Science dans le Department of Civil, Environmental, and Architectural Engineering. Il est responsable des études sur l'énergie des bâtiments. Il enseigne également à Mines ParisTech. Il a dirigé plusieurs projets pour développer des outils et des méthodes d'évaluation du comportement thermique des bâtiments.

**Dominique Marchio** est professeur à Mines ParisTech. Il est responsable du cours « Cycle de vie des systèmes énergétiques » depuis 2005. Il est aussi Directeur des études de la filière d'ingénieur en formation continue ISUPFERE et responsable du mastère spécialisé en Ingénierie et Gestion du gaz.

---

# Table des matières

---

<b>CHAPITRE 1 - INTRODUCTION À L'AUDIT ÉNERGÉTIQUE</b> .....	7
1. Introduction .....	7
2. Différents types d'audit énergétique.....	8
2.1. <i>Audit rapide avec visite du site</i> .....	8
2.2. <i>Analyse des coûts énergétiques</i> .....	9
2.3. <i>Audit énergétique standard</i> .....	9
2.4. <i>Audit énergétique détaillé</i> .....	10
3. Procédure générale pour un audit énergétique détaillé.....	11
4. Mesures usuelles d'économie d'énergie .....	14
4.1. <i>Enveloppe du bâtiment</i> .....	14
4.2. <i>Systèmes électriques</i> .....	15
4.3. <i>Systèmes de conditionnement d'air</i> .....	16
4.4. <i>Systèmes d'air comprimé</i> .....	17
4.5. <i>Systèmes de gestion énergétique</i> .....	18
4.6. <i>Gestion des consommations d'eau</i> .....	18
4.7. <i>Nouvelles technologies</i> .....	19
5. Liste des données à relever lors d'une visite .....	20
6. Bibliographie.....	23
<b>CHAPITRE 2 - RÉGLEMENTATION ÉNERGÉTIQUE EN FRANCE ET EN EUROPE</b> .....	31
1. Introduction .....	31
2. Les visites réglementaires : arrêté du 16/09/1998.....	33
3. Les programmes favorisant les économies d'énergie .....	34
3.1. <i>Le diagnostic thermique dans les bâtiments devenu DPE</i> .....	34
3.2. <i>L'audit énergétique de l'ADEME</i> .....	36
3.3. <i>Certificats d'économies d'énergie, aides publiques</i> .....	37
4. Aperçu des politiques en matière d'audit énergétique en Europe .....	38
<b>CHAPITRE 3 - MÉTHODES D'ANALYSE ÉCONOMIQUE</b> .....	43
1. Introduction .....	43
2. Concepts de base .....	44
2.1. <i>Le taux d'intérêt</i> .....	44
2.2. <i>Inflation</i> .....	45
2.3. <i>Impôts et taxes</i> .....	46

3. Les méthodes d'évaluation économique pour le choix entre solutions .....	47
3.1. Valeur actualisée nette .....	47
3.2. Taux de rentabilité interne.....	49
3.3. Rapport profit/coût.....	49
3.4. Temps de retour.....	49
3.5. Résumé des méthodes d'évaluation.....	50
4. La méthode du coût global actualisé.....	52
5. Procédure générale pour une évaluation économique.....	53
6. Options de financement .....	55
6.1. Investissement direct .....	55
6.2. Leasing .....	56
6.3. Contrat de performance .....	56
7. Conclusion.....	57
8. Bibliographie.....	57
<b>CHAPITRE 4 - OUTILS D'ANALYSE ÉNERGÉTIQUE.....</b>	<b>59</b>
1. Introduction .....	59
2. Méthodes basées sur des ratios .....	60
2.1. Que sont les ratios?.....	60
2.2. Types de ratios .....	63
2.3. Précautions à prendre quand on utilise des ratios .....	70
3. Les méthodes d'identification de modèle .....	70
3.1. Les modèles statiques de signature énergétique.....	71
3.2. Les modèles identifiés dynamiques.....	75
4. Modélisation physique du bâtiment .....	75
4.1. Les modèles statiques .....	75
4.2. Les méthodes dynamiques .....	76
5. Bibliographie.....	78
<b>CHAPITRE 5 - AMÉLIORATION DES SYSTÈMES ÉLECTRIQUES.....</b>	<b>81</b>
1. Introduction .....	81
2. Rappel des bases concernant les systèmes électriques .....	82
3. Amélioration du facteur de puissance .....	85
4. Amélioration de l'efficacité des moteurs électriques.....	86
4.1. Introduction .....	86
4.2. Vue d'ensemble des moteurs électriques.....	87
4.3. Remplacement par des moteurs à haut rendement énergétique.....	89
5. Éclairage à haut rendement énergétique.....	92
5.1. Introduction .....	92
5.2. Les systèmes d'éclairage à haut rendement .....	94
5.3. Gestion de l'éclairage .....	99

6. Les équipements de bureautique .....	100
7. Les ascenseurs .....	103
8. Autres équipements .....	103
9. La qualité de puissance .....	104
9.1. Introduction .....	104
9.2. Distorsion harmonique totale.....	104
10. Exemples sélectionnés de solutions d'économies d'énergie .....	107
11. Ventilation des consommations électriques.....	108
12. Conclusion.....	109
13. Bibliographie.....	109
<b>CHAPITRE 6 - AUDIT ÉNERGÉTIQUE DE L'ENVELOPPE DU BÂTIMENT .....</b>	<b>111</b>
1. Introduction .....	111
2. Concepts fondamentaux.....	112
3. Besoins énergétiques de chauffage et de refroidissement des bâtiments ...	125
4. Différents exemples de réhabilitation de l'enveloppe du bâtiment.....	140
4.1. Isolation des composants peu étanches de l'enveloppe du bâtiment .....	140
4.2. Amélioration des fenêtres .....	141
4.3. Réduction des infiltrations d'air .....	141
5. Ventilation des postes de déperditions .....	143
6. Bibliographie.....	143
<b>CHAPITRE 7 - AMÉLIORATION DES SYSTÈMES DE CONDITIONNEMENT D'AIR .....</b>	<b>145</b>
1. Introduction .....	145
2. Différents types de systèmes de traitement d'air .....	145
3. Mesures communes d'amélioration de l'efficacité énergétique des systèmes.....	153
4. Ventilation .....	154
4.1. Réduction de la ventilation .....	154
4.2. Économiseurs côté air .....	159
5. Régulation de la température intérieure .....	160
6. Amélioration des auxiliaires, ventilateurs en particulier.....	161
6.1. Part de consommation due aux auxiliaires.....	161
6.2. Principes de base du fonctionnement d'un ventilateur .....	163
6.3. Adaptation de la taille .....	164
7. Bibliographie.....	166

<b>CHAPITRE 8 - AMÉLIORATION DES SYSTÈMES DE PRODUCTION DE FROID</b> .....	169
1. Principes de base du refroidissement par compression de vapeur .....	169
2. Différents types de systèmes de refroidissement .....	171
2.1. <i>Systèmes de climatisation autonomes</i> .....	171
2.2. <i>Unités de toiture et armoires de climatisation</i> .....	172
2.3. <i>Refroidisseurs de liquide centralisés</i> .....	172
3. Evolution du rendement énergétique des systèmes de refroidissement ..	174
3.1. <i>Unités de climatisation autonomes</i> .....	174
3.2. <i>Refroidisseurs de liquide</i> .....	175
4. Mesures d'économie d'énergie .....	176
4.1. <i>Remplacement des refroidisseurs</i> .....	176
4.2. <i>Amélioration de la régulation d'un refroidisseur</i> .....	178
4.3. <i>Autres systèmes de refroidissement</i> .....	180
5. Bibliographie.....	180
<b>CHAPITRE 9 - MODERNISATION DES CHAUFFERIES</b> .....	183
1. Introduction .....	183
2. Principes de base de la combustion .....	184
2.1. <i>Différents types de combustibles</i> .....	184
2.2. <i>Généralités sur les chaudières</i> .....	185
2.3. <i>Configurations et composants d'une chaudière</i> .....	186
2.4. <i>Rendement thermique d'une chaudière</i> .....	189
3. Rendement moyen d'une chaudière .....	193
4. Amélioration du rendement d'une chaudière .....	194
4.1. <i>Réglage de la chaudière existante</i> .....	194
4.2. <i>Chaudières à haut rendement</i> .....	195
4.3. <i>Chaudières modulantes</i> .....	196
5. Bibliographie.....	197
<b>CHAPITRE 10 - SYSTÈMES DE GESTION TECHNIQUE</b> .....	199
1. Introduction .....	199
2. Principes de base de la régulation .....	200
2.1. <i>Modes de régulation</i> .....	200
2.2. <i>Systèmes de régulation avancés</i> .....	204
2.3. <i>Différents systèmes de régulation</i> .....	205
3. Systèmes de gestion technique du bâtiment.....	206
3.1. <i>Composants de base d'une GTB</i> .....	206
3.2. <i>Fonctions type de la GTB</i> .....	206
3.3. <i>Considérations sur la conception d'un système de GTB</i> .....	207
3.4. <i>Protocoles de communication</i> .....	208

4. Applications de régulation .....	208
4.1. <i>Fonctionnement intermittent des appareils électriques</i> .....	209
4.2. <i>Contrôle de l'introduction d'air extérieur</i> .....	211
4.3. <i>Techniques de régulation DAV pour les systèmes avec un conduit d'air extérieur dédié</i> .....	214
4.4. <i>Analyse comparative des modes de mesure des débits d'air</i> .....	215
4.5. <i>Optimisation de la relance de chauffage</i> .....	216
4.6. <i>Optimisation des centrales de production de chaud et de froid</i> .....	219
5. Conclusion .....	220
6. Bibliographie.....	221
<b>CHAPITRE 11 - AMÉLIORATION OPTIMALE</b> .....	225
1. Introduction .....	225
2. Approche d'analyse .....	227
3. Mesures d'efficacité énergétique .....	229
4. Analyse économique .....	231
5. Méthodologie générale d'analyse par optimisation .....	232
6. Discussion des résultats .....	235
6.1. <i>Analyse pour le cas de Paris</i> .....	235
6.2. <i>Résumé des résultats de l'analyse d'optimisation</i> .....	237
6.3. <i>Analyse de sensibilité</i> .....	240
7. Conclusion .....	241
8. Bibliographie.....	242
<b>CHAPITRE 12 - MÉTHODES DE MESURE ET VÉRIFICATION</b> .....	245
1. Introduction .....	245
2. Méthode générale de mesure et de vérification .....	246
3. Méthodes d'analyse .....	248
3.1. <i>Méthodes de calcul simplifié</i> .....	248
3.2. <i>Méthodes de régression simples</i> .....	249
3.3. <i>Méthodes de régression avec plusieurs variables</i> .....	252
3.4. <i>Méthodes d'analyse dynamique</i> .....	253
4. Etude de cas .....	260
4.1. <i>Description du projet de rénovation</i> .....	260
4.2. <i>Résultats des mesures</i> .....	262
4.3. <i>Analyse de mesure et vérification</i> .....	263
5. Bibliographie.....	267
<b>ANNEXES</b> .....	271