

Contenu

Partie 1 – Bases

1. Histoire du photovoltaïque	10
2. Marché	15
2.1 Développement du marché international	15
2.2 Evolution en Suisse	18
2.3 Commercialiser l'électricité solaire	19
3. Rentabilité	21
3.1 Coûts de capital et d'exploitation	21
3.2 Valeur actuelle, valeur actuelle nette et annuité	24
3.3 Plan des flux de trésorerie	24
3.4 Calcul du coût de production de l'électricité (LCOE) et du rendement	27
4. Cadre politique et subventions	31
4.1 Stratégie énergétique 2050	31
4.2 Conception du marché et subventions pour le photovoltaïque	32
4.3 Consommation propre et regroupement pour la consommation propre	38
5. Aménagement du territoire et règles de construction	43
5.1 Protection des monuments historiques	46
5.2 Réflexion et éblouissement	47
5.3 Lois, normes et directives	53
5.4 Impôts	55
6. Écologie et durabilité	57
6.1 Bilan écologique	57
6.2 Bilan énergétique	58
6.3 Bilan des polluants, unités de charge écologique	59
6.4 Besoins en matières premières	60
6.5 Compatibilité électromagnétique	61
7. Architecture	65
7.1 Conseils et erreurs à éviter	65
7.2 Les niveaux d'intégration	66
7.3 La diversité des modules PV	68
7.4 Le photovoltaïque en milieu urbain	69
7.5 Solutions possibles et exemples	71
8. L'énergie solaire	81
8.1 Le soleil, une source d'énergie	83
8.2 La trajectoire apparente du soleil	84
8.3 Le rayonnement solaire	86
8.4 Influence de la nébulosité	91
8.5 Masse d'air et albédo	91
8.6 Le rayonnement sur un plan incliné	92
8.7 L'ombrage et l'horizon	95

Partie 2 – Composants

9. L'électricité à partir de la lumière solaire	99
9.1 Principes physiques	99
9.2 Effet photoélectrique	100
9.3 Types de cellules solaires	105
9.4 Fabrication de cellules solaires cristallines	109
9.5 Optimisation des cellules	109
9.6 Technologie à couche mince	114
9.7 Cellules solaires organiques, à colorant et pérovskites	117
10. Modules PV	119
10.1 Processus de fabrication	119
10.2 Connexion des cellules solaires	123
10.3 Verre solaire	124
10.4 Boîte de jonction solaire et diode de dérivation	129
10.5 Types de modules PV	131
10.6 Applications spéciales	136
10.7 Modules PV colorés	138
10.8 Câblage électrique des cellules et des modules	140
10.9 Propriétés électriques	140
10.10 Ombrage partiel des modules équipés de cellules en silicium cristallin	146
10.11 Ombrage partiel des modules à couche mince	151
10.12 Dégradation	151
10.13 Essai et qualification des modules PV	154
11. Onduleurs pour fonctionnement en parallèle avec le réseau	155
11.1 Composants et fonctions des onduleurs	155
11.2 Types d'onduleurs	159
11.3 Puissance active, réactive et apparente	166
11.4 Rendement	168
11.5 Caractéristiques techniques des onduleurs	169
11.6 Fonctions de surveillance et de protection	169
11.7 Raccordement au réseau: régulation, immunité, protection, perturbations du réseau	171
11.8 Compatibilité électromagnétique et harmoniques	172
11.9 Durée de vie des onduleurs	173
12. Systèmes de batteries, onduleurs à batterie et régulateurs de charge	175
12.1 Principes de base et définitions	175
12.2 Technologie des cellules	178
12.3 Topologies de système	183
12.4 Système de secours et alimentation sans interruption (ASI)	185
12.5 Systèmes en site isolé	186

13. Installation en courant continu (DC)	189	19. Conception et dimensionnement des installations raccordées au réseau	235
13.1 Boîte de jonction de générateur	189	19.1 Choix de la puissance des modules	235
13.2 Câble à courant continu (DC)	190	19.2 Pics de puissance et pics de charge	235
13.3 Chemins de câbles et gaines de protection	191	19.3 Choix de la puissance optimale de l'onduleur	237
13.4 Connecteurs en courant continu (DC)	191	19.4 Câblage des modules	239
13.5 Protection contre les surtensions en courant continu (DC)	192	19.5 Conception avec optimiseurs de puissance	245
13.6 Interrupteurs, sectionneurs	193		
13.7 Dispositifs de protection contre les surtensions en courant continu (DC)	194	20. Conception et dimensionnement du câblage DC	249
		20.1 Utilisation et dimensionnement de la protection contre les surintensités des chaînes et des diodes de chaîne	249
14. Installation en courant alternatif (AC)	195	20.2 Dimensionnement des câbles	251
14.1 Ensembles d'appareillage	195	20.3 Acheminement des câbles	252
14.2 Câbles AC	196	20.4 Gestion des ombrages partiels	254
14.3 Protection contre les surtensions AC	196	20.5 Dispositifs de sectionnement et de commutation	254
14.4 Interrupteurs, sectionneurs	196		
14.5 Protection contre les surtensions	198	21. Dimensionnement du stockage pour les installations raccordées au réseau	259
14.6 Dispositifs de mesure, compteurs d'électricité	199	21.1 Domaines d'application des systèmes de stockage	259
14.7 Panneaux solaires pour balcons	200	21.2 Calcul de la capacité de stockage optimale	260
		21.3 Dimensionnement de la puissance et protection contre les surintensités	266
15. Gestion de l'énergie et surveillance des installations	201	21.4 Stratégies de charge et de décharge	266
15.1 Catégories de systèmes	201		
15.2 Systèmes de communication	203	22. Dimensionnement des installations en site isolé	269
15.3 Stations météorologiques	204	22.1 Analyse de l'utilisation et de la consommation	269
15.4 Appareils de mesure du rayonnement	204	22.2 Calcul de la capacité de stockage	270
		22.3 Calcul de la puissance photovoltaïque	272
Partie 3 – Planification		22.4 Choix de la puissance AC	274
		23. Mise à la terre, liaison équipotentielle, protection contre la foudre	275
16. Rendement énergétique	207	23.1 Mise à la terre et liaison équipotentielle	275
16.1 Aperçu des méthodes de calcul	207	23.2 Protection contre les surtensions	277
16.2 Rendement énergétique annuel	207	23.3 Protection contre la foudre, principes	278
16.3 Rendement énergétique mensuel	210	23.4 Analyse des risques et concept de zones de protection contre la foudre	279
16.4 Rendement énergétique horaire ou quart-horaire	211	23.5 Classes de protection contre la foudre	279
16.5 Pertes dans le système PV	212	23.6 Distance de séparation	280
16.6 Électricité hivernale grâce au photovoltaïque	218	23.7 Géométrie du cheminement des câbles	280
16.7 Pics de puissance et pics de charge	219	23.8 Variantes de mise en œuvre de la protection contre la foudre	282
		23.9 Lieu de montage et protection des câbles et des onduleurs	285
17. Consommation propre	221	23.10 Protection contre la foudre dans les façades	286
17.1 Calcul de la consommation propre	222		
17.2 Optimisation de la consommation propre	224	24. Raccordement au réseau	287
17.3 Consommation propre bénéfique pour le réseau	227	24.1 Processus de raccordement au réseau	287
		24.2 Principes et documents de référence	287
18. Configuration de l'installation	229	24.3 Exigences relatives aux installations PV	288
18.1 L'esthétique	229	24.4 Mesure et schéma de comptage	293
18.2 Rendement énergétique	231	24.5 Le photovoltaïque dans le réseau intelligent	294
18.3 Accessibilité	231	24.6 Le photovoltaïque dans le micro-réseau	294
18.4 Dispositif antichute	231	24.7 Le raccordement au réseau de demain	295
18.5 Autres exigences et spécifications	232		
18.6 Format portrait ou paysage?	232		
18.7 Angle d'inclinaison et espacement des rangées sur toits plats	234		

25. Intégration dans la domotique	299	30. Conception d'installations assistée par ordinateur	385
25.1 Solaire thermique et capteurs photovoltaïques thermiques	299	30.1 Applications météorologiques et calculateurs de potentiel photovoltaïque	386
25.2 Chauffe-eau avec élément chauffant	301	30.2 Programmes de simulation	387
25.3 Pompe à chaleur	302	30.3 Outils en ligne et outils de calcul	390
25.4 Produits blancs	304	30.4 Outils d'établissement d'offres	391
25.5 Systèmes d'automatisation des bâtiments	305	30.5 Logiciels de conception d'onduleurs	391
25.6 Mobilité électrique, stations de recharge	305	30.6 Building Information Modeling	391
25.7 Réduction dynamique de la puissance active	306		
25.8 Hiérarchie et priorité des systèmes de régulation	307		
26. Systèmes de montage	309	31. Acquisition, appel d'offres, soumission	393
26.1 Principes fondamentaux relatifs aux toitures, façades et enveloppes de bâtiments en général	309	31.1 Marchés publics	393
26.2 Classification des systèmes de montage	310	31.2 Documents de soumission	394
26.3 Installations ajoutées en toitures inclinées	312	31.3 Cahier des charges	396
26.4 Installations intégrées au toit pour toitures inclinées	318	31.4 Numérisation des processus d'achat	397
26.5 Installations ajoutées sur toiture plate	326		
26.6 Installations en façade	333	32. Déroulement du projet	399
26.7 Abris pour voitures et autres abris	341		
26.8 Vitrage horizontal et pergola	342	Partie 4 – Réalisation et exploitation	
26.9 Garde-corps et balustrades	343	33. Installation	403
26.10 Ouvrages d'infrastructure	344	33.1 Qui est autorisé à réaliser des installations?	403
26.11 Installations sur surface non bâtie	344	33.2 Préparation et logistique du chantier	404
		33.3 Déroulement des travaux	405
27. Statique	349	33.4 Dilatation et compatibilité des matériaux	406
27.1 Charges de neige	350	33.5 Remarques concernant l'installation et la qualité de l'installation	406
27.2 Forces dues au vent	353	33.6 Erreurs courantes	408
27.3 Facteurs de sécurité	355	33.7 Installations PV enfichables	414
27.4 Façade et vitrage horizontal	357		
28. Sécurité au travail et protection de la santé	361	34. Contrôles, réception, mise en service, mesures	415
28.1 Bases légales	361	34.1 Mesures	419
28.2 Mesures temporaires de protection contre les chutes lors de la construction	362	35. Documentation	433
28.3 Mesures permanentes de protection contre les chutes pour l'exploitation et l'entretien	363	35.1 Étiquetage et marquage	433
28.4 Sécurité électrique	370	35.2 Documentation de l'installation	435
28.5 Amiante	371		
29. Protection contre les incendies	373	36. Exploitation et maintenance	437
29.1 Prescriptions et bases	373	36.1 Administration et gestion	437
29.2 Évaluation des risques, objectifs de protection, sources de danger et propositions de solutions	375	36.2 Surveillance de l'installation	438
29.3 Protection incendie des installations PV et des batteries de stockage	376	36.3 Interventions de service et de contrôle	440
29.4 Protection incendie pour les installations PV en façade	380	36.4 Nettoyage	444
		36.5 Réparation, remplacement et repowering	447
		36.6 Coûts d'exploitation et d'entretien	449
		37. Démantèlement	451
		Annexe	
		A.1 Remerciements	455
		A.2 À propos de l'auteur	455
		A.3 Réglementations	456
		A.4 Normes et directives	456
		A.5 Abréviations	458
		A.6 Points importants: première visite	461
		A.7 Points importants: réception et mise en service	463
		A.8 Index	465