

Table des matières

Préface	1
Éric MONMASSON	
Introduction	3
Chapitre 1. Problématique du stockage de l'énergie électrique dans l'habitat : vers des bâtiments et des villes plus intelligents .	11
1.1. Vers des réseaux électriques plus intelligents.	11
1.1.1. Vers la décentralisation des réseaux électriques	11
1.1.2. Réseaux électriques intelligents	12
1.2. Besoins de stockage dans les bâtiments	14
1.3. Difficultés du stockage de l'énergie électrique	15
1.4. L'alimentation en énergie électrique des bâtiments	17
1.4.1. Alimentation et consommation des bâtiments	17
1.4.2. L'autoproduction et l'autoconsommation.	21
1.4.3. Microréseaux	22
1.5. Bâtiments intelligents	25
1.6. Villes intelligentes.	28
1.7. Questions socio-économiques	29
1.7.1. Vers de nouveaux modèles économiques	29
1.7.2. L'acceptabilité sociale	31
1.8. Gestion du stockage.	32
1.9. Méthodologies mises en œuvre pour construire la gestion énergétique d'un système de stockage	35

Chapitre 2. Stockage énergétique dans un bâtiment commercial . . .	39
2.1. Introduction.	39
2.2. Gestion d'un stockage d'énergie au sein d'un hypermarché	39
2.2.1. Introduction	39
2.2.2. Caractéristiques du système.	40
2.2.3. Facturation de l'électricité.	43
2.2.4. Objectifs de la gestion énergétique.	44
2.2.5. Superviseur à logique floue	45
2.2.5.1. Mode de fonctionnement PPW1	48
2.2.5.2. Mode de fonctionnement PPW2	52
2.2.5.3. Mode de fonctionnement SPW1	53
2.2.5.4. Mode de fonctionnement SPW2	54
2.2.5.5. Mode de fonctionnement OPW1.	55
2.2.5.6. Mode de fonctionnement OPW2.	56
2.2.6. Résultats de simulation.	57
2.2.7. Analyse de performances au moyen d'indicateurs.	60
2.3. Conclusion	63
2.4. Remerciements.	64
Chapitre 3. Stockage énergétique dans un bâtiment tertiaire, couplé à de la production photovoltaïque et de l'éclairage LED . .	65
3.1. Introduction.	65
3.2. Architecture du réseau DC	67
3.3. Gestion énergétique	68
3.3.1. Cahier des charges	68
3.3.1.1. Les objectifs.	68
3.3.1.2. Les contraintes	68
3.3.1.3. Les moyens d'action.	69
3.3.2. Les entrées/sorties du système	69
3.3.3. Graphe fonctionnel	71
3.3.4. Détermination des fonctions d'appartenance	71
3.3.5. Graphe opérationnel	74
3.3.6. Règles floues.	74
3.4. Résultats de simulation	76
3.4.1. Cas 1 : conditions d'accès au réseau (GAC) favorables	79
3.4.2. Cas 2 : conditions d'accès au réseau (GAC) défavorables	80
3.4.3. Cas 3 : conditions d'accès au réseau (GAC) variables	81
3.4.4. Comparaison des résultats	84
3.5. Conclusion	85
3.6. Remerciements.	85

Chapitre 4. Stockage hybride associé à du photovoltaïque dans le contexte de l'habitat en zone non interconnectée	87
4.1. Introduction.	87
4.2. Photovoltaïque associé aux bâtiments et intégration dans le réseau électrique	88
4.2.1. Contexte et enjeux économiques	88
4.2.2. Exemples de projets	90
4.2.2.1. Systèmes photovoltaïques autonomes.	90
4.2.2.2. Système photovoltaïque connecté au réseau	91
4.2.2.3. Système photovoltaïque connecté à un miniréseau	92
4.3. Importance du stockage dans les systèmes photovoltaïques	94
4.3.1. Cas du photovoltaïque en site isolé	95
4.3.2. Cas du photovoltaïque connecté au réseau	95
4.3.3. Hybridation du stockage	96
4.3.4. Structures électroniques de conversion pour le stockage hybride	98
4.4. Centrale photovoltaïque associée à un système hybride de stockage	101
4.4.1. Cas d'étude.	101
4.4.2. Principes et normes de soutien de la fréquence	103
4.4.2.1. Problème de la variation de la fréquence	103
4.4.2.2. Relation puissance-fréquence	104
4.4.3. Principe de calcul de la dégradation des batteries	107
4.5. Gestion énergétique	110
4.5.1. Méthodologie	110
4.5.2. Spécifications de fonctionnement	110
4.5.3. Structure du superviseur et détermination des entrées et sorties.	111
4.5.4. Graphes fonctionnels	113
4.5.5. Fonctions d'appartenances	115
4.5.6. Graphes opérationnels	119
4.5.7. Règles floues.	119
4.5.8. Indicateurs d'évaluation	119
4.5.8.1. Indicateurs de performance	119
4.5.8.2. Indicateur financier.	122
4.5.8.3. Durée de vie des composants de stockage	123
4.6. Résultats de simulation	123
4.6.1. Validation du superviseur	124
4.6.1.1. Mode de fonctionnement N1	124
4.6.1.2. Mode de fonctionnement N2	128
4.6.2. Durée de vie des éléments de stockage	129
4.6.3. Rendement	132
4.6.4. Coût actualisé de l'énergie	135
4.7. Validation expérimentale de la gestion énergétique	137

4.7.1. Définition des tests	138
4.7.2. Résultats expérimentaux	138
4.8. Conclusion	142
4.9. Remerciements	143

Chapitre 5. Changements économiques et sociologiques induits par les *smart grids* 145

5.1. Introduction	145
5.2. Diversité des acteurs dans un <i>smart grid</i>	147
5.3. Enjeux économiques et sociologiques induits par les <i>smart grids</i>	148
5.3.1. Introduction	148
5.3.2. La question du changement de la chaîne de valeur induite par l'émergence des <i>smart grids</i>	152
5.3.2.1. Les principales conditions du changement	153
5.3.2.2. La conception actuelle des modèles économiques	156
5.3.3. La position « aval » des <i>smart grids</i>	161
5.3.3.1. La gouvernance	162
5.3.3.2. Éléments analytiques	162
5.3.4. La position « amont » des <i>smart grids</i>	170
5.3.4.1. Les éléments analytiques : la question de l'élasticité du prix mais pas seulement	171
5.3.4.2. Les comportements des utilisateurs	173
5.3.4.3. La gouvernance	175
5.3.5. Les programmes de gestion de la demande	177
5.3.5.1. L'effacement en France	177
5.3.5.2. La valeur économique de l'effacement	178
5.3.5.3. Des freins à l'effacement au mécanisme de capacité	180
5.4. L'acceptabilité sociale	180
5.4.1. Introduction	180
5.4.2. Les cadres conceptuels de référence	181
5.4.2.1. La définition de l'acceptabilité sociale	181
5.4.2.2. La rationalité limitée de l'acteur	182
5.4.2.3. Le consommateur est depuis toujours un « consomm'acteur »	184
5.4.2.4. L'influence de dynamiques sociales imbriquées	184
5.4.3. Études des conditions d'acceptabilité sociale	185
5.4.3.1. Les conditions d'acceptabilité au sein des entreprises	185
5.4.3.2. Les facteurs d'acceptabilité en univers domestique	187
5.4.4. Application théorique de l'effacement dans les univers de référence	191

5.4.4.1. Étude appliquée au cas d'une galerie marchande	192
5.4.4.2. Étude appliquée au contexte sociotechnique domestique	195
5.4.5. La qualité du contrat d'effacement.	203
5.4.5.1. Les facteurs d'intérêt du contrat	203
5.4.5.2. La maîtrise des risques et des incertitudes	204
5.4.5.3. Anticiper les réticences des prospects.	205
5.4.5.4. Conclusion sur l'acceptabilité sociale et ses facteurs.	206
5.5. Conclusion	207
5.6. Remerciements.	208

Chapitre 6. Mutualisation énergétique entre bâtiments tertiaires, résidentiels et producteurs d'énergie 209

6.1. Introduction.	209
6.2. Mutualisation énergétique entre des bâtiments commerciaux, tertiaires, résidentiels, producteurs et gestionnaire de réseaux.	210
6.2.1. Les acteurs du réseau	210
6.2.2. Agrégateur de service énergétique	212
6.2.3. Structure du microréseau du cas d'étude	214
6.2.4. Profils de consommation et production des acteurs du microréseau	215
6.3. Gestion de la mutualisation énergétique entre bâtiments tertiaires, résidentiels et producteurs d'énergie.	217
6.3.1. Objectifs et contraintes des différents acteurs du microréseau.	218
6.3.2. Structure du superviseur : variables d'entrée et de sortie.	223
6.3.3. Graphes fonctionnels	225
6.3.4. Fonctions d'appartenance	225
6.3.5. Graphes opérationnels	229
6.3.6. Lois floues	230
6.3.7. Indicateurs	233
6.4. Cas d'étude	233
6.4.1. Caractéristiques du microréseau	233
6.4.2. Scénarios réalisés	234
6.4.2.1. Scénario 1 : sans superviseur	234
6.4.2.2. Scénario 2 : impact des énergies renouvelables sur le réseau d'étude	236
6.4.2.3. Scénario 3 : apport du superviseur.	238
6.5. Effacement de charges	240
6.5.1. Principe de l'effacement	240
6.5.2. Introduction de l'effacement de consommation et de l'acceptabilité	241
6.5.3. Simulation de la gestion énergétique intégrant l'effacement.	243

6.6. Conclusion	243
6.7. Remerciements.	245
6.8. Annexe : mode tarifaire.	245

**Chapitre 7. Gestion centralisée d'une communauté locale
énergétique permettant une autoconsommation maximale
de l'énergie photovoltaïque. 247**

7.1. Introduction.	247
7.2. Problématiques de la gestion énergétique des quartiers résidentiels.	255
7.2.1. Quelques fondamentaux sur la gestion des réseaux électriques	255
7.2.2. Vers un réseau intelligent (<i>smart grid</i>)	256
7.2.3. Quelques applications des microréseaux pour la gestion de communautés locales énergétiques.	259
7.2.3.1. Communautés locales énergétiques et microréseaux électriques	259
7.2.3.2. Positionnement du cas d'étude	263
7.3. Générateur PV actif.	264
7.3.1. Production PV actuelle.	264
7.3.2. Limites et évolutions rendues nécessaires.	264
7.3.3. Structure cascade	265
7.3.4. Application domestique	266
7.3.5. Gestion énergétique du bus continu	269
7.3.5.1. Gestion énergétique de la batterie par contrôle des modes de marche	269
7.3.5.2. Contrôle du bus continu interne et équilibre des puissances instantanées	270
7.3.5.3. Contrôle des puissances en mode déconnecté	271
7.3.5.4. Contrôle des puissances en mode normal	273
7.3.5.5. Contrôle des puissances en mode limitation	274
7.3.6. Gestion énergétique des supercondensateurs.	275
7.3.6.1. Principe	275
7.3.6.2. Supercondensateurs en mode chargé	277
7.3.6.3. Supercondensateurs en mode déchargé	278
7.4. Gestion d'un microréseau	278
7.4.1. Organisation de la gestion des réseaux électriques	278
7.4.2. Principales fonctions	280
7.4.2.1. Gestion à long terme ou engagement d'unités	280
7.4.2.2. Gestion à moyen terme pour l'ajustement ou le <i>dispatching</i> économique	280
7.4.2.3. Gestion centralisée d'un microréseau	281

7.4.2.4. Gestion décentralisée d'un microréseau par un système multi-agents	282
7.4.3. Spécificités des contrôleurs locaux de la production distribuée	283
7.4.4. Fondamentaux sur l'équilibrage des puissances	284
7.4.4.1. Une fonction essentielle de la gestion des réseaux	284
7.4.4.2. Réglage primaire des contrôleurs locaux	285
7.4.4.3. Réglage secondaire et tertiaire	285
7.4.5. Gestion des charges.	286
7.5. Application au développement d'un réseau électrique résidentiel	287
7.5.1. De la gestion domestique de la demande à celle de la production	287
7.5.2. Réseau résidentiel et application des concepts issus des microréseaux	290
7.5.3. Gestion énergétique en microréseau	294
7.5.3.1. Tâches et organisation	294
7.5.3.2. Stratégie	295
7.6. Techniques de prédiction et traitement des données	296
7.6.1. Prédiction de la production PV	296
7.6.2. Préviation de la charge	297
7.6.3. Estimation de l'énergie.	299
7.6.3.1. Contexte	299
7.6.3.2. Estimation de la puissance PV disponible	300
7.6.3.3. Estimation de l'énergie de charge requise	300
7.6.3.4. Estimation de l'énergie requise pour le stockage	300
7.7. Planification la veille pour le lendemain et calcul des références de puissance chaque demi-heure	301
7.7.1. Objectifs	301
7.7.2. Contraintes	301
7.7.2.1. Contraintes liées à la batterie au plomb	301
7.7.2.2. Contraintes liées à la microturbine à gaz	302
7.7.3. Algorithme déterministe pour l'exploitation des générateurs	302
7.7.3.1. Durant la journée	302
7.7.3.2. Durant la nuit	303
7.7.4. Application pratique	305
7.8. Gestion énergétique à moyen terme	307
7.8.1. Réduction des incertitudes de prévisions	307
7.8.2. Gestion énergétique des batteries (LC)	308
7.9. Gestion énergétique à court terme	310
7.9.1. Régulation primaire de fréquence	310
7.9.2. Stratégies d'équilibrage de puissance au sein du générateur actif.	311
7.9.2.1. Contrôle des modes de fonctionnement	312
7.9.2.2. Gestion énergétique des supercondensateurs	312

7.10. Tests expérimentaux par simulations en temps réel	312
7.10.1. Intérêts de la simulation en temps réel	312
7.10.2. La plateforme <i>Electrical Power Management Lab</i> du L2EP	314
7.10.3. Mise en œuvre expérimentale	316
7.10.4. Analyse de l'autoconsommation d'une maison	318
7.10.5. Augmentation du taux de pénétration PV dans un réseau résidentiel	324
7.10.5.1. Impact d'un producteur PV	324
7.10.5.2. Impact d'un taux de pénétration important	326
7.10.5.3. Impact des producteurs-consommateurs avec stockage d'énergie	328
7.11. Bilan des apports scientifiques et synthèse méthodologique	330
7.12. Retour d'expérience et perspectives de recherche	331

**Chapitre 8. Charge réversible des véhicules électriques
vers les réseaux et les bâtiments 335**

8.1. Introduction	335
8.2. La charge réversible des véhicules électriques	337
8.2.1. <i>Vehicle to Grid</i>	337
8.2.2. <i>Vehicle to Home et to Building</i>	341
8.2.3. <i>Vehicle to Station</i> et hub énergétique	342
8.2.4. Agrégateur de services énergétiques	343
8.3. Services potentiels et gestion énergétique d'un parc de véhicules électriques réversibles	343
8.3.1. Services potentiels du <i>Vehicle to Grid</i>	343
8.3.1.1. Réglage primaire de fréquence	344
8.3.1.2. Réglage secondaire de fréquence	345
8.3.1.3. Réglage tertiaire de fréquence	345
8.3.1.4. Lissage des pointes de puissance	345
8.3.1.5. Compensation de la puissance réactive	346
8.3.1.6. Support aux énergies renouvelables	346
8.3.2. Gestion énergétique d'un parc de <i>Vehicle to Grid</i>	346
8.3.2.1. Cas d'étude	346
8.3.2.2. Cahier des charges	347
8.3.2.3. Structure du superviseur	349
8.3.2.4. Graphes fonctionnels	350
8.3.2.5. Fonctions d'appartenance	351
8.3.2.6. Graphe opérationnel et règles floues	353
8.3.2.7. Optimisation du superviseur	355
8.3.2.8. Performances du superviseur	356
8.3.2.9. Impact sur le vieillissement des batteries	359

8.4. <i>Vehicle to Railway Station</i>	359
8.4.1. Impact et contribution des véhicules électriques sur le parking d'une gare	360
8.4.1.1. Modélisation et scénarios de profil de chargement de véhicules électriques sur le parking d'une gare	360
8.4.1.2. Optimisation de la puissance souscrite (SP)	362
8.4.2. Contribution de la technologie <i>Vehicle to Grid</i> sur le parking d'une gare	363
8.4.2.1. <i>Vehicle to Grid</i> dans le cas d'une gare	363
8.4.2.2. Supervision dans le contexte du tarif réglementé	364
8.4.2.3. Supervision dans le contexte du tarif du marché spot	366
8.5. <i>Vehicle to Home</i>	367
8.6. Conclusion	370
8.7. Remerciements.	371
8.8. Annexe : graphes fonctionnels détaillés de l'application V2G.	371
Bibliographie	375
Index	391