

Analyse de la chaîne de valeur des technologies relatives à l'énergie solaire en Tunisie

Rapport Final

Mandaté par

Ministère fédéral de l'Environnement, de la Protection de la Nature et de la Sûreté nucléaire de la République fédérale d'Allemagne

Ministère fédéral de la Coopération économique et du Développement de la République fédérale d'Allemagne

Institutions partenaires

Direction Générale de l'Energie du Ministère de l'Industrie de la République tunisienne

Agence Nationale de la Maîtrise de l'Energie de la République tunisienne

Publié par

Deutsche Gesellschaft für

Internationale Zusammenarbeit (GIZ) GmbH

Siège social

Bonn and Eschborn, Germany

T +49 228 44 60-0 (Bonn)

T +49 61 96 79-0 (Eschborn)

Friedrich-Ebert-Allee 40

53113 Bonn, Germany

T +49 228 44 60-0

F +49 228 44 60-17 66

Dag-Hammarskjöld-Weg 1-5

65760 Eschborn, Germany

T +49 61 96 79-0

F +49 61 96 79-11 15

E info@giz.de

I www.giz.de

Responsables

Martin Baltes (GIZ)

Projet « Appui au Plan solaire méditerranéen »

Jonas Zingerle (GIZ)

Projet « Promotion des énergies renouvelables et l'efficacité énergétique en Tunisie »

Auteurs

Dr. Sylvia Borbonus (Wuppertal Institute)

Thomas Fink (Wuppertal Institute)

Bernhard Brand (Wuppertal Institute)

Selly Wane (Wuppertal Institute)

Dr. Peter Viebahn (Wuppertal Institute)

Kerstin Fritzsche (Adelphi)

Karolin Blattmann (Adelphi)

Sami Zaoui (Ernst & Young)

Jalel Hannachi (Ernst & Young)

Aymen Jafaar (Ernst & Young)

Nada Amri (Ernst & Young)

Design

Diamond media GmbH (Miria de Vogt, Cheryl Juhasz); www.diamond-media-pr.de

Crédits photos de couverture

© GIZ / Berno Buff, voyage de presse GTZ en Tunisie: Visite de l'Hôtel «Les Colombes» à Hammamet. Des panneaux solaires thermiques sur le toit.

© Ir717 | Dreamstime.com; © Darrenbaker | Dreamstime.com

The geographical maps are for informational purposes only and do not constitute recognition of international boundaries or regions; GIZ makes no claims concerning the validity, accuracy or completeness of the maps nor assumes any liability resulting from the use of the information therein.

Toutes les cartes géographiques sont à titre d'information uniquement et ne constituent pas une reconnaissance des frontières internationales ou des régions; GIZ n'affirme pas la précision des cartes ni n'assume aucune responsabilité résultant de l'utilisation des informations qui s'y trouvent.

Tunis, 10.04.2013

Sommaire

LISTES DE TABLEAUX	8
LISTE DES FIGURES ET ILLUSTRATIONS	9
ABREVIATIONS	12
RESUME	14
1 INTRODUCTION	20
2 PHOTOVOLTAÏQUE : DEVELOPPEMENT DE LA TECHNOLOGIE ET DU MARCHÉ	23
2.1 DEVELOPPEMENT TECHNOLOGIQUE	24
2.1.1 TECHNOLOGIES PV: VUE D'ENSEMBLE	24
2.1.2 POTENTIEL D'INNOVATION	25
2.1.3 PERSPECTIVES DES APPLICATIONS PV	26
2.1.4 INTEGRATION DANS UN SYSTEME D'ENERGIE PLUS VASTE	27
2.1.5 COUT DES TECHNOLOGIES PV	27
2.2 DEVELOPPEMENT DU MARCHÉ ET DE L'INDUSTRIE	28
2.2.1 GENERALITES	28
2.2.2 REGION MENA	29
2.2.3 TUNISIE	30
2.3 RESUME ET CONCLUSIONS	30
3 ANALYSE DE LA CHAÎNE DE VALEUR DES SYSTEMES PHOTOVOLTAÏQUES	32
3.1 CHAÎNE DE VALEUR DE BASE DES SYSTEMES PV ET VENTILATION DES COUTS	34
3.2 MODULES MULTI-CRISTALLINS	34
3.2.1 PRODUCTION DE POLY-SILICIUM	35
3.2.2 FABRICATION DES PLAQUES	36
3.2.3 PRODUCTION DE CELLULES	38
3.2.4 MODULES	39
3.2.5 VERRE	41
3.2.6 FILMS/MATERIAUX D'ENCAPSULATION	42
3.3 MODULES TF: SILICIUM AMORPHE (A-SI)	43
3.4 CPV (BASE SUR LES SYSTEMES DE MODULES)	45
3.5 ONDULEUR	47
3.6 AUTRES EQUIPEMENTS ELECTRIQUES	48
3.7 STRUCTURES DE SUPPORT	49
3.8 RESUME ET CONCLUSIONS	51
4 ENERGIE SOLAIRE A CONCENTRATION : DEVELOPPEMENT DE L'INDUSTRIE ET DU MARCHÉ	52
4.1 DEVELOPPEMENT TECHNOLOGIQUE	53
4.1.1 LES TECHNOLOGIES D'ENERGIE SOLAIRE A CONCENTRATION	53
4.1.2 FRAIS D'INVESTISSEMENT	55
4.1.3 CHALEUR INDUSTRIELLE SOLAIRE	57
4.1.4 INTEGRATION DANS L'ENSEMBLE DU SYSTEME ENERGETIQUE	57
4.2 DEVELOPPEMENT DU MARCHÉ MONDIAL ET DE L'INDUSTRIE	57
4.2.1 MARCHÉ MONDIAL	57
4.2.2 REGION MENA	58
4.2.3 TUNISIE	60
4.3 RESUME ET CONCLUSIONS	60
5 ANALYSE DE LA CHAÎNE DE VALEUR DE LA CONCENTRATION D'ENERGIE SOLAIRE	61
5.1 MATERIAUX	63

5.2 COMPOSANTS DES SYSTEMES A CAPTEURS CYLINDRO-PARABOLIQUES	64
5.2.1 STRUCTURE DE MONTAGE ET SYSTEME DE POURSUITE OU DE SUIVI SOLAIRE	64
5.2.2 MIROIRS PARABOLIQUES	67
5.2.3 RECEPTEUR CYLINDRO-PARABOLIQUE	68
5.2.4 SYSTEME HFT	70
5.2.5 BLOC DE PUISSANCE	71
5.2.6 SYSTEME DE STOCKAGE	72
5.3 COMPOSANTS DES SYSTEMES LINEAIRES FRESNEL	74
5.3.1 STRUCTURE DE MONTAGE ET SYSTEME DE SUIVI SOLAIRE	74
5.3.2 MIROIRS POUR SYSTEME LINEAIRE FRESNEL	76
5.3.3 RECEPTEUR POUR SYSTEME LINEAIRE FRESNEL	77
5.3.4 SYSTEME HFT	78
5.3.5 BLOC DE PUISSANCE	78
5.3.6 SYSTEME DE STOCKAGE	78
5.4 COMPOSANTS DES SYSTEMES A TOUR SOLAIRE (RECEPTEUR CENTRAL)	79
5.4.1 STRUCTURE DE MONTAGE ET SYSTEME DE POURSUITE SOLAIRE	79
5.4.2 MIROIRS (HELIOSTATS)	81
5.4.3 RECEPTEUR CENTRAL	81
5.4.4 SYSTEME HFT	83
5.4.5 BLOC DE PUISSANCE	83
5.4.6 SYSTEME DE STOCKAGE	83
5.5 DEVELOPPEMENT DU PROJET	84
5.6 INGENIERIE ET CONSTRUCTION	84
5.7 SERVICE ET MAINTENANCE	85
5.8 DEMANTELEMENT	85
5.9 RESUME ET CONCLUSION	85
6 CHAUFFE-EAU SOLAIRE ET CHALEUR INDUSTRIELLE : TECHNOLOGIE ET DEVELOPPEMENT DU MARCHÉ	87
6.1 DEVELOPPEMENT TECHNOLOGIQUE	88
6.1.1 TYPES DE COLLECTEURS	88
6.1.2 CONCEPTIONS DE SYSTEMES CES DE BASE	89
6.1.3 EFFICACITES DE DIFFERENTS TYPES DE COLLECTEURS	94
6.1.4 COUTS ET STADE DE COMMERCIALISATION DE SYSTEMES DE CHAUFFE-EAU SOLAIRES	95
6.1.5 CHALEUR INDUSTRIELLE SOLAIRE	95
6.1.6 PERSPECTIVES DE PROGRES TECHNOLOGIQUES ET D'INNOVATION	96
6.1.7 INTEGRATION DANS LE SYSTEME ENERGETIQUE	96
6.2 DEVELOPPEMENT DU MARCHÉ ET DE L'INDUSTRIE	96
6.2.1 GENERALITES	96
6.2.2 REGION MENA	100
6.2.3 TUNISIE	102
6.3 RESUME ET CONCLUSIONS	103
7 ANALYSE DE LA CHAÎNE DE VALEUR DES SYSTEMES DE CHAUFFE-EAU SOLAIRES	104
7.1 CHAÎNE DE VALEUR FONDAMENTALE	105
7.1.1 MATERIAUX	105
7.1.2 DIMENSIONS DU SYSTEME ET FORMES DE BASE	106
7.1.3 INSTALLATION	107
7.1.4 SERVICE & MAINTENANCE	107

7.1.5	DISTRIBUTION	107
7.2	FABRICATION DE COMPOSANTS	107
7.2.1	COLLECTEUR A PLAT	107
7.2.2	COLLECTEUR A TUBES SOUS VIDE	109
7.2.3	SYSTEME DE MONTAGE D'UN COLLECTEUR	112
7.2.4	RESERVOIRS	113
7.2.5	ÉCHANGEUR DE CHALEUR	114
7.2.6	TUYAUTERIE, COMMANDES ET VALVES	115
7.2.7	POMPE ET STATION DE POMPAGE	117
7.2.8	FLUIDE CALOPORTEUR	118
7.3	RESUME ET CONCLUSION	119
8	MONOGRAPHIE DES INDUSTRIES IMPLIQUEES DANS LES TECHNOLOGIES- CIBLES	121
8.1	INDUSTRIE DE LA VERRERIE	122
8.1.1	DONNEES GLOBALES DU SECTEUR	122
8.1.2	ZOOM SUR LES SEGMENTS CIBLES	123
8.2	INDUSTRIE MECANIQUE & METALLURGIQUE (IMM)	123
8.2.1	DONNEES GLOBALES DU SECTEUR	124
8.2.2	ZOOM SUR LES SEGMENTS CIBLES	125
8.3	INDUSTRIE ELECTRIQUE & ELECTRONIQUE	127
8.3.1	DONNEES GLOBALES DU SECTEUR	127
8.3.2	ZOOM SUR LES SEGMENTS CIBLES	128
8.4	INDUSTRIE CHIMIQUE	129
8.4.1	DONNEES GLOBALES DU SECTEUR	129
8.4.2	ZOOM SUR LES SEGMENTS CIBLES	130
8.5	INDUSTRIE DES ENERGIES RENOUVELABLES	131
8.5.1	LE MARCHE DU CHAUFFE EAU SOLAIRE EN TUNISIE	131
8.5.2	LE MARCHE DU CSP EN TUNISIE (POTENTIEL)	132
9	ANALYSE DU POTENTIEL DE PRODUCTION DES COMPOSANTS POUR L'ENERGIE SOLAIRE	133
9.1	OBJECTIFS DE LA PHASE DE COLLECTE & D'ANALYSE DE DONNEES	134
9.1.1	APPROCHE DE SELECTION DES ECHANTILLONS CIBLES	134
9.1.2	DESCRIPTION DE L'ECHANTILLON DES ACTEURS INTERROGES	135
9.1.3	VISITES SUR SITE	138
9.2	EVALUATION DES CAPACITES FINANCIERES	139
9.2.1	ANALYSE DES RESULTATS DE LA PHASE DE TERRAIN	139
9.2.2	CONCLUSION	141
9.3	EVALUATION DES CAPACITES TECHNIQUES	141
9.3.1	EVALUATION GLOBALE DES DONNEES	142
9.3.2	INDUSTRIE SOLAIRE	144
9.3.3	INDUSTRIE DU VERRE	146
9.3.4	INDUSTRIE MECANIQUE ET METALLURGIQUE	146
9.3.5	INDUSTRIE ELECTRIQUE ET ELECTRONIQUE	147
9.3.6	INDUSTRIE CHIMIQUE/ PLASTIQUE	148
9.3.7	CONCLUSION	149
9.4	EXPERIENCE INTERNATIONALE & PARTENARIATS	150
9.4.1	ANALYSE DES RESULTATS DE LA PHASE DE TERRAIN	150
9.4.2	CONCLUSION	153
9.5	EVALUATION DES CAPACITES EN R&D DES ENTREPRISES	154
9.5.1	APERÇU DES CAPACITES R&D RELATIVES AUX TECHNOLOGIES SOLAIRES	154
9.5.2	CONCLUSION	155
9.6	STRUCTURES D'APPUI DE L'ETAT EN R&D, FORMATION ET TEST	157
9.6.1	ANALYSE DES RESULTATS DE LA PHASE DE TERRAIN	157
9.6.2	CONCLUSION	158

9.7	SYNTHESE DES PRINCIPALES CONCLUSIONS	159
9.7.1	LEVIER & BARRIERES A LA PRODUCTION D'EQUIPEMENTS DES ENERGIES RENOUVELABLES	159
9.7.2	ANALYSE SWOT DU POTENTIEL DE PRODUCTION DES COMPOSANTS SOLAIRES PAR TECHNOLOGIE	160
9.7.3	RECAPITULATIF DU POTENTIEL DE PRODUCTION PAR COMPOSANT CIBLE	162
9.7.4	MATRICE RECAPITULATIVE DU POTENTIEL DE PRODUCTION LOCALE PAR COMPOSANTS	163
9.8	MATRICE DES COMPOSANTS A PLUS FORT POTENTIEL	163
10	BONNES PRATIQUES INTERNATIONALES POUR LE DEVELOPPEMENT DE L'INDUSTRIE SOLAIRE	166
10.1	APPROCHE ANALYTIQUE ET CHOIX DES EXEMPLES	167
10.2	ANALYSE DES EXEMPLES DE DEVELOPPEMENT REUSSI DE L'INDUSTRIE PHOTOVOLTAÏQUE	169
10.2.1	MESURES ET DECISIONS POLITIQUES CONCERNANT LE MARCHE ET L'INDUSTRIE EN MALAISIE	169
10.2.2	MESURES ET DECISIONS POLITIQUES CONCERNANT LE MARCHE ET L'INDUSTRIE EN ALLEMAGNE	172
10.3	ANALYSE DU DEVELOPPEMENT REUSSI DE L'INDUSTRIE CSP EN ESPAGNE	174
10.4	ANALYSE DU DEVELOPPEMENT REUSSI DE L'INDUSTRIE DU CES EN TURQUIE	176
10.5	RECOMMANDATIONS D'ORDRE GENERAL POUR LA TUNISIE	177
11	RECOMMANDATIONS ET PLANS D' ACTIONS SPECIFIQUES PAR TECHNOLOGIE	180
11.1	POLITIQUE ENERGETIQUE ET EFFETS SOCIAUX-ECONOMIQUES	181
11.2	LE CHAUFFE EAU SOLAIRE (CES)	183
11.3	LE PHOTOVOLTAÏQUE (PV)	187
11.4	LES CENTRALES SOLAIRES THERMIQUES (CSP)	189
11.5	CONCLUSION	192
ANNEXES		195
REFERENCES		201

Listes de tableaux

Tableau 1 : Efficacité commerciale d'un module PV	25
Tableau 2 : Efficacité et les améliorations des technologies PV jusqu'en 2030	26
Tableau 3 : Aperçu des politiques et des projets solaires prévus	31
Tableau 4 : Coûts d'investissement en CSP avec spécifications	56
Tableau 5 : Vue d'ensemble des centrales ISCC installées dans la région MENA	58
Tableau 6 : Portefeuille de projets CSP en MENA, incluant les projets d'investissements (CTF)	59
Tableau 7 : Vue d'ensemble du portefeuille de projets CSP en Tunisie	60
Tableau 8 : Résumé des composants CSP	86
Tableau 9 : Avantages et inconvénients du système direct	91
Tableau 10 : Avantages et inconvénients du système indirect	93
Tableau 11 : Comparaison des différents types de systèmes CES	94
Tableau 12 : Taux d'efficacité, de température et coûts des différents types de capteurs	94
Tableau 13 : Quelques indicateurs sur le marché CES dans les pays sud-méditerranéens	102
Tableau 14 : Matières premières pour tubes sous vide, production et fonctionnement des panneaux CES à plat	106
Tableau 15 : Coûts de fabrication des collecteurs à plat en Allemagne (hors dépréciation pour les machines et l'équipement en %)	109
Tableau 16 : valeur estimée d'une chaîne de production de collecteurs à panneau plat	109
Tableau 17 : Valeur estimée d'une chaîne de production de tubes sous vide	111
Tableau 18 : processus de fabrication requis pour la production des composants CES	120
Tableau 19 : Les principaux résultats de l'approche de sélection préconisée	139
Tableau 20 : Vue d'ensemble des différents aspects technologiques étudiés au cours des entretiens	142
Tableau 21 : Composants de la chaîne de valeur PV actuellement fabriqués en Tunisie et leur potentiel	149
Tableau 22 : Composants de la chaîne de valeur ST pour les systèmes thermosiphon actuellement fabriqués en Tunisie et leur potentiel	149
Tableau 23 : Composants de la chaîne de valeur CSP actuellement fabriqués en Tunisie et leur potentiel	150
Tableau 24 : Analyse SWOT de l'industrie Tunisienne des composants de la technologie du solaire thermique	161
Tableau 25 : Analyse SWOT de l'industrie Tunisienne de production des composants de la technologie photovoltaïque	161
Tableau 26 : Analyse SWOT de l'industrie Tunisienne de production des composants de la technologie CSP	161
Tableau 27 : Aperçu des mesures de soutien pour le marché et pour l'industrie	168
Tableau 28 : Capacités actuelles des fabricants de photovoltaïque en Malaisie	170
Tableau 29 : Marché et politiques industrielles soutenant la fabrication du photovoltaïque en Malaisie	171
Tableau 30 : Marché et politiques industrielles soutenant la fabrication du photovoltaïque en Allemagne	174
Tableau 31 : Marché et politiques industrielles soutenant la fabrication du CSP en Espagne	175
Tableau 32 : Marché et politiques industrielles soutenant la fabrication de CES en Turquie	177
Tableau 33 : Emplois directs créés dans les secteurs solaires	182
Tableau 34 : Résumé des aspects essentiels du développement de l'industrie CES	184
Tableau 35: Plan d'action pour le développement de la Technologie CES en Tunisie	185
Tableau 36 : Résumé des aspects essentiels du développement de l'industrie du photovoltaïque	188
Tableau 37: Plan d'action pour le développement de la technologie photovoltaïque en Tunisie	190
Tableau 38 : Résumé des aspects essentiels du développement de l'industrie CSP	191
Tableau 39 : Plan d'action pour le développement de la Technologie CSP en Tunisie	193

Liste des figures et illustrations

Figure 1 : Répartition des coûts d'une centrale photovoltaïque (20 MW)	27
Figure 2 : Vue d'ensemble du top 10 mondial du marché PV	28
Figure 3 : Chaîne de valeur des systèmes PV	33
Figure 4 : Chaîne de valeur PV cristallin	34
Figure 5 : Chaîne de valeur PV TF	34
Figure 6 : Production des cellules par technologie en MW	35
Figure 7 : Répartition relative des éléments de coût	35
Figure 8 : Étapes de production par le Procédé Siemens	35
Figure 9 : Processus de découpage en plaques	37
Figure 10 : Processus de fabrication des cellules	38
Figure 11 : Composants basiques d'un module c-Si sans le BOS	39
Figure 12 : Procédé de fabrication d'un module	40
Figure 13 : Structure des coûts pour la production de verre flotté	41
Figure 14 : Schéma du réacteur PECVD	44
Figure 15 : Chaîne de valeur CPV basique	45
Figure 16 : Technologies CPV leaders (Soitec, SolFocus)	45
Figure 17 : Répartition des coûts de producteur d'un onduleur	47
Figure 18 : Défis actuels des composants utilisés dans les câbles PV	48
Figure 19 : Systèmes pour toitures plates et inclinées et pour espaces ouverts	50
Figure 20 : Schéma d'une centrale avec champ solaire	53
Figure 21 : Schéma d'un champ solaire	54
Figure 22 : Schéma d'un linéaire Fresnel	54
Figure 23 : Schéma d'une tour solaire	55
Figure 24 : Schéma du moteur Stirling	55
Figure 25 : Répartition des coûts d'investissement pour un champ cylindro-parabolique.	56
Figure 26 : Vue d'ensemble des projets CSP en Espagne et Etats-Unis ainsi que les projets au niveau mondial	58
Figure 27 : Aperçu de la chaîne de valeur d'un projet CSP	62
Figure 28 : Aperçu des composants des capteurs cylindro-paraboliques	64
Figure 29 : Formes de capteurs cylindro-paraboliques : boîte torque, boîte torque à bras cantilever, supports et plateformes terrestres.	65
Figure 30 : Commande à transmission à un axe et mécanisme de suivi hydraulique pour collecteurs cylindro-paraboliques.	65
Figure 31 : Composition des couches du miroir	67
Figure 32 : Formes de récepteurs cylindro-paraboliques : Schott Solar PTR 70 et Siemens UVAC 2010.	69
Figure 33 : Composants d'un récepteur cylindro-parabolique.	69
Figure 34 : Réseau de tuyauterie à l'intérieur du champ solaire	70
Figure 35 : Schéma d'un système de stockage thermique	73
Figure 36 : Aperçu des composants CSP d'un linéaire Fresnel	74
Figure 37 : Structure de montage d'un linéaire Fresnel	75
Figure 38 : Vis sans fin pour le couplage mécanique	75
Figure 39 : Section transversale d'un récepteur à tube unique de système linéaire Fresnel et schéma d'un récepteur multitube.	77
Figure 40 : Aperçu des composants d'une tour solaire	79
Figure 41 : Échantillons de différentes formes d'héliostats	80
Figure 42 : Entraînement à deux axes (système de poursuite solaire)	80
Figure 43 : Miroirs d'héliostats avec une surface de jusqu'à 120 m ²	81
Figure 44 : Récepteur central (chaudière)	82
Figure 45 : Forme d'un récepteur	82

Figure 46 : Chauffage solaire batch (réservoir de stockage intégré)	89
Figure 47: Système thermosiphon	90
Figure 48: Principe du système direct à boucle ouverte	91
Figure 49: Principe du système à boucle fermée (pressurisé au glycol)	92
Figure 50: Principe du système à vidange arrière (boucle fermée)	92
Figure 51: Répartition de la capacité totale installée en service (vitrée et non vitrée et capteurs à air) par région économique à la fin de l'année 2010	97
Figure 52: Répartition de la capacité nouvellement installée (vitrée et non vitrée et capteurs à air) par régions économiques en 2010.	97
Figure 53: Développement du marché de la capacité nouvellement installée entre 2009 et 2010 par région économique	98
Figure 54: Répartition par type de système pour la capacité totale installée de collecteur d'eau en service à la fin de l'année 2010	99
Figure 55 : Chaîne de valeur des technologies solaires pour l'eau chaude et la production de chauffage industriel	105
Figure 56 : Collecteur à panneau plat	108
Figure 57 : Collecteur à tube sous vide	110
Figure 58 : Système de montage pour collecteur à plat	112
Figure 59 : Réservoir solaire	113
Figure 60 : Échangeur de chaleur	114
Figure 61 : Valves de température, de contrôle et d'isolation	116
Figure 62 : Pompe	117
Figure 63: Répartition des entreprises par régime et par activité	122
Figure 64: Répartition de la production par segment (% , MTND)	124
Figure 65: Répartition des entreprises par régime et par segment	124
Figure 66: Répartition des entreprises certifiées ISO par segment	125
Figure 67: Répartition des entreprises par segment	126
Figure 68: Répartition des entreprises par segment	127
Figure 69: Répartition des entreprises par segment	128
Figure 70: Répartition des entreprises par régime et par activité	130
Figure 71: Evolution du nombre de ménages électrifiés via énergie PV en Tunisie	131
Figure 72: Répartition de l'échantillon final par secteur d'activité	135
Figure 73: Répartition de l'échantillon final par effectif employé	136
Figure 74: Répartition de l'échantillon final par régime d'activité	136
Figure 75: Répartition de l'échantillon final par participation étrangère Vs locale	136
Figure 76: Cartographie des acteurs interrogés par région	137
Figure 77: Cartographie des acteurs interrogés par technologie	137
Figure 78: Aperçu de la méthodologie de sélection des entreprises à visiter	138
Figure 79: Les freins cités par les entreprises non positionnées sur les énergies renouvelables	140
Figure 80: La nature des investissements à réaliser sur les 5 prochaines années	141
Figure 81: Les Investissements à réaliser sur les 5 prochaines années	141
Figure 82: a) Répartition sectorielle des entreprises impliquées dans les énergies solaires (base: 14) ; b) répartition des entreprises impliquées dans les énergies solaires par type de technologie	142
Figure 83: Probabilité d'entrer sur le marché du solaire	143
Figure 84: Systèmes de management et degré d'automatisation	143
Figure 85: Répartition des entreprises intéressées/non intéressées selon l'existence d'un partenaire stratégique	151
Figure 86: Répartition des entreprises intéressées / non intéressées par nature du capital social (100% tunisien / Avec participation étrangère)	151
Figure 87: Facteurs de motivation pour se positionner sur le secteur des composants solaires	151
Figure 88: Ventilation des entreprises 100% Tunisiennes et celles à capital étranger par régime	152
Figure 89: Répartition des entreprises interrogées par marchés destinataires de l'export	152
Figure 90: Marché à l'export des entreprises actives ou intéressées par le secteur des composants solaires	153
Figure 91: Répartition des entreprises interrogées par type d'implantation	153
Figure 92: Répartition des certifications par nature d'entreprises (Totalemment tunisienne/ à participation étrangère)	154

Figure 93: Implication des entreprises en R&D selon leur secteur d'activité	155
Figure 94: Implications des entreprises en R&D selon leur part de capital étranger	156
Figure 95: Répartition des entreprises impliquées dans la R&D selon l'effectif alloué (a) et selon le budget alloué en % du CA (b)	156
Figure 96: Récapitulatif des Barrières à la production d'équipements des énergies renouvelables - Optique entreprise	159
Figure 97: Récapitulatif des Leviers à la production d'équipements des énergies renouvelables - Optique entreprise	160
Figure 98: Matrice niveau d'investissement & transfert technologique requis / Potentiel de production locale par composant cible	164
Figure 99: Matrice des composants ayant le plus fort potentiel de fabrication en Tunisie	165
Figure 100 : Développement du marché du photovoltaïque en Allemagne en MW p.a.	172
Figure 101 : Capacité totale de collecteurs à panneau plat vitré et à tube sous vide en service en MWth (fin 2010) - Dix premiers pays (échelle logarithmique)	176
Figure 102 : Méthodologie de développement de recommandations spécifiques par technologie	181
Figure 103 : Type de postes créés tout au long de la chaîne de valeur	182

Abréviations

ANME :	Agence Nationale de la Maîtrise de l'Energie
a-Si :	Silicium amorphe
BOS :	Balance of System (composants système)
CA :	Chiffre d'affaires
CdTe :	Telluride de Cadmium
CES :	Chauffe-eau solaire
CETIME :	Centre Technique des Industries Mécaniques et Electriques
c-Si :	Silicium cristallin
CSP :	Concentrated Solar Power (solaire thermique à concentration)
CTMCCV:	Centre technique des Matériaux de Construction, de la Céramique et du Verre
EPC :	Engineering, procurement, contracting (l'ingénierie, l'approvisionnement, les contrats)
ENIT :	École nationale d'Ingénieurs de Tunis
ER2E :	Energies renouvelables et Efficacité énergétique
FIT :	Feed-in tariff (tarif de rachat)
GW(p):	Gigawatt (peak)
HTF :	Heat transfer fluid (fluide caloporteur)
IC :	Industrie chimique
IEE :	Industrie électrique et électronique
IER :	Industrie des Energies renouvelables
ISCCS :	Integrated Solar-Combined Cycle System (système solaire à cycle combiné intégré)
IMCCV :	Industrie des Matériaux de Construction, de la Céramique et du Verre
IMM :	Industrie mécanique et métallurgique
mc-Si :	Silicium multicristallin
MW(p):	Mégawatt (peak)
MWth :	Mégawatt thermique
MENA :	Middle East & North Africa (Moyen-Orient et l'Afrique du Nord)
PM :	Part de Marché
PMN :	Programme de Mise à Niveau
PSM :	Plan Solaire Méditerranéen
PST :	Plan Solaire Tunisien
PV :	Photovoltaïque
R&D :	Recherche & Développement
ST :	Solaire thermique
SWOT :	Strengths, Weaknesses, Opportunities and Threats
TCAM :	Taux de croissance annuel moyen
TF :	Thin film (technologies à couches fines)

Une politique industrielle pro-active visant à encourager la fabrication de technologies liées à l'énergie solaire devrait prendre en compte le type de technologie ainsi que ses débouchés. De fait, les technologies solaire pourraient favoriser le développement industriel et par conséquent contribuer à créer des emplois. La récente étude «L'efficacité énergétique et les énergies renouvelables en Tunisie – emploi, de qualification et impacts économiques» (Lehr et al. 2012) a permis de quantifier les effets de l'introduction des énergies renouvelables (photovoltaïque, éolienne solaire thermique) à travers les chaînes de valeurs en Tunisie. Il en résulte que l'installation d'équipements et des services après-vente représentent de loin les parts de chaînes de valeurs qui engendrent le plus d'emplois au sein de la branche solaire. Toutes les impulsions et priorités pour le développement d'une industrie de l'énergie solaire en Tunisie devraient donc soigneusement tenir compte des contraintes budgétaires et chercher à maximiser les effets socio-économiques tels que l'emploi et la valeur ajoutée nationale. De ce fait, l'objectif de cette étude est d'analyser les capacités et les intérêts des entreprises tunisiennes quant à la fabrication de composants liés à l'énergie solaire. Ainsi la question directrice de l'étude se pose en ces termes: Quelles devraient être, à court terme, les axes essentiels pour la promotion de la production de composants solaires en Tunisie?

L'analyse de la chaîne des valeurs mettant l'accent sur la fabrication de composants: les structures du marché et de l'industrie, les exigences de fabrication et les risques qui y sont liés ainsi que les effets socio-économiques

Le marché mondial du PV a enregistré jusqu'en 2011 un taux de croissance élevé. Ainsi en 2011, plus de capacités PV que jamais auparavant ont été ajoutées à la grille. Cependant, le plus grand marché reste l'Europe et la demande du marché dans la région MENA dépend fortement des projets gouvernementaux. Les programmes de promotion des PV, tels que l'alimentation en tarifs - le facteur clé du succès du développement du marché PV en Europe, ont été récemment réduit de façon drastique dans plusieurs pays. D'autre part, ces stratégies de soutien sont encore quasi inexistantes dans les pays MENA. Les premières installations de production de modules photovoltaïques existent déjà dans certains pays de la région MENA et même en Tunisie la première installation de production de modules PV vu le jour à la fin de 2011. En amont la production p.e. de poly-Si, de plaquettes, de cellules ainsi que le processus de production de films minces, nécessitent beaucoup de connaissances technique, du savoir-faire et requièrent des investissements élevés. D'autre part en aval (module et la fabrication de composants BOS) les barrières d'entrée sont généralement plus faibles. Toutefois, compte tenu de la surcapacité actuelle, de la baisse des prix et de l'inexistence d'un marché régional MENA, se lancer dans

production pourrait présenter des risques considérables pour la Tunisie. De manière générale, les effets sur l'emploi direct pourraient être plus élevés en aval de la chaîne des valeurs (ingénierie, construction, installation, exploitation et entretien créent autour de 14.5 emplois par MW) qu'en amont (fabrication de composants crée autour de 4 emplois par MW). Selon GWS (2012) 80% de l'ingénierie, de la construction et de l'installation et même 100% de la planification se font localement et la plupart des appareils électriques sont actuellement fabriqués localement (70%).

Le marché mondial du CSP est encore très jeune et aucune technologie CSP spécifique ne peut actuellement être identifiée comme étant la technologie du futur. La parabole reste aujourd'hui encore la technologie la plus convaincante, bien que la tour centrale et la linéaire de Fresnel se démarquent par leurs coûts de production plus faibles ainsi qu'une plus grande efficacité. Toutefois les coûts d'investissement devraient baisser pour toutes les technologies CSP dans un proche avenir. Les fournisseurs leaders en composants CSP et services se trouvent en Europe et aux États-Unis, qui ont fourni la plupart des composants en système cycle-solaire-combiné-intégré (ISCCS) dans la région MENA étant donné que les entreprises agissant dans le domaine du CSP sont encore rares dans la région. Des composants tels que les miroirs, les structures de montage, les systèmes de suivi et récepteurs devront à l'avenir être adaptés aux conditions environnementales locales. Cependant, cela engendrera des dépenses élevées dans le cadre des activités de RD. Les expériences des marchés CSP de premier plan ont en outre montré que le soutien du public et les activités de RD sont des facteurs clés pour le succès ainsi que pour le développement d'une industrie.

Même dans la région MENA les premiers projets-pilote CSP ont été développés en combinaison avec des centrales à combustibles fossiles. Cependant, la capacité en CSP installée dans la région reste faible par rapport aux principaux marchés et aux tarifs feed-in et des stratégies nationales font défaut dans la plupart des pays. En aval les technologies CSP ont plus d'impact sur l'emploi (8 emplois par MW) que les activités en amont (3,5 emplois par MW). La plupart des emplois pourraient être créés dans les travaux publics (emplois par MW 5-7), alors que la fabrication de composants crée entre 0,4 et 1,5 emplois par MW. En Tunisie le taux d'importation d'appareils électriques se situe autour de 30% et devrait baisser jusqu'à 10% en 2030. Dans l'avenir la planification jouera également un rôle important.

Les systèmes de chauffe-eau solaires tels que les systèmes de capteurs en plaque planes de tubes à vide sont des technologies fiables, et déjà une alternative économique à

Résumé

celles basées sur les combustibles fossiles. Dans les régions ensoleillées, le thermosiphon simple à tube vide ou avec collecteurs en plaques planes prévaut déjà. Des systèmes plus sophistiqués sont nécessaires pour les maisons destinées à plusieurs familles, à l'industrie ou aux climats plus froids. Dans les climats ensoleillés les perspectives sur le marché des systèmes de chauffe-eau solaires sont bonnes. La Chine et Israël ont montré que la technologie peut être financièrement compétitive et qu'elle peut-être déployée sans soutien financier à long terme.

En Afrique du Nord, le marché des chauffe-eau solaires ont connu une croissance en Égypte, au Maroc et en Tunisie. L'absorption sur le marché des applications pour (chaleur industrielle solaire) est surtout possible sur les marchés européens du solaire qui sont bien développés. Toutefois, imposer un marché de chauffe-eau solaires dynamique pour les procédés de chaleur industrielle dans la région MENA et en Europe nécessite un ensemble de mesures pour renforcer la confiance envers les marchés ainsi qu'une maîtrise de la chaîne des valeurs. Les composants pour chauffe-eau solaires sont plutôt faciles à produire et nécessitent un faible investissement. Toutefois, les entreprises tunisiennes font face à certains risques concernant la production de capteurs et de systèmes de chauffe-eau solaires: le coût croissant des matières premières, les questions de qualité ainsi que les marchés axés sur la politique. Les fabricants de capteurs solaires disposent d'une production de plus en plus automatisée et d'une fabrication optimisée. Les réductions de coûts dans le secteur de la fabrication sont énormes et correspondent à une courbe d'apprentissage de 15%. Toutefois, le coût des matières ont presque absorbé la digression des coûts de production. La qualité des chauffe-eau solaires doit être améliorée et garantie. Afin de pouvoir exporter vers les marchés européens, l'industrie tunisienne devrait se conformer aux normes européennes comme par exemple le label Solar Key Mark. En outre, les marchés ont été créés avec un soutien politique: les programmes de stimulation déterminent la taille du marché en Europe et dans la région MENA. La planification et l'installation constituent l'étape la plus génératrice d'emploi de la chaîne des valeurs (13,6 jobs/1000m²), comparé à la fabrication de composants avec 5,2 job/1000m². Le pourcentage de machines importées devrait baisser à l'avenir et passer de 70 à 40%. Le système d'écoulement, la mesure, ainsi que le contrôle resteront, même à l'avenir à 100% des produits d'importation. Cependant, l'installation, le commerce et la planification sont à 100% des services nationaux. Dans les étapes en aval (définies comme l'approvisionnement, l'installation, l'exploitation et l'entretien), les effets sur l'emploi totalisent presque le triple des 5,2 emplois par 1000 m². Les fabricants tunisiens importent 70% de leurs machines. Tous les cadrans ainsi que les télécommandes sont importés.

Toutefois, l'installation, la construction, planification et le commerce sont basés entièrement sur l'expertise locale.

Le potentiel de la Tunisie quant à la fabrication de composants solaires: la situation actuelle des industries de composants solaire à fort potentiel

En Tunisie, l'industrialisation de la technologie du solaire thermique est confortée par l'existence d'un marché et d'une industrie mature pour les Chauffe-eau solaires. Les activités commerciales des entreprises concernées s'étendent de la fabrication des composants, à la planification et à l'installation de systèmes à usage résidentiel et tertiaire, couvrant ainsi l'intégralité de la chaîne de valeurs. Toutefois, les exportations sont limitées à la région MENA. Les industriels tunisiens ont par ailleurs besoin de soutien pour l'obtention de certifications internationales ainsi que pour le développement d'une activité R&D, afin de faire face à la concurrence régionale et mondiale, notamment à la Chine (coûts compétitifs) et à l'Europe (qualité compétitive). Comme l'a démontré l'enquête auprès des entreprises, les ressources humaines, le savoir-faire et le niveau de coopération internationale nécessaires sont disponibles en Tunisie. L'enquête a également relevé des insuffisances au niveau du contrôle qualité. En résumé, la Tunisie bénéficie d'une base industrielle et technologique solide et d'un bon système incitatif pour les chauffe-eau solaires.

Le marché du photovoltaïque en Tunisie n'a pas encore dépassé la phase embryonnaire de son développement. En effet, toutes les lignes de fabrication existantes sont des lignes de fabrication de modules qui sont installées depuis peu de temps. Néanmoins, elles sont pourvues d'équipements à la pointe de la technologie et semi-automatisées pour permettre une certaine flexibilité au niveau du montage des composants. Un certain degré d'automatisation est cependant nécessaire pour accroître le niveau d'efficacité et d'intégration de la production de certains composants (y compris le verre, les films, les backsheets, les boîtes de jonction et les cellules) actuellement importés. Le marché mondial du photovoltaïque se trouve actuellement en phase de consolidation et présente beaucoup d'incertitudes quant aux demandes en volume et à la croissance. Les capacités de fabrication existantes (amont) en Asie constituent une barrière à l'entrée, notamment sur l'aspect coût, pour les nouveaux entrants. Bien qu'il n'existe guère de compétence de fabrication de photovoltaïque en Tunisie, les industries de câblage et de métallurgie sont bien développées. Selon les responsables interrogés, ces industries n'ont aucune chance de s'intégrer le marché du photovoltaïque en l'absence d'un système d'incitations fiable. Parmi les autres faiblesses relevées, nous retrouvons l'absence d'une main d'œuvre qualifiée et la faible connexion entre la R&D et l'industrie. La consoli-

dation que connaît le secteur du photovoltaïque à l'échelle mondiale force les acteurs internationaux à rechercher de nouvelles opportunités d'affaires et de nouveaux marchés. De par son niveau d'ensoleillement élevé et de par sa proximité avec l'Europe, la Tunisie dispose d'une position attractive, moyennant des mesures de soutien à mettre en place.

L'analyse du potentiel local de fabrication des composants solaires en Tunisie démontre que l'industrie de la technologie CSP reste encore non établie. En effet, aucune ligne de fabrication pour ses composants n'existe encore et très peu d'acteurs du marché sont actuellement en mesure de fabriquer ces composants. De tels constats ont révélé d'importantes lacunes notamment en termes d'absence de maîtrise technique de la technologie à tous les niveaux (industrie, formation, recherche...), d'expertise humaine et d'activités de R&D. En conséquence, ce n'est qu'à long terme que le CSP peut représenter une option valable pour le tissu industriel tunisien. Comparé au photovoltaïque, les marchés internationaux sont de petite envergure et les activités de développement de projet représentent un risque élevé pour les investisseurs. Néanmoins, la Tunisie constitue une destination à fort potentiel théorique pour les centrales CSP, en raison de ses conditions géographiques favorables (niveau d'ensoleillement, proximité de l'Europe).

Recommandations et plan d'action

Compte tenu des conditions actuelles du marché, de la concurrence, des risques d'entreprise et des étapes technologiques de chaque technologie solaire, chauffe eau solaire semble à court terme être la technologie la plus prometteuse en termes de fabrication locale et en termes d'effets sur l'emploi pour la Tunisie. En plus d'une bonne couverture existante de la chaîne de valeur en Tunisie, le système PROSOL a créé un marché attrayant.

Presque tous les composants sont importants pour les fabricants tunisiens: Capteur solaire, ballon stockage (industrie solaire), la transformation du verre (industrie de verre), système de montage (industries mécanique et métallurgique). Cependant le système de mesure et de contrôle devront être importés jusqu'en 2030. Les activités en aval sont également à favoriser car elles favorisent la création d'emploi en aval et contribuent à réduire les coûts le long de la chaîne des valeurs, surtout au niveau de l'installation et réduisent ainsi le coût global du système. Les interventions devraient se concentrer sur l'amélioration de la qualité des produits, sur la consolidation du marché intérieur, l'offre d'opportunités d'exportation.

Ainsi le plan d'action mentionne entre autre: une amélioration du système stimulation, par exemple, concernant

les contrôles de transparence et de qualité, pour soutenir et / ou stimuler la croissance du marché local, accélérer La mise en place d'un système de contrôle qualité des chauffe-eau solaire, mettre en place des programmes d'assistance à la certification des produits ciblant les fabricants. D'autre part le PV est non seulement beaucoup moins représenté dans le paysage de l'industrie tunisienne, mais l'industrie mondiale est actuellement confrontée à une importante consolidation et à un développement incertain du marché. Toutefois, étant donné le positionnement géographique favorable de la Tunisie (forte irradiation solaire) et l'existence d'industries annexes, le PV peut présenter certaines opportunités. Cependant compte tenu du faible taux d'emplois créés et des barrières d'entrée sur le marché élevées, la priorité devrait être donnée au développement des activités en aval. Cela nécessite un important marché local qui devrait être stimulé. Les interventions devraient viser à (a) renforcer le marché local, (c) soutenir les activités en aval, (b) renforcer l'éducation et la formation + connecter l'industrie et la R&D (invertteur & électrique, la cellule R&D). À cette fin, le plan d'action privilégie des mesures telles que la définition d'objectifs ambitieux de déploiement; la mise à jour du PROSOL ELEC, l'attraction d'IED, la R&D pour onduleurs, régulateurs, supports et câbles.

Du fait que marché et l'industrie du CSP sont pratiquement inexistantes en Tunisie car les technologies CSP n'ont pas encore atteint la maturité, les coûts de R&D et d'investissements présentent des barrières pour les fabricants tunisiens. Aucun des éléments CSP n'est encore fabriqué en Tunisie. Ainsi des mesures détaillées devraient être précédées d'une discussion générale incluant l'agenda de politique énergétique en Tunisie. Comme pour les activités en aval PV présentent un potentiel élevé de création d'emplois et de valeur ajoutée locale.

En outre, le renforcement des capacités est nécessaire au sein des institutions gouvernementales, de l'industrie et dans le système éducatif (universités, par exemple). Puisque qu'il n'est pas encore possible de discerner la technologie qui s'imposera dans le futur, il est important de rester ouvert dans les domaines de la R&D et de l'enseignement supérieur. A court terme, la politique industrielle devrait éventuellement mettre l'accent sur l'industrie électrique et électronique (connecteur, câbles). D'ici à 2030 leur taux d'importation se situera autour de 10%.

Dans le même temps, les scénarios de politique énergétique suggérés actuellement prévoient une capacité de 110 MW en 2016, 330 MW en 2020 pour atteindre 460 MW en 2030. Même si cela correspond à un taux annuel d'installation relativement modeste, la difficulté, vu le risque élevé pour les entreprises et le manque de savoir-faire local, est

d'attirer les investisseurs. À la lumière de ces conclusions, des recommandations s'adressant aux organisations gouvernementales et à l'industrie ont été formulées quant à la création de capacités. Un savoir-faire supplémentaire est requis. Il peut être acquis par le biais d'organisations internationales ou en attirant les IDE. Alors que l'installation de parcs CSP peut générer de la création d'emplois, il convient de prévoir que les effets sur l'emploi liés à la fabrication de composantes ne se feront sentir qu'à moyen

ou long terme, afin de réduire les risques annexes. Trois thèmes semblent se profiler: les mesures de politique industrielle à court terme, le renforcement des capacités institutionnelles ainsi que l'attraction d'investissements directs. Ainsi le plan d'action recommande: d'évaluer les tendances mondiales, les variantes technologiques ainsi que les risques générés par l'intégration locale des activités CSP, et assurer une veille sur les technologies CSP à travers des activités de R&D.

L'essor et les priorités relatives au développement de l'industrie de l'énergie solaire en Tunisie doivent être considérés avec attention en tenant compte des contraintes budgétaires et de la question de la maximalisation des effets socio-économiques (emplois et valeur ajoutée au niveau national, par exemple). Par conséquent, du point de vue de la politique industrielle, il semble prometteur de continuer d'explorer les potentiels de fabrication de composants.

Une politique industrielle pro-active encourageant la fabrication de technologies liées à l'énergie solaire doit concentrer ses objectifs en fonction de la technologie solaire et de ses débouchés. Après avoir connu des problèmes de livraison en raison de pénurie de silicium, le marché de l'énergie solaire photovoltaïque (PV) est devenu un marché acquéreur dans les années 2007 à 2009. Depuis 2009, l'augmentation drastique des capacités de production a engendré une concurrence effrénée et une surproduction au sein du marché de la PV. Ces deux conséquences ont entraîné un déclin significatif des prix ainsi qu'une dynamique du marché partiellement inattendue, particulièrement notable en 2011. Le marché du chauffage solaire a bénéficié des taux de croissance substantiels lors de la dernière décennie, tout particulièrement en Europe et en Chine, en raison de l'introduction de régimes de subvention à long-terme ou d'obligations en matière d'énergie solaire (Autriche et Allemagne, par exemple) ou encore en raison des avantages concurrentiels des systèmes solaires de production d'eau chaude ou des technologies alternatives (Chypre et Chine, par exemple). Spécialement dans les états de la région du Moyen-Orient et de l'Afrique du Nord (MENA pur Middle East and North Africa) disposant d'un fort ensoleillement, les décideurs politiques sont fortement intéressés par le concept des centrales solaires thermiques (CSP pour Concentrated Solar Power).

En effet, les technologies liées à l'énergie solaire ont un potentiel non négligeable pouvant contribuer au développement de l'industrie et du marché de l'emploi. L'étude récente sur l'efficacité énergétique et les énergies renouvelables en Tunisie - emplois, qualification et impacts économiques (« Energy efficiency and renewable energies in Tunisia - Job, qualification and economic impacts ») a pour objectif de quantifier les effets de l'introduction d'énergies renouvelables (PV, éoliennes, solaires thermiques) à travers toutes les chaînes de valeur en Tunisie. Leur potentiel de création d'emplois montre plusieurs niveaux de performance. Une des conclusions principales est qu'il existe d'importantes différences entre la filière solaire thermique et la PV. La filière solaire thermique a créé 1 418 emplois entre 2005 et 2010 alors que la PV n'en a généré que 27. L'étude montre également que le secteur d'installation de l'équipement et les services après-vente représentent de loin la partie de la chaîne de valeur engendrant le plus

d'emploi dans la filière de l'énergie solaire (plus de 1 045 emplois créés).

De ce fait, l'objectif de cette étude est d'analyser les capacités et les intérêts des entreprises tunisiennes en matière de production de composants pour les technologies liées à l'énergie solaire. Pour mener cette étude, trois organisations ont collaboré : le Wuppertal Institute, Adelphi et Ernst&Young Tunisie. La réalisation de cette étude s'est déroulée en 4 étapes :

- 1 : le diagnostic du marché mondial, régional et national pour la PV, les CSP et les technologies solaires thermiques pour la production d'eau chaude et de chaleur pour le processus industriel (Wuppertal Institute, en charge de CSP et chauffe-eau solaire, et Adelphi, en charge de PV)
- 2 : l'analyse des composants des chaînes de valeur de la PV, des CSP et des technologies solaires thermiques pour la production d'eau chaude et de chaleur pour le processus industriel (Wuppertal Institute, en charge de CSP et chauffe-eau solaire, et Adelphi, en charge de PV)
- 3 : l'analyse des capacités tunisiennes en termes de production de composants par enquête et visite d'entreprises (Adelphi, en charge de l'évaluation technique et de l'évaluation des capacités en R&D et Ernst & Young en charge de la présentation des monographies dans les technologies-cible, de l'évaluation des capacités financières, du partenariat à l'international et des structures de soutien)
- 4 : l'élaboration d'un plan d'action pour le développement de la fabrication locale (Adelphi en charge de la présentation des meilleures pratiques et de la présentation des éléments de marché et de la chaîne de valeur par technologie, et Ernst & Young en charge de la présentation du plan d'actions et des recommandations spécifiques par technologie)

En premier lieu, l'étude livre des analyses détaillées de la chaîne de valeur de technologies sélectionnées liées à l'énergie solaire pouvant potentiellement être fabriquées par des entreprises tunisiennes, à condition que celles-ci disposent des capacités financières et techniques requises. Se basant sur une analyse du développement des technologies et du marché, cette évaluation se concentre sur les technologies suivantes :

- la photovoltaïque (PV), en particulier les modules solaires polycristallins et les modules à film fin (silicium amorphe) ainsi que la photovoltaïque à concentration (CPV)
- le solaire thermique à concentration (CSP), en particulier les systèmes de miroirs paraboliques, les systèmes à lentilles de Fresnel et les systèmes avec tour solaire (récepteur central)

1 Introduction

- et les technologies solaires thermiques (ST) pour la production d'eau chaude et de chaleur industrielle en mettant l'accent sur les systèmes de chauffage solaire de l'eau avec capteurs plats et les capteurs à tubes sous vide.

Les analyses détaillées de la chaîne de valeur se réfèrent à la fabrication des composants pour les technologies sélectionnées et fournissent des informations pertinentes sur les matériaux correspondants, les processus et exigences. Le déroulement d'un projet, la construction, la maintenance et l'exploitation tout comme le démantèlement, en tant qu'aspects complémentaires de la technologie solaire ne sont pas développés de manière approfondie dans cette évaluation et seront évoqués uniquement en cas de besoin.

Les évaluations de la chaîne de valeur des technologies liées à l'énergie solaire suivent un plan commun. Les composants essentiels du système d'énergie solaire sont identifiés et brièvement décrits, incluant leur part dans le coût global du système. Les sous-ensembles de composants sont exposés, incluant une description détaillée du processus de fabrication, des exigences particulières et des problèmes posés. Les contraintes de fabrication techniques et financières sont soulignées, incluant les informations clés telles que les frais d'investissement, les compétences nécessaires et le savoir-faire technique, la taille des infrastructures types, les principaux producteurs et les structures industrielles actuelles.

Les acteurs potentiels de l'industrie et des structures d'appui seront identifiés et analysés selon leurs capacités (financières, techniques, R&D, partenariats et expérience internationale) à contribuer à la production locale. Pour les composants pouvant potentiellement être réalisés en Tunisie, un plan d'action pour le renforcement des capacités industrielles et de la relation de coopération avec les structures d'appui sera élaboré. Il est à noter que le

choix des technologies faisant l'objet de cette étude a été énoncé par la volonté de l'Agence Nationale de la Maîtrise de l'Energie (ANME) à redynamiser les entreprises actives du secteur pour répondre aussi bien au besoin du marché local qu'à la demande internationale ainsi que pour contribuer à la création d'emplois. D'autant plus que, en ces temps de transition, le taux de chômage de la population tunisienne jeune et diplômée est important et que le secteur des énergies renouvelables pourrait répondre à leurs attentes en termes d'employabilité.

Le plan d'action comprend des recommandations d'ordre plutôt général autour des 4 dimensions qu'il convient de prendre en considération dans le cadre de la mise en application de mesures spécifiques destinées à promouvoir les énergies renouvelables. Toute stratégie relative aux technologies solaires devrait être conçue au sein d'un cadre légal. D'autres types d'énergies renouvelables ainsi que la structure de l'alimentation en énergie en Tunisie, y compris la collaboration avec les pays voisins, fournissent les axes stratégiques de base. Elles jouent un rôle important sur la priorisation des technologies solaires (p. ex. préférence pour le photovoltaïque ou le CSP). Il convient de noter que les mesures énoncées ont également été sélectionnées en raison de leur faisabilité sur un certain laps de temps. Certaines d'entre elles, comme l'amélioration de la communication, pourront être mises en place relativement rapidement et à moindre effort, alors que d'autres, comme la création d'un système d'incitation ou la mise en place d'une régulation des contenus locaux, nécessiteront une analyse détaillée et impliquent un nombre plus important de parties prenantes. Pour ces raisons, ce plan d'action a surtout pour vocation de donner des indications concernant les actions nécessaires. Une coordination des mesures mises en place est également utile afin d'assurer le contrôle des progrès effectués sur chacun des axes concernés.

2 Photovoltaïque : développement de la technologie et du marché

2.1 Développement technologique

2.1.1 Technologies PV: vue d'ensemble

Les systèmes photovoltaïques (PV) convertissent l'énergie solaire directement en électricité. Ils peuvent être utilisés pour des applications lointaines géographiquement (systèmes off-grid ou non-connectés au réseau) ou alimenter directement un réseau électrique (systèmes on-grid ou connectés au réseau). La plus petite unité d'un système PV est la cellule PV qui est un dispositif semi-conducteur convertissant l'énergie solaire directement en courant électrique continu. Pour construire un module PV, généralement de plusieurs centaines de Watts (W), les cellules PV sont reliées entre elles par un composé de feuilles à fond vitré. Combinés à d'autres composants-système dépendant d'applications (Balance of System, BOS) comme des onduleurs, contrôleurs de charge, composants électriques, batteries ainsi qu'à un système de montage, les modules PV forment un système PV. En raison de leur grande modularité, les systèmes PV peuvent aller d'une capacité de quelques Watts à plusieurs Mégawatts (MW) (IEA 2010a).

Les technologies photovoltaïques peuvent être classées en deux catégories générales : les modules à plaquettes en silicium cristallin et les modules à couches fines. En plus de ces technologies PV actuellement en vigueur sur le marché et éprouvées commercialement, il existe une gamme émergente de nouvelles technologies et de nouveaux concepts de cellules PV qui pourrait pénétrer le marché à condition qu'il soit établi une feuille de route pour augmenter leur performance, améliorer leur fiabilité et réduire leur coût.

Silicium cristallin (c-Si)

En 2011, près de 90% des ventes de cellules PV ont été réalisées à partir des technologies de cellules en silicium (Si) qui ont largement prouvé leur fiabilité et qui devraient rester la technologie PV dominante sur le marché; du moins sur le moyen-terme. Le silicium cristallin est composé de cellules PV reliées entre elles et encapsulées entre une face avant transparente et un matériau de support. Sur le marché mondial, la plupart des modules PV c-Si est fabriquée à partir de cellules soit monocristallines, soit multicristallines.

Les modules composés de cellules en silicium monocristallin ont une efficacité commerciale de 14 à 20% et utilisent des couches de silicium fabriquées à partir de la méthode de croissance monocristalline. Les couches de cellules multicristallines sont générées par des procédés de fusion et de solidification de silicium polycristallin. Bien que ces derniers modules aient une efficacité commerciale inférieure aux autres, de l'ordre de 11 à 15%, ils augmentent leurs parts de marché notamment grâce à leurs coûts de production moindres (IEA-PVPS 2011).

Cependant, les rendements des cellules PV c-Si, mentionnés ci-dessus, diminuent avec des températures élevées. Cette diminution est particulièrement importante dans les régions chaudes comme la zone MENA (Moyen-Orient et Afrique du Nord).

Aujourd'hui, les cellules c-Si sont la technologie PV la plus mature. Cependant, des améliorations restent nécessaires pour en réduire les coûts, augmenter l'efficacité et la durée de vie des cellules. Les coûts des matières premières comme l'argent pourraient devenir une préoccupation future en raison de la rapide augmentation de leur prix ces dernières années.

Thin film technologies ou technologies à couches fines (TF)

En 2010, les TF PV ont représenté environ 12% de la totalité des modules PV fabriqués. Les cellules TF sont fabriquées en déposant des couches extrêmement fines de matériau semi-conducteur sur un matériau de support à faible coût comme le verre, l'acier inoxydable ou le plastique. Contrairement aux cellules cristallines, qui peuvent se briser facilement, certaines technologies TF permettent leur encapsulation dans des modules flexibles et transparents pouvant être utilisés pour des applications spécifiques telles que l'intégration PV aux bâtiments (Build-in PV = BIPV) (IEA-PVPS, 2011). Les technologies PV peuvent être classées en cinq sous-catégories générales (IEA 2010a) :

- amorphe (a-Si)
- couches fines de silicium à jonctions multiples (a-Si/ μ c-Si)
- Telluride de cadmium (CdTe),
- cuivre-indium-diséléniure (CIS) et cuivre-indium-gallium-diséléniure (CIGS)
- couches fines de silicium à jonctions multiples consistant en la combinaison d'une cellule a-Si et de couches additionnelles de silicium a-Si avec du silicium microcristallin (μ c-Si)

L'efficacité des couches fines PV va, actuellement, de 6 à 9% pour les a-Si et les a-Si/ μ c-Si, de 9 à 11% pour les CdTe, et de 10 à 12% pour les CIS et CIGS. Bien que présentant des rendements plus faibles que les cellules de silicium cristallin, les cellules TF sont potentiellement moins chères à produire. À cause de leur moindre rendement, les cellules PV TF ont besoin de plus de surface pour produire la même quantité d'électricité que les cellules PV c-Si.

Cependant, en comparaison avec les cellules s-Ci, l'efficacité des cellules à couches fines est moins encline à diminuer en raison de fortes températures ; ce qui est un avantage non-négligeable. De plus, les cellules PV TF sont prometteuses pour des applications intégrées aux bâtiments, comme mentionné précédemment.

Tableau 1 : Efficacité commerciale d'un module PV

Wafer-based Si		Thin Film		
Mono-Si	Mc-Si	a-Si/a-Si/ μ c-Si	CdTe	CIS/CIGS
14-20%	11-15%	6-9%	9-11%	10-12%

Source: IEA 2010b, p. 8

Composants système ou Balance of system (BOS)

Les composants système ou Balance of System (BOS) consistent en de multiples composants tels que des onduleurs/batteries, traqueurs, boîtes de jonction, câbles, connecteurs et sont une part de la chaîne de valeur PV. Comme le prix des modules PV diminuent, la part du coût de ces composants va en augmentant. En outre, les composants BOS sont importants pour la fiabilité du système PV car de nombreuses pannes découlent directement de ces derniers. Les temps d'arrêt dus à ces pannes ont un impact significatif sur la performance de tout le système. L'onduleur est devenu un composant particulièrement important du BOS pour les systèmes PV connectés au réseau électrique; non seulement parce qu'il doit alimenter le courant continu d'un générateur solaire en courant alternatif, mais, aussi, parce qu'il remplit les fonctions sophistiquées de contrôle et de communication nécessaires pour contribuer activement à la gestion du réseau dans les nouveaux codes de ce réseau. Comme de plus en plus de systèmes PV collectifs de plusieurs MW sont installés, les onduleurs ont été développés avec des capacités allant jusqu'à 2 MW (IEA-PVPS 2011).

2.1.2 Potentiel d'innovation

Technologies émergentes et nouveaux concepts PV

Les cellules en couches fines et organiques avancées entrent, tout particulièrement, dans la catégorie des nouvelles technologies émergentes. Dans les cellules organiques, on différencie les cellules entièrement organiques des cellules solaires hybrides à colorant organique (DSSC/dye sensitized solar cells). Ces technologies peuvent être produites avec les systèmes d'impression par bobines et les systèmes d'impression habituels ; ce qui promet des coûts de production très faibles. Cependant, la plupart de ces développements en sont encore au stade de la recherche en laboratoire et il reste de nombreux problèmes à résoudre comme le faible rendement et la faible durée de vie par rapport aux autres technologies PV.

En outre, la recherche fondamentale est menée afin de développer de nouveaux concepts et technologies PV, incluant la recherche sur les matériaux de pointes, les

nouveaux concepts et procédés de conversion, afin de parvenir à une ultra-haute efficacité des cellules PV. Celle-ci inclut, notamment, les cellules de points quantiques et les cellules thermoélectriques. Les points quantiques pourraient surmonter l'efficacité limitée du silicium cristallin car ils absorbent ou émettent, à volonté, un rayonnement en ajustant la longueur d'onde, permettant, ainsi, de récolter une plus large proportion de lumière incidente. Le traitement peut s'effectuer sur des matériaux peu coûteux comme des feuilles de plastique, de verre ou de métal. Les points quantiques pourraient avoir un rendement supérieur à 40% avec des coûts de production faibles. Toutefois, des efforts en recherche fondamentale sont nécessaires. (IEA 2010a).

Concentration photovoltaïque (CPV)

En utilisant un système à concentrateur optique en forme de lentilles ou de miroirs, la CPV concentre le rayonnement solaire sur de petites cellules à haut-rendement. Ces cellules PV sont, en général, faites de plusieurs couches de matériaux semi-conducteurs différents afin de capturer une longueur d'onde spécifique du spectre lumineux solaire sur chacune des couches. Bien que la CPV soit plus coûteuse que les autres technologies PV, un rendement, allant jusqu'à 38% pour les cellules et 25% pour les modules, est possible (IEA-PVPS, 2011). Contrairement à la technologie PV, la CPV doit suivre le soleil en utilisant un système de suivi à 2 axes afin de garder la lumière du soleil concentrée sur les cellules photovoltaïques. Des systèmes de suivi qui opèrent de manière fiable pendant de nombreuses années sont donc indispensables pour la CPV. Les principaux avantages des systèmes de CPV sont le haut rendement combiné à des faibles coûts de fonctionnement. De plus, de faibles investissements sont déjà utilisés pour faciliter une rapide intensification. Néanmoins, la technologie CPV est encore une approche émergente et, de ce fait, elle doit encore surmonter d'importants défis technologiques (ex: systèmes de suivi sophistiqués) (EIS 2012). Des projets pilotes CPV sont en cours de test.

Perspectives des technologies PV

Des améliorations significatives en efficacité et dans les processus de production sont attendues dans les techno-

Tableau 2 : Efficacité et les améliorations des technologies PV jusqu'en 2030

Christalline silicon technologies	2010-2015	2015-2020	2020-2030/2050
Efficiency target in % (commercial modules)	- sc-Si: 21% - mc-Si: 17%	- sc-Si: 23% - mc-Si: 19%	- sc-Si: 25% - mc-Si: 21%
Industry manufacturing aspects	- Si consumption <5 grams/Watt (g/W)	- Si consumption <3 g/W	- Si consumption <2 g/W
Selected R&D areas	- New silicon materials and processing - Cell contacts, emitters and passivation	- Improved device structures - Productivity and cost optimisation in production	- Wader equivalent technologies - New device structures with novel concepts
Thin film technologies	2010-2015	2015-2020	2020-2030
Efficiency target in % (commercial modules)	- Thin film Si: 10% - Copper indium gallium (di)selenide (CIGS): 14% - Cadmium-telluride (CdTe): 12%	- Thin film Si: 12% - Copper indium gallium (di)selenide (CIGS): 15% - Cadmium-telluride (CdTe): 14%	- Thin film Si: 15% - Copper indium gallium (di)selenide (CIGS): 18% - Cadmium-telluride (CdTe): 15%
Industry manufacturing aspects	- High rate deposition - Roll-to-roll manufacturing - Packing	- Simplified production process - Low cost package - Management of toxic materials	- Large high-efficiency production units - Availability of manufacturing materials - Recycling of modules
Selected R&D areas	- Large area deposition process - Improved substrates and transparent conductive oxides	- Improved cell structures - Improved deposition techniques	- Advanced materials and concepts

Source: IEA 2010b, p. 24f

logies PV. À l'avenir, une grande variété de technologies PV est appelée à voir le jour. Le Tableau 2 présente une vue d'ensemble des objectifs de rendement des modules commerciaux à l'horizon 2030. Alors que la consommation de silicium doit être réduite pour toutes les technologies cristallines, les modules en couches fines ont besoin de processus de production nouveaux et simplifiés (IEA 2010b).

2.1.3 Perspectives des applications PV

On peut différencier quatre principaux domaines d'application (IEA-PVPS 2011):

- Off-grid domestic – système autonome domestique
- Off-grid non-domestic – système autonome non-domestique
- Grid-connected distributed – système raccordé au réseau de distribution
- Grid-connected centralized – système raccordé au réseau centralisé

Les systèmes autonomes domestiques sont installés dans le monde entier et utilisés pour alimenter en électricité

des zones non connectées au réseau de distribution public (ex : éclairage).

Les systèmes autonomes non-domestiques alimentent en électricité des applications telles que les télécommunications ou les pompes à eau dans les zones où de petites quantités d'électricité ont une grande valeur.

Les systèmes raccordés au réseau de distribution alimentent directement en électricité des clients connectés à ce réseau ou alimentent le réseau d'électricité public auquel sont connectés les clients. En général, on utilise de tels systèmes PV pour des propriétés privées ou des bâtiments publics.

Les systèmes raccordés au réseau centralisé fournissent de l'électricité à des clients non spécifiés. Ces systèmes PV sont utilisés comme des centrales électriques et, généralement, montés au sol.

Les systèmes PV connectés au réseau nécessitent des onduleurs pour intégrer le courant continu du rayonnement solaire au réseau d'électricité alternative. Bien que les systèmes non-connectés n'intègrent pas l'électricité pro-

duite dans le réseau électrique, un onduleur est toujours indispensable pour stocker et fournir l'électricité à la demande, à partir des batteries. Des batteries en plomb/acide à profondes décharges sont bien adaptées à la technologie leader des systèmes PV non-connectés.

Alors que, dans beaucoup de régions du monde, les systèmes PV ne sont pas encore compétitifs aux heures de pointe avec la distribution d'électricité générée en réseau connecté, ils sont déjà compétitifs en tant que système non-connecté dans les zones rurales éloignées (IEA 2010a). Cependant, la baisse des prix des systèmes PV ainsi que les progrès technologiques favoriseront la parité des systèmes dans un futur proche.

2.1.4 Intégration dans un système d'énergie plus vaste

La production d'électricité PV dépend des flux d'énergie dans le milieu naturel. Si le rayonnement solaire incident sur les panneaux PV change, la production électrique change immédiatement entraînant des niveaux de fiabilité moindres qui représenteront le défi principal pour l'intégration dans le système énergétique. Cet effet sera, dans une certaine mesure, lissé par différents types de sites pour les installations, en augmentant la surface de ces mêmes installations aussi bien que la dispersion géographique entre plusieurs sites. Les petits et moyens sites PV sont, généralement, installés près des utilisateurs finaux car l'intégration dans l'infrastructure électrique est simplifiée, alors que les grands sites PV peuvent, eux, être installés loin des centres de charge. Cependant, ces sites nécessitent, en règle générale une infrastructure de réseau

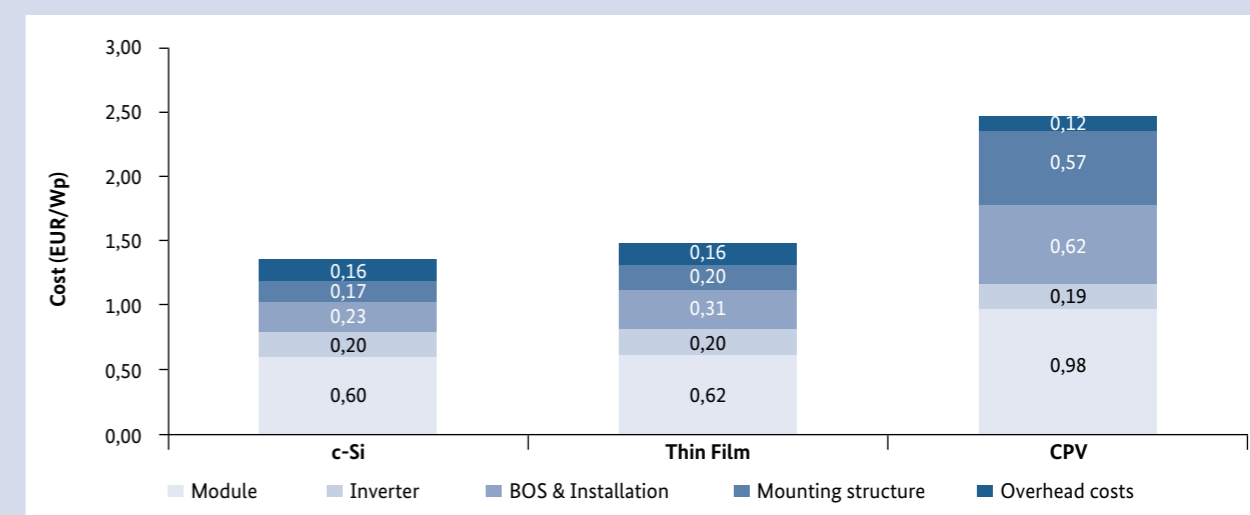
supplémentaire. Les facteurs de capacité des PV vont de 12 à 27 %, tandis que les systèmes PV à inclinaison fixe ont des capacités inférieures mais utilisent un système de suivi à axe unique qui fournit des facteurs de capacités supérieures (Sims et al. 2011). Avec l'augmentation de la capacité PV installée, l'intégration nécessite une gestion de réseau sophistiquée. Ainsi, les technologies PV nécessitent un nouveau contrôle et de nouvelles applications de communication pour contribuer activement à la gestion du réseau.

2.1.5 Coût des technologies PV

Ces dernières années, la technologie PV a connu une baisse rapide des prix en raison des améliorations technologiques et des économies d'échelle massives entraînées par la montée en puissance des capacités. Comme mentionné ci-dessus, la féroce concurrence entre les fabricants de modules, due à une offre excédentaire sur le marché mondial, fut cruciale pour de rapides réductions de coûts. Les prix des modules c-Si diminuèrent de plus de 40 % en 2011. Aujourd'hui, les prix moyens les plus bas du marché pour les modules multi-cristallins vont de 0,71 à 0,99 EUR/W en avril 2012 (pv exchange, 2012). Les prix des modules TF étaient descendus à 0,71 EUR/W (a-Si/ μ -Si), 0,88 EUR/W (a-Si), et 0,69 EUR/W (CdTe). Concernant des projets à grande échelle, des prix aussi bas que 0,50 EUR/W ont été constatés. Les prix sur le marché au comptant des modules en couches CIGS/CIS commencent actuellement à 1,01 EUR/W. Les marges des fabricants ont baissé de quelques cents seulement (Siemer 2012).

Dans l'ensemble, la tendance à la baisse des prix pour les technologies PV se poursuivra à l'avenir. Ceci doit être

Figure 1 : Répartition des coûts d'une centrale photovoltaïque (20 MW)



bien considéré pour les nouveaux arrivants sur le marché du PV.

40 à 60 % des coûts principaux pour les modules technologiques sont relatifs aux installations et à l'habillage des modules. Toutefois, en raison de la baisse générale des prix des modules, l'importance de ces coûts diminuera au fil du temps et d'autres composants deviendront des facteurs de coûts plus importants dans les installations. En d'autres mots, la pression des prix sur les composants du BOS comme les onduleurs ou les systèmes de montage va gagner en importance. En 2011, le marché des onduleurs a vu ses prix décliner de 15 à 20 % (Photon 2011). La Figure 1 illustre la ventilation indicative des coûts à grande échelle pour une centrale PV installée de 20 MW. En plus des faibles prix des modules, les prix des onduleurs ont également diminué de 10-15 % en 2011, ce qui n'est pas reflété dans la figure 1 en raison de l'absence de données détaillées sur le marché.

2.2 Développement du marché et de l'industrie

2.2.1 Généralités

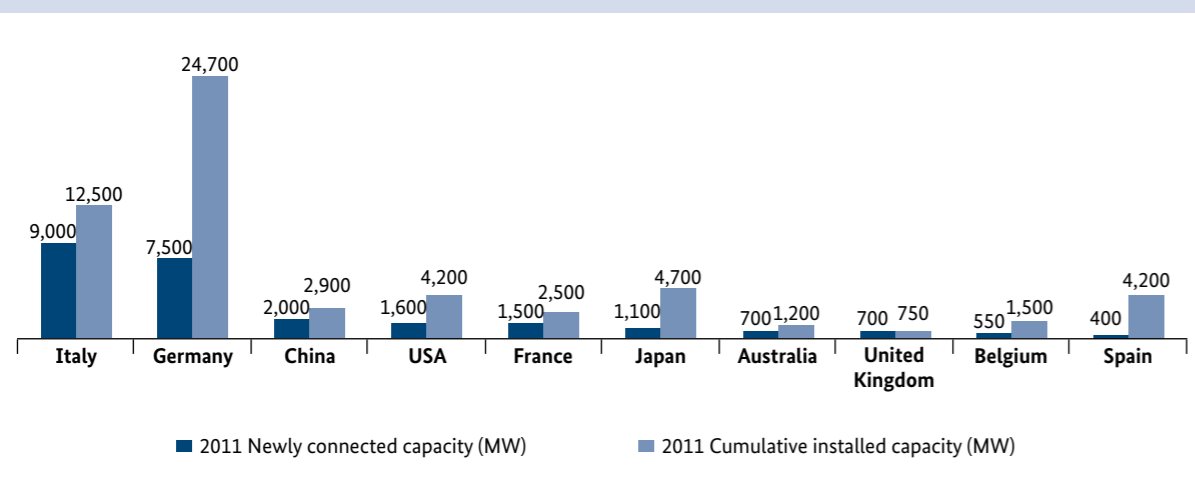
Les installations PV ont connu une croissance rapide dans beaucoup de pays et, particulièrement, sur le continent européen. La puissance cumulée globale a atteint plus de 67,3 GW à la fin de l'année dernière, dont seulement 27,5 GW ont été ajoutés au réseau en 2011. Ceci correspond à un taux de croissance d'environ 67 %. Quelques 33 % (9 GW) de cette puissance ajoutée, a été installée en Italie et quelques 27 % (7 GW) en Allemagne. Ces deux pays sont les plus gros marchés PV au monde. La puissance cumulée installée en Italie et en Allemagne comptait respective-

ment 12,5 GW et 24,7 GW fin 2011. Avec respectivement 4,2 GW et 4,7 GW de puissance cumulée les Etats-Unis, l'Espagne et le Japon sont également de gros marchés dans le monde. Cependant, la croissance de la capacité nouvellement ajoutée observe un ralentissement depuis fin 2008. En dehors de l'Europe, la Chine a connu un fort développement PV. Néanmoins, la capacité installée cumulée en Chine est encore faible par rapport aux principaux marchés dans le monde (EPIA 2012). La figure 2 présente un aperçu de la capacité PV mondiale installée en 2011 et de la capacité installée cumulée à la fin de l'année 2011.

L'énorme croissance mondiale du marché PV a été particulièrement soutenue par des mécanismes politiques de soutien efficaces (ex: les tarifs de rachat) et de considérables réductions de coûts ces dernières années. Ceci a favorisé de nombreux projets en Allemagne et en Italie. Cependant, un grand nombre de pays a annoncé la réduction des coûts et de l'amélioration technologique des modules PV ou a déjà réduit leurs tarifs de rachat par suite de la forte évolution du marché.

L'industrie mondiale des PV est actuellement confrontée à une rude concurrence et à la consolidation du marché, notamment la production massive de puissance PV en Asie. Cela a conduit à une surabondance de panneaux PV sur le marché mondial (y compris les stocks), ce qui ne répond pas à la demande mondiale. La pression sur les prix et les réductions de coûts liés aux modules PV continueront à l'avenir, ce qui renforce la tendance de marges de productions en baisse et de concurrence accrue sur le marché. Cela se reflète dans le fait que les ventes de l'industrie mondiale n'ont augmenté que de 12 % alors que le marché a crû de 40 % en 2011.

Figure 2 : Vue d'ensemble du top 10 mondial du marché PV



Source: EPIA 2012, p. 4

En 2012, les niveaux de demande devraient se maintenir à ceux de 2011. Les incitations sont toujours les principaux pilotes du marché. Néanmoins, une croissance à long-terme et un futur potentiel PV sont prévus dans presque toutes les régions du monde car la part de la production d'électricité photovoltaïque mondiale devrait atteindre jusqu'à 5 % en 2030 et 11 % en 2050, comparativement à seulement 0,1 % en 2010 (AIE 2010b). L'Europe devrait perdre sa position de leader sur le marché au profit de la Chine et des Etats-Unis à moyen-terme. Les autres marchés émergents sont le Japon, l'Australie, le Maroc, l'Inde, l'Afrique du Sud et la Malaisie.

Dans le top 10 des fabricants de cellules PV, 5 sont chinois (Suntech Power, JA Solar, Yingli Green Energy, Trina Solar, Haeron Solar) et 2 sont taiwanais (Motech Industries, Gintech). Actuellement, seuls 2 fabricants de ce classement sont américains (First Solar et Sunpower) et un autre est canadien (Canadian Solar), qui a également sa fabrication en Chine. Aucun fabricant européen ni japonais ne sont présents dans le top 10 des producteurs de cellules solaires. A l'avenir, on attend d'autres implantations dans les zones où la main d'oeuvre est à bas prix comme en Asie, et plus précisément en Chine (Photon 2012).

En 2012, le leader mondial Suntech Power, qui est un fournisseur chinois de cellules cristallines et TF ainsi que de modules a eu une capacité de production de plus de 2 GWp. À l'exception de Suntech Power et de First Solar, qui est le deuxième fabricant mondial de cellules, tous les autres ne fournissent pas de cellules TF même s'ils ont tous des capacités annuelles de plus d'1 GWp. Néanmoins, en dépit de sa position de leader, Suntech n'a pas pu empêcher une perte record en 2011 de plus de 1 milliard de dollars, comparativement à des profits élevés des années précédentes. Pour réduire les coûts de production, Suntech a récemment annoncé un partenariat stratégique avec la société DuPont, géant américain de produits chimiques, pour développer de nouvelles technologies solaires (EuroObserv'ER 2012). Les facteurs de réussite des principaux fabricants sont des économies d'échelle, ce qui réduit les coûts, ainsi que la qualité et l'efficacité des cellules et modules photovoltaïques. En outre, l'intégration verticale le long de la chaîne de valeur ainsi que de faibles coûts énergétiques (ce qui est particulièrement important pour la production intensive d'énergie de silicium) peuvent être identifiés comme des facteurs de réussite supplémentaires pour les producteurs.

2.2.2 Région MENA

En raison de la popularité médiatique d'un large éventail de projets envisagés par Desertec ou le plan solaire méditerranéen, la région MENA a acquis la réputation

d'être l'un des futurs hauts-lieux pour le développement du marché solaire mondial. Il est maintenant reconnu que non seulement les CSP, mais aussi des technologies photovoltaïques pourraient offrir des débouchés prometteurs dans les pays de la région grâce à la diminution des coûts des modules PV au cours des deux dernières années.

Jusqu'à présent, le volume du marché PV dans la région était relativement faible. En Afrique du Nord, la demande globale correspond à une puissance en MW à un chiffre et est principalement soutenue par des installations hors-réseau et certains programmes subventionnés par le gouvernement pour de petits systèmes raccordés au réseau. Des exemples de tels programmes sont le programme PROSOL-ELEC en Tunisie ou l'initiative Chorouk au Maroc. Néanmoins, certains gouvernements de la région sont en train de considérer une augmentation des parts de l'électricité photovoltaïque dans leurs sources d'énergie. L'Algérie a annoncé une feuille de route des énergies renouvelables, qui prévoit la construction de plusieurs grandes centrales photovoltaïques jusqu'en 2030. De même, le Maroc envisage de faire plus en plus appel à des technologies photovoltaïques (en plus de DSP) pour la mise en œuvre de son plan solaire. Concernant l'Algérie, il convient de mentionner que le pays a apporté un énorme soutien à la fabrication de systèmes PV. À l'heure actuelle, une installation de production de modules d'une capacité annuelle ciblée d'environ 120 MW de modules cristallins est en cours de construction. Le projet a été initié par la société d'utilité publique Sonelgaz et devrait commencer à produire les premiers modules en 2014. Les modules produits seront très vraisemblablement installés dans le cadre du programme algérien de renouvellement de l'énergie. D'autres signaux prometteurs pour le PV dans la région MENA sont envoyés à partir de la région du Golfe, en particulier les Émirats Arabes Unis (EAU). Abu Dhabi, avec son installation solaire majeure, Masdar, peut être considéré comme le premier pays PV de la zone. Masdar, inaugurée en 2009, est la plus grande centrale photovoltaïque en cours dans la région MENA avec un projet de 10 MW à Masdar City. Dans un avenir proche, ce projet sera complété par le projet « Nour 1 » de 100 MW PV à Abu Dhabi. Les Émirats Arabes Unis accueilleront également un fabricant de modules domestiques, Microsol International. Microsol produit des cellules et modules cristallins principalement destinés à l'exportation avec une capacité annuelle en sortie d'usine de 250 MW. L'Arabie saoudite a également reconnu le potentiel des PV dans la région et a récemment annoncé la construction d'une première tranche d'un système PV de 10 MW monté au sol. Le tableau 3 présente un résumé des politiques et des projets actuellement menés dans la région MENA.

En résumé, on peut dire que la région MENA représente un important gisement potentiel en PV pour la produc-

tion d'énergie électrique. Toutefois, certaines caractéristiques de cette technologie doivent être prises en considération (source fluctuante, stockage électrique nécessaire, diminution de l'efficacité dans les régions chaudes). La demande actuelle dépend fortement des incitations et des programmes gouvernementaux. Des stratégies de soutien au PV manquent toujours actuellement dans les pays de la MENA. Par conséquent, les fabricants privés potentiels de modules PV devraient, non seulement, considérer les risques liés à une demande incertaine mais, également, être conscients de la rudesse de la pression exercée mondialement sur les prix à cause de la compétition venue d'Asie. En comparaison avec les fabricants internationaux, les capacités de production nationales de fabricants de la région MENA sont très faibles et une véritable industrie PV n'existe pas encore dans la région.

2.2.3 Tunisie

En 2009, la Tunisie a, entre autres, publié son Plan Solaire Tunisien (PST) qui envisage le développement de 40 installations solaires et éoliennes ainsi que des projets en efficacité énergétique entre 2010 et 2016 de manière à fournir 16 % de sa production électrique domestique en énergies renouvelables d'ici 2016. Les objectifs PV contenus dans le PST sont (ANME 2012) :

- Installation d'une capacité de 15 MW sur les toitures (6 000 résidences et 1 000 bâtiments publics et privés)
- Équipement de 200 fermes avec des systèmes d'irrigation PV
- Électrification de 1 000 maisons et de 100 fermes ainsi que de petits projets PV ruraux
- Installation d'une capacité PV totale de 0,5 MW pour l'éclairage public
- Installation de systèmes PV connectés au réseau dans les stations-service
- Installation d'un éventail de projets publics de 10 MW (STEG)
- Installation d'un éventail de projets privés de 10 MW

Jusqu'à présent, seuls environ 2 MW de systèmes photovoltaïques ont été installés sur les toitures. Par ailleurs, la Tunisie est entrain de réviser son Plan solaire dans le but d'accélérer la fixation des objectifs et de faciliter les procédures juridiques. En outre, les décisions sur la composition future du parc énergétique de la Tunisie sont attendues dans les mois à venir, ce qui pourrait impliquer des objectifs d'installation PV d'environ 2 GW d'ici 2030 selon le scénario choisi.

Afin de favoriser le développement du photovoltaïque dans le secteur résidentiel, la Tunisie a mis en œuvre le projet PROSOL-ELEC. Ce projet a reçu une subvention du

Fonds National pour la Conservation de l'Énergie (FNME) représentant 30 % des coûts d'investissement du système PV et un plafond de 3 000 Dirhams tunisiens par KWc. De plus, un onduleur permettant de transformer le courant continu fourni par les modules PV en courant alternatif est fourni gracieusement. Des incitations supplémentaires comprennent la mise à disposition d'un crédit pour le système PV et la prime sur le montant des taux d'intérêts correspond à 5 % du coût d'investissement (ANME 2010).

À la fin de 2011, La première usine tunisienne de modules PV, NR-Sol, a ouvert fin 2011 avec une capacité de production annuelle initiale d'environ 25 MW de modules mono-et poly-cristallins pour fournir la demande locale et régionale. Selon son directeur, NR-Sol devrait fabriquer des cellules PV dans un avenir proche. Actuellement, les cellules PV pour chaque module sont importées et leur fabrication est sous-traitée. Les prix actuels des modules PV peuvent être négativement déformés par les stocks constitués en 2011, la moyenne des prix du marché au comptant ayant varié de 0,71 à 0,99 EUR/W en avril 2012 (PV Exchange, 2012). Aurasol, le deuxième fabricant de modules PV tunisien est entrain d'augmenter sa production. Cette entreprise se concentre sur les modules PV intégrés bi-verre en utilisant des cellules cristallines. Sa capacité est estimée à 17 MW par an.

2.3 Résumé et conclusions

Le marché du photovoltaïque s'est considérablement développé au cours des dix dernières années. Les marchés sont principalement soutenus par des systèmes incitatifs qui se sont avérés très efficaces en Allemagne, en Italie, aux Etats-Unis et au Japon. Une baisse drastique des coûts par module (actuellement en raison des niveaux élevés de stocks mondiaux) et les incitations gouvernementales ont augmenté la compétition globale et beaucoup d'entreprises se retrouvent menacées de faillite ou de devoir se retirer du secteur PV. D'autre part, les coûts de l'électricité produite à partir de centrales photovoltaïques se rapprochent de ceux de la production d'électricité conventionnelle. Toutefois, les subventions favorisent encore l'électricité fossile par rapport aux sources renouvelables en Tunisie. Malgré le fort potentiel du marché solaire tunisien, la part du PV reste relativement petite même si le système d'incitation Prosol-elec a été un succès. Le développement futur au niveau national et au niveau local est assez difficile à prévoir. Alors que les directives du plan solaire tunisien sont mises à jour, celles des pays de la région MENA prennent de l'ampleur.

Tableau 3 : Aperçu des politiques et des projets solaires prévus

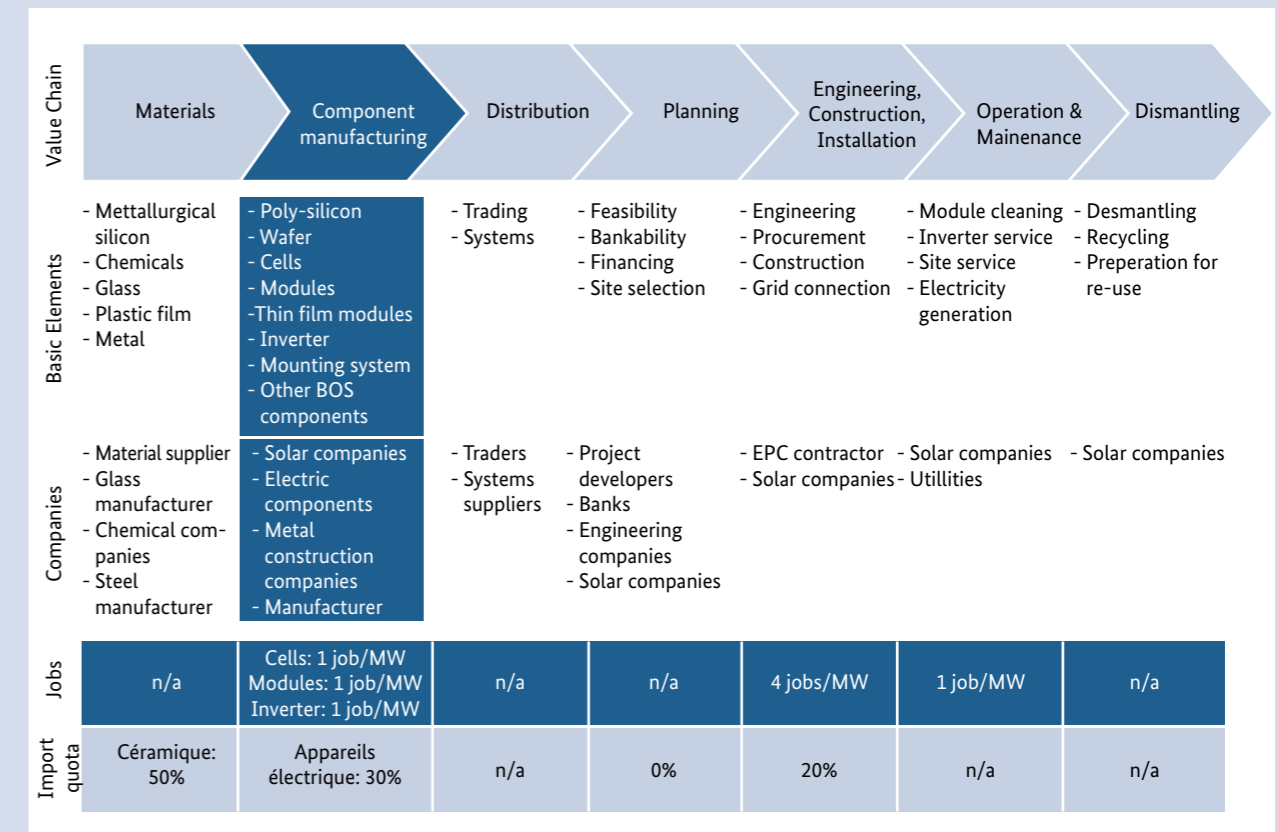
Pays	Politique en matière d'énergie solaire			Projets		
	Objectifs	Investissement	Catégorie	Nom/Localisation	Capacités	Date de réalisation
Abu Dhabi	7 % de l'énergie provenant des énergies renouvelables d'ici 2020	US \$ 15 Bn	Centrale PV	Nour 1	100 MW	Fin 2013
			Parc solaire	Dubai Electricity and Water Authority	1 GW	2030
Algérie	Capacités installées cumulées de 800 MW pour PV d'ici 2020 40 % de l'énergie fournie par énergies renouvelables d'ici 2030	US \$ 120 M jusqu'en 2030	Installation de production de modules	Roubia Eclairage/Sonelgaz	116 MW p.a.	Fin 2013
			Fabrication de poly-silicium	Sonelgaz	-	2020
			Site de production de miroirs CSP Production de fluide caloporteur et équipement de stockage solaire Usine d'équipement pour blocs de puissance			
Egypte	20 % de l'énergie provenant des énergies renouvelables d'ici 2020	-	Centrale PV	Kom Ombo	100 MW	2017
Jordanie	Implémentation de 1,8 GW des énergies renouvelables d'ici 2020 Capacité de 600 MW d'énergie solaire en 2022	-	Production de modules PV	Philadelphia Solar		
			Centrale PV	Shams Ma'an	100 MW	2013
Israël	10 % de l'énergie provenant des énergies renouvelables d'ici 2020	-	Centrale PV	Tarabin	8 MW	-
			Production de modules PV	Millennium: Company Profile	300 MW	
			Cellules solaires photochimiques à colorant	3 GS Solar	-	-
Maroc	Capacité de 2 000 MW des énergies renouvelables d'ici 2020 (soit 42 % de la production totale d'énergie attendue)	US \$ 9 Bn	Centrales CSP	Plan Solaire Marocain	Part du PV non déterminée pour le moment	2020
Arabie saoudite	10 % de l'énergie provenant des énergies renouvelables d'ici 2020	US \$ 100 Bn (nucléaire inclus)	Centrale PV	Bahra	300 MW	
	25 % de la génération total d'électricité par énergie solaire d'ici 2032 (soit 41 GW) • 16 GW de PV • 25 GW de CSP	Dix milliards de US \$	Centrale PV pour l'automobile	Saudi Aramco	10 MW	-

Sources: recherche personnelle, PV Magazine, Guardian, ITNEWSafrica, Saudigazette, Apricum

3 Analyse de la chaîne de valeur des systèmes photovoltaïques

La chaîne de valeur globale des systèmes PV comprend les pièces suivantes (voir Figure 3 : Chaîne de valeur des systèmes PV):

Figure 3 : Chaîne de valeur des systèmes PV



Source: documentation interne. Effets d'emplois et quota d'importation en Tunisie à base de ISE et al. 2012, GWS 2012.

Les principaux composants d'un système PV sont indiqués dans la colonne des composants. De nombreux de matériaux différents entrent dans le processus de production comme des produits chimiques, du gaz, du verre, du métal et des matériaux semi-conducteurs principaux. En conséquence, des entreprises de différents secteurs fournissent les entreprises d'énergie solaire en toutes sortes de composants. Les grands projets photovoltaïques (centrales solaires commerciales sur toitures ou montées au sol) nécessitent un processus de développement de projet détaillé avec des étapes principales comprenant la pré-faisabilité, la faisabilité et bancabilité ainsi que l'ingénierie, l'approvisionnement, les contrats (EPC) et les services d'installation comme les principales étapes. Après la production des composants concernés, un contractant EPC (pour les grands projets) installe le système ainsi que la connexion au réseau. L'exploitation et la maintenance sont effectués soit par un développeur de projet, un sous-traitant ou un service public, et ces opérations ne sont pas gourmandes

en capital ni en main-d'œuvre. Les onduleurs doivent, toutefois être remplacés tous les sept à dix ans. Les coûts incluent le nettoyage des modules, la maintenance de l'onduleur, la location et la maintenance. Le développeur de projet doit démanteler le site à la fin du contrat d'exploitation et recycler tous les composants.

Comme pour la basse température solaire thermique et le CSP, les effets sur l'emploi dans cette industrie sont plus élevés dans la partie aval de la chaîne de valeur. C'est dans la distribution, la planification, l'ingénierie, la construction, l'installation, l'exploitation, la maintenance et le démantèlement que l'on trouve la plus grande proportion d'emplois créés par système installé. Bien que les données varient et qu'elles ne soient pas transparentes au regard des hypothèses et des calculs, la tendance reste cohérente. Approximativement, 3,5 emplois par MW sont créés et on présume que 5 emplois par MW sont créés en amont et en aval (ISE et al. 2011 ; GWS et al. 2011). La figure 3 montre

aussi le quota d'importations de certaines étapes de la chaîne des valeurs de PV en Tunisie.

L'analyse de la chaîne de valeur de ce chapitre se concentre sur la fabrication de composants PV de taille moyenne.

3.1 Chaîne de valeur de base des systèmes PV et ventilation des coûts

Chaîne de valeur de base

Quelque soit la technologie utilisée pour les modules, tous les systèmes PV sont constitués des mêmes éléments. La Figure 4 et la Figure 5 montrent la chaîne de valeur fondamentale pour les modules cristallins et TF.

L'analyse présentée dans les sections suivantes décrit les différentes technologies de modules et de leurs chaînes de valeur, y compris les procédés de fabrication et les considérations de coût. Ceux-ci sont décrits en détail pour les modules multi-cristallins (mc-Si), les modules amorphes à couches minces (a-Si), les modules de concentration photovoltaïque (PV-c) et les composants BOS. La Figure 6 montre les chiffres de production annuelle en fonction des différentes technologies cellulaires pour 2011. Les modules cristallins, comme les cellules multi- et mono-cristallines, sont la technologie dominante alors que le

telluride de cadmium (CdTe) remporte la plus grande part dans les technologies TF. Les technologies TF à base de silicium (amorphe, micro morphe) détiennent 3% des parts de marché alors que les technologies CIS/CIGS constituent seulement une infime portion du marché.

3.2 Modules multi-cristallins

En dépit de la croissance du marché mondial du PV, il existe encore des surcapacités de c-Si à chaque étape de la chaîne de valeur. Les derniers chiffres indiquent que, par rapport à 27,5 GW (Solarbuzz 2012) de capacité installée, 29,8 GW de poly-silicium 31,6 GW de plaquettes, 31 GW de cellules, et 34 GW de modules ont été produits en 2011 (PV Mag 2012). En conséquence, toutes les étapes de la chaîne de valeur sont touchées par la baisse des prix et la pression pour réduire les coûts afin d'atteindre la parité avec le réseau et devenir compétitives sans soutien politique.

La figure 7 montre la répartition relative actuelle des éléments de coût le long de la chaîne de valeur solaire. Les éléments de coût majeurs comprennent donc les consommables (usure et pièces de rechange) et les matériaux sans silicium (pâte de métallisation, verre, feuille de fond). Les coûts d'amortissement/de capital et d'espace sont aussi des parts importantes dans toutes les étapes de la chaîne

Figure 4 : Chaîne de valeur PV cristallin

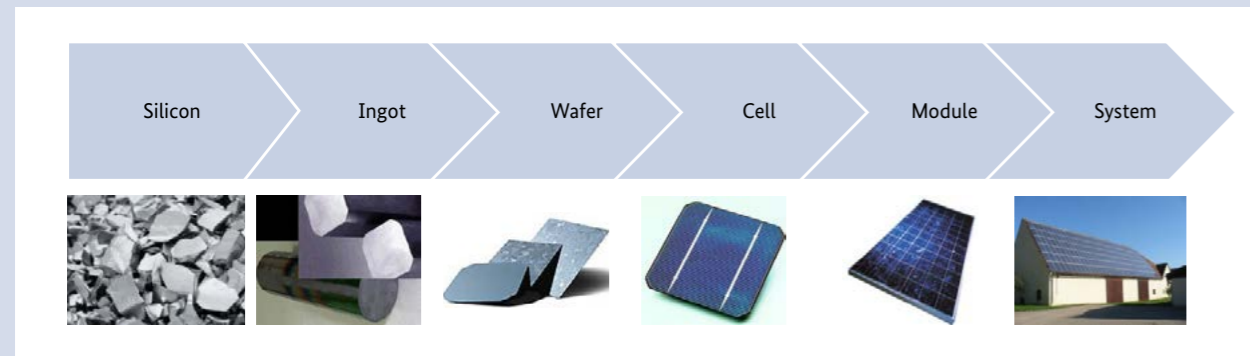
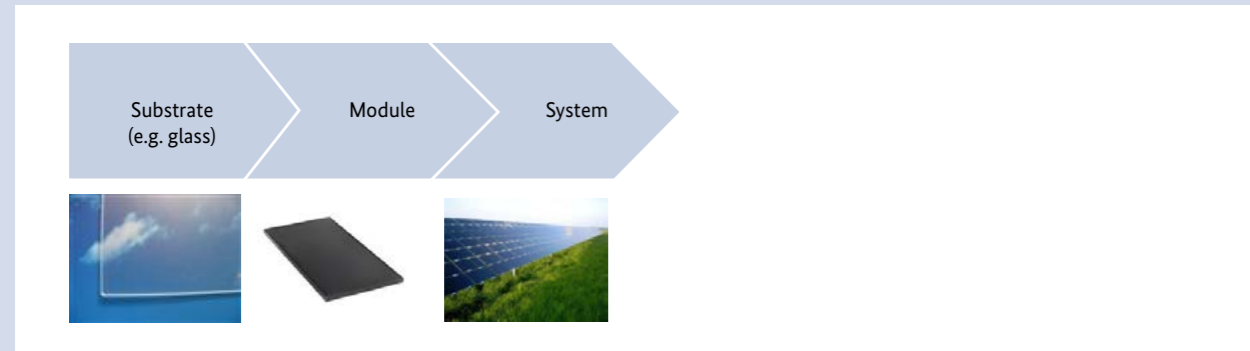
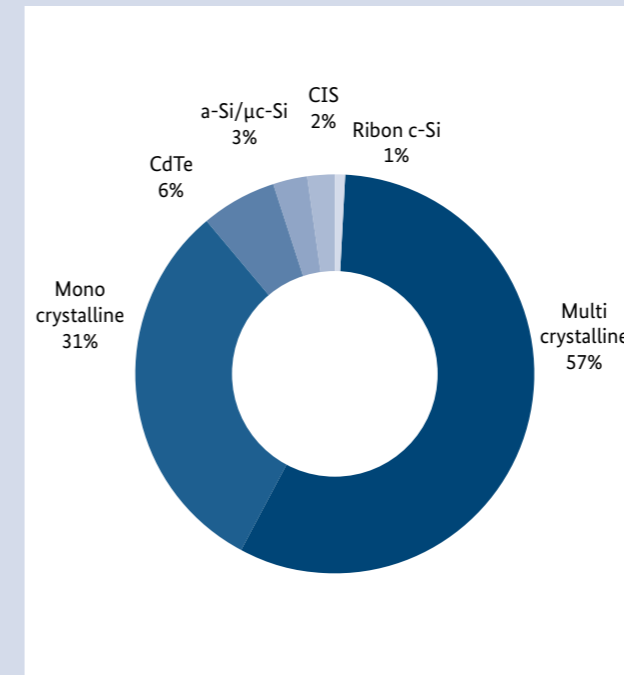


Figure 5 : Chaîne de valeur PV TF



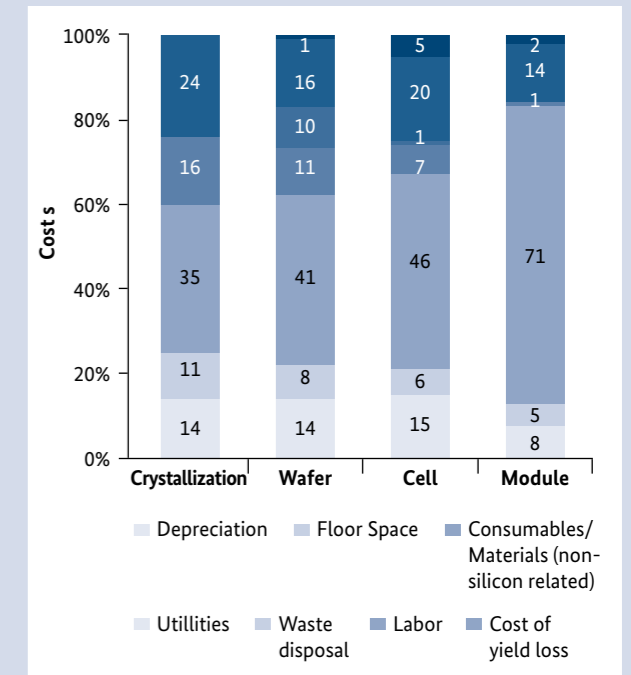
Source: Apricum Group 2008

Figure 6 : Production des cellules par technologie en MW



Source : Photon International 2012

Figure 7 : Répartition relative des éléments de coût



Source: ITRPV 2011

de valeur. Les coûts utilitaires sont des facteurs importants sauf pour la production des modules alors que les coûts de main-d'œuvre sont importants à chaque étape de la chaîne de valeur.

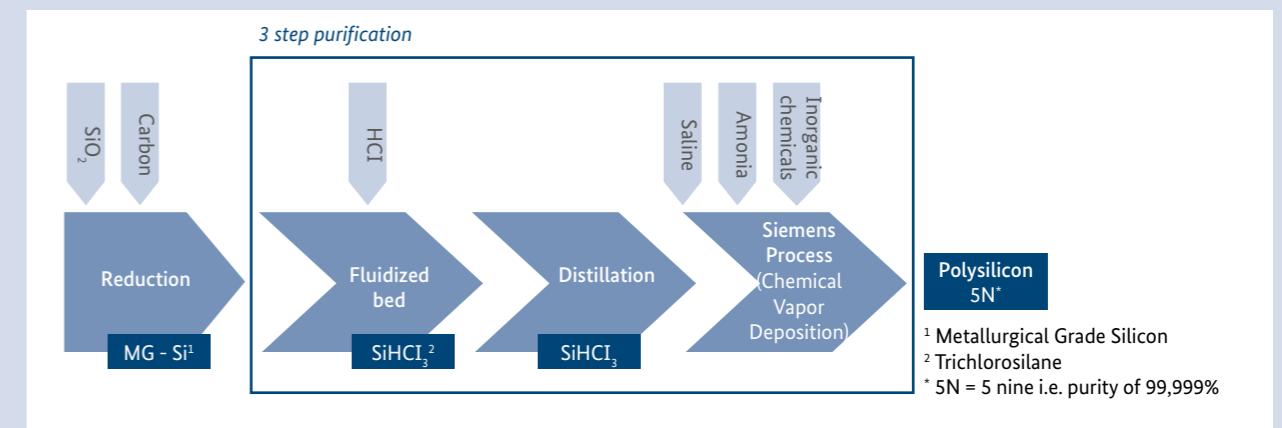
3.2.1 Production de poly-silicium

Le procédé de fabrication des cellules multi-cristallines commence avec la production de poly-silicium de quartz de qualité solaire (voir Figure 8). Le plus connu de ces procédés est le procédé Siemens qui utilise du silicium

métallurgique (98% de sable SiO₂) et de l'acide chlorhydrique (HCl) comme principaux matériaux d'entrée. Après la production de trichlorosilane (TCS, pouvant aussi être utilisé en tant que matériau d'entrée principal) le poly-silicium est déposé (dépôt chimique en phase vapeur) sur les tiges du réacteur Siemens. Le procédé est capital, nécessite beaucoup d'énergie et demande une grande expérience pour atteindre les niveaux de pureté demandés.

Les 10 premiers producteurs de poly-silicium représentent 70% du marché global et ont développé d'énormes

Figure 8 : Étapes de production par le Procédé Siemens



Source: schéma selon Wacker 2007

¹ Metallurgical Grade Silicon
² Trichlorosilane
 * 5N = 5 nine i.e. purity of 99,999%

capacités de production. La capacité de production totale annuelle est d'environ 288 000 Mt (GTM). Les producteurs leaders sont OCI (Corée du Sud), Wacker (Allemagne), Hemlock (USA), GCL (Chine) et REC (Norvège). Les producteurs de poly-silicium de qualité solaire viennent soit de l'industrie chimique, soit de l'industrie des semi-conducteurs. Quelques-uns ont acquis des licences (REC) et mis en place de nouvelles unités. L'intégration verticale dans la chaîne de valeur solaire est limitée en raison de la différence entre les divers procédés de fabrication, des flux des déchets et des matériaux principaux d'entrée ainsi que les différences des savoir-faire en matière de résultats.

En 2011, les coûts du poly-silicium pour les producteurs de poly-Si étaient inférieurs à 30 USD/kg (voire même 20 USD/kg) (ITRPV), ce qui représente une baisse considérable de 90 % au cours des 5 dernières années. Des lignes de procédé

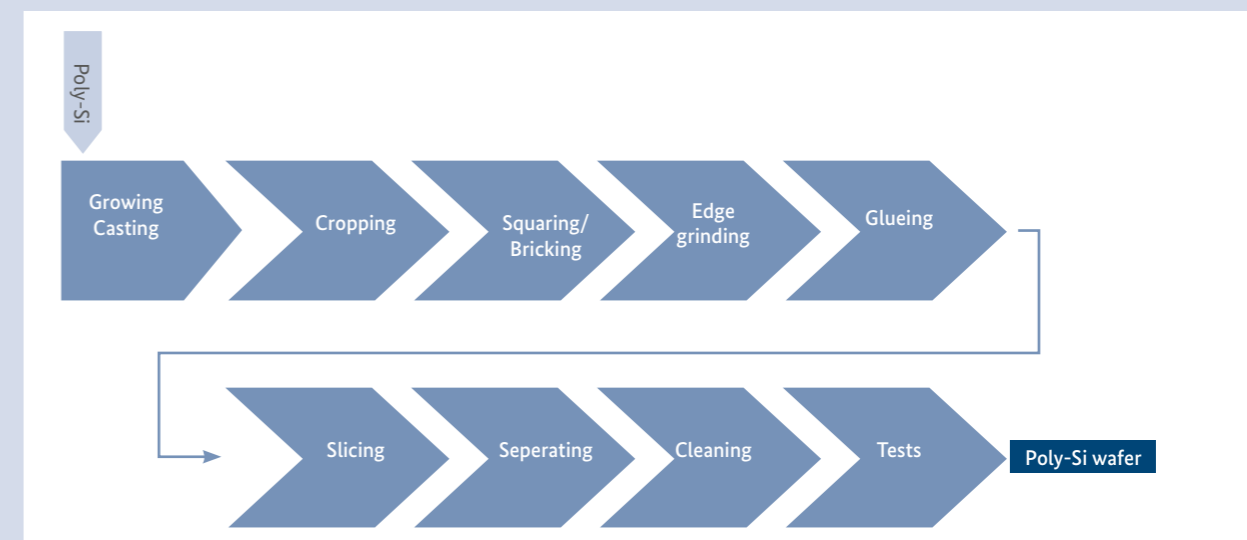
Siemens clé-en-main (par exemple: GT Solar, Centrotherm) sont disponibles à un coût de 0,5 à 0,7 EUR/W. Cependant, en plus d'un grand savoir-faire technique, l'échelle se révèle être un facteur décisif de rentabilité. Une installation typique de 600 MW (soit 5 000 t) devrait donc se traduire par un investissement à hauteur de 400 millions EUR. Il est à noter que le plus grand producteur possède une capacité de production de près de 35 000 MT, soit 4,3 GW.

3.2.2 Fabrication des plaques

Le processus de découpage en plaques débute par une coulée de poly-silicium fondu dans des moules à travers une solidification directionnelle à gradient vertical. Ces lingots sont d'abord découpés en briques, qui sont ensuite découpées en tranches d'épaisseur comprises entre 150 et 200 µm (généralement 180 µm). Les émulsifiants et les câbles, ainsi que

Exigences de fabrication	
Niveau technologique	Commercialisé
Industries annexes	Industrie chimique et semi-conducteurs
Matières premières	Silicium métallurgique
Facteur économique et coûts	
Taille minimum	5 000 MT (~ 600 MW)
Frais d'investissement	0,5-0,7 EUR/W
Structure de l'industrie	
Acteurs principaux	OCI (Corée), Wacker (Allemagne), Hemlock (USA), CGL (Chine), les 10 acteurs principaux possèdent 70 % des capacités
Facteurs clés du succès	Quantité, qualité, savoir-faire
Barrières à l'entrée	Surcapacités actuelles, expérience en matière de fabrication
Forces	Faiblesses
Clé pour la chaîne de valeur PV	Frais d'investissement élevés
	Nécessite un capital important
	Savoir faire et expérience requis pour la fabrication
	Baisse des prix très importante
Opportunités	Menaces
Intégration possible dans les usines chimiques (flux de déchets, industrie des semi-conducteurs, etc.) afin de desservir d'autres marchés	Surproduction actuelle
	Marché peu sûr pour PV

Figure 9 : Processus de découpage en plaques



Source: schéma selon Meyer Burger 2005

d'autres consommables du processus de découpage sont les principaux facteurs de coûts. Le fil de diamant tranchant, qui ne nécessite pas d'émulsifiant ni de coûteux recyclage, laisse augurer des réductions de coûts significatives mais il reste toujours en processus de développement (Meyer Burger). Figure 9, ci-dessous, résume la technique de découpage.

Le processus de découpage des plaques est, dans la plupart des cas, intégré à la chaîne de valeur, soit en amont (GCL Solar Energy), soit en aval (LDK Solar) du fait de considéra-

tions qualitatives et financières. Les plus grands producteurs de plaques sont situés en Chine et possèdent plus de 50 % des capacités mondiales de production. Les producteurs asiatiques se partagent 80 %. Les producteurs leaders asiatiques sont en train d'augmenter massivement leur capacité de production alors que les producteurs européens perdent en compétitivité (GWI 2012). Les couts d'investissement et de production sont difficiles à obtenir car ce processus est intégré dans la chaîne de valeur. Cependant, on peut prendre 0,40 EUR/W en tant que valeur indicative.

Exigences de fabrication	
Niveau technologique	Commercialisé et en grande partie intégré dans la chaîne de valeur (dans la fabrication de polysilicium ou de cellule/module PV)
Industries annexes	Industrie des semi-conducteurs
Matières premières	polysilicium
Facteur économique et coûts	
Taille minimum	100-250 MW
Frais d'investissement	0,4 EUR/W
Structure de l'industrie	
Acteurs principaux	CGL (Chine), LDK (Chine), concentration de la fabrication en Asie (80 % des capacités)
Facteurs clés du succès	Intégration verticale, coûts énergétiques faibles
Barrières à l'entrée	existence d'autres étapes de la chaîne de valeur PV

Forces	Faiblesses
Technologie rodée et mature	Nécessite un haut niveau de savoir-faire
	Economies d'échelle importantes et intégration verticale nécessaires
	Savoir faire et expérience requis pour la fabrication
	Baisse des prix très importante
Opportunités	Menaces
	Les capacités de production asiatiques sont en pleine expansion

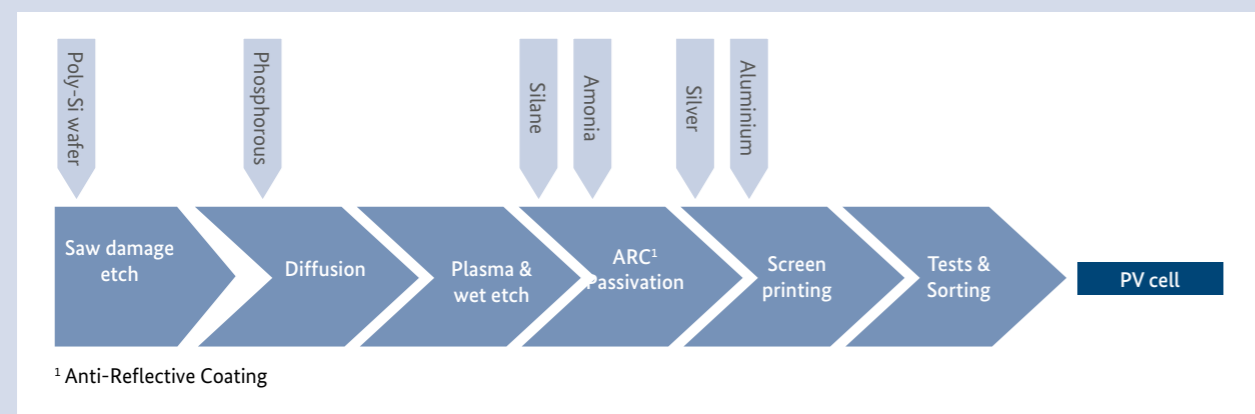
3.2.3 Production de cellules

Comme indiqué plus haut, la pression sur les prix et la pression sur les réductions de coûts sont les enjeux majeurs de l'industrie PV. L'intégration verticale des étapes de la chaîne de valeur débutant par le découpage en plaques est une tendance importante pour la réduction des coûts liés au transport, le profit lié aux économies d'échelle et les bénéfices de la chaîne de valeur. Le processus de fabrication des cellules solaires est schématisé dans la Figure 10. La plaquette subit un certain nombre de traitements par semi-conducteurs (diffusion, gravure, traitement antireflet et passivation) avant que les contacts-avant (argent) et les contacts-arrière (aluminium) ne soient imprimés sur les cellules. Les bords des cellules sont isolés avant que les cellules ne subissent le test final. Les principaux coûts de ce processus sont le découpage en plaques, l'argent et l'aluminium.

En 2011, les 10 plus grands producteurs mondiaux ont établi à peu près toutes leurs unités de production en Asie.

Dans cette liste des 10 plus grands producteurs, seul First Solar est aussi un producteur de TF et est, de loin, le plus grand producteur de modules CdTe. Les leaders de la production des cellules c-Si sont Suntech Power (Chine), JA Solar (Chine), Yingli Green Energy (Chine), Trina Solar (Chine), et Motech (Taïwan). Ces 10 entreprises ont produit près de 36 % de toutes les cellules en 2011. Près de 57 % du volume mondial est produit en (33 % en 2008). Cette tendance devrait se poursuivre. Les leaders ont augmenté leur capacité à plus 1 GW. Les coûts d'investissement pour une cellule clé-en-main sont de 0,5 EUR/W avec une puissance 200 MW sont de l'ordre de 100 Mio EUR.

Figure 10 : Processus de fabrication des cellules



Source: documentation interne

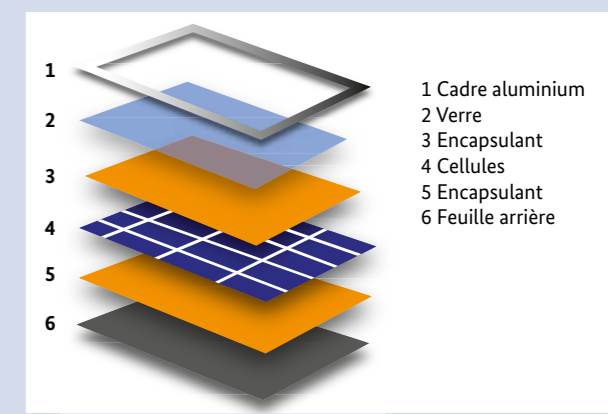
Exigences de fabrication	
Niveau technologique	Commercialisé
Industries annexes	Industrie des semi-conducteurs
Matières premières	Wafers, produits chimiques
Facteur économique et coûts	
Taille minimum	100-250 MW
Frais d'investissement	0,5 EUR/W
Structure de l'industrie	
Acteurs principaux	Suntech Power (Chine), JA Solar (Chine), Yingli Green Energy (Chine) = 57 % des capacités cellulaires globales sont en Asie
Facteurs clés du succès	Quantité, qualité
Barrières à l'entrée	Capacités existantes, concurrence des coûts accrue
Forces	Faiblesses
Technologie rodée et mature	Savoir-faire requis pour la fabrication et expérience des semi-conducteurs
	Economies d'échelle importantes nécessaires
	Savoir faire et expérience requis pour la fabrication
	Baisse des prix très importante
Opportunités	Menaces
Avantage compétitif par le biais des TF	Part croissante des cellules produites en Asie
Gains d'efficacité possibles, opportunités pour la R&D	Concurrence accrue

3.2.4 Modules

La production de modules n'est pas aussi gourmande en énergie et en capitaux que les étapes de production précédentes. Figure 11 montre la disposition typique d'un module, constitué par les cellules, du matériel d'encapsulation, d'une feuille arrière en verre, d'un cadre en aluminium et d'une boîte de jonction (non représentée).

Le processus de fabrication débute avec le serrage des cellules, le lavage du verre et la superposition de tous les composants (cf. Figure 12). La superposition est le processus-clé dans la fabrication car la qualité de ce dernier détermine essentiellement la durée de vie, la performance, l'efficacité et la production d'électricité du module. Outre la qualité des composants, les cellules doivent être pro-

Figure 11 : Composants basiques d'un module c-Si sans le BOS

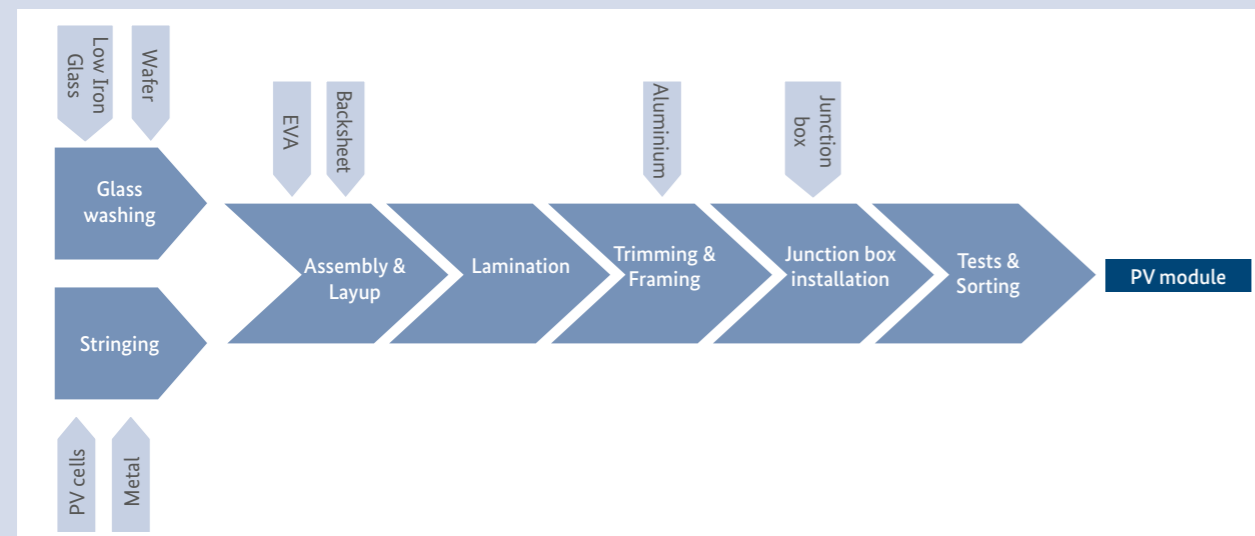


Courtesy of Centennial Solar

tégées de façon optimale par l'encapsulation et la feuille arrière grâce à une étanchéité très fiable. La courbe temps/température du procédé de contre-collage doit être ajusté au type d'encapsulation et à la plaque (voir ci-dessous). On peut trouver des contre-colleuses sous différents designs ainsi que différentes méthodes. Le débit du procédé de

superposition est le goulet d'étranglement de la fabrication de modules. Dans l'étape suivante, la surface stratifiée est découpée, (cadre en aluminium) et la BOS est fixée sur le module. Enfin, le module est testé, trié et emballé selon sa puissance mesurée en sortie.

Figure 12 : Procédé de fabrication d'un module



Source: d'après Centrotherm 2009

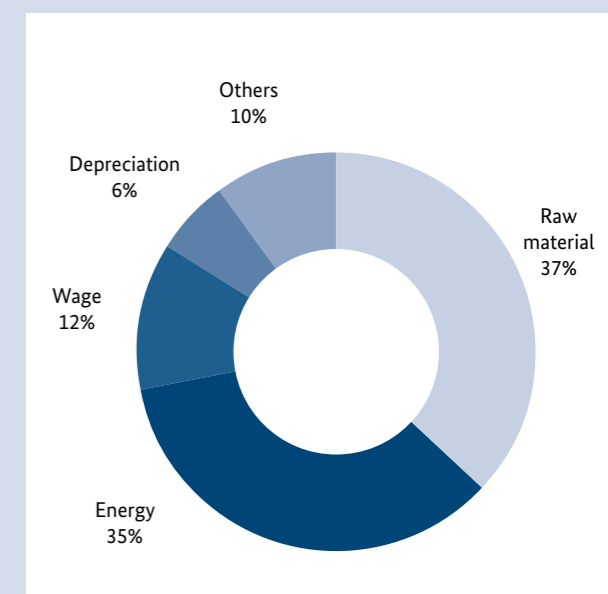
Exigences de fabrication	
Niveau technologique	Commercialisé
Industries annexes	Aucune
Matières premières	Cellules, verre, matériel encapsulant, rubans, cadre, boîtier d'assemblage
Facteur économique et coûts	
Taille minimum	100-500 MW
Frais d'investissement	0,2 EUR/W
Structure de l'industrie	
Acteurs principaux	Suntech Power (Chine), Yingli Green Energy (Chine), Trina Solar (Chine); les 9 principaux acteurs ont au moins 1 GW de capacité chacun
Facteurs clés du succès	Economies d'échelle, capacités de production, qualité, coût des matériaux, intégration verticale
Barrières à l'entrée	Coûts, surproduction actuelle

Forces	Faiblesses
Peu de savoir-faire requis pour la fabrication	Concurrence au niveau des coûts
Equipement clé en main disponible	Certification obligatoire
Opportunités	Menaces
Développement de marchés régionaux et de niche	Surproduction
	Concurrence au niveau des coûts
	Développement du marché incertain

3.2.5 Verre

Le verre des modules solaires (couverture et/ou substrat) peut être du verre flotté ou du verre coulé qui sont produits par l'industrie traditionnelle. Le verre utilisé pour les applications PV représente une très petite part de l'industrie du verre (0,7 % en 2011, FH ISE 2012). Le verre est, cependant, un facteur de coût important dans la fabrication de modules PV. L'industrie traditionnelle du verre est concentrée – les 5 plus grands producteurs possèdent 65 % des capacités de production et le verre flotté représente environ 96 % de la production totale (Pilkington 2010). Les critères essentiels incluent la transmission de la lumière qui est influencée par les caractéristiques du verre et la qualité de la couche de revêtement antireflet. Ces critères sont obtenus en choisissant des matériaux d'entrée de haute qualité et les étapes spécifiques au cours du traitement ultérieur (antireflet, par exemple). Ainsi, la qualité (transmission de la lumière, par exemple) du verre solaire diffère considérablement des applications du verre traditionnel et peut être spécifiée conformément à la demande des clients. La Figure 13 illustre la ventilation des coûts d'une structure de verre flotté. Pour les modules TF, où le verre représente approximativement 25 % du coût d'un module, les dépenses en logistique et en transport sont importantes. Ainsi, un emplacement proche du fabricant du module est essentiel pour réduire les coûts.

Figure 13 : Structure des coûts pour la production de verre flotté



Source: GRE 2012

Exigences de fabrication	
Niveau technologique	Commercialisé
Industries annexes	Industrie verrière
Matières premières	Sable quartz, soude, chaux calcaire
Facteur économique et coûts	
Taille minimum	-
Frais d'investissement	>100m EUR pour des lignes de verre flotté
Structure de l'industrie	
Acteurs principaux	AGC (Japon), NSG Group (Japon), Saint Gobain (France), Guardian (USA)
Facteurs clés du succès	Qualité (transmission), contrôle du processus
Barrières à l'entrée	Frais d'investissement, marché concentré, capacités suffisantes
Forces	Faiblesses
Synergie avec l'industrie verrière	Frais d'investissement élevés pour les lignes de verre flotté
	Gourmand en énergie
	Acteurs dominant le marché avec des parts élevées
Opportunités	Menaces
traitement du verre	volume de marché faible pour le verre PV pouvant être absorbé par l'industrie existante
développement des marchés régionaux et avantage en termes de coûts logistiques	

3.2.6 Films/matériaux d'encapsulation

Les films utilisés dans la fabrication de modules PV utilisent un procédé d'extrusion traditionnel connu dans l'industrie du plastique. Les encapsulants EVA et OVB sont les principaux utilisés. Les critères importants sont le prix et la transmission. Le Tedlar (Dupont) est le plus utilisé pour la feuille arrière. Toutefois le polyéthylène téréphtalate (PET) ou les polymères fluorés sont entrain d'entrer sur le marché. Les américains et les européens sont les leaders de ce marché. Bien qu'aucun concurrent chinois n'ai pénétré le marché (principalement en raison des soucis de qualité), les capacités de production ont été déplacées vers la Chine afin d'être au plus près des clients et de réagir rapidement à la demande. Les plus grandes entreprises sont, entre autres, STR (USA), Solutia (USA), Coveme (Italie), 3M (USA), Krempel (Allemagne) et Saint-Gobain (France) (Photon 2011).

Le business model ou modèles d'entreprise pour les matériaux d'encapsulation comprend les entreprises chimiques qui fournissent aussi d'autres éléments de la chaîne de valeur PV, des fournisseurs de matériaux PV qui sont spécialisés dans les encapsulants, et d'autres nouveaux entrants sur le marché. La pénurie et la position dominante sur le marché de DuPont pour la feuille arrière ont attiré de nombreux nouveaux entrants. Même si le procédé d'extrusion n'est pas compliqué en termes d'étapes et d'équipement, la combinaison des matériaux d'entrée demande, par contre, beaucoup d'expérience et de savoir-faire. Ceci détermine les caractéristiques du film, qui, à leur tour, sont déterminantes pour l'efficacité et la durabilité du module.

Exigences de fabrication	
Niveau technologique	Commercialisé
Industries annexes	Industrie des matières plastiques
Matières premières	Résines, mélanges personnalisés
Facteur économique et coûts	
Taille minimum	-
Frais d'investissement	-
Structure de l'industrie	
Acteurs principaux	STR (USA), Solutia (USA), Coverne (Italie), 3M (USA), Bridgestone (Japon)
Facteurs clés du succès	Qualité (transmission, durabilité), contrôle du processus
Barrières à l'entrée	Niveau de qualité exigée élevé, matières premières propriétaires, coûts
Forces	Faiblesses
Technologie éprouvée, équipement standard pour l'extrusion des films avec des modifications mineurs	Matières premières propriétaires
Frais d'investissement peu élevés	Exigences de qualité élevées
	Acteurs dominant le marché avec des parts élevées
Opportunités	Menaces
Développement produit pour améliorer la qualité	Développement du marché PV incertain

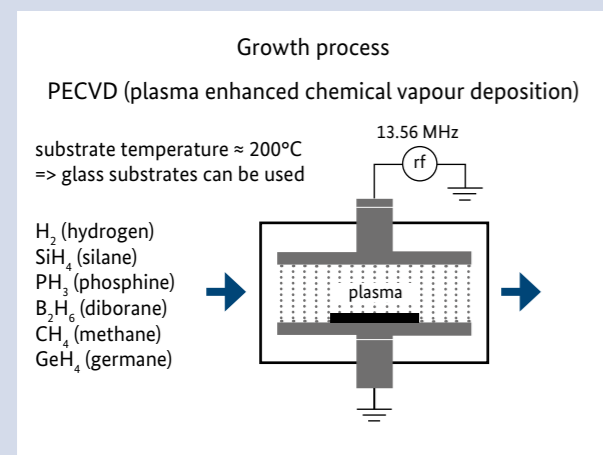
3.3 Modules TF: silicium amorphe (a-Si)

L'analyse suivante se limite à la fabrication de modules a-Si pour plusieurs raisons :

- First Solar domine le marché CdTe en tant que leader au niveau du prix; les barrières d'entrée sont exceptionnellement hautes.
- Les technologies CIGS/CIS demandent un procédé de fabrication extrêmement complexe qui doit, à présent, montrer son potentiel pour une production de masse au regard de l'efficacité et des coûts.
- Les modules de silicium micro morphe sont compliqués à fabriquer à cause de leurs multiples couches. Des fournisseurs qui, autrefois, étaient leaders sur ce marché ont, depuis, jeté l'éponge (Applied Materials, Oerlikon, Ulvac).
- En 2011, les a-Si représentaient environ 50 % de parts de marché dans les technologies TF (6WResearch 2012).

En utilisant du gaz silane, les modules a-Si sont réalisés par Plasma Enhanced Chemical Vapor Deposition ou dépôt chimique en phase vapeur activé par plasma (PECVD) sur un substrat (verre, acier). Le procédé de fabrication débute avec la préparation du verre (SolarThinFilms 2012). On peut utiliser des substrats flexibles (feuille de métal, plastique) mais le verre reste utilisé pour la production à commercialiser. Ensuite, on dépose de l'oxyde d'étain et on le grave pour former l'électrode. L'étape suivante consiste à déposer le silicium amorphe (par PECVD) sur le substrat et on le grave une nouvelle fois. L'arrière de l'électrode (aluminium) est alors déposé et gravé également. Enfin, on applique une couche de polymère, le module est encapsulé et encadré, la boîte BOS est attachée et testée. Le processus de fabrication est lié à la production d'écrans LCD. Figure 14 illustre les étapes de fabrication.

Figure 14 : Schéma du réacteur PECVD



Source: Rech 2009

Selon le design du module, on utilise le même verre et les mêmes encapsulants que pour les modules c-Si. Les modules a-Si sont produits en tant que segment du portfolio des modules PV par de grandes entreprises (Sharp, Schott) ainsi que par des fabricants spécialisés (Trony Solar). En 2011, les leaders du marché a-Si TF étaient Sharp (Japon), Trony Solar (Chine), et Schott (Allemagne). L'ancien leader United Solar (USA) a déposé le bilan en février 2012 (WoodTV 2012). Le processus de fabrication demande du savoir-faire et l'expertise en PEVCD pour atteindre des sorties de production stables en matière de qualité. L'équipement revient à environ 0,45-0,7 EUR/W (PVTech 2011).

Exigences de fabrication	
Niveau technologique	Commercialisé
Industries annexes	Industrie électronique/LCD
Matières premières	Produits chimiques (gaz silane), verre, matériel encapsulant, cadre, boîtier d'assemblage
Facteur économique et coûts	
Taille minimum	-
Frais d'investissement	0,45-0,7 EUR/W
Structure de l'industrie	
Acteurs principaux	Sharp (Japon), Trony Solar (Chine), Schott (Allemagne)
Facteurs clés du succès	Contrôle du processus, coûts de production moindres
Barrières à l'entrée	Investissement, savoir-faire
Forces	Faiblesses
Coûts de production peu élevés	Efficacité moindre
	Savoir-faire nécessaire
Opportunités	Menaces
Technologie de base pour le développement des cellules à multijonction	Chute des prix des modules c-Si
	Efficacité moindre

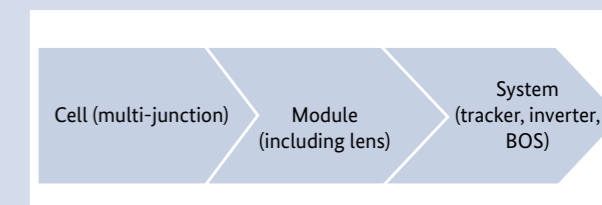
3.4 CPV (basé sur les systèmes de modules)

Tout comme les modules de concentration PV (CPV), les systèmes convertissent la lumière du soleil en électricité. La différence réside dans la manière dont la lumière est dirigée au travers d'une lentille optique, qui, elle, concentre précisément la lumière vers les cellules. Ce processus demande un système de suivi qui suit la trajectoire du soleil (c.-à-d. l'irradiation solaire directe). Les systèmes CPV sont catégorisés selon leur facteur de concentration solaire. Les CPV faibles (LCPV) se réfèrent généralement à des systèmes inférieurs à 100 Sun. Les CPV élevés peuvent atteindre des concentrations de 1000 Sun. Alors que les anciens systèmes utilisent des cellules c-Si standards, les nouveaux utilisent des cellules III-V à jonctions multiples, originalement développées pour des applications spatiales. Tous les systèmes CPV requièrent un rayonnement direct normal (DNI). De plus, les pays dont les prix de l'électricité sont élevés forment une cible potentielle pour les applications CPV. Ces régions sont le sud-ouest américain, le Mexique, le Chili, le sud péruvien, le sud-ouest bolivien, le nord-est argentin, les pays méditerranéens, l'Australie, l'Afrique du Nord, le Moyen-Orient, l'ouest indien et l'ouest chinois. Actuellement, les projets CPV sont en cours en Espagne, en Allemagne, dans le sud-ouest américain. Les pays à fort potentiel de croissance sont l'Inde, l'Australie, le Japon et la Chine grâce à leurs aides à la promotion de l'environnement (Energytrend 2012). Ces régions attirent également les applications CSP ; la plupart des systèmes CPV ne nécessitant pas de refroidissement, ce qui est un avantage dans des zones où la pénurie en eau est un enjeu majeur.

Processus de production

Étant donné que le portefeuille de projets actuels est dominé par les systèmes HCPV, la fabrication de composants LCPV est exclue. La Figure 15 montre les étapes de base de la chaîne de valeur.

Figure 15 : Chaîne de valeur CPV basique

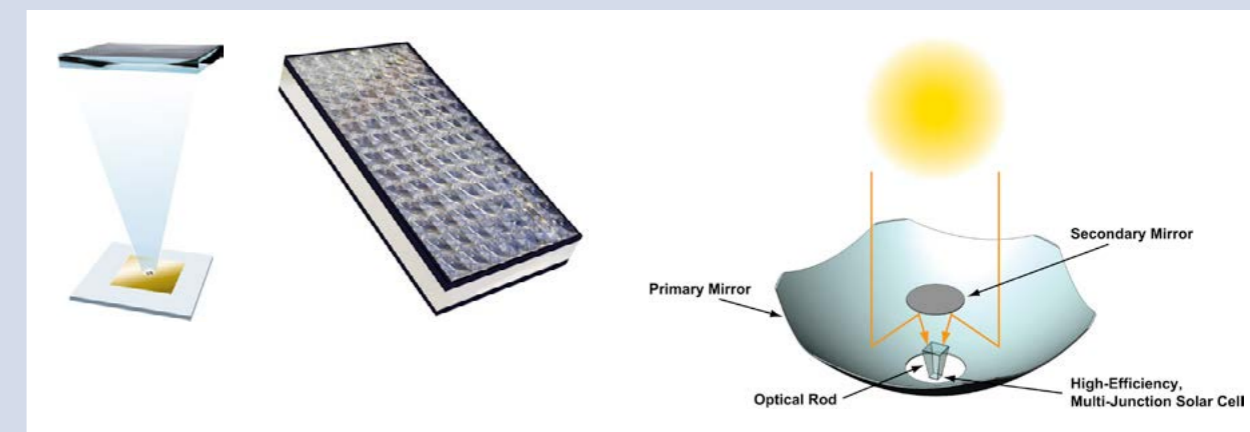


Source: documentation interne

Dans une première étape, on fabrique les plaquettes III-V à haut rendement par épitaxie en phase vapeur aux réacteurs organométalliques (MOVPE). On traite ensuite les cellules solaires en différentes étapes technologiques comme la gravure chimique humide, l'évaporation et le dépôt de revêtement antireflet. Les cellules solaires à jonctions multiples peuvent atteindre un rendement théoriquement plus élevé (grâce aux matériaux et aux jonctions utilisés) que les cellules c-Si. Jusqu'à présent, on a atteint des rendements de 40 % au niveau de la cellule et de 30 % au niveau du module (FH ISE 2012).

L'équipement utilisé est le même que celui utilisé dans l'industrie des semi-conducteurs. De même, les étapes doivent être effectuées dans des salles blanches. Malgré la disponibilité des équipements clé-en-main, le processus est complexe et demande un haut niveau de savoir-faire technologique. La cellule est ensuite incorporée dans une unité de réception et les composants optiques primaires (miroirs, lentilles) ainsi que d'autres composants (ex: cadre en métal) sont assemblés dans un module CPV. Pour les systèmes HCPV et LCPV, il existe une grande diversité de technologies qui concernent les cellules, les optiques, les matériaux et les modules (cf. Figure 16). Elles ont toutes été développées en tant que processus propriétaires qui sont des lignes de production réalisées sur mesure.

Figure 16 : Technologies CPV leaders (Soitec, SolFocus)



Sources: sites Internet d'entreprises

Les capacités de production actuelles sont situées en Allemagne, aux USA et en Asie pour être à proximité des grands projets (ex: accords sur la fourniture en électricité avec les autorités publiques) et à cause des avantages en coût du capital. La capacité globale est de 250-300 MW (FH ISE 2012).

Dans le segment global du PV, le CPV ne représente qu'une faible part de marché (0,07 % in 2010, Energytrend 2012). Le portefeuille de projets actuels est estimé à 700 MW. Malgré de grandes attentes en termes de croissance dans cette niche, le marché global CPV reste sous pression en raison de la diminution des prix du silicium et des modules qui menace la vente de CPV (Solarnovus 2012). À moyen-terme, il faudra une coupe drastique dans les coûts de ces systèmes afin de pouvoir rester compétitifs. Les recherches de GTM estiment une réduction de coûts

de l'ordre de 2 USD pour 2020 grâce à une réduction potentiellement plus importante pour les cellules à haut rendement (Solarnovus 2012), moins de pertes au niveau du système et l'augmentation des capacités de production. Depuis que les CPV faibles (LCVP) utilisent les cellules standards c-SI, la technologie semble profiter d'une dépréciation de prix plus rapide que les CPV élevés (HCPV). On fait également valoir que le CPV est déjà plus compétitif que le CSP en termes de LCOE (PV Insider 2012).

Trois fabricants de HCPV dominent le marché, c'est-à-dire, les portefeuilles de projets : Soitec (Concentrix), Amonix and SolFocus qui constituent 95% de l'actuel portefeuille global (Energytrend 2012). Les entreprises de LCPV devraient bénéficier de la réduction des prix des modules et de plus grandes capacités de production dans le futur.

Exigences de fabrication	
Niveau technologique	En phase pilote
Industries annexes	Semi-conducteur, verre, industrie optique
Matières premières	cellules II-V, lentilles, verres, aluminium
Facteur économique et coûts	
Taille minimum	-
Frais d'investissement	-
Structure de l'industrie	
Acteurs principaux	Soltec (Concentrix) (France, Allemagne), Amonix (USA), SolFocus (USA)
Facteurs clés du succès	Technologie propriétaire, expérience, développement de projets, stabilité et force financières
Barrières à l'entrée	Frais d'investissement élevés, exigences techniques, propriété intellectuelle
Forces	Faiblesses
Rendements élevés	3 acteurs dominent les projets HCPV en prévision en raison de la technologie propriétaire
	Expérience limitée requise sur le terrain
Opportunités	Menaces
Fort potentiel à moyen terme en fonction de l'évolution des coûts CPV et c-Si	Concurrence en termes de coûts en raison du faible prix des modules c-Si

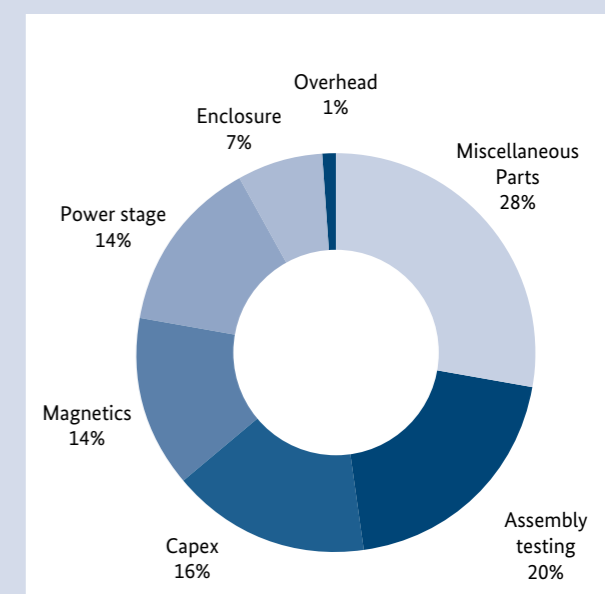
3.5 Onduleur

Afin de diriger l'électricité produite par une cellule solaire vers le réseau, le courant continu doit être changé en courant alternatif au moyen d'un onduleur. Pendant le processus de fabrication, tous les composants électroniques (condensateurs, interrupteurs, câbles, transformateurs, transistors) et les appareils mécaniques sont assemblés sur des cares et des panneaux. Tandis que la dernière étape peut être semi- ou entièrement automatisée, la soudure, elle, est totalement automatisée. Tous les composants sont alors incorporés en cabine afin de les protéger des conditions extérieures. Le test de l'onduleur, qui est une étape cruciale, est fait ultérieurement. Bien que les rendements des grands producteurs soient homogènes et que les prix aient tendance à baisser, une étude récente révèle que les clients seraient prêts à payer une prime pour une puissance de sortie plus forte. La Figure 17 montre que la majeure partie des coûts pour les onduleurs provient des matériaux, ce qui peut représenter près de 90 % du total (iSuppli 2011).

Les lignes de production sont la propriété des entreprises productrices. SMA Solar Technology, qui détient 30 % de parts de marché et qui est également une marque reconnue, domine le marché des onduleurs PV. Fronius, KACO et PowerOne sont également des marques leaders mais pas en ce qui concerne les ventes et la capacité comme pour SMA. Power One est le second dans la liste

des marques favorites d'onduleurs, suivi de Fronius, Kaco, Danfoss, SolarMax, Schneider Electric, Diehl Ako, Kostal et Refusol. Actuellement, il y a quelques 100 concurrents sur ce marché. Les barrières d'entrée principales sont la haute qualité et la pression sur les coûts.

Figure 17 : Répartition des coûts de producteur d'un onduleur



Source: GTM 2011b.

Exigences de fabrication	
Niveau technologique	Commercialisé
Industries annexes	Industrie électronique
Matières premières	Electronique de puissance
Facteur économique et coûts	
Taille minimum	-
Frais d'investissement	-
Structure de l'industrie	
Acteurs principaux	SMA (Allemagne), Fronius (Allemagne), KACO (Allemagne), PowerOne (USA)
Facteurs clés du succès	Puissance de sortie, marque, fiabilité
Barrières à l'entrée	Acteurs dominants ayant de grandes capacités, image de marque forte et qualité

Forces	Faiblesses
Pas de modifications majeures pour les applications PV	Fabricants établis
	Niveau élevé de puissance de sortie
Opportunités	Menaces
Barrières à l'entrée faibles	Adaptation aux différentes exigences du réseau en fonction des spécifications des réseaux des pays

3.6 Autres équipements électriques

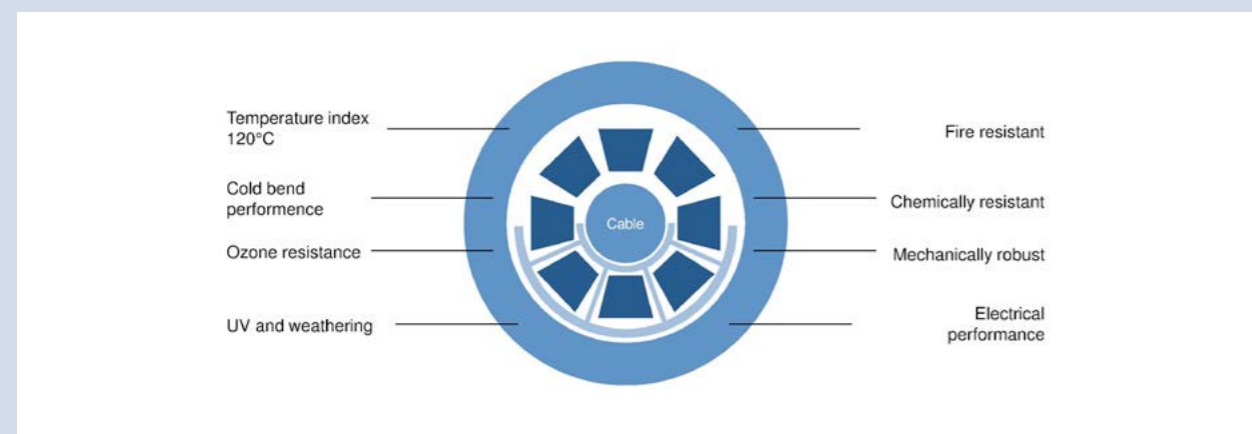
L'équipement électrique d'un système PV consiste en un transformateur, du câblage, un équipement de moyenne tension et de sous-stations. Seules les centrales solaires nécessitent un équipement MV. Il s'agit principalement d'équipements standards électriques. Les câbles des applications PV doivent résister à des conditions climatiques difficiles, comme la pluie, les changements de température, un rayonnement solaire important etc. Les exigences qualitatives sont, donc, plus élevées que pour des câbles traditionnels. De plus la durée de vie des câbles PV doit être significativement plus longue et les câbles ont besoin de résister au stress mécanique durant leur installation. UL et TÜV ont publié des exigences pour les câbles mais il n'existe pas de norme internationale à l'heure actuelle.

Les câbles PV, c.-à-d. les câbles CC de connexion des modules aux onduleurs, sont composés d'un brin de

cuivre (fils de cuivre étamé) et d'un revêtement (appliqué par vulcanisation ou par un procédé à sec de silane). En plus du cuivre, les matériaux d'entrée comprennent une base polymère, des stabilisateurs UV, et des mélanges antioxydants et colorants. La Figure 18 illustre les défis des composants plastiques pour les câbles PV.

Le marché des câbles PV est estimé de 1,1 à 1,6 M km en 2011 selon le mode de calcul du 40-60 km par MW (côté CC seulement, Kemmler 2009). Les entreprises leaders offrent une large gamme de produits de câblage pour diverses applications. Les matières premières (ex : le cuivre) sont les principaux facteurs de coûts. Les câbles doivent être conformes aux normes régionales ou nationales et aux normes des composants électriques. Les leaders du marché sont Leoni (Allemagne), Prysmian (Italie) et Nexans (France).

Figure 18 : Défis actuels des composants utilisés dans les câbles PV



Source: schéma d'après Kemmler 2010

Exigences de fabrication	
Niveau technologique	Commercialisé
Industries annexes	Industrie électronique et du câblage
Matières premières	Cuivre, polymères
Facteur économique et coûts	
Taille minimum	-
Frais d'investissement	-
Structure de l'industrie	
Acteurs principaux	Leoni (Allemagne), Prysmian (Italie), Nexans (France)
Facteurs clés du succès	
Barrières à l'entrée	
Forces	Faiblesses
Le processus de fabrication requiert des changements mineurs	Durabilité
	Acteurs établis
	Faibles volumes en comparaison à l'industrie du câblage dans le secteur automobile, par exemple
	valeur ajoutée locale faible
Opportunités	Menaces
Intégration dans le portefeuille du câblage	Développement peu sûr sur le marché PV
	Concurrence accrue
	Différents standards dans les pays

3.7 Structures de support

Structures de support pour les systèmes c-Si, TF montés sur axe fixe

En raison des baisses importantes de prix des modules PV, le chapitre suivant se concentre sur les systèmes de montage et exclut les systèmes de suivi des modules classiques. Les systèmes montés pour les toitures sont différents des applications montées au sol. Les systèmes de montage sont proposés selon le type de toiture, le type de mécanisme de fixation (brides, cadres, systèmes de rails arrière)

et de l'angle (cf. Figure 19). Les caractéristiques essentielles comprennent le poids, le temps d'installation et la robustesse contre les conditions météorologiques. Les systèmes de fixation sont en acier. Comparés à d'autres composants du système PV, ils ont un processus de fabrication relativement simple. Les principaux producteurs se composent de sociétés intégrées verticalement et de négociants en systèmes comme Schüco (Allemagne) et Gehrlicher Solar (Allemagne) mais aussi des entreprises spécialisées dans d'autres segments comme Schletter pour le traitement des métaux légers.

Figure 19 : Systèmes pour toitures plates et inclinées et pour espaces ouverts



Source: Schletter 2012

Exigences de fabrication	
Niveau technologique	Commercialisé
Industries annexes	Industrie métallurgique
Matières premières	Aluminium
Facteur économique et coûts	
Taille minimum	-
Frais d'investissement	-
Structure de l'industrie	
Acteurs principaux	Gehrlicher (Allemagne), Schüco (Allemagne), Schletter (Allemagne)
Facteurs clés du succès	Facile à installer, adaptable à différents types de toit, exigences en termes de poids et de sécurité
Barrières à l'entrée	Produit propriétaire, expérience, en relation avec les fabricants de modules/revendeurs de systèmes
Forces	Faiblesses
Savoir-faire technologique faible, apparenté au processus standard de la métallurgie	Systèmes personnalisés nécessaires
Opportunités	Menaces
Variétés de modules en augmentation (BIPV, TF flexible, par exemple)	Développement du marché PV
Développement de nouveaux marchés avec différentes exigences en termes d'architecture et de climat	Propriété intellectuelle
	Prix du métal

Structures de support pour les systèmes CPV

Comme mentionné plus haut, un système de suivi est nécessaire pour toutes les technologies CPV. Les systèmes de suivi à axe unique sont généralement utilisés pour les systèmes LCPV car certains d'entre eux peuvent utiliser

un rayonnement solaire diffus. Les systèmes de suivi pour HCPV doivent être précis afin de capturer directement le rayonnement solaire. Ainsi des trackers bi-axiaux sont nécessaires. Certains fabricants CPV développent un système de suivi en collaboration avec leurs fournisseurs

afin d'adapter le système de conception et de contrôle à leur technologie spécifique. Le contrôle des paramètres optiques, c'est-à-dire la façon dont le soleil est dirigé vers la cellule, est cruciale pour l'efficacité et la puissance constante de sortie qui influe directement sur LCOE et, par conséquent, sur la compétitivité de ces systèmes. La part des coûts de la structure porteuse dépend de la technologie et le système qui en résulte (uni vs bi-axial) ainsi que de la conception et des composants utilisés. En moyenne 23 % des coûts sont partagés (20 MW d'un système monté au sol) (FH ISE 2012).

3.8 Résumé et conclusions

Jusqu'en 2011, le marché mondial a montré des taux de croissance élevés. En 2011, la puissance appliquée au réseau a été augmentée comme jamais auparavant. Cependant le plus grand marché reste encore l'Europe et la demande des marchés de la MENA dépend fortement des projets gouvernementaux. Des outils de promotion

du PV comme les tarifs d'alimentation restent la clé du succès du développement PV en Europe mais les budgets ont été dramatiquement réduits dans plusieurs pays. Par ailleurs, ces stratégies d'aide sont toujours manquantes ou à leurs balbutiements dans les pays de la MENA. Pourtant, les capacités de production de modules PV existent déjà dans la zone MENA et la première unité de production de modules a ouvert en Tunisie fin 2011.

L'amont de la production PV, comme les processus de production pour les poly-Si, les plaques, les cellules et les TF, demande un grand savoir-faire technique, de l'expérience mais aussi des coûts d'investissement élevés. L'aval (fabrication de modules et composants BOS) a, en règle générale, des barrières d'entrée basses. Toutefois, compte tenu de la surcapacité actuelle, de la baisse drastique des prix et du manque de marché dans la région MENA, l'entrée de la Tunisie dans ces étapes de la chaîne de valeur présente un risque entrepreneurial certain.

4 Énergie solaire à concentration : développement de l'industrie et du marché

4.1 Développement technologique

4.1.1 Les technologies d'énergie solaire à concentration

Les technologies d'énergie solaire à concentration (CSP) fournissent de l'électricité propre et fiable en convertissant un rayonnement direct normal concentré (DNI) en électricité. Les valeurs élevées de DNI que l'on trouve habituellement dans les zones arides et semi-arides sont importantes puisque seuls les sites CSP sont situés dans des zones présentant des valeurs DNI supérieures à 2 000 kWh/m²/y sont économiques (DLR 2005). Les systèmes CSP utilisent des miroirs pour réfléchir l'énergie solaire sur un récepteur qui absorbe la chaleur. L'énergie thermique qui en résulte est utilisée pour produire de la vapeur ou de l'air chaud qui conduit finalement à une turbine à vapeur, une turbine à gaz ou un moteur Stirling. Pour transporter la chaleur vers les systèmes d'alimentation du cycle CSP, on utilise un fluide de transfert de chaleur (HTF) ex: air, eau, huile, sel fondu. Les stockages thermiques permettent la production d'électricité même sans soleil ou à la demande. Figure 20 montre une centrale CSP avec champ solaire. Dans ce que l'on appelle les systèmes solaires à cycle combiné intégrés (ISCCS), les champs de capteurs CSP sont combinés avec des centrales classiques à gaz.

Bien que les différentes technologies CSP soient entrées dans une phase commerciale, il y reste encore un fort potentiel d'améliorations techniques. Les améliorations techniques et la recherche ont, en particulier, mis l'accent sur des rendements plus élevés et des réductions de coûts, qui dépendent principalement des aspects suivants (A.T. Kearney 2010) :

- Réduction des coûts grâce à l'optimisation de la conception du champ solaire
- Réduction de la consommation en ressources internes : eau, électricité

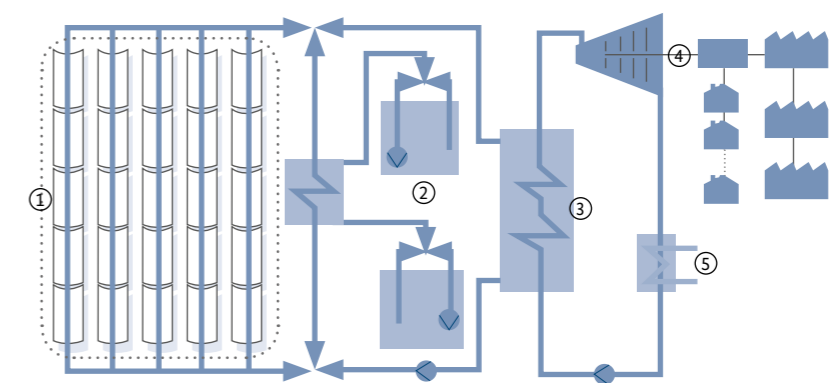
On distingue 4 technologies CSP de maturités différentes :

- Capteur parabolique
- Linéaire Fresnel
- Tour solaire (récepteur central)
- Moteur Stirling

Capteur ou collecteur cylindro-parabolique

Le capteur cylindro-parabolique est la technologie la plus éprouvée en opération sur le marché depuis son installation dans le désert du Mojave en Californie en 1984 (Solar Electric Generating Systems, SEGS). A l'heure actuelle, plus de 1.500 MW ont été installés dans le monde, dont plus de 1.000 MW en Espagne (Hering 2011). Un champ de miroirs cylindro-paraboliques solaires se compose de plusieurs rangées modulaires et parallèles de collecteurs paraboliques à axe unique de suivi et qui sont alignées en direction nord-sud. Grâce à leur modularité, les systèmes de capteurs paraboliques peuvent atteindre plusieurs centaines de MW. Pour suivre le soleil, la structure de concentration permet au collecteur de tourner. Les miroirs paraboliques concentrent et réfléchissent la lumière vers un tube absorbeur linéaire situé dans la ligne focale de la parabole. À l'intérieur du récepteur, un fluide caloporteur synthétique est chauffé jusqu'à 390 °C et produit de la vapeur haute-pression surchauffée. Enfin, une turbine à vapeur conventionnelle génère l'électricité.

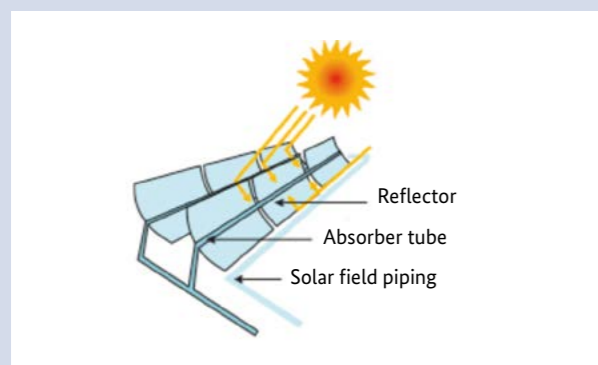
Figure 20 : Schéma d'une centrale avec champ solaire



1. Solar field, 2. Storage, 3. Heat exchanger, 4. Steam turbine and generator, 5. Condenser

Source: Flagsol 2012.

Figure 21 : Schéma d'un champ solaire



Source: IEA 2010.

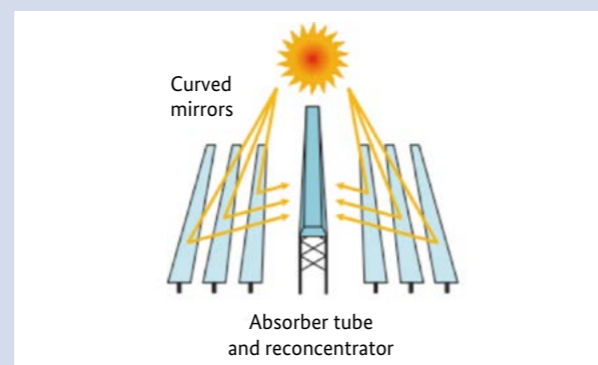
De nos jours, l'utilisation d'une huile synthétique telle que le HTF est la norme. Cependant, le sel fondu permettrait des rendements plus élevés du fait de son utilisation possible à très haute température (> 550 °C). L'utilisation de vapeur directe est actuellement en cours d'investigation. Le collecteur parabolique a une bonne efficacité optique mais son installation requiert une certaine distance afin de minimiser l'ombrage sur la structure (IEA 2011). À l'heure actuelle, l'efficacité nette des systèmes de capteurs cylindro-paraboliques est d'environ 13,5 à 14 %. Les centrales solaires basées sur la technologie cylindro-parabolique pourraient augurer des capacités, allant jusqu'à 500 MW à l'horizon de 2025 (A. T. Kearney 2010). Aujourd'hui, de nombreux systèmes cylindro-paraboliques sont construits avec un stockage thermique. Toutefois, les systèmes de stockage sont encore à un stade précoce de développement. Des expériences à long terme et l'acquisition de plus de parts de marché garantiraient la bancabilité.

Linéaire Fresnel

Les collecteurs linéaires de Fresnel sont des miroirs plats à l'instar des miroirs de forme parabolique. Seuls quelques projets de démonstration ont été mis en œuvre à ce jour. En ce qui concerne les systèmes linéaires de Fresnel, plusieurs miroirs parallèles à trackers multiples de Fresnel réfléchissent l'énergie solaire sur un récepteur fixe situé à plusieurs mètres de hauteur, où l'eau est vaporisée et la vapeur directe avec des températures allant jusqu'à 500 °C est générée (Novatec 2012).

Ensuite, un second réflecteur situé dans le récepteur concentre tous les rayons provenant de réflecteurs Fresnel primaires sur le tube absorbant. La vapeur produite à l'intérieur de l'absorbeur est finalement utilisée pour entraîner une turbine à vapeur. Par rapport aux capteurs cylindro-paraboliques, les linéaires de Fresnel permettent un assemblage plus facile et plus rapide du champ solaire.

Figure 22 : Schéma d'un linéaire Fresnel



Source: IEA 2010.

Et il est moins onéreux en termes de coût. La baisse des coûts sont dus aux facteurs suivants (Häberle et al 2002) :

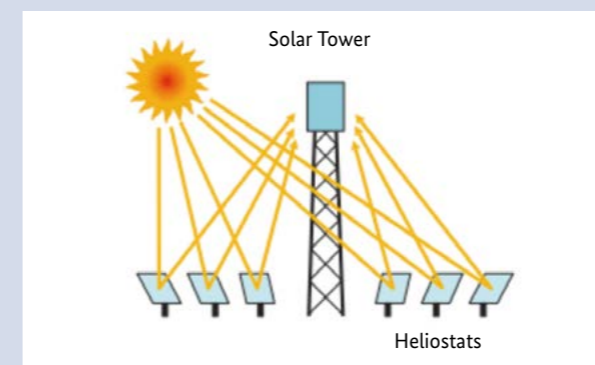
- miroirs plats et système de suivi simple
- absence de technologie du vide, de scellement métallique du verre, d'arcs de dilatation thermique et de joints souples haute pression
- Plus grande largeur du réflecteur pour un absorbeur par rapport au capteur cylindro-parabolique
- Absence d'échangeur de chaleur car la vapeur est générée directement
- Utilisation efficace des terrains en raison du positionnement des collecteurs

Les réflecteurs linéaires de Fresnel ont une faible efficacité optique et sont surtout moins efficaces en cas de faible ensoleillement (IEA 2011). Le rendement net est compris entre 10,5 et 11 %, ce qui est plus bas que toutes les autres technologies CSP. Les centrales solaires basées sur la technologie linéaire de Fresnel pourraient augurer des capacités allant jusqu'à 250 MW à l'horizon 2025 (A.T. Kearney 2010). Aujourd'hui, aucun stockage thermique n'est commercialisé pour les systèmes linéaires de Fresnel puisque que la vapeur directe est générée, mais les systèmes de stockage sont à l'étude. Seuls quelques projets de démonstration sont en service à ce jour, d'où le fait que cette technologie ne pas encore très concluante.

Tour solaire (récepteur central)

La tour solaire ou système de récepteur central est la deuxième technologie la plus éprouvée. Plusieurs miroirs à tracker individuel, dits héliostats, réfléchissent l'énergie solaire sur un récepteur central (échangeur de chaleur) monté sur une tour. La chaleur résultante est utilisée dans un cycle thermodynamique, par exemple, un cycle eau-vapeur, pour produire de l'électricité. Du sel fondu ou de l'air chaud peuvent être utilisés comme alternatives. En fonction du fluide de travail choisi, les plages de températures

Figure 23 : Schéma d'une tour solaire



Source: IEA 2010.

de fonctionnement oscillent entre 500 et 600 °C (ESTELA 2009). Des concepts de récepteurs plus récents atteignant des températures de fonctionnement de plus de 1000 °C permettraient une meilleure efficacité en cas d'utilisation de turbines à gaz et cycles combinés à l'avenir. Cependant, ces concepts sont encore à l'étude et ne sont pas encore commercialisables. Le rendement net des systèmes de tours solaires est d'environ 16 à 17 % et les capacités des centrales électriques devraient augmenter jusqu'à 200 MW en 2025 (Kearney 2010).

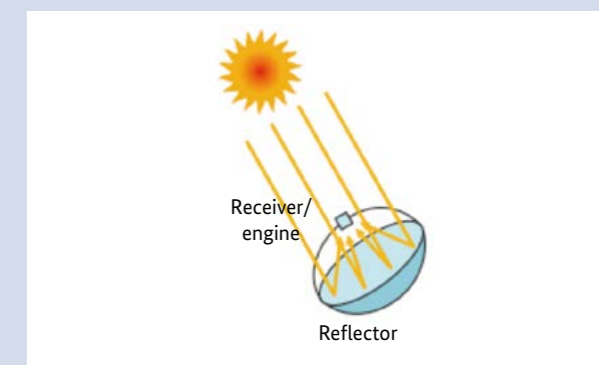
Contrairement aux capteurs cylindro-paraboliques et les systèmes linéaires de Fresnel, les systèmes de récepteurs centraux ne sont pas nécessairement installés sur des terrains plats. La taille du champ des systèmes de récepteurs centraux, cependant, est limitée à un rayon d'environ 1,5 km car de plus longues distances entre les héliostats et la tour ne feraient que compliquer l'exacte réflexion sur le récepteur. Même l'atténuation atmosphérique qui réduit l'efficacité de champ d'héliostats lointains, limite la taille des champs de tour solaire (AIE 2011). En raison d'un nombre croissant de projets, les systèmes de tour solaire deviennent aujourd'hui de plus en plus rentables.

Moteur Stirling

Les systèmes à moteur Stirling concentrent l'énergie solaire sur un récepteur en utilisant un système de suivi du soleil à deux axes plat parabolique. À l'intérieur du récepteur, de l'énergie solaire est concentrée sur l'absorbeur de chaleur d'un moteur Stirling qui convertit l'énergie thermique en énergie électrique.

Le fluide de travail (hydrogène/hélium), à l'intérieur d'un moteur Stirling, est chauffé et mis sous pression, ce qui, finalement, donne de la puissance au moteur Stirling. Les systèmes simples de moteurs Stirling ont généralement une plage de puissance de 5 à 25 kW; ils peuvent donc être utilisés soit pour de petites applications autonomes

Figure 24 : Schéma du moteur Stirling



Source: IEA 2010.

et décentralisées hors réseau, soit assemblés aux grandes centrales électriques d'une capacité maximale de 500 MW. Cette technologie est caractérisée par la plus grande efficacité nette de toutes les technologies CSP allant de 20,3 à 23,7 % (A.T. Kearney 2010). En outre, cette technologie est particulièrement adaptée aux zones arides car son processus de refroidissement à sec ne nécessite pas d'eau. Le principal inconvénient des systèmes Stirling est qu'ils ne peuvent pas stocker l'énergie thermique. Cet inconvénient diminue significativement l'attractivité de la technologie: elle est intermittente comme PV, mais à des coûts significativement plus élevés (3,5 \$ en 2010/Wp, Sargent & Lundy 2009). Il en résulte des difficultés à trouver des marchés pour les fabricants de moteurs Stirling. Aussi, les grands projets de ce type de technologie ne sont actuellement pas rentables.

4.1.2 Frais d'investissement

Les investissements pour les CSP sont actuellement plus élevés par rapport à d'autres technologies solaires, ce qui est un obstacle majeur. Néanmoins, les coûts devraient baisser puisque de grands projets et des processus de production de masse ont été développés, ce qui se traduira par une concurrence accrue et des améliorations technologiques. Aujourd'hui, les coûts d'investissement pour les technologies CSP varient à l'infini et les investissements pour les tours solaires sont actuellement de plus du double par rapport aux technologies paraboliques. Les investissements des centrales de référence sont résumés dans le tableau 4. :

- Référence de centrale cylindro-parabolique : 100 MW et une capacité de stockage de 4 h
- Référence de centrale à tour solaire : 20 MW et une capacité de stockage de 15 h
- Référence de système linéaire Fresnel : 50 MW et aucun stockage
- Référence de système de moteur Stirling : 100 MW et aucun stockage

Tableau 4 : Coûts d'investissement en CSP avec spécifications

Technology	Heat Transfer	Tracking/ Receiver	Operating Temperature	Type of operation	Net efficiency (%)	Total investment costs (Mio. € 2012)	Investment costs (€ 2012/kW)
Parabolic Throughs 100 MW 4h storage	Synthetic oil	Single-axis/ moving receiver	>400°C	commercial	15.5–16.0	478.4	4,784
Linear Fresnel, 50MW	Water/steam	Single-axis/ fixed receiver	>500°C	demonstration	10.5–11.0	171.1	3,422
Solar Tower 20 MW 15h storage	Molten salt	Two-axis/ fixed receiver	>565°C	commercial	16.0–17.0	217.0	10,850
Dish Stirling, 100 MW	(Hydrogen/ helium)	Two-axis/ moving receiver	<700°C	demonstration	20.0–23.7	468.8*	4,688*

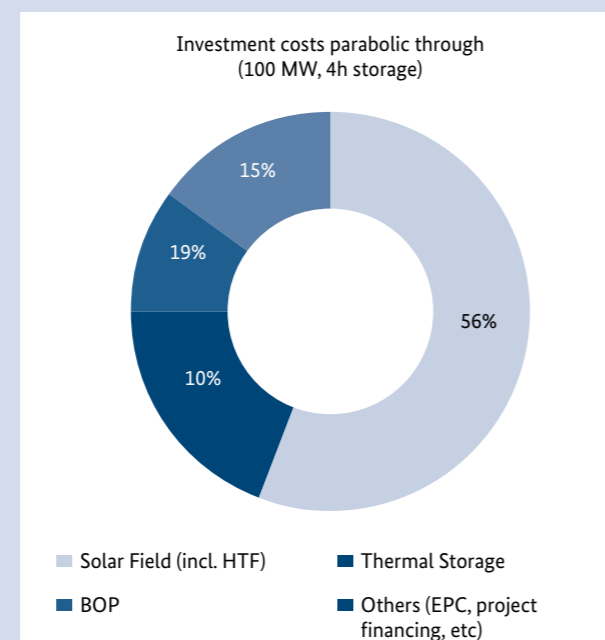
* 3,525 \$2010 (1 \$=1,33 €)

Source: FH ISE 2012, p. 25 et Sargent & Lundy 2009, p. 6-8.

Dans la Figure 25, les coûts d'investissement d'une centrale de référence cylindro-parabolique de 100 MW avec une capacité de stockage de 4 heures sont répartis. Les terrains solaires comptent pour 56 % du total des investissements d'une centrale de miroirs cylindro-paraboliques. Environ 10 % des investissements sont comptabilisés pour le stockage thermique. Le bloc d'alimentation conventionnel comprenant l'équilibrage des systèmes d'usine (Balance Of Plant ou BOP), à savoir les composants du circuit primaire avec le bloc d'alimentation et le raccordement du BOP au réseau représentent 19 % des coûts d'investissement. 15 % des coûts d'investissement sont consacrés à d'autres postes comme l'EPC ou le financement de projets. La répartition des coûts pour les tours solaires est à peu près identique à celle des capteurs cylindro-paraboliques. Seul, le linéaire Fresnel a le plus faible coût en champ solaire, ce qui représente environ 46 % (FH ISE 2012). La forte proportion de champs solaires montre l'attrait pour la fabrication locale de composants pour ces mêmes champs.

Avec le doublement des capacités des champs cylindro-paraboliques jusqu'à 200 MW, les coûts d'investissement par watt devraient chuter de 8 %. Les coûts pour l'équilibre de la centrale (BOP), des blocs d'alimentation et du raccordement au réseau devraient baisser de 20 à 25 % avec le doublement des capacités. Une diminution de 10 à 20 % est attendue si la vapeur directe remplace l'huile synthétique comme fluide caloporteur. Au total, les coûts d'investissement des centrales peuvent être réduits de 30-40 %

Figure 25: Répartition des coûts d'investissement pour un champ cylindro-parabolique.



Source: FH ISE 2012, p. 25.

jusqu'en 2020 (AIE 2010). Des baisses de coûts plus élevées sont prévues pour les systèmes à tour solaire. Grâce à des améliorations technologiques, ils peuvent baisser de 25 % jusqu'en 2025. L'amélioration des processus de production (par exemple la production de masse) peut réduire les

coûts de 35 %. L'augmentation des capacités de production jusqu'à 200 MW à l'horizon 2025 peut conduire à des réductions de coûts d'environ 40 % (Sargent & Lundy 2009). Un développement suffisant du marché CSP est, toutefois, nécessaire au préalable.

4.1.3 Chaleur industrielle solaire

Les systèmes CSP peuvent générer de la chaleur pour des procédés industriels. Cependant, avec des niveaux de températures faibles ou moyens (> 200 °C), les systèmes CSP se retrouvent face à la concurrence accrue des systèmes solaires thermiques moins coûteux et moins sophistiqués. La chaleur perdue générée par le monoxyde de carbone peut être utilisée à une température basse de 70 °C à 110 °C pour des processus tels que la désalinisation d'eau de mer. En raison de la pénurie d'eau dans les pays de la MENA, la désalinisation d'eau de mer a un fort potentiel et pourrait être un domaine prometteur pour la chaleur CSP. Au niveau moyen de température, la plupart des procédés thermiques industriels comprennent la distillation, la cuisson, le séchage, etc. ainsi que l'industrie alimentaire, le textile et la chimie (Lauterbach et al. 2011). L'industrie de fertilisants et la production industrielle d'ammoniaque en Tunisie pourraient être bien adaptées à la chaleur CSP. De plus, des processus de production à forte intensité énergétique de divers métaux, tout comme du ciment et du verre, sont prometteurs. La récupération du pétrole (EOR) assistée par un système solaire thermique pourrait être une autre application relative au processus de chaleur industrielle CSP et est très intéressante pour les pays riches en pétrole et ensoleillés de la région MENA. Néanmoins, la chaleur industrielle solaire produite par les systèmes CSP est encore à un stade précoce de développement et seulement quelques installations de démonstration sont en service à ce jour. Les améliorations technologiques et des températures de fonctionnement plus élevées peuvent créer des nouveaux champs d'application pour la chaleur industrielle CSP, en particulier à haute température.

4.1.4 Intégration dans l'ensemble du système énergétique

La production d'électricité CSP dépend des flux d'énergie dans l'environnement naturel ; cependant, les variations à court terme du rayonnement solaire peuvent être lissées en raison de l'inertie thermique du fluide de travail (Sims et al. 2011). Des systèmes adéquats de stockage thermique rendent la production d'électricité plus fiable et la distribution de l'électricité CSP simplifie l'intégration. L'emplacement et la taille optimale de la centrale dépend, dans la plupart des cas, des DNI et de la disponibilité des terres. Ainsi, les sites CSP ne sont pas nécessairement situés à proximité des centres de consommation et nécessitent,

donc, dans la plupart des cas, une nouvelle infrastructure de transport. Les taux de capacité pour les centrales solaires à concentration sans systèmes de stockage sont d'environ 25 %. En utilisant un stockage thermique, le taux augmente jusqu'à plus de 70 % (NREL 2010).

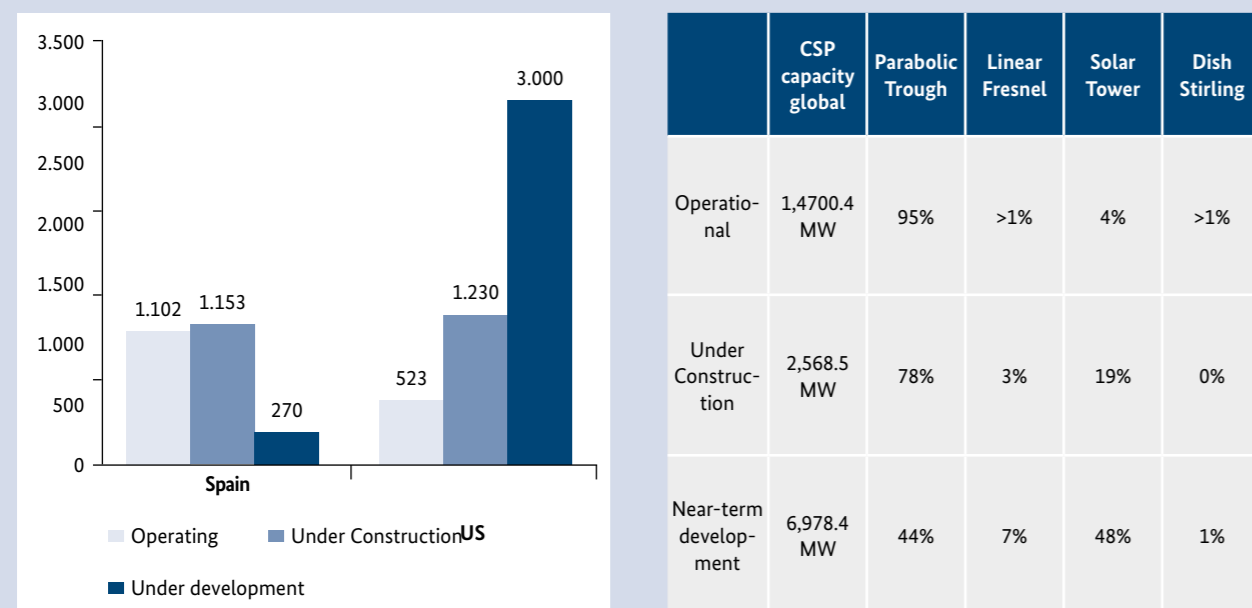
4.2 Développement du marché mondial et de l'industrie

4.2.1 Marché mondial

Depuis que la première centrale parabolique a été développée dans le désert californien du Mojave, en 1984, de nombreux projets CSP ont été annoncés et particulièrement développés aux Etats-Unis et en Espagne. Les deux pays sont les plus grands marchés actuels pour les projets CSP et représentent plus de 95 % de la capacité mondiale installée. Environ 520 MW sont déjà en service aux Etats-Unis et plus de 1 100 MW en Espagne. En outre, plus de 2,3 GW sont actuellement en construction dans les deux pays (Hering 2011). Le fort développement de projets CSP dans les deux marchés dominants repose notamment sur les incitations nationales de soutien telles que des tarifs de rachat et de réductions fiscales.

La technologie cylindro-parabolique est aujourd'hui le leader mondial des technologies et compte pour 95 % de la capacité mondiale installée. Seuls quelques systèmes linéaires de Fresnel et de tours solaires sont actuellement en service. Toutefois, le portefeuille de projets en cours et de projets à court terme montrent une part croissante de projets de tours solaires. Les tours solaires représentent déjà 19 % de tous les projets en cours de développement mais les projets cylindro-paraboliques dominent toujours avec 78 %. A court terme, la part des projets de tours solaires va augmenter jusqu'à 48 % alors que celle des miroirs cylindro-paraboliques va diminuer jusqu'à 44 %. Le linéaire de Fresnel, cependant, ne représente que 3 % des projets en cours et environ 7 % des projets prévus à court terme. Le moteur Stirling, même en court terme, ne représente pas plus de 1 %. Malgré ces perspectives positives pour les projets CSP, il faut mentionner que près de 4 GW de projets ont été modifiés en technologie PV ou annulés aux Etats-Unis en 2011 en raison de la baisse des prix PV (Hering 2011).

Figure 26: Vue d'ensemble des projets CSP en Espagne et Etats-Unis ainsi que les projets au niveau mondial



Source: Hering 2011, p. 164.

La plupart des fournisseurs de composants et de services CSP sont toujours situés dans les plus grands marchés. Mais, en Allemagne, une grande partie de développeurs a travaillé en étroite collaboration avec les agences gouvernementales et les instituts de recherche (par exemple le Centre Aérospatial Allemand, DLR). Cette approche peut être identifiée comme un facteur de succès. Le programme national allemand a financé la recherche et le développement relatifs aux centrales thermiques solaires (2000-2004), incluant aussi la recherche et le développement de différentes technologies solaires. Les développeurs qui ont été engagés dans ces projets sont aujourd'hui les leaders en fourniture de composants et de services CSP. En Espagne, les principaux fournisseurs de composants et de services CSP coopèrent avec la Plataforma Solar de Almeria (PSA), qui est un projet de recherche de premier

plan pour renforcer la coopération entre les entreprises et les institutions scientifiques. PSA fournit la R & D et les essais en collaboration avec les entreprises et les institutions scientifiques. Les principaux fournisseurs CSP ont tous été impliqués dans des projets publics financés par PSA. Ainsi, en Espagne, la recherche commune et les projets de développement et de démonstration peuvent être identifiés comme des facteurs de réussite.

4.2.2 Région MENA

Les premiers projets CSP à grande échelle ont déjà été installés en Algérie, en Égypte et au Maroc. Tous ces projets sont des centrales ISCCS utilisant un champ solaire combiné avec une centrale à gaz classique. Les capacités solaires de ces projets représentent au total pour 60 MW.

Tableau 5 : Vue d'ensemble des centrales ISCC installées dans la région MENA

Country	ISCC power plant	Location	Total MW Capacity	Solar Capacity (MW)	Technology	Status
Algeria	ISCC SPP1	Hassi R'mel	150	20	Parabolic trough	Operational
Egypt	ISCC Al-Kuraymat	Kuraymat	140	20	Parabolic trough	Operational
Morocco	ISCC Morocco	Ain Beni Mathar	470	20	Parabolic trough	Operational

Source: Institut Wuppertal.

Environ 60 % de la valeur du champ solaire en Égypte ont été fournis localement, grâce à un contractant EPC local. Cependant, des éléments clés de la filière solaire sont fournis par des fabricants internationaux (par exemple : récepteurs, miroirs, HTF, générateurs de vapeur). Néanmoins, les sous-traitants égyptiens ont fourni les pièces principales de la structure métallique de support. Les composants de la centrale au Maroc, ont été principalement importés d'Europe (Espagne, Allemagne et Turquie). Même en Algérie, les composants n'ont pas été fabriqués localement et environ 90 % des composants ont été importés (FH ISE 2011).

Pour la région MENA, le CSP pourrait être une technologie prometteuse en raison de l'excellent rayonnement solaire local. Des initiatives telles que Desertec augurent une expansion rapide des technologies CSP dans la région pour satisfaire la demande énergétique locale et pour l'exportation d'électricité vers l'Europe. Les projets CSP qui sont déjà dans le portefeuille de projets sont présentés dans le tableau 6. Tous font partie du fonds pour les technologies propres de la Banque Mondiale (CTF) qui fournit le financement des projets. Une nette sensibilisation pour les systèmes CSP a été identifiée en Algérie, au Maroc, en Égypte et en Jordanie. Beaucoup de ces projets reposent sur les systèmes cylindro-paraboliques. Au Maroc, à Ouarzazate, un champ CSP de 500 MW est l'un des projets les plus ambitieux au monde et fait partie du plan national marocain d'alimentation solaire qui vise 2 000 MW de

capacité de production d'énergie solaire d'ici à 2020. Une capacité initiale de 160 MW sera mise en route dès 2014.

A Abu Dhabi, une première tranche de 100 MW d'un projet cylindro-parabolique est déjà en cours de construction et sera mise en route en 2012. Des projets CSP en Algérie, en Égypte et en Jordanie sont actuellement en cours de planification et représentent 420 MW au total. D'autres projets CSP prometteurs incluent le développement d'environ 800 MW d'ici à 2030 à Dubaï (CSP Today 2012) et le développement ambitieux de 25 GW en Arabie Saoudite jusqu'en 2032 (PV magazine de 2012).

En dépit de perspectives CSP assez bonnes dans la région MENA, les entreprises qui se concentrent sur les CSP sont encore rares, même si les industries locales pouvant fournir la chaîne de valeur CSP existent déjà (par exemple industries du métal, du verre, du matériel électronique). En Égypte, l'usine de la National Steel (NSF) a été impliquée dans le projet Kuramat et a fourni les pièces principales de la structure d'acier. Même si la NSF n'avait aucune expérience des structures de CSP, la société possède beaucoup de connaissances sur les structures en acier dans d'autres projets (par exemple, ponts). Le projet Kuramat a fourni des expériences significatives pour la NSF sur les CSP pouvant être utilisées dans les projets futurs (NSF 2012). Le potentiel de marché pour les nouveaux fabricants locaux de composants CSP est élevé et ouvre un large éventail de possibilités.

Tableau 6: Portefeuille de projets CSP en MENA, incluant les projets d'investissements (CTF)

Country	Project	Solar Capacity (MW)	Technology	Status
Algeria	Hassi R'mel II	70	Parabolic trough	Planning
Algeria	Megahir	80	Parabolic trough	Planning
Algeria	Naama	70	Parabolic trough	Planning
Egypt	Kom Ombo	100	Parabolic trough	Planning
Jordan	Joan-1	100	Linear Fresnel	Planning
Morocco	Ouarzazate	500	Parabolic trough/ Solar Tower	Planning
UAE	Shams-1	100	Parabolic trough	Under construction
		1020		

Source: CTF 2010, p. 20f ; MASEN 2013.

4.2.3 Tunisie

Plusieurs projets CSP et un projet de câblage vers l'Europe sont déjà en cours en Tunisie. Tous ces projets sont axés sur les systèmes cylindro-paraboliques. En outre, le bien nommé « TuNur-Project » a été annoncé en 2012. Le 2 GW du projet TuNur serait l'un des projets CSP les plus ambitieux au monde. Contrairement à d'autres projets CSP en cours de planification, le projet TuNur (à hauteur de 7 à 9 milliards d'EUR) est basé sur un système de tour solaire (Stenzel 2012). Néanmoins, TuNur est encore en phase de planification.

En comparaison avec les pays voisins, le potentiel DNI est significativement plus faible en Tunisie (DLR 2005). Cette situation rend la mise en œuvre de projets CSP moins attrayants. Même s'il y a des projets CSP dans les portefeuilles des projets énergétiques, le potentiel du marché local est encore faible. L'exportation vers la région MENA est, pour le moment, le seul marché potentiel. La mise en œuvre des premiers projets de démonstration CSP devrait aider les entreprises tunisiennes à gagner une expérience significative pour de futurs projets et pourrait ouvrir des fenêtres d'opportunités pour les industries existant déjà en Tunisie afin de se spécialiser sur des éléments clés.

4.3 Résumé et conclusions

Le marché mondial CSP est encore à un stade précoce et aucune technologie CSP spécifique ne peut, actuellement, être identifiée comme la technologie leader du futur. La maturité des technologies varie en outre considérablement. En raison d'un excellent rayonnement solaire dans la région, des initiatives telles que Desertec augurent

un marché important futur des technologies CSP dans la région MENA afin de satisfaire la demande régionale toujours croissante d'énergie ainsi que les exportations d'électricité vers l'Europe. L'analyse de la chaîne de valeur se concentre sur les capteurs cylindro-paraboliques, le linéaire Fresnel et la tour solaire (récepteur central) car ce sont les technologies les plus prometteuses.

Les premiers projets cylindro-paraboliques en Tunisie ouvrent des opportunités pour les précurseurs ; cependant, leur réalisation est incertaine. Les fournisseurs en composants et service CSP sont actuellement situés en Europe et aux États-Unis et fournissent la plupart des composants pour les installations existantes ISCCS dans la région MENA puisque les entreprises CSP locales sont encore rares. Les expériences des marchés CSP de premier plan ont, en outre, montré que le soutien du secteur public et les activités de R&D sont des facteurs clés de succès.

La plupart des investissements CSP sont dépensés pour le champ solaire, mais comme le montre le projet égyptien, la plupart des régions se fournissent encore à l'étranger pour les éléments de leur champ solaire. Le marché de l'environnement est en pleine mutation et peu d'entreprises dans le monde fournissent des composants pour les champs solaires CSP. Les composants tels que les miroirs, les structures de montage, les systèmes de suivi, les récepteurs et les tuyaux de raccordement sont nécessaires pour les systèmes cylindro-paraboliques, les linéaires de Fresnel et les systèmes de récepteurs centraux et peuvent offrir des opportunités prometteuses de marché pour les fabricants tunisiens. Ces composants sont décrits dans le chapitre suivant.

Tableau 7 : Vue d'ensemble du portefeuille de projets CSP en Tunisie

Power plant/ Project manager	Solar Capacity (MW)	Technology	Period
STEG	50 (*)	Parabolic Trough	2010–2016
Private	75	Parabolic Trough	2010–2016
SITEP	5	Parabolic Trough	2012–2014
IPP	100	Parabolic Trough	From 2016
ELMED	100+	Parabolic Trough	From 2016
	330+		

(*) Feasibility study underway.

Source: ANME 2012.

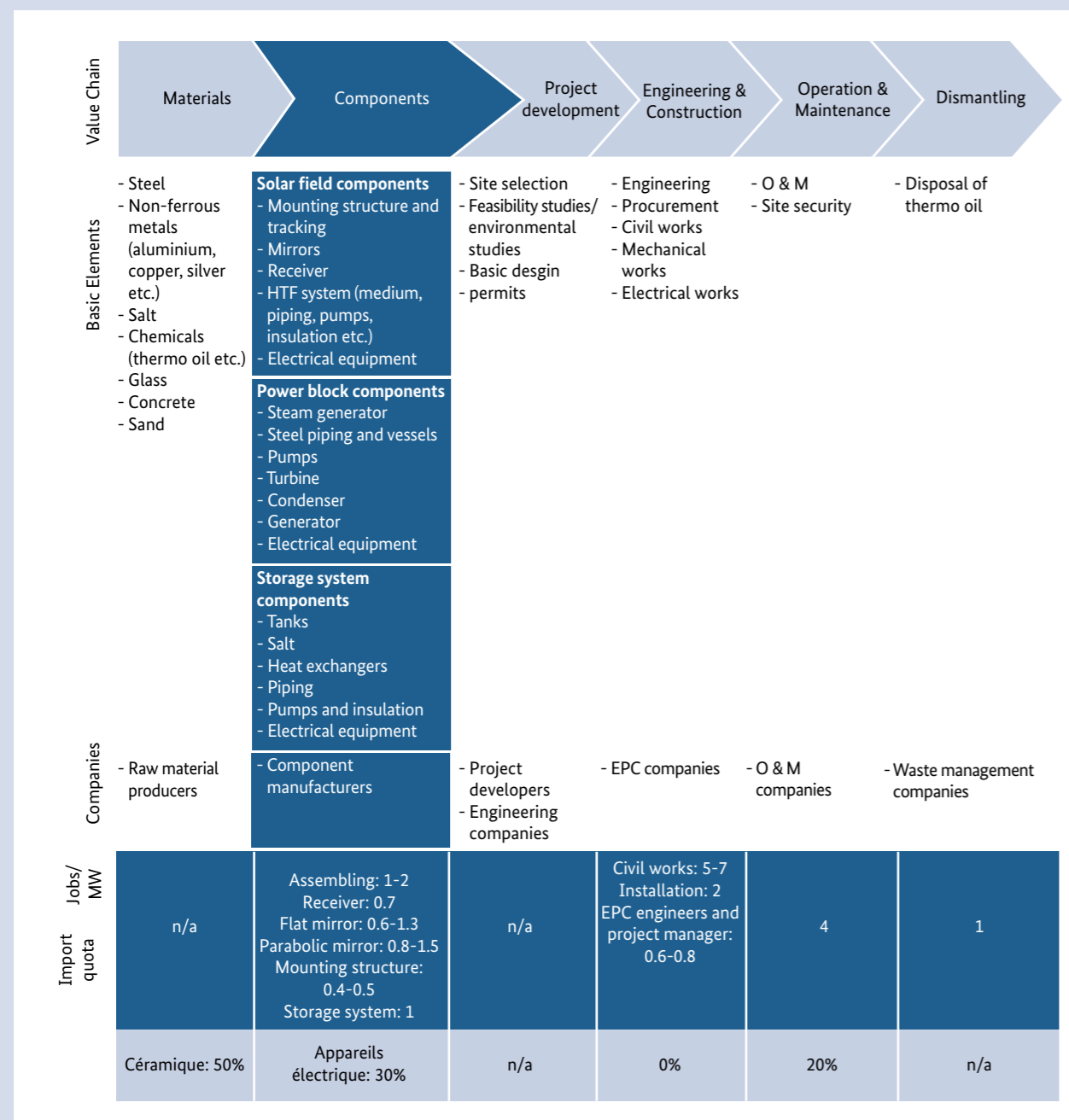


5 Analyse de la chaîne de valeur de la concentration d'énergie solaire

L'analyse suivante se concentre sur les technologies les capteurs cylindro-paraboliques, les systèmes linéaires Fresnel et les tours solaires pouvant être combinés aux circuits à vapeur conventionnels. Le système à parabole Stirling ne fait pas partie de cette analyse, étant donné qu'il s'agit de la technologie la moins prometteuse des quatre technologies de CSP. Au cœur de la chaîne de valeur, 6 étapes peuvent être identifiées :

- Matériaux
- Fabrication de composants
- Développement du projet
- Ingénierie & construction
- Service & maintenance
- Démantèlement

Figure 27 : Aperçu de la chaîne de valeur d'un projet CSP



Source : documentation interne ; GWS et al. 2011 ; ISE et al. 2011

L'analyse tient particulièrement compte de la fabrication des composants et des exigences annexes incluant des miroirs de dernière génération, des structures de montage, des récepteurs, des HTF (fluides caloporteurs), des blocs de puissance et des systèmes de stockage. Le développement du projet, l'ingénierie et la construction, l'exploitation et la maintenance seront rapidement évoqués. Une description approfondie des matériaux comme, par exemple, la production du verre a déjà été proposée (ISE et al. 2011).

Du point de vue des effets sur l'emploi, les CSP offrent opportunités en amont (soit 3,5 emplois par MW installé) ainsi qu'en aval (soit 8 emplois par MW installé). Toutefois, selon ISE et al., la majorité des emplois peuvent être créés dans le secteur du génie civil (5 à 7 emplois par MW installé) (ISE et al. 2011). Le potentiel de création d'emploi pour l'installation sur site est de 2 emplois par MW, de 0,6 à 0,8 emploi par MW dans le domaine de l'ingénierie et la gestion/direction et de 1 à 2 emplois par MW pour l'assemblage. Les emplois potentiels sont moindres dans le secteur de production de miroirs à plat (0,6 à 1,3 emplois par MW), miroirs paraboliques (0,8 à 1,5 emplois par MW), structures de montage (0,4 à 0,5 emplois par MW) et systèmes de stockage (1 emploi par MW).

5.1 Matériaux

Toutes les technologies CSP (capteur cylindro-parabolique, récepteur central et collecteur Fresnel) comportent des

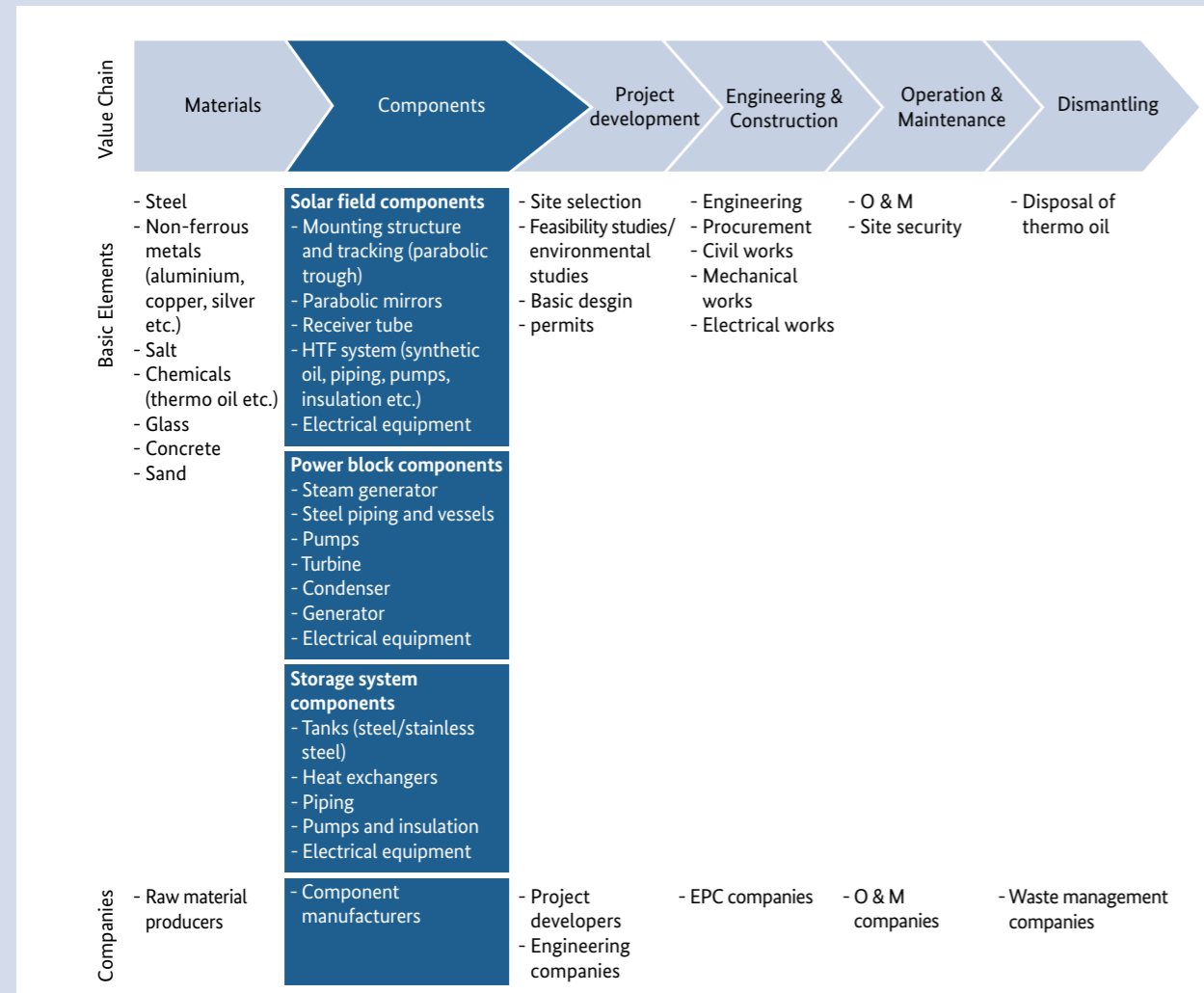
matières premières similaires qui ne sont pas seulement spécifiques aux technologies CSP. Les matériaux les plus employés sont :

- Le béton pour les fondations, les bâtiments et les travaux publics
- L'acier et les métaux non ferreux pour les structures de montage et la tuyauterie
- Du verre pour les miroirs
- Des sels pour les systèmes de stockage
- Des produits chimiques pour le fluide de transfert de chaleur HTF

L'étude du champ solaire, des implantations de capteurs cylindro-paraboliques et de tours solaires montre que le matériau le plus utilisé est le béton comptant pour près de 2/3 du total des matériaux. Les installations de type Fresnel n'utilisent pas autant de béton puisque des barres métalliques sont généralement employées dans les champs solaires en remplacement de la majeure partie des fondations requises. En outre, l'acier, comptant pour 25 % dans les installations de capteurs cylindro-paraboliques et tours solaires, est également très important. Dans le cas des systèmes Fresnel, l'acier atteint même les 70 %. Le verre est également un matériau de tout premier plan. Environ 10 % des centrales à capteurs cylindro-paraboliques et récepteurs centraux et environ 27 % des systèmes Fresnel sont constitués de ce matériau (Viebahn et al. 2008).

5.2 Composants des systèmes à capteurs cylindro-paraboliques

Figure 28 : Aperçu des composants des capteurs cylindro-paraboliques



Source : documentation interne

5.2.1 Structure de montage et système de poursuite ou de suivi solaire

La structure de montage, constituée du collecteur parabolique et du mécanisme de poursuite, est un composant-clé du champ de capteurs cylindro-paraboliques. De nos jours, différentes formes de collecteurs en acier ou aluminium sont disponibles sur le marché. Il existe notamment des formes telles que le tube torque à bras cantilever et les supports et plates-formes terrestres (A. T. Kearney 2010). La qualité du capteur cylindro-parabolique dépend de la précision de sa parabole. Ceci demande une production beaucoup plus pointue que celle des héliostats de tours solaires ou des collecteurs Fresnel. Une légère imprécision risque de compromettre fortement la performance d'une

centrale à capteurs cylindro-paraboliques. De même, il est indispensable d'assurer l'alignement parfait tout le long de la rangée de collecteurs paraboliques, la rigidité, la stabilité de la structure et la résistance à long-terme (FH ISE et al. 2011).

La tendance actuelle est au développement capteurs cylindro-paraboliques de grandes dimensions afin de réduire les coûts. Toutefois, des capteurs de grande taille requièrent une résistance et une rigidité accrues en raison de leur vulnérabilité au vent.

Un mécanisme de suivi à un axe est un autre composant-clé en complément de la structure de montage et qui garantit une réflexion précise sur le receveur. Il se com-

Figure 29 : Formes de capteurs cylindro-paraboliques : boîte torque (gauche), boîte torque à bras cantilever (centre), supports et plateformes terrestres.



Source : Flagsol 2012a (gauche) et A.T. Kearney 2010 (centre et côté droit).

pose de plusieurs inclinomètres ou capteurs incrémentaux ainsi que de commandes hydrauliques standards ou à transmission alimentée par de petits moteurs électriques. Un équipement électrique standard est habituellement utilisé (câbles, par exemple). Même si les commandes hydrauliques ou à transmission ne sont pas spécifiques à la technologie solaire, il est essentiel de garantir une précision extrême de l'ajustement et, ceci, à long-terme dans un environnement désertique.

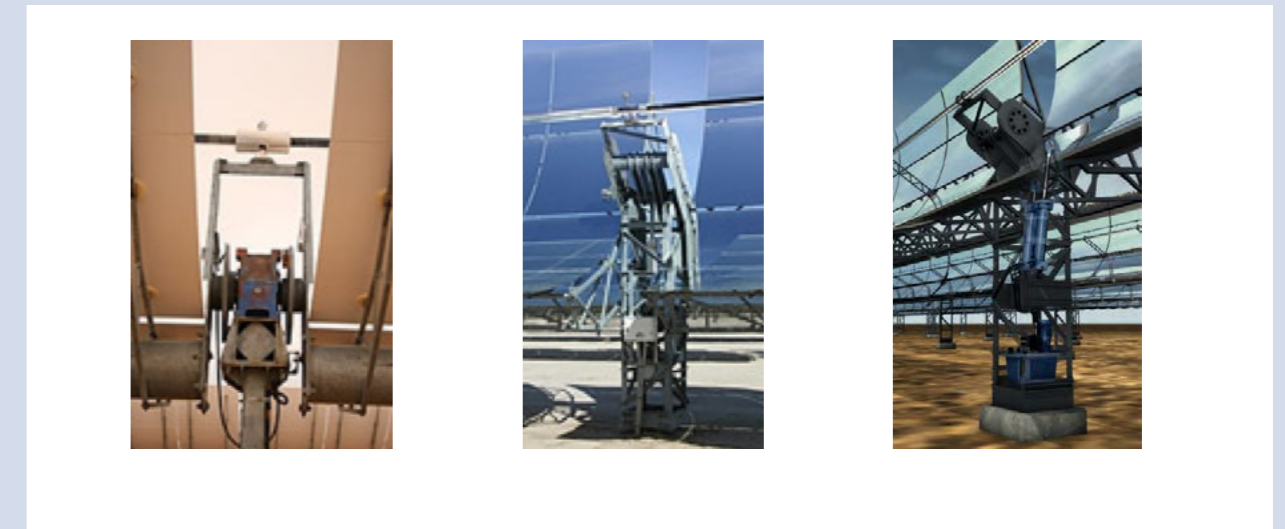
La concurrence entre les producteurs de collecteurs augmente et requiert des concepts de production rationnels en matière de coûts de production. Ainsi, la production de masse et la standardisation des composants deviennent de plus en plus importants. De nouvelles formes de collecteurs constitués d'un minimum de composants ainsi que

d'un assemblage normalisé sont nécessaires. Les étapes de production suivantes sont incluses dans le processus d'assemblage (FH ISE 2012) :

- Processus de galvanisation
- Processus d'emboutissage
- Fabrication de profilés en acier
- Assemblage

Le processus de galvanisation est primordial afin de protéger les structures de l'acier contre la corrosion et est indispensable pour les composants en acier dans les environnements difficiles. L'emboutissage des bras cantilever permet d'obtenir une grande quantité de pièces identiques de manière très précise ainsi qu'une production très rapide. La fabrication de profilés d'acier, utilisés pour former

Figure 30 : Commande à transmission à un axe (gauche) et mécanisme de suivi hydraulique (centre et droite) pour collecteurs cylindro-paraboliques.



Source : NREL 2010 (côté gauche) et Bosch Rexroth 2011 (côté droit).

des tubes en acier, par exemple, et pour l'assemblage, est aujourd'hui privilégiée à la soudure en raison de défauts inévitables au niveau de la précision et des contraintes thermiques. De même, le raccordement par fiches est préféré aux vis et est fourni par les fabricants.

Pour assembler toutes les parties d'un collecteur cylindro-parabolique avec une grande précision, des chaînes de montage avec gabarit d'assemblage sont installées à proximité immédiate des champs solaires. De nouveaux concepts, inspirés de l'industrie automobile, sont en cours de développement pour une fabrication robotisée, parallèlement au modèle d'assemblage par gabarit. Flagsol, par exemple, a déjà développé une chaîne de production hautement automatisée pour son collecteur Heliotrough et peut ainsi assembler les collecteurs beaucoup plus rapidement, tout en s'assurant une moyenne qualitative élevée. Cette chaîne de production hautement automatisée comporte cinq stations synchronisées sur lesquelles les grues sont remplacées par des convoyeurs terrestres

pilotés automatiquement pour assurer le transport des composants entre les différentes stations. Les sous-processus, tels que l'assemblage, le boulonnage, le cimentage et l'équilibrage, seront à l'avenir exécutés par des robots pour atteindre une haute précision, un rendement de qualité et une reproductibilité dans des délais très courts. L'ensemble du processus est comparable à une chaîne de production automobile et garantit la fixation exacte de chaque miroir dans la bonne position et le serrage de chaque joint selon le même couple défini (Flagsol 2010).

Les coûts des nouvelles chaînes de production sont d'environ 10 millions d'euros et nécessitent un résultat annuel de 150 à 200 MW (FH ISE et al. 2011). Pour les nouveaux arrivants sur le marché, l'installation de moyens de production est donc très gourmande en capital et requiert une main d'œuvre moindre mais très qualifiée. Il est attendu que les coûts augmentent avec l'automatisation grandissante des chaînes de production. Le marché offre aux nouveaux arrivants un créneau au niveau des

Exigences de fabrication	
Niveau technologique	Commercialisé
Industries annexes	Industrie de l'acier et métallurgie
Matières premières	Acier et autres métaux
Facteur économique et coûts	
Taille minimum	150-200 MW
Frais d'investissement	10 M d'euros
Structure de l'industrie	
Acteurs principaux	Flagsol (Allemagne), Sener (Espagne), Abengoa (Espagne), Novatec Solar (Allemagne), Bright Source (USA), eSolar (USA)
Facteurs clés du succès	Quantité, qualité
Barrières à l'entrée	Exigences de qualité élevées, durabilité à long terme
Forces	
De bonnes perspectives de débouchés pour les nouvelles formes économiques	Nécessite un capital important savoir-faire technique et expérience exigés/exigences de qualité élevées
Opportunités	
Possibilités d'exportation moyennes à bonnes pour les entreprises tunisiennes	Marché intérieur peu important ; également en-dehors des perspectives tunisiennes de marché limitées dans la région

nouveaux concepts de production et des nouvelles formes de collecteurs.

5.2.2 Miroirs paraboliques

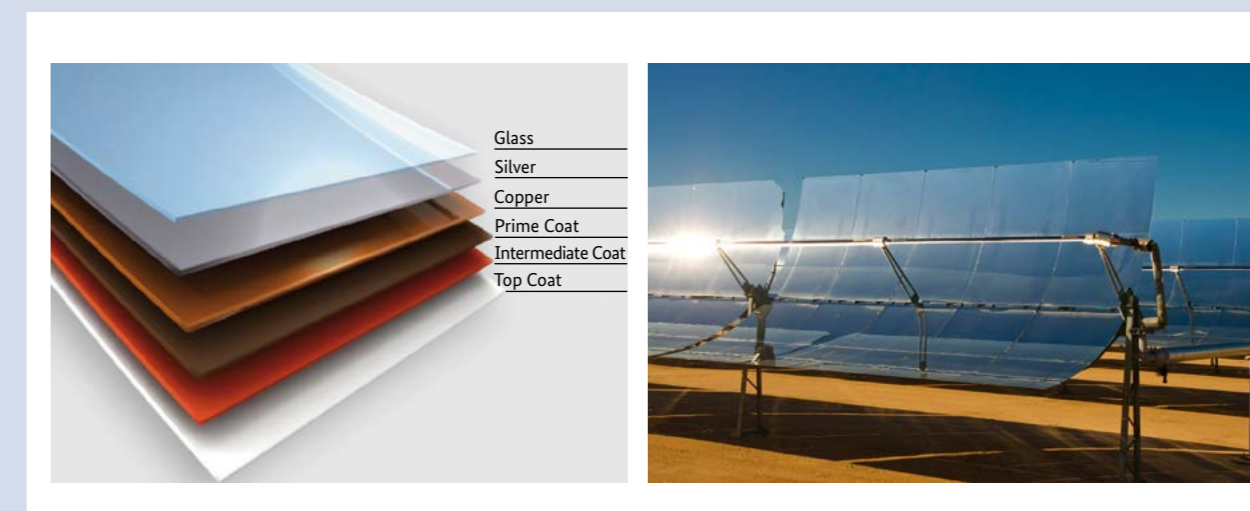
Les miroirs des systèmes cylindro-paraboliques ont une forme de parabole et sont faits de verre à basse teneur en fer et devant fournir une haute réflectivité. Les miroirs de dernière génération fournissent une réflexion d'énergie solaire de plus de 93 % et sont issus d'un processus de production de verre flotté (Saint-Gobain 2012). Une description approfondie du processus de production de verre flotté est disponible dans le rapport de l'institut Fraunhofer (FH ISE et al. 2011).

Afin de garantir une grande efficacité, les miroirs de forme parabolique doivent être courbés de manière précise pour refléter les rayons solaires incidents sur le récepteur avec une précision géométrique. Ceci est primordial puisqu'une déviation minimale suffit à compromettre la performance

économique d'une centrale cylindro-parabolique (Flabeg 2010a). Ainsi, un processus de cintrage est nécessaire. Durant ce processus les feuilles de verre à faible teneur en fer sont chauffées et placées dans des formes de cintrage ultra-précises. À ceci s'ajoute un processus de trempage qui confère aux feuilles de verre une forme parabolique stable. Cette technique, dite de cintrage par gravité, est bien adaptée pour obtenir une grande précision. Pour l'ensemble du processus de cintrage, il est impératif de garantir une reproductibilité importante pour un très grand nombre de miroirs de verre identiques. Afin de transformer les feuilles de verre de forme parabolique en miroirs, le verre est recouvert d'une pellicule d'argent et d'une couche de protection sélective afin de garantir une résistance à long-terme. Enfin, une protection céramique est collée à l'arrière des miroirs (Saint-Gobain 2012).

Il existe une autre méthode de cintrage des miroirs, dite processus de cintrage par emboutissage, mais la plupart des fabricants appliquent le technique de cintrage par gravité.

Figure 31 : Composition des couches du miroir



Source : Flabeg 2012

Photo : © Ir717; dreamstime.com

Exigences de fabrication	
Niveau technologique	Commercialisé
Industries annexes	Industrie verrière
Matières premières	Verre à faible teneur en fer, cuivre, argent, enduit, céramique
Facteur économique et coûts	
Taille minimum	200-400 MW
Frais d'investissement	30 M d'euros

Structure de l'industrie	
Acteurs principaux	Flabeg (Allemagne), Saint-Gobain (France), Rioglass Solar (Espagne)
Facteurs clés du succès	Efforts de R&D importants en collaboration avec les organismes de recherche
Barrières à l'entrée	Exigences de qualité élevées, précision, réflectivité, durabilité à long terme
Forces	Faiblesses
Présence d'une industrie verrière en Tunisie	Nécessite un capital important
	Nécessite un haut niveau de savoir-faire
Opportunités	Menaces
Possibilités d'exportation moyennes à bonnes	Marché intérieur peu important
Equipement clé en main disponible	Des miroirs polymères sont en développement

Un procédé chimique par voie humide combiné à un enrobage sur bande-test est utilisé pour l'argenteur suivie du cuivrage du miroir afin de former la première couche de protection de base. Trois couches supplémentaires complètent le revêtement de protection. L'ensemble du processus est hautement automatisé (Flabeg 2010b).

Une résistance à la corrosion et une grande durabilité doivent être garanties même dans des conditions extrêmes pendant plus de vingt ans, ce qui est un défi majeur pour des enduits spéciaux. Tous les projets commerciaux d'installations cylindro-paraboliques utilisent des miroirs en verre comme matériau réfléchissants. Toutefois, des études portent actuellement sur des matériaux réfléchissants tels que l'aluminium et les films polymères pour évaluer leur durabilité et leur résistance.

Les coûts des nouvelles chaînes de production pour miroirs paraboliques sont d'environ 30 millions d'euros et nécessitent un résultat annuel de 200 à -400 MW (FH ISE et al. 2011). L'ensemble du processus de production est très coûteux en énergie et en règle générale exécuté par le même fabricant.

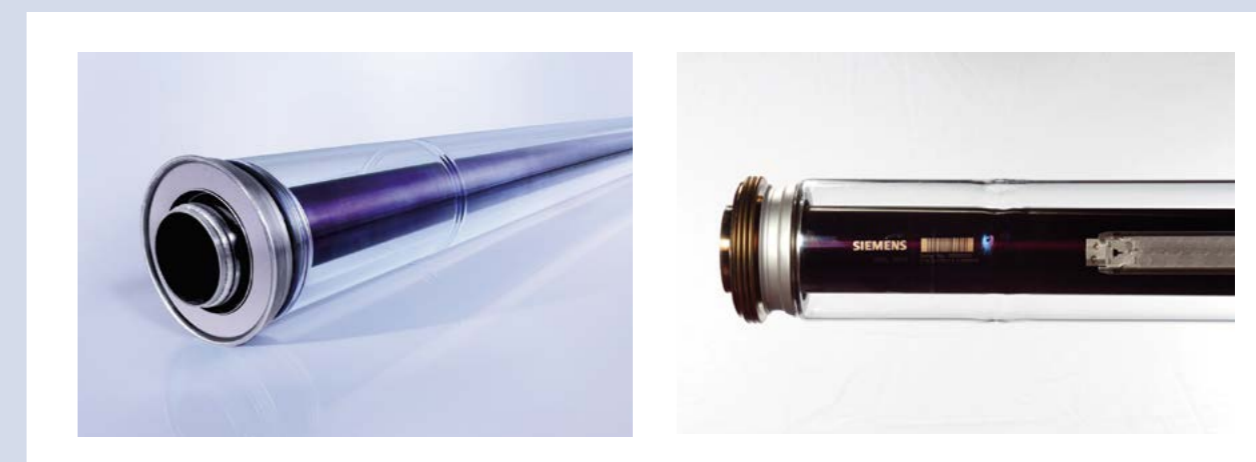
5.2.3 Récepteur cylindro-parabolique

Le récepteur cylindro-parabolique (généralement un tube de plusieurs mètres de long) a une incidence décisive sur l'efficacité globale de la centrale solaire-thermique et est l'un de ses composants les plus complexes. Le récepteur se compose d'un absorbeur spécial en acier à revêtement sélectif (diamètre 70 mm) entouré d'un tube en verre sous

vide à haut niveau de transmissibilité et empêchant la conduction. Un revêtement antireflet de la surface interne et externe du tube en verre réduit les pertes de réflexion. Pour ces récepteurs, une absorbance solaire élevée et une émissivité thermique réduite sont des points cruciaux. Les récepteurs de dernière génération offrent une stabilité thermique à long-terme et ont une absorbance de plus de 95 % permettant des températures d'exploitation de plus de 400C. La production du revêtement sélectif de l'absorbeur en acier est une étape demandant un savoir-faire particulièrement élevé et une très grande technicité. Celle-ci englobe un système de plusieurs couches comprenant trois systèmes de sous-couches et est réalisée uniquement par une poignée de producteur au monde (Schott Solar et Siemens, par exemple). La première couche du tube d'acier se compose d'un métal à basse émissivité thermique qui réduit les pertes de chaleur des radiations infrarouges. Un mélange de céramique et de métal (le cermet) est utilisé pour la seconde couche afin d'augmenter l'absorption. Elle se présente sous la forme de plusieurs couches isolées, en commençant par les fractions à plus forte teneur en métal et terminant par les fractions à plus forte teneur en céramique. Pour minimiser les pertes en matière de réflexion, une troisième couche anti-réflexion se trouve à la surface du tube. Le revêtement anti-réflexion du tube de verre nécessite un processus sol-gel à base d'une solution d'acide modifié. Ici également, une très haute précision au niveau de l'épaisseur de couche tout le long du tube de verre est requise (FH ISE et al. 2011).

Pour résoudre le problème lié aux différences de dilatation thermique des tubes en métal et en verre et éviter la

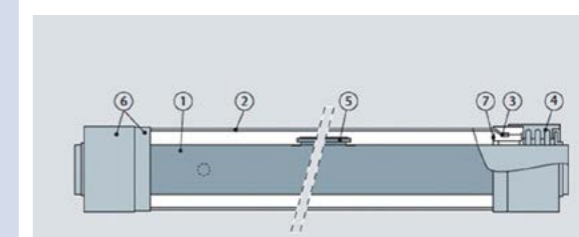
Figure 32 : Formes de récepteurs cylindro-paraboliques : Schott Solar PTR 70 (côté gauche) et Siemens UVAC 2010 (côté droit)



rupture du scellement entre le verre et le métal, du verre borosilicate est employé afin d'obtenir les caractéristiques du métal. En outre, le dessous des tubes est protégé par des zones tampons (Schott 2011).

Les coûts des nouvelles chaînes de production sont d'environ 25 millions d'euros et nécessitent un résultat annuel de 200 MW (FH ISE et al. 2011). L'ensemble du processus est hautement automatisé et un savoir-faire de haute technicité est requis.

Figure 33 : Composants d'un récepteur cylindro-parabolique



Components of the Siemens UVAC 2010

1. Coated stainless steel absorber tube
2. Coated glass-sleeve enclosure
3. Glass-to-metal joint
4. Bellows
5. Hydrogen and barium getters
6. External shields
7. Internal shield

Source : Siemens 2010

Exigences de fabrication	
Niveau technologique	Commercialisé
Industries annexes	sidérurgie et industrie verrière
Matières premières	acier inoxydable, autres métaux, verre borosilicate, enduits
Facteur économique et coûts	
Taille minimum	200 MW
Frais d'investissement	25 M d'euros

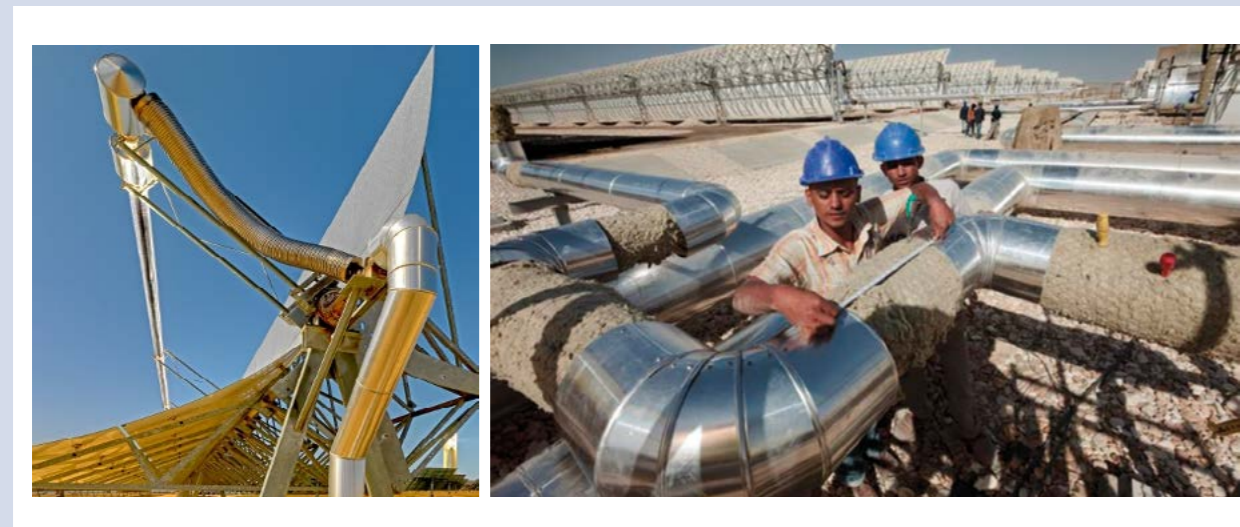
Structure de l'industrie	
Acteurs principaux	Siemens (Allemagne), Schott Solar (Allemagne)
Facteurs clés du succès	Importants efforts de R&D, fusions et acquisitions
Barrières à l'entrée	Exigences de qualité élevées, concurrence internationale accrue
Forces	Faiblesses
Présence de l'industrie sidérurgique et verrière en Tunisie	Nécessite un capital important
	Nécessite un savoir-faire important
Opportunités	Menaces
Possibilités d'exportation moyennes à bonnes pour les entreprises tunisiennes	Développement du marché incertain
Système cylindro-parabolique viable	Part décroissante des projets de type cylindro-parabolique en cours

5.2.4 Système HFT

Les composants essentiels d'un système cylindro-parabolique HTF sont le fluide HTF, le réseau de tuyauterie, les pompes, l'échangeur de chaleur et les matières isolantes. Actuellement, l'huile de synthèse est le fluide utilisé pour les centrales cylindro-paraboliques et peut être chauffée jusqu'à 390 C°. L'huile de synthèse est toxique et composée à 73,5 % d'oxyde de diphenyle et de 26,5 % de biphenyle. Elle présente une grande stabilité à la chaleur bien que la surchauffe (au-delà de 400 C°) doit être évitée car celle-ci risque d'entraîner la formation de dépôts solides (Solutia 2008).

Pour le transport du fluide HTF, des pompes hydrauliques supportant ces températures élevées et garantissant la viscosité sur une longue distance sont nécessaires. Un réseau de tuyauterie en tubes d'acier est nécessaire au transport du fluide actif chauffé entre le champ solaire et l'échangeur de chaleur. Des matériaux isolants autour des tuyaux sont également requis pour minimiser la déperdition de chaleur. Comme les collecteurs cylindro-paraboliques sont en mouvement, des matériaux isolants ignifuges sont utilisés pour les connecteurs étant donné que l'huile de synthèse peut s'enflammer au contact de l'air (FH ISE 2012).

Figure 34 : Réseau de tuyauterie à l'intérieur du champ solaire



Source : Abengoa Solar 2011 (tuyaux flexibles du côté gauche) et Flagsol 2012b (côté droit).

Exigences de fabrication	
Niveau technologique	Commercialisé
Industries annexes	Industrie chimique
Matières premières	Huile de synthèse (oxyde de diphenyle et biphenyle)
Facteur économique et coûts	
Taille minimum	Non communiqué
Frais d'investissement	Non communiqué
Structure de l'industrie	
Acteurs principaux	Solutia (USA), BASF (Allemagne), Linde (Allemagne) etc.
Facteurs clés du succès	R&D, économies d'échelle
Barrières à l'entrée	Frais d'investissement élevés, concurrence internationale accrue
Forces	Faiblesses
Présence d'une industrie chimique en Tunisie	Nécessite un capital important
	Nécessite un savoir-faire et des R&D importants
	pas de technologies clé en main disponible
Opportunités	Menaces
Produit d'export	La recherche sur de nouveaux fluides de transfert de chaleur est en cours
	concurrence internationale accrue

5.2.5 Bloc de puissance

Le bloc de puissance est une partie importante du CSP devant fournir de l'énergie de manière fiable et efficace. Les composants du bloc de puissance peuvent être subdivisés de la manière suivante :

- HTF/générateur de vapeur (préchauffage, évaporateur, surchauffeur)
- Réseau de tuyauterie en acier et cuves
- Pompes de recirculation
- Turbine à vapeur
- Condensateur
- Générateur
- Connexion électrique (câblage, transformateurs, poste HT, systèmes de contrôle de la centrale, commutateur, etc.)

La plupart de ces éléments sont des composants standards utilisés dans les stations d'énergie thermique conventionnelles et, de ce fait, non spécifiques. Les blocs de puissance destinés à la CSP sont remaniés afin d'intégrer le champ solaire et le système HTF. L'interface entre le champ solaire et le bloc de puissance est optimisée ainsi que la flexibilité d'exploitation qui permet une mise en marche et un arrêt quotidiens. Les systèmes de contrôle des blocs de puissance ont été étendus afin d'intégrer l'exploitation de l'ensemble de la centrale CSP. Une description approfondie de cette optimisation est proposée par Siemens 2011.

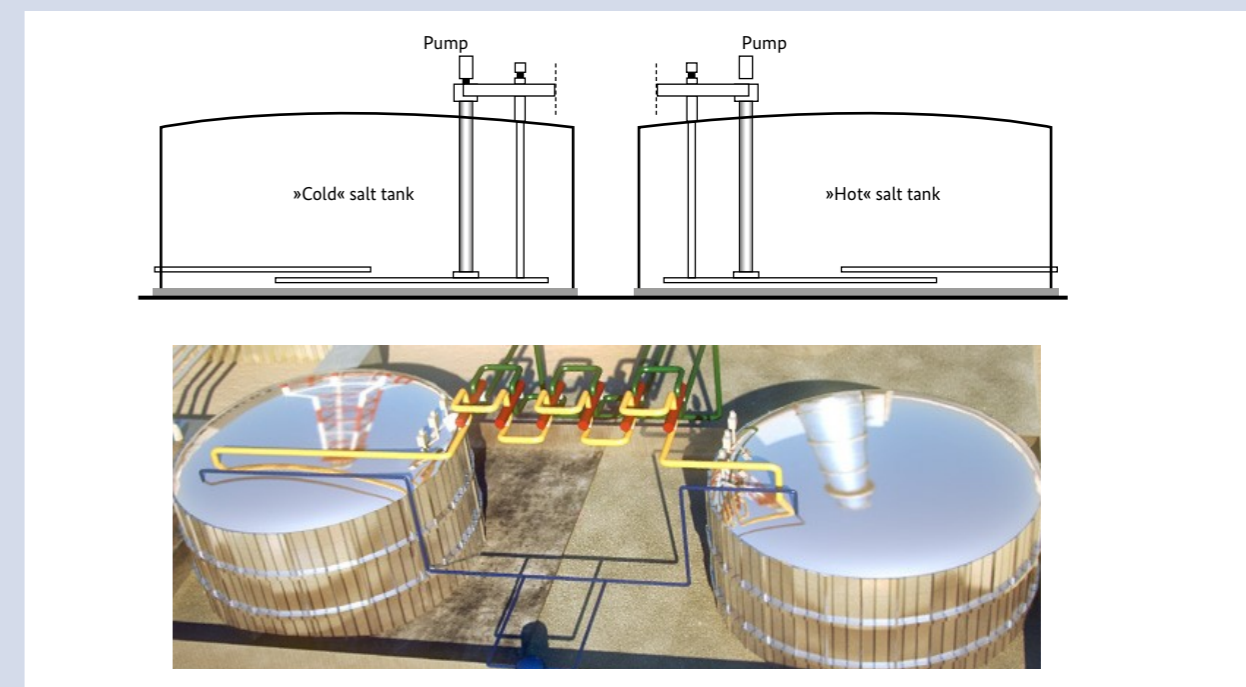
Exigences de fabrication	
Niveau technologique	Commercialisé
Industries annexes	Industrie électronique
Matières premières	Acier inoxydable, métaux, équipement électrique, aluminium, cuivre, polymères
Facteur économique et coûts	
Taille minimum	Non communiqué
Frais d'investissement	Non communiqué
Structure de l'industrie	
Acteurs principaux	Siemens (Allemagne), GE Power (USA), ABB (Suisse), Alstom (France)
Facteurs clés du succès	Orientation à l'export, importants efforts de R&D, quantités
Barrières à l'entrée	Nécessite un très haut niveau de savoir-faire, concurrence internationale accrue
Forces	Faiblesses
Présence d'une industrie électronique en Tunisie	Nécessite un haut niveau de savoir-faire
Opportunités	Menaces
Risque moindre du point de vue de la demande sur le marché	Concurrence internationale accrue
	concurrence internationale accrue

5.2.6 Système de stockage

Différents systèmes de stockage (béton, sels fondus, céramique et matériau à changement de phase) sont en cours d'évaluation. Seuls des systèmes de stockage à deux réservoirs de sels fondus sont actuellement disponibles sur le marché pour des centrales CSP à grande échelle. Un stockage à deux réservoirs se compose de manière générale de deux grands réservoirs cylindriques (chaud et froid) de plusieurs mètres de hauteur et de diamètre (16 m x 19 m, par exemple), du matériau de stockage (sel de nitrate à 60% de NaNO_3 et de 40% de KNO_3), d'un échangeur de chaleur HTF et sels fondus, d'un réseau de tuyauterie, des pompes et d'isolation.

Le sel fondu est pompé du réservoir froid vers un HTF de haute technicité et l'échangeur de chaleur où il est chauffé. Le sel chauffé est pompé vers le réservoir chaud où il est stocké jusqu'à ce que la chaleur soit libérée à nouveau vers le circuit de vapeur en cas de besoin. Le réservoir de stockage froid en acier carbone fonctionne à 288°C tandis que le réservoir de stockage chaud en acier inoxydable fonctionne jusqu'à 565°C. Pour réduire la déperdition de chaleur, les deux réservoirs sont isolés par l'extérieur avec des matériaux adéquats (Pacheco 2011).

Figure 35 : Schéma d'un système de stockage thermique



Source : Flagsol 2012c (dessus) et Bright Source 2012 (dessus).

Exigences de fabrication	
Niveau technologique	En démonstration voire commercialisé
Industries annexes	Industrie sidérurgique, électronique et chimique
Matières premières	Acier inoxydable, métaux, matériaux isolants, sels fondus
Facteur économique et coûts	
Taille minimum	Non communiqué
Frais d'investissement	Non communiqué
Structure de l'industrie	
Acteurs principaux	Gehrlicher (Allemagne), Schüco (Allemagne), Schletter (Allemagne)
Facteurs clés du succès	R&D, orientation à l'export
Barrières à l'entrée	Nécessite un haut niveau de savoir-faire, stade précoce du développement
Forces	Faiblesses
Présence de l'industrie sidérurgique, électronique et chimique en Tunisie	Nécessite un haut niveau de savoir-faire (durabilité à long-terme en milieu désertique)
Opportunités	Menaces
De bonne perspectives de débouchés, demande à la hausse	De nouveaux systèmes de stockage sont en développement
Possibilités modérées à l'export	Très peu d'entreprises spécialisées

Les systèmes de stockage thermique sont coûteux et très complexes. Une très haute précision est nécessaire au niveau des températures d'exploitation pour éviter la solidification des sels (déjà à 200 C). Les pompes de circulation sont positionnées à la verticale dans chaque réservoir (de haut en bas) et requièrent une technique de pointe étant donné qu'elles doivent être en mesure de supporter des températures élevées, être dotées d'une protection contre l'inversion du sens de rotation, d'un variateur de vitesse, de paliers radiaux à immersion verticale, d'arbres de pompe de grandes taille, être capables de faire circuler une chaleur sèche ainsi que d'être ajustées dans le sens axial en raison de la dilatation thermique (Schwartz 2010).

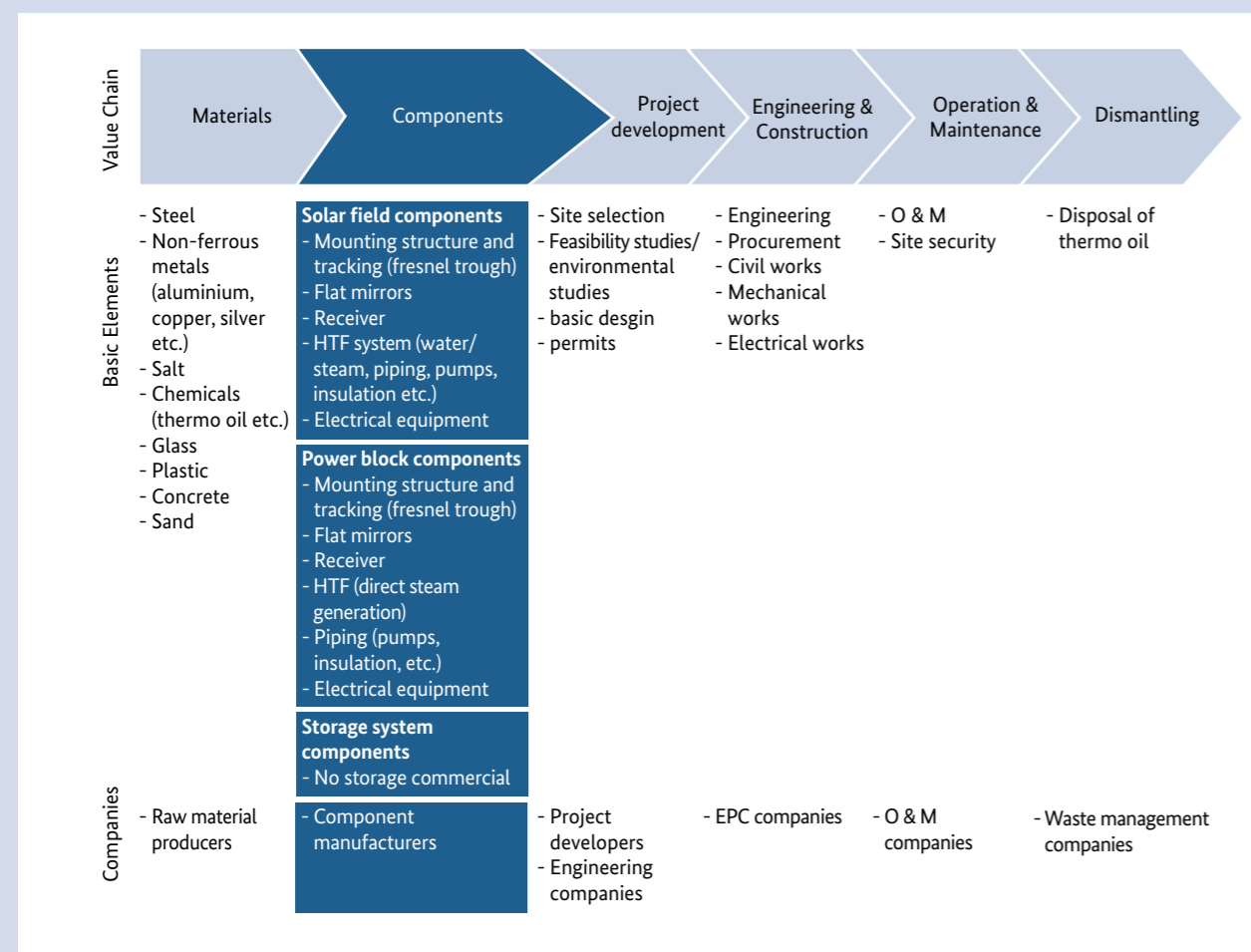
5.3 Composants des systèmes linéaires Fresnel

L'analyse des composants d'un système linéaire Fresnel se concentre sur l'utilisation directe de la vapeur générée.

5.3.1 Structure de montage et système de suivi solaire

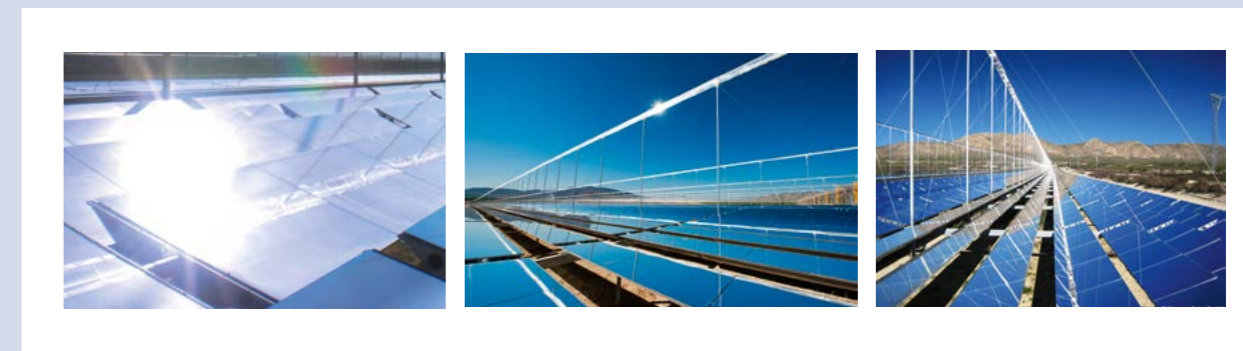
La structure de montage des collecteurs linéaires Fresnel est moins complexe et coûteuse que les capteurs cylindro-paraboliques puisque la structure est destinée à des miroirs plats. Les miroirs montés ne sont pas complètement plats mais disposent d'une légère forme incurvée grâce au positionnement et de la fixation sur profilés d'acier ou d'aluminium, apportant la stabilité nécessaire dans le cas de lignes multiples. La longueur de ces lignes de miroirs peut varier de 224 m (5 modules) à 985 m (22 modules) (Novatec 2012a). Enfin, ces composants sont montés sur un système en acier (poutrelles horizontales en acier, par exemple) au niveau du sol dans le but de concentrer l'énergie solaire sur le récepteur situé au dessus. Les profilés pour miroirs tout comme le système en acier à la base de la structure de montage sont des composants standards et disponibles tels quels sur le marché. Le récepteur

Figure 36 : Aperçu des composants CSP d'un linéaire Fresnel



Source : documentation interne

Figure 37 : Structure de montage d'un linéaire Fresnel



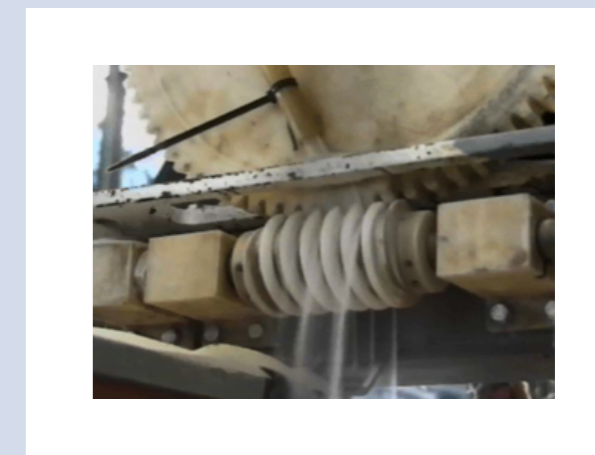
Source : Novatec Solar 2012

fixe d'un système Fresnel est installé à plusieurs mètres de hauteur sur des poutres métalliques verticales qui garantissent la stabilité contre le vent.

Une fois que les profilés des miroirs sont mis en place correctement, le mouvement de tous les profils de miroirs est identique et peut être couplé mécaniquement. Ceci simplifie le mécanisme de poursuite des linéaires Fresnel à un axe puisque des lignes de miroirs multiples sont pivotées conjointement et commandées par un moteur électrique standard. Une vis sans fin est une solution courante pour le couplage mécanique. Ce composant a déjà subi des tests intensifs et est bien adapté à des conditions désertiques extrêmes car le sable peut simplement passer à travers (Häberle et al. 2002). Dans un autre cas de figure, chaque miroir peut bénéficier d'un entraînement propre.

La structure de montage des linéaires Fresnel fait déjà l'objet d'une production en série utilisant des composants et techniques de fabrication standardisés. L'utilisation de chaînes de production entièrement automatisées et

Figure 38 : Vis sans fin pour le couplage mécanique



Source : Häberle et al. 2002.

robotisées augmente le niveau des investissements. Néanmoins, de belles perspectives sont en vue pour la fabrication locale et les nouvelles formes de structures.

Exigences de fabrication	
Niveau technologique	En démonstration voire commercialisé
Industries annexes	Industrie sidérurgique
Matières premières	Acier et autres métaux
Facteur économique et coûts	
Taille minimum	Non communiqué
Frais d'investissement	Non communiqué

Structure de l'industrie	
Acteurs principaux	Novatec Solar (Allemagne)
Facteurs clés du succès	Economies d'échelle, qualité
Barrières à l'entrée	Nécessite un haut niveau de savoir-faire, durabilité à long-terme
Forces	Faiblesses
Technologies CSP prometteuses en raison de faibles coûts d'investissement	Ligne de production nécessitant un fort capital Exigences de qualité élevées
Opportunités	Menaces
Peu de fabricants sur le marché	Pas de marché intérieur et peu de projets en cours

5.3.2 Miroirs pour système linéaire Fresnel

Les systèmes de miroirs Fresnel n'ont qu'une faible courbure obtenue par le positionnement des miroirs et non par cintrage. En effet, les capteurs linéaires de type Fresnel utilisent des miroirs plats à la place de miroirs courbés. Tout comme pour les miroirs paraboliques, l'emploi de verre à basse teneur en fer est indispensable pour obtenir une haute réflectivité. Une résistance à la corrosion et une grande durabilité sont d'une grande importance pour les miroirs linéaires Fresnel doivent être garanties pendant

plus de vingt ans. Ainsi, les exigences de qualité et de durabilité sont comparables à celles des miroirs cylindro-paraboliques. À la différence des autres systèmes CSP, les systèmes linéaires Fresnel utilisent un second étage de miroirs en verre ou aluminium dans le réflecteur. La production de miroir plat est identique à celle des miroirs courbés, à l'exception du processus de cintrage. Le processus de production est néanmoins coûteux du point de vue énergétique et économique et l'investissement pour les infrastructures est d'environ 26 millions d'euros. Un résultat annuel d'environ 200 MW est requis (FH ISE et al. 2011).

Exigences de fabrication	
Niveau technologique	Commercialisé
Industries annexes	Industrie verrière
Matières premières	Verre à faible teneur en fer, cuivre, argent, enduits, céramique
Facteur économique et coûts	
Taille minimum	200-400 MW
Frais d'investissement	26 M d'euros
Structure de l'industrie	
Acteurs principaux	Flabeg (Allemagne), Saint-Gobain (France), Rioglass Solar (Espagne)
Facteurs clés du succès	Efforts de R&D importants en collaboration avec les organismes de recherche
Barrières à l'entrée	Exigences de qualité élevées, réflectivité, durabilité à long terme

Forces	Faiblesses
Technologie rodée et mature	Nécessite un haut niveau de savoir-faire
Présence d'une industrie verrière en Tunisie	Nécessite un capital important (chaîne de production hautement automatisée)
Opportunités	Menaces
Possibilités d'exportation moyennes à bonnes	Marché intérieur peu important Des miroirs polymères sont en développement

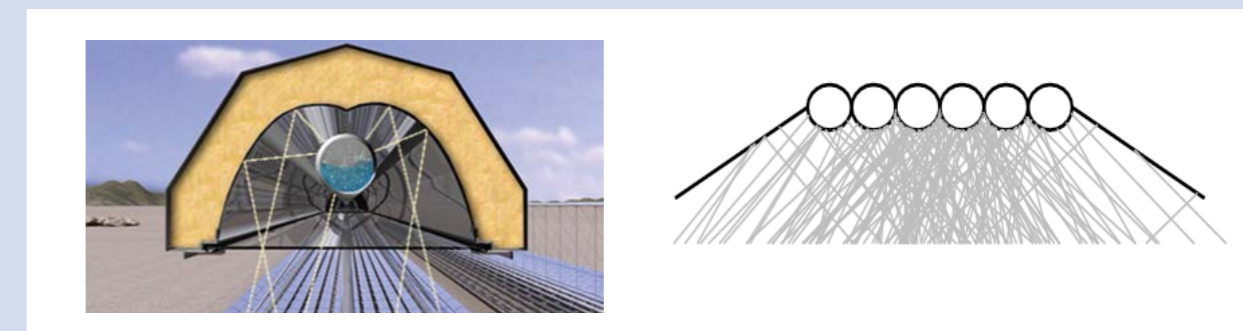
5.3.3 Récepteur pour système linéaire Fresnel

Il existe différentes formes de récepteurs Fresnel (FH ISE 2012) : Récepteurs multitubes et récepteurs à tube unique.

En règle générale, un récepteur linéaire Fresnel se compose d'un tube absorbeur en acier enduit contenant le fluide HTF, d'un récepteur de second niveau réfléchissant tous les rayons provenant du premier récepteur Fresnel sur le tube absorbeur et d'une plaque de verre couvrant le deuxième récepteur. Les tubes absorbeurs d'un système Fresnel ont habituellement un diamètre de 6 à 19 cm et sont donc plus larges que ceux d'un système cylindro-parabolique. En raison de la génération de vapeur directe, le tube absorbeur en acier doit pouvoir résister à une pression de service de plus de 100 bar (Morin et al. 2006).

Les absorbeurs en acier disponibles sur le marché sont recouverts de couches sélectives (chrome noir ou cermet pulvérisé) leur conférant une longue durabilité. Le chrome noir reste stable jusqu'à 300 C° tandis que le cermet pulvérisé résiste à des températures bien supérieures allant jusqu'à 500 C° (FH ISE 2012). Le réflecteur du second niveau, en forme de parabole constituée principalement de feuilles d'aluminium, concentre les rayons provenant du réflecteur Fresnel inférieur sur le tube absorbeur, ce qui élargi la cible du réflecteur Fresnel primaire. Le récepteur du second étage utilise également une isolation opaque à l'arrière afin de minimiser les pertes thermiques. Les pertes de chaleur à l'avant sont évitées grâce à un panneau de verre permettant de fermer l'espace. Afin de réduire l'ombrage des miroirs primaires, la forme des réflecteurs secondaires doit être aussi fine que possible.

Figure 39 : Section transversale d'un récepteur à tube unique de système linéaire Fresnel (à gauche) et schéma d'un récepteur multitube (à droite).



Source : Novatec Solar 2012a et Mertins 2009.

Exigences de fabrication	
Niveau technologique	Commercialisé
Industries annexes	Industrie sidérurgique et du verre
Matières premières	Acier et autres métaux, revêtement
Facteur économique et coûts	
Taille minimum	Non communiqué
Frais d'investissement	Non communiqué
Structure de l'industrie	
Acteurs principaux	Siemens (Allemagne), Schott Solar (Allemagne), Archimede Solar (Italie)
Facteurs clés du succès	Intensive R&D, mergers and acquisitions
Barrières à l'entrée	Nécessite un haut niveau de savoir-faire, forte concurrence internationale
Forces	
Moins de savoir-faire par rapport aux récepteurs PT	Exigences de qualité élevées
Opportunités	
Peu de fabricants sur le marché	Pas de marché intérieur et peu de projets en cours
Faiblesses	
Menaces	

5.3.4 Système HFT

Les systèmes linéaires Fresnel actuellement sur le marché utilisent de l'eau et génèrent directement de la vapeur. Ainsi, l'utilisation d'huile de synthèse ou de sels fondus est superflue. Par rapport à l'huile de synthèse, le risque d'inflammation ou de dommages pour l'environnement n'est pas encouru. Par conséquent, aucune isolation ignifuge n'est requise. De plus, il n'est pas nécessaire d'employer des pompes. Toutefois, des pressions de service très élevées et l'absence de solution de stockage commerciale sont à ce jour les principaux inconvénients. L'emploi de sels fondus comme HTF est actuellement à l'étude. En raison de la génération de vapeur directe, la tuyauterie en acier utilisée pour le système HTF doit pouvoir résister à une pression de service de plus de 100 bar et nécessite une isolation pour éviter la déperdition de chaleur.

5.3.5 Bloc de puissance

Les composants du bloc de puissance CSP sont presque les mêmes pour toutes les technologies CSP. Toutefois, contrairement aux capteurs cylindro-paraboliques, les

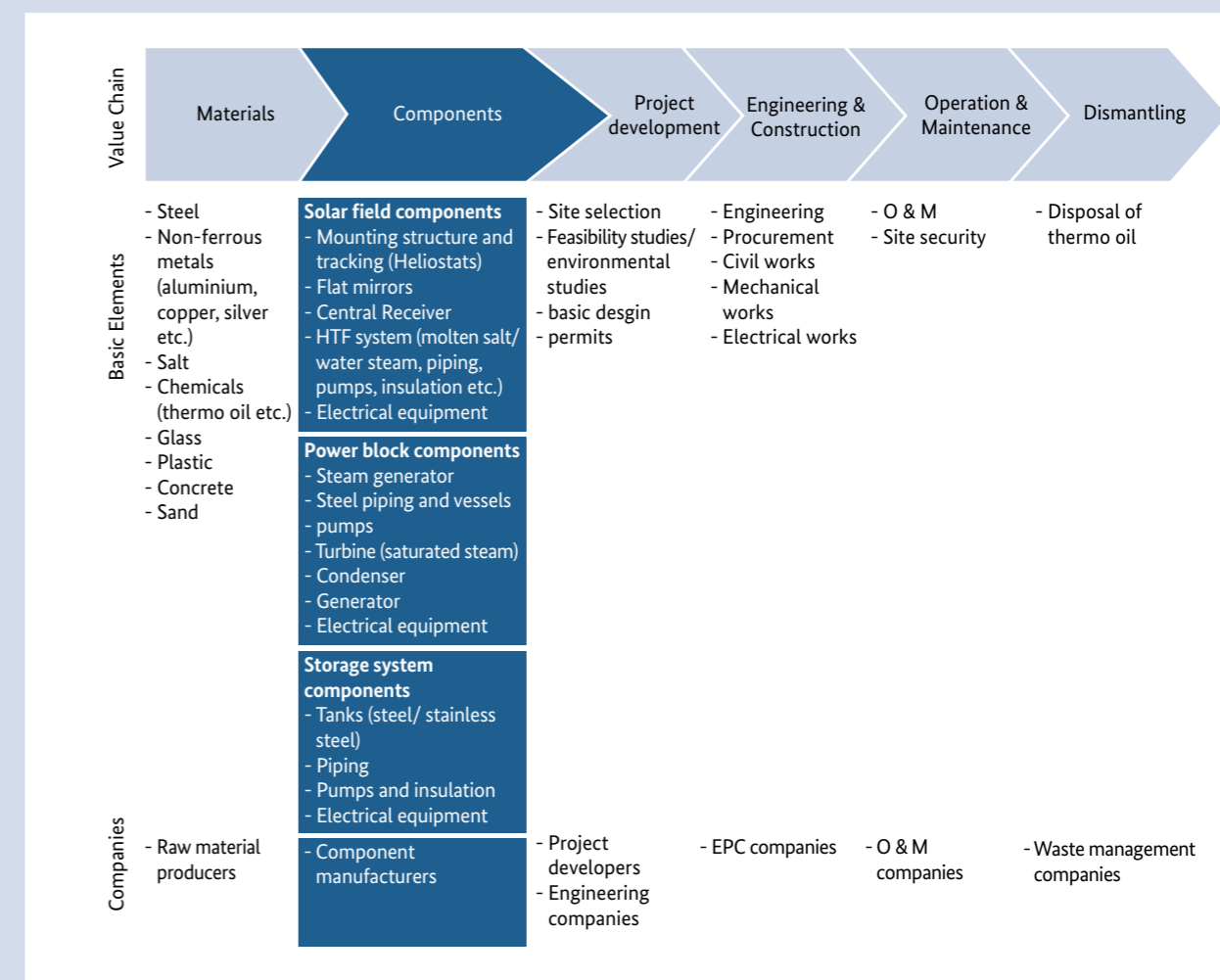
systèmes linéaires Fresnel génèrent des températures de service bien plus élevées et utilisent directement la vapeur générée. De ce fait, des turbines à vapeur utilisant la vapeur saturée sont requises dans le bloc de puissance. De surcroît, grâce à la génération directe de vapeur, un générateur HTF/vapeur n'est pas nécessaire pour le bloc de puissance des systèmes linéaires Fresnel.

5.3.6 Système de stockage

Un système Fresnel standard utilise directement la génération de vapeur. Aucune solution de stockage n'est donc actuellement disponible sur le marché et ceci représente un inconvénient majeur. L'emploi de sels fondus comme fluide HTF dans les systèmes Fresnel est actuellement à l'étude. Les systèmes de stockage pour sels fondus devraient être identiques à ceux des capteurs cylindro-paraboliques bien que des échangeurs de chaleur HFT/sels fondus ne soient pas nécessaires dans le cas présent.

5.4 Composants des systèmes à tour solaire (récepteur central)

Figure 40 : Aperçu des composants d'une tour solaire



Source : documentation interne

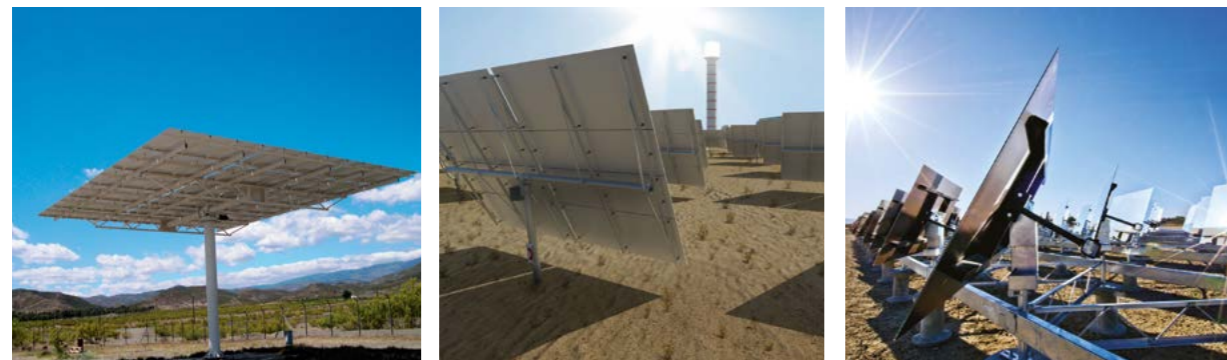
5.4.1 Structure de montage et système de poursuite solaire

Les structures de montage des tours solaires sont appelées héliostats. Plusieurs milliers d'héliostats utilisant des miroirs plats sont installés sur le champ solaire. La forme d'un héliostat est fortement liée à sa taille. Des surfaces de miroirs de plus en plus grandes nécessitent des structures de montages plus stables et solides pour garantir rigidité et stabilité contre les forces externes (les charges de vent, par exemple).

Les héliostats à deux axes se composent d'un pilier vertical en acier monté sur une base et une structure métallique lui conférant la stabilité nécessaire au montage de miroirs

plats. La structure métallique pour les miroirs est montée sur un axe horizontal lui-même fixé sur le pilier vertical par le biais d'un dispositif mobile à l'intersection permettant de poursuivre les mouvements du soleil. Cet assemblage de composants doit avoir une très grande stabilité pour pouvoir réfléchir les rayons solaires avec précision vers le récepteur monté sur une tour et ceci, même en cas de fort vent. Une précision accrue est significative et indispensable puisque des déviations même minimales compromettent la précision de réflexion des héliostats situés à plus longue distance. Ainsi un mécanisme de poursuite fiable et doté d'une grande précision de pointage est d'une importance primordiale. Les capacités de poursuite du soleil doivent même être supérieures pour les panneaux plus grands et les surfaces de miroirs plus

Figure 41 : Échantillons de différentes formes d'héliostats



Source : SENER Group 2013 (gauche), Bright Source 2012 (centre) et eSolar 2011 (droite).

lourdes. Les mécanismes de poursuite courants ont une précision de pointage de plus de 0,1° (Sener 2012a). En règle générale, les fabricants de systèmes à tour solaire

fournissent également les systèmes de poursuite solaire pour héliostats.

Figure 42 : Entraînement à deux axes (système de poursuite solaire)



Source : SENER Group 2013 et Terresol Energy 2010

Exigences de fabrication	
Niveau technologique	Commercialisé
Industries annexes	Industrie sidérurgique
Matières premières	Acier et autres métaux
Facteur économique et coûts	
Taille minimum	Non communiqué
Frais d'investissement	Non communiqué

Structure de l'industrie	
Acteurs principaux	Bright Source (USA), eSolar (USA), Abengoa (Spain)
Facteurs clés du succès	Échelle, qualité
Barrières à l'entrée	Nécessite un haut niveau de savoir-faire, longue durabilité
Forces	Faiblesses
Bonnes perspectives de marché pour les nouveaux modèles rentables	Exigences de qualité élevées
Opportunités	Menaces
Part croissante de projets dans en portefeuille à travers le monde	Pas de marché intérieur

5.4.2 Miroirs (héliostats)

Les héliostats des tours solaires utilisent des miroirs plats en verre à faible teneur en fer. Les exigences de qualité sont élevées et similaires aux systèmes cylindro-paraboliques et linéaires Fresnel car une résistance à la corrosion et une grande durabilité doivent être garanties pendant plus de vingt ans. En fonction de la forme de l'héliostat, les miroirs peuvent s'étendre sur de très grandes surfaces allant jusqu'à 120m² bien que des formes beaucoup plus petites soient disponibles.

Les miroirs plats pour linéaires Fresnel et héliostats sont identiques et ont, par conséquent, les même processus de production et exigences de qualité. Les coûts des nouvelles chaînes de production sont d'environ 26 millions d'euros

et nécessitent un résultat annuel de 200 MW (FH ISE et al. 2011).

5.4.3 Récepteur central

Les récepteurs centraux sont encore à un stade de développement précoce puisque le marché n'est pas encore très demandeur à l'heure actuelle. De bonnes opportunités sont toutefois attendues dans le futur en raison de plusieurs projets en préparation. Différentes formes de récepteurs sont en développement et, à ce jour, seuls les récepteurs sous forme de tubes sont implantés dans des projets de CSP à tours solaires de plus grande envergure. Ce type de récepteur atteint des températures de service de plus de 500 C° en utilisant une forme standard de chaudière usuellement disponible dans le commerce.

Figure 43 : Miroirs d'héliostats avec une surface de jusqu'à 120 m²



Source : Bright Source et DLR (CC-BY 3.0)

Les récepteurs centraux sont produits sur des chaînes de production moins automatisées. Un système à tour solaire peut fournir des températures de plus de 1 000 °C et de nouveaux types de récepteurs sont en cours de développement et en phase de test. Par rapport aux technologies actuelles, ces nouveaux types de récepteurs sont basés sur des formes radicalement différentes.

Le récepteur central se compose de panneaux faits de tubes parallèles remplis d'eau ou de vapeur. Les composants essentiels sont des tambours en acier, des panneaux récepteurs, des tuyaux reliés entre eux, l'isolation ainsi que du béton ou de l'acier pour la tour. Le tambour à vapeur du générateur est conçu en fonction de normes spécifiques pour les chaudières ouvertes. Les panneaux récepteurs semi-circulaires sont réalisés en un alliage spécial afin de résister à des chaleurs extrêmes. À l'intérieur du tambour l'eau s'évapore en créant de la vapeur saturée. Un système spécial d'injection de la vapeur assure la sécurité de l'ensemble et en raison de la circulation naturelle, aucune pompe n'est requise. Par le biais de l'installation d'une série additionnelle de panneaux récepteurs, il est même possible de produire de la vapeur surchauffée (Aalborg 2011). Tous les composants doivent résister à des hautes pressions de service et une durabilité à long-terme (> à 25 ans) ainsi qu'une haute qualité sont requises.

Les nouvelles générations de récepteurs sont des récepteurs volumétriques utilisant des absorbeurs volumétriques poreux en céramique. Toutefois, la stabilité à des hautes températures ainsi que l'intégration dans des projets commerciaux font encore défaut.

Figure 44 : Récepteur central (chaudière)



Source : Bright Source

Figure 45 : Forme d'un récepteur



Source : Aalborg (2011)

Exigences de fabrication	
Niveau technologique	Commercialisé
Industries annexes	Sidérurgie et industrie des chaudières
Matières premières	Acier
Facteur économique et coûts	
Taille minimum	Non communiqué
Frais d'investissement	Non communiqué
Structure de l'industrie	
Acteurs principaux	Aalborg (Danemark)
Facteurs clés du succès	Produit de niche
Barrières à l'entrée	Normes spécifiques pour chaudières ouvertes
Forces	Faiblesses
Présence de l'industrie sidérurgique et de chaudières en Tunisie	Nécessite un haut niveau de savoir-faire
Synergies potentielles avec les structures de montage PV et STHW	
Opportunités	Menaces
Part croissante des projets en préparation	R&D des nouvelles technologies d'absorbeur en cours
Produit de niche/orientation à l'export, production semi-automatisée	
ST devient viable	

5.4.4 Système HFT

Les systèmes à tour solaire sont actuellement basés sur un circuit à eau/vapeur directe ou utilisent des sels fondus en tant que HTF. De ce fait, aucune huile de synthèse toxique n'est requise et les risques d'incendie et des dommages pour l'environnement sont réduits.

Les récepteurs centraux étant généralement situés à proximité du bloc de puissance, le système nécessite un réseau de tuyauterie moindre que dans le cas de capteurs cylindro-paraboliques ou Fresnel puisqu'aucun HTF ne circule dans l'étendue du champ solaire. Les tuyaux en acier doivent résister à des hautes pressions de service et au fluide HTF. Afin d'empêcher la perte de chaleur, le système de tuyauterie doit être isolé.

5.4.5 Bloc de puissance

Les composants du bloc de puissance sont pratiquement identiques pour toutes les technologies CSP. Comme les systèmes linéaires Fresnel, les récepteurs centraux atteignent des températures de service plus élevées et produisent de la vapeur saturée ou surchauffée pouvant être appliquée à une turbine à vapeur. La prochaine génération de récepteurs, capable d'atteindre des températures de service de plus de 1000 C°, va permettre l'utilisation de turbines à gaz à la place des turbines à vapeur. Il est même possible de coupler des systèmes à circuit combiné avec ce type de récepteurs.

5.4.6 Système de stockage

À ce jour, peu de systèmes à tour solaire de grande envergure et à vocation commerciale utilisant un système de stockage à sels fondus ont été développés. Les composants

Exigences de fabrication	
Niveau technologique	A l'essai voire commercialisé
Industries annexes	Industrie sidérurgique, électronique et chimique
Matières premières	Acier inoxydable, métaux, matériaux isolants, sels fondus
Facteur économique et coûts	
Taille minimum	Non communiqué
Frais d'investissement	Non communiqué
Structure de l'industrie	
Acteurs principaux	Gehrlicher (Allemagne), Schüco (Allemagne), Schletter (Allemagne)
Facteurs clés du succès	R&D, orientation à l'export
Barrières à l'entrée	Nécessite un haut niveau de savoir-faire, stade précoce du développement
Forces	Faiblesses
Présence de l'industrie sidérurgique, électronique et chimique en Tunisie	Nécessite un haut niveau de savoir-faire (durabilité à long-terme en milieu désertique)
Opportunités	Menaces
De bonnes perspectives de débouchés, demande à la hausse	De nouveaux systèmes de stockage sont en développement
Possibilités modérées à l'export	Très peu d'entreprises spécialisées Augmentation du coût des matériaux

sont identiques à ceux des systèmes de stockage à sels fondus pour capteurs cylindro-paraboliques bien que des échangeurs de chaleur huile synthétique/sels fondus ne soient pas nécessaires, l'huile de synthèse n'étant pas employée.

5.5 Développement du projet

Pour toutes les trois technologies CSP, le déroulement du projet est identique. Il commence avec la prise de décision incluant la sélection du site, les études de faisabilité technique et économique et l'évaluation de l'environnement du projet. La forme de base et les spécifications techniques sont déterminées lors d'études d'ingénierie conceptuelle. Toutes ces étapes sont nécessaires pour négocier les contrats, financer le projet et procéder aux demandes de permis. Ces activités sont habituellement réalisées par des développeurs de projets tels que des ingénieurs experts et spécialisés dans le développement de centrales énergétiques.

5.6 Ingénierie et construction

Des entreprises spécialisées dans l'ingénierie, de l'approvisionnement et de la construction (EPC) assurent généralement la planification et la réalisation des centrales CSP. Il s'agit de d'entrepreneurs généraux spécialisés et de chefs de projets expérimentés et responsables de l'intégralité du projet. L'entrepreneur EPC assure la coordination et choisit les fournisseurs des différents composants ainsi que les sous-traitants pour l'ingénierie et le génie civil. Les entrepreneurs EPC sont en générale des filiales de groupes spécialisés dans la construction, l'énergie ou les infrastructures industrielles ayant un savoir-faire et une expérience de longue date. Dans de nombreux projets CSP, les entrepreneurs EPC agissent en tant que propriétaire et exploitant dans les premières années. Les entrepreneurs EPC sont souvent étroitement liés aux entreprises de travaux publics incluant différentes activités telles que la préparation du site, la construction des fondations, les

bâtiments (tour solaire), les structures de support (routes, par exemple), etc. Une grande précision est requise pour les opérations de nivellement, en particulier dans les projets de type cylindro-parabolique et de linéaire Fresnel car même de petites imprécisions risquent de compromettre la performance de la centrale.

5.7 Service et maintenance

Le nettoyage des miroirs est l'une des principales tâches relatives au service et à la maintenance dans les centrales CSP fréquemment nécessaires en milieu désertique. Des véhicules de nettoyage spécialisés sont utilisés dans le champ solaire et peuvent être manipulés par une main d'œuvre peu qualifiée. Les activités de service et de maintenance dans le bloc de puissance sont similaires à celles des blocs de puissance à turbines à vapeur conventionnels. À cela s'ajoute le personnel pour la sécurité du site et les patrouilles.

5.8 Démantèlement

Les installations cylindro-paraboliques utilisent de très grandes quantités d'huile de synthèse en tant que fluide caloporteur. L'huile de synthèse est toxique et comporte certains risques. De ce fait, ce HTF doit être traité avec la plus grande précaution et éliminé par des professionnels afin de prévenir tout risque pour l'environnement et les être humains. D'autres moyens HTF tels que la vapeur, l'air ou les sels non fondus ne présentent aucuns risques relatifs à l'élimination.

5.9 Résumé et conclusion

Depuis 2004, une capacité de plus de 1 600 MW a été installée en CSP sur les deux marchés leaders : l'Espagne et les États-Unis. Ces marchés sont fortement dépendants de mesures incitatives favorables comme des prix de rachat fixes et garantis ou encore de fortes stratégies nationales. Même dans la région MENA, les premiers projets pilotes ont été développés parallèlement à des centrales électriques utilisant des combustibles fossiles. Cependant, les capacités CSP installées dans la région MENA restent encore très inférieures à celles des marchés leaders et

les prix de rachat fixes et les stratégies nationales fortes manquent dans la plupart des pays. Des frais d'investissement très élevés, une dynamique et des incertitudes relatives aux technologies CSP ont été relevés mais aucune voie vers une technologie de pointe n'est en vue. Une diminution des frais d'investissement est néanmoins attendue dans un avenir proche pour toutes les technologies CSP. Les capteurs cylindro-paraboliques sont, à ce jour, la technologie la plus éprouvée et viable bien que les systèmes à tour centrale et Fresnel offrent de bonnes perspectives en termes de diminution des coûts de production et d'efficacité plus élevée. Des projets de recherche communs tels ceux en cours sur les marchés leaders sont un facteur-clé du succès pour les fabricants de composants impliqués. Ces projets de recherche sont également subventionnés par des mesures gouvernementales.

La vue d'ensemble des composants analysés pour les systèmes cylindro-paraboliques, linéaires Fresnel et tours solaires est récapitulée dans le Tableau 8.

En Égypte, les composants-clé des champs solaires CSP sont déjà produits par des entreprises égyptiennes, clarifiant ainsi le potentiel de la fabrication locale. Toutefois, la production de nombreux composants nécessite un grand savoir-faire et une grande expérience. En outre, des processus de production rentables et des investissements conséquents dans des chaînes de production automatisées deviennent de plus en plus importants à mesure que la pression relative aux coûts augmente. En raison du stade précoce de développement de la technologie, les opportunités ont été identifiées pour les innovateurs et les entrepreneurs tunisiens. Toutefois, les entreprises tunisiennes devraient attentivement considérer la dynamique élevée dans ces secteurs ainsi que l'incertitude du marché dans leur décision d'investissement. Les composants tels que les miroirs, les structures de montage, les systèmes de suivi ou tracking solaire et les récepteurs doivent, tout particulièrement, être adaptés à l'environnement local dans le futur et, de ce fait, des dépenses importantes en matière de R&D sont à prévoir. Le stade de développement précoce des systèmes à récepteur central et linéaire Fresnel offre des perspectives entrepreneuriales particulièrement intéressantes pour les précurseurs.

Tableau 8 : Résumé des composants CSP

Component	Parabolic Trough	Linear Fresnel	Solar Tower
Mounting structure	<ul style="list-style-type: none"> - Steel structure - 1-axis tracking system (hydraulic, motors, electronic control units) 	<ul style="list-style-type: none"> - Steel structure - Aluminium profiles - 1-axis tracking system (hydraulic, motors, electronic control units) 	<ul style="list-style-type: none"> - Steel beam - Metal structure - 2-axis tracking system (hydraulic, motors, electronic control units)
Mirrors	<ul style="list-style-type: none"> - Bent glass mirrors (borosilicate glass) 	<ul style="list-style-type: none"> - Flat glass mirrors (borosilicate glass) - Flat aluminium mirrors 	<ul style="list-style-type: none"> - Flat glass mirrors (borosilicate glass)
Receiver	<ul style="list-style-type: none"> - Receiver (steel absorber, 70 mm) - Borosilicate glass envelope (125mm) 	<ul style="list-style-type: none"> - Steel absorber (operating pressure 10-100 bar and inner tube diameter 6-19 cm) - Aluminium profiles - Insulation glass panel 	<ul style="list-style-type: none"> - Steel drums - Receiver panels - Piping - Insulation - Concrete receiver tower
HTF system	<ul style="list-style-type: none"> - Synthetic oil - Piping - Pumps - Insulation 	<ul style="list-style-type: none"> - Piping - Insulation 	<ul style="list-style-type: none"> - Piping - Insulation - Pumps
Power Block/ steam cycle components(1)	<ul style="list-style-type: none"> - HTF/steam generator (preheater, evaporator, superheater) - Steel piping and vessels - Circulation pumps - Steam turbine - Condenser - Generator - Electrical connection (cabling, transformer, HV-substation etc.) 	<ul style="list-style-type: none"> - Steel piping and vessels - Circulation pumps - Steam turbine (saturated steam) - Condenser - Generator - Electrical connection (cabling, transformers, HV-substation) 	<ul style="list-style-type: none"> - Salt/steam generator (preheater, evaporator, superheater) - Steel piping and vessels - Circulation pumps - Steam turbine (saturated steam) - Condenser - Generator - Electrical connection (cabling, transformer, HV-substation)
Storage system	<ul style="list-style-type: none"> - Steel tank (cold tank) - Stainless steel tank (hot tank) - Salt - HTF/Salt Heat Exchangers - Piping - Pumps - Insulation 	<ul style="list-style-type: none"> - No commercial storage system 	<ul style="list-style-type: none"> - Steel tank (cold tank) - Stainless steel tank (hot tank) - Salt - Heat Exchangers - Piping - Pumps - Insulation

Source : documentation interne

6 Chauffe-eau solaire et chaleur industrielle : technologie et développement du marché

6.1 Développement technologique

Au niveau mondial, le chauffage solaire de l'eau est une option techniquement et commercialement mature de chaleur renouvelable pour l'eau chaude domestique et les procédés industriels à basse température. Ce chapitre donne un aperçu des principaux aspects technologiques concernant les chauffe-eau solaires (CES). Ce chapitre porte sur les différents types de capteurs et leur efficacité, les coûts et la commercialisation, le potentiel d'innovation et d'intégration dans le système énergétique.

6.1.1 Types de collecteurs

Les technologies de chauffage solaire utilisent l'énergie solaire pour fournir de la chaleur. Les composants d'un système solaire thermique varient en fonction de la demande mais comprennent toujours un collecteur pour capter le rayonnement du soleil et un système de conversion pour transformer l'énergie en chaleur utile. La température requise pour chaque utilisation finale dicte le type de capteur à utiliser pour exploiter l'énergie thermique. Les collecteurs peuvent être conçus pour fournir de l'eau chaude aux ménages mais la technologie est également de plus en plus employée à grande échelle pour fournir de l'eau chaude aux exploitations commerciales et industrielles. Plusieurs types de collecteurs sont développés sur le marché. Pour l'eau et le chauffage des locaux, des collecteurs à plat et à tubes à vide sont les plus populaires, avec des capteurs non vitrés utilisés pour le chauffage des piscines (Brown et al. 2011).

Les dispositifs les plus simples, que l'on appelle capteurs ou collecteurs non vitrés, utilisés pour chauffer l'eau des piscines (principalement en Australie, au Canada et aux États-Unis) ou les douches à l'extérieur, ne sont que des tuyaux noirs gisant sur le sol ou fixés à la structure de la douche (AIE septembre 2011).

Les collecteurs à plat sont appropriés pour les systèmes qui demandent une plus faible quantité d'eau chaude. Un collecteur à plat est un assemblage d'une surface noire dans une boîte isolée avec un couvercle en verre. Pour conserver autant de chaleur que possible, il faut éviter les échappements de chaleur par l'arrière ou l'avant. Le rayonnement émis par la surface chauffée est grand tandis que le rayonnement entrant a une onde plus courte. Le verre a la propriété d'être relativement opaque aux grandes ondes - chauffage radiant - tout en laissant passer la lumière entrant. Le rayonnement solaire entre dans le collecteur au travers du couvercle transparent et atteint l'absorbeur, où le rayonnement absorbé est transformé en énergie thermique. Une bonne conductivité thermique est nécessaire pour transférer la chaleur collectée à partir de la

feuille d'absorption de l'absorbeur vers les tubes où la chaleur est transmise à un fluide. Généralement un mélange eau/glycol avec des additifs anticorrosion est utilisé en tant que fluide caloporteur (IEA sept. 2011).

Les capteurs à plat standards peuvent fournir de la chaleur à des températures allant jusqu'à 80 °C. Les valeurs de perte des collecteurs à plat standards peuvent être classées comme des pertes optiques, qui augmentent avec des angles de lumière incidente, ou comme des pertes thermiques qui augmentent rapidement avec les niveaux de température de travail. Le rendement d'un collecteur à plat à atteint 60 %. Dans une même gamme de températures, les collecteurs à plat de pointe ou tubes sous vide ont des rendements encore plus élevés que ceux du photovoltaïque ou de l'énergie solaire à concentration. Pour améliorer le standard de collecteurs à plat, quelques-unes des principales pertes doivent être réduites. Un revêtement antireflet peut réduire les pertes de 4 % à 7 %. Un revêtement de l'absorbeur peut réduire les pertes du rayonnement. Afin de réduire les pertes les plus importantes de convection à travers la face avant, les collecteurs scellés hermétiquement avec des remplissages de gaz inertes, équipés de double-couverture ou sous vide peuvent être utilisés (IEA SEP 2011).

Les collecteurs à tubes sous vide peuvent produire des températures plus élevées dans le fluide de transfert de chaleur et sont donc utilisés plus souvent en cas de forte demande constante de systèmes de chauffage à eau ou de processus de charge. Les tubes sous vide montrent une bonne efficacité même pour des températures aussi élevées que 170 °C. Tous les collecteurs à tubes sous vide ont les mêmes caractéristiques techniques (AIE septembre 2011) :

- Un vide constitué d'une rangée de tubes de verre parallèles
- Un vide à l'intérieur de chaque tube qui réduit considérablement les pertes par conduction et élimine les pertes de convection
- La forme du verre est toujours un tube résistant à la pression du vide
- L'extrémité supérieure des tubes est reliée à un tuyau collecteur
- Un piège utilisant une matière maintient le vide et donne une indication visuelle de l'état du vide
- Les tubes sous vide contiennent un absorbeur plat incurvé revêtu d'une surface sélective et des fluides d'entrée/de sortie des tuyaux. Des tubes d'entrée et de sortie peuvent être parallèles ou concentriques. En variante, deux tubes de verre concentriques sont utilisés, avec un vide entre eux. L'extérieur du tube intérieur est généralement revêtu d'un absorbeur sélectif pulvérisé.

Les collecteurs à tubes sous vide peuvent être classés en deux groupes principaux (IEA SEP 2011):

- tubes d'écoulement direct : le fluide de la boucle solaire circule dans la tuyauterie de l'absorbeur
- tubes caloducs : la chaleur absorbée est transférée en utilisant le principe du caloduc, sans contact direct avec le HTF de la boucle solaire. L'avantage d'un tel système est que les collecteurs continuent à fonctionner même si un ou plusieurs tubes sont brisés. Les tubes endommagés peuvent être facilement remplacés.

Les capteurs plats à tubes sous vide combinent l'esthétique d'une assiette plate vitrée, d'un panneau solaire et les qualités isolantes de capteurs sous vide, ce qui réduit le transfert de chaleur par convection.

Le stockage à collecteur intégré (ICS) ou des collecteurs de lots réduisent la perte de chaleur en plaçant le réservoir d'eau dans une boîte isolée thermiquement. Ceci est réalisé en plaçant le réservoir d'eau au sommet d'une boîte de verre qui permet à la chaleur du soleil d'atteindre le réservoir d'eau. Les autres parois de la boîte sont isolées thermiquement, ce qui réduit la convection et le rayonnement. En outre, la boîte peut également avoir une surface réfléchissante à l'intérieur. Cela reflète la chaleur perdue à l'arrière du réservoir vers le réservoir. De façon simple, on pourrait considérer un chauffe-eau solaire ICS comme un réservoir d'eau qui a été enfermé dans une sorte de « four » qui retient la chaleur du soleil ainsi que la chaleur de l'eau dans le réservoir. L'utilisation d'une boîte n'élimine pas la perte de chaleur du réservoir vers l'environnement extérieur mais il réduit considérablement cette perte (Ramlow & Nusz 2010). Les capteurs standards ICS ont une caractéristique qui limite fortement l'efficacité du collecteur : un ratio de petite surface/volume élevé. Puisque la quantité de chaleur du soleil que peut absorber un réservoir est largement tributaire de la surface de la cuve directement exposée au soleil, il s'en suit qu'une petite surface limite la température à laquelle l'eau peut être chauffée par le soleil. Des objets cylindriques tels que le réservoir dans un collecteur ICS ont intrinsèquement ce ratio de petite surface/volume élevé et les collecteurs les plus modernes tentent d'augmenter ce taux pour un réchauffement efficace de l'eau dans le réservoir.

Les capteurs d'air solaires chauffent l'air directement pour, presque toujours, chauffer un espace. Les systèmes vitrés ont une feuille supérieure transparente ainsi que du sable isolé et des panneaux arrière pour minimiser la perte de chaleur à l'air ambiant. Les plaques d'absorbeur dans les panneaux modernes peuvent avoir une capacité d'absorption supérieure à 93 %. L'air passe généralement le long de la face avant ou arrière de la plaque absorbante en frottant

directement la chaleur de celui-ci. L'air chaud peut ensuite être distribué directement ou utilisé pour des applications telles que le chauffage et le séchage ou peut être stockée pour une utilisation ultérieure. Les systèmes non vitrés, les systèmes d'air transpiré consistent en une plaque d'absorbeur au travers ou par laquelle l'air passe et se frotte à la chaleur de l'absorbeur. Ces systèmes sont généralement utilisés pour le préchauffage d'appoint dans les bâtiments commerciaux (Ramlow & Nusz 2010).

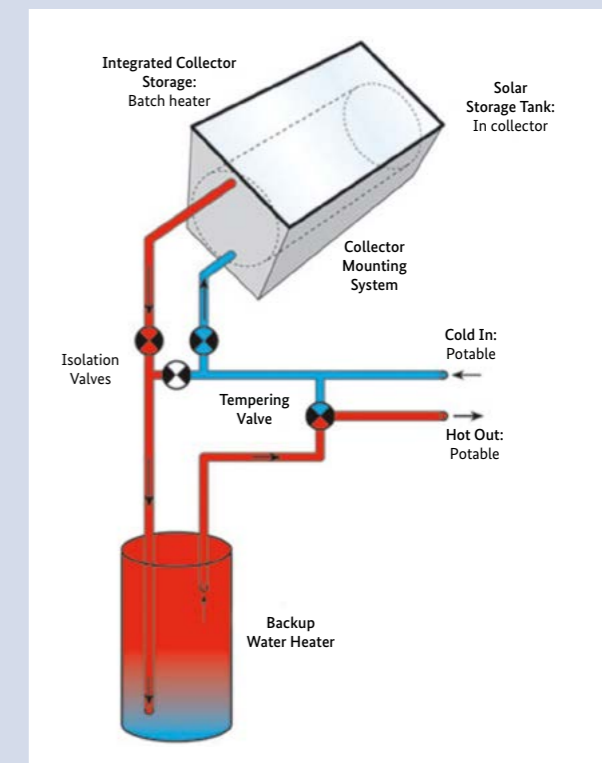
6.1.2 Conceptions de systèmes CES de base

Les systèmes CES se distinguent par deux caractéristiques principales : les systèmes actifs et passifs, et les systèmes directs (boucle ouverte) ou indirects (boucle fermée). Il existe plusieurs conceptions possibles du système basées sur le prix que l'utilisateur final est prêt à payer pour le système ainsi que sur le fait que les systèmes soient, oui ou non, reliés aux systèmes existants de chauffage de l'eau. Des capteurs différents peuvent être utilisés avec n'importe quel type de système. Le réservoir de stockage, le système de commande, et l'architecture globale définissent ces différents systèmes.

Systèmes pompes/actifs et thermosiphons/passifs

Il s'agit de systèmes actifs qui comprennent des pompes de circulation et des contrôles et de systèmes passifs,

Figure 46 : Chauffage solaire batch (réservoir de stockage intégré)



Source: Patterson 2012

qui reposent sur la convection naturelle pour déplacer le fluide de transfert de chaleur entre le capteur et le réservoir. Les systèmes passifs sont des systèmes batch (réservoir et collecteur forment un seul composant) et les systèmes passifs de thermosiphon/convection (réservoir et collecteur sont deux éléments) (voir Figure 46), qui travaillent sur la circulation naturelle du fluide de chauffage de l'eau entre le collecteur et le réservoir de stockage. Ils ne peuvent travailler dans les systèmes fermés couplés où le réservoir de stockage est situé au-dessus de la surface de capteurs (Du Toit 2009). Cette différence de hauteur permet un thermo siphonage naturel. Les systèmes actifs utilisent une pompe pour faire circuler le fluide eau/ chauffage entre le collecteur et le réservoir de stockage. Les pompes sont utilisées lorsque le capteur solaire est utilisé conjointement à une cuve de stockage située plus bas que le collecteur à l'intérieur ou à l'extérieur, sur le toit d'une maison, par exemple, et que le collecteur est relié à un dispositif de chauffage électrique de l'eau classique ou d'un système au fuel.

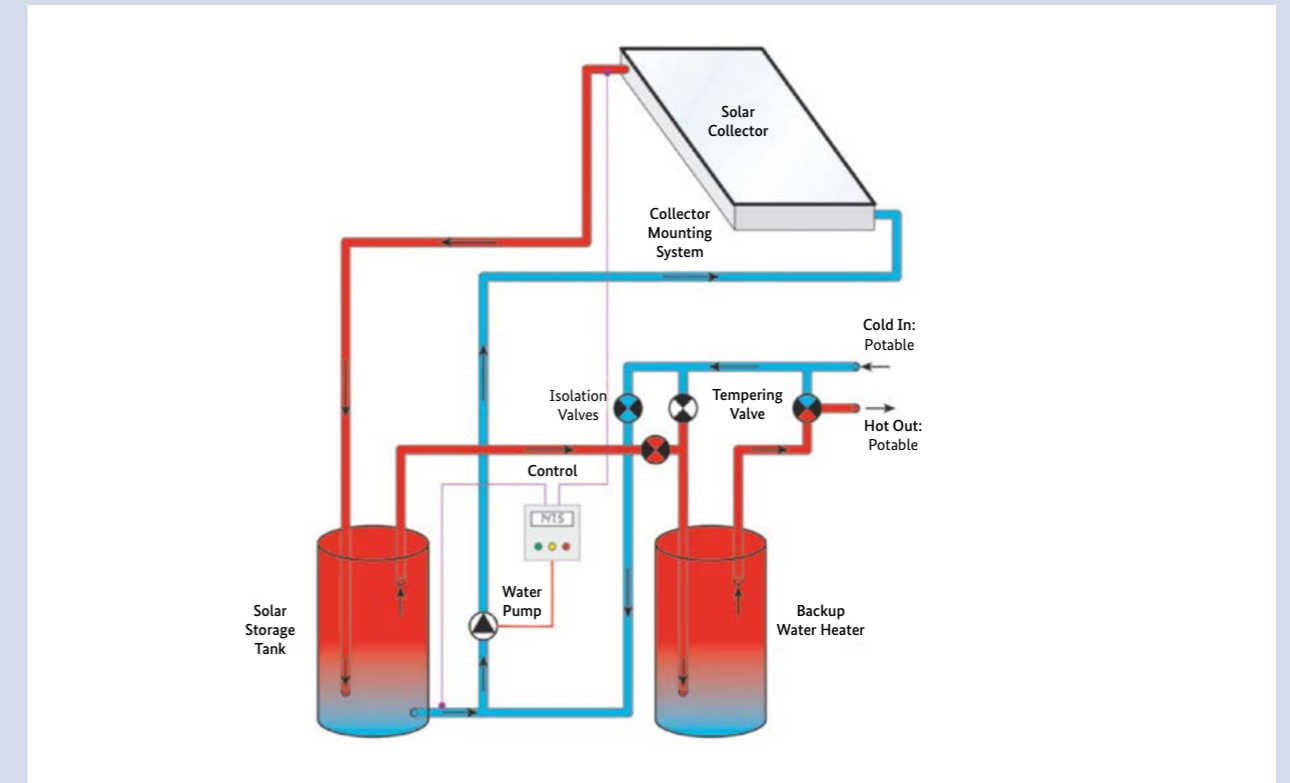
Les systèmes actifs sont généralement plus coûteux et plus efficaces que les passifs. Cependant, ces derniers sont souvent plus robustes et fiables, nécessitant moins d'entretien en raison de l'absence d'une pompe et d'un contrôleur. Néanmoins, les systèmes passifs, par exemple, les systèmes de thermosiphon, sont sujets au gel et à la surchauffe et sont, donc, plus adaptés à des climats modérés.

Systèmes directs (boucle ouverte) et indirects (boucle fermée)

Les systèmes directs font circuler l'eau domestique directement des collecteurs dans le réservoir (voir Figure 48), tandis que les systèmes indirects font circuler un fluide de transfert de chaleur (par exemple de l'eau distillée ou de l'antigel dilué) dans les capteurs, puis utilisent un échangeur de chaleur pour transférer la chaleur à l'eau domestique. En raison de leur complexité, les systèmes indirects sont plus chers mais offrent l'avantage de protection contre le gel et la surchauffe.

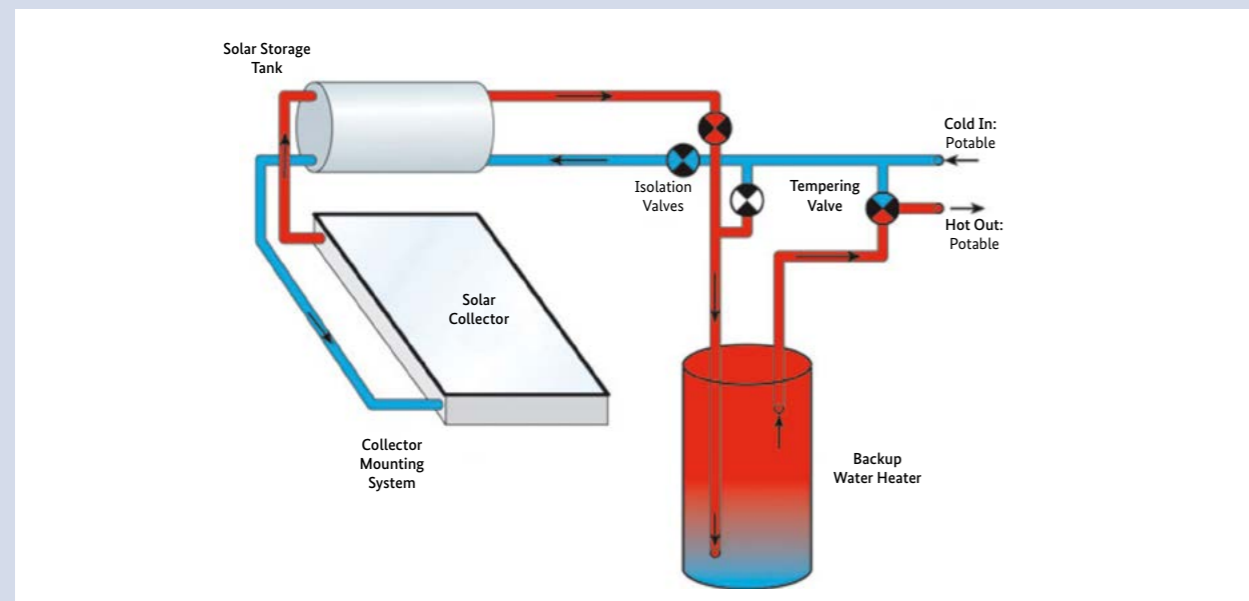
Les systèmes directs ne peuvent être utilisés en toute sécurité que dans les zones où le gel ne se produit pas et où l'eau n'est pas calcaire sinon le système sera endommagé lorsque l'eau gèle dans les tuyaux pendant la nuit ou si les sabots de chaux obstruent le système de circulation (Du Toit 2009).

Figure 48: Principe du système direct à boucle ouverte



Source: Patterson 2012

Figure 47: Système thermosiphon



Source: Patterson 2012

Tableau 9: Avantages et inconvénients du système direct

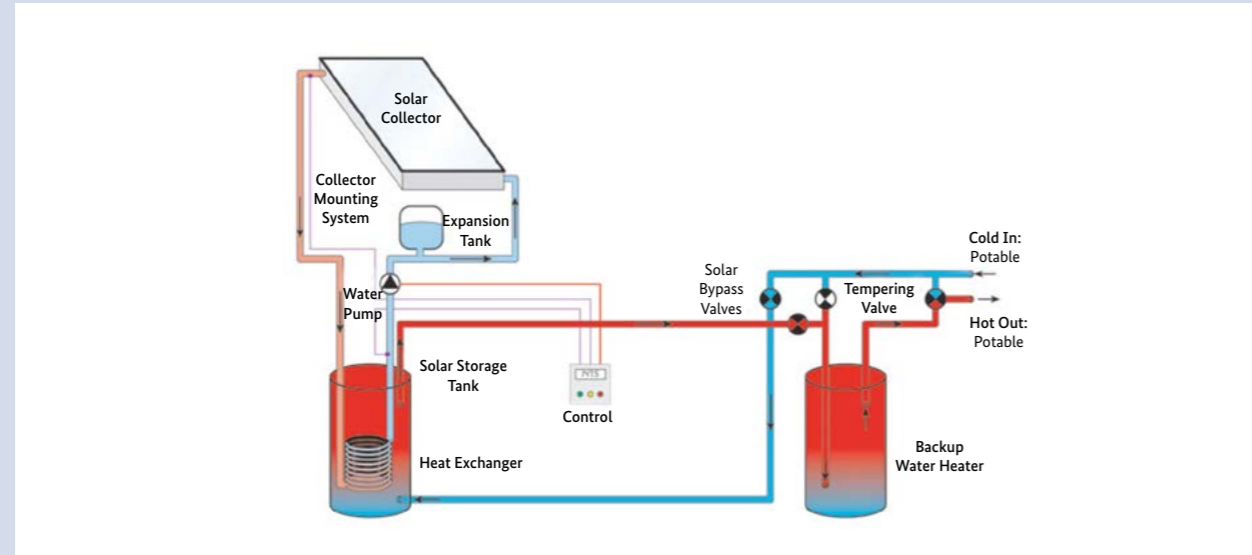
Avantages du système direct	Inconvénients du système direct
L'eau de service est utilisée directement depuis la boucle du collecteur	Bonne qualité de l'eau requise afin de prévenir la corrosion ou les dépôts
Pas d'échangeur de chaleur – transfert plus efficace vers le réservoir de stockage	La protection antigel dépend des valves mécaniques
Pompe de circulation (si nécessaire) doit uniquement surmonter les pertes de friction – système sous pression	Recommandé aux climats avec un potentiel de gel minimal ou nul et en cas de bonne qualité de l'eau

Source: Du Toit 2009

Dans les systèmes indirects, l'eau s'écoule dans le réservoir de stockage et le collecteur et est indirectement chauffée par la conduction d'un tube échangeur de chaleur au travers lequel circule un fluide de chauffage après avoir traversé la zone du collecteur. Pour éviter le gel, le fluide de chauffage est constitué d'un mélange d'eau et de glycol,

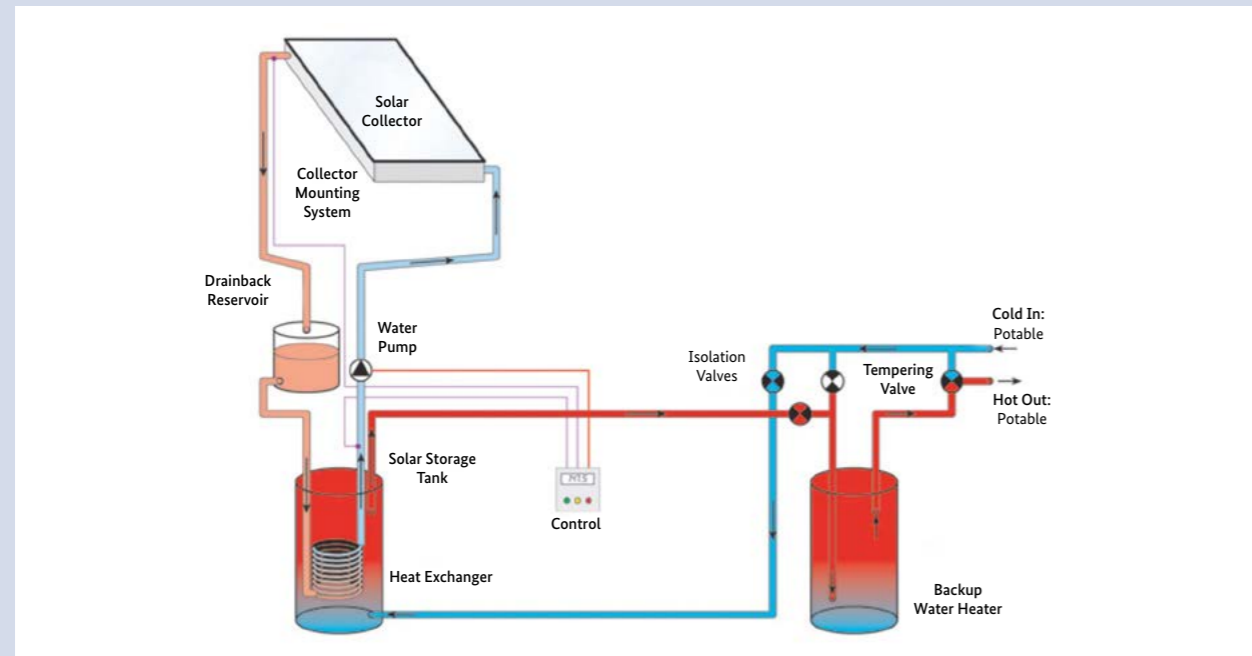
auquel sont ajoutés des anticorrosifs. Certains systèmes – appelés systèmes à vidange arrière – n'utilise aucun agent de protection contre le gel en fonctionnant par siphonage temporaire du fluide caloporteur lorsque le gel se produit (voir Figure 49).

Figure 49: Principe du système à boucle fermée (pressurisé au glycol)



Source: Patterson 2012

Figure 50: Principe du système à vidange arrière (boucle fermée)



Source: Patterson 2012

Les systèmes indirects sont plus durables et sont utilisés dans toutes les conditions météorologiques et pour tous les types d'eau. Mais ils sont plus coûteux en raison de l'exigence de tuyauterie supplémentaire, d'un collecteur et d'échangeur de chaleur (cf. le Tableau 10) (Du Toit 2009). Cette conception du système est commune dans les climats nordiques, où les périodes de gel sont plus fréquentes.

Systèmes à haute et basse pression

Des chauffe-eau solaires peuvent être conçus pour fonctionner comme des systèmes à haute ou basse pression. Les systèmes à haute pression sont plus adaptés à un usage domestique pour des ménages à revenus moyens et hauts car l'eau du système peut être plus facilement mélangée avec de l'eau froide à haute pression fournie par les entités municipales. Les systèmes à haute pression sont toutefois plus coûteux que les systèmes à basse pression car ils doivent être construits à partir de matériaux plus coûteux capables de résister à des pressions élevées. Dans les systèmes à basse pression, la pression de l'eau à la sortie du robinet est déterminée par la hauteur de la cuve de stockage. Plus le réservoir est situé au-dessus du niveau du robinet où l'eau est utilisée, plus la pression d'eau sera forte. En raison des hauteurs relativement faibles des toits, la haute pression n'est jamais atteinte. Cela peut créer des problèmes lorsque l'eau du chauffe-eau solaire doit être mélangée à de l'eau municipale sous pression.

Systèmes d'appoint auxiliaires aux systèmes de chauffe-eau solaires

Lors de périodes où le ciel est complètement couvert, les chauffe-eau solaires sont incapables de chauffer à des

températures suffisamment élevées. Dans ce cas, et lorsque la demande d'eau chaude est supérieure à l'offre chauffée par le soleil, un système de secours est nécessaire. Celui-ci peut être soit directement installé dans le réservoir de stockage intégré, soit indirectement par un échangeur de chaleur supplémentaire. Un brûleur à gaz, mazout ou bois, une pompe à chaleur ou un chauffage par résistance électrique simple peuvent fournir la chaleur de secours. Dans ce dernier cas, l'élément de chauffage électrique peut être installé dans le réservoir de stockage d'un système à couplage direct. Si le chauffe-eau solaire est relié à un geyser classique existant, l'ancien élément peut être retenu de manière à faire en sorte que le système d'appoint ne soit activé qu'en cas de besoin. Une minuterie peut être installée mais cela augmente les coûts d'installation (Van Gass & Govender 2009).

La technologie des chauffe-eau solaires n'est pas très complexe, mais elle a certainement évolué depuis la conception d'un système simple vers des systèmes plus efficaces. L'innovation technique a également permis d'améliorer les performances, la durée de vie et la facilité d'utilisation de ces systèmes. Les innovations ont été largement développées dans des domaines tels que le type de collecteur (plaque plane, tube sous vide, concentration), l'emplacement du collecteur (monté sur le toit, au sol, support mural), et l'emplacement du réservoir de stockage ainsi que dans le procédé de transfert de chaleur (en boucle ouverte ou en boucle fermée avec échangeur de chaleur). Certains systèmes sont relativement faciles à installer tandis que d'autres nécessitent une expertise plus technique. Le Tableau 11 compare les différentes caractéristiques des différents types de systèmes de chauffe-eau solaires.

Tableau 10 : Avantages et inconvénients du système indirect

Avantages du système indirect	Inconvénients du système indirect
Protection antigel assurée par fluide antigel ou retour par drainage	Efficacité du transfert de chaleur réduite par échangeur
Collecteur/tuyauterie protégés contre les agressions de l'eau	Ajout de matériel = augmentation des coûts
	Si pas d'utilisation d'eau, les fluides requièrent une maintenance
	La plupart des formes nécessitent des coûts supplémentaires pour le pompage

Source: Du Toit 2009.

Tableau 11 : Comparaison des différents types de systèmes CES

Caractéristiques	Batch	Thermosiphon	Boucle ouverte directe	Glycol	Refoulement
Profil bas et faible encombrement	non	non	oui	oui	oui
Léger	non	non	oui	oui	oui
Tolérance au gel	non	non		oui	oui
Installation facile maintenance peu fréquente	oui	oui	oui	non	non
Opération passive (pas des pompes ou contrôle)	oui	oui	non	non	non
Economie de place (réservoir superflu)	oui	oui	non	non	non

Source: MNRE & REEEP (o.J.), p. 17.

6.1.3 Efficacités de différents types de collecteurs

Le rendement d'un capteur solaire est défini par le quotient de l'énergie thermique utilisable en fonction de l'énergie solaire reçue. Outre la perte thermique, il y a aussi toujours une perte optique. Le facteur de conversion de l'efficacité optique indique le pourcentage de la lumière solaire pénétrant dans le couvercle transparent du collecteur (transmission) et le pourcentage absorbé. Fondamentalement, il est le produit du taux de transmis-

sion du couvercle et -due taux d'absorption de l'absorbeur (www.solarserver.com). Alors qu'un absorbeur atteint de plus hauts rendements optiques, les collecteurs à vide ont moins de pertes (cf. tableau 12).

Cela signifie que les collecteurs d'absorption peu coûteux sont bien adaptés aux basses températures (jusqu'à 40 °C). Les collecteurs à tubes sous vide coûteux ont des pertes thermiques relativement faibles, même à des températures élevées (jusqu'à 120 °C) et avec des températures extérieures basses. Leur efficacité énergétique est très bonne.

Tableau 12 : Taux d'efficacité, de température et coûts des différents types de capteurs

Type de collecteurs	Efficacité optique	Facteur de perte de chaleur W/m ² °C	Températures °C	Coûts spécifiques €/m ²
Absorbeur (sans verre)	0,82 - 0,97	10 - 30	Up to 40	25 - 100
Collecteur plat	0,66 - 0,83	2,9 - 5,3	20 - 80	150 - 600
Collecteur plat sous vide	0,81 - 0,83	2,6 - 4,3	20 - 120	-
Collecteur à tube sous vide	0,62 - 0,84	0,7 - 2,0	50 - 120	400 - 1.200
ICS/Batch	~ 0,55	~ 2,4	20 - 70	-
Collecteur à air	0,75 - 0,90	8 - 30	20 - 50	-

Source: www.solarserver.com/knowledge/basic-knowledge/solar-collectors.html. Aucune donnée disponible sur les coûts spécifiques pour les collecteurs à plat sous vide, les batchs et les collecteurs à air. Merci de noter que selon l'AIE de septembre 2011, la plage de température des collecteurs de tube à vide collectionneurs va jusqu'à 170 °C.

Les capteurs à plat se trouvent entre les 2 types précédents en ce qui concerne la gamme de température (jusqu'à 80 °C) ainsi que des coûts.

6.1.4 Coûts et stade de commercialisation de systèmes de chauffe-eau solaires

Le chauffage solaire de l'eau constitue, actuellement, l'une des applications les plus rentables de l'énergie solaire. Il constitue l'essentiel du marché actuel du chauffage et du refroidissement solaires, produisant presque quatre fois plus d'énergie que toutes les technologies solaires électriques confondues. Des systèmes simples tels que les thermosiphons non protégés contre le gel, les collecteurs à plat ou les collecteurs à tubes sous vide, peuvent être installés sur les terrasses et les toits horizontaux dans les climats tempérés. L'intégration des systèmes de pompage au bâtiment permet le stockage pendant plusieurs jours dans des cuves d'eau stratifiées, où un système d'appoint à partir d'une autre source d'énergie est souvent installé. Les fabricants ont réussi à surmonter des problèmes techniques, mais l'installation nécessite des installateurs formés et expérimentés. Les systèmes les plus rentables couvrent 40 % à 80 % de la charge de chauffage de l'eau chaude domestique. Cependant, pour couvrir les 100 %, il faudrait des collecteurs et des capacités de stockage surdimensionnés collectionneurs. Le coût supplémentaire est généralement injustifiable et le surdimensionnement augmente le risque de surchauffe, ce qui pourrait endommager les capteurs (AIE septembre 2011). Les systèmes sont généralement conçus pour couvrir entièrement la basse saison en demande d'eau chaude (été).

Les coûts de la fourniture en chaleur à partir de capteurs solaires dépendent fortement de (Ölz 2011) :

- du rendement énergétique de collecteur, qui est une fonction de la ressource solaire disponible à un endroit particulier et de l'efficacité du système de chauffe-eau
- du prix d'achat du système et des coûts d'installation, qui à leur tour dépendent de la disponibilité d'une chaîne d'approvisionnement d'exploitation à une échelle suffisante pour fournir des collecteurs à faible coût
- de la fraction solaire, qui indique la proportion de la charge totale de l'eau chaude fournie par les capteurs solaires thermiques

La Tunisie peut généralement bénéficier de coûts moyens relativement faibles pour les systèmes de thermosiphon et de fractions solaires relativement élevées en raison de rendements élevés de l'énergie solaire et de petites quantités d'eau chaude, ce qui se traduit par une baisse d'utilisation du système et les périodes de récupération des coûts. Les

coûts d'investissement pour le chauffage solaire de l'eau dépendent de la complexité de la technologie utilisée ainsi que l'état du marché dans le pays d'opération (GIEC 2011). Les coûts d'un système de chauffe-eau solaire installé varient de USD 83/m² en 2005 à plus de USD 1 200/m² en 2005 également. La recherche pour diminuer le coût des systèmes de chauffe-eau solaires est principalement orientée vers le développement de la prochaine génération à faible coût, à base de polymères pour des zones à climats doux. L'objectif consiste à tester la durabilité des matériaux. Le travail de recherche comprend, aujourd'hui, des systèmes de stockage à collecteur intégral en polymère non pressurisé qui utilisent un échangeur de chaleur immergé du côté de la charge et des systèmes de thermosiphon directs.

Les coûts varient considérablement selon les conditions climatiques et les niveaux associés de complexité, ainsi que d'autres facteurs tels que la main d'oeuvre. Un système thermosiphon CES pour une unité familiale composée d'un collecteur de 2,4 m² et de 150 litres de réservoir coûte 700 euros en Grèce, mais 150 euros en Chine (sans aide gouvernementale). En Europe centrale, un système de pompage de 4 à 6 m² et un réservoir de 300 litres, entièrement protégé contre le gel, coûte environ 4 500 euros. Les systèmes de cette taille peuvent être utilisés tant pour le chauffage de l'eau que pour de contribuer - très légèrement - au chauffage des locaux (AIE septembre 2011). La production d'eau chaude solaire domestique coûte, en Europe, de 85 à 190 euros par MWh de chaleur, ce qui concurrence les prix au détail dans certains pays, mais pas encore les prix du gaz naturel. Ces coûts devraient diminuer d'ici 2030 pour atteindre 50 à 80 euros par MWh pour les installations solaires très chaudes. En Chine, à Chypre et en Turquie, les chauffe-eau solaires à faible coût sont déjà une alternative économique pour les ménages. En Israël, ils sont omniprésents et fournissent 6 % de la demande totale en électricité.

6.1.5 Chaleur industrielle solaire

Les systèmes solaires thermiques ont un énorme potentiel pour être utilisés dans l'industrie. Environ 30 % de la demande totale de chaleur industrielle est à des niveaux de température inférieure à 100 °C qui peuvent être fournis par des capteurs solaires thermiques disponibles sur le marché (43 % de chaleur à haute température et 27 % de chaleur à température moyenne) (Weiß 2006). Cependant, le chauffage solaire pour les procédés industriels était à un stade très précoce de développement en 2010. On signale moins de 100 exploitations de systèmes solaires thermiques pour la chaleur industrielle dans le monde, avec une capacité totale d'environ 24 MWth (34 000 m² de surface de capteurs) (IPCC 2011). La plupart des systèmes

sont à un stade expérimental et à une échelle relativement petite. À court terme, le chauffage solaire pour les procédés industriels sera principalement utilisé pour les applications à basse température, allant de 20 à 100 °C. Avec le développement technologique, un nombre croissant d'applications à moyenne température - jusqu'à 250 °C - deviendra possible sur le marché.

Les domaines d'application actuels les plus importants sont les industries alimentaires et de boissons, les industries textiles et chimiques et de procédés de nettoyage simples où les collecteurs simples peuvent fournir une température souhaitée de 50 à 90 °C. Les procédés sont (IEA SEP 2011) : le nettoyage, le lavage et le séchage, l'évaporation, la pasteurisation et la stérilisation, le préchauffage, le chauffage de halls de production et de refroidissement solaire. La plupart des processus de chaleur ont une gamme de températures moyennes de 100 à 200 °C et utilisées dans les industries alimentaires, textiles et chimiques pour des applications aussi diverses que le séchage, la cuisson, le nettoyage, l'extraction et beaucoup d'autres. Une bonne efficacité dans la collecte de la chaleur nécessite des collecteurs un peu plus sophistiqués, comme des plaques plates avancées (avec double et triple vitrage) ou des tubes sous vide éventuellement complétés de petits dispositifs CPC. De récentes améliorations dans la technologie des capteurs stationnaires suggèrent que le rapport coût-efficacité pourrait être à peu près similaire dans une plage de températures de 50 à 160 °C, car les coûts d'investissement plus importants pourront également conduire à des économies de carburant plus importantes (IEA septembre 2011). En termes techniques et pratiques, le processus de chaleur solaire est plus souvent lié à des mesures d'efficacité énergétique dans un procédé industriel qu'à la production d'électricité courante. Par conséquent, le soutien politique et les activités promotionnelles devraient également être pris en compte dans le cadre de mesures d'efficacité énergétique dans l'industrie (Egger & Öhlinger 2012).

6.1.6 Perspectives de progrès technologiques et d'innovation

Des modèles améliorés pour les systèmes de chauffage et de refroidissement solaires doivent avoir une durée de vie longue, des coûts d'installation bas et une efficacité à des températures élevées. Voici quelques options de conception (IPCC 2011) : 1) l'utilisation de matières plastiques pour les chauffe-eau solaires résidentiels, 2) l'utilisation de capteurs plats pour l'eau chaude domestique et commerciale; des collecteurs à tubes sous vide pour l'eau chaude industrielle et le refroidissement activé thermiquement.

6.1.7 Intégration dans le système énergétique

En Chine, en Grèce, à Chypre et en Israël, les chauffe-eau solaires apportent une contribution significative à la satisfaction de la demande d'énergie domestique (IPCC 2011). Dans les pays où l'électricité est une ressource majeure pour le chauffage de l'eau (par exemple l'Australie, le Canada et les États-Unis), l'impact de nombreux chauffe-eau solaires domestiques dans le fonctionnement du réseau électrique dépend de la stratégie des sociétés de services publics en charge de la gestion. Pour un service public qui utilise la commutation de charge centralisée, l'installation de plusieurs chauffe-eau solaires peut avoir l'avantage supplémentaire de réduire la demande en période de pic sur le réseau. Pour un service public qui présente un pic en été, le temps de sortie maximal du chauffe-eau solaire correspond à la demande d'électricité de pointe, et il existe un avantage lié à la capacité de remplacement de la charge des chauffe-eau électriques. Le déploiement à grande échelle du chauffage solaire de l'eau peut bénéficier aux clients privés et aux services publics. Un autre avantage pour les services publics est la réduction des émissions, parce que le chauffage solaire de l'eau peut remplacer les centrales de production polluantes utilisées pour produire de la puissance de charge en pointe.

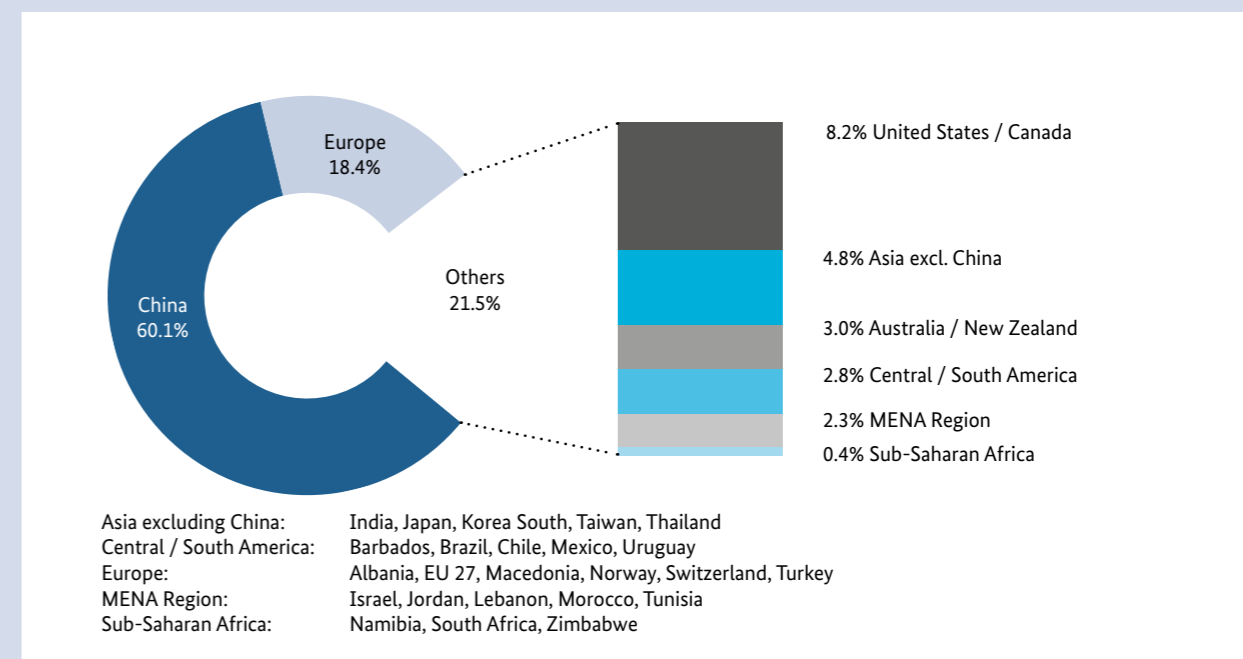
6.2 Développement du marché et de l'industrie

Ce chapitre décrit l'état actuel et le développement de l'eau chaude solaire thermique ainsi que le marché de la chaleur industrielle. Il comprend un aperçu des fabricants de systèmes de chauffe-eau solaires au niveau mondial et les facteurs déterminants de leur succès. Une attention particulière est portée à l'état du marché dans la région MENA en mettant l'accent sur la Tunisie.

6.2.1 Généralités

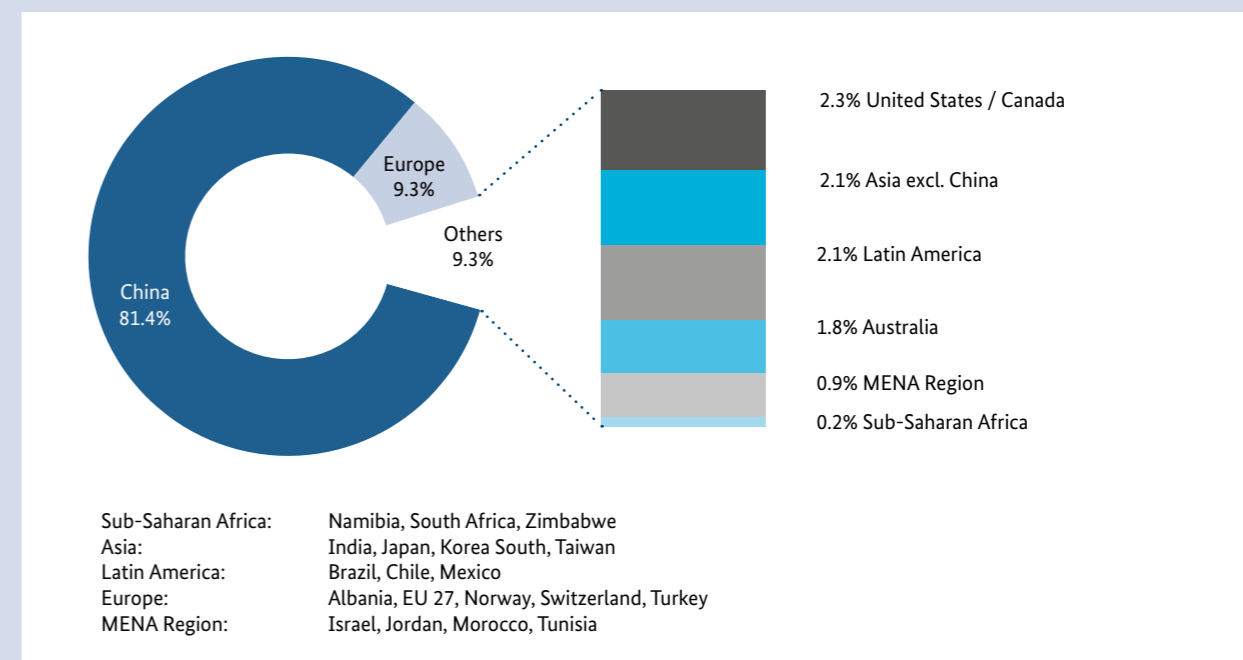
Pour le chauffage et le refroidissement solaires actifs, un certain nombre de technologies de capteurs et des approches différentes du système ont été développés. De manière générale, une comparaison des marchés dans les différents pays est difficile en raison de la vaste gamme de modèles utilisés pour différents climats et des exigences différentes de la demande. Cependant, la capacité en collecteurs solaires thermiques en fonctionnement dans le monde entier à la fin de 2010 était de 195,8 GWth (Weiss et Mauthner 2012). Le marché a connu un changement majeur, avec des taux de croissance très élevés en Chine, où la capacité s'élève maintenant à 117,6 GWth. D'autres marchés importants se situent en Europe (36 GW th), aux États-Unis et au Canada (16,0 GWth) (cf. Figure 51).

Figure 51: Répartition de la capacité totale installée en service (vitrée et non vitrée et capteurs à air) par région économique à la fin de l'année 2010



Source : Weiß & Mauthner 2012

Figure 52: Répartition de la capacité nouvellement installée (vitrée et non vitrée et capteurs à air) par régions économiques en 2010.



Source : Weiß & Mauthner 2012

En 2010, le marché mondial a augmenté de 25,3 %, avec 36,5 GW de nouvelles capacités installées. Au sein de ces nouvelles capacités, 81,4 % ont été installées en Chine et 9,3 % en Europe (cf. Figure 52).

La part de la surface totale installée de capteurs à tubes sous vide sur la surface totale installée en exploitation à la fin de l'année 2010, a représenté 56,6 %. Suivie des collecteurs à plat qui représentent 31,7 %, des

collecteurs d'eau non vitrés représentant 11,0 % et des capteurs à air (vitré et non vitré) 0,7 % (Weiss et Mauthner 2012).

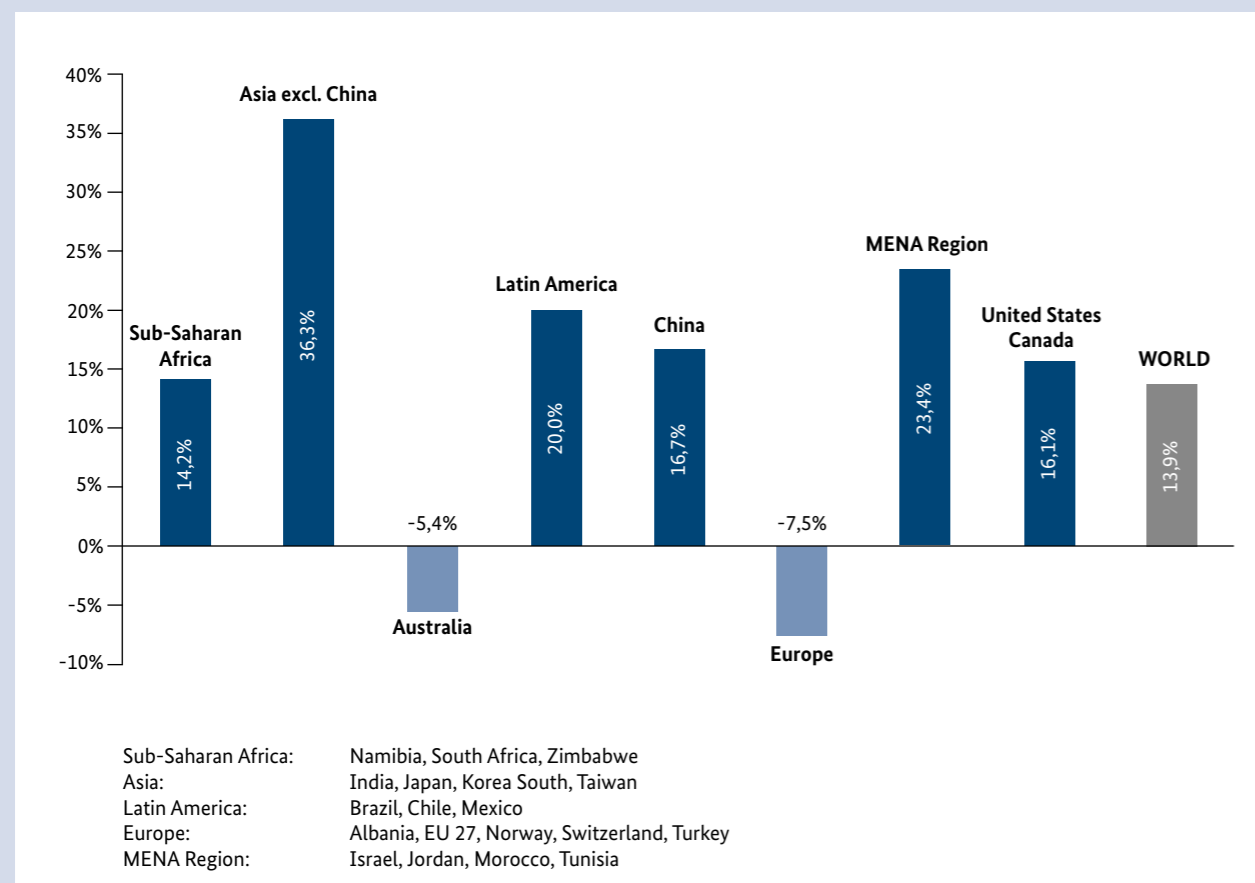
Les tendances pour les systèmes de thermosiphon et pour les capteurs à tubes sous vide sont fortement influencées par le marché chinois qui influe sur les chiffres dans le monde entier en raison de taux de croissance anormalement élevés combinés à une domination absolue du marché de ces technologies (Weiss & Mauthner 2012). L'Espagne, l'Allemagne et l'Autriche ont les marchés les plus sophistiqués pour les différentes applications solaires thermiques. Ils comprennent des systèmes de chauffage de locaux, de maisons individuelles et multifamiliales et d'hôtels, les grandes usines de chauffage urbain et un nombre croissant de systèmes de climatisation, de refroidissement et d'applications industrielles. D'autres marchés importants existent aux États-Unis et Canada.

Les économies émergentes montrent une pénétration du marché en pleine expansion, comme la Turquie, le Brésil

et l'Inde. Bien que les grandes politiques axées sur les marchés de chauffe-eau solaires soient dans les pays industrialisés, les pays émergents introduisent de plus en plus des objectifs et des politiques visant à encourager l'utilisation de chauffe-eau solaires. Les pays ayant des objectifs d'eau chaude solaires comprennent, par exemple, le Mozambique et l'Ouganda (REN21 2012) (cf. Figure 53).

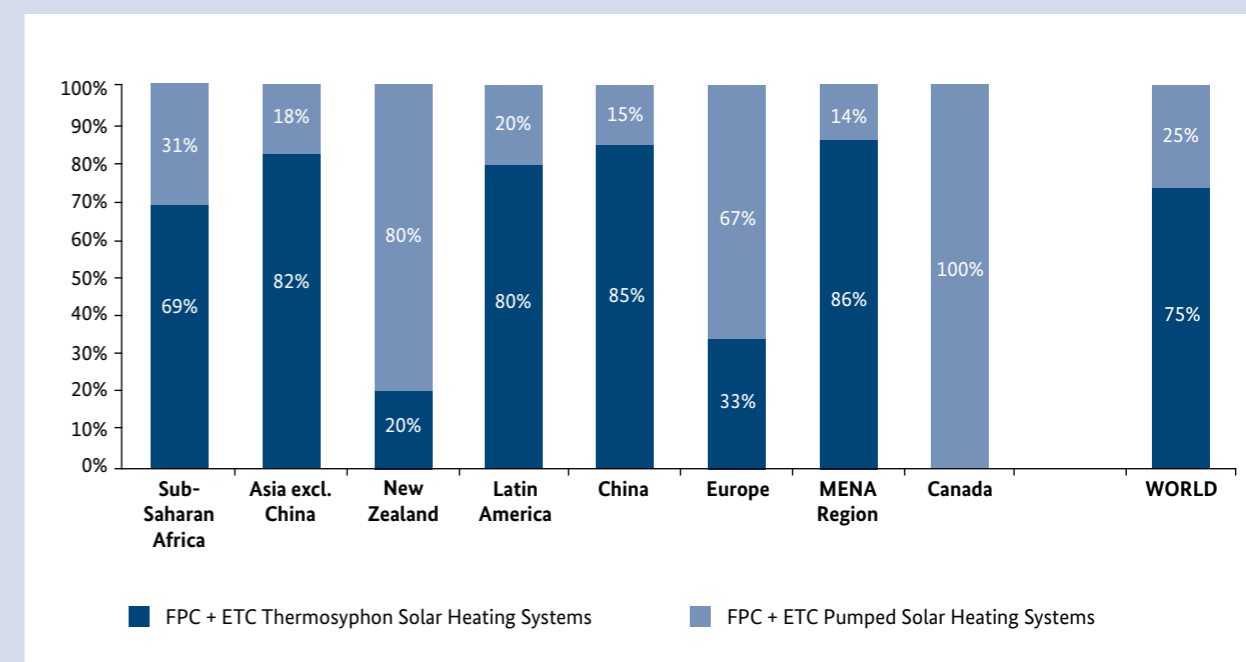
Dans le monde, environ les trois quarts de tous les systèmes solaires thermiques installés sont des systèmes à thermosiphon et le reste, des systèmes de chauffage solaire à pompes (cf. Figure 54). Semblable à la distribution de capteur solaire thermique dans le nombre total, le marché chinois a influencé les évolutions globales, et, en 2010, 89 % des systèmes nouvellement installés ont été des systèmes à thermosiphon tandis que les systèmes pompés ne représentaient que 11 % (Weiß & Mauthner 2012). En général, les systèmes de thermosiphon sont plus fréquents dans les climats chauds, comme en Afrique, en Amérique latine, dans le Sud de l'Europe et dans la région MENA. Dans ces régions, les systèmes de thermosiphon sont plus

Figure 53: Développement du marché de la capacité nouvellement installée entre 2009 et 2010 par région économique



Source : Weiß & Mauthner 2012

Figure 54: Répartition par type de système pour la capacité totale installée de collecteur d'eau en service à la fin de l'année 2010



Source : Weiß & Mauthner 2012

souvent équipés de capteurs plats, tandis qu'en Chine le système à thermosiphon typique pour la production d'eau chaude sanitaire est équipé de tubes sous vide.

De bonnes perspectives existent pour une application plus large des systèmes de chauffe-eau solaires, en particulier dans les climats ensoleillés, où la technologie peut être financièrement compétitive et déployée sans soutien financier à long terme, comme le montrent la Chine et Israël (Brown et al. 2011). En principe, les perspectives de marché pour la chaleur solaire sont aussi plutôt positives. Surtout au regard des marchés bien développés comme en Europe, un développement notable sur le marché pourrait avoir lieu dans les prochaines années (Egger & Oehlinger 2012). Cependant, une absorption plus rapide du marché a besoin de programmes dédiés et d'efforts concertés de la part des acteurs pour lutter contre les barrières économiques ainsi que contre les lacunes d'information à travers la chaîne de valeur.

L'industrie solaire thermique internationale est encore très fragmentée, avec seulement une société sur quatre produisant plus de 50 000 m² par an (35 MWth) (Epp 2012). La Chine a dominé le marché mondial pour le chauffage solaire de l'eau depuis plusieurs années et est également le leader mondial de la fabrication (REN21 2011). Les fabricants chinois de chauffe-eau solaires ont produit 49 millions m² de surface de capteurs en 2010. Plus de 5 000 entreprises étaient actives dans l'industrie chinoise, la plupart d'entre elles opérant au niveau régional et/ou

national. Cependant, environ 20 de ces entreprises étaient actives à l'international. Les plus grandes entreprises chinoises comprennent Himin, Linuo, Sunrain et Sangle. Un enjeu majeur pour les fabricants chinois continue à être la nécessité d'une amélioration systématique de la qualité et de la standardisation des produits.

En Europe, l'énergie solaire d'eau chaude et de chauffage industriel a été marquée par des acquisitions et des fusions entre les principaux acteurs, par une solide croissance annuelle, et un changement vers une utilisation accrue des systèmes de chauffage des locaux, en plus de l'eau chaude (REN21 2012). L'Allemagne, l'Autriche et la Grèce constituent le podium au regard de la capacité totale installée. Les principaux fabricants sont Alanod, Almeco-TINOX, Bosch, Bluetec, GREENoneTEC, le groupe Ritter, et Solvis. Les principaux fournisseurs de systèmes européens en 2010 de plus en plus exportés vers les marchés des pays émergents tels que l'Inde et le Brésil sont GREENoneTEC, Vissman, Schüco, thermosolaire, Solvis, Ritter Solar, Wolf, Kingspan Solar, Vaillant, KBB Kollektorbau, Riello Group, EZINC, et Bosch Thermotechnik.

Les entreprises brésiliennes sont entrain de devenir les principaux fabricants de systèmes de chauffe-eau solaires. En 2010, l'industrie comptait 200 fabricants et 1 000 installateurs (REN21 2011). L'expansion de l'industrie en Afrique du Sud englobe 108 fournisseurs agréés, 245 distributeurs agréés et 124 installateurs agréés indépendants.

Dans certaines parties du processus de production, tels que les revêtements sélectifs, on a atteint des niveaux de production industrielle à grande échelle (IPCC 2011). Un certain nombre de matériaux différents, notamment le cuivre, l'aluminium et l'acier inoxydable, sont appliqués et combinés avec différentes technologies de soudage pour réaliser un processus d'échange de chaleur performant dans le collecteur. Les matériaux utilisés pour le couvercle en verre sont structurés ou plats, comme le verre à faible teneur en fer. Les revêtements antireflets arrivent sur le marché à l'échelle industrielle, conduisant à des améliorations en efficacité de l'ordre de 5 %. Les tubes chinois de Dewar dominant actuellement la production de capteurs à tubes sous vide, où un échangeur de chaleur métallique est intégré afin de les connecter avec les traditionnels systèmes de chauffage d'eau. En outre, certains collecteurs standards à tubes sous vide, avec absorbeurs métalliques de chaleur, sont sur le marché. Les plus grands exportateurs de systèmes de chauffe-eau solaires sont l'Australie, la Grèce et les Etats-Unis. La majorité des exportations de la Grèce sont destinées à Chypre et à la zone proche de la Méditerranée. La France envoie un nombre important de systèmes à ses territoires d'outre-mer. La majorité des exportations américaines partent dans la région des Caraïbes. Les entreprises australiennes exportent environ 50 % de la production (principalement des systèmes à thermosiphon avec réservoirs externes horizontaux) à la plupart des régions du monde qui n'ont pas de périodes de gel. En somme, les économies d'échelle, l'intégration verticale et les exportations sont des facteurs importants de réussite.

6.2.2 Région MENA

L'énergie finale utilisée pour le chauffage diffère selon les pays de la région MENA en raison de la combinaison d'un climat méditerranéen, le long de la ligne de côte en Afrique du Nord, où la demande de chauffage en hiver (octobre à mars) est courante, et d'un climat désertique au Moyen-Orient, où la demande de chauffage est absente (Müller et al. 2011). Dans les pays d'Afrique du Nord, où la population est concentrée le long de la côte méditerranéenne, la demande en chauffage se constitue dans la période d'octobre à mars et la demande d'eau chaude domestique et de chaleur industrielle dure toute l'année. La demande en chaleur industrielle consiste dans une large mesure en la demande de chaleur pour l'industrie agro-alimentaire, en particulier pour le chauffage de serres au cours de la saison d'hiver. Dans les régions avec un climat désertique, en particulier l'ensemble de l'Arabie saoudite et les Émirats Arabes Unis, la demande en chauffage de locaux est pratiquement absente, même si une petite demande en eau chaude sanitaire et une demande plus considérable en chaleur industrielle existent.

Les conditions climatiques en Méditerranée et dans le désert dans la région MENA entraînent une demande considérable (latente) en refroidissement, ce qui devrait augmenter parallèlement au développement économique. Les taux de pénétration en installations actives de systèmes de refroidissement sont déjà en hausse et sont plus sensiblement élevés dans des pays comme Israël, les Émirats Arabes Unis et l'Arabie saoudite (Müller et al. 2011). Les conditions climatiques d'un pays comme l'Égypte pourraient conduire à un taux de pénétration de 95 % en installations actives de refroidissement, alors que le niveau actuel reste sous la part de 10 %. La demande de refroidissement a coïncidé avec la disponibilité de la chaleur renouvelable, c'est à dire lorsqu'il fait chaud dehors. Cette situation peut être utilisée pour créer des synergies. La consommation totale d'utilisation de chaleur s'élevait à 87,6 millions de tep (tonne d'équivalent de pétrole) en 2009. Ce nombre a augmenté de 47 % depuis 2000, alors qu'elle était de 60 M tep. Dans la région MENA, le mélange de combustible utilisé pour le chauffage montre une prédominance du pétrole et du gaz avec une part de 46,7 % pour le pétrole et 48,0 % pour le gaz. La chaleur renouvelable constitue 4,8 % des parts de la consommation finale totale d'énergie pour le chauffage, avec 3,6 % provenant de la bioénergie. La chaleur géothermique et thermique solaire fournit 1,2 % de la consommation finale d'énergie pour le chauffage.

Le potentiel total en chaleur renouvelable s'élève à 12 830 K tep dans les pays de la région. Le potentiel est dominé par le solaire thermique, en particulier en Israël et dans les Emirats Arabes Unis en raison des ressources limitées en biomasse (Müller et al. 2011). En chiffres absolus, l'Égypte montre le plus fort potentiel technique pour l'énergie solaire thermique à moyen terme, mais (comptetenu de son faible taux actuel de pénétration en solaire thermique) exigerait un effort important dans l'introduction de politiques visant à encourager le déploiement de systèmes solaires thermiques.

Le programme ALSOL de chauffage solaire de l'eau en Algérie a commencé en 2010. Il était prévu de subventionner un total de 400 systèmes résidentiels dans l'année (Epp 2010). Le soutien financier que le Fonds National pour la Maîtrise de l'Énergie (FNME) fournit, a été pensé afin d'assurer le succès de ce programme ; il finance jusqu'à 45% des coûts globaux d'installation d'un chauffe-eau solaire résidentiel. Les banques partenaires financent le reste avec un taux de crédit bonifié accordé à chaque client. Le programme ALSOL est une première étape dans l'évolution du marché du chauffage solaire en Algérie. Jusqu'à présent, il n'y a pas de fabricants locaux. Le matériel est importé d'autres pays, comme la Tunisie, la Turquie, la Chine et l'Espagne. Deux fabricants internationaux ont profité de

cette première série de subventions: le fabricant tunisien Industries Sines de collecteurs et de réservoirs et le fabricant français Jacques Giordano Industries, ce dernier avec l'exploitation de deux usines solaires thermiques, l'une à Aubagne, France, et l'autre à Grombalia, Tunisie. Selon l'APRUE, un chauffe-eau solaire de 200 litres est estimé à environ 100 000 Dinars Algériens (DZD) (1 124 EUR) – ce qui est de loin, trop cher pour un revenu familial moyen. Le volume du marché est estimé à environ 50 systèmes résidentiels par an. En outre, l'APRUE a financé un total de 24 200 litres-systèmes pour les écoles dans tout le pays, afin de démontrer l'utilisation de l'énergie solaire dans le secteur de l'éducation. Il y a aussi quelques grandes installations de démonstration, par exemple, les installations du ministère algérien des Mines. La première est l'école technique de Blida, qui a besoin d'eau chaude pour le réfectoire de l'école. Une surface totale de 18,8 m² a été installée, ce qui apporte une contribution annuelle solaire de 11 000 kWh (585 kWh/m²/a). Le second exemple concerne le centre de formation de Ben Aknoun à Alger, qui est équipé d'une surface de capteurs de 16 m². Une contribution annuelle solaire de plus de 9 000 kWh (563 kWh/m²/a) est escomptée.

En Égypte, le gouvernement a mis en place des législations solaires sur l'utilisation des CES depuis 1987 (OME et al. 2011). Ces obligations ne sont toutefois pas appliquées. Aujourd'hui, le marché est estimé à environ 6 000 unités installées par an, pour un total de près de 400 000 unités dans l'ensemble du pays. Le volume total du marché est très faible en comparaison avec le potentiel élevé du pays. Le principal obstacle aux chauffe-eau solaires en Égypte est le prix de l'électricité, qui est subventionné et qui l'un des plus faibles de la région MENA, favorisant le développement des chauffe-eau électriques. Il y a 9 sociétés de production et d'installation de chauffe-eau solaires dont huit sont des entreprises privées. Parmi elles, 4 entreprises fabriquent les systèmes et fournissent le service d'installation, et 5 importent les produits et installent les systèmes. La plupart des entreprises sont situées au Caire, ce qui conduit à un coût élevé en entretien pour les utilisateurs finaux vivant à l'extérieur du Caire. Tous les matériaux nécessaires à la fabrication sont disponibles en Égypte (verre, cuivre, aluminium, acier, etc.) à l'exception des revêtements à haute efficacité, qui sont importés. Il existe 3 types de chauffe-eau solaires qui sont installés en Égypte : les systèmes de thermosiphon actifs et passifs, les systèmes de thermosiphon indirects, et les systèmes à tubes sous vide. La gamme de prix des systèmes fabriqués localement varie de 520 à 1830 euros selon leur taille et la quantité totale de chauffe-eau solaires pouvant être fabriquée localement était estimée à 1 GW th (700 000 m²) à la fin de 2010 (REN21 2011).

Le marché de chauffe-eau solaire au Maroc a connu une évolution significative avec la mise en œuvre du programme PROMASOL (Programme de Développement du Marché Marocain des Chauffe-eau Solaires) en 2002 (OME et al. 2011). Le programme a conduit à une forte augmentation du marché des CES en passant de 10 000 m²/an à 40 000 m² an. On estime que la part de la production locale en CES est d'environ 20 % tandis que les importations ont représenté 80 %. Ainsi, le marché est très dépendant des technologies CES importées avec pour résultat : des prix relativement élevés. Le programme PROMASOL est axé notamment sur l'élaboration des normes marocaines spécifiques aux CES avec un organisme de certification des systèmes disponibles sur le marché, l'étiquetage des produits, le soutien financier et la sensibilisation du public. Néanmoins, le programme a eu des difficultés en matière de financement et a besoin de plus de fonds afin d'assurer la gestion et la pérennité de son fonds de garantie.

En Jordanie, le solaire thermique est l'une des composantes de l'augmentation des parts des énergies renouvelables (OME et al. 2011). À cette fin, une loi solaire thermique pour les bâtiments neufs a été votée dans la législation des constructions. L'industrie énergétique de la Jordanie est déjà relativement bien développée. Il existe plusieurs fabricants mais, seulement trois d'entre eux suivent les spécifications établies par la Royal Scientific Society. En 2007, il y avait cinq producteurs de chauffe-eau solaires à petite échelle avec des surfaces de vente et d'installations de chauffe-eau solaires. En raison d'une industrie déjà existante, les secteurs industriels locaux pourraient fournir des pièces de haute qualité pour la production de collecteurs. Les systèmes de chauffe-eau solaires installés en Jordanie sont estimés à plus de 200 000 unités. En 2009, les types de systèmes installés étaient des capteurs à plat pour 76 %, contre 2 % de collecteurs des tubes sous vide. Il n'existe pas encore de réglementation sur le contrôle de qualité pour les appareils solaires thermiques, ni de normes pour les produits.

Au total, le marché CES régional dans les pays sud-méditerranéens est estimé à environ 20 millions de m² de capteurs installés en surface (OME et al. 2011). Il est dominé, en termes réels par la Turquie avec plus de 10 000 000 m² installés (52 % de la surface totale des collecteurs installés), suivi par Israël, qui représente 25 % de parts de marché. En raison de la taille très hétérogène de la population au sein de ces pays, un indicateur intéressant du taux de pénétration des CES est la surface de capteurs installés par habitant. La surface de capteurs solaires installée par habitant est la plus élevée en Israël, suivi des Territoires Palestiniens, la Jordanie, la Turquie, le Liban et la Tunisie. Pour les autres pays, la part des chauffe-eau solaires est

négligeable ou les informations ne sont pas disponibles (cf. Tableau 13).

6.2.3 Tunisie

Le programme «PROSOL» a été lancé en 2005 afin de revitaliser le marché tunisien en chauffe-eau solaires. Le plan de financement consiste en une subvention du coût jusqu'à 55 euros payés par le gouvernement tunisien, un mécanisme de prêt à taux réduit pour les ménages pour l'achat d'un chauffe-eau solaire remboursé au travers de la facture d'électricité (OME et al. 2011). Les fournisseurs, qui agissent en tant que prêteurs indirects pour leurs clients, doivent être accrédités par l'Agence de l'Énergie en Tunisie (ANME). Les personnes admissibles à PROSOL doivent avoir un contrat de service électrique avec la STEG. Grâce à PROSOL, 540 000m² de capteurs solaires ont été installés entre 2007 et 2011. Au-delà de cette période, un objectif annuel de 120 000m² a été fixé, ce qui correspondrait à environ 1 million de m² pour 2015.

Le « Programme Collectif Prosol » en Tunisie est un programme de subventions pour les installations solaires thermiques dans le secteur tertiaire et il a été lancé en

2007. Le taux d'application était faible dans les premiers temps mais le marché du solaire thermique a vite pris une certaine ampleur. L'Agence Nationale de l'Énergie (ANME) a conçu le plan financier, en coopération avec le Programme des Nations Unies pour l'Environnement (PNUE) en 2008. Le programme vise à l'installation de 60 000m² de surface de capteurs dans le secteur tertiaire entre 2008 et 2011, dont 80 hôtels. Cet objectif n'a, de loin, pas été atteint à la fin de 2011 (Epp 2011).

La principale réalisation du programme PROSOL a été de réussir à déplacer un marché au comptant fondé vers un marché du crédit basé sur la réduction du poids de ces investissements sur le pouvoir d'achat de la population (OME et al. 2011). Le marché de CES a doublé en 10 ans, passant de 550 000 unités en 1999 à 1 180 000 en 2009. Les chaudières GPL dominent toujours le marché avec une part de 65 %, après avoir atteint 72 % en 2004. La part des chauffe-eau électriques a diminué de 19 % à 6 % en raison du développement croissant des parts du chauffage au gaz naturel et des chauffe-eau solaires. Selon les estimations faites par l'Agence Nationale pour l'Efficacité Énergétique (ANME), la technologie solaire thermique pour le chauffage de l'eau pourrait satisfaire 70 % à 80 % de la demande

en eau chaude dans le secteur résidentiel. En septembre 2010, 470 000m² ont été installés dans le secteur résidentiel mais seulement pour le chauffage (pas de refroidissement). Tous les panneaux sont des capteurs à plat et 100 % des systèmes installés sont les systèmes solaires passifs car ils sont tous des unités de stockage intégral de collecteurs (ICS). Le nombre d'entreprises CES admissibles dans Prosol a atteint 47 à la fin de 2010. En même temps, 1 042 installateurs étaient actifs sur le marché.

Il n'y a certainement aucun obstacle juridique à l'intégration des sources d'énergie solaires thermiques pour l'usage domestique en Tunisie. Cependant, pour atteindre les objectifs visés par PROSOL, il serait nécessaire de mettre en place un cadre réglementaire distinct composé d'obligations et d'incitations (CAMI & GIZ 2011). En outre, il est nécessaire de décentraliser les décisions, d'encourager une plus grande participation des acteurs non étatiques dans la définition de la politique environnementale ainsi que de promouvoir des styles de consommation alternatifs. Selon la C.A.M.I. et la GIZ, deux scénarios sont possibles pour l'exploitation du potentiel des systèmes solaires thermiques dans les bâtiments multifamiliaux (en supposant que le nombre total de bâtiments ne dépasse pas 200 000 unités) : 1) basé sur un taux d'intégration de 50 %, ce qui implique une amélioration du cadre général, environ 100 000 installations solaires seraient possibles au cours des cinq prochaines années ; ce qui représenterait environ 250 000m² surface de capteurs installés. 2) Si aucune amélioration n'est constatée dans le cadre général, la surface de capteurs ne devrait pas dépasser 50 000 m².

Après trois ans de préparation, le premier programme d'activités (PoA) tunisien pour le chauffage solaire de l'eau a été enregistré avec succès avec le Mécanisme pour un Développement Propre (MDP) en avril 2011 (Epp 2012). Il s'agit du second programme d'action Africain se concentrant exclusivement sur les chauffe-eau solaires après le programme SASSA « Programme Chauffe-eau solaire à basse pression » en Afrique du Sud, qui a débuté en mars 2011. Dans le cas du programme de chauffe-eau solaires en Tunisie, l'objectif déclaré du programme d'action a été d'installer environ 30 000 chauffe-eau solaires par an pour les ménages, en remplacement de l'électricité de réseau à forte intensité carbonique et des combustibles fossiles actuellement utilisés pour fournir l'eau chaude sanitaire. Il existe déjà un site de production en Tunisie. Depuis 2005, l'entreprise Sines produit des réservoirs pour les systèmes à chauffe-eau solaires.

6.3 Résumé et conclusions

Les systèmes de chauffe-eau solaires à faibles coûts tels que des absorbeurs non vitrés, les systèmes de collecteurs à plats ou à tubes sous vide sont des technologies éprouvées et fiables et, également, une alternative économique aux combustibles fossiles. En général, les capteurs à tubes sous vide sont bien adaptés pour des applications à températures plus élevées mais sont plus coûteux que les capteurs à plats.

Les perspectives du marché pour les systèmes de chauffe-eau solaires dans les climats ensoleillés sont bonnes. La Chine et Israël ont montré que la technologie peut être financièrement compétitive et déployée sans soutien financier à long terme. En Afrique du Nord, les marchés des CES se sont développés en Égypte, au Maroc et en Tunisie. Le marché des procédés de chaleur industrielle est accessible car il est de plus en plus développé dans les pays européens. Toutefois, l'évolution des marchés de chauffe-eau solaires actifs dans la région MENA et en Europe pour des applications de chaleur industrielle nécessite un ensemble de mesures pour renforcer la confiance dans le marché et la capacité de la chaîne de valeur.

Les systèmes à thermosiphon simple avec soit des tubes sous vide, soit des collecteurs à plat prévaudront dans régions à climats ensoleillés. Des systèmes plus sophistiqués sont nécessaires pour les résidences multifamiliales, l'industrie ou les climats plus froids. Par conséquent, les systèmes à thermosiphon ainsi que des systèmes à pompes et les deux types de capteurs seront analysés en profondeur en ce qui concerne leur potentiel de production par l'industrie tunisienne. D'autres technologies comme le collecteur d'air ne seront pas considérées en raison de ses parts de marché limitées.

Tableau 13: Quelques indicateurs sur le marché CES dans les pays sud-méditerranéens

	Moyenne GHI kWh/m ² /jour	Heure d'ensoleillement/an	Marché CES actuel m ²	m ² /1 000 habitants
Algérie	5,0 – 7,0	2 000 – 3 900	150 000 (2007)	4
Égypte	5,2 – 7,1	3 200 – 3 600	800 000	10
Libye	n/a	n/a	8 000 CES	-
Maroc	4,5 – 5,5	2 800 – 3 400	231 600 (2008)	7
Tunisie	4,0 – 5,2	2 800	404 778	39
Israël	5,0 – 6,0		4 961 100 (2007)	710
Jordanie	4,5 – 6,5	300 jours	932 591	152
Liban	4,8	3 000	348 312	84
Territoires Palestiniens	5,0 – 5,5	2 900	1 500 000 (2004)	362
Syrie	4,4 – 5,2	2 800 – 3 200	300 000 (2008)	15
Turquie	3,6	2 640	10 150 000 (2007)	132

Source: OME et al. 2011, p. 36



7 Analyse de la chaîne de valeur des systèmes de chauffe-eau solaires

7.1 Chaîne de valeur fondamentale

La chaîne de valeur fondamentale des technologies solaires pour l'eau chaude et la production de chaleur à des températures sous 100 °C (c'est-à-dire des processus industriels) pouvant être produites par des collecteurs solaires thermiques peut être divisée selon les étapes de base suivantes :

- Matériaux
- Composants
- Distribution & installation
- Service & maintenance
- Démantèlement

La Figure 55 offre une vue d'ensemble des éléments contenus dans chaque partie de la chaîne de valeur et des entreprises impliquées dans les différentes étapes de la chaîne de valeur et les secteurs des industries annexes.

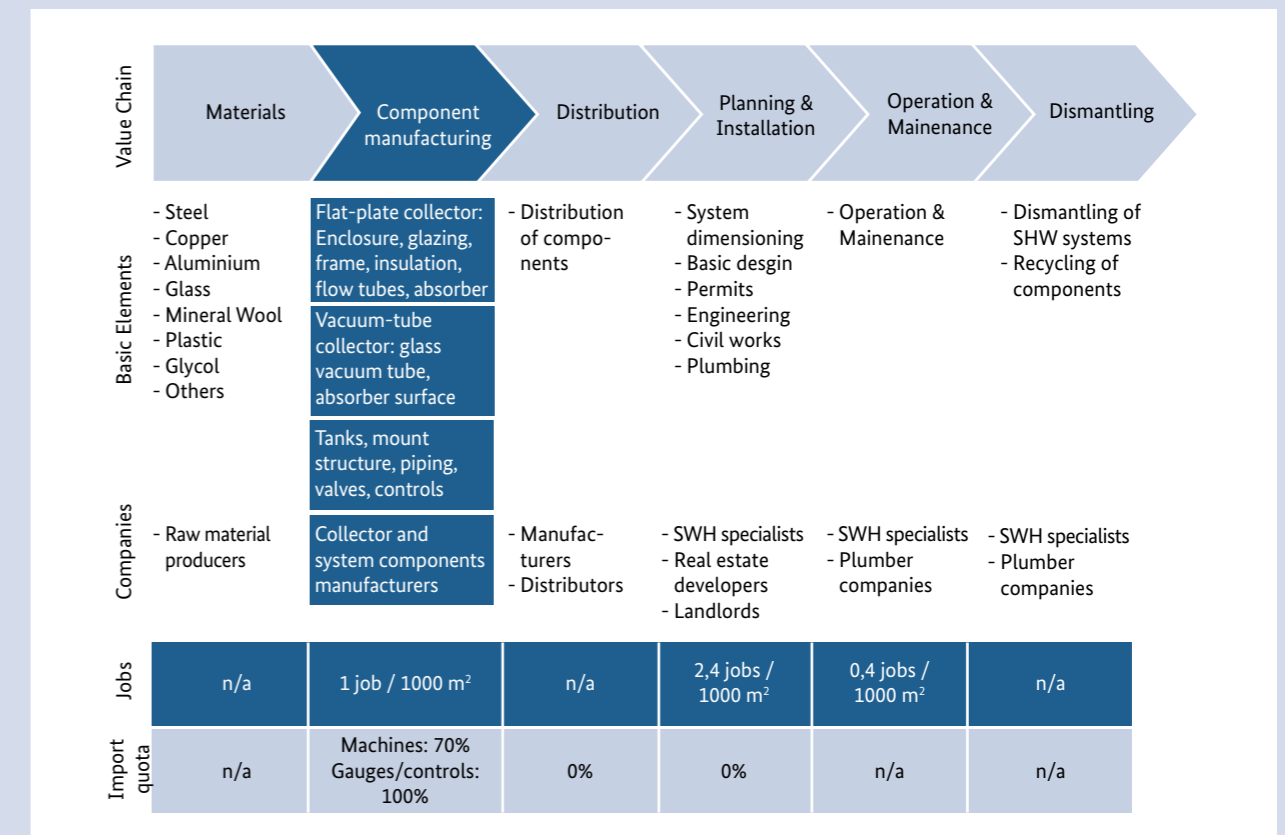
Le graphique montre également que le niveau de l'emploi varie en fonction des différentes étapes de la chaîne de valeur. Du point de vue des effets sur l'emploi, la production

d'eau chaude solaire thermique a un potentiel d'activité en amont estimé à environ 1 emploi par 1 000 m² de collecteurs installés (GWS et al. 2012). Dans les activités en aval, les effets sur l'emploi sont presque multipliés par trois et atteignent 2,8 emplois par 1 000 m². Les activités en aval sont définies comme l'approvisionnement et l'installation (2,4 emplois par 1 000 m²) ainsi que le service et la maintenance (0,4 emploi par 1 000 m²). Les activités en amont correspondent à la fabrication des composants. De même, les quotas à l'import varient en fonction des différentes étapes de la chaîne de valeur : les fabricants tunisiens importent 70 % de leurs machines. 100 % des jauges et instruments de contrôle sont importés. Toutefois, dans le domaine de l'installation, la construction, la planification et la commercialisation, le potentiel local est de 100 %.

7.1.1 Matériaux

Le tableau 14 montre les matières premières pour les panneaux de CES (chauffe-eau solaire) à plat ainsi que la production et le fonctionnement des tubes CES sous vide. L'absorbeur d'un collecteur à plat se compose d'une fine couche absorbante faite soit de polymères offrant

Figure 55 : Chaîne de valeur des technologies solaires pour l'eau chaude et la production de chauffage industriel



Source : documentation interne ; GWS et al. 2011 ; ISE et al. 2011

une stabilité à la chaleur, soit d'aluminium, d'acier ou du cuivre, à laquelle un enduit noir mat ou une couche sélective est appliquée. Les panneaux absorbeurs sont en général recouverts d'enduits sélectifs qui absorbent et retiennent mieux la chaleur que la peinture noire ordinaire. Ces absorbeurs sont faits de métal (cuivre ou aluminium) puisque celui-ci est un bon conducteur thermique. Le cuivre, bien que plus cher, est un meilleur conducteur et moins sujet à la corrosion. Avec l'introduction du soudage au laser, l'industrie productrice a été en mesure de passer du cuivre à l'aluminium meilleur marché. De nouveaux panneaux collecteurs à base de polymères sont produits en Europe en tant qu'alternative aux collecteurs en métal.

Ceux-ci sont totalement composés de polymères ou peuvent inclure des panneaux métalliques à l'avant des canaux de circulation d'eau résistant au gel et faits en gomme de silicone. Le cuivre et l'aluminium sont également utilisés dans le système hydraulique. L'acier est nécessaire pour l'enveloppe du collecteur, la structure de montage et les réservoirs. Le verre est la matière première pour la production des tubes sous vide et la couverture de surface des panneaux collecteurs plats. L'isolation à l'arrière des panneaux collecteurs est en verre et laine de roche. Une mousse flexible et résistante à la chaleur est utilisée pour l'isolation des tuyaux. Un mélange d'eau et d'antigel (du propylène glycol utilisé dans l'industrie alimentaire, par exemple) est employé en tant que fluide échangeur de chaleur et comme protection contre le gel.

Les industries impliquées dans la production de matériaux utilisés pour la fabrication et l'exploitation de systèmes CES sont les producteurs d'acier, d'aluminium et de cuivre; des fabricants de verre et de matières plastiques ainsi que de pâte à papier et de papier.

7.1.2 Dimensions du système et formes de base

Dimensions du système

Le nombre de personnes au sein d'un foyer va déterminer la taille du système CES à employer ainsi que le type de système envisageable. Planifier un système CES de manière économique requiert la collecte précise d'informations relatives à la consommation et aux habitudes des membres du foyer (BINE Info 2012). Il existe de nombreux programmes de simulation pour le dimensionnement du système, tout particulièrement pour les installations plus grandes et complexes. L'étape la plus importante lors de la configuration de l'ensemble est l'estimation des besoins en eau chaude de la façon la plus exacte possible. Il s'agit là du paramètre décisif pour déterminer la dimension du collecteur requis. Plus le système est équilibré de manière exacte en fonction des besoins en eau chaude, meilleure sera son efficacité de fonctionnement. Les différents systèmes CES se distinguent en premier lieu et avant tout par l'aspect de leurs réservoirs et le type d'échangeur de chaleur utilisé. Le volume du réservoir doit être adapté à la surface du collecteur. Un volume plus petit chauffe rapidement et a, par conséquent, une efficacité moindre. Un réservoir ayant

Tableau 14 : Matières premières pour tubes sous vide, production et fonctionnement des panneaux CES à plat

	Système de panneau plat CES	Système CES de tube sous vide
Production	Aluminium, polymères stables, acier, cuivre pour la couche de l'absorbeur Verre solaire, verre à faible teneur en fer pour la surface de couverture Fibre de verre ou laine de roche en tant qu'isolant à l'arrière de l'absorbeur Polyuréthane comme matériel isolant pour la tuyauterie Enduits pour la couche anti réflexion (TiNOx, laques solaires, etc.) Acier pour l'enveloppe du collecteur, la structure de montage et les réservoirs Polyuréthane comme matériel isolant pour le stockage de l'eau Cuivre et aluminium pour les systèmes hydrauliques Alliage d'aluminium pour le support Carton ondulé pour emballage	Verre, métal (cuivre exempt d'oxygène, par exemple) pour les tubes Aluminium destiné au cadre du support Cuivre ou aluminium pour le collecteur et le manchon
Fonctionnement	Propylène glycol antigel	

Source : documentation interne

un volume plus important prendra plus de temps pour atteindre le niveau de température requis. Surdimensionner le système n'en augmente pas l'efficacité. Les collecteurs fonctionnent de manière optimale lorsqu'ils sont orientés vers le sud. Le meilleur angle d'inclinaison ne varie pas seulement avec l'emplacement géographique du collecteur mais aussi avec les fonctions saisonnières (Homola 2010). L'inclinaison idéale est égale à la latitude locale.

Formes de base

Le choix d'un système de chauffe-eau solaire englobe les tâches de base suivantes (Homola 2010) :

- Se renseigner au sujet des codes, conventions et règlements en vigueur au niveau local
- Considérer les aspects économiques d'un système de chauffe-eau solaire
- Évaluer les ressources solaires du site
- Déterminer la taille adéquate du système
- Estimer et comparer les prix du système

Des distributeurs locaux tels que des entreprises artisanales et chauffagistes peuvent proposer des services pour le dimensionnement et la forme de base. Dans le cas de la Tunisie, il est à préciser que la majorité des CES vendus sur le marché sont des systèmes simples et préfabriqués de thermosiphons dimensionnés par le fabricant en fonction de la consommation moyenne du foyer. Les entreprises sanitaires peuvent aisément les installer sans avoir à effectuer des ajustements compliqués relatifs à la taille du système.

7.1.3 Installation

L'installation commune des systèmes de chauffe-eau solaire dépend de plusieurs facteurs. Ces facteurs sont l'espace de toit orienté vers le sud disponible, l'exposition au vent, les exigences en matière de droit de construction local et les normes de sécurité (Homola 2010). Un autre facteur déterminant de l'installation est le système des eaux existant ainsi que la qualité de l'eau dans des systèmes en boucle ouverte (l'eau ne doit pas être corrosive pour le cuivre et ne pas être fortement minéralisés).

7.1.4 Service & maintenance

La maintenance ordinaire des systèmes simples peut être effectuée à la fréquence de tous les 3 à 5 ans et exécutée de préférence par une société qualifiée ayant de l'expérience et des connaissances en matière de systèmes de chauffe-eau solaire (Homola 2010). Les systèmes avec des composants électroniques nécessitent habituellement un remplacement des pièces après 10 ans. Les deux facteurs principaux affectant la performance des systèmes de

chauffe-eau solaire situés et installés correctement sont l'entartrage et la corrosion. En règle générale, des anodes en zinc sont utilisées pour la protection cathodique des réservoirs de stockage en surface. Les anodes enterrées doivent être remplacées en temps voulu. Autrement, la fonction de protection contre la corrosion n'est plus assurée.

7.1.5 Distribution

Contrairement au marché PV qui est global et délimité, le marché CES est bien plus petit et local. Comme l'industrie n'est pas assez importante pour des distributeurs dédiés, les fabricants de composants jouent souvent le rôle de grossistes ou de distributeurs et vendent leurs produits directement aux installateurs des systèmes. Des relations personnelles et une familiarité avec les produits spécifiques sont à la base de ce genre de ventes. De nombreuses combinaisons de composants différents prévalent sur le marché CES et surtout sur le marché résidentiel (Navigant 2012).

7.2 Fabrication de composants

La section suivante propose une description des différentes parties de la chaîne de valeur. Le sujet principal de cette section porte, cependant, sur les composants d'un système CES et leur processus de fabrication. Les systèmes CES comptent de nombreux composants dont certains sont fabriqués spécialement pour les applications CES tandis que d'autres sont plus généraux et utilisés dans d'autres applications et systèmes sanitaires. Chaque composant ainsi que son processus de fabrication sont décrits ci-après. Cette liste n'est pas exhaustive et n'inclut que les composants fréquemment utilisés. Un composant majeur d'un système CES est le collecteur solaire. Dans cette optique, la section se concentre sur l'analyse des collecteurs à plat et tubes sous vide. Les entreprises sont réticentes à fournir des informations relatives aux coûts. De ce fait, les informations relatives aux coûts de production ne sont indiquées que pour les composants des collecteurs et non pour l'ensemble du système CES et chacun de ses composants. De plus amples informations relatives aux coûts sont fournies pour les chaînes de fabrication clé en main pour collecteurs à plat et tube sous vide.

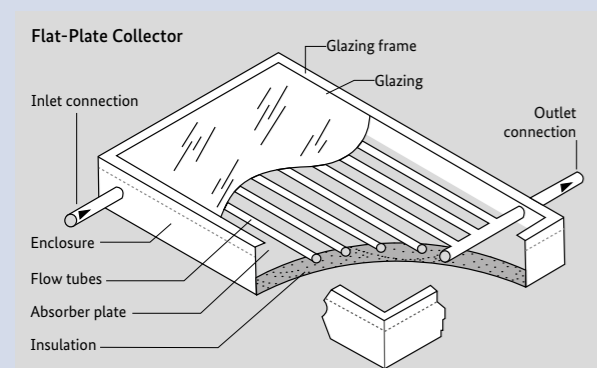
7.2.1 Collecteur à plat

Un collecteur à plat contient un absorbeur sombre dans un boîtier isolé et étanche sous un couvercle transparent ou translucide (voir fig. 55 Figure 56). Le couvercle ou vitrage est utilisé dans le but de réduire le volume des fuites de chaleur tout en laissant passer suffisamment de lumière solaire pouvant ainsi atteindre l'absorbeur. Les collecteurs

à plat comportent typiquement les composants suivants (Homola 2010) :

- Enveloppe : boîtier ou cadre maintenant l'ensemble des composants.
- Vitrage : couvercle transparent en verre au-dessus de l'enveloppe permettant aux rayons du soleil d'atteindre l'absorbeur. Habituellement, du verre sécurisé à faible teneur en fer et de 4 mm d'épaisseur est utilisé en tant que couvercle transparent pour une pénétration maximale de la radiation solaire. Du plastique transparent peut également être utilisé.
- Cadre du vitrage : élément reliant le couvercle au cadre. Des joints au niveau du vitrage évitent d'éventuelles fuites le long du cadre du vitrage et assurent la concentration et l'expansion. Le couvercle et son cadre mettent l'absorbeur à l'abri des intempéries. Les matériaux habituellement employés pour le cadre sont l'aluminium et l'acier galvanisé. Il est également possible de trouver du plastique renforcé de fibres de verre.
- Isolation : il s'agit du matériau employé à l'arrière et sur les côtés de l'absorbeur pour réduire au minimum la déperdition de chaleur par conduction et, par là, diminuer les pertes de chaleur au niveau de l'enveloppe du collecteur et résister à des températures de stagnation. L'isolation est généralement de la mousse de polyuréthane ou de la laine minérale bien qu'il soit également possible d'utiliser des fibres minérales isolantes telles que la laine de verres, la laine de roche, la fibre de verre ou de la fibre optique. Absorbeur : c'est la surface plane généralement métallique à l'intérieur de l'enveloppe étant en mesure d'absorber et de transférer un niveau élevé d'énergie solaire grâce à ses propriétés physiques.
- Tubes de circulation (combinaison de tube collecteur et de refoulement ou tube serpenti-forme simple) : ce sont des tubes métalliques hautement conducteurs traversant l'absorbeur et par lesquels les fluides circulent et qui transfèrent la chaleur de l'absorbeur au fluide.

Figure 56 : Collecteur à panneau plat



Source : Patterson 2012

Processus de fabrication

En règle générale, trois étapes de production peuvent être identifiées dans le processus de fabrication de l'absorbeur et du collecteur (Navigant 2010) :

- La production de feuilles d'aluminium par le biais du soudage laser.
- L'assemblage de l'ensemble du collecteur, puis les absorbeurs soudés par laser seront pivotés à 180 ° sur un poste de rotation, sans toutefois les tordre lors du processus.
- Montage des collecteurs : Le cadre du collecteur est typiquement en aluminium et sert à enrober les tuyaux d'absorption, le verre et l'isolation. Le cadre peut être obtenu par emboutissage de pièces de tôle.
- Pour l'isolation des collecteurs à plat des fibres minérales, du verre cellulaire à cellules fermées ou de la mousse polyuréthane sont employés. La majorité des absorbeurs sont faits de tubes de cuivre et de zones de plaques en cuivre ou en aluminium sélectives ou non. Les plaques sont soudées aux tubes par un procédé à ultrasons ou laser. Les tubes eux-mêmes sont recouverts d'une laque thermique résistante à la chaleur afin de transférer cette chaleur avec le moins de déperdition possible (DCTI 2009). Les enduits sélectifs pour absorbeurs sont destinés à la surface hautement sélective de l'absorbeur pour la radiation solaire et sa conversion en chaleur (degré d'absorption > 90 %) et, en même temps, à réduire les émissions de radiation infrarouge comme dans le cas d'un enduit noir. Les laques solaires peuvent être appliquées sur l'absorbeur par le biais d'un processus mécanique au pinceau ou en spray. Elles ne sont toutefois que peu sélectives et entraînent de émissions élevées. Les meilleurs équipements disposent d'enduits sélectifs appliqués par des procédés galvaniques tels que le chrome noir, le nickel noir et l'oxyde d'aluminium pigmenté avec nickel. Des couches d'oxyde et nitrure de titane peuvent être évaporées lors des processus de vaporisation par vide poussé. Elles assurent non seulement une émission très basse mais également des processus de production moins gourmands en énergie.

Pour les applications dans la gamme de températures de 80 à 120 C° tout particulièrement, il existe de nombreuses possibilités d'amélioration des collecteurs à plat, de sorte qu'ils s'adaptent à ces applications. Pour atteindre ce but, il est nécessaire de réduire les pertes de chaleur du collecteur sans pour autant sacrifier trop de performance optique. Pour mentionner les possibilités les plus intéressantes : des collecteurs à plat à double vitrage antireflet et des collecteurs scellés hermétiquement à remplissage de gaz inerte ou sous vide (Du Toit 2009).

Coûts de fabrication

Le collecteur est le composant primaire d'un système CES et compte pour près de la moitié des coûts de tous les composants du système (hors main d'oeuvre). Les coûts de production pour un collecteur à panneau plat standard fabriqué en Allemagne peuvent être estimés à 70 €/m². Presque tous les matériaux ont connu une hausse significative de leur prix ces dernières années et comptent pour 50 % des coûts de production (Banse & Berner 2012). Le tableau 15 montre clairement la contribution des composants isolés du collecteur pour l'ensemble des coûts.

De plus en plus de fabricants souhaitent passer d'une production manuelle à une production automatisée. Les coûts estimés pour une chaîne d'assemblage modulaire et semi-automatisée ainsi que d'une machine pour le soudage laser est d'environ d'1 million d'euros (voir tableau 16). L'économie d'échelle est importante, ce qui signifie qu'une production plus importante entraîne de coûts plus importants pour des chaînes de production.

La mise en place d'une chaîne de production pour des collecteurs à plat prend environ six mois (Epp 2010). Certains fabricants de machines ne fournissent pas seulement l'équipement technique mais également un modèle de collecteur à plat doté d'une certification Solar Keymark illimitée. Ceci permet d'économiser la période habituelle de 2 ans pour la conception, les tests et la certification de panneaux solaires thermiques.

Tableau 15 : Coûts de fabrication des collecteurs à plat en Allemagne (hors dépréciation pour les machines et l'équipement en %)

	1995	2011
Métal (absorbeur, cadre/réceptacle)	52	65
Couvercle en verre	12	14
Isolation	8	6
Autres coûts (énergie, main d'oeuvre, autre matériel)	28	15

Source : Solrico & Mangold 2012, d'après Banse & Berner 2012, p. 66.

Tableau 16 : Valeur estimée d'une chaîne de production de collecteurs à panneau plat

Coûts estimés pour une chaîne d'assemblage modulaire et semi-automatisée ainsi que d'une machine pour le soudage laser pour la production de collecteurs à panneau plat (clé en main)	Capacité de production par année
1 M d'euros	400 000 m ² 100 à 400 collecteurs par jour

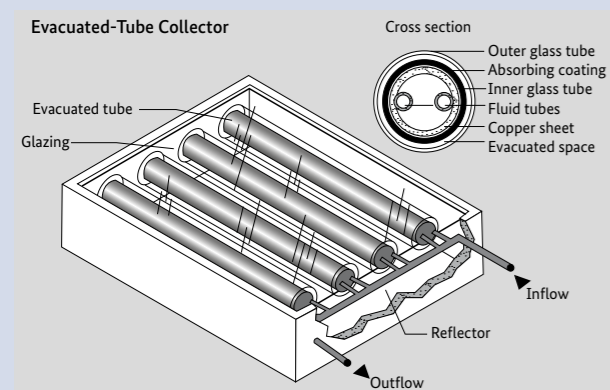
Source : Epp 2010

7.2.2 Collecteur à tubes sous vide

Certains tubes sous vide (verre/métal) sont faits d'une couche de verre se rétrécissant vers le tube échangeur de chaleur à l'extrémité supérieure et qui entoure le tube de chaleur et l'absorbeur dans le dispositif sous vide. D'autres types de tubes (verre/verre) se composent d'une double couche de verre fusionnant à l'une ou aux deux extrémités avec un vide entre les deux couches (comme le dispositif d'une bouteille ou d'un flacon sous vide) et l'absorbeur et le tube de chaleur contenus à une pression atmosphérique normale (voir Figure 57). Les tubes verre/verre disposent d'un vide hermétique mais les deux couches de verre réduisent le volume de lumière arrivant à l'absorbeur et il n'est pas exclu que de l'humidité pénètre dans la zone, qui n'est pas sous vide, entraînant, par là, la corrosion de l'absorbeur. Les tubes verre/métal permettent à un volume de lumière plus important d'atteindre l'absorbeur et le protège contre la corrosion ainsi que le tuyau de chaleur (contenu dans le dispositif) sous vide, même si ceux-ci sont composés de matériaux différents (voir corrosion galvanique) (Ramlow & Nusz 2010). La majorité de tubes collecteurs sous vide en Chine sont des tubes sous vide de type « eau en tube » sous vide en verre double (90 %). En Europe la plupart des collecteurs à tube sous vide sont faits de tubes sous vide à verre simple dotés d'un absorbeur en métal (Epp 2009).

Exigences de fabrication	
Niveau technologique	Commercialisé
Industries annexes	Industrie sanitaire et production de chaudières
Matières premières	Verre à faible teneur en fer, cuivre, aluminium, acier polyuréthane, laine minérale/de verre, enduits
Facteur économique et coûts	
Taille minimum	1 000 km ² d'espace de collecteurs (économies d'échelle)
Frais d'investissement	150-600 EUR/m ²
Structure de l'industrie	
Acteurs principaux	Entreprises européennes : Alanod-TINOX, Vissman, Bosch, Bluetec, GreenOneTech, Ritter Group etc.
Facteurs clés du succès	Economie d'échelle, qualité, automatisation, orientation à l'export, intégration verticale
Barrières à l'entrée	Exigences de qualité en Europe (certification Solar Key Mark Label), marché européen dominé par l'importante industrie des chaudières
Forces	Faiblesses
fabrication de panneaux plats déjà établie en Tunisie	Savoir faire et expérience requis pour la fabrication
Frais d'investissement moyens	Norme Solar Key Mark Label requise en Europe
Opportunités	Menaces
Dynamique de développement des marchés en Asie, Amérique latine, Afrique du Nord et subsaharienne	La demande dépend des marchés créés par les politiques (programmes d'incitation/subventions)
	Marché européen dominé par l'industrie des chaudières européenne
	La qualité doit être garantie

Figure 57 : Collecteur à tube sous vide



Source : Patterson 2012

Processus de fabrication

Un collecteur à tube sous vide est composé d'une rangée de tubes en verre parallèles et transparents. Il existe différentes configurations pour la forme mais, en règle générale, chaque tube consiste en un tube externe en verre et absorbeur à l'intérieur de ce tube. Certains modèles disposent d'un second tube interne en verre. Un dispositif sous vide à l'intérieur du tube ou entre les tubes évite la déperdition de la chaleur et offre un fonctionnement de ce type de collecteur solaire thermique moins dépendant des températures ambiantes, c'est-à-dire qu'il permet un meilleur rendement en hiver. Ces tubes sont connectés au tuyau collecteur. Les tubes peuvent être remplacés lorsqu'ils sont endommagés évitant ainsi de remplacer l'ensemble du collecteur. Les tubes comprennent les éléments suivants (Homola 2010) : tubes sous vide en verre trempé

dont la fonction est d'assurer simultanément le vitrage et l'isolation. Une surface absorbante à l'intérieur du tube sous vide. Un dispositif sous vide autour de l'absorbeur réduisant fortement les pertes de chaleur.

Coûts de fabrication

Pour la fabrication de tubes sous vide, des chaînes de production automatisées sont également utilisées. Une chaîne de production de tubes sous vide entièrement

automatisée coûte environ 2 millions d'euros (voir Tableau 17) (Epp 2009). Les étapes du processus de production sur une chaîne entièrement automatisée sont la découpe et le nettoyage des tubes en verre, le revêtement par enduit de la couche absorbante, la jonction des deux tubes en verre, l'évacuation du vide du tube à verre double et un getter (ou piège à gaz) destiné à indiquer les fuites dans les tubes sous vide.

Tableau 17 : Valeur estimée d'une chaîne de production de tubes sous vide

Coûts estimés pour des chaînes d'assemblage modulaires et semi-automatisées ainsi que d'une machine pour le soudage laser pour la production de tubes sous vide (clé en main)	Capacité de production par année
2 millions d'euros	550 000 m ²

Source : Epp 2009

Exigences de fabrication	
Niveau technologique	Commercialisé
Industries annexes	Industrie verrière
Matières premières	Verre à faible teneur en fer, métaux (cuivre, aluminium)
Facteur économique et coûts	
Taille minimum	20 000 km ² d'espace collecteur (économies d'échelle)
Frais d'investissement	400-1200 EUR/m ²
Structure de l'industrie	
Acteurs principaux	Entreprises chinoises : Linuo New Materials, Sangle, Micoe, Himin, Sunrain, Tsinghua, Sunshore, Tianpu
Facteurs clés du succès	Intégration verticale, économies d'échelle, automatisation, orientation à l'export
Barrières à l'entrée	marché dominé par les entreprises chinoises
Forces	Faiblesses
Présence d'une industrie verrière en Tunisie	Savoir-faire et expérience requis
Equipement clé en main disponible	
Opportunités	Menaces
Dynamique de développement du marché en Chine	La demande dépend des marchés créés par les politiques (programmes d'incitation/subventions)
Exigences moyennes en matière de savoir-faire	Les entreprises chinoises dominent le marché pour les systèmes de thermosiphon avec tubes sous vide
Les tubes sous vide peuvent également être utilisés dans le processus de chauffage industriel	

Étant donné que les coûts relatifs aux matériaux ont connus une hausse importante dans les dernières années et cette hausse allant se poursuivre dans le futur, il est primordial de réduire les coûts tout au long de la chaîne de valeur, tout spécialement au niveau de l'installation.

7.2.3 Système de montage d'un collecteur

Les trois types de montage pour collecteurs solaires les plus courants sont le montage sur toit, au sol et en auvent. Les collecteurs montés sur un toit à deux versants sont maintenus par un support, habituellement parallèle au toit et à quelques pouces de hauteur. Les systèmes au sol sont tout simplement composés de 4 (ou plus) poutrelles dans le sol dont la longueur est ajustée pour obtenir l'inclinaison optimale (cf. Figure 58). Dans le cas du montage en auvent, les collecteurs sont fixés à un mur vertical. Des

Figure 58 : Système de montage pour collecteur à plat



Source : Solardirekt24 2012

Exigences de fabrication	
Niveau technologique	Commercialisé
Industries annexes	Industrie métallurgique, industrie sanitaire généraliste, fabricants de collecteur
Matières premières	Acier inoxydable, aluminium
Facteur économique et coûts	
Taille minimum	Non communiqué
Frais d'investissement	Non communiqué
Structure de l'industrie	
Acteurs principaux	Les fabricants de collecteurs produisent habituellement les systèmes de montage. Les entreprises spécialisées sont ALTEC Solartechnik (Allemagne), Schletter (Allemagne), par exemple
Facteurs clés du succès	Economies d'échelle, capacités de production, qualité, coût des matériaux
Barrières à l'entrée	Peu importantes
Forces	
Des technologies éprouvées et mûres sont déjà produites en Tunisie	Savoir-faire nécessaire
Opportunités	
Produit déjà commercialisé	Développement du marché incertain : la demande dépend des politiques de subvention
Risques au niveau de la production peu élevés	Augmentation du coût des matériaux
Risques financiers peu élevés	

supports horizontaux poussent la base du collecteur vers l'avant afin d'obtenir l'inclinaison souhaitée. En matière de choix d'un système de montage, le montage sur toit est en général la solution la plus économique offrant des paramètres d'inclinaison et d'orientation acceptables. Si le poids du dispositif est un problème à prendre en compte, le montage au sol est la solution adéquate. Le montage mural est une autre solution offrant de bons résultats dans certaines situations (Ramlow & Nusz 2010).

Dans la plupart des cas, les systèmes de montage sur toit en pente sont des systèmes de portants avec éléments de connexion en métal résistant à l'humidité (aluminium, acier inoxydable). Les systèmes pour toit plat (caractéristique de construction communément répandue en Tunisie) sont des systèmes de montage assurant un angle d'inclinaison optimal. Le système est arrimé par vissage ou avec une charge de blocs de béton, du sable ou du gravier, par exemple. Les composants de ce système sont en général obtenus par emboutissage et usinage de tôle. En règle générale, les fabricants de collecteurs produisent également les portants. Il existe également quelques entreprises spécialisées dans les systèmes de montage pour équipement solaire. Une entreprise produisant des produits métalliques peut très facilement fabriquer des portants pour collecteur par le biais des techniques d'emboutissage et d'usinage du métal (Navigant 2010).

7.2.4 Réservoirs

Un **réservoir d'eau solaire** est un réservoir de stockage d'eau isolé et également un composant-clé de tous les systèmes CES (voir fig. Figure 59). En fonction de la chaleur demandée et de la différence de températures entre le stockage et le débit, un réservoir d'eau de quelques centaines de litres environ peut stocker la chaleur solaire pour une durée de quelques heures jusqu'à quelques jours. L'eau froide entrant en général dans un chauffe-eau conventionnel pénètre dans le réservoir solaire et génère de l'eau chaude chauffée par le soleil. Dans un système à boucle fermée, l'eau est chauffée par contact avec le réseau de tuyauterie contenant l'eau mélangée au produit antigel circulant à travers le collecteur. Dans les systèmes à boucle ouverte, l'eau potable circule directement à travers les collecteurs. Bien que les réservoirs de stockage d'eau chaude soient actuellement produits pour l'industrie d'eau chaude sanitaire, certaines applications pour l'industrie CES peuvent requérir des réservoirs à deux échangeurs de chaleur dont l'un est destiné au chauffage auxiliaire d'appoint et l'autre destiné aux collecteurs solaires. Les principales exigences en termes de fabrication sont l'emboutissage, le laminage, la peinture et l'assemblage. Les techniques de revêtement par enduit sont toutefois une barrière à l'entrée non négligeable (Navigant 2010).

Les systèmes à boucle fermée requièrent un **vase d'expansion**. Celui-ci dispose d'une chambre dans laquelle l'air est aspiré et d'une membrane ou diaphragme. Le vissage se fait selon les normes de filetage sanitaires de 1/2 ou 3/4 pouce. Lorsque les tuyaux sont remplis de fluide caloporteur (HTF) et que la pression de service du système est réglée, le fluide va occuper un volume défini en fonction de la température. Le vase d'expansion permet au fluide de se dilater en toute sécurité en compressant l'air dans la chambre. Les vases d'expansion sont de fabrication standard pour l'industrie sanitaire. Toutefois, en raison de l'utilisation croissante du glycol dans les systèmes CES, des vases d'expansion plus robustes sont nécessaires. Le glycol contenu dans les systèmes CES risque d'endommager le matériau utilisé pour la membrane à air dans les vases d'expansion actuellement employés. En effet, des réservoirs uniques peuvent être produits pour l'industrie CES avec des membranes plus résistantes au glycol (Navigant 2010). Les réservoirs peuvent être fabriqués par emboutissage et assemblage.

Des **réservoirs de refoulement** sont utilisés pour drainer des fluides caloporteurs sans agent de protection antigel hors des collecteurs solaires lorsqu'ils n'y a pas assez de soleil pour empêcher l'eau froide de geler. Ces réservoirs sont spécifiques au marché CES. Les principales exigences à la fabrication sont l'emboutissage, le laminage, l'usinage et la peinture (Navigant 2010).

Figure 59 : Réservoir solaire



Source : Patterson 2012

Exigences de fabrication	
Niveau technologique	Commercialisé
Industries annexes	Industrie des chaudières
Matières premières	Acier ou acier inoxydable
Facteur économique et coûts	
Taille minimum	Non communiqué
Frais d'investissement	Non communiqué
Structure de l'industrie	
Acteurs principaux	En règle générale, les fabricants de collecteurs produisent également les réservoirs
Facteurs clés du succès	Quantité, qualité
Barrières à l'entrée	Peu importantes
Forces	Faiblesses
Fort potentiel lié à la production de réservoirs solaires	Savoir-faire en matière d'isolation et de protection contre la déperdition de chaleur
Opportunités	Menaces
Produit déjà commercialisé	La demande dépend des marchés créés par les politiques (programmes d'incitation/subventions)
Risques relatifs à la production et financiers peu élevés	Augmentation du coût des matériaux

Exigences de fabrication	
Niveau technologique	Commercialisé
Industries annexes	Industrie sanitaire et production de chaudières
Matières premières	Acier inoxydable
Facteur économique et coûts	
Taille minimum	Non communiqué
Frais d'investissement	Non communiqué
Structure de l'industrie	
Acteurs principaux	Voir les fabricants de réservoirs
Facteurs clés du succès	Liés à la production de réservoirs solaires
Barrières à l'entrée	Peu importantes
Forces	Faiblesses
Fort potentiel lié à la production de réservoirs solaires	Aucune
Opportunités	Menaces
Produit non spécifique à l'industrie solaire	La demande dépend des marchés créés par les politiques (programmes d'incitation/subventions)

7.2.5 Échangeur de chaleur

Les systèmes de chauffe-eau solaires utilisent des échangeurs de chaleur pour transférer l'énergie solaire absorbée par le collecteur solaire au liquide ou à l'air employés pour chauffer l'eau ou l'espace (voir Figure 60). Les échangeurs solaires sont utilisés dans les systèmes solaires d'eau chaude à boucle fermée. Ils permettent de transférer la chaleur d'un fluide à l'autre sans les mélanger. Les échangeurs de chaleur internes sont dans le réservoir et non visibles. Ils peuvent tout simplement avoir la forme d'un réseau de tuyauterie serpentiniforme reposant dans le fond du réservoir ou enroulé à l'extérieur entre l'isolation et le couvercle de surface. Étant donné que le fluide caloporteur du collecteur solaire se déplace à travers un réseau de tuyauterie, la chaleur est transférée du fluide plus chaud à l'eau potable plus froide. Un échangeur de chaleur externe se compose en général d'un tuyau dans un autre tuyau. Le fluide caloporteur et l'eau potable circulent en sens inverse l'un contre l'autre et la chaleur est transférée au niveau du tuyau de l'échangeur de chaleur. Le fluide peut être

mis en mouvement par l'intermédiaire de pompes, d'un système à thermosiphon ou d'une combinaison des deux.

Figure 60 : Échangeur de chaleur



Source : Patterson 2012

Les échangeurs de chaleur représentent une part importante sur le marché CES et doivent être composés d'acier inoxydable en raison de l'utilisation croissante de glycol. Les échangeurs plats peuvent être fabriqués par le biais des processus d'usinage, d'emboutissage, de laminage et de soudage mais sont, en règle générale, utilisés dans des réservoirs à double paroi imposés par la législation en matière de construction dans certaines régions (Navigant 2010). Un échangeur de chaleur peut prendre la forme d'un réseau de tuyauterie serpentiniforme ou d'une série de plaques parallèles. Ces deux types d'échangeur de chaleur nécessitent des processus de fabrication différents : cintrage pour l'un et emboutissage et laminage pour le second. Les échangeurs de chaleur peuvent être produits par l'industrie sanitaire classique.

7.2.6 Tuyauterie, commandes et valves

Les installations de tuyauterie représentant une part importante du coût total sont une cible privilégiée pour la réduction des frais. Les fabricants de tuyaux ont créé des équipements dotés d'un joint compressé dans les tuyaux

pour l'étanchéité. Le joint est compressé par le biais d'outils électriques disponibles sur le marché. Ce genre d'équipement représente une dépense supplémentaire et est, par conséquent, utilisé dans des installations de tuyauterie de plus grande importance (Navigant 2010). Une tuyauterie flexible se compose généralement de deux tubes flexibles en acier inoxydable isolés et reliés entre eux par un câble de sonde. L'intérêt des tuyaux flexibles est de supprimer le processus de brassage nécessaire pour la production de tuyaux rigides et de simplifier la mise en place de la tuyauterie dans des endroits confinés. Ceci réduit les frais d'installation des systèmes de manière considérable, tout particulièrement dans le cas d'applications de réfection. Les tuyaux sont en cuivre, acier inoxydable et autres métaux et proviennent de l'industrie sanitaire classique.

Dans le cas des systèmes actifs utilisant des pompes, lorsque le collecteur atteint une température supérieure à celle du réservoir de stockage, la pompe doit être mise en marche pour faire circuler le système. Lorsque la température du réservoir est plus élevée que celle du collecteur, la pompe doit être arrêtée. Cette fonction est exécutée par un

système de commande à thermostat différentiel. Le dispositif de contrôle du thermostat différentiel compare les valeurs du capteur de chaleur du réservoir et du collecteur et commute la pompe en conséquence. Ce type de dispositif n'est pas nécessaire en cas de réchauffage discontinu ou de système de thermosiphon. Les producteurs d'appareillage électronique peuvent très aisément fabriquer des systèmes de commande simples, résistants et conviviaux pour contrôler les différences de température. Les fonctions de base sont les processus de commutation en fonction de conditions thermiques. Une valve d'isolement devrait également faire partie de chaque chauffe-eau solaire afin de pouvoir isoler le réservoir en cas de problème, tout en permettant au système auxiliaire de rester en service. La

valve d'isolement se compose d'une ou plusieurs valves manuelles situées à la fois sur les deux circuits d'eau potable entrant et sortant du réservoir solaire. La valve d'isolement est en acier ou autres métaux et provient de l'industrie sanitaire classique.

Par temps ensoleillé, l'eau stockée dans le collecteur peut devenir brûlante. Si l'eau sortant du chauffe-eau auxiliaire est trop chaude, la valve de température s'ouvre pour permettre un retour d'eau froide afin que le mélange puisse refroidir et éviter, ainsi, les risques de brûlure. La valve de température est en acier ou autres métaux et provient de l'industrie sanitaire classique. La Figure 61 illustre des valves et un dispositif de commande et de contrôle.

Figure 61 : Valves de température, de contrôle et d'isolation



Source : Patterson 2012

Exigences de fabrication	
Niveau technologique	Commercialisé
Industries annexes	Industrie sanitaire et production de chaudières
Matières premières	Cuivre, acier inoxydable
Facteur économique et coûts	
Taille minimum	Non communiqué
Frais d'investissement	Non communiqué
Structure de l'industrie	
Acteurs principaux	Aucun
Facteurs clés du succès	Intégration verticale
Barrières à l'entrée	Peu importantes

Forces	Faiblesses
Des technologies éprouvées et mûres sont déjà produites en Tunisie	Aucune
Opportunités	Menaces
Produit déjà commercialisé et non spécifique à l'industrie solaire	Augmentation du coût des matériaux

7.2.7 Pompe et station de pompage

Les pompes sont utilisées dans les systèmes actifs mais ne sont pas requises dans les systèmes discontinus ou thermosiphon (voir Figure 62). Elles font circuler l'eau et l'antigel entre le collecteur solaire et le réservoir de stockage. Trouver la pompe adaptée au système dépend de sa taille et de la distance et, aussi, du dénivelé entre le ou les collecteurs et le réservoir de stockage. Des pompes de bonne qualité ont une durée de vie de 20 ans pour une utilisation intensive (Patterson 2012).

La station de pompage (voir également ci-dessus) est un composant à forte valeur étant donné qu'elle se compose de pièces détachées achetées et sa fabrication nécessite le moulage du boîtier, le brassage des tuyaux et l'assemblage. Les stations de pompage sont cruciales pour la progression de l'industrie CES car elles sont susceptibles de contribuer à la réduction des coûts. Les frais d'installation représentent environ la moitié du coût total du système. Par le biais de coûts de main d'oeuvre limités ou d'une baisse non prévisible, la station de pompage permet également de promouvoir la standardisation et la fiabilité du système. Actuellement, de nombreux installateurs utilisent une combinaison de différents composants du système, entraînant ainsi une

Figure 62 : Pompe



Source : Patterson 2012

variété de composants et de formes de systèmes différents. Par conséquent, il existe de nombreux systèmes peu sophistiqués du point de vue technique. Ces systèmes sont fragiles et peu performants, conférant une mauvaise réputation à la branche. Les stations de pompage sont rassemblées et vont permettre de réduire le nombre de dispositifs non standards et accroître la fiabilité (Navigant 2010). Les installateurs sont en mesure de procéder à l'assemblage.

Exigences de fabrication	
Niveau technologique	Commercialisé
Industries annexes	Industrie sanitaire et production de chaudières, industrie électronique
Matières premières	Identiques aux pompes à chaleur
Facteur économique et coûts	
Taille minimum	Non communiqué
Frais d'investissement	Non communiqué

Structure de l'industrie	
Acteurs principaux	Aucun
Facteurs clés du succès	Intégration verticale
Barrières à l'entrée	Peu importantes
Forces	Faiblesses
Des technologies éprouvées et mûres sont déjà produites en Tunisie	Qualité du produit : durabilité
Opportunités	Menaces
Frais d'investissement peu élevés	Volume du marché solaire local/régional peu élevé
Produit non spécifique à l'industrie solaire	

7.2.8 Fluide caloporteur

En règle générale, l'eau est utilisée comme moyen de stockage thermique. Si nécessaire, des solutions antigel habituellement à base de glycol (du glycol propylène, par exemple) sont employées et diluées avec un volume d'eau dépendant de la température de service minimum.

Ces solutions contiennent des additifs anticorrosion Les exigences relatives aux solutions antigel sont une grande capacité thermique, une haute viscosité cinématique à basse température, l'innocuité pour la santé et l'environnement et la compatibilité avec les matières plastiques. Le propylène glycol est issu de l'industrie alimentaire (Ramlow & Nusz 2012).

Exigences de fabrication	
Niveau technologique	Commercialisé
Industries annexes	Industrie alimentaire
Matières premières	Eau ou propylène glycol
Facteur économique et coûts	
Taille minimum	Non communiqué
Frais d'investissement	Non communiqué
Structure de l'industrie	
Acteurs principaux	Absence d'acteurs majeurs
Facteurs clés du succès	Intégration verticale
Barrières à l'entrée	Peu importantes
Forces	Faiblesses
Produit déjà commercialisé	Qualité du produit avec propylène glycol : capacité thermique, haute viscosité cinématique à basse température, non nocifs pour la santé et l'environnement
Produit non spécifique à l'industrie solaire	

Opportunités	Menaces
Produit non spécifique à l'industrie solaire	La demande dépend des marchés créés par les politiques (programmes d'incitation/subventions)

7.3 Résumé et conclusion

Le Tableau 18 donne un aperçu des processus de fabrication nécessaires pour la production de systèmes CES. Cette analyse montre que les composants CES sont relativement faciles à produire et nécessitent peu d'investissement. Cependant, celles-ci font face à certains risques relatifs à la production de collecteurs et systèmes CES : coûts des matériaux en constante augmentation, problèmes de qualité et des marchés dépendants des décisions politiques.

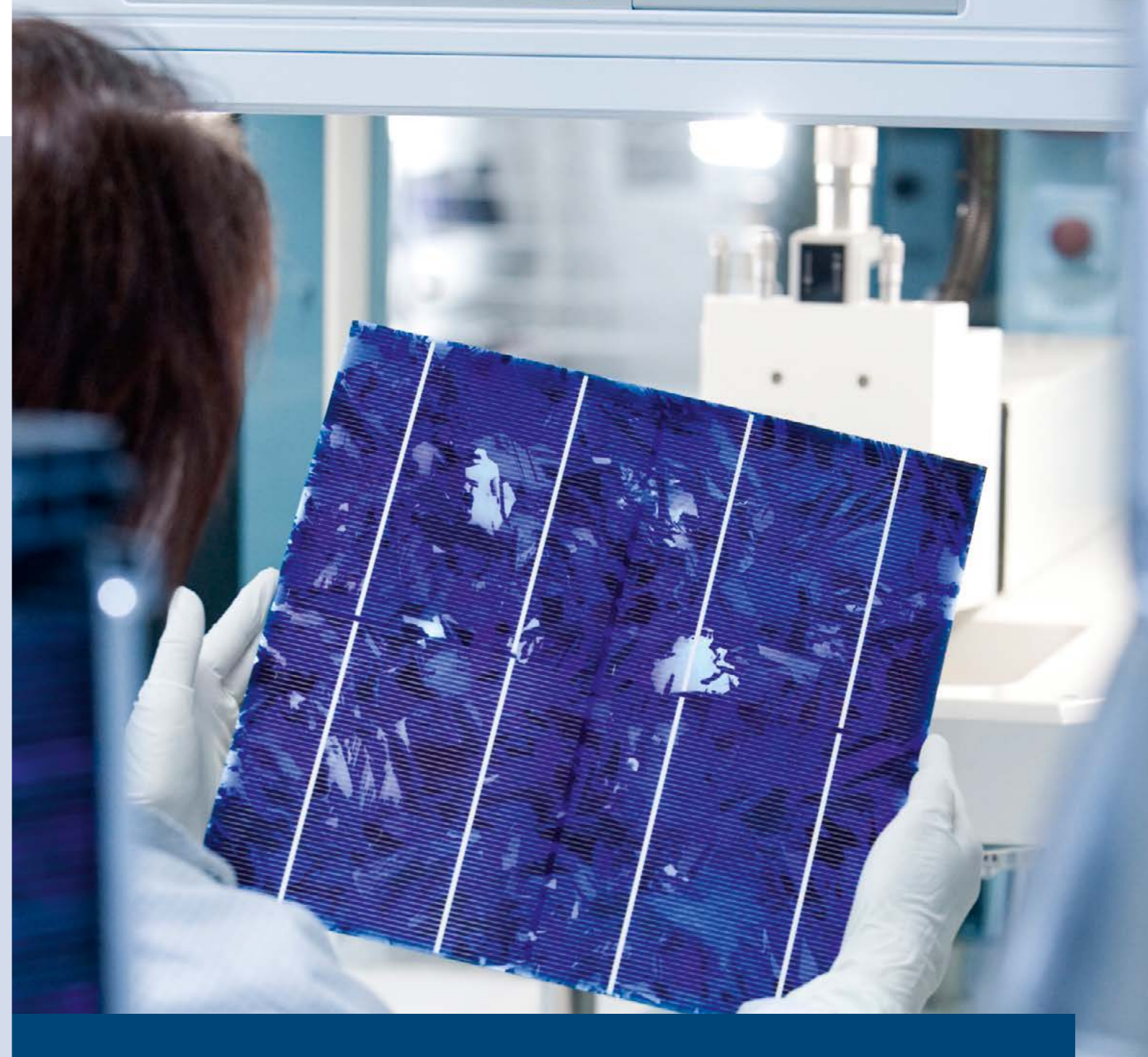
Dans l'objectif d'identifier les inducteurs de coûts dans l'industrie CES, il faut considérer les activités de fabrication de la chaîne de valeur puisque celles-ci sont les premiers facteurs de coûts. Les fabricants de collecteurs solaires utilisent de plus en plus de chaînes de production et de processus optimisés. La réduction des coûts de pro-

duction est drastique et correspond à une courbe évolutive de 15 %. Toutefois, les coûts des matériaux ont déjà grignoté la part d'économies réalisées au niveau de la production. Depuis 1995, leur part dans les coûts totaux est déjà passée de 52 % à 65 %. Il est, par conséquent, important de réduire les coûts tout au long de la chaîne de valeur, en premier lieu et surtout au niveau de l'installation, par exemple, afin de réduire le coût global du système. L'industrie peut contribuer à fournir des systèmes CES à prix abordables. D'une manière générale, la qualité des systèmes CES doit continuer à être améliorée et garantie. Afin de pouvoir exporter vers les marchés européens, l'industrie tunisienne doit s'adapter aux standards européens tels que la norme Solar Key Mark Label. Parallèlement, des marchés ont été créés par le biais du soutien politique. Ainsi, les programmes de subventions déterminent la taille du marché en Europe et dans la région MENA.

Tableau 18 : Processus de fabrication requis pour la production des composants CES

Composant CES	Usinage	Emboutissage	Laminage	Poinçonnage	Soudage (TIG/MIG)	Découpe laser	Fonderie	Cintrage	Sablage	Peinture	Revêtement par enduit	Moulage	Émaillage
Collecteur solaire					X			X		X	X	X	
Cadre du collecteur solaire	X	X			X						X		
Système de montage d'un collecteur	X	X			X						X		
Tuyauterie			X										
Accessoires de tuyauterie		X											
Isolation des tuyaux													
Réservoir de stockage d'eau		X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
Vase d'expansion		X											
Réservoir de refoulement		X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
Échangeur de chaleur		X	X					X				X	
Pompe à eau	X						X						
Brîdes du moteur de la pompe	X	X					X						
Valve hydraulique	X						X						
Valve d'élimination d'air	X						X						
Valve de température (mélangeur)	X	X					X						
Commandes													
électroniques												X	
Jauges de pression	X	X					X						
Jauges de température	X	X					X						
Assemblage - station de pompage													
Séparateurs d'air et de particules	X	X					X						

Source : Navigant 2010, p. 29.



8 Monographie des industries impliquées dans les technologies-cibles

L'objectif de cette section est de présenter un aperçu des industries & segments intimement reliés à l'industrie des composants pour la production de l'énergie solaire. A cette fin, cinq industries ont été identifiées comme étant les plus pertinentes dans leur potentiel apport en composants dans la chaîne de valeur pour l'industrie de l'énergie solaire. Ces industries sont :

- L'industrie de la verrerie (incluant miroiterie)
- L'industrie mécanique & métallurgique
- L'industrie électrique & électronique
- L'industrie chimique.
- L'industrie des Energies Renouvelables a été ajoutée compte tenue de l'existence d'une industrie tunisienne sur les technologies du Chauffe Eau solaire à usage résidentiel & tertiaire, du Photovoltaïque et du CSP.

L'analyse comprend des données générales sur l'industrie ainsi que des données relatives aux segments les plus pertinents à chaque industrie (ex de données : capacité de production, investissements, nombre d'entreprises, structure du capital, taille des entreprises, degrés de certification du secteur...).

8.1 Industrie de la Verrerie

L'industrie de la verrerie est de premier intérêt pour l'étude du potentiel de l'industrie Tunisienne dans la fabrication de composants ER. En effet, le secteur, et plus particulièrement le verre flotté sert à alimenter les technologies CSP, PV et CES (chaîne photovoltaïque, miroir pour CSP, capteurs pour CES).

Le secteur du verre regroupe plusieurs segments:

- La transformation du verre plat pour le bâtiment, l'automobile, la miroiterie et les Meubles;
- La production et la décoration sur verre creux pour l'emballage, le flaconnage, la Verrerie de table, l'ornementation et la lustrerie;
- Autres produits en verre (verre technique et verre securit).

8.1.1 Données globales du secteur ¹

Le Verre est utilisé sous diverses formes et pour différentes applications, allant des verres à boire (segment du verre creux) aux pare-brises des automobiles en passant par le verre plat pour les besoins du bâtiment & de l'ameublement.

Volume du marché

La valeur de la production du secteur de la verrerie a atteint 130,4 M TND en 2008 contre 109 MTND en 2004

enregistrant un taux de croissance annuel moyen (TCAM) de 5%. La production du segment de « transformation de verre plat » est passée de 35,1 MTND en 2004 à 40,1 MTND en 2008, soit un TCAM de 3%.

Investissements

Les investissements dans le secteur sont faibles, représentant uniquement 2 M TND en 2008, soit uniquement 1% des investissements totaux réalisés dans l'industrie de l'IMCCV.

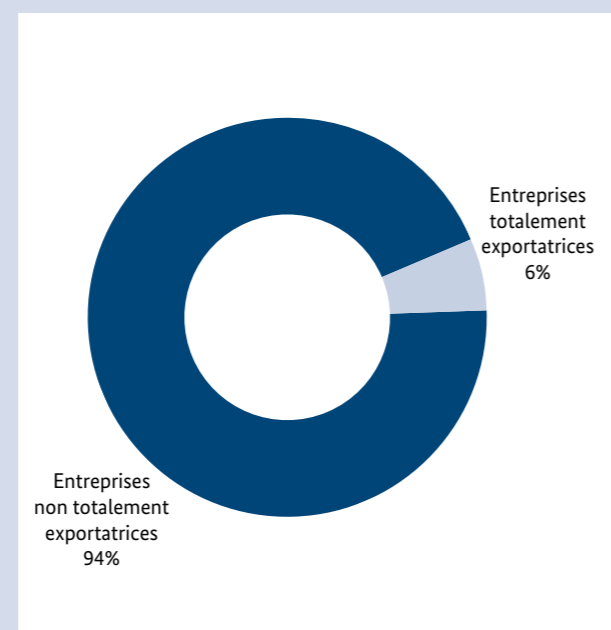
Commerce

Les importations du secteur sont passées de 43 MTND en 2004 à 68,4 MTND en 2008 (TCAM de 12%). Quant aux exportations, elles ont plus que doublées sur la période 2004-2008 en passant de 6 MTND à 15,3 MTND (TCAM de 26%).

Les entreprises du secteur

L'industrie du « verre & articles en verre » compte actuellement 32 entreprises employant 10 personnes et plus. L'effectif total est d'environ 1 500 personnes. L'effectif moyen par entreprise dans le secteur est d'environ 50 employés (APII, Juin 2012).

Figure 63: Répartition des entreprises par régime et par activité



Source : API, Juin 2012

¹ Source : API, BMN, INS

Certifications

Les entreprises certifiées ISO dans le secteur sont au nombre de 5 soit 17% du total des entreprises du secteur (3 entreprises de transformation de verre plat, 1 entreprise de fabrication de verre creux, et 1 entreprise « Autres verres »).

8.1.2 Zoom sur les segments cibles

Dans la présente partie, nous nous intéresserons tout particulièrement aux segments de transformation de verre plat ainsi qu'à celui relatif aux autres produits en verre.

La transformation de Verre Plat:

L'activité de transformation de verre plat consiste en la fabrication du verre feuilleté et du verre trempé (pour les besoins du bâtiment, de l'automobile et de l'ameublement), ainsi que du verre isolant et du miroir (pour les besoins du bâtiment).

Il n'existe pas en Tunisie d'unités de fabrication de verre plat. Les besoins du pays sont totalement couverts par l'importation: l'industrie Tunisienne du verre est donc une industrie de transformation de verre plat et non de production de verre flotté. L'inexistence d'une unité de fabrication de verre plat s'explique par l'investissement lourd que l'activité requière, entre 80 et 100 M TND selon une étude de l'APII. L'étude réalisée pour le compte de la Banque Mondiale² fait quant à elle mention d'un investissement initial de 180 à 200 Million de Dollar pour une unité de fabrication ayant une capacité de production journalière de 600 T. L'inexistence d'une telle unité de production s'explique également par une demande locale actuellement insuffisante pour justifier un tel investissement. En effet, la demande locale en Tunisie ne représente qu'environ 25% de la production d'une unité de fabrication de verre flotté profitable (unité de production, pour laquelle l'output minimal pourrait être estimé à environ 150 000 T / an- Rapport BM).

La demande locale annuelle a été évaluée à 29,000 T en 2006 (APII) et est s'élève actuellement à environ 40,000 T/an, niveau encore trop faible pour justifier la création d'une unité de fabrication de verre plat. Néanmoins, en dépit d'une demande suffisamment importante, les intrants nécessaires à la fabrication du verre plat, le sable ainsi que le gaz naturel sont dors et déjà disponibles dans le pays.

Volume du marché

La production est passée de 35,1 MTND en 2004 à 40,1 MTND en 2008, soit un TCAM de 3%.

² Rapport de la Banque Mondiale : Middle East and North Africa Region Assessment of the Local Manufacturing Potential for Concentrated Solar Power (CSP) Projects, January 2011.

Commerce

En 2008, les importations ont atteint 36 400 T pour une valeur de 23,3 MTND (les besoins du pays étant entièrement couverts par l'import), contre 28 700 T en 2004 et une valeur de 14 MTND, soit un TCAM de 14% en valeur et de 8% en quantité. L'importation de verre plat constitue 9% des importations du secteur IMCCV (INS).

Les entreprises du secteur

Les entreprises industrielles qui transforment le verre plat sont au nombre de 19, pour un effectif d'environ 600 personnes. Parmi elles, une seule entreprise fabrique le miroir d'une façon industrielle (STE TNNE D'EXPLOITATION DE LA MIROITERIE - STEMIR). Deux entreprises transformatrices de verres plats sont en partenariat (Techno Glass employant 42 employés et BTI employant 140 employés). L'effectif moyen par entreprise dans le secteur est d'environ 30 employés. (APII, Juin 2012).

Les autres Verres: Volume du marché

La production de la branche est passée de 27,1 MTND en 2004 à 38 MTND en 2008, soit un TCAM de 10%. (APII)

Commerce

Les importations en valeur de verre securit progressent de façon régulière atteignant 7,7 MTND en 2008 contre 5 MTND en 2004. En quantité, les importations ont atteint 2000 T en 2008, contre 990 T en 2004. (INS)

Les entreprises du secteur

Il y a actuellement 3 entreprises qui fabriquent le verre securit. Elles emploient au total 281 personnes. (APII)

8.2 Industrie Mécanique & Métallurgique (IMM)

Dans l'industrie mécanique & métallurgique la branche métallurgique, plus particulièrement, la branche métallurgique sert à alimenter les technologies CSP, PV et CES (chaudronnerie, tuyauterie, tubes en acier, réservoirs, citernes des CES, structures de support métalliques, conduites, tour métallique, composants BTP classiques...).

L'industrie mécanique & métallurgique regroupe plusieurs segments:

- Sidérurgie, métallurgie & fonderie
- Travail des métaux
- Machines & équipements
- Composants automobiles mécaniques

8.2.1 Données globales du secteur ³

Volume du marché

La valeur de la production des IMM a atteint 3 706 M TND en 2008 contre 2 169 MTND en 2004 enregistrant ainsi un taux de croissance annuel moyen (TCAM) de 14%. La part moyenne de la valeur ajoutée dans la production du secteur durant la période 2004-2008 est de 28%. (APII)

Investissements

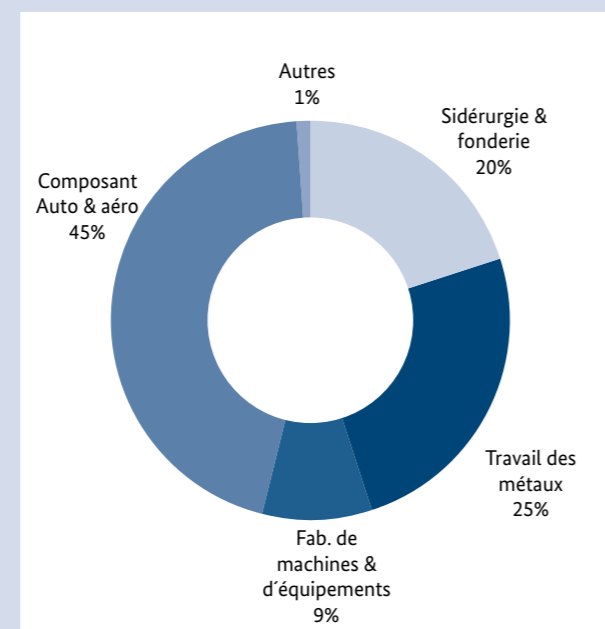
Les investissements réalisés dans le secteur sont passés de 128 MTND en 2004 à 172 MTND en 2008 (TCAM de 8%). Les investissements dans les branches « Sidérurgie, Fonderie et Métallurgie » et « Travail des métaux » sont des investissements lourds ; ensemble, ils totalisent 62% des investissements en 2008 (MDCI).

Commerce

Les importations du secteur sont passées de 3 426 MTND en 2004 à 7 453 MTND en 2008 (TCAM de 21%). Les importations sur la période 2004 - 2008 ont totalisé 24 856 MTND, avec la branche « Machines et équipements » représentant 29% du total, talonné par la branche « Sidérurgie, Fonderie et Métallurgie » avec 27%, suivie par le « Matériel roulant » avec 19%. Les principaux pays fournisseurs de la Tunisie en produits IMM, en 2008, sont l'Italie avec 20% de la valeur des importations, la France avec 20% et l'Allemagne avec 10% (INS).

³ Source : APII, INS, MDCI

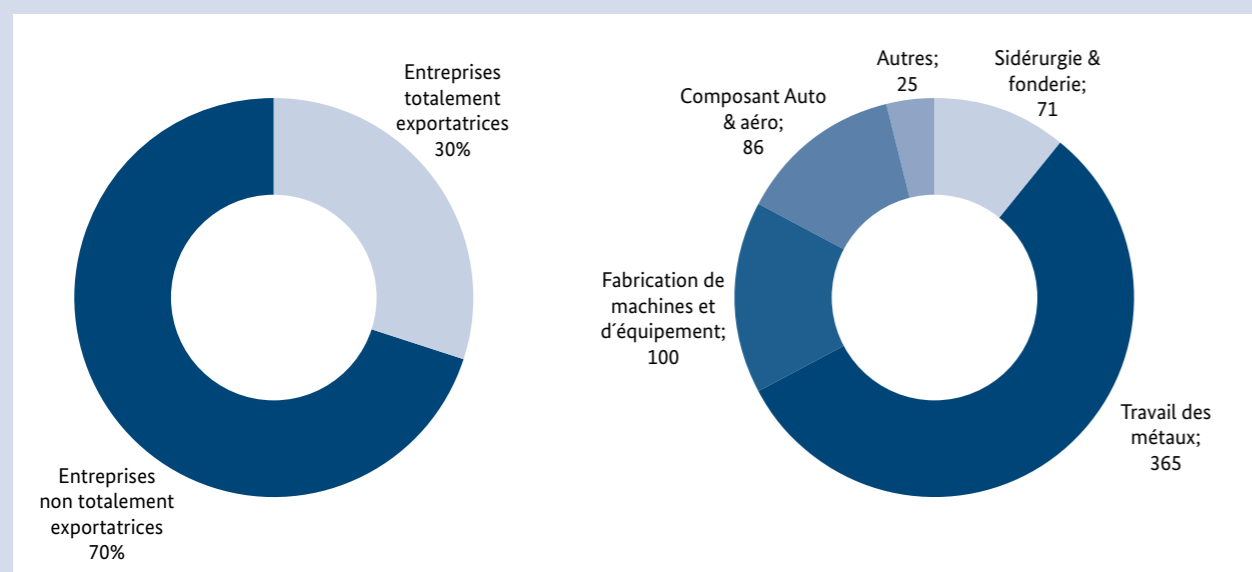
Figure 64: Répartition de la production par segment (% , MTND)



Source: MDCI 2008

Quant aux exportations, elles ont quasiment triplés sur la période 2004-2008 en passant de 694 MTND à 1 928 MTND (TCAM de 29%). Les « Composants automobiles » constitue la branche la plus exportatrice avec une part de 28% (sur le total 2004-2008), suivie de la branche « Sidérurgie, Métallurgie, Fonderie » (24%), puis le « Travail des métaux » (21%). Les principaux clients de la Tunisie en produits IMM, en 2008, sont la France (26% de la valeur des

Figure 65: Répartition des entreprises par régime et par segment



Source : APII, Juin 2012

Source: APII, Nov. 2009

exportations), suivie de l'Italie (14%), de la Libye (11%), et de l'Algérie (9%). (INS)

Les entreprises du secteur IMM

Nombre d'entreprises: Le secteur IMM compte en 2012 plus de 600 entreprises de 10 emplois et plus employant au total environ 38 400 personnes, dont 181 unités totalement exportatrices employant 36% des actifs du secteur. Le secteur IMM représente 10% de l'ensemble des industries manufacturières en nombre d'entreprises et 7% des emplois. L'effectif moyen par entreprise dans le secteur est de plus de 60 personnes (APII, Juin. 2012).

Répartition géographique:

La répartition régionale fait ressortir une concentration d'entreprises dans les Gouvernorats de Ben-Arous, Sfax, Nabeul, Sousse et Bizerte. Ces cinq gouvernorats totalisent 390 unités (68% du total).

Participation étrangère :

- Le partenariat dans le secteur a connu un développement important :
- Le nombre d'entreprises en partenariat a plus que doublé en passant de 81 entreprises en 2001 à 110 en 2005, puis 192 unités en Juin 2012.
- Le nombre d'entreprises 100% étrangères est passé de 25 entreprises en 2001 à 120 entreprises en 2012. Concernant la nationalité des investisseurs, les Français, viennent en première position (participation totale ou partielle de 108 entreprises du secteur), suivis par les Italiens (avec 56 entreprises).

Certifications:

Les entreprises certifiées ISO dans le secteur sont au nombre de 95, soit 17% des entreprises manufacturières certifiées en Tunisie.

8.2.2 Zoom sur les segments cibles

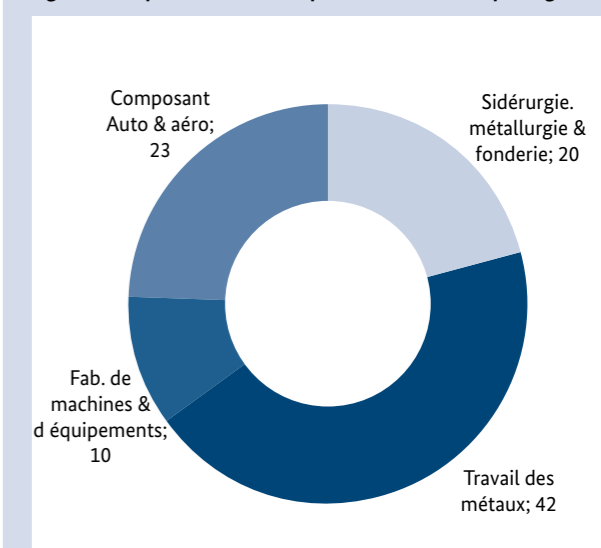
Dans la présente partie, nous nous intéresserons tout particulièrement aux segments de la sidérurgie, métallurgie & fonderie ainsi qu'à celui relatif au travail des métaux.

La sidérurgie, la métallurgie & la fonderie ⁴:

Les produits fabriqués par cette branche sont: Les produits laminés, Les tréfilés, Les cornières et fers plats, La fabrication des tubes, Les pièces en fonte, Les pièces en acier, Les pièces en métaux non ferreux. Le secteur est marqué par la prédominance de l'entreprise nationale EL FOULEDH sur les branches de la Sidérurgie et de la Métallurgie avec la fabrication des produits laminés. Les opérateurs privés se positionnent quant à eux sur le laminage des produits

⁴ Source : APII, INS, MDCI

Figure 66: Répartition des entreprises certifiées ISO par segment



Source: API, BDI

longs, le tréfilage du fil acier, la fabrication de cornières et fers plats en acier et la fabrication d'autres produits sidérurgiques en métaux non ferreux.

Concernant la branche de la Fonderie, GERVAZONI (anciennement SOFOMECA) constitue la plus grande fonderie de fonte et acier de Tunisie. La FMT (Fonderie Moderne de Tunisie) représente également un acteur phare de l'industrie. Ensemble, ces 2 opérateurs accaparent 70 % de la capacité totale de production des pièces en fonte des fonderies tunisiennes.

La production en fonte et en acier en Tunisie est essentiellement destinée à couvrir les besoins du marché local, notamment pour le développement des infrastructures d'assainissement et d'irrigation,... ainsi que pour les besoins des autres industries (composants autos, pièces mécaniques de rechange pour les cimenteries, les unités chimiques et sidérurgiques, la rechange des engins de travaux publics et pour le bâtiment) (APII).

Volume du marché

La valeur de la production du secteur a atteint 671,2 M TND en 2008 contre 366,9 MTND en 2004 enregistrant un taux de croissance annuel moyen (TCAM) de 16%. La part moyenne de la valeur ajoutée dans la production du secteur durant la période 2004-2008 est de 20%. (APII).

La Branche sidérurgique a connu un accroissement considérable de sa capacité de production (TCAM de 16% entre 2004 et 2008), par opposition à la branche de la fonderie (TCAM de 5%) qui elle, a rencontré des difficultés relatives à une demande locale stagnante ainsi que des impor-

tations de produits finis et semi-finis en augmentation (perte de change) (Etude CEPI).

Investissement

Les investissements réalisés dans le secteur sont passés de 20 MTND en 2004 à 166 MTND en 2008 (TCAM de 52%).

Commerce

Les importations en valeur ont connues une nette augmentation entre 2006 et 2008 (TCAM de 43%), principalement en raison de la flambée des prix internationaux de l'acier.

Les importations en produits laminés et alliages légers représentent 90% des importations totales de la branche Sidérurgie, Métallurgie, Fonderie sur la période 2006 – 2008 (APII).

Quant aux exportations, elles se sont élevées à environ 1 200 M TND pour 2008 (80% étant des alliages légers & des produits laminés).

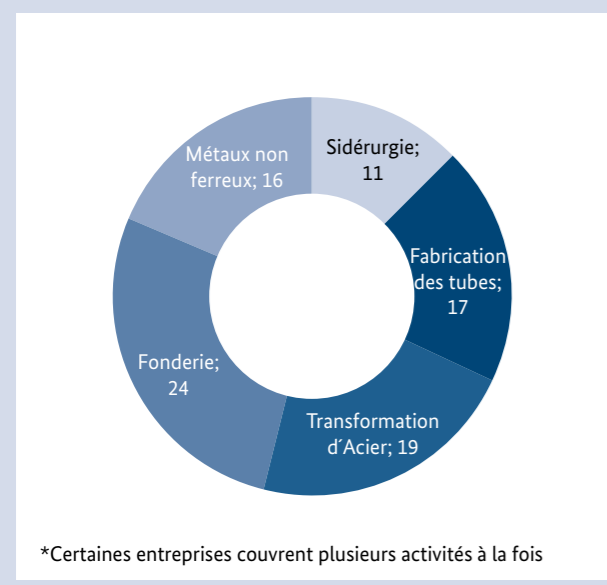
Les Entreprises du secteur sidérurgie, métallurgie & fonderie

Le segment relatif aux activités de sidérurgie, métallurgie & fonderie comporte 71 entreprises (employant plus de 10 pers.) dont 15 sont totalement exportatrices et 20 sont certifiées ISO (soit 28% des entreprises).

Le secteur emploie 5 251 personnes (dont environ 1 000 employées par la société publique EL FOULEDH).

La branche de la fonderie est celle qui présente le plus d'entreprises totalement exportatrices avec 14 entreprises,

Figure 67: Répartition des entreprises par segment



suivi par les branches de Fabrication de Tubes (4 entreprises) et la transformation d'acier (2 entreprises).

Sur les 71 entreprises de la branche, 16 présentent une participation étrangère à leur capital. La France constitue le premier partenaire étranger avec un total de 9 entreprises en partenariat.

Le travail des métaux ⁵:

Les produits fabriqués par cette branche sont les suivants :

- Forge, Emboutissage, Estampage et Métallurgie des poudres ⁶
- Les constructions métalliques ⁷
- Le traitement des métaux ⁸
- Ouvrages en métaux ⁹
- La coutellerie, quincaillerie et outillage.

Volume du marché

La valeur de la production du secteur a atteint 963 M TND en 2008 contre 626 MTND en 2004 enregistrant un taux de croissance annuel moyen (TCAM) de 9%. La Branche des constructions métalliques (branche qui présente un intérêt pour les composants des énergies renouvelables) représente 23% de la production totale du secteur (en valeur).

Investissement

Les investissements réalisés dans le secteur sont assez stables sur la période 2004 à 2008, ils sont d'en moyenne 50 M TND.

⁵ Source : APII, INS, MDCI

⁶ Pièces forgées ou estampées en acier, pièces matricées en métaux non ferreux, pièces métalliques découpées ou embouties et pièces obtenues par friction

⁷ Charpentes métalliques (bâtiments, halles, ponts métalliques,...); Chaudronnerie tuyauterie (réservoirs, citernes, silos, bouteilles pour gaz comprimé, radiateurs pour chauffage central, ...); mécano-soudage (remorque, wagons, socles, bâtis,...) accessoires pour bâtiments (portes, fenêtres, clôtures et grilles métalliques, escaliers,...); mobilier métallique (armoires, coffrets, enceintes, tables,...); fabrication spécifique (grillages, crochets, chaînes, cages,...); montages extérieurs et maintenance (montage d'usine, installations industrielles); tôlerie (bardages, couverture, volet de rideaux métalliques, chemin de câbles,...).

⁸ Traitement et revêtement des métaux (traitement thermique, revêtement métallique des métaux, polissage, revêtement protecteurs et décoratifs des métaux, etc.) ; Opérations de mécanique générale (pièces usinées par enlèvement de matières, reconstruction de moteurs thermiques, pièces métalliques décolletées, etc.)

⁹ Fabrication de fûts et emballages métalliques similaires (bidons, fûts et tonnelets métalliques, tourets métalliques pour câbles, boîtes à conserves, d'emballage pour poisson, de tubes et étuis souples, articles métalliques de bouchage et sur bouchage, etc.) ; Fabrication d'articles en fils métalliques (câbles et tresses métalliques, clous, etc.) ; Fabrication de visserie et boulonnerie, chaînes et ressorts (boulons, vis, écrous, rondelles, chaînes à maillon, ressorts à lames, ressorts hélicoïdaux, barres de torsion, etc.) ; Fabrication d'ouvrages divers en métaux (articles sanitaires).

Commerce

Les importations du secteur ont plus que doublées entre 2004 et 2008, elles sont passées de 420 MTND à 1 039 M TND, la branche quincaillerie & outillage représentant 56% de ces importations (en valeur pour la totalité de la période 2004-2008).

Quant aux exportations, elles se sont élevées à environ 435 M TND pour 2008 (dont plus de la moitié étant relatifs aux constructions métalliques).

Les Entreprises de la branche travail des métaux

Le segment relatif aux activités de travail des métaux comporte 365 entreprises (employant plus de 10 pers.) dont 94 sont totalement exportatrices 42 sont certifiées ISO (soit 11% des entreprises).

Le secteur emploie environ 20.000 personnes.

La branche du traitement des métaux est celle qui présente le plus d'entreprises totalement exportatrices avec 51 entreprises, suivi par les branches de Construction métallique (30 entreprises) et ouvrage des métaux (18 entreprises).

Sur les 365 entreprises de la branche, 97 présentent une participation étrangère à leur capital (dont 64 à capital 100% étranger). La France constitue le premier partenaire étranger avec un total de 51 entreprises en partenariat, suivi de l'Italie avec 19 entreprises.

8.3 Industrie Electrique & Electronique

L'industrie électrique & électronique est de premier intérêt pour l'étude du potentiel de l'industrie Tunisienne dans la fabrication de composants ER. En effet, le secteur, et plus particulièrement la branche des composants électriques et électroniques sert à alimenter les technologies CSP, PV et CES (câblage, module, onduleurs, Equipements Electriques Standards, capteurs solaires...). L'industrie Electrique & Electronique compte deux segments: branche électrique et branche électronique.

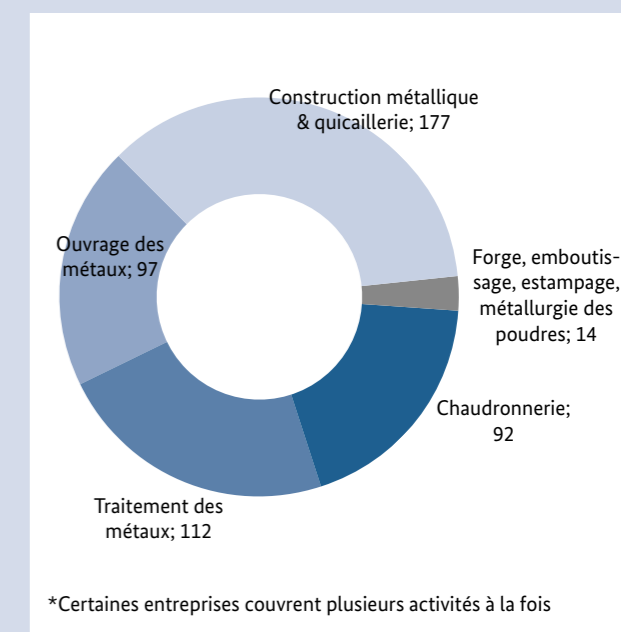
8.3.1 Données globales du secteur ¹⁰

Volume du marché

La valeur de la production du secteur a atteint 4 536 M TND en 2008 contre 2 095 MTND en 2004 enregistrant un taux de croissance annuel moyen (TCAM) de 21%. Les faisceaux de câble accaparent une part importante de la production (en valeur) puisqu'ils représentent 28% de la

¹⁰ Source : APII, INS, MDCI

Figure 68: Répartition des entreprises par segment



Source: API, BDI, Données Juin 2012.

production totale de l'industrie Electrique et Electronique (incluant Electroménagers) (APII).

Investissement

Les investissements réalisés dans le secteur sont passés de 48 MTND en 2004 à 133 MTND en 2008 (TCAM d'env. 23%).

Commerce

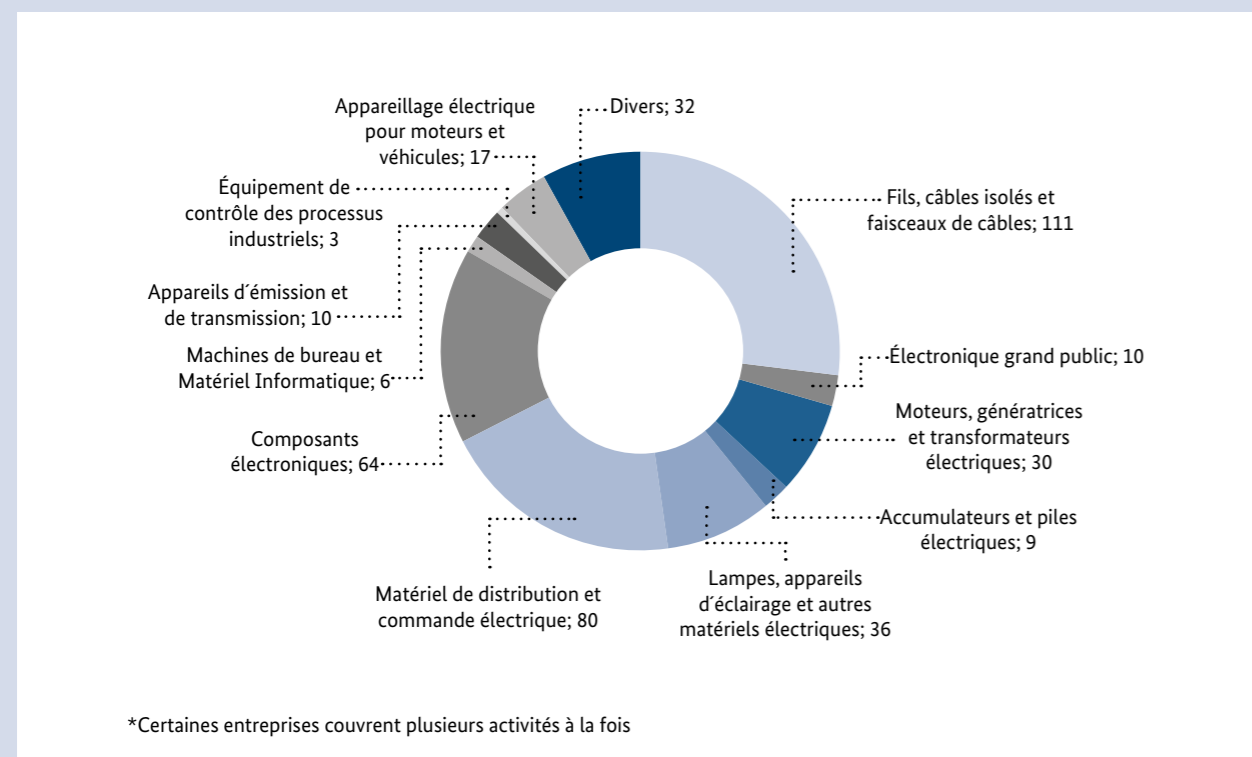
Les importations en valeur ont connues une augmentation constante entre 2004 et 2008, elles sont passées de 2 361 M TND en 2004 à 3 717 en 2008 (TCAM d'env. 10%). Les principaux pays fournisseurs de la Tunisie pour l'industrie Electrique et Electronique (incluant l'Electroménager) sont la France et l'Allemagne.

Quant aux exportations, elles se sont élevées à environ 4 124 M TND pour 2008 (contre 1 831 MTND pour 2004, TCAM d'env. 18%). Les composants auto, le matériel de distribution & de commande ainsi que les parties et composants électriques ont eux seuls accapérés 70% des exports en valeur pour 2008. Les principaux pays de destinations de ces composants ont été la France, l'Allemagne et l'Italie, principalement en raison du nombre de filiales d'entreprises françaises, allemandes et italiennes sur le sol Tunisien avec un régime totalement exportateur.

Les Entreprises du secteur

L'industrie Electrique & Electronique comporte 337 entreprises (employant plus de 10 pers.) dont 240 sont totale-

Figure 69: Répartition des entreprises par segment



Source: APII, BDI, Données Juin 2012

ment exportatrices (soit plus de 70%) et 111 sont certifiées ISO 9000¹¹ (soit le tiers des entreprises de l'industrie Électrique et Électronique ou encore 20% des entreprises manufacturières certifiées en Tunisie - Janv. 2010). Le secteur emploie environ 87 000 personnes (dont environ 78 000 employés par les entreprises totalement exportatrices).

Les branches Fils, câbles isolés et faisceaux de câble ainsi que matériel de distribution & commande électrique et composants électroniques représentent environ 43% des entreprises du secteur. Ces branches totalisent également le plus d'entreprises exportatrices du secteur avec au total 216 entreprises totalement exportatrices. (APII, Juin 2012) Sur les 337 entreprises de la branche, 243 (soit 72%) présentent une participation étrangère à leur capital, dont 164 à capitaux 100% étrangers. La France constitue le premier partenaire étranger avec un total de 99 entreprises en partenariat.

11 Plusieurs entreprises sont également certifiées ISO 14 001, ISO TS 16 949, etc.

8.3.2 Zoom sur les segments cibles

Les composants électriques¹²:

Cette branche couvre des produits diversifiés : moteurs, génératrices, transformateurs électriques, matériel de distribution et de commande électrique, fils et câbles isolés, faisceaux de câbles, accumulateurs et piles électriques, lampes et les dispositifs d'éclairage, appareils de connexion, de commande et de protection, conducteurs nus, isolés et accessoires, machines tournantes et accessoires, Machines statiques et accessoires (voir aussi le paragraphe 10.2.2.3 du présent rapport).

Volume du marché

La valeur de la production du segment a atteint 3 540 M TND en 2008 contre 1 554 M TND en 2004 enregistrant un taux de croissance annuel moyen (TCAM) de 18%. La Branche des fils, câbles et faisceaux de câbles représente 35% de la production totale du secteur (en valeur). (APII)

Investissement

Les investissements réalisés dans le secteur ont considérablement augmentés sur la période 2004 à 2008 (de 28 MTND à 66 MTND), ils sont d'en moyenne 50 M TND/an.

12 Source : APII, INS, MDCI

Commerce

Les importations du secteur sont passées de 1 276 MTND en 2004 à 1 784 M TND en 2008, les branches Appareils de coupure et de commande et Fils, câbles isolés et faisceaux de câbles représentant 52% de ces importations (en valeur pour la totalité de la période 2004-2008). Quant aux exportations, elles ont connu une croissance soutenue sur la période 2004-2008 (+25% en moyenne par an). Elles se sont élevées en 2008 à 2 680 M TND (dont plus de la moitié étant relatifs aux Fils, câbles isolés et faisceaux de câbles).

Les entreprises du secteur

L'industrie compte 215 entreprises (dont env. 150 unités totalement exportatrices). L'emploi créé par la branche est de 46 351 postes (données API, Juin 2012). Les entreprises totalement exportatrices emploient 41 326 personnes, ce qui représente 89% de l'emploi de la branche des industries électriques. L'emploi dans la branche est généré essentiellement par l'activité Fils, câbles isolés et faisceaux de câbles et dans une moindre mesure par l'activité Matériel de distribution et de commande.

Participation étrangère : Le secteur électrique compte 146 entreprises créées par des capitaux 100% étrangers ou mixtes (avec participation étrangère). On y rencontre une forte présence des pays partenaires de la Tunisie : la France (avec 52 entreprises), l'Italie (47 unités) et l'Allemagne (26 entreprises). (APII, Nov 2009).

La branche électronique¹³:

Cette branche couvre des produits diversifiés. Au niveau de cette partie, nous nous intéresserons tout particulièrement aux branches des composants électroniques et des équipements de contrôle des processus industriels.

Investissement

Les investissements réalisés dans la branche électronique¹⁴ sont passés à 20 M TND en 2004 à 67 M TND en 2008.

Commerce

Les importations de la branche ont faiblement augmenté entre 2004 et 2008, elles sont passées de 883 MTND à 1 011 M TND, le segment des composants électroniques représentant près de 2/3 de ces importations (en valeur pour 2008). Quant aux exportations, elles se sont élevées à environ 743 M TND pour 2008 (dont plus des 2/3 étant relatifs aux composants électroniques). La France constitue la première destination des produits électroniques fa-

13 Source : APII, INS, MDCI

14 Les investissements inclus également l'Électronique grand public, les appareils d'émission et de transmission, & les machines de bureau et matériel informatique.

briqués en Tunisie en 2008 (avec 61%), suivi de l'Allemagne et de l'Italie avec respectivement 12% et 10%.

Les Entreprises de la branche

Le segment comporte 67 entreprises (employant plus de 10 pers.) dont 60 sont totalement exportatrices. Le segment emploie environ 13 500 personnes (l'activité Composants électroniques génère environ 98% de ces emplois).

8.4 Industrie Chimique

L'industrie chimique et plus particulièrement les branches de l'industrie plastique servent à alimenter les technologies CSP, PV et CES (Fabrication de films pour panneaux photovoltaïques, connecteurs automatiques pour la boîte de jonction des modules solaires, boîtes de jonction pour modules photovoltaïques, inter-connecteurs câbles photovoltaïques...). L'industrie chimique regroupe plusieurs branches ou segments dont les principaux sont les suivants:

- L'industrie du plastique
- Savons, détergents & produits d'entretien
- Les industries pharmaceutiques
- L'industrie du caoutchouc & pneumatique
- L'industrie chimique de base
- L'industrie chimique de base
- Autres produits chimiques

8.4.1 Données globales du secteur¹⁵

Le secteur des industries chimiques en Tunisie est une industrie de transformation de matières premières, soit locales (ex : phosphate), soit importées (ex : Industrie des caoutchoucs, secteur Pharmaceutique, etc.).

Nombre d'entreprises

L'industrie du chimique compte 514 entreprises employant 10 personnes et plus. L'effectif total est d'environ 43 000 personnes dont environ la moitié relève des entreprises totalement exportatrices, qui représentent un quart du tissu des ind. Chimiques (APII, Juin 2012). Les structures totalement exportatrices sont donc nettement plus grandes en termes de taille que les structures non totalement exportatrices. En termes de segment, l'industrie est dominée par les entreprises opérant dans l'industrie du plastique (représentant 51% des entreprises). L'effectif moyen par entreprise dans le secteur est d'environ 80 employés.

Participation étrangère

Le nombre d'entreprises à participation étrangère est de 167 (32% des entreprises du secteur) dont 87 sont à capi-

15 Source : APII, INS, MDCI

taux 100 % étrangers. Avec 88 entreprises en partenariat, la France constitue le premier pays partenaire de la Tunisie. L'Italie et l'Allemagne sont respectivement deuxième (avec 40 entreprises) et troisième (avec 10 entreprises). (APII, Juin 2012)

8.4.2 Zoom sur les segments cibles

Dans la présente partie, nous nous intéresserons tout particulièrement au segment des composants plastique (voir aussi le paragraphe 10.2.2.4 du présent rapport).

Les composants Plastiques ¹⁶:

L'industrie plastique tunisienne sert principalement à alimenter les secteurs suivants : Construction électrique, l'industrie automobile, le Bâtiment, ainsi que les Equipements industriels et l'emballage. Dans cette partie, nous nous intéresserons à la branche des articles plastiques utilisés dans plusieurs composants CSP, PV et CES c'est-à-dire les composants entrants comme accessoires ou éléments supports de composants électriques (exemples : commodos, connectiques, boutons poussoirs...)

Volume du marché

La valeur de la production du segment a atteint 70 M TND en 2008 contre 5 MTND en 2006 enregistrant un taux de croissance annuel moyen (TCAM) de 141%. La Branche des fils, câbles et faisceaux de câbles représente 35% de la production totale du secteur (en valeur). (APII)

Investissement

Les investissements réalisés dans la branche sur la période 2006 à 2008 ont représentés 15,6 M TND. Ces investissements ont été des investissements d'extension et ont concernés 5 entreprises de la branche.

Commerce

Les importations de la branche sont passées de 10 MTND en 2006 à 69 M TND en 2008. ¹⁷ Quant aux exportations, elles ont connue une croissance soutenue sur la période 2006-2008. Elles sont passées de 5 MTND en 2006 à 70 MTND pour 2008.

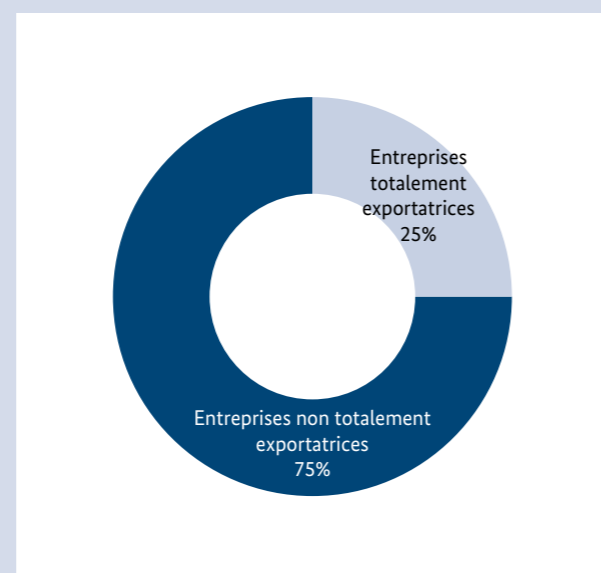
Les entreprises du secteur

L'industrie compte 18 entreprises (dont la plupart, soit env. 17 unités totalement exportatrices). L'emploi créé par la branche est de 1 750 postes (données APII, Mai 2009). Le nombre d'entreprises certifiées s'élèvent à 15 entreprises

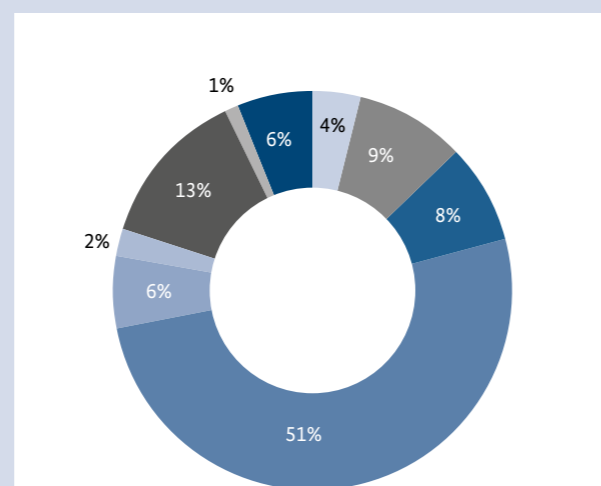
¹⁶ Source : APII, INS, MDCI

¹⁷ Note de l'APII : Il est difficile de cerner les importations des composants plastiques du fait de la multitude de produits. Les chiffres émanent donc des statistiques (Doti) des entreprises du panel plutôt que de la base statistique nationale INS.

Figure 70: Répartition des entreprises par régime et par activité



Source: APII, Juin 2012



- Ind. chimiques de base
- Ind. Pharmaceutiques
- Peintures, colles, résines et encres
- Ind. du plastique
- Ind. du caoutchouc et pneumatiques
- Produits agro-chimiques
- Savons, détergents, produits d'entretien, parfum et produits cosmétiques
- Raffinage de pétrole
- Autres produits chimiques (huiles essentielles, gaz industriels, explosifs)

Source: APII, Juin 2012

(soit 83% du total). Concernant les types de certifications obtenues : 9 entreprises ont une certification ISO TS 16949, 11 entreprises sont certifiées ISO 9001, et 2 entreprises certifiées ISO 14 001.

8.5 Industrie des Energies Renouvelables

8.5.1 Le marché du Chauffe Eau Solaire en Tunisie

Un marché qui a connu différentes vagues de croissance

En Tunisie, le marché du Chauffe Eau Solaire (CES) est né au début des années 80 avec le démarrage de la fabrication de CES par la Société Publique Serept Energie Nouvelle (SEN). Le marché n'a malheureusement pas rencontré le succès escompté en raison d'un manque de maîtrise technologique, ainsi que du manque de compétitivité des prix pratiqués (en effet, le coût initial d'acquisition du chauffe-eau solaire est nettement plus élevé que les chauffe-eau conventionnels). Le marché est ainsi passé d'env. 5 000 m² / an de capteurs installés à la fin des années 80s à quelques centaines vers le milieu des années 90s (voir aussi chapitre 6.2).

C'est dans ce contexte que le Gouvernement Tunisien a décidé de lancer un vaste programme de redynamisation de l'industrie dans le but d'insuffler une croissance au secteur. Ainsi en 1995, une subvention à l'achat de CES (à hauteur de 35%) est mise en place, grâce au financement du Fonds pour l'Environnement Mondial ou FEM (6,6 millions USD) : il s'agit du projet GEF. Ce dernier a rencontré un franc succès dans la mesure où il a permis de redyna-

miser le secteur, de redorer l'image de la technologie du solaire, et surtout de favoriser l'émergence d'un véritable tissu industriel d'opérateurs de l'industrie du solaire (aussi bien fabricants que distributeurs). Le secteur a tout de même connu une baisse de la demande en 2001, le programme de subvention venant à sa fin (la diffusion du CES est ainsi passé de 18 000 m² en 2001 à 8,000 m² en 2004). ¹⁸

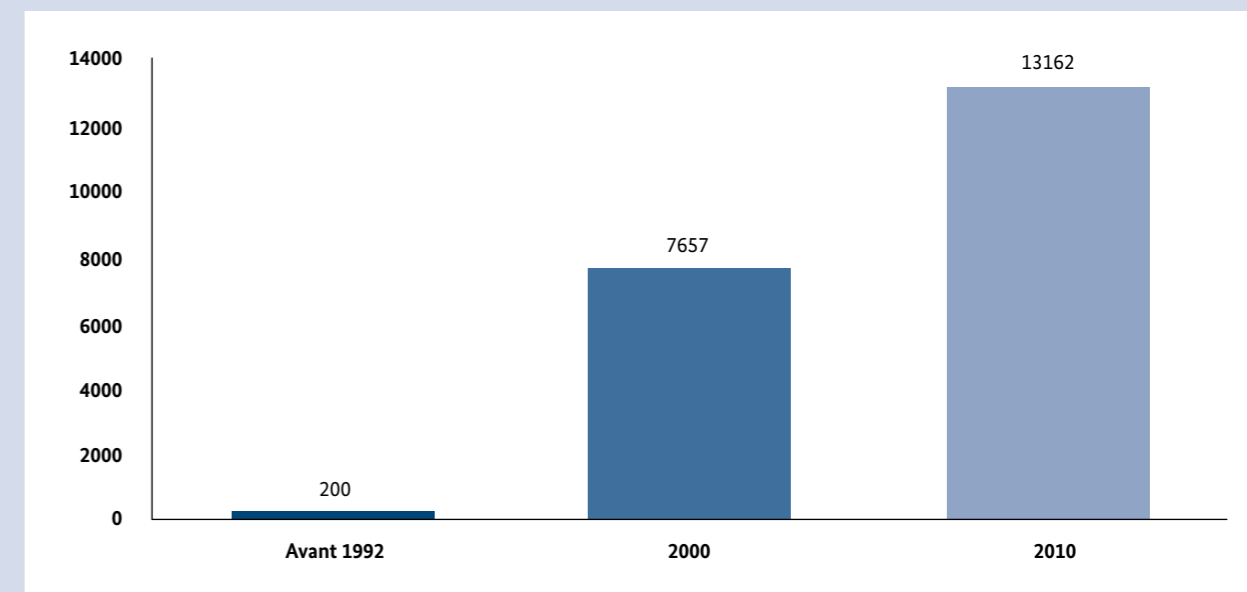
Conscient de la nécessité d'une redynamisation du secteur, le Gouvernement a ainsi décidé de lancer, en 2004, le programme Prosol ayant permis une augmentation significative de la surface de capteurs solaires installés. Puis, avec le lancement en 2007 du programme Prosol 2, allouant un crédit allant jusqu'à 1 150 dinars pour l'installation d'un chauffe-eau solaire, le marché a connu un essor considérable. La surface cumulée de capteurs installés a ainsi plus que triplé entre 2005 et 2010 passant d'environ 150 000 m² à 490 000 en 2010 (source : ANME) est atteinte une moyenne d'installation de 81 000 m²/an durant les années de 2008 à 2010.

Une industrie largement dominée par les installateurs de CES

Vue d'ensemble : Le secteur compte actuellement environ 45 sociétés qui œuvrent dans le secteur de l'énergie solaire. Parmi elles, seules 7 sont des fabricants & assembleurs de CES. Les autres sont des importateurs de cette technologie et constituent ainsi des distributeurs de CES, représentant

¹⁸ Source: Chauffe-eau solaires en Tunisie : le programme PROSOL, papier de Rafik Missaoui

Figure 71: Evolution du nombre de ménages électrifiés via énergie PV en Tunisie



Source: ANME

plusieurs fournisseurs étrangers. Les services offerts par ces opérateurs se limitent généralement à l'installation et au Service Après Vente.

Certains des fabricants présents en Tunisie sont d'envergure internationale et profitent ainsi de l'assise offerte par le marché tunisien pour se positionner sur le marché régional, maghrébin et africain. A titre d'exemple, SOFTEN exporte vers la France y compris les Dom Tom (Caraïbes...), l'Espagne, l'Italie et l'Afrique du sud.¹⁹

Le marché du Photovoltaïque en Tunisie

En Tunisie, le marché du Photovoltaïque est né il y a de cela 30 ans (au début des années 80) avec la première centrale photovoltaïque de Hammam Biadha en vue d'assurer l'électrification des postes frontaliers isolés. Les applications du photovoltaïque se sont par la suite diversifiées pour couvrir l'éclairage public, l'éclairage domestique, l'alimentation des stations Telecom ou encore le pompage solaire.

Dynamisé par le programme PROVOLT, le marché du photovoltaïque se traduit en Tunisie par l'Électrification de 13 000 ménages, 200 écoles rurales ainsi que diverses infrastructures (des dispensaires, des postes frontaliers, des relais de télécommunication, des plages, des parcs...). (Source : ANME)

Un secteur naissant du point de vue de la fabrication locale de panneaux photovoltaïques

NR-SOL constitue le premier fabricant tunisien de modules solaires photovoltaïques (utilisant la technologie du silicium cristallin) et le premier fabricant en termes de capacité de production dans l'Afrique du Nord. Son usine, située à Zaghuan et dont l'inauguration a eu lieu en Dec. 2011, prévoit une capacité de production annuelle de 25 Mégawatts et la création de près de 4 000 emplois directs et indirects (production, installation, ...).

AURASOL, le deuxième fabricant de panneaux photovoltaïque en Tunisie, fut créée en avril 2011, et ce par la société luxembourgeoise SolarWood Folkendange. L'investissement initial de la mise en place de son site de production, situé à Béja (Oued Ezarga), est estimé à 2.480.000 dinars. Avec un portefeuille produit diversifié (modules verre-verre, de modules triangulaires ou de modules colorés) et une large gamme de panneaux spécifiques allant de 20 à 60 cellules avec des efficacités différentes allant de 135wp à 270wp, ce fabricant tente de bien se positionner aussi bien sur le segment du résidentiel que du professionnel.

8.5.2 Le marché du CSP en Tunisie (potentiel)

Durant ces dernières années, l'Union Européenne a mis en place une série d'initiatives pour encourager l'utilisation des énergies renouvelables. L'institution s'est ainsi engagée, d'ici à 2020, à couvrir 20% des besoins énergétiques de l'UE, via des sources propres, impliquant ainsi que 34% de l'électricité fournie proviendra de sources renouvelables. Aujourd'hui, les pays de l'UE sont bien en deçà de cet objectif laissant présager que le rythme de la mise en place de l'Initiative pour les pays membres tendra à s'accélérer dans les années à venir. Le marché Européen regorge ainsi d'opportunités pour les pays exportateurs d'énergies propres. La Tunisie, avec ses excellentes ressources solaires souhaite ainsi s'inscrire dans cette dynamique (voir aussi chapitre 4.2).

C'est dans ce cadre que le projet TuNur a vu le jour (Joint Venture entre Nur Energie Ltd et des investisseurs Tunisiens avec pour chef de fil : Top Oilfield Services, projet promu par la fondation Desertec²⁰). Le projet consiste en l'exportation d'énergie solaire de la Tunisie vers l'Europe via le développement de centrales solaires thermiques (technologie CSP) à grande échelle dans le sud Tunisien (puissance cible de 2 000 MW) et d'un câble trans méditerranéen (câble HVDC) reliant la Tunisie à l'Italie. Le projet constitue un investissement total de 10 Milliards d'Euros à réaliser sur 6 ans.

Le lancement de la première phase du projet est planifié pour 2014 (horizon à la fin duquel 825 000 miroirs seront installés dans le désert tunisien) avec pour objectif de commencer à exporter l'électricité vers l'Europe à partir de 2016. Le projet prévoit la création de 1500 emplois directs et de 20,000 emplois²¹ indirects résultant aussi bien de la phase de construction que celle de l'exploitation.

(Cette analyse a été réalisée dans le but de donner un bref aperçu sur le paysage sectoriel actuel (secteurs et segments ciblés) et ce, dans la limite des données disponibles auprès des sources de données publiques).

²⁰ Projet lancé en 2008 parallèlement au Plan Solaire Méditerranéen (PSM) et soutenu par 56 financiers et industriels (parmi eux: E.ON, RWE, Deutsche Bank, Munich Re, Saint-Gobain-Solar, ...) regroupés au sein de la DII (Desertec Industrial Initiative). Le projet Desertec vise la production de 100 GW d'électricité renouvelable au Maghreb et au Moyen-Orient à l'horizon 2050, et l'exportation d'une partie de cette électricité vers l'Europe, pour environ 15 % de ses besoins.

²¹ Source : www.tunur.tn

¹⁹ Source: Interview d'Omar Ettaieb, DGA, 2010



9 Analyse du potentiel de production des composants pour l'énergie solaire

La présente section du rapport vise à exposer les grandes lignes de la méthodologie adoptée pour la réalisation de la phase de la collecte et de l'analyse des données du projet d'étude du potentiel de l'industrie Tunisienne pour la production locale d'équipements des énergies renouvelables.

9.1 Objectifs de la phase de collecte & d'analyse de données

Cette phase du projet a pour principal objet de collecter, auprès des entreprises et institutions cibles, les informations nécessaires à l'évaluation du potentiel de la Tunisie en termes de fabrication d'équipements des énergies renouvelables ainsi qu'à l'identification des axes clés de son amélioration. L'objectif de cette phase est de :

- Evaluer les capacités actuelles et potentielles (financières, technologiques, recherche & développement et expérience internationale & partenariats) des entreprises opérants en Tunisie pour les composants des installations PV, CSP, et solaire thermique. Cette évaluation se fondera essentiellement sur les informations collectées lors de la phase d'enquête et visite sur site ;
- Evaluer le degré de collaboration et de synergies entre les structures d'appui et les industriels locaux notamment en termes de capacités de R&D. Cette analyse se fera à travers la conduite d'entretiens directs avec les institutions dont l'activité concoure au périmètre du projet d'étude du potentiel de l'Industrie Tunisienne pour la production locale d'équipements énergies renouvelables
- Identifier les composants ayant un potentiel réalisable (de court, moyen et long termes) en Tunisie et ce pour toutes les technologies cibles, c.-à-d. celles du PV, CSP et des technologies solaires thermiques pour la production d'eau chaude et la chaleur de processus industriel
- Identifier le besoin de soutien et d'accompagnement requis par les industriels et les structures d'appui afin de renforcer le potentiel local de fabrication des composants des énergies renouvelables
- Proposer des axes de recommandation pour l'amélioration du potentiel de l'Industrie Tunisienne pour la production locale d'équipements énergies renouvelables et ce, par thématique clés : politiques incitatives, sources de financement, formation, certifications...

Démarche de la phase de collecte & d'analyse de données

La démarche de cette phase s'articule autour de deux principaux axes :

(1) La collecte de données se décline en six étapes :

- L'élaboration de l'approche de sélection de l'échantillon cible
- La préparation des outils de collecte de données

- La conduite des entretiens et la collecte des données
- La Short-list des entreprises à visiter présentant un important potentiel quant à la production d'équipements des énergies renouvelables et visite sur site
- La conduite d'interviews avec les institutions cibles.

(2) L'analyse de données se décline en deux volets :

L'évaluation du potentiel (sur les court et moyen termes) que représentent les industriels présents en Tunisie quant à la fabrication de composants des énergies renouvelables (notamment en termes de capacités financières, techniques, R&D, expérience internationale/partenariats et structure d'appui)

9.1.1 Approche de sélection des échantillons cibles

Afin de s'assurer de la pertinence de l'échantillon quant aux objectifs de la présente enquête, la démarche de sélection s'est basée sur l'adoption simultanée de deux approches différentes: l'approche Bottom-up et l'approche Top-down.

(1) L'échantillon initial des entreprises (Approches Bottom Up & Top Down):

L'échantillon initial de l'enquête est constitué de 141 entreprises industrielles et de 9 institutions étroitement reliées au secteur des Energies Renouvelables.

L'approche Bottom-up trouve sa source dans la base de données des 1 520 entreprises de l'APII¹ et a permis d'exploiter, d'une façon optimale, les informations mises à disposition par les différentes sources de données auxquelles nous avons eu accès (APII, CTMCCV, FEDELEC...). A son issue, 133 industriels opérant au niveau des secteurs de la Verrerie, la Mécanique & Métallurgique, l'Electrique & l'Electronique, la Chimie et les Energies Renouvelables, ainsi que 9 institutions étroitement reliées à l'activité des Energies Solaires, ont été sélectionnés.

L'approche Top-down trouve sa source dans la lise des 500 entreprises les plus performantes² de l'année 2011 (en termes de chiffre d'affaire pour l'année 2010). Elle vise à identifier les acteurs (entreprises et/ou groupes) majeurs du tissu économique Tunisien prédisposés, compte tenu de leur assise financière, à s'engager et à investir dans la

1 La base de données de l'APII représente la population mère de cette enquête. Elle est constituée de 1 520 entreprises Industrielles opérant au niveau des secteurs suivants : Industries mécaniques et métallurgiques, Industries chimiques, Industries électriques, électroniques et de l'électroménager, Industries du verre.

2 En se référant aux données communiquées par la revue économique annuelle "l'Economiste Maghrébin" de l'année 2011

production de composants des énergies renouvelables. Elle a ainsi, permis de sélectionner, à partir de la liste des 500 acteurs les plus performants, 8 entreprises supplémentaires bénéficiant du plus important potentiel de développement dans les Energies renouvelables. Les deux approches ont permis l'identification des 150 acteurs à contacter.

(2) L'échantillon initial des institutions

Le recours à l'approche Bottom-up (cf. annexe 1) a permis d'intégrer 9 institutions Tunisiennes dont l'activité concoure au périmètre du projet. L'objectif de cette intégration est d'étudier la nature de la relation entre ces structures d'appui et les industriels opérant au niveau des secteurs cibles afin d'évaluer le besoin de soutien et d'accompagnement requis au renforcement du potentiel Tunisien en matière de fabrication des composants des énergies renouvelables (pour la liste complète des institutions, voir annexe). Partant de là, trois catégories d'institutions ont été ciblées :

Les centres de recherche: Le Centre de Recherche et des Technologies de l'Energie de Borj Cedria (CRTE) a été identifié comme acteur majeur de la recherche dans les énergies solaires. Il a pour principale mission d'assurer une veille technologique en termes de R&D dans les domaines reliés au secteur solaire.

Les centres techniques: Trois centres techniques figurent au niveau de l'échantillon final des acteurs à interroger. Il s'agit du Centre Technique des Matériaux de Construction, de la Céramique et du Verre (CTMCCV), du Centre Technique des Industries Mécaniques et Electriques (CETIME) et du Centre Technique de la Chimie (CTC). Ils assurent des missions relatives à la normalisation, au contrôle technique/qualité et à l'assistance technique.

Les établissements universitaires et laboratoires de recherche: Trois établissements universitaires et laboratoires de recherche ont été identifiés comme acteurs phares de la recherche en Energies Renouvelables. Il s'agit de l'Ecole Nationale d'Ingénieurs de Monastir, l'Ecole Nationale d'Ingénieurs de Tunis et l'Ecole Nationale d'Ingénieurs de Sfax. Tandis que l'activité des établissements ciblés se focalise essentiellement sur l'enseignement et la formation dans des domaines reliés au secteur des énergies renouvelables, les laboratoires de recherche sont dédiés aux activités de modélisation et d'étude des systèmes énergétiques.

Les laboratoires de test: Un laboratoire de test à été ciblé par cette enquête : le laboratoire Central d'Analyses et d'Essais. Il a comme principal mission de tester l'innocuité et la sécurité des matières premières utilisées pour la fabrication des produits solaires.

Les pôles de compétitivité: La Technopole de Sousse est l'unique pôle de compétitivité qui figure au niveau de l'échantillon final de cette enquête. Elle a été ciblée car elle

inclut une Ecole d'ingénieurs, un centre de recherche et un centre de ressources technologiques (CRT).

9.1.2 Description de l'échantillon des acteurs interrogés

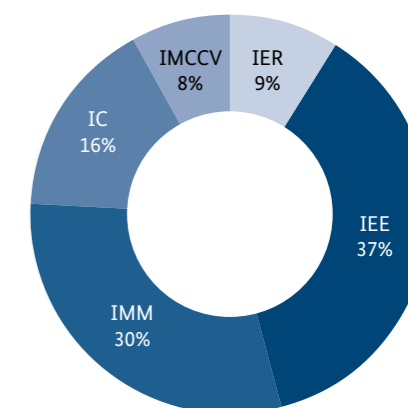
L'échantillon final des acteurs interrogés est constitué de 81 (entreprises et institutions). Dans ce qui suit, nous présenterons un bref descriptif de sa composition (secteur d'activité, taille, régime partenariat, etc...).

Nombre d'acteurs: Le nombre total des institutions interviewées est de 7 (ce qui représente 9% de l'échantillon final) résultant d'un taux de réponse d'environ 78%. Le nombre total des industriels interrogés dans le cadre de cette enquête s'élève à 74, soit 91% de la taille totale de l'échantillon final. Ce nombre, résulte d'un taux de réponse d'environ 52,5% sur une base total de 141 entreprises ciblées.

Secteur d'activité:

- En termes de distribution sectorielle, les Industries Electriques, Electroniques et de l'Electroménager ainsi que l'industrie Mécanique et Métallurgique représentent plus des deux tiers de la population finale des entreprises interviewées.
- Les secteurs des Matériaux de Construction, de la Céramique et du Verre et des Energies Renouvelables représentent 17,5% du nombre total des industriels interrogés.
- Cette distribution sectorielle de la population finale est allignée à celle de l'échantillon initial (voir annexe 4).

Figure 72: Répartition de l'échantillon final par secteur d'activité



Taille:

- Conformément aux approches de sélection choisies (Bottom-up et Top-Down), l'échantillon final de la présente enquête répond à l'un des critères majeurs de sélection : une taille significative.
- Ainsi les 2/3 des industriels interrogés emploient plus de 100 employés contre une minorité de 7% employant moins de 20 personnes et qui opèrent essentiellement au niveau du secteur des Energies renouvelables.

Régime d'activité:

- Le nombre d'entreprises exportatrices est de 68 (environ 92% du nombre total des entreprises interrogées) dont près de la moitié ont un régime 100% exportateur et 45% avec un régime partiellement exportateur.
- Le nombre d'entreprises non exportatrices représente 8% (6 entreprises interrogées) du pool final interrogé. Tandis que la moitié de ces entreprises opère au niveau du secteur des Matériaux de Construction, de la Céramique et du Verre, l'autre moitié opère au niveau des industries Mécaniques et Métallurgiques.

Partenariat étranger:

- L'échantillon final est à la fois constitué d'entreprises 100% Tunisiennes que d'entreprises à participation étrangère.
- Les entreprises à participation étrangère présentent plus de la moitié de l'échantillon final interviewé.

Figure 73: Répartition de l'échantillon final par effectif employé

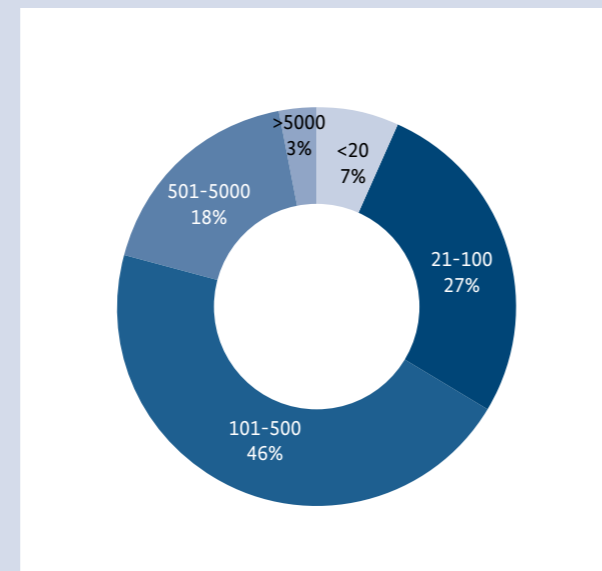


Figure 74: Répartition de l'échantillon final par régime d'activité

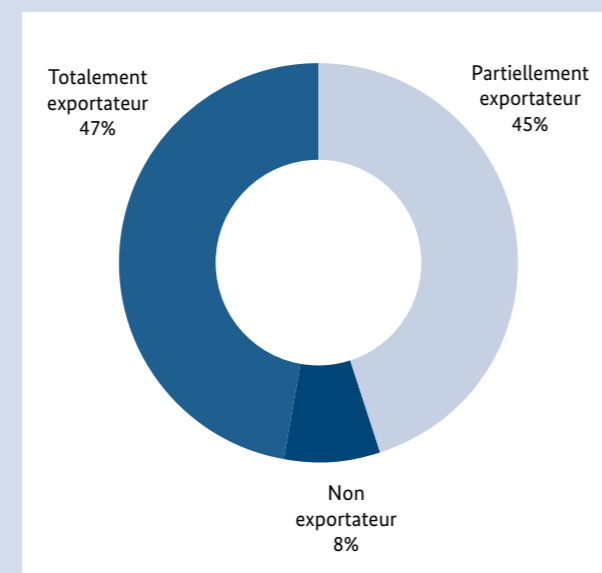


Figure 75: Répartition de l'échantillon final par participation étrangère Vs locale

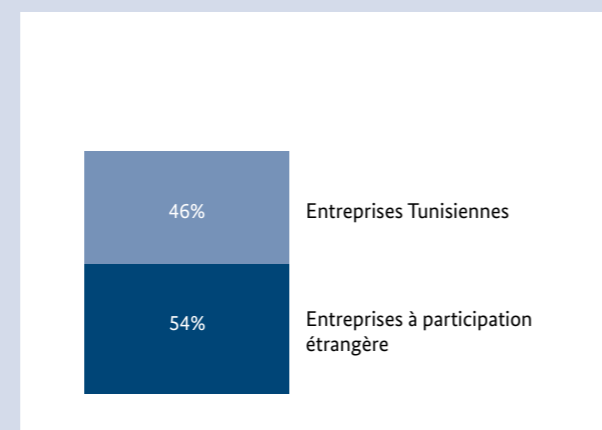
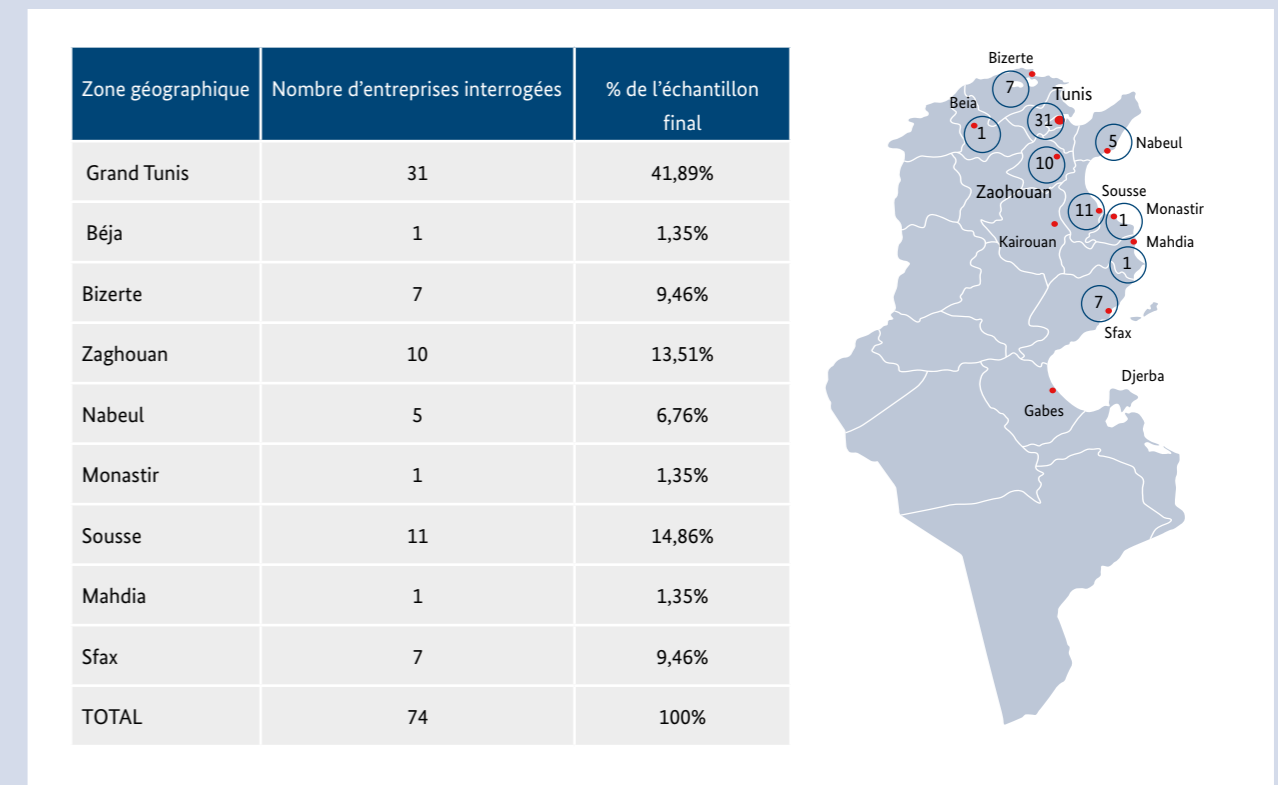


Figure 76: Cartographie des acteurs interrogés par région



Cartographie des acteurs par région:

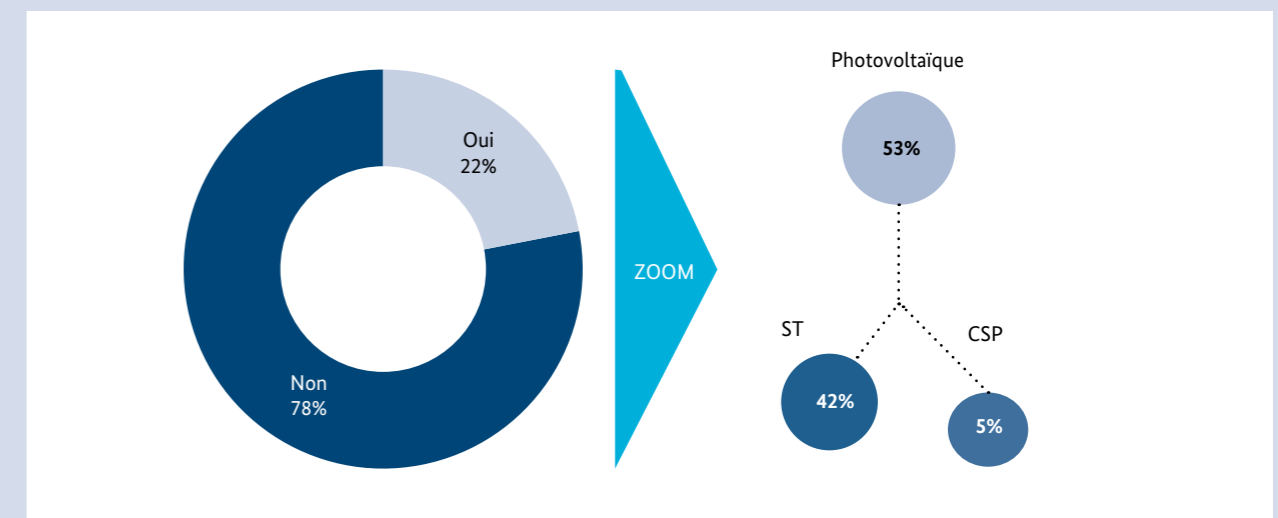
Cette cartographie a comme objet de servir comme un instrument de lecture transversale de l'implantation géographique des acteurs interrogés sur le territoire tunisien.

Cartographie des acteurs par Technologie:

L'objectif de cette cartographie est de dresser un état des lieux de l'implication directe ou indirecte, par technologie, des acteurs interviewés, dans le secteur solaire.

- Le nombre d'entreprises impliquées (directement ou indirectement) dans le secteur solaire est de 16, ce qui

Figure 77: Cartographie des acteurs interrogés par technologie



représente environ 22% de l'échantillon final, contre une majorité de 78% qui sont actuellement non actifs au niveau de ce secteur.

- Parmi les entreprises impliquées, la cartographie dressée, par technologie, révèle que plus de la moitié (53%) sont présentes au niveau du segment du Photovoltaïque, 42%. Toutefois, un seul répondant déclare être actif dans le CSP uniquement pour les activités d'installation.

9.1.3 Visites sur site

L'objectif de la phase visite est de faire un zoom sur les capacités technologiques, financières, organisationnelles et managériales des entreprises sélectionnées via des entretiens avec le management et des visites des usines.

- Ces visites nous ont permis d'échanger avec le top management des entreprises short-listées sur :
 - Les contraintes et les facteurs de motivation pour se positionner sur le secteur des composants solaires
 - Les orientations stratégiques de l'entreprise en termes de développement de produits et de positionnement sur des nouveaux marchés
- La perception des interviewés quant au secteur des composants solaires

Pour sélectionner les entreprises à visiter, nous avons procédé en deux phases:

(1) Une analyse quantitative basée sur une grille d'évaluation:

Afin de rationaliser la sélection des entreprises à visiter, un modèle de scoring a été élaboré. La logique de ce modèle d'évaluation permet de favoriser les entreprises ayant le plus grand potentiel de positionnement sur le secteur des composants solaires. En effet, la pondération des questions a été faite de manière à ce que les entreprises ayant les capacités technologiques, financières, organisa-

tionnelles et managériales les plus matures seront sélectionnées. En contre partie, les entreprises moins matures seront écartées. L'application de la grille sur l'ensemble de l'échantillon interviewé a permis d'avoir un premier classement des entreprises par secteur d'activité.

(2) Une analyse qualitative basée sur une batterie de critères :

Les certifications internationales dont bénéficient le ou les produit(s) de l'entreprise interviewée

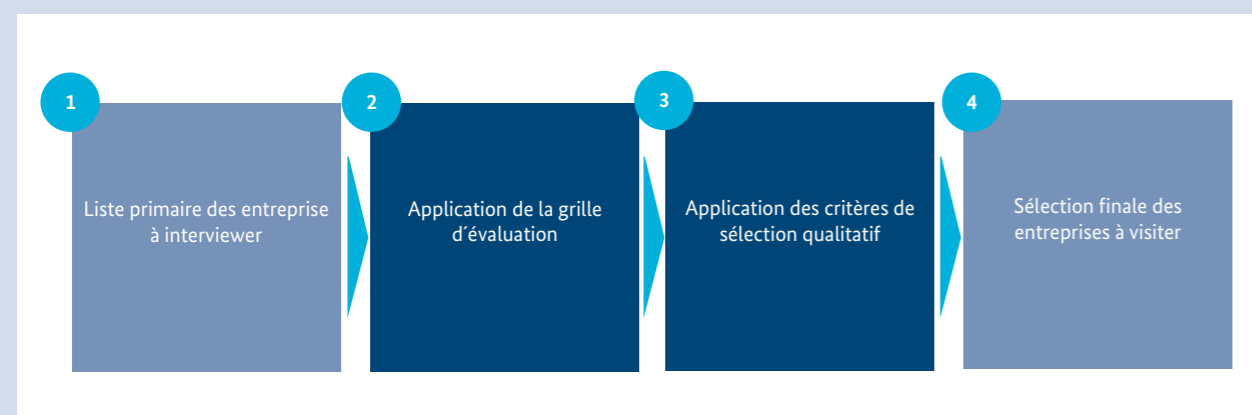
- Le taux d'utilisation moyen de l'outil de production
- Les investissements à réaliser sur les 5 prochaines années
- Les intentions de développement de nouveaux produits pour les 5 prochaines années
- Les domaines & les partenaires des entreprises en termes de Recherche et Développement
- Les clients des entreprises interviewées
- Les marchés à l'export des entreprises et les réseaux de distribution utilisés.
- Les outils de gestion de risques monétaires mis en place

En plus de ces critères, lors de la sélection finale de la short-list des entreprises à visiter nous avons pris en compte d'autres facteurs de sélection, notamment :

- La probabilité d'implication de l'entreprise sur les énergies solaires
- La couverture des produits impliqués dans la chaîne de valeur
- La représentativité des familles de produits impliqués dans la chaîne de valeur.

La phase de visite s'est déroulée pendant les 3, 4 et 5 Juillet. Cette phase a été assurée par deux équipes composées chacune de deux consultants E&Y et d'un consultant adelphi/Wuppertal Institute.

Figure 78: Aperçu de la méthodologie de sélection des entreprises à visiter



Le tableau suivant présente les résultats de l'approche de sélection préconisée.

Tableau 19: Les principaux résultats de l'approche de sélection préconisée

Secteur	Représentativité par rapport à l'échantillon initial	Représentativité par rapport à la liste finale
Industrie des Energies Renouvelables	9%	32% (*)
Industries Chimiques	16%	13%
Industries des Matériaux de Construction, de la Céramique et du Verre	8%	9%
Industries Electriques, Electroniques et de l'Electroménager	37%	23%
Industries Mécaniques et Métallurgiques	30%	23%

(Pour la liste complète des entreprises short-listées, voir annexe)

(*) Afin de faire un focus sur le secteur des Energies Renouvelables, le pourcentage des entreprises intervenant sur ce secteur dans la liste finale des entreprises à visiter a été relativement élevé par rapport au pourcentage initial dans l'échantillon interrogé.

9.2 Evaluation des capacités financières

9.2.1 Analyse des résultats de la phase de terrain

Une assise financière et une stabilité de l'activité qui viendrait booster un positionnement sur les énergies renouvelables

Sur les 59 répondants (environ 80% de l'échantillon) qui sont actuellement impliqués ou envisagent de se positionner sur les énergies renouvelables (envisagez-vous d'investir dans les technologies du solaire : probable à très probable), 42%³ ont réalisés un chiffre d'affaire supérieur à 10 M TND pour l'exercice 2011 (et 21% ont réalisé un Chiffre d'affaire supérieur à 20 M TND). Ces entreprises réalisent également de bonnes performances en termes de croissance de leur chiffre d'affaire durant les 5 dernières années : la croissance est positive pour l'ensemble de ces entreprises, avec une croissance annuelle d'en moyenne 35%.

L'assise financière dont jouit ce pool d'entreprises viendrait donc renforcer les chances d'un probable positionnement sur les énergies renouvelables. Aussi, sur les 59 répondants (80% de l'échantillon) actuellement impliqués ou qui envisagent de se positionner sur les énergies renouvelables, plus de la moitié (56%⁴) accaparent une part

3 42% de 53 entreprises car six entreprises n'ont pas répondu à la question relative au Chiffre d'affaire pour l'exercice 2011.

4 56% de 49 entreprises car dix entreprises n'ont pas répondu à la question relative à la Part de Marché.

de marché supérieure à 15% (part de marché exprimée en pourcentage du chiffre d'affaire global du secteur).

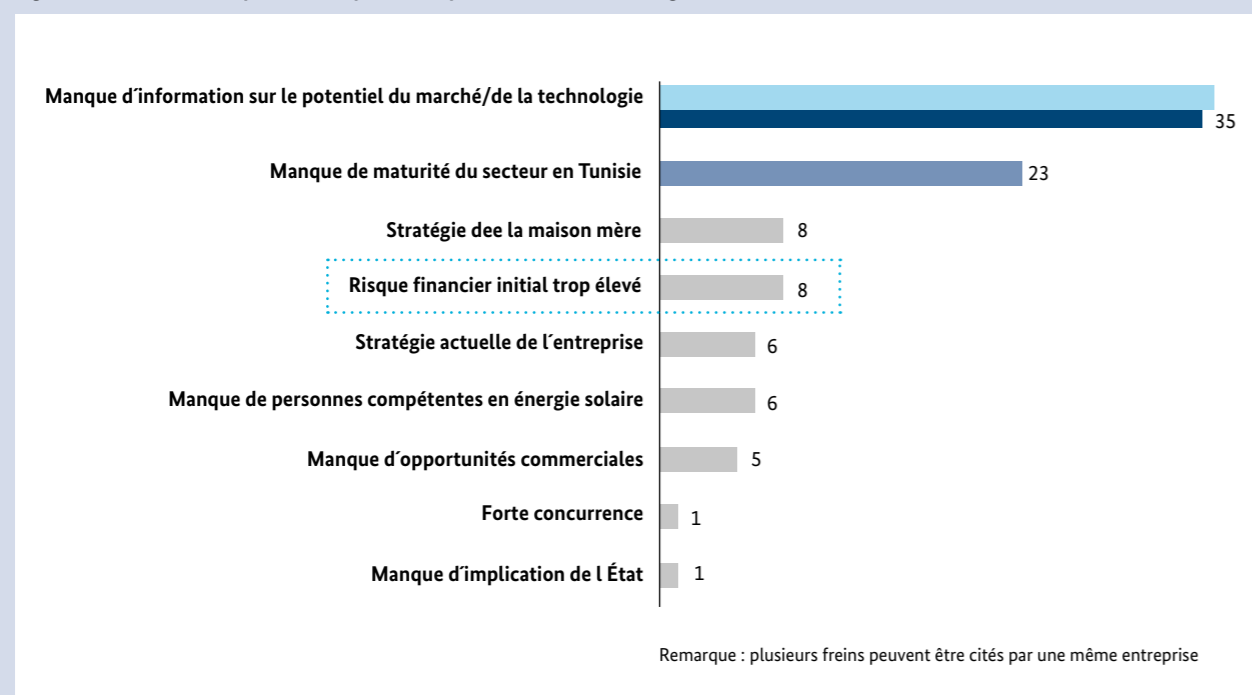
Le risque financier, frein mineur pour un positionnement sur les énergies renouvelables

Sur les 74 entreprises de l'échantillon, 58 ne sont actuellement pas positionnées sur les énergies renouvelables. Parmi ces 58 entreprises, environ 14% ont évoqué le risque financier comme principal frein à un positionnement sur le marché du solaire. Parmi les raisons citées, le risque financier arrive en 3e position, le Manque d'information sur le potentiel du marché/de la technologie et le manque de maturité du secteur en Tunisie arrivant respectivement en 1ère et 2ème position des principaux freins cités (avec respectivement 60% et 40% des répondants). Le frein du risque financier n'est donc pas perçu comme étant majeur pour plus de 86% des entreprises non encore positionnées sur les énergies renouvelables.

La plupart des entreprises qui sont actuellement impliquées ou qui envisagent de se positionner sur les énergies renouvelables sont financées à majorité par des sources de financement locales

Sur les 59 répondants (80% de l'échantillon) actuellement impliqués ou qui envisagent de se positionner sur les énergies renouvelables, seul 35% sont financés à majorité (plus de 51% du financement total) par des sources de financement internationales. Les 65% restants sont financés par des sources de financement nationales. Il existe donc une

Figure 79: Les freins cités par les entreprises non positionnées sur les énergies renouvelables



faible corrélation entre les 2 variables (implication actuelle ou positionnement possible sur les énergies renouvelables et source de financement international), néanmoins nous notons une forte corrélation pour le financement national.

La plupart des entreprises qui sont actuellement impliquées ou qui envisagent de se positionner sur les énergies renouvelables reçoivent des subventions de l'Etat (PMN)

Sur les 80% des répondants actuellement impliqués ou qui envisagent de se positionner sur les énergies renouvelables, 71% affirment recevoir des subventions de l'Etat. Pour 89% de ces entreprises, il s'agit du Programme de Mise à Niveau. Avec près de 5 000 attestations d'adhésion totalisées à ce jour (depuis 1996), la grande majorité des entreprises du tissu industriel tunisien sont inscrites au PMN : nous ne pouvons donc pas observer de corrélations pertinentes et significatives. Il est aussi à noter, que la majorité des entreprises actuellement impliquées dans la fabrication des chauffe-eau solaires reçoivent des subventions du PROSOL ELEC⁵. La plupart des entreprises visitées estiment que les subventions de l'Etat devraient être davantage renforcées. Le feedback des entreprises short listées révèle l'importance du rôle des incitations finan-

cières de l'Etat comme facteur de motivation pour se positionner sur le secteur des énergies renouvelables. Bien que la plupart de ces dernières bénéficient déjà des subventions relatives au PMN, elles réclament le renforcement de telles incitations surtout dans des domaines clés tels que la recherche, la certification et la participation aux foires internationales. Dans ce même cadre, 75% des entreprises visitées du secteur des énergies renouvelables perçoivent le faible niveau de subvention, (essentiellement pour la technologie photovoltaïque), comme une contrainte pour se lancer dans le secteur des énergies renouvelables. D'ailleurs, elles estiment, que pour promouvoir ce secteur stratégique, l'Etat Tunisien devrait aussi subventionner la fabrication des produits solaires et non seulement leur achat (tel que pratiqué en Chine). Sur un autre plan, elles considèrent la subvention des hydrocarbures, notamment le gaz, comme un facteur qui impacte fortement la compétitivité de certains produits, essentiellement, les chauffe-eau solaires. Aussi, d'autres problématiques importantes ont été soulevées notamment celles relatives aux retards de déblocage des subventions accordées, impactant fortement la gestion de la trésorerie des entreprises concernées. Il existe donc une forte corrélation entre l'implication actuelle ou positionnement possible sur les énergies renouvelables et les subventions publiques (formation, certification et achat/fabrication des produits solaires).

⁵ Pour encourager les fabricants, l'Etat a mis en place une prime de 30% du coût de l'investissement avec un plafond de trois mille dinars (3 000 DT) par kilowatt crête de puissance et quinze mille dinars (15 000 DT) par installation. Cette prime est financée par le Fond National pour la Maîtrise de l'Energie (FNME).

Des investissements à majorité matériels (équipements) prévus pour les 3/4 des répondants

Figure 80: La nature des investissements à réaliser sur les 5 prochaines années

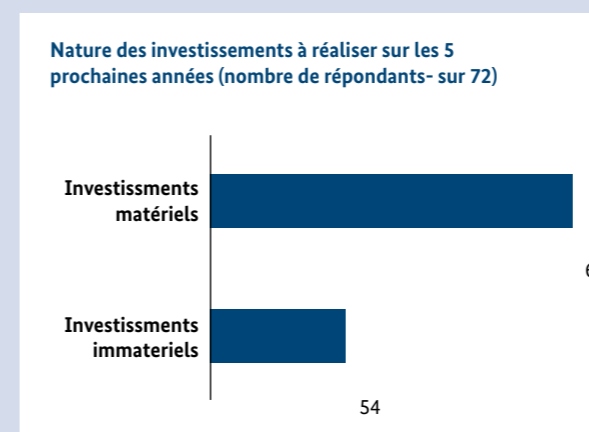
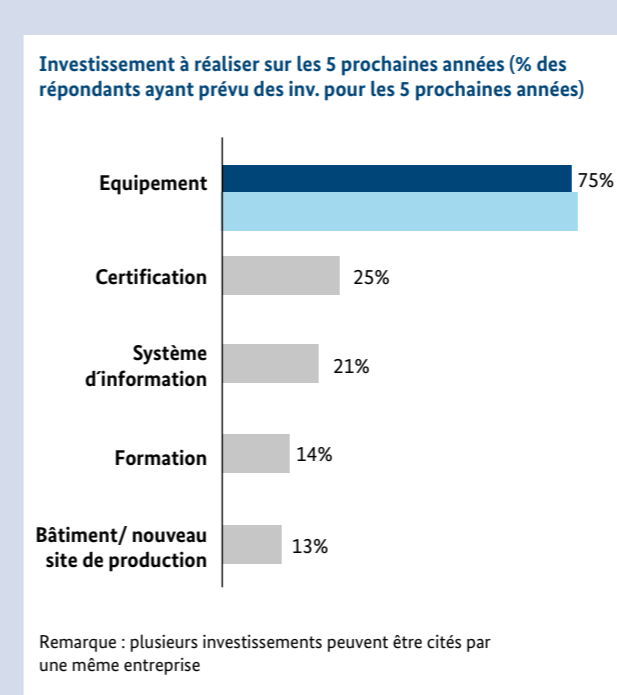


Figure 81: Les Investissements à réaliser sur les 5 prochaines années



Les investissements matériels en équipements de production dominent largement en termes des investissements à réaliser sur les 5 prochaines années, suivis par les investissements immatériels (Certification, Système d'information, et formation).

Ces investissements matériels interviennent dans le cadre de projet d'augmentation de capacités de production ou encore de stratégie de diversification produits (environ 80% des entreprises comptent développer de nouveaux produits au courant des 5 prochaines années).

9.2.2 Conclusion

L'analyse des capacités financières (CA, part de marché, taux de croissance, performance) du pool final des entreprises qui sont actuellement impliquées ou envisagent de se positionner sur les énergies renouvelables, révèle la disponibilité d'une bonne assise financière. En effet, plus de 56% de ces entreprises accaparent une part de marché supérieure à 15% expliquant ainsi, la faible considération du risque financier comme frein majeur de développement dans les énergies renouvelables et ce, pour plus de 86% des entreprises non encore positionnées sur ce secteur stratégique.

En termes de sources de financement, l'analyse a montré la forte corrélation entre l'implication actuelle ou possible sur les énergies renouvelables et les sources de financement locales (65% des entreprises sont financées par des sources de financement nationales) contre une faible corrélation avec les sources de financement internationales (35% des entreprises sont financées par des sources de financement internationales). En se référant aux feedbacks des entreprises short listées, le rôle des différentes incitations financières publiques (dans les domaines de la formation, la recherche, la certification, la fabrication et l'achat des produits solaires) apparaît comme un important facteur de motivation et levier pour se positionner sur ce secteur. Toutefois, la plupart d'entre elles relèvent l'importance des investissements matériels prévus notamment en termes d'équipements pour la fabrication des composants énergies renouvelables. Malgré l'existence d'une telle barrière, les différentes observations relevées précédemment, renforcent les chances d'une probable introduction dans ce secteur stratégique.

9.3 Evaluation des capacités techniques

Les sections suivantes offrent une analyse détaillée des conclusions essentielles à retenir. Pour chaque secteur industriel, les différents aspects technologiques sont évalués à la lumière des enquêtes et données collectées, des entretiens téléphoniques (phase I) et des visites sur site (phase

II). Dans un second temps, le potentiel à court, moyen ou long terme de chaque technologie solaire est analysé. La section 4 se conclut sur un résumé des capacités techniques de la Tunisie et une appréciation du potentiel de production pour certains composants solaires.

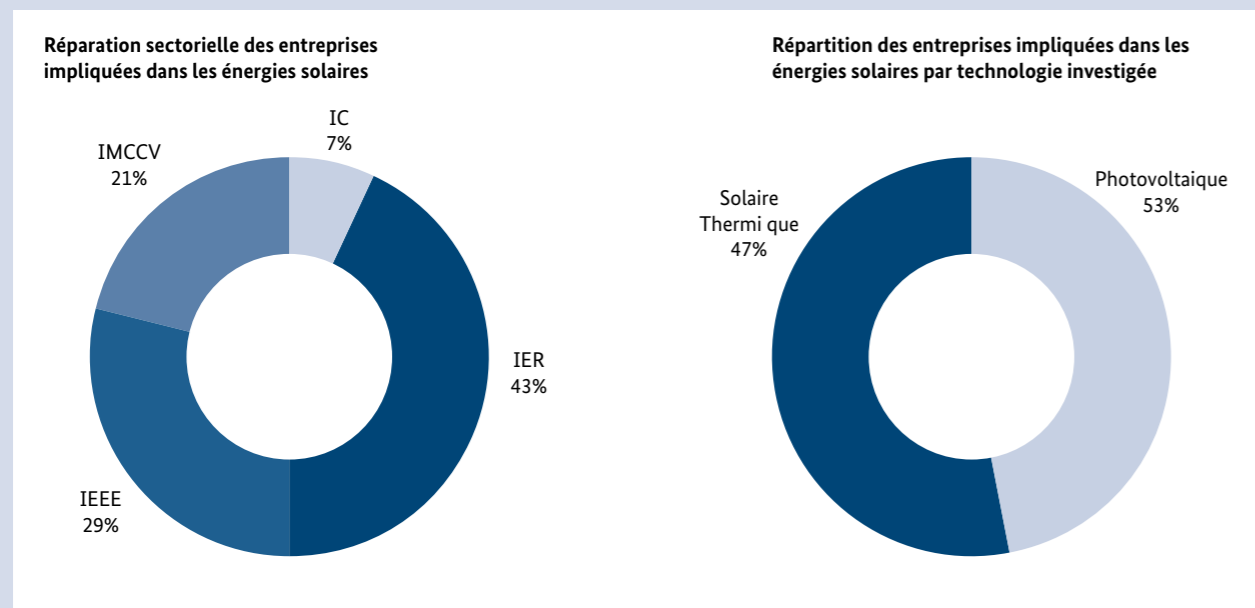
9.3.1 Evaluation globale des données

Le tableau suivant donne un aperçu des principaux aspects technologiques pris en compte pendant les différentes phases d'entretiens de cette étude. Les informations collectées en phase I ont été vérifiées et précisées à l'aide d'entretiens menés en face-à-face ainsi que de visites sur site effectuées sur les différentes installations.

Tableau 20 : Vue d'ensemble des différents aspects technologiques étudiés au cours des entretiens

Aspect technologique	Type d'information
Produits fabriqués	Gamme de produits y compris les composants non solaires
Segment de marché	Production, montage, R&D, investissements, prestations de services
Intention d'entrer sur le marché du solaire	Estimation de la probabilité allant de « Très peu probable » à « Très probable »
Système de gestion	Système de gestion en place, p. ex. ISO 9001/14001, ISO/TS
Certifications internationales obtenues	Certificats comme IEC, CE, UL
Type d'activités	P. ex. montage ou fabrication
Degré d'automatisation	Entièrement automatisé, semi-automatisé ou non-automatisé
Utilisation de lignes de fabrication	Quote-part en pourcentage
Age de l'équipement	<3, <10 ou <20 ans
Logistique	Type de système de progiciel de gestion intégré utilisé

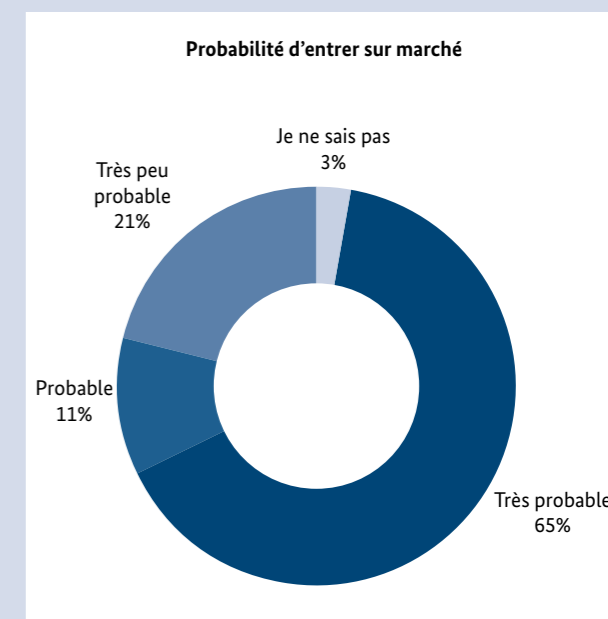
Figure 82: a) Répartition sectorielle des entreprises impliquées dans les énergies solaires (base: 14) ; b) répartition des entreprises impliquées dans les énergies solaires par type de technologie



Sur les 74 entreprises interrogées, 14 ont déclaré produire des composants solaires. La figure 81 a) montre leur pourcentage respectif dans chaque secteur. Les entreprises du secteur des énergies renouvelables (ici uniquement les entreprises solaires) représentent la plus grande part, suivies par les entreprises de l'industrie électrique et électronique, puis de l'industrie du verre et enfin de l'industrie chimique. Alors que la fabrication de composants CSP n'est pas couverte par les entreprises tunisiennes interrogées, la technologie PV et la technologie solaire thermique sont représentées à parts quasiment égales. Cependant, le marché des énergies solaires représente une opportunité d'expansion commerciale intéressante pour les entreprises tunisiennes de tous les secteurs industriels.

Il convient de noter que les réponses aux questions posées ont principalement été obtenues à l'occasion d'entretiens téléphoniques ne permettant pas d'évaluer l'étendue ni l'avancement des projets de l'entreprise en termes d'entrée sur le marché de l'énergie solaire. Des recherches plus poussées dans ce sens pourraient donc se révéler utiles. Quoi qu'il en soit, la majorité des entreprises interrogées ont exprimé un intérêt moyen à élevé en ce qui concerne la pénétration de ce segment de marché. De plus, l'attrait de marché du solaire est perçu de manière plus ou moins équivalente par tous les secteurs industriels analysés. Dans tous les secteurs, plus de 50 % des entreprises interrogées ont déclaré que leur entrée sur ce marché était très probable. Le développement d'un marché attractif en Tunisie ou plus généralement dans la région MENA serait un facteur déterminant pour encourager les entreprises à entrer

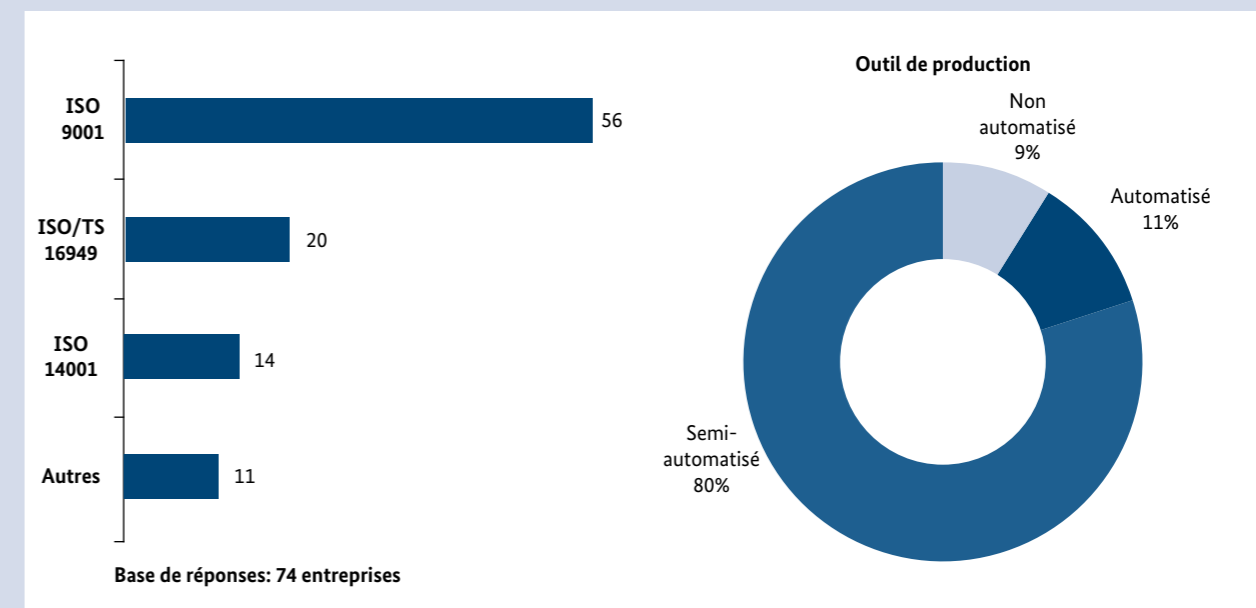
Figure 83: Probabilité d'entrer sur le marché du solaire



dans le secteur solaire. Ceci va dans le sens des conclusions de nos visites sur site telles qu'elles sont décrites plus bas.

En ce qui concerne les systèmes de gestion de la qualité en place, le système le plus souvent appliqué est ISO 9001, avec 57 entreprises certifiées. Il est donc possible de présumer à la fois d'un certain niveau de gestion de la qualité et d'une certaine expérience du contrôle de gestion international. Pour ce qui est de la moyenne d'âge

Figure 84: Systèmes de management et degré d'automatisation



des équipements utilisés, la plupart des entreprises (69 %) dispose de machines de moins de 10 ans et l'on peut donc considérer que leur équipement est raisonnablement moderne. D'autre part, la majorité des entreprises classe ses activités dans les secteurs de la production (56 %) ou du montage (32 %). Les entreprises restantes mentionnent les deux catégories (12 %). La production semi-automatisée est la plus représentée (80 % des entreprises), suivie par la production entièrement automatisée pour un faible pourcentage d'entreprises (11 %) et par la production non automatisée (9 % des entreprises).

En résumé, l'industrie concernée par les composants solaires est généralement bien équipée si l'on considère l'âge des équipements et le degré d'automatisation, de même que l'organisation de la production. Ces paramètres diffèrent cependant selon le secteur. Une image plus détaillée de ces paramètres sera présentée dans les sections suivantes. Une brève appréciation des potentiels à court, moyen et long termes en matière de fabrication de composants solaires en Tunisie est donnée à la fin de chaque section. Cette estimation se base non seulement sur les résultats des analyses de la chaîne de valeur mais surtout sur les données collectées lors des entretiens et visites sur site effectués. Quoiqu'il soit difficile d'établir des prévisions exactes, cette évaluation pourra avoir une valeur indicative en ce qui concerne la situation actuelle et les obstacles auxquels les entreprises seront confrontées. Par exemple, un potentiel à court terme fait référence aux compétences techniques disponibles actuellement en Tunisie et au faible niveau d'investissements nécessaires (en ce qui concerne le financement, la formation, la technologie).

9.3.2 Industrie solaire

Dans le cadre de la présente étude, l'industrie solaire se rapporte à la fabrication de composants photovoltaïques, solaires thermiques et CSP. Comme décrit de manière détaillée dans les analyses de la chaîne de valeur, toutes les prestations de services (c.-à-d. planification de projet, EPC, installation, etc.) ne sont pas prises en compte. De plus, la taille des composants a été limitée, c.-à-d. que seuls les composants essentiels de la chaîne de valeur ont été inclus, comme précisé dans le rapport précédent. Comme mentionné plus haut, 14 entreprises issues de différents secteurs ont déclaré être déjà actives sur le marché de l'énergie solaire (figure 20). Alors que la section suivante traite uniquement des entreprises regroupées sous la dénomination « IER » (Industrie des Énergies Renouvelables), toutes les entreprises actives sur le marché du solaire seront détaillées un peu plus loin, dans les sections concernant leurs secteurs industriels respectifs. Quatre entreprises sont donc actuellement classées parmi les acteurs

du marché des énergies renouvelables qui fabriquent des composants solaires.

Composants solaires thermiques

Les activités commerciales des entreprises du solaire thermique s'étendent de la fabrication des composants à la planification et à l'installation de systèmes à usage résidentiel et tertiaire. Les producteurs tunisiens de solaire thermique couvrent l'intégralité de la chaîne de valeur mais ils importent les composants qui ne sont pas disponibles sur le marché tunisien. La production de composants solaire thermique comprend les capteurs plans (généralement des systèmes thermosiphon), les réservoirs (200 à 500 l) et les structures de support. En 2011, le marché local de capteurs plans représentait environ 80 000 m² (visites sur sites). Du point de vue des entreprises interrogées, la demande en capteurs à tube sous vide est faible, car ce produit n'est pas optimisé pour une utilisation en Tunisie (risque de casse du fait des températures élevées). Les capteurs sont importés ou partiellement montés en Tunisie, tandis que les réservoirs sont entièrement fabriqués dans le pays. En ce qui concerne le montage des capteurs, les étapes de production réalisées en Tunisie comprennent le soudage des tubes de cuivre sur les plaques d'absorption, la connexion, l'isolation, l'encadrement et la manipulation du verre. La fabrication et le montage des capteurs ne sont pas automatisés, mais des investissements dans de nouvelles machines sont entrepris afin d'augmenter le degré d'automatisation. Il s'agit par exemple de l'achat de machines de soudage par ultrason, procédé actuellement réalisé manuellement. Les réservoirs sont produits à la main et l'isolation est réalisée par injection de mousse de polyuréthane. L'acier galvanisé nécessaire à la réalisation des structures de support est importé. Les principaux acteurs du marché sont certifiés ISO 9001 ou en cours de certification.

En règle générale, l'assemblage manuel est considéré comme la méthode de production la plus rentable en Tunisie en ce qui concerne les systèmes solaires thermiques. La plupart des entreprises interrogées ont déclaré que les méthodes manuelles de montage utilisées dans leurs usines permettent pour le moment de garantir le niveau de production et de qualité requis actuellement sur le marché tunisien. Les entreprises travaillent avec des progiciels de gestion intégrés.

Avec des producteurs établis sur le marché, les composants solaires thermiques recèlent un potentiel à court terme en termes d'expansion et éventuellement d'exportation, si les programmes gouvernementaux sont prolongés et si des investissements sont faits. Il s'agirait ici d'investissements voués à une augmentation des capacités visant à accroître

le rendement de production ainsi qu'à prendre en charge des étapes supplémentaires de la chaîne de valeur. Ces étapes incluent p. ex. la production de pompes, comme l'envisage au moins une des entreprises concernées.

Composants photovoltaïques

Toutes les lignes de production photovoltaïque existantes sont des lignes de fabrication de modules. Aucune entreprise ne produit de polysilicium, de wafers, ni de cellules. Au cours de la phase d'entretiens, d'autres expériences de la fabrication de composants PV ont été rapportées. Par manque de débouchés ou de soutien gouvernemental, les entreprises concernées ont cependant abandonné ces expériences.

Les lignes de fabrication de modules PV sont installées depuis peu en Tunisie. Elles sont pourvues d'équipements à la pointe de la technologie et semi-automatisées. Certaines étapes, comme le tabbing et le stringing, ne sont pas automatisées. Cela correspond aux standards industriels appliqués en Allemagne, où la plupart des lignes de production sont semi-automatisées pour permettre une certaine flexibilité au niveau du montage des composants. Un certain degré d'automatisation est cependant nécessaire pour accroître le niveau d'efficacité. Les matériaux sont pour la plupart importés, tandis que certains composants et systèmes fabriqués par des fournisseurs tunisiens sont d'ores et déjà exportés vers la région MENA. La quasi-totalité des composants utilisés dans les modules PV sont importés, y compris le verre, les films, les back-sheets, les boîtes de jonction et les cellules. Cependant, une entreprise au moins est actuellement en train de mettre en place une collaboration avec des fournisseurs de verre et d'aluminium. Dans la mesure où les fabricants de produits photovoltaïques sont des entreprises de création récente, elles ne disposent pas encore de certification ISO. La capacité actuelle de modules PV est environ de 30 à 40 MW par an.

A en juger par les équipements et compétences techniques acquises, les producteurs de photovoltaïque ont créé une base solide pour développer des produits compétitifs. Cependant, les entreprises profiteraient sans aucun doute d'un soutien de l'état qui leur permettrait de faire face à la concurrence internationale très forte actuellement et de continuer à développer leurs projets commerciaux. En effet, il serait bon d'envisager la mise en place d'une aide gouvernementale spécifique, sous la forme p. ex. de projets de référence, pour soutenir ces pionniers de l'industrie du photovoltaïque tunisienne. Dans la mesure où l'industrie internationale du photovoltaïque est soumise à une concurrence massive en termes de coûts, les fabricants sont confrontés aux défis du marché et de la technologie.

Au vu des capacités PV existantes en Asie et à l'importance des investissements nécessaires pour la fabrication en amont (poly silicium, wafers et cellules), le potentiel à court et à moyen terme pour ces composants est plutôt faible et lié à des risques commerciaux élevés.

Composants CSP

Quelles que soient les différentes technologies solaires, aucune ligne de fabrication de composants CSP n'existe (voir chapitre 5).

A long terme, le CSP peut représenter une option valable. Reste à voir comment les marchés internationaux et les chemins technologiques (p. ex. le développement de la technologie CSP) vont évoluer. Cela concerne le développement de systèmes de centrales électriques qui comprennent différents composants et sera pris en considération dans les sections suivantes. Ici, les composants fondamentaux comme le développement d'un récepteur pour miroir cylindro-parabolique représentent des composants potentiels. Comme signalé dans le rapport WP 2, très peu d'acteurs du marché sont actuellement en mesure de fabriquer de tels composants du fait des investissements très lourds impliqués en termes de R&D et de propriété intellectuelle.

Défis et opportunités

Tous les fabricants établis sur le marché du solaire ont mentionné le manque de soutien gouvernementale et institutionnelle de la part des différentes parties prenantes du secteur de l'énergie en Tunisie. Cela se rapporte aussi bien au système d'aides confus et incohérent (PROSOL), au niveau de qualité organisationnelle et aux questions de responsabilité pour les systèmes solaires au sein de PROSOL, qu'à la présence de barrières bureaucratiques (voir section 4.1.1 pour plus d'informations). Des préoccupations ont également été exprimées en ce qui concerne l'aide à la recherche et au développement avec des institutions existantes sur le terrain.

Le potentiel de production de composants solaires dépend en grande partie du type de technologie.

Le paysage tunisien de l'industrie solaire peut ainsi être caractérisé de deux manières. Les systèmes solaires thermiques sont produits par des entreprises bien établies mais plutôt orientées vers le marché local. Les fabricants de modules photovoltaïques, pour leur part, sont des entreprises récentes en Tunisie et leur objectif est de fournir à la fois le marché local et le marché international. Pour ces deux technologies, le potentiel d'élargissement de l'offre en composants pour toute la chaîne de valeur tunisienne est réel. Cet aspect sera approfondi dans la suite de cette section.

9.3.3 Industrie du verre

L'industrie du verre fait partie de l'IMCCV (Industrie des Matériaux de Construction, de la Céramique et du Verre). Le verre est le composant le plus important dans ce secteur en ce qui concerne la production de composants solaires. Bien que le verre soit nécessaire dans toutes les technologies solaires, chacune a recours à des types de verre différents présentant des caractéristiques particulières en termes de transparence, d'épaisseur et de surface (voir les chapitre 3, 5 et 7 pour plus de détails). En général, on utilise du verre extra-clair (verre sécurité) pour garantir un très haut niveau de transmission. Les technologies CSP utilisent des miroirs, pour lesquels le verre est soumis à un traitement chimique supplémentaire et parfois à un traitement mécanique. Le matériel de base est en général le verre flotté. Aucune ligne de fabrication de verre flotté n'existe en Tunisie. Tous les producteurs de verre plat traitent du verre brut importé. Dans l'échantillon de base, cinq entreprises de traitement de verre plat ont pu être identifiées. Trois d'entre elles étaient impliquées dans le secteur solaire, plus précisément dans la fourniture de produits solaires thermiques. Ces entreprises sont actives dans domaine du traitement (découpe et trempé) de verre solaire importé et destiné à la fabrication de capteurs solaires thermiques. Deux autres entreprises ont montré un fort intérêt. Dans la mesure où l'épaisseur et le traitement requis pour les capteurs photovoltaïque et CSP diffèrent par rapport aux capteurs solaires thermiques, il est raisonnable de déduire des données collectées que la Tunisie n'offre pas de capacités de fabrication pour ces technologies. La moitié des entreprises est certifiée en ce qui concerne la gestion de la qualité (ISO 9001). Les lignes de production semi-automatisées sont majoritaires et l'âge des équipements peut être considéré comme récent à moyennement récent.

Les obstacles mentionnés par les entreprises incluent les investissements élevés nécessaires pour démarrer dans le secteur du traitement du verre CSP et PV (p. ex. les investissements nécessaires pour garantir un procédé de refroidissement plus rapide) ainsi que le manque de marché potentiel. Cependant, les capacités et les équipements nécessaires pour le bombage des miroirs CSP sont globalement disponibles, malgré certaines restrictions en ce qui concerne les dimensions possibles. D'autres entreprises internationales couvrent toute la gamme des degrés de bombage utilisés pour les diverses technologies CSP et tailles de miroir. Pour ce qui est des entreprises tunisiennes, des investissements en termes d'équipement seraient nécessaires, mais elles pourraient rencontrer une demande potentielle dans ces différentes dimensions. Un potentiel est exploitable en termes d'exportation de verre solaire thermique à condition que les certifications

demandées sur les marchés internationaux concernés soient obtenues.

Contrairement aux équipements de traitement du verre, une unité de fabrication de verre flotté implique des coûts d'investissement très élevés. Étant donné la forte concentration de telles unités de fabrication sur le marché, le potentiel est plutôt faible en Tunisie. De plus, le verre solaire représente une proportion minimale de la production globale de verre destiné au bâtiment et à l'automobile, et de verre sécurité. Les capacités globales de verre flotté sont destinées à alimenter le marché solaire international, sans goulet d'étranglement prévisible (voir les chapitres 3, 5 et 7).

Au regard de ce qui a été exposé ci-dessus, un potentiel à court terme (ST), à moyen terme (PV) et à long terme (CSP) existe pour les entreprises de l'industrie du verre souhaitant entrer ou se développer dans le secteur solaire. Il convient de garder à l'esprit que les coûts de logistique sont plus élevés pour le verre que pour les autres composants et que la proximité du marché ou des producteurs finaux peut donc représenter un avantage décisif en termes de compétitivité du fait de la nécessité de réduire les coûts de production, en particulier en ce qui concerne les technologies PV et CSP. Là encore, le développement d'un marché local ou régional est un facteur clé pour stimuler les investissements. Par ailleurs, les installations de verre flotté existantes en Algérie et en Égypte sont suffisantes pour répondre à une grande partie de la demande sur le marché africain. Dans la mesure où la production de verre flotté est forte consommatrice d'énergie, l'Algérie détient ici un avantage compétitif réel vis-à-vis de la Tunisie.

9.3.4 Industrie mécanique et métallurgique

Les composants solaires potentiels fabriqués par l'industrie mécanique et métallurgique concernent surtout les structures de support utilisées par les trois types de technologie de même que les systèmes de tuyauterie, les échangeurs thermiques, les chaudières et les citernes pour CES et centrales CSP.

La principale caractéristique des structures de support des systèmes solaires thermiques et photovoltaïques est leur adaptabilité aux différents types de toits et de systèmes. Pour les centrales photovoltaïques, le temps d'assemblage sur le site est également décisif. Les deux systèmes doivent résister aux charges pondérales et au vent. L'assemblage doit être simple. Les structures de support des installations de CSP doivent relever le défi représenté par les suiveurs de soleil qui doivent faire preuve de précision et de fiabilité. De plus, les différentes technologies CSP requièrent des structures de support de conceptions différentes. Les

systèmes de CSP HTF doivent résister à des pressions et des températures élevées et nécessitent des composants de haute précision impliquant des compétences technologiques qui dépassent les processus de traitement standard du métal.

Au cours de la phase d'entretiens, 21 entreprises de l'industrie mécanique et métallurgique (sur les 36 de l'échantillon de base) ont été analysées. Aucune entreprise de ce secteur n'est impliquée sur le marché du solaire, bien qu'un intérêt (élevé) ait été témoigné dans tout le secteur (17 sur 21).

La gamme de produits proposée par les entreprises de ce secteur est très diversifiée. De par sa nature, cette industrie est plus orientée vers la production que vers l'assemblage, ce qui concorde avec les données collectées. Par rapport à d'autres secteurs industriels, les équipements sont plus âgés (10 à 20 ans), mais la plupart des entreprises prévoit des investissements en termes d'équipement et de machines. Les lignes de production sont en grande partie semi-automatisées avec quelques sections manuelles, comme le soudage. La plupart des entreprises est certifiée ISO 9001.

Malgré un intérêt élevé pour s'implanter sur le marché du solaire, les entreprises sont confrontées à un manque d'opportunités (en termes de marché) qui représente un obstacle majeur. De plus, le niveau de formation dans le domaine du soudage est insuffisant et une pénurie de soudeurs a été rapportée par les entreprises. Comme pour les autres secteurs, l'absence d'une politique énergétique claire a été mentionnée de manière répétée par les entreprises comme représentant un obstacle majeur au développement des affaires. Dans l'ensemble, l'industrie mécanique et métallurgique est bien établie dans les secteurs concernés. Un potentiel à court terme pour les structures de support pour systèmes ST et PV, basé sur les capacités technologiques des entreprises, est visible ici. Cependant, si aucune opportunité de prendre part à des projets spécifiques ou de travailler avec des partenaires ne se présente, ce potentiel n'est ni attractif, ni réalisable, vue l'étendue des investissements nécessaires (en machines, développement produit) et des volumes critiques nécessaires sur le marché. Ce dernier critère, c.-à-d. essentiellement le développement d'un marché régional ou local, est décisif dans la mesure où certaines entreprises métallurgiques sont soutenues par de grands groupes nationaux ou internationaux et sont donc en mesure de fournir les ressources financières et humaines nécessaires. Bien que l'existence d'appels d'offre ait été mentionnée, le potentiel qui s'offre en termes de fabrication de composants CSP comme les structures de support des miroirs suiveurs de soleil, les tuyauteries ou les composants du bloc de

puissance (chauffe-eau et générateurs de vapeur) semble plutôt réalisable à moyen et long terme et implique la coopération de partenaires spécifiques susceptibles de fournir les installations de production et le savoir-faire technologique. Au moins une entreprise, cependant, a déclaré être en mesure de fabriquer, sur la base de l'équipement existant, toute la gamme des structures métalliques requises pour les centrales CSP.

9.3.5 Industrie électrique et électronique

Le type de produits électriques et électroniques couverts par les entreprises de l'échantillon de base pris en compte dans le cadre de la présente étude a été décrit à la section 3.3. En général, un certain nombre de produits fabriqués par cette industrie est utilisé dans les systèmes solaires et les centrales. Ces produits comptent les régulateurs, les batteries et l'électronique de puissance comme celle utilisée dans les onduleurs solaires. Dans la mesure où ils ne nécessitent pas de modifications majeures en termes de spécifications, ils ne sont pas analysés en détail dans le cadre de cette étude. Les autres composants comme les câbles et les onduleurs doivent être adaptés et ont donc été examinés dans le cadre de l'analyse de la chaîne de valeur. Il convient de noter que l'industrie électronique tunisienne est bien positionnée sur le marché international. La fabrication de câbles et câblages, en particulier, constitue une opportunité intéressante pour ce secteur aussi bien du fait de sa taille (47 %) que du fait de son positionnement en termes de compétitivité sur ce sous-secteur en Tunisie. Pour ces raisons, l'accent a été mis ici sur les entreprises qui produisent ou assemblent des câbles, mais d'autres secteurs ont été inclus dans d'autres analyses effectuées à partir de l'échantillon de base. Au total, 28 entreprises ont été interrogées. Quatre d'entre elles ont mentionné des activités dans le secteur solaire, principalement le photovoltaïque. Une analyse approfondie a été réalisée mais n'a pas révélé de ventes ni de volumes significatifs dans l'industrie PV. Par conséquent, les activités sur le secteur photovoltaïque sont probablement liées à des projets sur mesure ou à l'export, qui ne jouent pas un rôle majeur à l'échelle du marché local. Cependant, 50 % des entreprises environ a signifié de l'intérêt pour une implantation sur le secteur solaire. Les entreprises tunisiennes de ce secteur disposent non seulement d'une expérience solide dans la fabrication et l'assemblage de câbles, mais également de la technologie, de la recherche et développement et des ressources financières nécessaires. Elles sont donc bien positionnées pour fabriquer des câbles pour l'industrie PV en particulier. Certaines de ces entreprises ont mentionné des efforts faits à différentes étapes du développement produit. D'autres ont indiqué qu'elles disposent des capacités technologiques nécessaires, mais que le marché local n'est pas assez attractif en termes de volumes potentiels

(p. ex. du fait du Plan Solaire Tunisien) et en termes de fiabilité à ce sujet. Pour la plupart, les lignes de production sont au moins semi-automatisées avec des équipements âgés de moins de 10 ans et la plupart des entreprises sont certifiées ISO 9001.

Le potentiel de l'industrie tunisienne de production de câbles et de câblage pour le secteur photovoltaïque est relativement élevé du fait de son positionnement compétitif dans l'industrie du câblage pour le secteur automobile. Bien que les câbles PV nécessitent des paramètres spécifiques, les ressources financières, technologiques et de recherche et développement disponibles en Tunisie sont à même de répondre à ces exigences. A court terme, l'assemblage de câbles pour l'industrie photovoltaïque représente l'opportunité la plus intéressante dans la mesure où la production des câbles en eux-mêmes implique d'investir dans des machines d'extrusion spécifiques. En règle générale, les câbles utilisés en extérieur sur les centrales CSP doivent répondre à des exigences équivalentes à celles des câbles PV et représentent une bonne opportunité. Contrairement au marché du photovoltaïque qui s'est déjà développé de manière considérable, le marché du CSP est bien plus petit et dépend dans une large mesure de projets de centrales concrets. Les opportunités sont généralement liées à une collaboration dans le cadre de projets spécifiques. Pour ces deux technologies, les investissements ne seront stimulés que par la présence d'un marché solaire local ou régional important.

Comme mentionné plus haut, l'industrie électrique et électronique est caractérisée par un ensemble de produits diversifiés qui s'étend du câble à l'électronique de puissance. Eu égard à la forte proportion d'entreprises existantes spécialisées dans le câble/le câblage et à leurs compétences technologiques, ce secteur est bien positionné pour alimenter l'industrie solaire régionale ou locale. Ces entreprises ont, elles aussi, justifié leurs hésitations à se lancer dans des investissements majeurs pour stimuler la production locale par le manque d'opportunités et de transparence qui règnent sur le marché.

9.3.6 Industrie chimique/ plastique

L'industrie chimique tunisienne propose une très large gamme de produits et est impliquée dans diverses activités (voir base de données API). Bien que de nombreux produits issus de l'industrie chimique classique soient vendus aux fabricants du secteur solaire, cette étude se concentre uniquement sur les composants plastiques, c.-à-d. les films, et ce pour un certain nombre de raisons. D'une part, l'analyse de la chaîne de valeur s'est concentré sur les composants d'une taille minimum prédéfinie, et d'autre part, le petit matériel chimique comme les colles

pour métal, du fait de son caractère fluctuant, dépasserait le cadre de cette étude. Au sein du secteur du solaire thermique, la recherche et développement en matière de capteurs entièrement constitués de polymères haute performance est actuellement en cours afin de remplacer les composants en cuivre et aluminium très coûteux. Cette recherche n'a pas encore un niveau de maturité permettant une commercialisation immédiate. Il en va de même pour les films réflecteurs solaires destinés aux centrales CSP comme champ de recherche potentiel. L'industrie plastique a donc été surtout analysée sous l'angle de ses capacités à produire des films pour modules photovoltaïques. Les autres produits potentiels recouvrent les composants plastiques pour les pièces électroniques comme les coffrages. Ces derniers sont généralement fabriqués par moulage par injection alors que les films d'encapsulation et de face arrière (backsheet) sont fabriqués par procédé d'extrusion.

Sur les 29 entreprises identifiées dans le premier échantillon, douze producteurs de plastique ont été interrogés. Un seul d'entre eux est actuellement impliqué dans la production de composants solaires, et huit ont mentionné être potentiellement intéressés par ce secteur. Le seul producteur ayant déjà accumulé une certaine expérience de la production destinée à l'industrie PV produisait des composants en plastique pour les boîtes de jonction des modules PV, mais cette production a été considérablement réduite du fait de la chute radicale de la demande de la part de sa clientèle européenne. Les entreprises interrogées sont actives sur le secteur de la fabrication de film, de tubes en plastiques et autres composants plastiques. Les visites sur site ont révélé que ces entreprises utilisent les procédés de moulage par injection et d'extrusion. Si ce dernier n'est pas une condition indispensable pour démarrer dans le secteur de la fabrication de film, le manque de savoir-faire (en termes d'épaisseur, de qualité et de paramètres de processus), de même que les investissements nécessaires, représentent des obstacles majeurs pour ces entreprises. Dans l'échantillon de l'étude, aucune des entreprises qui utilisent le procédé d'extrusion de film n'a fait preuve d'intérêt pour s'implanter sur le marché du solaire.

Neuf entreprises sur les douze entreprises interrogées ont signifié un intérêt élevé pour le secteur solaire sans pour autant ne mentionner aucun projet concret d'implantation sur ce marché. Les autres fabricants, p. ex. de petits composants en plastiques, qui ne sont pas pris en compte de cette étude, réagissent de manière sans doute similaire. La plupart des fabricants de l'industrie plastique disposent de lignes de production semi-automatisées et d'équipements relativement récents. Ils ont également l'intention d'investir dans de nouveaux équipements dans les années à venir.

Un petit nombre d'entreprises est impliqué dans la fabrication de film. Tandis que certaines entreprises déplorent l'absence d'information technique et d'un marché suffisant, un autre obstacle majeur pour pénétrer sur le marché du solaire est peut-être la faible concentration de fournisseurs. Du fait du manque de savoir-faire en termes d'extrusion de film et des exigences de qualité élevées liées au film PV, ces composants présentent plutôt un faible potentiel à court et moyen terme en Tunisie. Une seule entreprise a déclaré disposer des compétences nécessaires à la production de film technologique et pourrait servir de point de départ à un développement ultérieur de ce secteur. A nouveau, le manque d'opportunités pour un marché tunisien du solaire profitable représente un obstacle majeur pour les investissements en recherche et développement. De plus, les entreprises concernées auraient besoin de partenaires pour développer ce type de films.

9.3.7 Conclusion

Les tableaux 4, 5 et 6 donnent une vue d'ensemble des résultats exposés ci-dessus. Elles montrent que la Tunisie est bien représentée tout au long de la chaîne de valeur du solaire thermique. La fabrication de composants solaires thermiques existe déjà. Elle inclut les capteurs, les réservoirs et les structures de support. Les modules et le déve-

loppement de produits de câblage sont les seuls composants PV couverts, tandis que la fabrication de composants CSP est actuellement inexistante. Ces figures montrent également les potentiels révélés pour le court, le moyen et le long terme (rouge = potentiel faible ou inexistant, jaune = moyen, vert = fort). Toutes les conclusions sont basées sur des pré-requis encourageant les investissements (p. ex. développement du marché et taille critique) et se rapportent exclusivement aux capacités technologiques décrites ci-dessus.

Les composants PV en aval recèlent le plus fort potentiel de fabrication en Tunisie. Pour les composants en amont et les films, les potentiels à court et moyen terme semblent plutôt faibles du fait de l'importance des investissements et du haut niveau de technologie requis (voir chapitre 3). En fonction de l'évolution du marché international et du marché régional ainsi que des mesures qui seront prises pour stimuler leur développement sur le long terme, ces composants pourraient cependant encore être fabriqués en Tunisie.

A l'inverse, la chaîne de valeur solaire thermique est en partie couverte et dispose d'acteurs industriels bien établis. Par conséquent, la Tunisie est plutôt bien positionnée pour connaître une expansion tout au long de la chaîne de valeur et augmenter ses capacités de production.

Tableau 21: Composants de la chaîne de valeur PV actuellement fabriqués en Tunisie et leur potentiel

	Miroir	Récepteur	Système stockage	Power block/ Steam cycle components	Heat Transfer Fluid System	Support
Présence sur le marché						
Vision	Potentiel de production					
Court						
Moyen						
Long						

Tableau 22: Composants de la chaîne de valeur ST pour les systèmes thermosiphon actuellement fabriqués en Tunisie et leur potentiel

	Capteur solaire	Ballon stockage	Pompe	Contrôleur électronique	Verre	Support
Présence sur le marché	√	√				√
Vision	Potentiel de production					
Court						
Moyen						
Long						

Tableau 23: Composants de la chaîne de valeur CSP actuellement fabriqués en Tunisie et leur potentiel

	Upstream (Silicium, Lingot, Wafer, Cellule)	Verre	Encapsulant/ Backsheet	Module	Câblage	Onduleur	Composants électriques	Support
Présence sur le marché				√	√			
Vision	Potentiel de production							
Court								
Moyen								
Long								

Actuellement, aucun composant CSP n'est fabriqué en Tunisie. Étant donné le niveau de développement technologique et l'incertitude par rapport à la réduction des coûts et aux défis non résolus, le potentiel de production à court terme en Tunisie est faible pour les composants sophistiqués mais plus élevé pour les composants impliquant des équipements standard et des travaux de métallurgie. Le développement à long terme dépendra de l'évolution du marché, des mécanismes d'aide et d'une structure d'encouragement ciblé de la recherche et développement et de la formation.

Parmi les trois types de technologie solaire analysés ci-dessus, le solaire thermique offre le plus fort potentiel de production de composants en Tunisie. Les principales raisons en sont l'existence d'entreprises de fabrication, le marché local, et le système d'aides. Ceci est partiellement vrai également pour le secteur PV, mais pour ce qui est de la production de modules PV et des étapes préalables, la compétition internationale et les exigences technologiques en termes de complexité de fabrication, de savoir-faire et d'économies d'échelle sont assez élevées. Néanmoins, d'autres composants de systèmes PV comme le verre, les câbles et les structures de support sont susceptibles d'être fabriqués par les entreprises tunisiennes, qui ont exprimé un vif intérêt pour ces segments. Pourtant, le manque d'attractivité du marché local a freiné la plupart des activités jusqu'à présent. La technologie CSP, qui offre des opportunités mais implique de hauts risques, est celle qui est le moins représentée sur le marché tunisien. D'un côté, les entreprises tunisiennes pourraient encore prendre part au développement et à l'optimisation des produits. De l'autre, des risques sont liés à l'incertitude qui règne au sujet de ou des types de technologie qui finiront par se montrer plus rentables. Le développement d'un marché local est donc essentiel pour stimuler les investissements.

9.4 Expérience internationale & partenariats

9.4.1 Analyse des résultats de la phase de terrain

Environ 2/3 des entreprises actives ou qui souhaitent se positionner sur le secteur des composants solaires bénéficient d'un partenariat stratégique national ou international

Les entreprises ayant un partenaire stratégique national ou international représentent environ 54% de l'ensemble des entreprises interrogées (74 entreprises). Sur les 59 entreprises intéressées par le secteur des composants solaires, environ 2/3 ont affirmé avoir un partenaire stratégique national ou international. Ces relations de partenariat stratégique consolident le potentiel des entreprises pour concrétiser leur positionnement sur le secteur des composants solaires. Le graphe suivant illustre la répartition des entreprises actives et intéressées d'une part et celles non actives et non intéressées d'autre part selon l'existence ou l'absence d'un partenaire stratégique.

Un grand intérêt des entreprises totalement tunisiennes et celles à participation étrangère vis-à-vis du secteur des composants solaires

Sur les 74 entreprises interviewées, 54% sont à participation étrangère dont 73% sont impliquées ou souhaitent se positionner sur le secteur des composants solaires.

Les entreprises à capital tunisien ont également montré un grand intérêt au secteur des composants solaires. En effet, 88% des entreprises 100% tunisiennes sont déjà actives ou envisagent de se positionner sur le secteur des composants solaires.

La figure suivante présente l'importance de l'intérêt au secteur de la part des entreprises interviewées, ventilé par nature de participation (Tunisienne ou étrangère).

L'identification d'un partenaire étranger, levier important de positionnement sur le secteur des composants solaires

Pour l'ensemble des entreprises qui ont manifestées un intérêt pour un éventuel positionnement sur le secteur des composants solaires, l'existence d'un partenariat avec un ou plusieurs acteurs étrangers reste un facteur de motivation relativement important. En effet, parmi les facteurs de motivation cités, l'identification d'un partenaire étranger arrive en 2ème position (représentant 28% des entreprises du pool).

La plupart des entreprises interviewées sont présentes sur des marchés à l'export, favorisant ainsi les chances de succès d'un positionnement sur le secteur des composants solaires

Notre analyse a montré que 82% des entreprises 100% tunisiennes (dont 32% font partie du secteur Mécanique et métallurgie qui est le secteur le plus présent en terme d'export pour ces entreprises) sont présentes sur des marchés à l'export.

Quant aux entreprises à participation étrangère, elles sont en totalité exportatrices ou totalement exportatrices. Le secteur d'activité dominant de ces entreprises est le secteur électrique, électronique et électroménager avec 46% des entreprises à participation étrangère. Les deux figures suivantes présentent respectivement la répartition des entreprises 100% tunisiennes et celles à participation étrangère par nature du régime (Totalement exportateur, exportateur ou non exportateur).

Cette présence sur les marchés à l'export représente un atout majeur pour les entreprises actives ou souhaitant se positionner sur le secteur des composants solaire dans le sens où cela favorise leurs chances de réussir leur positionnement.

Figure 85: Répartition des entreprises intéressées/non intéressées selon l'existence d'un partenaire stratégique

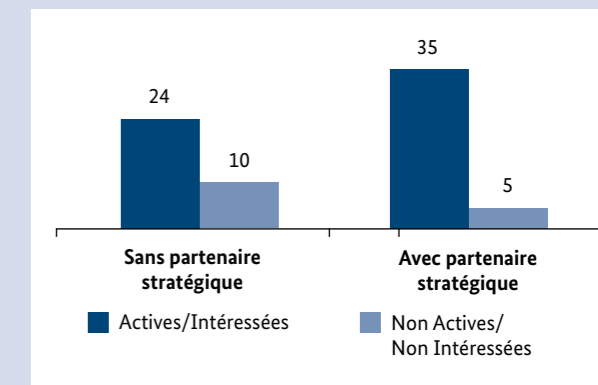
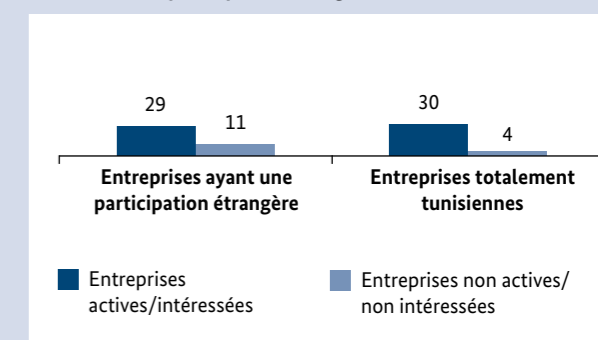


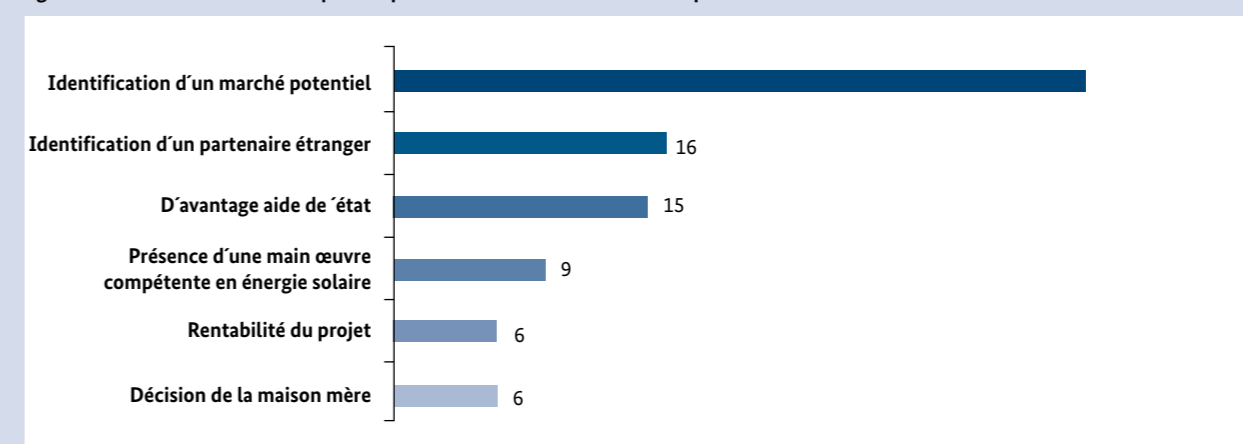
Figure 86: Répartition des entreprises intéressées / non intéressées par nature du capital social (100% tunisien / Avec participation étrangère)



La plupart des entreprises à participation étrangère ont accès au marché Européen

Plus que 2/3 des entreprises à participation étrangère ont l'Europe comme marché de prédilection comme le montre la figure suivante. En ce qui concerne les entreprises tunisiennes, elles sont plutôt positionnées sur le marché Afri-

Figure 87: Facteurs de motivation pour se positionner sur le secteur des composants solaires



caïn. En effet, plus de 2/3 des entreprises 100% tunisiennes exportent vers ce marché.

La plupart des entreprises actives ou voulant se positionner sur le secteur des composants solaires exportent vers l'Europe

Sur 59 entreprises qui sont actives ou souhaitent se positionner sur le secteur des composants solaires, 76% (45 entreprises) ont l'Europe comme principal marché à l'export comme le présente la figure suivante.

La majorité des entreprises actives ou ayant exprimé un intérêt au secteur des composants solaires ont une implantation mondiale ou régionale, favorisant ainsi les chances de succès d'un positionnement sur le secteur des composants solaires

Les entreprises interrogées ⁶ qui sont implantées au niveau mondial ou régional représentent environ 2/3 du pool total.

⁶ 71 entreprises ont répondu à cette question

La figure ci-dessous la répartition de ces entreprises par nature d'implantation.

Environ 63% des entreprises actives ou ayant exprimées un intérêt pour un éventuel positionnement sur le secteur des composants solaires ont une implantation mondiale ou régionale. Ces entreprises ayant une présence internationale ont plus de potentiel à viser des marchés étrangers et à réussir le positionnement sur le secteur des composants solaire.

Les entreprises ayant une participation étrangère disposent de capacités technologiques légèrement plus avancées que les entreprises 100% tunisiennes

Dans cette partie du rapport nous visons à présenter et analyser les dépendances et corrélations entre l'existence d'une participation étrangère et la capacité technologique de l'entreprise. Cette analyse sera faite par rapport

Figure 88: Ventilation des entreprises 100% Tunisiennes et celles à capital étranger par régime

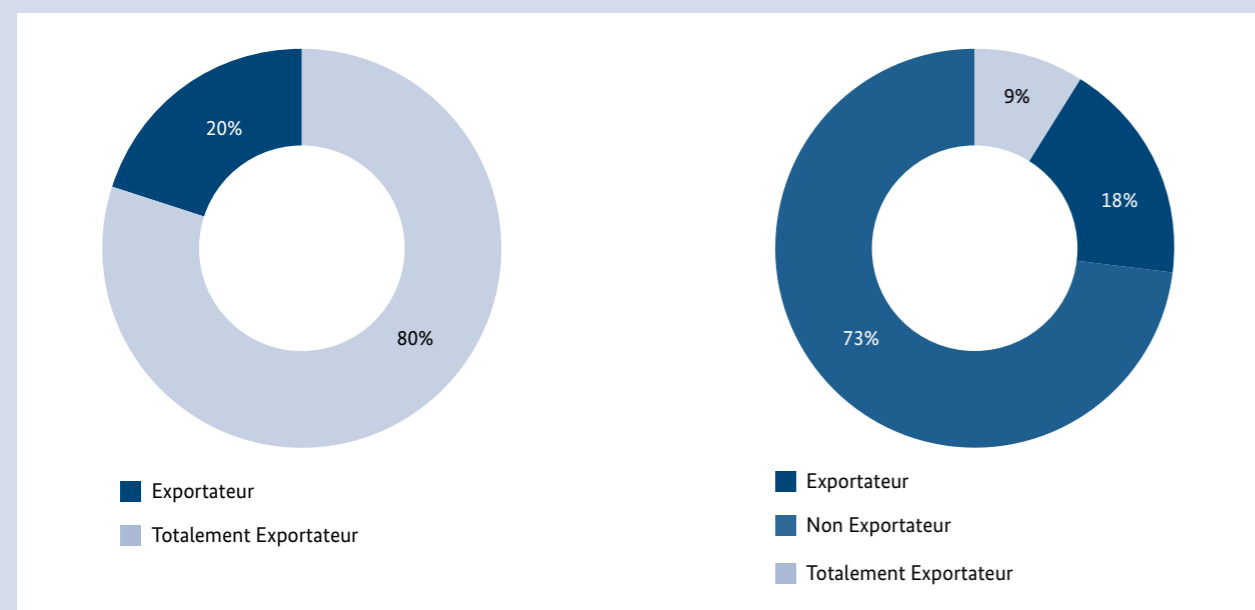


Figure 89: Répartition des entreprises interrogées par marchés destinataires de l'export

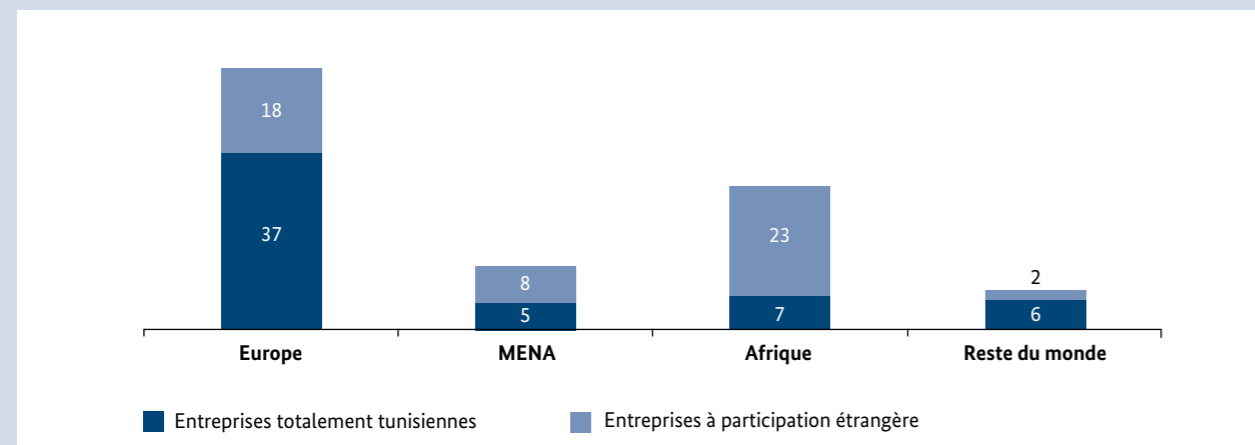
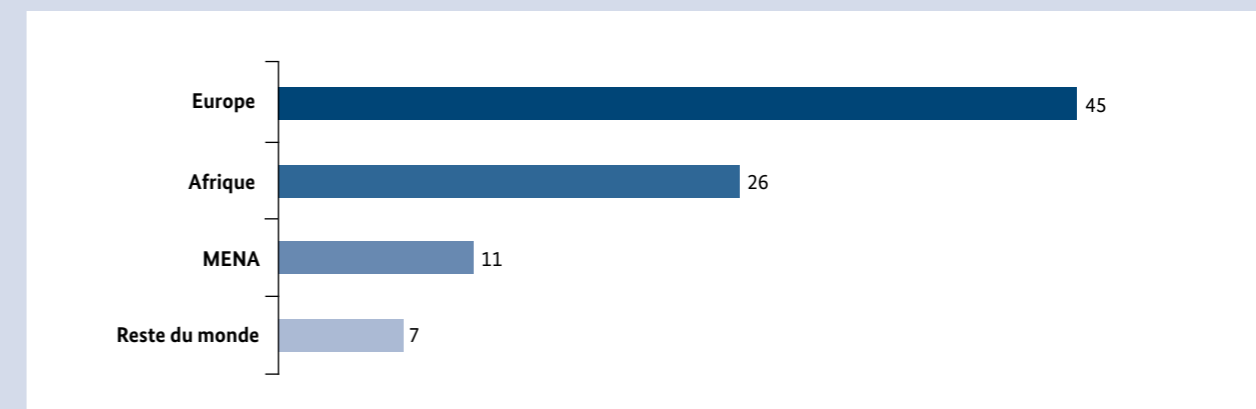


Figure 90: Marché à l'export des entreprises actives ou intéressées par le secteur des composants solaires



à deux axes, à savoir: L'utilisation des systèmes ERP et la certification. Sur 39 ⁷ entreprises qui ont une participation étrangère, 85% disposent d'un système de gestion intégré (ERP). Le pourcentage des entreprises tunisiennes utilisant un ERP est également élevé. En effet, sur les 34 entreprises 100% tunisiennes interrogées, 62% utilisent un système ERP. Au niveau de la certification, 88% des entreprises ayant une participation étrangère et 68% des entreprises 100% tunisiennes disposent au moins d'une certification (ISO 9001, ISO 14001, ISO TS...). La certification ISO 9001 reste la certification la plus répandue au niveau des entreprises

⁷ 39 entreprises ont répondu à la question « Disposez-vous d'un système ERP ? »

à participation étrangère et 100% tunisiennes comme le montre le graphique suivant.

9.4.2 Conclusion

L'existence de partenariat(s) entre les industriels tunisiens et des acteurs étrangers peut s'avérer fort bénéfique pour un éventuel positionnement sur le secteur des composants solaires, et ce, à plusieurs niveaux : le transfert technologique et de compétences, la facilitation d'accès à des marchés étrangers et des réseaux de distribution internationaux, la recherche et développement et l'accès à des sources supplémentaires de financement.

L'analyse relève qu'une part significative des entreprises interrogées bénéficient de relations de partenariat avec des acteurs étrangers ce qui favorisent leurs chance de positionnement sur le secteur des composants solaires.

Cependant, ces partenariats entre entreprises tunisiennes et acteurs étrangers restent non suffisamment matures pour supporter le développement de la fabrication de composants solaires. En effet, ces relations doivent se tisser avec des acteurs étrangers actifs sur le secteur des composants solaires pour faciliter le positionnement.

Sur le plan de l'export, les industriels tunisiens actifs ou intéressés par le secteur des composants solaires ont montré une bonne présence sur les marchés étrangers notamment Européens & Africains. Cette présence serait un atout supplémentaire pour un éventuel positionnement sur le secteur des composants solaires. L'envergure de l'entreprise et sa présence internationale ou régionale est un autre facteur favorisant le positionnement des entreprises intéressées sur le secteur des composants solaires. Pour ainsi conclure, l'analyse a démontré que les entreprises actives ou ayant exprimées un intérêt de positionnement disposent de plusieurs atouts en terme de d'accessibilité aux marchés

Figure 91: Répartition des entreprises interrogées par type d'implantation

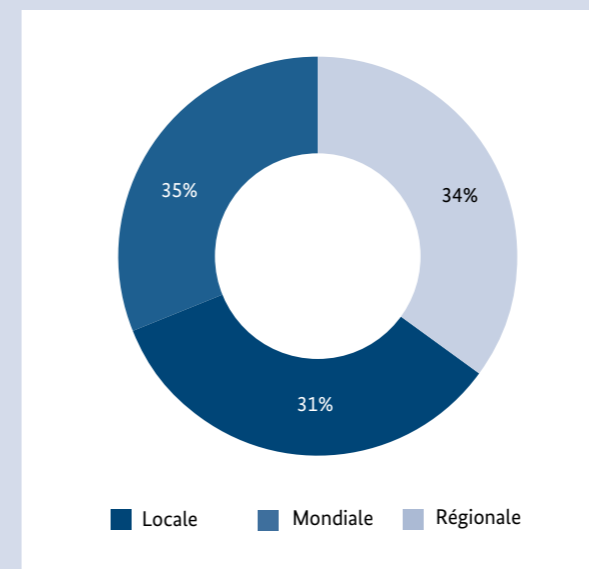
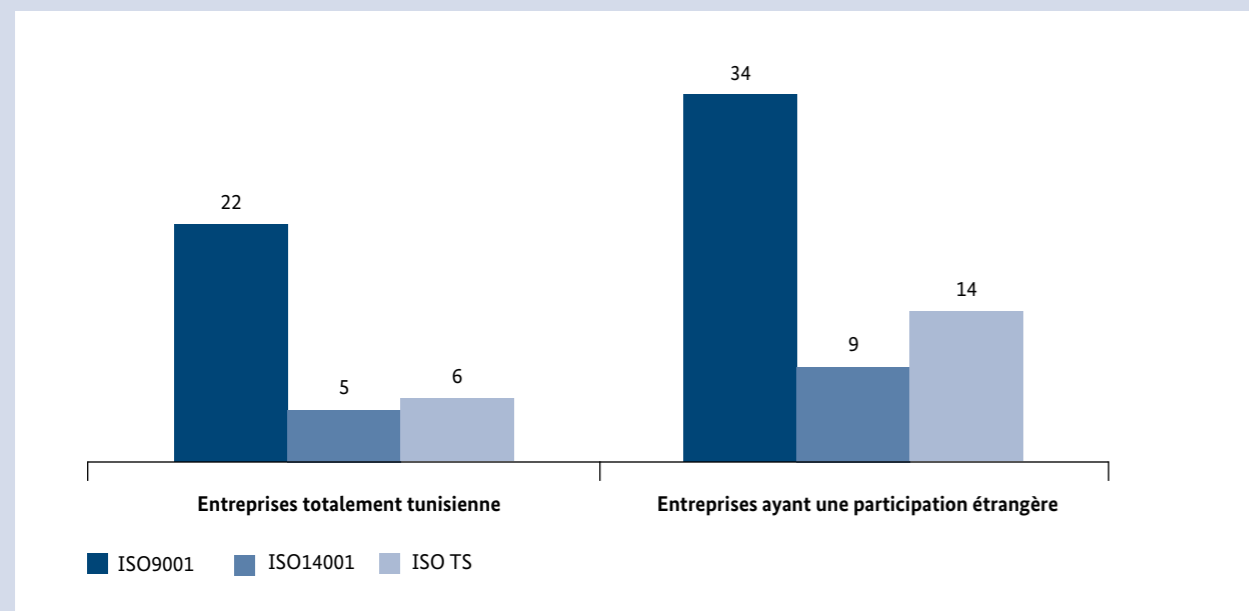


Figure 92: Répartition des certifications par nature d'entreprises (Totalement tunisienne/ à participation étrangère)



étrangers, d'implantation régionale ou mondiale ou de relation de partenariats stratégiques locaux ou internationaux.

9.5 Evaluation des capacités en R&D des entreprises

9.5.1 Aperçu des capacités R&D relatives aux technologies solaires

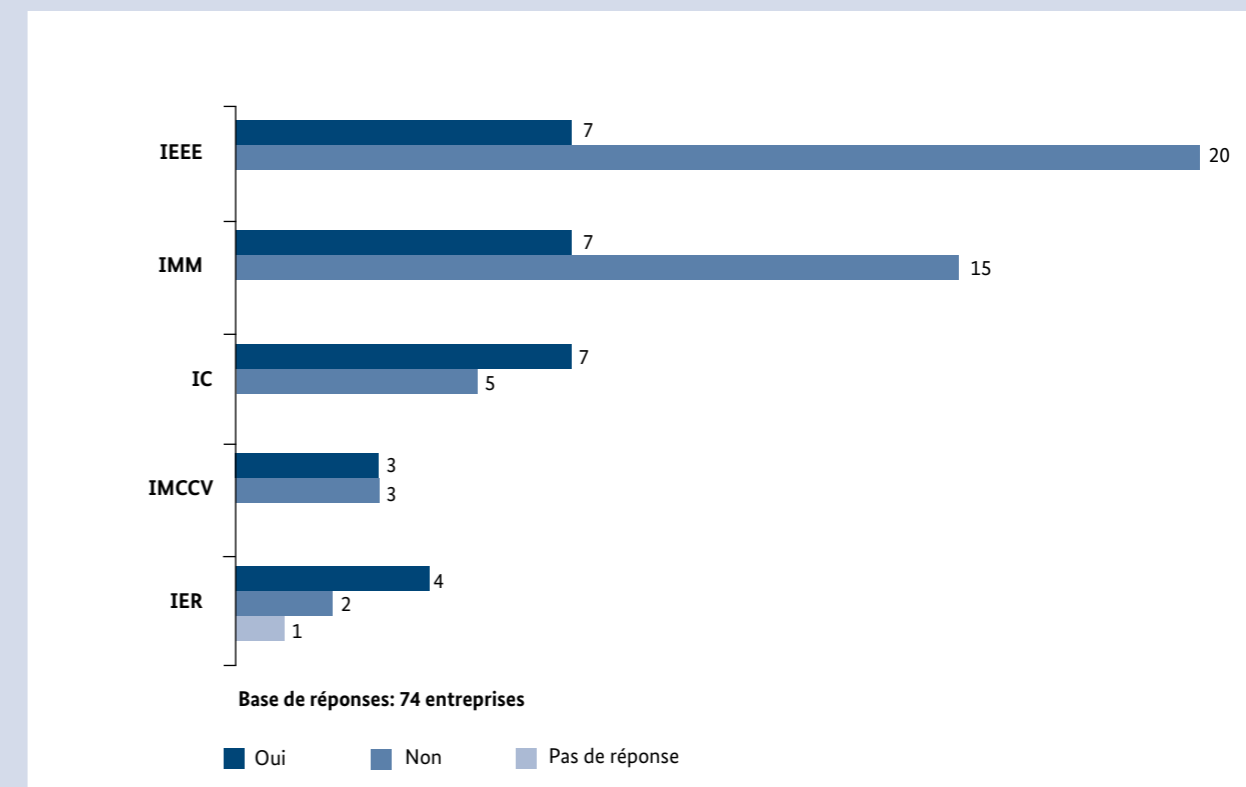
Les résultats de l'enquête ont montré que, généralement, les activités de recherche et développement des entreprises tunisiennes sont plus l'exception que la règle. Sur les 74 entreprises qui ont répondu aux questions concernant leurs capacités en recherche et développement, 61 % ont déclaré n'avoir aucune activité dans ce domaine. Les 28 entreprises impliquées dans des activités de recherche et développement sont issues à parts égales (25 %) de l'industrie électrique et électronique, de l'industrie mécanique et métallurgique et de l'industrie chimique. Les 25 % restants sont composés d'entreprises issues de l'industrie des énergies renouvelables (14 %) et de l'industrie des matériaux de construction, de la céramique et du verre (11 %). La figure suivante offre une vue d'ensemble de l'implication des entreprises dans la recherche et développement selon les secteurs d'activités pris en compte dans l'analyse.

Sur les 28 entreprises actives dans le domaine de la recherche et développement, 10 collaborent avec des partenaires internationaux, 5 ont déclaré ne pas être impliquées dans des partenariats internationaux et 13 n'ont pas répondu à cette question. De plus, l'ensemble des 7 entreprises ayant indiqué avoir déposé des brevets travaillent avec

des partenaires internationaux ou font partie de groupes internationaux. La figure 31 montre de quels secteurs sont issues les entreprises qui sont actives dans la recherche et développement et qui travaillent en collaboration avec des partenaires internationaux. Quatre de ces entreprises sont issues du secteur de l'électricité et de l'électronique, trois viennent du secteur des énergies renouvelables, deux de l'industrie chimique et une du secteur mécanique et métallurgique. Aucune n'est issue de l'industrie des matériaux de construction, de la céramique et du verre.

Comme le montre la figure 95 ci-dessous, il est intéressant de constater que, pour la plupart des entreprises actives en matière de recherche et développement (20 sur 28), la part de capital étranger est nulle ou inférieure à 25 %, alors que les entreprises dont la part de capital étranger est plus élevée sont moins actives dans ce domaine. De plus, sur les 8 entreprises présentant une part de capital étranger supérieure à 25 % et disposant d'un département R&D, 5 ont indiqué travailler en partenariat avec une autre entreprise ou avec leur entreprise mère dans le cadre de leurs activités de recherche. Les trois entreprises restantes n'ont pas répondu à cette question. Ceci va dans le sens des observations faites pendant les visites sur site et selon lesquelles les entreprises appartenant à un groupe ne disposent pas de leur propre département R&D car ces activités sont généralement incluses dans la structure organisationnelle de l'entreprise mère. Par ailleurs, l'ensemble des 6 entreprises ayant indiqué qu'elles ne vendaient pas leurs produits à l'export font partie des 20 entreprises qui ne sont pas actives dans la recherche et développement et qui n'ont pas de capital étranger.

Figure 93: Implication des entreprises en R&D selon leur secteur d'activité



Sur les 28 entreprises actives dans la recherche et développement, 13 sont explicitement impliquées dans le secteur des technologies solaires. Ces entreprises sont principalement engagées dans le photovoltaïque et le solaire thermique. D'après les données collectées, il apparaît pourtant clairement que la recherche et développement dans le secteur des technologies solaires, particulièrement en ce qui concerne le CSP, ne présente pas encore un intérêt suffisant fort pour les entreprises tunisiennes. Sur ces 13 entreprises, 5 sont issues du secteur chimique, 4 du secteur des énergies renouvelables, 2 du secteur électrique et électronique, 1 de l'industrie des matériaux de construction, de la céramique et du verre et une du secteur mécanique et métallurgique.

En ce qui concerne les ressources humaines, l'étude a montré que la plupart des entreprises emploie moins de 5 personnes à des activités de recherche et développement (voir figure 96 a). Cependant, aucun rapport de cause à effet n'a pu être observé entre le nombre d'employés travaillant dans le domaine de la recherche et développement et le nombre de brevets déposés. 5 des 7 entreprises dépositaires de brevets emploient moins de 5 personnes en R&D ; une entreprise emploie 5 à 9 personnes et une autre a déclaré employer plus de 50 personnes dans ce domaine, ce qui est cependant certainement dû au fait que cette entreprise appartient à un groupe international. Une entreprise qui a fait preuve d'une très forte activité de R&D, avec 21 à 50 per-

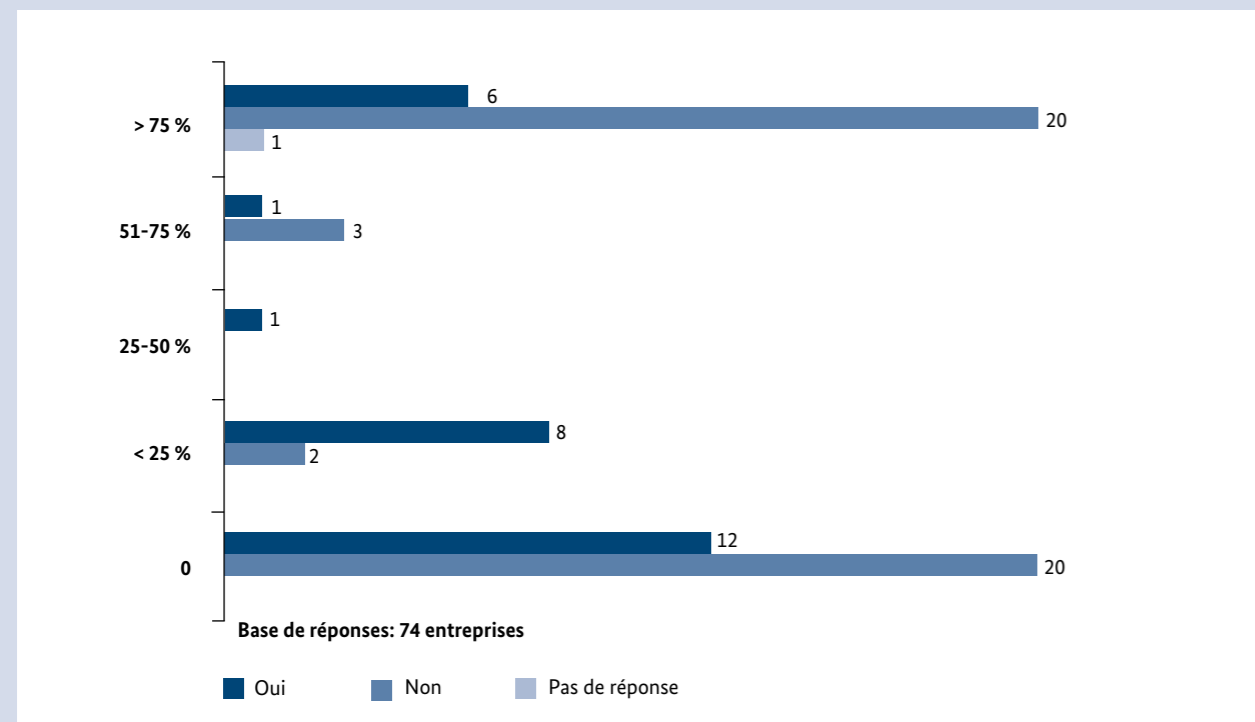
sonnes employées dans ce domaine, n'a pas encore déposé de brevet

La situation est légèrement différente en ce qui concerne les moyens financiers alloués la recherche et développement. Comme le montre la figure 96 b) ci-dessous, la moitié des entreprises qui ont répondu à la question correspondante investit moins de 1 % de son chiffre d'affaires dans la recherche et développement, alors que les entreprises restantes lui dédit 1 % ou plus.

9.5.2 Conclusion

En ce qui concerne les capacités de recherche et développement des entreprises tunisiennes, l'étude permet de tirer les conclusions suivantes : l'étendue de l'implication actuelle des entreprises tunisiennes analysées dans la recherche et développement varie sensiblement. Dans le secteur du solaire thermique, la recherche et développement est déjà assez avancée, en particulier en ce qui concerne l'optimisation des processus. Dans l'ensemble, cependant, les ressources humaines et financières dédiée à la recherche et développement sont très limitées. Les facteurs qui sont à l'origine de cet état de fait sont de natures diverses. Les entreprises impliquées dans des partenariats solides au niveau international et orientées vers l'export semblent être plus inclinées à s'engager dans la recherche et développement,

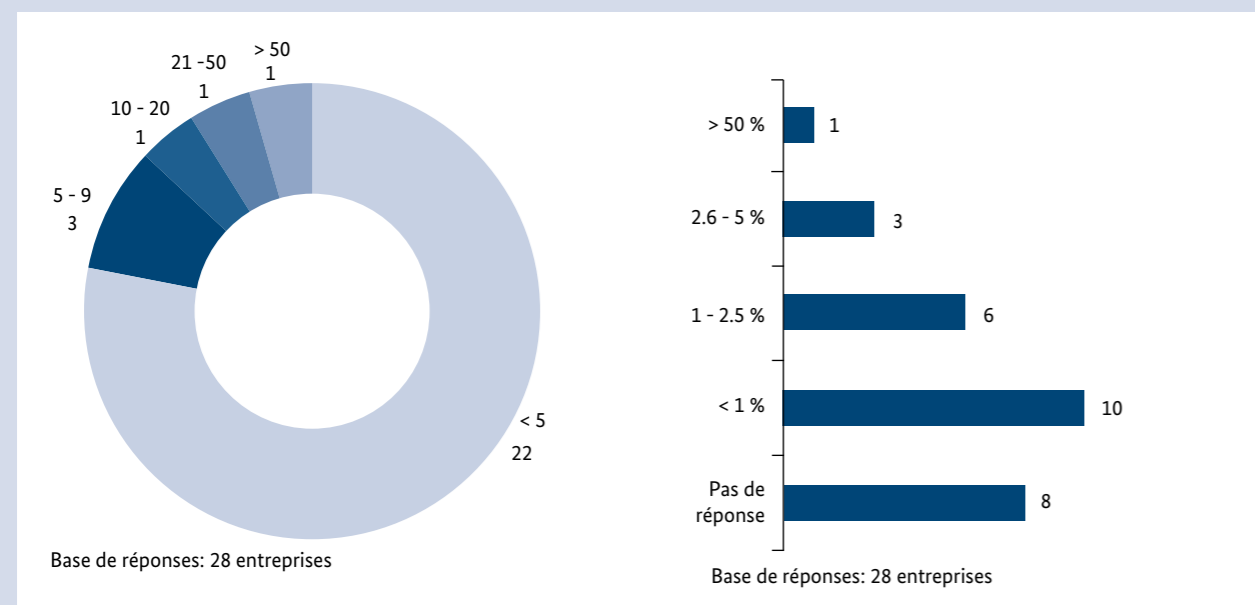
Figure 94: Implications des entreprises en R&D selon leur part de capital étranger



mais se concentrent principalement sur le développement des produits. Par ailleurs, pour ce qui est des entreprises tunisiennes qui font partie de groupes internationaux, les départements de recherche et développement sont souvent intégrés dans les structures organisationnelles des entreprises mères. Les perspectives incertaines en ce qui concerne la stratégie solaire en Tunisie de même que les

évolutions du marché mondial représentent des obstacles majeurs à l'augmentation de l'engagement des entreprises dans la recherche et développement spécifique aux technologies solaires. Cependant, des exemples issus du secteur de l'industrie mécanique et métallurgique aussi bien que du secteur des industries électriques et électroniques montrent que le potentiel de recherche et développement existe et

Figure 95: Répartition des entreprises impliquées dans la R&D selon l'effectif alloué (a) et selon le budget alloué en % du CA (b)



qu'il peut être exploité au sein de la stratégie commerciale de l'entreprise. C'est particulièrement vrai pour les entreprises qui disposent des compétences nécessaires ainsi que d'une expérience suffisante à l'échelle internationale, et qui poursuivent consciemment l'objectif de développer des produits de niche pour le marché international afin de garder une certaine indépendance par rapport à l'évolution du marché du solaire tunisien.

9.6 Structures d'appui de l'Etat en R&D, formation et test

L'analyse des capacités actuelles des structures d'appui au secteurs industriels pour le développement du potentiel de fabrication des composants pour les énergies solaire est analysé selon deux angles :

Optique Entreprises : La capacité des structures d'appui du point de vu des entreprises (à travers les réponses collectés dans le cadre de l'étude : questionnaire & visite sur site)

Optique Institutions : Analyse des capacités sur la base des entretiens avec les institutions qui ont été sélectionnés dans le cadre de cette étude ; Sélection qui s'est basée sur l'importance de l'implication de l'institution sur les énergies renouvelables ainsi que la nature de leurs missions. Ces institutions couvrent différentes formes de support en termes de recherche et développement, de formation, d'assistance technique aux entreprises ainsi que de tests sur les équipements et les composants.

9.6.1 Analyse des résultats de la phase de terrain

Très peu d'interaction des entreprises avec les structures d'appui

L'analyse de la base des réponses des entreprises démontre une faible interaction avec les structures d'appuis mises en place par l'Etat pour supporter le secteur industriel en général et le domaine des énergies renouvelables en particulier. En effet, la quasi-totalité des entreprises actives dans les énergies renouvelables estime que leur degré de recours aux structures d'appuis actuelles ou partenariat en matière de recherche et développement, formation, centre technique et laboratoire des tests, est très faible.

Ceci bien évidemment constitue un levier d'action important qui pourrait être activé pour créer des liens forts entre les structures d'appuis actives actuellement dans le domaine des énergies renouvelables et les industriels actuels et futurs, y compris ceux qui sont/seront actifs dans la fabrication des composants pour les applications aux systèmes des énergies solaires.

Par ailleurs, l'entretien avec les institutions confirme cette conclusion. En effet, le niveau actuel de collaboration se limite le plus souvent à une approche réactive aux demandes des industriels, généralement déclenchées suite à des approches et contacts personnels plutôt qu'un système formalisé de collaboration.

Portée limitée des tests actuellement disponibles pour les systèmes et composants des énergies renouvelables

La portée actuelle des tests réalisés sur les systèmes solaire est très limitée et répartie entre plusieurs institutions qui chacune prend un charge une série limitée de tests (absence d'une institution offrant la totalité de la batterie de tests nécessaires).

Pour les CES par exemple, les tests répertoriés au niveau des institutions interviewées sont les suivants :

CTMCCV : Test des performances thermiques sur les chauffe eau solaires. Le laboratoire de test de performances mécanique des CES n'est plus opérationnel depuis janvier 2011, ce dernier ayant été endommagé lors de la révolution (En cours de remise en état) ;

CETIME : Test sur la qualité des matériaux et sécurité de fonctionnement (électrique) pour les ballons des CES ;

ENIT : Certains tests sur les CES sont réalisés au niveau de l'école suite à des demandes de quelques industriels (Faible activités en volume).

Les tests sur les systèmes PV sont actuellement quasi-inexistants au niveau des institutions interviewées mis à part quelques tests sur les composants électriques au niveau du CETIME qui sont rendu possible grâce à l'expérience de cette institution sur des tests similaires sur les câbles et les câblages automobile.

Par ailleurs, au niveau de la CETIME un projet est en cours de réalisation pour l'installation d'un laboratoire de test pour les systèmes PV. La première phase du projet (en cours), couvre principalement les tests UV, l'essai d'efficacité, l'essai mécanique, la sécurité électrique. La finalisation de la première phase du projet est prévue d'ici à la fin 2013. La deuxième phase portera sur la certification des systèmes et des composants et les services d'assistance aux entreprises actives dans le secteur.

Des travaux de recherche diffus, non ciblés et non valorisés

Il existe des travaux de recherche et développement relatifs au domaine des énergies solaires et des composants pour les technologies solaires au niveaux des centres techniques, des écoles d'ingénieurs et des universités (Ecole Nationale d'Ingénieur de Tunis, Faculté des Sciences de Tunis, Technopôle

de Borj Cedria ...). Ces travaux peuvent avoir des dimensions pratiques ou fondamentales. Cependant, ces activités restent diffuses et non ciblées.

Les structures de Recherche et Développement travaillent en silo de manière cloisonnée, limitant ainsi le degré d'interaction entre les différents acteurs du secteur, ce qui a conduit à une redondance des travaux de recherche et une duplication des efforts. Aussi, ces travaux sont rarement valorisés ou exploités. En effet, les activités de recherche et développement sont très rarement industrialisées ou valorisées commercialement.

Les structures de recherche affirment avoir réalisé des innovations ou des recherches qui peuvent être brevetées ou protégées. Néanmoins, le nombre de brevets dans le domaine des technologies solaires est négligeable et l'utilisation concrète des résultats de la recherche par les entreprises est très faible. Les publications scientifiques restent la principale fin des travaux de recherche réalisés actuellement au niveau des unités de recherche sur les ER solaire.

Un degré de coopération et de synergie très timide entre la sphère de la recherche et celle de l'industrie

Malgré les efforts de l'Etat en matière de promotion de la recherche et de mise en œuvre de mécanismes de partenariat entre l'industrie et les structures de recherche ainsi que l'initiation des programmes nationaux visant à renforcer la coopération entre les différents acteurs du secteur des énergies renouvelables (comme le programme TRENET Tunisian Renewable Energy Network) pour renforcer la coopération entre les acteurs du secteur des énergies renouvelables (Recherche-Industrie), ces relations restent timides et les mécanismes ne sont pas suffisamment efficaces pour déclencher ou pérenniser cette dynamique visée.

Les interlocuteurs interviewés lors de cette étude avancent l'inexistence de mécanismes clairs et formalisés pour dynamiser cette coopération ou ces partenariats. Il est à noter que le programme TRENET fait face à certaines difficultés notamment après la révolution du 14 Janvier. Ce réseau doit être réactif.

Quant aux partenariats entre structures de recherche nationales et structures internationales, ils sont quasi-inexistants. En effet, les stages Etudiants dans le cadre de projets de fin d'études, de Masters ou de thèses de doctorat semblent être la seule forme de coopération entre structures nationales & internationales de Recherche et Développement (nous entendons par structures R&D, principalement des unités et laboratoire de recherche au sein d'universités, écoles d'ingénieurs et technopoles des énergies renouvelables).

La formation dans les énergies renouvelables solaire, dans l'attente d'un marché

L'analyse des réponses des entreprises qui se sont déclarées actives dans le domaine des énergies renouvelables démontre qu'il n'y a généralement pas de difficultés particulières à trouver les compétences requises, et ce aussi bien au niveau des cadres qu'au niveau de la main d'œuvre qualifiée. En effet les compétences actuellement disponibles dans des disciplines classiques tel que mécanique, électrique, énergétique sont pour le moment adaptées aux besoins actuels des industriels en ressources qualifiées.

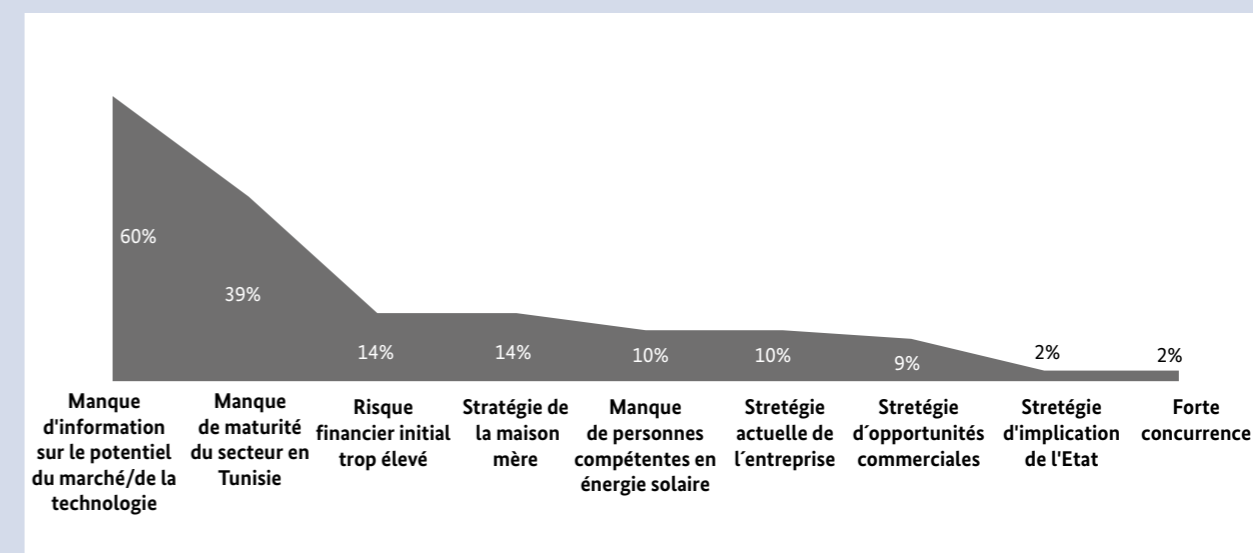
Selon le feedback des institutions qui ont été interviewées, relevant du Ministère de l'Enseignement Supérieur & de la Recherche Scientifique (ANPR, ENIT, Faculté des sciences), le besoin actuel du marché en termes de profils ayant des compétences pointues dans les énergies renouvelables solaires n'est pas très important. De ce fait, la mise en place de programmes spécifiques à travers le renforcement des cursus actuels ou la mise en place de nouvelles branches (CSP par exemples), ne pourrait se faire que dans le cadre d'une stratégie nationale globale pour le secteur des énergies renouvelables. Ceci permettrait d'assurer une cohérence entre les besoins en compétences supplémentaires sur les énergies renouvelables solaires au niveau du marché de l'emploi et les profils qui sont formés au niveau des universités (en termes de nombre et de spécialités).

9.6.2 Conclusion

Le niveau de maturité actuel des structures d'appuis sur les technologies solaires est très modeste. Les insuffisances ont trait essentiellement à l'absence d'une vision sur les prévisions de développement futur du secteur des technologies relatives à l'énergie solaire en Tunisie ainsi qu'une difficulté de financement et d'acquisition de matériels nécessaires pour les laboratoires ou les centres techniques ainsi que les lourdeurs des procédures administratives.

L'industrialisation de la filière solaire en Tunisie, ainsi que la mise en œuvre de mécanismes efficaces susceptibles de créer la synergie requise entre la sphère industrielle, celle de la recherche et développement ainsi que les institutions de tests et d'assistance aux industriels, pourrait constituer un facteur important pour le développement des activités au niveau des structures d'appuis, en phase avec la croissance future du secteur.

Figure 96: Récapitulatif des Barrières à la production d'équipements des énergies renouvelables – Optique entreprise



9.7 Synthèse des principales conclusions

9.7.1 Leviers & Barrières à la production d'équipements des énergies renouvelables

L'optique des entreprises:

L'analyse du potentiel de production des composants pour l'énergie solaire a permis de mettre en avant les principaux facteurs de frein (barrières) et de motivation (leviers) à l'introduction dans ce secteur. Les capacités analysées (financières, techniques, R&D, expérience internationale & partenariat) révèlent ainsi, que le principal déterminant de l'attractivité du secteur réside dans l'existence d'un marché potentiel. En effet, près de 71% des entreprises qui ne sont pas actuellement positionnées sur les énergies renouvelables reconnaissent l'importance cruciale de ce facteur de motivation. En conséquence, le manque d'information et l'incertitude relative à un tel potentiel ne cesse de limiter la volonté de s'y engager pour plus de 60% de ce pool final⁸.

Le manque d'information/ de maturité du potentiel du marché local des énergies renouvelables est la principale barrière à l'introduction des entreprises dans ce secteur

Le récapitulatif des barrières à la production d'équipement des énergies renouvelables révèle que l'introduction des entreprises dans ce secteur se trouve, essentiellement, freinée par le manque d'information

Le récapitulatif des barrières à la production d'équipement des énergies renouvelables révèle que l'introduction des entreprises dans ce secteur se trouve, essentiellement, freinée

par le manque d'information et de maturité du potentiel (global et local) que représente ce secteur stratégique. Le risque financier et la stratégie de l'entreprise mère sont classés en 3^{ème} position et considérés ainsi, comme des freins mineurs au positionnement sur les énergies renouvelables (avec 14% des répondants). Parmi les autres barrières citées, le manque de compétences humaines en la matière et la stratégie de spécialisation de l'entreprise arrivent en 5^{ème} position, devançant ainsi le manque des opportunités commerciales, qui avec 9% des répondants, se trouve classé en 6^{ème} position.

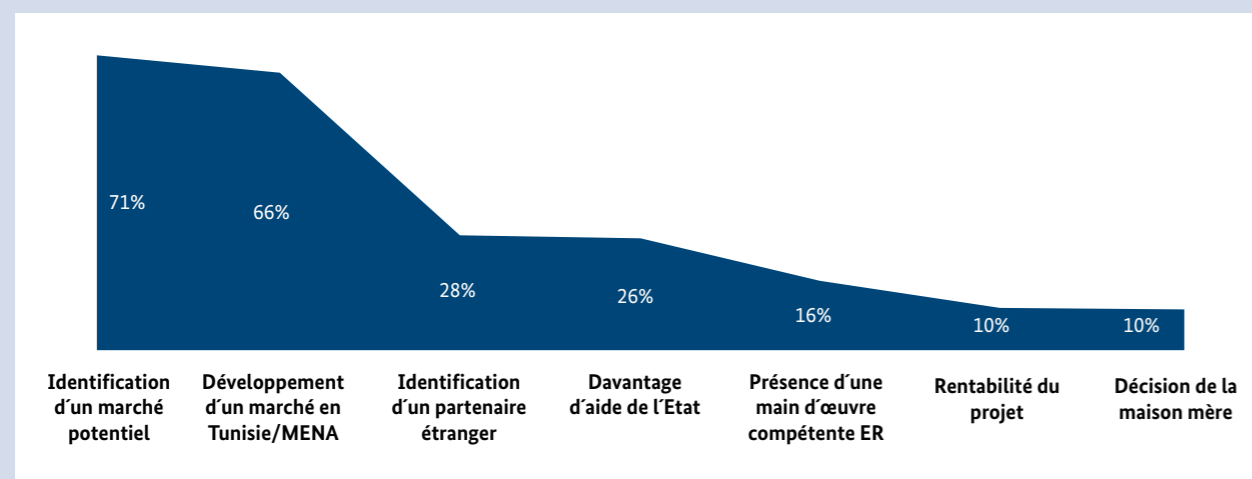
Il est à noter que dans ce même cadre, le manque d'implication de l'Etat, notamment à travers le rôle des institutions dont l'activité est reliée aux domaines des technologies solaires, est également perçu par les entreprises comme un frein majeur. En effet, de nombreuses entreprises (même celles actives dans le secteur des énergies renouvelables) ont exposé le faible niveau d'interaction entre l'industrie et les structures d'appui, essentiellement, pour la formation et la recherche & le développement, comme un facteur limitant, non seulement, le développement de compétences pointues dans le domaine mais surtout la visibilité de ce secteur stratégique.

L'identification/ développement d'un marché potentiel (Tunisie/ MENA) est le principal levier de motivation pour l'introduction des entreprises dans ce secteur

En se référant au récapitulatif ci-dessus, l'identification d'un marché potentiel et le développement d'un marché local et/

⁸ Le pool final des entreprises qui ne sont actuellement pas positionnées sur les ER est de 58.

Figure 97: Récapitulatif des Leviers à la production d'équipements des énergies renouvelables – Optique entreprise



ou régional, arrivent respectivement en 1^{ère} et 2^{ème} position des principaux facteurs de motivation cités par les entreprises non encore actives sur le secteur des composants solaires (avec respectivement 71% et 66% des répondants). En 3^{ème} position et avec 28% des répondants, l'identification d'un partenaire international apparaît comme un facteur qui peut motiver et booster le positionnement sur ce secteur stratégique tout comme les aides financières publiques (4^{ème} position), particulièrement, dans les domaines de la formation, la certification et la recherche. Ce besoin de renforcer davantage la relation avec les organismes publics en général et les structures d'appui, actuellement, actives dans le domaine des énergies renouvelables d'une manière plus spécifique, constitue un levier d'action important qui pourrait améliorer l'attractivité de ce secteur.

Parmi les autres leviers cités, la disponibilité de la main d'œuvre qualifiée, la rentabilité financière du projet et les décisions prises par la maison mère, arrivant en dernière position sont considérés comme peu significatifs en terme d'encouragement à l'engagement dans le secteur des énergies renouvelables.

L'optique des structures d'appui:

L'analyse des capacités actuelles des structures d'appui actives dans le domaine des énergies renouvelables confirme l'existence d'un faible niveau de collaboration avec les industriels. En effet, les entretiens réalisés auprès des 8 institutions ciblées par cette étude, démontre l'absence d'une approche proactive entre les deux catégories d'acteurs limitant ainsi les résultats attendus des synergies potentielles.

De telles observations, révèlent le faible niveau de maturité des structures d'appui à l'égard du secteur des énergies renouvelables et ce à plusieurs niveaux :

- La portée limitée des tests disponibles actuellement pour les systèmes et composants énergies renouvelables
- Le manque de valorisation et de ciblage des recherches dans les domaines technologiques solaires
- Le manque de partenariat entre les structures de recherche nationales et celles internationales
- L'absence de mécanismes formels de coordination avec les industriels
- Le faible degré de mise en œuvre de programmes spécifiques à la formation des compétences spécifiques dans le domaine des technologies solaires.

L'élaboration des recommandations au renforcement de la production nationale des composants des énergies renouvelables devrait considérer de telles insuffisances comme des leviers d'action majeure qui pourront activer et dynamiser la relation entre les structures d'appui et les industriels concernés en vue d'un développement potentiel futur de ce secteur. Il est bien entendu que ces mécanismes sont à considérer parallèlement à des mesures visant la création de la demande locale ou l'identification d'un marché sur une échelle internationale.

9.7.2 Analyse SWOT du potentiel de production des composants solaires par technologie

L'identification des forces, faiblesses, opportunités et menaces relatives à la production des composants solaires pour les différentes technologies ciblées, s'est fondée sur les principales conclusions issues des capacités évaluées (financières, techniques, R&D, expérience internationale & partenariat, structures d'appui).

Tableau 24: Analyse SWOT de l'industrie Tunisienne des composants de la technologie du solaire thermique

Forces	Faiblesses
Existence d'un marché mature pour les CES	Faible niveau de certifications par rapport aux standards internationaux
Présence des industriels Tunisiens sur les marchés de l'export	Investissement insuffisant dans activités de R&D: se limitant aux bureaux d'étude (au niveau des entreprises) et aux publications scientifiques (au niveau des institutions)
Forte maîtrise technique de la quasi-totalité des composants CES (ballons, capteurs, équipements d'installation)	
Bonne disponibilité des ressources humaines qualifiées	
Important potentiel pour faire croître la capacité locale de production	
Opportunités	Menaces
Existence d'un marché prometteur à l'export (Europe, MENA, Afrique particulièrement)	Forte dépendances vis-à-vis des subventions et programmes de l'Etat (PROSOL)
Important potentiel de l'intégration locale des composants actuellement importés	Fortes pressions concurrentielles régionales
Possibilité d'avoir un fort transfert technologique à travers les partenariats (étrangers) déjà établis	Absence de structures de test sur les composants et équipements CES

Tableau 25: Analyse SWOT de l'industrie Tunisienne de production des composants de la technologie photovoltaïque

Forces	Faiblesses
Existence de nouveaux producteurs de panneaux photovoltaïques déjà établis avec des capacités technologiques de pointe	Faible niveau d'expertise locale (le premier fabricant de panneaux photovoltaïque s'est implanté en Tunisie en 2011)
Forte maturité industrielle locale dans la production des composants électroniques et électriques (câbles et autres composants électriques) orienté essentiellement vers les marchés de l'export	Manque de ressources humaines qualifiées
Bon niveau de certification aussi bien au niveau de la production des panneaux photovoltaïques que pour la production de composants électriques	Investissement insuffisant dans les activités de R&D pour les composants du verre, des cellules et des feuilles d'encapsulation en plastique
Bonnes capacités technologiques et de R&D pour les industries impliquées (Électriques essentiellement)	
Opportunités	Menaces
Accès facile aux marchés de l'Export (Europe et Afrique essentiellement)	Forte concurrence internationale et retard de maturité technologique à rattraper
Accès au marché local via les activités d'assemblage et d'installation	Risque de ROI du à l'incertitude sur le développement du marché global
Irradiation solaire/ zone géographique favorable	Faible visibilité sur les tendances mondiales
	Absence de cadre réglementaire pour les activités photovoltaïques
	Absence de structures de test sur les composants et équipements photovoltaïques

Tableau 26: Analyse SWOT de l'industrie Tunisienne de production des composants de la technologie CSP

Forces	Faiblesses
Bonne capacité de production locale des structures métalliques pour des installations spécifiques (tubes, réservoirs, supports...)	Industrie non établie
Important potentiel dans l'industrie du verre	Absence de maîtrise technique de la technologie CSP à tous les niveaux (industrie, formation, recherche...)
	Absence d'expertise humaine dans les technologies CSP
	Absence d'activités R&D dans les domaines de CSP
Opportunités	Menaces
Climat géographique favorable	Pas de visibilité sur l'avenir mondial du développement de la variante technologique CSP
Projet DESERTEC	Faible niveau de développement de l'industrie locale du verre
Possibilité d'être le pays « first mover » et bénéficier des importants avantages de ce positionnement	

9.7.3 Récapitulatif du potentiel de production par composant cible

Id.	Composants	Potentiel de fabrication en Tunisie	Actions requises/ recommandées
1	CSP-Miroir	Potentiel moyen à court/ potentiel fort à long-terme - Capacités technologique existantes, investissements nécessaire - Développement d'un marché local déterminant pour les investissements - Concurrence de l'Algérie et Egypte (cout de l'énergie)	- Ne pas produire juste ce composant, à cause d'immatunité du marché et l'absence d'une industrie locale - Opportunité existe si marché régional ou local se développe
2	CSP-Récepteurs	Potentiel faible à court et moyen terme, - haute technologie, forts investissements requis pour développer capacités humaines, technologique, R&D	- Ne pas produire à cause d'immatunité du marché et l'absence d'une industrie locale
3	CSP-Système de stockage	Potentiel faible à court et moyen terme - Compétence spécifiques requises (durabilité, qualité) - Peu d'entreprises spécialisées dans le monde	- Ne pas produire à cause d'immatunité du marché et l'absence d'une industrie locale
4	CSP-Power block	Potentiel moyen à court/moyen/long-terme - Composants standards - Forte concurrence internationales	- Ne pas produire à cause d'immatunité du marché et l'absence d'une industrie locale
5	CSP-Heat Transfer Fluid System	Potentiel moyen à court/moyen/long-terme - Haute technologie - Importants investissements requis - No turn-key technology available	- Ne pas produire, à cause d'immatunité du marché et de la chaine de valeur
7	CSP-Support	Potentiel moyen à court/moyen terme, potentiel fort à long-terme - Systèmes produits par type de technologie - Haute précision nécessaire - Investissements dans des capacités technologiques, ressources humaines et R&D nécessaire	- Ne pas produire, à cause d'immatunité du marché et de la chaine de valeur
8	PV- Upstream	Potentiel très faible à court et moyen-terme, potentiel moyen à long terme - Concurrence internationale très forte - Importants investissements par rapport à l'équipement, ressources humaines, compétence nécessaires - Structure industriel inexistante	- Ne pas produire à cause de l'inexistence d'un marché régional/local face à grands capacités mondiales
	PV-Verre	Potentiel fort à moyen-terme (traitement) - Capacité de production existant - Investissements dans l'équipement nécessaire - Concurrence de l'Algérie et Egypte (cout de l'énergie)	- Produire si marché régional/locale se développe
9	PV-film	Potentiel faible à court et moyen-terme, potentiel moyen à long terme - Haute technologie - Investissement dans R&D, équipements de production nécessaire - Fort concurrence internationale	- Ne pas produire à cause de disponibilité internationale
	PV-Modules	En production Potentiel de développement à court-terme - Potentiel moyen à moyen et long terme - Forte concurrence internationale avec grand capacité - L'environnement de marché difficile - Production de niche possible	- Ne pas produire sur des grandes capacités, support de la production de niche (BIPV)
	PV-Câbles	En production (pilote) - Fort potentiel de développement à court-terme - Capacités technologique et de production disponible	- Produire si marché local/régional se développe

12	PV-Onduleurs	Potentiel moyen faible à court-terme - Composants standard adapté aux besoins des systèmes PV - Haute qualité nécessaire - Fort concurrence internationale	- Produire à moyen terme si marché local se développe
	PV-Composants électroniques	Fort potentiel à court, moyen et long-terme - Composants standards - Pas d'adaptation PV nécessaire	- Produire si marché local/régional se développe - Intégré dans le secteur électrique
15	PV-Support	Fort potentiel à court, moyen et long-terme - Capacité technologique et de production disponible - Investissement dans développement de produit nécessaire	- Produire si marché local/régional se développe
17	ST-Capteurs Solaires	En production Fort potentiel de développement à court-terme - Forte capacité industrielle locale - Certifications internationales pour entrer plus de marchés mondiaux	- Continuer à produire, support pour développer des produits des systèmes pour le marché mondial (certification)
18	ST-Ballon de stockage	En production Fort potentiel de développement à court-terme - Capacité locale disponible - R&D (isolation) - Investissement dans l'équipement	- Continuer à produire
19	ST- Verre	Potentiel à court-terme (traitement) - Capacité de production existante - Concurrence de l'Algérie et Egypte (cout de l'énergie)	- Continuer à produire
20	ST- Contrôleurs électroniques	Fort potentiel à court-terme - Composants standards	
	ST- Support	En production Fort potentiel de développement à court-terme	- Continuer à produire

9.7.4 Matrice récapitulative du Potentiel de production locale par composants

La matrice suivante présente le potentiel de production locale de chaque composant cible compte tenu du niveau d'investissement et transfert technologique requis. Elle récapitule, ainsi, les principales conclusions discutées tout au long de ce rapport. En effet, en se référant aux capacités analysées (financières, techniques, R&D, expérience internationale & partenariat, structures d'appui), il ressort que la production locale serait plus réceptive aux composants des technologies du solaire thermique (ST) et photovoltaïque (PV) qu'à celle du CSP. Cette prédisposition s'articule, au tour des :

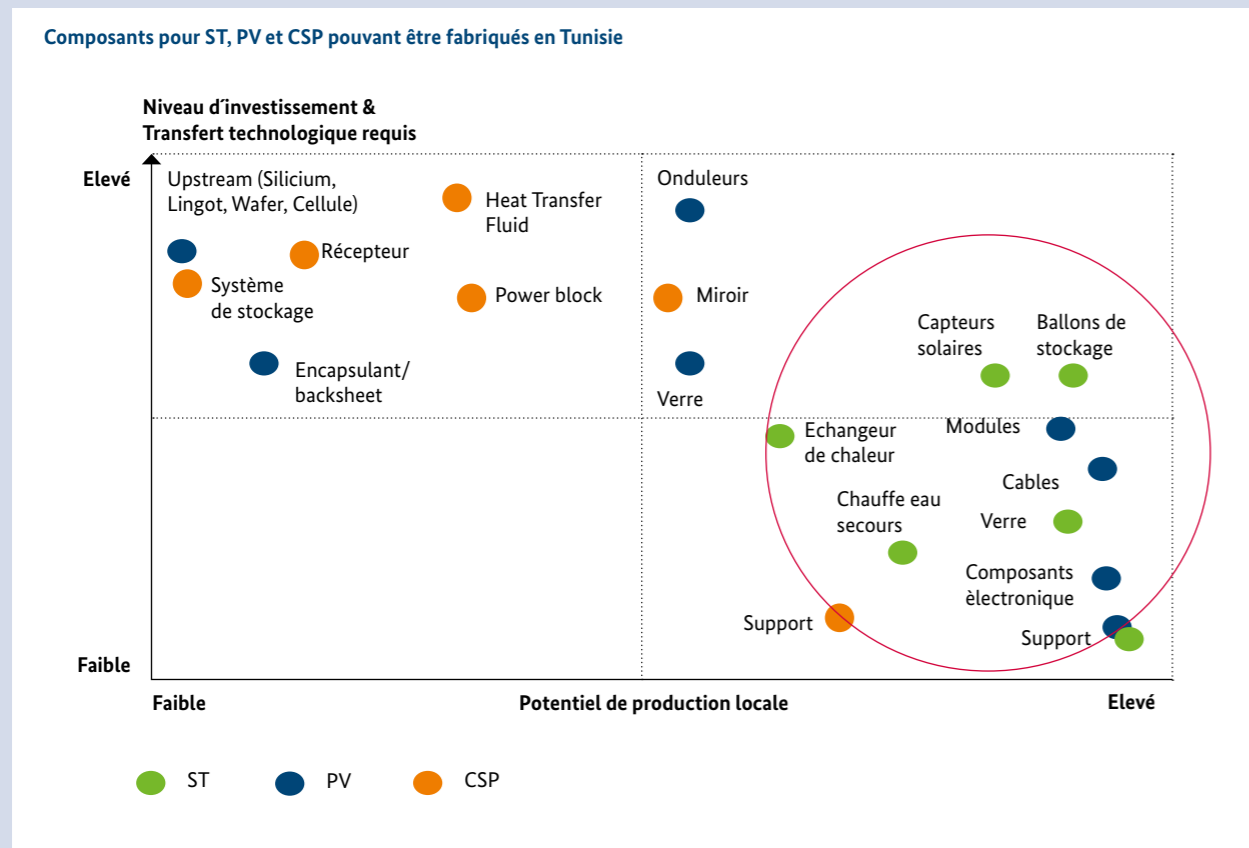
- Composants PV (électrique essentiellement)
- Composants pour les CES
- Et autres composants de support pour les systèmes CSP.

L'analyse du degré de complexité (niveau d'investissement et transfert technologique requis) de chaque composant solaire permet de dresser un état des lieux de la complexité de sa fabrication locale. Elle permet ainsi, de déduire la difficulté de l'introduction, à court et moyen termes, des encapsulants et Upstreams (Silicium, Lingot, Wafer, Cellule) sur le marché domestique. A long terme, il est possible que les industriels Tunisiens arrivent à les produire s'ils parviennent à dépasser les barrières technologiques, financières et techniques que leur fabrication présente. La matrice suivante confirme ainsi, le potentiel immédiat de ces industriels à produire les composants électroniques pour les technologies solaires (essentiellement PV et ST).

9.8 Matrice des composants à plus fort potentiel

La matrice ci-dessous fournit un aperçu sur les opportunités que les industriels Tunisiens pourraient saisir sur le court, moyen et le long terme. Il en résulte que le posi-

Figure 98: Matrice niveau d'investissement & transfert technologique requis / Potentiel de production locale par composant cible

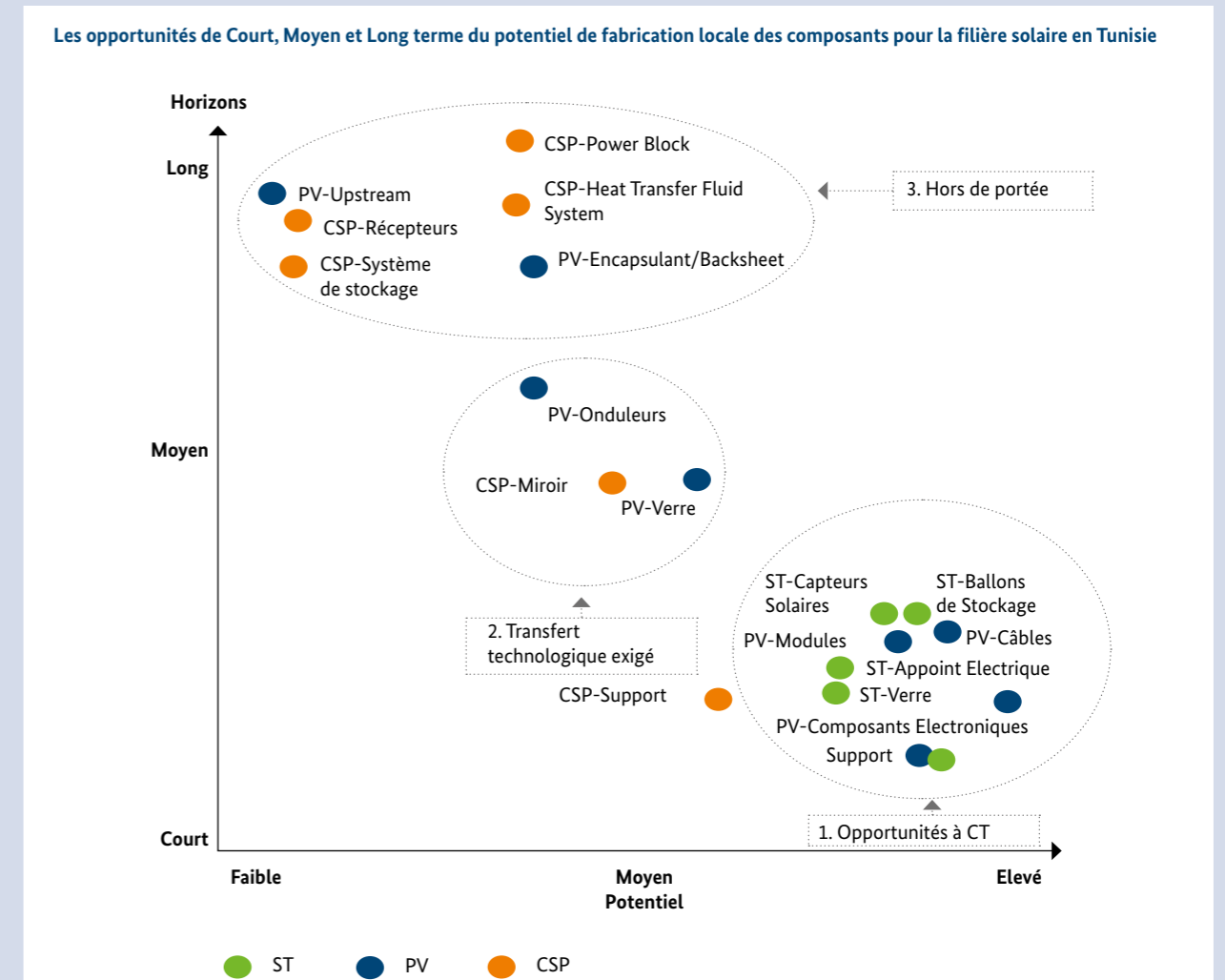


tionnement stratégique de la filière solaire Tunisienne est prédisposé à être plus orienté vers la fabrication de composants, essentiellement, électroniques, pour les systèmes photovoltaïques et de support pour le solaire thermique. Toutefois, le positionnement sur les produits solaires du CSP n'est possible que pour la fabrication des composants de support (cf. figure 37).

En Tunisie, l'évaluation du potentiel de fabrication des composants solaires a, non seulement, révélé la forte attractivité des segments qui font déjà l'objet d'importantes capacités industrielles locales (câbles, modules, onduleurs et autres composants électroniques), mais a surtout mis en avant le besoin de soutien et d'accompagnement requis (notamment sur les aspects : accès au marché, capacités techniques, capacités financières,

capacités technologiques...) par les industriels afin de renforcer leur capacité de production dédiée au secteur des énergies renouvelables. Les recommandations pour le développement d'une branche industrielle en matière d'énergie renouvelable solaire fait partie du chapitre 14 de cette étude et seront structurés selon les axes la politique, le cadre réglementaire, le financement et le renforcement des capacités (R&D, formation et certification).

Figure 99: Matrice des composants ayant le plus fort potentiel de fabrication en Tunisie



1. Opportunités à CT
2. Transfert technologique exigé
3. Hors de portée

10.1 Approche analytique et choix des exemples

Les conclusions des sections précédentes donnent une image très claire des exigences et conditions requises pour garantir le succès du développement de l'industrie solaire en Tunisie. Les visites sur site de fabricants tunisiens, en particulier, ont permis de conclure que, pour assurer la création d'un environnement favorable à la fabrication de composants solaires, de nombreuses mesures doivent être prises aussi bien du côté du marché (demande) que du côté l'industrie (offre).

Dans cette section, divers exemples internationaux de développement du secteur solaire seront examinés. Les facteurs de réussites seront analysés et des recommandations spécifiques au marché tunisien seront énoncées. Le principal objectif de cette section est donc, d'une part, de recommander des mesures ciblées et spécifiques visant à favoriser le développement d'un marché et d'une industrie solaire en Tunisie, et d'autre part, de proposer un plan d'action pour mettre ces recommandations en pratique.

En conséquence, les chapitres prochains comporte les points suivants :

- 1) Exemples internationaux de développement réussi de l'industrie solaire
- 2) Recommandations générales pour promouvoir le développement de l'industrie solaire
- 3) Recommandations technologiques spécifiques au marché tunisien et plan d'action pour leur mise en application.

Le premier point de cette section est basé sur des recherches documentaires et, pour les sites de l'industrie solaire pour lesquels aucune information précise concernant les mesures de développement n'était disponible, sur des entretiens avec des experts choisis. Les recommandations du second point se basent sur les leçons tirées des exemples internationaux et tiennent compte des principales conclusions des sections précédentes : la première section traite du développement de la technologie et du marché du photovoltaïque, du CSP et du CES et fournit des informations sur les principales évolutions et tendances technologiques internationales, informations qui doivent être prises en compte dans les recommandations. La deuxième section analyse la chaîne de valeur de ces trois technologies et fournit des informations sur les exigences, défis et opportunités qui y sont liés. La troisième section propose un aperçu des capacités techniques, financières et R&D des entreprises tunisiennes. Elle iden-

tifie les mesures rapidement applicables pour le développement de l'industrie solaire aussi bien que les questions qui demandent des efforts plus intenses pour permettre aux entreprises tunisiennes de se préparer efficacement à entrer sur le marché du solaire. Ces conclusions se retrouvent dans les recommandations faites à la fin de la présente section.

De plus, les recommandations tiennent compte des résultats d'un groupe de travail constitué par la GIZ, ses partenaires et les principales parties prenantes, et qui s'est réuni à Tunis au mois de septembre 2012. Ce groupe de travail était consacré au potentiel industriel tunisien en matière de fabrication de composants solaires et aux actions indispensables pour son exploitation. Le plan d'action proposé est également le fruit d'une approche participative incluant des responsables politiques, des experts et des fabricants locaux tunisiens. Sa faisabilité a été examinée avec les partenaires locaux et il comprend un lot de mesures identifiées comme prioritaires. La faisabilité du plan d'action et les priorités énoncées ont également été examinées au cours de groupes de travail constitués de responsables politiques, d'experts et de fabricants locaux.

La réussite du développement industriel des technologies solaires dépend de différents facteurs comme des marchés porteurs, un tissu industriel qui offre les bases nécessaires ou une contribution adéquate pour l'industrie solaire ainsi qu'un environnement favorable à ces facteurs. Les marchés sont nécessaires pour générer la demande. Les technologies solaires, qui ne sont pas encore compétitives par rapport aux autres énergies, doivent être soutenues par des mécanismes incitatifs. En Tunisie, les subventions accordées pour les énergies fossiles représentent une barrière supplémentaire à la compétitivité des technologies solaires. Le développement de l'industrie, p. ex. la fabrication (en amont) et les services (en aval) crée de la valeur ajoutée, des emplois et du savoir-faire au niveau national. Une base solide est cependant nécessaire pour soutenir ce développement, p. ex. la présence d'entreprises déjà actives dans les secteurs liés à l'industrie solaire ainsi que des mesures incitatives ou des ressources financières permettant à de telles entreprises de s'établir sur le marché ou de développer leur gamme de produits. Un environnement favorable est essentiel pour l'évolution et le maintien à la fois des marchés et du développement industriel, particulièrement en ce qui concerne la création d'avantages en termes de compétitivité sur le marché international.

La présente analyse privilégie donc deux aspects analytiques indissociables : le premier concerne essentiellement le niveau de développement du marché et le second se concentre sur la présence d'un environnement favorable pour les différents acteurs industriels. Cette approche se

10 Bonnes pratiques internationales pour le développement de l'industrie solaire

base sur les conclusions essentielles du chapitre 11. Elles mettent en évidence un manque d'opportunités en termes de débouchés et des déficits par rapport aux besoins spécifiques des fabricants, ce qui constitue une barrière importante pour entrer sur le marché de la fabrication de composants solaires. Cela inclut par exemple le transfert d'informations et de savoir, de même que des mesures d'incitation aux investissements, p. ex. dans de nouveaux équipements de production dédiés aux technologies solaires.

Pour ces deux aspects, l'analyse d'exemples internationaux se concentrera sur quatre dimensions différentes :

- **Politique** : cette dimension concerne les politiques énergétiques correspondantes (énergie renouvelable)

des pays en question, et, le cas échéant, les politiques industrielles qui s'y rapportent.

- **Cadre légal** : cette dimension se rapporte aux dispositions légales et réglementaires concernant la mise en application des politiques relatives à l'énergie renouvelable et à son industrie.
- **Financement et mesures incitatives** : ce point concerne le financement des mécanismes d'encouragement et les mesures d'incitation de la demande ou de l'offre.
- **Création de capacités** : concerne, entre autres, l'amélioration des institutions, la qualité de production ainsi que les mesures d'encouragement de l'innovation.

Le offre un aperçu non exhaustif des différentes options politiques et mesures s'adressant aussi bien au marché qu'à l'industrie pour les quatre dimensions décrites

Tableau 27 : Aperçu des mesures de soutien pour le marché et pour l'industrie

Dimension / Niveau	Politique	Cadre légal	Incitations	Création de capacités
Marché	Mise en place de politiques énergétiques, d'objectifs en matière d'énergies renouvelables (en fonction des technologies solaires spécifiques) et/ou d'objectifs de réduction des gaz à effet de serre très clairs Transparence des mesures politiques et des réglementations	Cadre légal (lois, arrêtés, réglementations, ordonnances etc.) soutenant les objectifs politiques	Financement d'un mécanisme de soutien Mesures d'incitations liées au prix de l'énergie pour ce qui est de l'énergie solaire Diminution des subventions destinées aux secteurs de l'énergie conventionnelle Incitations financières et crédits pour les consommateurs	Mesures favorisant l'amélioration de la qualité des services fournis par les institutions et administrations en charge de l'application des mesures destinées au marché.
Industrie	Mise en place d'objectifs clairs pour le développement industriel p. ex. soutien de certaines branches et secteurs	Régulation des contenus nationaux en tant qu'option potentielle	Existence de crédits et de mesures d'incitation aux investissements pour les fabricants Subventions d'équipement et prêts pour les fabricants et investisseurs dans des entreprises solaires (potentielles)	Mesures ciblées d'amélioration de la Recherche et Développement et des innovations, p. ex. encouragement de la mise en place de pôles de compétence Augmentation de la capacité à satisfaire aux standards de qualité et à obtenir des labels internationaux Formation et stages à la fois dans le domaine de l'industrie et dans le domaine de la prestation de services financiers (banques)

Source : documentation rassemblée par les auteurs.

ci-dessus. Ces mesures ne peuvent pas être examinées indépendamment les unes des autres. Qui plus est, elles sont complémentaires et se conditionnent réciproquement. Par exemple, le développement de mesures financières adaptées aux fabricants de composants solaires doit être soutenu par une politique industrielle claire, qui s'appuie à son tour sur des objectifs bien définis de développement de l'énergie solaire en tant que composant du mixe énergétique national. Les informations concernant aussi bien les mesures politiques que les mesures incitatives doivent être communiquées afin de garantir la transparence et la traçabilité et de renseigner les producteurs au sujet des potentiels que recèle le marché. L'exploitation de ces potentiels, cependant, peut être conditionnée par la présence ou par la création de capacités indispensables pour satisfaire aux standards en matière de technologie et de procédures. Une politique ou stratégie industrielle allie donc dans l'idéal des mesures qui concernent les deux aspects (marché et industrie) et les différentes dimensions en fonction des besoins spécifiques et du contexte donné.

La mise en place d'une politique industrielle réussie allée à une industrie locale bien établie et à la création d'emploi est un processus complexe et parfois assez long. C'est particulièrement vrai en ce qui concerne les nouvelles technologies, comme le solaire, dans la mesure où elles présentent des risques et des incertitudes qui ne pourront être écartés qu'au cours du processus de développement. D'une manière générale, le nombre de pays ayant réussi à mettre en place une industrie solaire qui fonctionne bien est réduit. Les cas sélectionnés dans le cadre de cette étude sont donc souvent très différents de la Tunisie en ce qui concerne la situation économique, le niveau de développement technologique et le cadre social et politique, facteurs qui jouent un rôle de premier plan dans la création d'une industrie solaire. Cependant, les expériences accumulées par d'autres pays et les enseignements tirés peuvent être une source d'informations utiles et d'inspiration. La Tunisie peut les prendre en considération dans le cadre de la mise en place de sa propre politique de développement d'une industrie solaire locale.

En fonction de l'importance du marché existant et des capacités de fabrication disponibles pour les technologies solaires (photovoltaïque, CSP, eau chaude solaire thermique) et de la volonté clairement exprimée par les gouvernements d'encourager le développement de l'énergie solaire, quatre cas ont été sélectionnés pour une étude plus approfondie : la Malaisie et l'Allemagne ont été retenues pour ce qui est du photovoltaïque. La Malaisie a réussi à attirer des fabricants réputés de photovoltaïque et a récemment introduit un mécanisme d'incitation pour stimuler le développement du marché local. L'Allemagne, pour sa part, est devenue un marché et un pôle de produc-

tion de photovoltaïque qui compte parmi les leaders mondiaux. Malgré la crise que connaît actuellement le secteur solaire en Allemagne, le pays est un exemple intéressant en termes de mécanismes d'incitation, de promotion de la Recherche et Développement ainsi qu'en ce qui concerne les adaptations nécessaires aux évolutions du marché effectuées pendant plus de 20 ans d'activités dans le domaine du solaire. La situation économique de l'Allemagne et celle de la Malaisie ne peuvent pas être comparées à celle de la Tunisie. Cependant, ces pays sont des exemples intéressants de développement réussi de l'industrie solaire.

Le cas retenu pour le CSP est celui de l'Espagne. Avec les États-Unis, l'Espagne fait partie d'un nombre restreint de pays qui disposent d'un système d'incitation, d'un marché et d'une industrie des centrales solaires à concentration. Enfin, la Turquie a été choisie pour représenter l'industrie de la production d'eau chaude solaire thermique, car elle fait partie des marchés leaders pour cette technologie, et ce malgré un manque de mesures d'incitation ciblées destinées à stimuler son développement.

Malgré le succès de son industrie solaire, la Chine n'a pas été retenue dans la mesure où il s'agit d'une économie dirigée par l'État et où la taille du marché intérieur chinois autorise des politiques et stratégies de développement de l'industrie solaire très particulières.

Les exemples internationaux seront analysés selon le schéma défini plus haut. Il convient de rappeler que chaque cas sélectionné présente des caractéristiques spécifiques et se base sur une situation particulière en ce qui concerne la demande du marché, les capacités technologiques, les expériences préalables dans le domaine des technologies concernées, les domaines politiques etc. Les mesures appliquées avec succès dans un contexte particulier sont donc susceptibles de mener à des résultats différents dans un autre contexte. Cependant, l'observation de l'interaction de certaines mesures avec la création d'environnements favorables peut permettre de tirer certains enseignements, en particulier si les conditions sont similaires ou présentent des points fondamentaux communs.

10.2 Analyse des exemples de développement réussi de l'industrie photovoltaïque

10.2.1 Mesures et décisions politiques concernant le marché et l'industrie en Malaisie

La Malaisie fait partie des pays d'Asie qui ont su attirer les fabricants de composants photovoltaïques. Des conditions géographiques favorables (p. ex. l'ensoleillement) et surtout des subventions d'équipement encourageantes et la présence d'une industrie du semi-conducteur et d'un

personnel qualifié ont permis de stimuler ce développement.

Le gouvernement malaisien prévoit de faire passer à 6 % la part de la capacité de production totale d'électricité représentée par les énergies renouvelables d'ici 2015. Au sein de cette part, l'objectif pour le photovoltaïque est de 5 % d'ici 2015 (c.-à-d. environ 0,055 GW, selon la Politique nationale des énergies renouvelables Malaisienne). En 2011, une loi sur les énergies renouvelables (Renewable Energy Act) spécifiait les tarifs de rachat pour les énergies renouvelables (y compris énergie hydraulique et bioénergie) de même que pour les installations photovoltaïques, afin d'encourager le développement d'un marché national. Le système de tarifs couvre les installations jusqu'à 30 MW et s'étale de 0,219 à 0,317 EUR/kWh. Pour les installations de plus grande envergure, une autorisation spéciale délivrée par le Ministère de l'énergie, des technologies vertes et de l'eau (KeTTHA, 2012) est requise. Parallèlement au tarif de base, des bonus sont attribués pour les systèmes intégrés au bâti (Building Integrated Systems BIS, 0,0645 - 0,0671 EUR/kWh) et les contenus nationaux de systèmes photovoltaïques, c.-à-d. les modules photovoltaïques ou onduleurs solaires produits ou assemblés sur le territoire (respectivement 0,0077 et 0,0026 EUR/kWh). Avec un taux dégressif annuel et un achat d'électricité garanti sur 21 ans, le mécanisme d'incitation de l'allocation sur les tarifs de rachat (FIT) malaisien ressemble à celui de la loi allemande sur les sources d'énergies renouvelables. Quoiqu'il en soit, un pourcentage attribué aux technologies solaires a été défini dans le cadre de la répartition des aides financières entre les différentes énergies renouvelables. Le pourcentage visé pour le photovoltaïque était plutôt bas par rapport au reste et a été rehaussé en mars 2012, quatre mois seulement après l'entrée en vigueur du FIT au 1er décembre 2011 (The Malaysian Reserve (2012), IEA-

PVPS (2011#9). L'introduction du FIT avec un pourcentage faible semble être un mécanisme inefficace pour inciter à des installations photovoltaïques importantes. En conséquence, la poursuite du développement du marché reste actuellement limitée au sein de ce système et les effets bénéfiques de l'introduction du FIT risquent donc de ne pas être à la hauteur de son potentiel.

Dans la mesure où l'introduction du FIT est récente, la puissance cumulée des installations photovoltaïques n'atteignait pas plus de 140 MW au mois de mars 2012 (The Malaysian Reserve (2012), Recharge Malaysia FIT Status, 2012). Cela correspond à 0,6 % (MEIH, Total Installed Generation Capacity Malaysia) de la capacité totale d'électricité installée en Malaisie. Comme spécifié plus haut, le quota actuel pour le photovoltaïque solaire de 150 MW pour la période 2012 à 2014 a été respecté. De même, les installations photovoltaïques existantes ont dépassé les objectifs fixés par le gouvernement. Cependant, il est difficile d'établir des prévisions de marché qui peuvent dépendre entièrement des forces inhérentes au marché comme la parité tarifaire, les coûts de l'électricité et les prix des systèmes. L'organisme gouvernemental responsable SEDA (Sustainable Energy Development Authority) met les lois, réglementations et actualisations du processus d'application à disposition sur son site internet. Les investisseurs étrangers qui investissent dans le photovoltaïque profitent en Malaisie de mesures incitatives généreuses : soit une exonération d'impôt sur les revenus de 100 % pendant 10 ans (statut de pionnier), soit un abattement fiscal pour investissement de 100 % sur les dépenses en capital admissibles effectuées pendant une période de 5 ans. Le MISA (Malaysia Investment Development Authority) agit comme agence centrale d'aide aux investisseurs et comme lien entre l'industrie et le gouvernement.

Tableau 28 : Capacités actuelles des fabricants de photovoltaïque en Malaisie

Entreprise	Pays	Produit(s)	Capacités annuelles	Statut
First Solar	États-Unis	Modules photovoltaïques couche mince (CdTe)	800 MW	En exploitation
Sunpower	États-Unis	Lingots monocristallins, wafers, cellules	1 000 MW	En exploitation
Q-Cells	Allemagne	Wafers et cellules cristallines	800 MW (lingots) 500 MW (cellules)	En exploitation
Tokuyama	Japon	Polysilicium	20 000 tonnes	En construction
ReneSola	Chine	Silicone (recyclé)	1 000 tonnes	En exploitation

Source : MBIPV Malaysia PV Industry, Tokuyama, MBIPV, businessweek

Parallèlement à ces incitations fiscales, la croissance du secteur photovoltaïque a été stimulée par l'existence d'une industrie déjà bien développée du semi-conducteur, par la présence d'un personnel qualifié, ainsi que par l'existence d'infrastructures et de parcs industriels indispensables. Au final, plusieurs fabricants importants de photovoltaïque ont ouvert des usines de fabrication en Malaisie (voir tableau 28). Parallèlement aux investissements effectués par First Solar, Sunpower et Q-Cells, au moins 10 700 emplois directs ont été créés au départ (MBIPV – Malaysia PV Industry 2009)). L'association malaisienne de l'industrie du photovoltaïque (MPIA) compte actuellement 28 membres, bien qu'aucun acteur international n'y soit représenté, et gère un site internet qui propose des informations de base.

Enseignements tirés de l'exemple de la Malaisie

La Malaisie a pris des mesures décisives pour encourager le développement d'une industrie nationale du photovoltaïque, créer des emplois et soutenir la croissance du marché. Ces évolutions ont eu lieu en parallèle plutôt qu'elles ne se sont conditionnées mutuellement. Cependant, ces deux niveaux (marché et industrie) sont de plus en plus étroitement liés à mesure du développement de la politique industrielle et climatique. Les raisons principales qui attirent les fabricants étrangers de photovoltaïque sont la présence d'un personnel qualifié et de structures industrielles qui correspondent aux besoins de ces fabricants, p. ex. l'industrie du semi-conducteur, ainsi que les mesures d'incitation fiscale. L'introduction de tarifs de rachat représente une étape importante supplé-

mentaire pour soutenir le développement d'un marché national, en particulier au vu des incertitudes qui règnent sur les marchés du photovoltaïque « traditionnels ». De fait, les fabricants de photovoltaïque qui produisent et donc créent de la valeur ajoutée en Malaisie dépendent en grande partie des marchés internationaux. Vu le déclin actuel de cette industrie, les emplois en Malaisie dépendent de la capacité de ces fabricants à conquérir de nouveaux marchés comme la Malaisie. Quoiqu'il en soit, il convient d'attendre de voir si le système FIT et l'introduction d'un quota mèneront à une croissance et à un bon fonctionnement du marché national. En effet, la simple introduction d'un système efficace ne suffit pas en soi. Au contraire, les procédures administratives et techniques sont essentielles pour soutenir la croissance du marché et donc la sécurité des investissements et de la planification. De plus, des politiques transparentes doivent être définies dès maintenant en ce qui concerne les mesures d'encouragement et d'incitation à venir. De même, la R&D doit être développée dans le domaine des technologies solaires afin d'instaurer un savoir-faire national.

La Tunisie pourrait s'appuyer sur ces trois enseignements en analysant avec soin les secteurs industriels qui sont à la fois compétitifs au niveau international et liés à l'industrie solaire. Chapitre 11 a déjà livré des conclusions essentielles à ce sujet. Au vu des résultats des rapports précédents, l'industrie du câblage peut servir d'exemple. Cependant, il convient de prendre en considération que la valeur ajoutée des câbles par rapport au système photovoltaïque est

Tableau 29 : Marché et politiques industrielles soutenant la fabrication du photovoltaïque en Malaisie

Niveau	Dimension			
	Politique	Cadre légal	Incitations	Création de capacités
Marché	Objectifs de la politique : 6 % d'énergies renouvelables sur le total des capacités de production d'électricité d'ici 2020 Choix de la technologie : basé sur les conditions nationales	Système de tarif de rachat avec taux fixes pendant 21 ans		Organisme institutionnel : SEDA
Industrie		Régulation des contenus nationaux : bonus ajouté au tarif de rachat	Subventions d'équipement et prêts : incitations fiscales intéressantes	Encouragement de zones industrielles : p. ex. parc Kulim High Tech avec comme point fort le semi-conducteur et le photovoltaïque Associations industrielles : Malaysia PV Industry Association (MPIA)

Source : documentation rassemblée par les auteurs.

minimale et que cette industrie ne peut donc pas remplir les mêmes attentes (que l'industrie du semi-conducteur en Malaisie p. ex.). Par conséquent, d'autres industries annexes comme l'industrie du verre devraient être analysées. Si la Tunisie dispose de personnel qualifié dans les industries existantes, les infrastructures industrielles (p. ex. parcs industriels, réseaux d'énergie etc.) ainsi que la coopération entre les associations et l'industrie peuvent encore être améliorées.

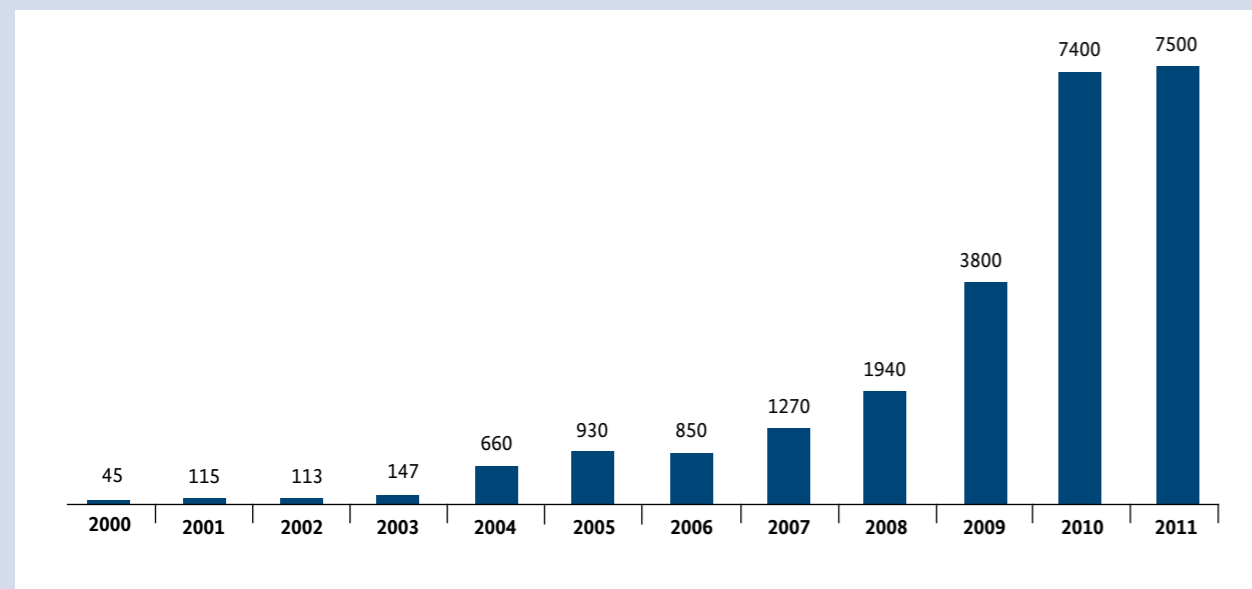
10.2.2 Mesures et décisions politiques concernant le marché et l'industrie en Allemagne

Avec plus de 32 GW de capacité installée de photovoltaïque en septembre 2012 (PV Insider 2012) et une quote-part de 5,7 % de la consommation brute d'électricité, l'Allemagne est le pays leader quant à taille du marché et à la production d'électricité pour ce qui est des installations photovoltaïques et de l'électricité produite (voir Figure 100). Le gouvernement allemand prévoit de faire passer à 35 % la part des énergies renouvelables sur le total de la consommation électrique d'ici 2020 et au moins à 80 % d'ici 2050. Il prévoit également d'atteindre une capacité cumulée de 52 GW (pour les installations sous la loi German Ren. En. Sources) d'ici 2020, ce qui correspond presque au double de la capacité installée actuellement. De plus, toute la chaîne de valeur du photovoltaïque est couverte en Allemagne, y compris des instituts de recherche de pointe dans le domaine du photovoltaïque.

Le principal instrument de développement du marché allemand est la loi sur les énergies renouvelables adoptée sous sa forme actuelle en 2000 et amendée et adaptée plusieurs fois depuis. Elle a également servi de modèle pour un certain nombre d'autres pays (Ontario, Malaisie). Un tarif de rachat garantit aux producteurs un prix défini pour l'alimentation d'électricité dans le réseau électrique. Selon le type et la taille de l'installation, les tarifs de rachat varient entre 0,135 et 0,195 EUR/kWh (01 avril 2012). Ces tarifs décroissent selon un taux prédéfini qui est adapté par la suite. Les tarifs de rachat sont payés pendant 20 ans. Ce système est financé par la majorité des consommateurs d'électricité. Le montant des coûts partagés pour l'électricité qui dépend de capacités nouvellement installées est publié une fois par an. Ainsi, le financement du système d'aide est en majeure partie indépendant d'un budget prédéfini par l'État. Cependant, pour limiter la charge qui revient aux consommateurs et l'augmentation des prix de l'électricité, les tarifs de rachat sont adaptés et diminués en fonction du volume annuel du marché. Le processus d'application, y compris l'autorisation et la connexion au réseau, est l'un des plus efficaces en Europe.

Pour garantir la transparence et la communication, le gouvernement entretient un site internet spécialisé (www.erneuerbare-energien.de) qui offre un accès rapide aux documents politiques, lois et réglementations aussi bien qu'à des informations supplémentaires à l'attention des consommateurs, producteurs et autres parties prenantes.

Figure 100 : Développement du marché du photovoltaïque en Allemagne en MW p.a.



Source : BSW 2012

Une industrie dynamique s'est développée de pair avec la croissance du marché et les aides à l'investissement. En 2010, environ 70 entreprises liées à la chaîne de valeur du photovoltaïque fabriquaient des composants photovoltaïques en Allemagne. Environ 108 000 emplois ont été créés dans l'industrie photovoltaïque, en comptant les acteurs en aval (p. ex. les installateurs). Cette industrie a réalisé un chiffre d'affaires de 12,2 milliards d'euros et une part d'exportation de 50 % en 2010. En plus des conditions favorables sur le marché, les fabricants qui ont implanté leurs usines dans l'est de l'Allemagne ont profité d'incitations aux investissements. C'est la raison pour laquelle 90 % des fabricants de photovoltaïques sont implantés dans cette région. En raison de surcapacités au niveau international et de la réduction des mesures d'incitation, cette industrie se trouve actuellement en difficultés. En conséquence, un grand nombre d'entreprises a déposé le bilan ou fermé des usines en Allemagne. L'industrie du photovoltaïque devra donc faire face à un certain nombre de défis dans un avenir proche. Pour les surmonter et assurer l'existence de cette industrie, plusieurs mesures sont demandées par les acteurs de l'industrie et les associations. En accord avec l'approche analytique décrite plus haut, ces mesures allient l'amélioration de la compétitivité, le développement du marché et le soutien à un environnement favorable (TMWAT 2012) :

- Développement du marché national axé sur les solutions à petite échelle et intégrées
- Réduction des coûts
- Développement de solutions intégrées (soutenu par la R&D)
- Développement de marchés internationaux

Ces mesures peuvent uniquement être conçues et réalisées en commun par les décideurs politiques, les acteurs industriels et les associations. Ceci souligne une fois de plus la dynamique interactive du développement industriel. Il reste à voir de quelle manière l'industrie photovoltaïque allemande affrontera les changements qui s'effectuent dans l'environnement international.

La R&D dans le domaine des technologies photovoltaïques est largement portée et encouragée à la fois par le gouvernement et par l'économie. Plusieurs ministères fédéraux proposent des financements pour des projets de recherche spécifique. Par exemple, le programme « Innovation Alliance Photovoltaic » est doté par le Ministère fédéral de l'Éducation et de la Recherche (BMBF) de 100 millions d'euros en plus des 500 millions d'euros investis par l'industrie. Les domaines de recherche incluent des champs innovants dans les technologies des wafers en silicium et des couches minces, de l'intégration de systèmes et de l'intégration au réseau aussi bien que dans les technologies auxiliaires comme le stockage.

La coopération et les réseaux entre l'industrie et les instituts de R&D sont bien développés et la mise en commun des efforts porte ses fruits, comme par exemple dans le cas du plan d'action ITRPV (International Technology Roadmap for Photovoltaics). Les organisations industrielles du pays sont bien établies et l'industrie est intégrée dans des associations nationales et internationales comme EPIA ou SEMI. Des pôles de compétence nationaux ont été créés pour renforcer les capacités de formation et le développement des infrastructures (p. ex. parcs industriels) et aider les investisseurs à développer leurs affaires. Enfin, le paysage de l'industrie allemande est constitué d'acteurs spécialisés et hétérogènes qui vont de la petite entreprise jusqu'aux grandes sociétés. Cette communauté dispose d'un haut niveau de savoir-faire en termes de fabrication et de recherche qui a largement contribué au développement de la technologie photovoltaïque.

Enseignements tirés de l'exemple de l'Allemagne

Le tableau 30 ci-dessous donne un résumé des principaux critères de développement du paysage photovoltaïque allemand. Les principaux enseignements qui peuvent être tirés de l'exemple de l'Allemagne sont l'établissement d'une politique et d'un système de régulation clairs. Ceci comprend des règles bien définies pour l'installation et la connexion de systèmes photovoltaïques au réseau, la définition des processus d'application et de connexion ainsi que la mise en place d'autorités de contrôle. Le système lui-même doit donc être contrôlé et adapté aux évolutions technologiques (diminuant ainsi les coûts de production et de génération d'énergie) et aux évolutions du marché. Dans le même temps, la transparence et la communication des changements de politiques et de réglementations sont essentielles pour permettre aux investisseurs de planifier de manière plus rigoureuse leurs investissements. D'autres facteurs favorables incluent l'existence d'une main d'œuvre qualifiée et d'industries annexes du photovoltaïque (comme le semi-conducteur ou la chimie). Les acteurs industriels ont créé des organisations spécifiques à l'industrie du photovoltaïque qui jouent un rôle important pour connecter et renforcer les structures industrielles. Cependant, il convient de noter que le système d'aide actuel est mis au défi par un certain nombre de facteurs. Il s'agit surtout du coût et du cadre du mécanisme incitatif, y compris les effets sur le prix de l'électricité et les adaptations qui en résultent au niveau de l'affectation budgétaire aussi bien que des considérations de politique industrielle concernant la valeur ajoutée nationale. Enfin, la complexité économique internationale et la dépendance vis-à-vis des marchés internationaux représentent un défi grandissant pour toute stratégie de soutien à une politique industrielle nationale. Comme décrit plus haut, la situation actuelle présente de nombreux défis pour l'industrie du photovoltaïque en Allemagne. Bien que

la voie sur laquelle l'industrie photovoltaïque sera amenée à s'engager ne soit pas encore claire, la Tunisie peut tirer un certain nombre d'enseignements de cet exemple. Tout d'abord, il est intéressant d'observer de quelle manière les défis actuels sont gérés, p. ex. avec des adaptations du système incitatif aux changements qui se produisent dans l'industrie et sur le marché. Une des principales tâches qui reviennent aux entreprises allemandes est de conquérir de nouveaux marchés, p. ex. en coopérant avec des partenaires nationaux. Cet exemple peut être un point de démarrage pour les acteurs de l'industrie tunisienne, même en l'absence d'un marché conséquent. Ce dernier processus peut être soutenu activement par les agences tunisiennes de promotion des investissements. De pair avec le développement de nouveaux marchés, il est probable

que de nouveaux emplois soient créés en aval de la chaîne de valeur solaire, p. ex. dans la planification, l'installation, l'entretien et le démantèlement. Cela résulte à la fois de la nécessité pour les entreprises de trouver de nouveaux marchés aussi bien que de l'automatisation grandissante de l'industrie en amont.

10.3 Analyse du développement réussi de l'industrie CSP en Espagne

Comme les États-Unis, l'Espagne est devenue un des principaux centres internationaux du CSP. Environ 65 % (REN 21 2012) des installations CSP de la planète se situent en Espagne. De plus, un grand nombre d'entreprises, y compris des acteurs leaders sur le marché, ainsi qu'une

Tableau 30 : Marché et politiques industrielles soutenant la fabrication du photovoltaïque en Allemagne

Dimension / Niveau	Politique	Cadre légal	Incitations	Création de capacités
Marché	Objectifs politiques et énergie renouvelable : au moins 35 % d'énergies renouvelables dans la production totale d'électricité d'ici 2020 et au moins 80 % en 2050.	Renewable Energy Sources Act Gestion et transparence des mesures politiques et de la réglementation : informations librement disponibles et accès aux discussions parlementaires, chambre de compensation	Incitations financières et crédits pour les consommateurs, système de tarifs de rachat Mesures incitatives relatives au prix de l'énergie pour les énergies solaires : tarif plus élevé que le prix de l'électricité, incitations pour la propre consommation	Qualité des services : qualité élevée grâce à des procédures administratives définies et efficaces
Industrie			Subventions d'équipement et prêts : incitations aux investissements pour les fabricants dans l'est de l'Allemagne	Mesures d'amélioration de la R&D et innovation : programmes bien dotés de R&D, p. ex. « Innovation Alliance Photovoltaic » Mise en place de pôles de compétence comme dans l'est de l'Allemagne Standards de qualité et acquisition de labels internationaux : standards définis basés sur les standards internationaux, réglementation nationale pour les composants spécifiques (p. ex. câbles) Formation et stages à la fois dans le domaine de l'industrie et dans le domaine de la prestation de services financiers (banques)

Source : documentation rassemblée par les auteurs.

structure industrielle, s'y sont installées. Les activités de recherche et développement sont menées aussi bien par des entreprises privées que par des organismes publics. L'Espagne vise un objectif de 20,8 % d'énergies renouvelables sur la totalité de sa consommation énergétique en 2020, ce qui correspond à une capacité de 4,8 GW (Gouvernement espagnol, 2012). En 2004, l'Espagne a introduit un système de tarifs de rachat pour la cogénération et les énergies renouvelables. Du fait de la crise économique que traverse l'Espagne actuellement et de la crise financière internationale, le FIT a été interrompu en janvier 2012. On ne sait pas encore s'il sera redémarré et si oui, quand. Jusqu'à la fin 2011, deux systèmes coexistaient : le système de tarif fixe de 0,2674 EUR/kWh garanti au producteur d'énergie renouvelable un tarif fixe pendant 25 ans. Parallèlement, un tarif variable contenant une variable sur le prix de marché et une prime fixe peut être choisi. Il se situe entre 0,2540 EUR/kWh et 0,3440 EUR/kWh. Ce dernier a été introduit pour contrôler les tarifs payés. Dans la mesure où les fournisseurs étaient obligés de payer ces tarifs définis et n'étaient pas autorisés à reporter leurs coûts sur les consommateurs, leurs difficultés économiques ont augmenté au moment de la crise économique et financière, ce qui a conduit à une baisse de rentabilité. Au final, le système de tarifs était sous-financé et a donc été suspendu.

La capacité CSP cumulée installée en Espagne a atteint 1 102 MW en 2011. Elle était constituée de 1 050 MW pour les capteurs cylindro-paraboliques, 50 MW pour les tours solaires, 1,4 MW pour les systèmes linéaires Fresnel et 1 MW pour le système à parabole Stirling (Photon 2011). Vu l'avenir incertain du système de tarifs de rachat et l'état du développement technologique en Espagne, les évolutions futures du marché du CSP sont aléatoires.

Des conditions de marché favorables et des compétences techniques bien développées ont multiplié le nombre d'ac-

teurs de l'industrie CSP en Espagne. L'industrie CSP espagnole atteignait un chiffre d'affaires de 1 013 m. d'euros en 2010 (APPA). Environ 1 810 emplois ont été créés (APPA). En 2004, les entreprises de CSP espagnoles ont fondé l'association « Protermosolar », qui compte aujourd'hui 80 entreprises membres.

Actuellement, l'avenir des mesures d'incitation espagnole pour le CSP restent incertaines, ce qui met en danger non seulement l'industrie CSP en Espagne mais également dans le reste du monde. Contrairement au système FIT allemand, où les coûts sont reportés sur les consommateurs d'électricité, le système espagnol reporte les coûts sur les fournisseurs, ce qui résulte en un alourdissement de la dette de l'État, puisque qu'il doit intervenir pour soutenir ces entreprises. Vu les difficultés économiques que rencontre l'Espagne actuellement, les perspectives qui s'offrent aux projets CSP et donc à l'industrie nationale restent incertaines.

Enseignements tirés de l'exemple de l'Espagne

Actuellement, le principal enseignement qui peut être tiré de l'exemple de l'Espagne est malgré tout l'importance d'une conception minutieuse et d'une base financière intelligente du système d'incitation. L'absence d'une telle base, y compris les adaptations potentielles aux évolutions du marché (p. ex. limitation du volume du marché) présente de gros risques et un accroissement des incertitudes pour les investisseurs. L'exemple de l'Espagne montre également que l'intégralité du système énergétique d'un pays devrait être prise en compte, c.-à-d. également les structures de production d'électricité, le transport et la distribution. Pour ce qui est de la Tunisie, il est donc important d'impliquer d'autres parties prenantes clés comme le STEG pour garantir l'accès au réseau d'électricité et sa régulation.

Tableau 31 : Marché et politiques industrielles soutenant la fabrication du CSP en Espagne

Dimension / Niveau	Politique	Cadre légal	Financements et incitations	Création de capacités
Marché	Objectifs de la politique : 4,8 GW de capacité d'énergie renouvelable en 2020		Tarifs de rachat : prix fixes attractifs	
Industrie	-	-	-	-

Source : documentation rassemblée par les auteurs.

10.4 Analyse du développement réussi de l'industrie du CES en Turquie

La Turquie fait partie des marchés du chauffe-eau solaire les plus importants au monde. La figure 100 ci-dessous montre qu'avec sa capacité installée de 9,3 GWth en 2010, la Turquie était le deuxième plus grand marché de collecteurs à panneau plat au monde. En 2011, la capacité cumulée atteignait 10,6 GWth (REN 21, 2012).

Le marché du CES et, avec lui, une industrie bien établie, se sont développés malgré l'absence de mécanismes de support pour les systèmes de chauffe-eau solaire. D'autres sources d'énergie renouvelable comme l'énergie hydraulique, la biomasse, l'énergie éolienne, la géothermie et le photovoltaïque sont encouragées par un système de tarifs de rachat. Il s'agit d'un cas spécifique mais cela prouve en même temps que les pays qui présentent les mêmes conditions (ensoleillement, manque d'eau et réseau de distribution de la chaleur insuffisant) offrent de bonnes opportunités pour l'application de ces systèmes.

En Turquie, les prix élevés de l'énergie, les conditions climatiques favorables pour l'industrie du chauffe-eau solaire et les faibles barrières à l'entrée pour cette technologie ont conduit à une large utilisation des chauffe-eau solaires dans tout le pays. De plus, l'utilisation de petits dispositifs généralement constitués d'un réservoir d'eau peint en noir et placé sur le toit pour chauffer l'eau pendant les heures d'ensoleillement était déjà largement répandue en Turquie auparavant. Le chauffe-eau solaire

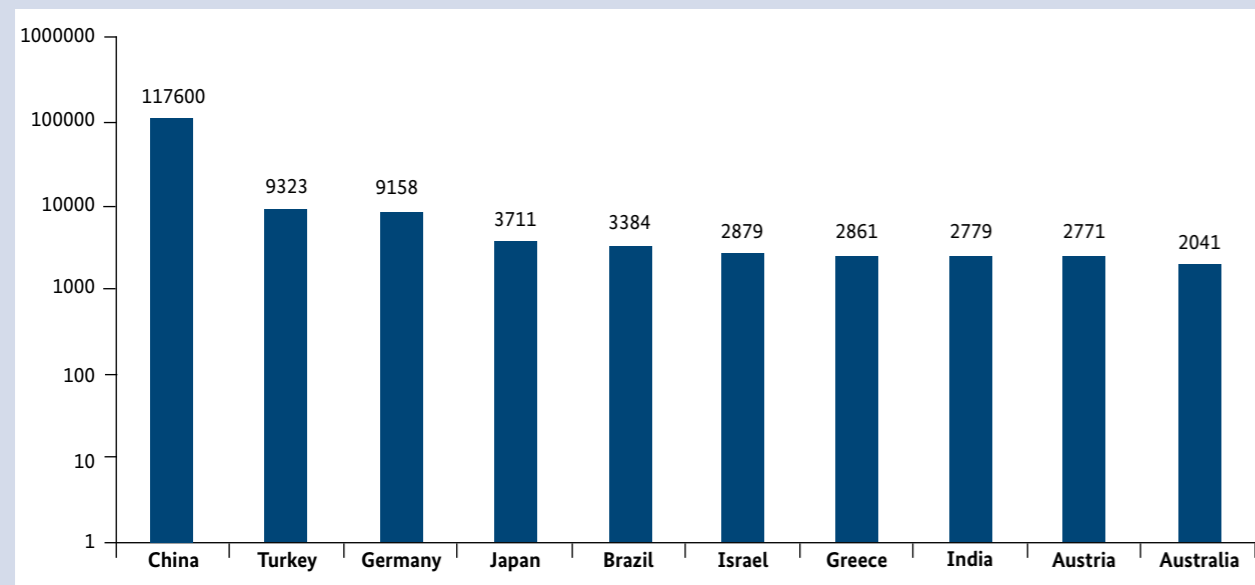
représentait donc un développement technologique d'un principe déjà bien accepté et utilisé dans tout le pays.¹ Le marché du chauffe-eau solaire existait déjà dans les faits et des conditions favorables ont stimulé le développement de cette industrie malgré le manque d'incitations financières. Le gouvernement turc prévoit d'atteindre 30 % d'énergies renouvelables sur le total de son alimentation en énergie d'ici 2023. Cependant, aucun objectif clair n'a été défini en ce qui concerne le pourcentage représenté par le chauffe-eau solaire dans ces prévisions.

Bien qu'aucune donnée spécifique ne soit disponible, on estime que la Turquie compte au moins 100 fabricants de systèmes et composants solaires thermiques (dena 2009). En 2008, la capacité de production s'élevait à plus d'un million de m² de collecteurs à panneau plat (dena 2009). La plupart des collecteurs (75 à 80 %) ont été vendus sur le marché national. L'industrie du chauffe-eau solaire emploie environ 2 000 personnes.

Les systèmes de chauffe-eau solaire produits par les fabricants sont souvent simples et, pour la majorité, ils ne sont pas équipés d'un régulateur de température permettant de mélanger l'eau chaude et l'eau froide.² Ces dispositifs de régulation doivent généralement être intégrés séparément au système de chauffe-eau solaire. Du fait des coûts plus

- 1 Entretien avec un expert de la chambre de commerce et d'industrie turco-allemande, le 23 octobre 2012.
- 2 Entretien avec un expert de la chambre de commerce et d'industrie turco-allemande, le 23 octobre 2012.

Figure 101 : Capacité totale de collecteurs à panneau plat vitré et à tube sous vide en service en MWth (fin 2010) – Dix premiers pays (échelle logarithmique)



Source : Weiss & Mauthner 2011

Tableau 32 : Marché et politiques industrielles soutenant la fabrication de CES en Turquie

Niveau \ Dimension	Politique	Cadre légal	Incitations	Création de capacités
Marché	Stratégie pour les énergies renouvelables sans objectif spécifique pour le CES	Loi sur les énergies renouvelables sans tarifs pour le chauffe-eau solaire.	Absence de mesures financières d'incitation visant le CES en particulier	
Industrie	Absence de mesures claires pour le CES		Programme gouvernemental pour encourager les investissements, mais ne visant pas particulièrement l'industrie du CES	

Source : documentation rassemblée par les auteurs

élevés, la production de systèmes plus sophistiqués ne s'est pas encore intensifiée. L'utilisation du CSP dans la production de chaleur pour le secteur industriel représente une opportunité de croissance supplémentaire. Cependant, l'amélioration du réseau turc de distribution de gaz représente une menace potentielle pour la poursuite de la croissance du marché du chauffe-eau solaire.

Enseignements tirés de l'exemple de la Turquie

Le marché turc du CES a atteint un volume important sans mesures d'incitation spécifiques. Un point important pour l'entrée du CES en Turquie était l'existence et l'utilisation répandue de systèmes plus simples (installation de réservoirs). Dans la mesure où les consommateurs étaient habitués à l'utilisation de ce type de systèmes et donc enclins à reconnaître les avantages apportés par des applications plus modernes, les barrières à l'entrée étaient particulièrement faibles pour la technologie du chauffe-eau solaire. Pour ce qui est de la Tunisie, il peut être avantageux de procéder à une étude détaillée de l'état actuel et de l'utilisation des technologies énergétiques existantes et d'identifier celles dont la modernisation ou l'actualisation pourrait permettre d'accéder à des marchés potentiels. Il sera alors efficace de promouvoir ces technologies en soutenant les entreprises (p. ex. en élargissant les capacités) pour exploiter ces opportunités d'affaires inexploitées. Il convient également de noter que le marché du chauffe-eau solaire en Turquie est un marché essentiellement national et que l'industrie destinée à l'export ne s'est pas particulièrement développée.

Il reste à voir si la Turquie sera en mesure de maintenir son marché du chauffe-eau malgré des conditions changeantes (p. ex. meilleure couverture du réseau de gaz). Le manque de structures d'encouragement (voir tableau 6) peut s'avérer défavorable à l'avenir. La Tunisie pourrait anticiper de telles évolutions en encourageant son industrie du CES actuellement plutôt orientée sur le marché

national à acquérir des certifications internationales et à établir des coopérations internationales.

10.5 Recommandations d'ordre général pour la Tunisie

Sans être exhaustive, la sélection d'exemples présentée ci-dessus permet de tirer un certain nombre d'enseignements et de conclusions en ce qui concerne le développement de l'industrie solaire. Comme précisé plus haut, chaque pays présente des conditions différentes. La simple reproduction des politiques et stratégies présentées ne mènerait certainement pas au succès escompté en Tunisie. Cependant, il apparaît que le succès du développement de l'industrie solaire est intimement lié à certains schémas et mesures, quels que soient les environnements, et indépendamment de la technologie choisie. La liste de recommandations suivantes présente ces mesures clés pour les quatre dimensions traitées : politique, cadre légal, financement et incitations, et création de capacités. Chaque recommandation inclut une brève explication quant à la pertinence de la mesure et le cas échéant, des remarques concernant le niveau actuel de mise en œuvre en Tunisie.

Politique

- **Recommandation 1** : Établir des **objectifs politiques clairs** à long terme en ce qui concerne l'intégration des énergies renouvelables et/ou la réduction de l'effet de serre, et les intégrer dans les stratégies énergétiques nationales (Plan Solaire Tunisien) et potentiellement internationales (p.ex. Plan Solaire Méditerranéen, Initiative Industrielle Desertec).

Pour que les investisseurs puissent s'appuyer sur une planification à long terme des ressources financières et R&D, une politique gouvernementale claire est nécessaire en ce qui concerne l'énergie solaire. De plus, cette stratégie devrait être intégrée dans un scénario global pour l'énergie

(renouvelable). Une étude récente sur l'avenir de la composition du mixe énergétique tunisien et une révision du Plan Solaire Tunisien actuel marquent les premières étapes dans cette direction.

Cadre légal

■ **Recommandation 2** : Fournir un **cadre légal intelligent** pour l'application des objectifs politiques en matière d'énergie renouvelable et/ou de réduction des gaz à effet de serre et pour renforcer la législation.

Une législation forte et soutenue est une base nécessaire pour la poursuite des objectifs en matière d'énergie renouvelable et de réduction des gaz à effet de serre, et elle souligne les engagements pris vis-à-vis des objectifs définis. Elle est donc essentielle pour réduire les incertitudes aussi bien des entreprises d'énergie solaire que des investisseurs et elle peut également soutenir le développement du marché et de l'industrie.

■ **Recommandation 3** : La législation concernant le système incitatif devrait déterminer un **processus administratif transparent et une réglementation claire** pour ce qui est des critères suivants (entre autres) :

- Durée déterminée (date de mise en œuvre, dates de révision programmées) de la période d'incitation
- Système de contrôle (agence responsable, méthode, données collectées)
- Agence responsable de la mise en application, établissement de procédures administratives, responsabilités
- Procédures d'application, contrôles qualité, garantie, exigences supplémentaires (p. ex. apposition de labels)

La transparence et la clarté des dispositions sont essentielles pour que les investisseurs et les acteurs industriels puissent évaluer les avantages et risques potentiels de leurs investissements. Une législation claire peut contribuer à augmenter considérablement la confiance du marché et des acteurs de l'industrie dans le développement des énergies renouvelables en Tunisie.

■ **Recommandation 4** : **Les conditions locales** (ensoleillement, savoir-faire de l'industrie et de la main d'œuvre, état du réseau de transmission etc.) doivent être prises en considération lors de la conception du système d'incitation.

La conception d'un système d'incitation est soumise à un certain nombre de défis. Parallèlement au type de mécanisme d'incitation (tarifs de rachat, quotas, certifications, etc.), il convient de tenir compte des coûts locaux de production, de l'état du réseau d'électricité et du cadre légal

préexistant. De plus, il convient de procéder à une analyse minutieuse pour sélectionner les technologies qui seront concernées par le schéma incitatif. Les résultats de cette analyse pourront donner des indications importantes sur les potentiels actuels et à long terme en matière de production des différents composants (voir chapitre 10).

En Tunisie, le programme actuel PROSOL reprend tous ces points, mais une adaptation est nécessaire en ce qui concerne la mise en pratique des contrôles de qualité, la durabilité du programme, les problèmes de garantie etc. Un examen critique du repli actuel devrait donc être effectué. Pour encourager l'évolution du marché, un examen des schémas actuels serait également bénéfique.

Financements et incitations

■ **Recommandation 5** : **Établir et communiquer les informations** concernant la manière dont le système d'incitation est contrôlé et financé

La viabilité d'un système de mesures incitatives dépend de son financement. Quel que soit le type de financement (budget fixe, report des coûts sur les consommateurs etc.), il est essentiel d'informer les parties prenantes sur les montants disponibles, la durée et les réductions ou augmentations potentielles, afin de permettre aux investisseurs de planifier à long terme. Cela s'applique par exemple au calcul d'un tarif de rachat attractif qui nécessite une évaluation et une planification minutieuses.

■ **Recommandation 6** : Évaluer la mise en place d'une régulation des **contenus nationaux**.

La régulation des contenus nationaux peut être un moyen de stimuler l'éclosion d'un savoir-faire local et d'augmenter la valeur ajoutée nationale. Cependant, la régulation internationale et le niveau de disponibilité de l'expertise locale peuvent avoir un effet restrictif sur la régulation des contenus nationaux. Une discussion détaillée dépasserait le cadre de cette étude. Il est essentiel de concevoir et d'examiner de manière rigoureuse de telles dispositions particulièrement au regard des éventuelles violations des règles du commerce international susceptibles de gêner l'engagement sur les marchés internationaux. Zusätzlich einfügen : Local content regulation can be integrated as an obligation or a bonus into the incentive system. Une réglementation locale peut être intégrée comme une obligation ou un bonus dans le système d'incitation. Il convient de noter que des mesures de protection commerciales peuvent avoir des effets politiques qui devraient être examinés avec attention. Une discussion détaillée dépasserait le cadre de cette étude.

■ **Recommandation 7** : **Améliorer les infrastructures** et évaluer les possibilités de mesures d'incitation fiscales pour les investissements directs à l'étranger (IDE). Fournir aux investisseurs des informations complètes et un service de conseil d'entreprise gratuits.

Les mesures d'incitation aux investissements à l'attention d'investisseurs nationaux et internationaux peuvent inclure des incitations fiscales et matérielles, telles que l'affectation de zones industrielles spécifiques pour encourager un effet de débordement ou la création de pôles de compétences et fournir les infrastructures essentielles (ports, électricité, télécommunications etc.). De plus, la compétitivité de l'industrie nationale doit être améliorée en soutenant l'acquisition de standards et de labels de qualité internationaux. D'autre part, des mesures non contraignantes doivent être envisagées, telles que des services de développement des affaires proposés par l'agence nationale de promotion des investissements, un accès à l'information concernant le secteur solaire (lois, industrie existante, réglementations commerciales, etc.) de même que la promotion de la Tunisie sur les salons internationaux.

Création de capacités

La création de capacités se réfère à la formation et au développement de l'expertise. En d'autres termes, la formation d'experts et des parties prenantes est la clé. Il existe différentes formes dans la façon d'organiser des processus d'apprentissage efficaces. Naturellement, la communication est un préalable indispensable à tout processus d'apprentissage et il concerne donc chacune des recommandations inséparables ci-dessous.

■ **Recommandation 8** : **Gérer la création de capacités** au sein des organismes gouvernementaux liés à la conception et à la mise en place du système de mécanismes d'incitation et à la régulation du développement de l'énergie renouvelable.

Un développement réussi de l'industrie doit être accompagné d'une large création de capacités au niveau des institutions clés qui soutiennent la mise en place des politiques d'énergie renouvelable et le développement des industries solaires. En ce qui concerne le développement du marché, cela inclut p. ex. la formation d'agents d'État responsables de l'application et du contrôle des procédures.

■ **Recommandation 9** : **Soutenir la création de réseaux** entre les parties prenantes clés et les associations, p. ex. grâce à des groupes de travail communs ou une organisation centrale pour les énergies solaires (ANME).

Le soutien aux associations industrielles existantes, p. ex. en créant une association de l'énergie solaire ou des branches spécifiques à l'énergie solaire au sein d'associations existantes, permettra de mettre à jour le savoir-faire existant, les opportunités d'innovation et les secteurs d'affaires potentiels. Selon les conclusions du chapitre 11, des branches spécifiques ou des associations industrielles dédiées existent déjà en Tunisie (CSNER). Cependant, le degré de collaboration ainsi que le niveau d'attraction pour les fabricants existants sont limités. De plus, les acteurs industriels tunisiens peuvent profiter des associations internationales existantes dédiées aux énergies renouvelables et solaires telles qu'EPIA, SEMI ou IRENA.

■ **Recommandation 10** : **Connecter la R&D et les acteurs industriels** et créer des programmes de financement de la R&D.

L'innovation devrait être soutenue par un encouragement de la coopération entre la R&D et l'industrie. Parallèlement aux programmes de financement incluant un effet de levier de la part de l'industrie, ces collaborations peuvent être encouragées activement en mettant en relation les différentes parties prenantes.

Le développement du marché et de l'industrie dans un secteur comme celui de l'énergie renouvelable n'est jamais indépendant des autres secteurs de la politique nationale comme la planification des infrastructures et la politique de l'emploi ou encore le développement d'autres secteurs industriels, etc. De plus, au sein d'une économie internationalisée, les mesures de politique industrielle nationales sont toujours conditionnées par des forces et des tendances régionales et internationales. En conséquence, le développement de l'industrie solaire ne devrait pas être considéré de manière isolée, mais dans le contexte du marché et des développements technologiques internationaux aussi bien qu'en fonction des capacités, besoins et objectifs de développement nationaux. La section précédente du présent rapport donne une évaluation du développement du marché et de l'industrie du photovoltaïque, du CSP et du CES, ainsi que de leur chaîne de valeur respective et des capacités existantes et potentielles des entreprises tunisiennes en ce qui concerne la production de composants pour ces technologies. À l'appui des conclusions et des recommandations d'ordre général énoncées ci-dessus, des recommandations spécifiques pour chaque technologie seront présentées pour la Tunisie dans le chapitre suivant.

11.1 Politique énergétique et effets sociaux-économiques

Le chapitre relie les recommandations d'ordre général avec les conclusions des rapports de travail précédents (chapitres 2-10). Ainsi, des recommandations spécifiques à chaque technologie sont déduites selon la méthodologie de la Figure 102 ci-dessous. Finalement, un Plan d'action détaillé pour chaque technologie définit les étapes nécessaires à l'application des recommandations énoncées pour la Tunisie.

Effets sur l'emploi

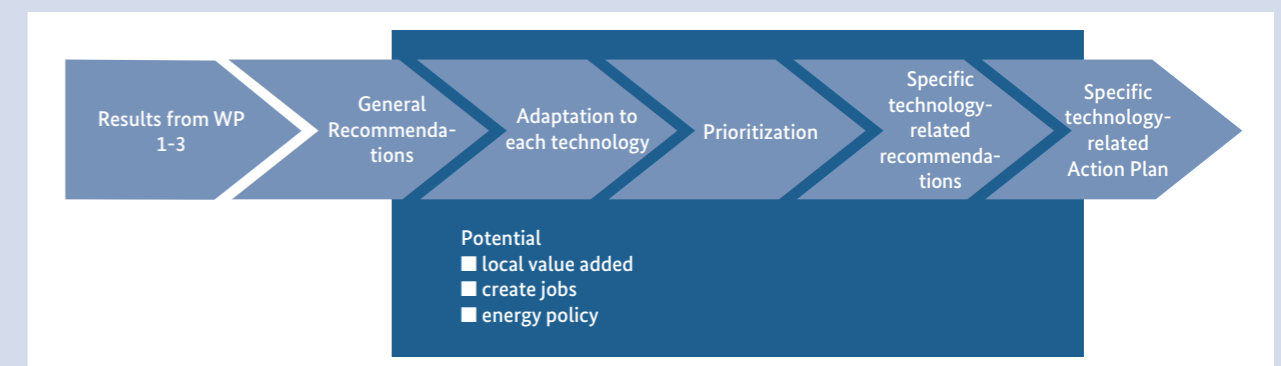
Du fait du manque de cohérence des données disponibles, l'évaluation des effets sur l'emploi (voir Tableau 33) susceptibles de résulter d'une application du Plan d'action doit être comprise comme une estimation approximative. Il convient également de noter que les effets positifs du développement des énergies renouvelables sur l'emploi sont souvent estimés sur l'hypothèse d'un marché du travail idéal, avec un personnel faisant preuve de mobilité en matière de poste de travail et de situation géographique et avec une présence de personnel qualifié en quantité suffisante. Cependant, étant donnée les conditions plutôt défavorables sur le marché du travail réel, une transformation structurelle de l'économie en ce qui concerne les énergies renouvelables est susceptible d'aller de pair avec des perturbations et des déséquilibres au niveau du nombre et du type de postes disponibles. Ces changements structurels doivent donc être accompagnés p. ex. par des cours de formation professionnelle efficaces, adaptés et orientés vers la pratique (JLO 2009). De plus, les cursus universitaires doivent être modifiés en fonction des besoins naissants. D'autre part, il convient de s'interroger sur les possibilités de développement des énergies renouvelables dans des zones confrontées à de forts taux de chômage, ainsi que sur des mesures politiques pour promouvoir

des processus de recrutement non discriminatoires et encourager la mobilité des employeurs et du personnel (Rosenberg 2010).

Il apparaît que, pour les trois types de technologie solaire, la partie en aval de la chaîne de valeur (c.-à-d. la distribution, la planification, l'installation, la mise en service et la maintenance, et le démantèlement) génère une proportion plus élevée d'emplois par système installé.

Bien que les données disponibles varient et que les hypothèses concernant le calcul soient opaques, la tendance reste cohérente. En particulier, les données relatives aux CSP s'appuient sur moins de données et, en conséquence, les évaluations des effets sur l'emploi en aval et en amont sont parfois quasiment identiques. Avec la production de masse et la commercialisation, le quota CSP déplacera les emplois vers l'aval. Les données CSP sont basées sur l'expérience internationale et aucune estimation pour la Tunisie n'est disponible. Les chiffres des STWH sont tirés du Lehr et al. 2012. Des entretiens menés dans cette étude ne sont pas suffisantes pour effectuer des analyses statistiques ou des comparaisons. L'aval des SWTH n'a pas été analysé dans cette étude: pour la Tunisie, ce chiffre pour la Tunisie a été adopté sans modification depuis Lehr et al. 2012. Les emplois sont considérés être directs et permanents (stable et à plein-temps). Il n'est pas précisé, si s'agissant de la durée de vie des installations, ce sont les années de travail ou leur effet sur le marché qui sont pris en compte. Les chiffres de l'emploi PV ont été pris à partir du FH ISE 2012 et reflètent des tendances plutôt internationales en raison de l'inexistence d'une industrie photovoltaïque développée en amont en Tunisie. Le Lehr et al. 2012 cite des chiffres de 14 emplois / MW en PV connecté installé (contre 50 emplois / MW installé hors réseau) pour la Tunisie. Encore une fois, l'aval n'était pas une priorité dans cette étude. Il est donc difficile d'évaluer un nombre

Figure 102 : Méthodologie de développement de recommandations spécifiques par technologie



11 Recommandations et plans d'actions spécifiques par technologie

distinct mais une fourchette de 5 - 14 emplois / MW peut servir d'indication. Par conséquent, les estimations brutes suivantes sont retenues:

Toutes les estimations ci-dessous se réfèrent à des emplois directs créés au sein de l'industrie solaire. L'effet sur l'emploi sera plus important du fait de la création d'emplois indirects dans les secteurs de la fourniture des matières premières utilisées dans l'industrie solaire aussi bien que d'emplois au sein des organismes de régulations et organismes gouvernementaux, des entreprises de conseil et des organisations de recherche (IRENA 2011).

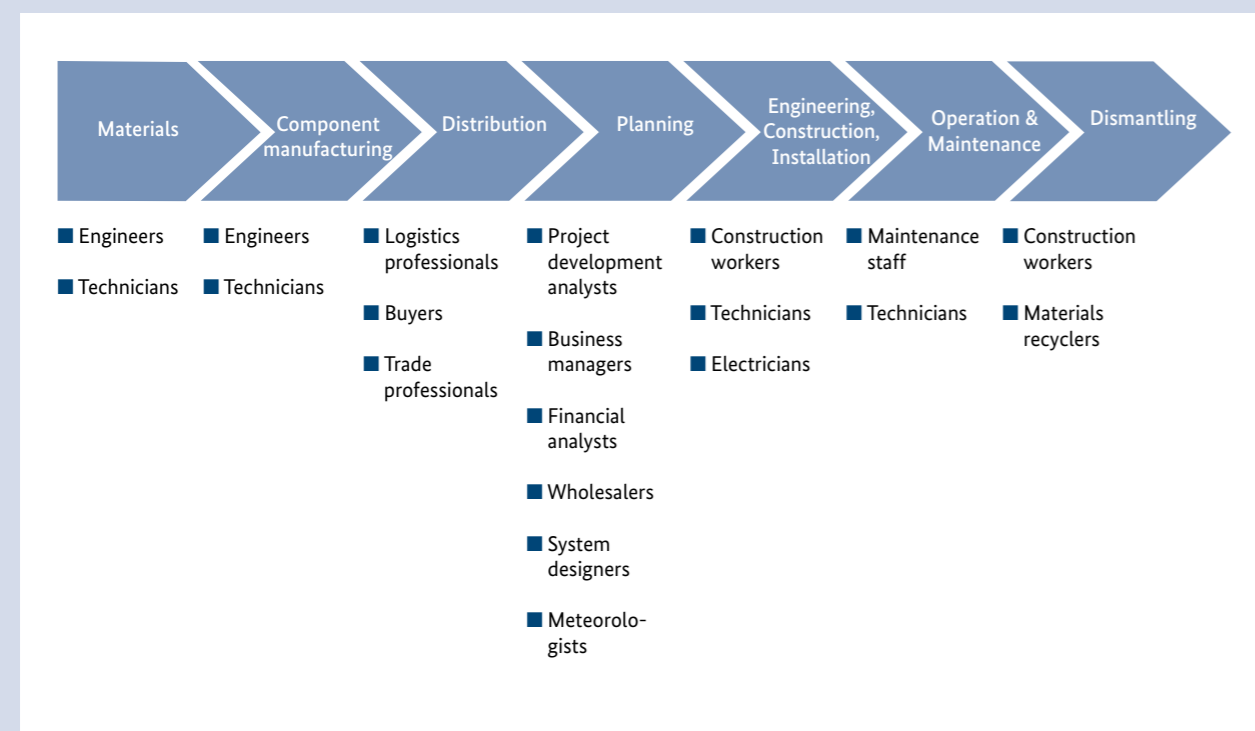
Les compétences professionnelles requises sont présentées dans la figure 102. Outre une formation générale, des compétences spécifiques sont nécessaires pour chaque technologie solaire. Par exemple, le soudage de composants CSP exige une haute qualité et une formation supplémentaire. De plus, puisqu'il n'y a pas d'industrie des semi-conducteurs en Tunisie, les ingénieurs pour superviser la fabrication des cellules photovoltaïques devraient poursuivre leurs études dans ce domaine. Cela s'applique également à la partie aval de la chaîne de valeur. Les compétences spécifiques aux technologies solaires vont de la collecte et l'interprétation des données de rayonnement solaire à la maintenance (par exemple: le nettoyage) des systèmes. D'autres, comme les travaux d'électricité ou le développement de projets pourraient être menés à partir d'autres

Tableau 33 : Emplois directs créés dans les secteurs solaires

Technologie	En amont	En aval
CES	3-5.2 postes/1 000 m ²	14.4 postes/1 000 m ²
Photovoltaïque	3,5 postes/MW installé	5 - 14 postes/MW installé
CSP	5 postes/MW installé	8 postes/MW installé

Source : ISE 2012, Lehr et al. 2012 ; propre recherche

Figure 103 : Type de postes créés tout au long de la chaîne de valeur



industries et exigeraient moins d'efforts en création de capacités. Une analyse approfondie des compétences existantes et des programmes éducatifs est nécessaire afin de déterminer les efforts à mener.

Comme le montre la Figure 103 ci-dessus, la politique énergétique et le potentiel de valeur ajoutée nationale ont été pris en considération afin d'établir les priorités parmi les recommandations ci-dessous. Une étude récente (« Stratégie nationale de mixe énergétique pour la production électrique », GIZ, 2013, à l'étude) présente différents scénarios de mixe énergétique pour la Tunisie impliquant une certaine quantité d'électricité produite par les installations photovoltaïques et CSP. Ces objectifs nécessitent certaines mesures qui seront étudiées plus bas. De plus, les recommandations visent à créer autant de valeur ajoutée nationale que possible. Ceci s'applique à l'ensemble de la chaîne de valeur et est bien sûr étroitement lié à la création d'emplois. Par contre, le concept de valeur ajoutée comprend la fourniture de matières premières. Par conséquent, le nombre potentiel de postes dans la fabrication ou en amont pourrait être élevé même si la valeur ajoutée nationale est faible, du fait de l'importation de produits bruts ou semi-finis. De toute évidence, le potentiel de valeur ajoutée nationale est plus élevé en aval puisqu'à ce niveau, il s'agit surtout de la fourniture de services, donc lié aux ressources humaines. Il convient de garder ceci à l'esprit si l'on choisit la création d'emploi et la valeur ajoutée nationale comme objectifs prioritaires.

En outre, les dynamiques entrelacées de la politique énergétique, la création d'emplois, la création de valeur locale et leurs effets sur les prix de l'électricité et du budget national doivent être considérés. Bien qu'une telle analyse détaillée irait au-delà du champ de cette étude, quelques considérations générales peuvent être brièvement abordées. Tout d'abord, en Tunisie, la capacité de génération électrique actuelle est principalement dépendante du gaz naturel, dont près de la moitié est importée (GIZ 2013). Selon l'évolution des prix et les futures offres en électricité, différents effets sur les prix de l'électricité peuvent se produire. L'étude citée, ci-dessus, illustre les coûts de l'électricité cumulés entre 2013 et 2030, en omettant le scénario de des énergies renouvelables. Toutefois, en raison des risques élevés (technologiques, financiers), pour les CSP par exemple, il est possible que les prix de l'électricité pourraient augmenter et potentiellement entraîner une baisse du pouvoir d'achat des ménages. L'effet des prix de l'électricité sur les secteurs industriels inhérent à leur structure est fortement discuté entre les différents groupes d'intérêt. Par exemple, il a été avancé que l'effet des prix de l'électricité plus élevés liés à un déploiement accru des énergies renouvelables en Allemagne entraînerait de graves désavantages concurrentiels pour l'industrie

locale. D'autres ont signalé des effets seulement dans les secteurs industriels à forte intensité énergétique tels que la fabrication d'acier. Selon l'IER 2011, une augmentation de 30 à 40 % du prix de l'électricité se traduirait par une baisse de 0,32 % à 0,51 % du PIB allemand (basé sur l'année 2005). Bien qu'il s'agisse d'un chiffre considérable en termes absolus, il faut garder à l'esprit que le PIB allemand a une structure différente de celui de la Tunisie. Il est donc nécessaire de calculer les effets respectifs pour la Tunisie. De plus, l'effet sur l'emploi résultant de l'augmentation du déploiement des énergies renouvelables mais, en même temps, résultant du prix de l'électricité, est difficilement quantifiable. D'une manière générale, le déploiement des énergies renouvelables créera des emplois. Le GIZ (2013) estime que 10.000 emplois seraient créés en Tunisie entre 2013 et 2030 dans le cas d'un scénario des énergies renouvelables. Dans le sens contraire, la faible compétitivité de l'industrie locale résultant de prix de l'électricité pourrait anéantir ces effets. Il est donc difficile de prévoir une éventuelle dynamique. Un facteur décisif est le mix énergétique actuel et futur ainsi que son état physique. En conclusion, une analyse macro-économique qui prend en compte un scénario énergétique donné apporterait de la lumière sur cette discussion.

11.2 Le Chauffe Eau Solaire (CES)

Dans la perspective d'un marché global, le CES est une technologie mûre et commercialisée. La croissance du marché est bonne dans les régions ensoleillées et certains pays comme la Chine ont prouvé la compétitivité financière de cette technologie sans aide gouvernementale à long terme. On prévoit une forte croissance en Europe et dans la région MENA. Les facteurs essentiels du succès pour la fabrication incluent l'intégration verticale et l'automatisation, la certification de la qualité (label Keymark) et des mesures permettant de faire face à l'augmentation des coûts des matériaux.

En Tunisie, l'industrialisation de la technologie du solaire thermique est confortée par l'existence d'un marché et d'une industrie mature pour les CES. Les activités commerciales des entreprises concernées s'étendent de la fabrication des composants à la planification et à l'installation de systèmes à usage résidentiel et tertiaire, couvrant ainsi l'intégralité de la chaîne de valeur. Toutefois, l'activité export est limitée à la région MENA. Les industriels tunisiens ont par ailleurs besoin de soutien pour l'obtention de certifications internationales et le développement d'une activité R&D, afin de faire face à la concurrence régionale et mondiale, notamment la Chine (coûts compétitifs) et l'Europe (qualité compétitive).

Comme l'a démontré chapitre 9, les ressources humaines, le savoir-faire et le niveau de coopération internationale nécessaires sont disponibles en Tunisie. L'enjeu consistera à capitaliser sur ces prérequis pour produire de meilleurs composants et évoluer sur la chaîne de valeur. D'autre part, le développement d'un marché requiert nécessairement un système incitatif transparent et un environnement d'affaires stable. Le chapitre 10 a également relevé des insuffisances au niveau du contrôle qualité.

En résumé, la Tunisie bénéficie d'une base industrielle et technologique solide et d'un bon système incitatif pour le CES.

L'objectif des mesures pour le CES devrait être d'aider les industries nationales à améliorer la qualité de leurs produits et à acquérir des certifications internationales, à évoluer le long de la chaîne de valeur et à pénétrer les marchés de l'export. D'autre part, il conviendrait d'amplifier le développement du marché en soutenant et en faisant évoluer le système PROSOL.

En outre, le développement du marché local devrait être marqué par le maintien et le l'amélioration du système PROSOL. Ces recommandations sont basées sur les résultats des phases précédentes du projet qui ont montré une bonne couverture de la chaîne de valeur entre fabricants. Ainsi un faible pourcentage de systèmes de composants importés devrait baisser si ces mesures étaient mises en œuvre. Ceci coïncide avec GWS 2012 qui assume pour tout le système un taux d'importation de 40% en 2010 qui tomberait à 10% en 2030. Toutefois, nous estimons le potentiel de production, de mesure et de contrôle d'équipement local se situera au dessus de 0% d'ici 2030.

La priorité devrait donc être donnée à la mise en place et à la communication du financement ou budget du système PROSOL actuel (rec. 5). Les entreprises et le grand public devraient être tenus informés de la durée et de la révision du programme, des limitations financières éventuelles et du processus d'application. Il est essentiel que ces informations soient facilement accessibles et régulièrement actualisées. Cela permettra de redonner confiance aux en-

Tableau 34 : Résumé des aspects essentiels du développement de l'industrie CES

Marché international et perspectives industrielles	
Marché	- Croissance surtout dans les régions ensoleillées et en Europe
Industrie	- Pour la plupart, des fournisseurs de systèmes - L'Europe et la Chine dominent le marché - Orientation à l'export modérée
Coûts	- Commercialisé - Soutien par mesures politiques nécessaire dans de nombreux pays - Augmentation du coût des matériaux
Fabrication	- Technologie éprouvée et fiable - Potentiel de réduction des coûts par intégration verticale - Compatibilité avec les standards de qualité internationaux nécessaire (label Key-mark)
Potentiel de la Tunisie	
Composants attractifs	- Collecteurs : fabriqués et importés (surtout panneaux plats), production non automatisée à semi-automatisée - Réservoirs : entièrement fabriqués en Tunisie - Verre : traitement (découpe et trempe) de verre solaire importé - Structures de montage fabriquées avec de l'acier galvanisé importé - Pompes : non fabriquées mais potentiel important
Facteurs encourageants	- Marché tunisien existant - Ressources humaines qualifiées - Acteurs existants (fabrication, services en aval) avec un fort potentiel d'intégration verticale (7 fabricants, env. 40 revendeurs) - Activités à l'export existantes - Partenariats internationaux existants
Barrières	- Faibles investissements en R&D, faible niveau de collaboration entre l'industrie et la recherche et développement - Faible niveau de certification et équipements de test - Dépendance élevée vis-à-vis des programmes d'incitation et transparence insuffisante de ces programmes (PROSOL) - Forte concurrence régionale

trepreneurs tunisiens et les soutiendra en ce qui concerne la planification de leurs investissements. De plus, un programme soutenu d'incitation créera un marché national et donc des emplois directs et indirects. D'autre part, il convient de développer les compétences méthodologiques au sein des organisations gouvernementales en charge du programme PROSOL afin d'améliorer p. ex. le contrôle qualité des composants importés, la transparence et l'efficacité des procédures et la compatibilité avec les standards

de qualité internationaux. Ce dernier point devrait être réalisé en prenant contact avec des organisations industrielles internationales ou en mettant en place/intensifiant les partenariats avec des pays comme l'Allemagne qui ont une longue expérience dans ce secteur.

Dans la mesure où l'industrie tunisienne est déjà bien implantée dans le secteur du CES, la part actuelle de la valeur ajoutée nationale est moyenne à élevée. Pour augmenter la

Tableau 35: Plan d'action pour le développement de la Technologie CES en Tunisie

N°	Action	Argumentaire de l'action	Entité Responsable	Entités impliquées	Action prioritaire ?	Horizon de l'action*
Politique						
1	Définir et mettre en place une stratégie à long terme avec des objectifs chiffrés pour le développement des CES intégrés avec les initiatives nationales (PST) et internationales (PSM)	- Offrir de la visibilité aux structures publiques et aux opérateurs privés pour planifier leur activité. - L'urgence de cette action trouve son explication dans le besoin vital des opérateurs et industriels de données claires sur le marché pour pouvoir établir à moyen terme leurs plans de développement	MI/ANME	STEG CSER	☐	MT
2	Accélérer la mise en place d'un système de contrôle Qualité des CES : - Développer/ définir les référentiels de contrôle qualité des composants et des systèmes complets CES - Doter les centres techniques des moyens de contrôles nécessaires - Définir les mécanismes et les règles de fonctionnement	Améliorer la qualité des produits fabriqués en Tunisie & Offrir aux industriels tunisiens les moyens de certifier leurs produits. L'objectif étant de faciliter l'accès à l'export (qui est l'une des priorités du secteur) et donner les moyens de faire face à la concurrence	ANME	INNORPI Centres techniques	☐	MT
Cadre légal						
3	Alléger les procédures administratives et les rendre accessibles au public pour le ProSol tertiaire	Faciliter l'accès au programme et redynamiser le marché des chauffe-eaux solaires. La capitalisation et la continuité du marché local est une condition pour le développement du secteur	ANME		☐	MT
4	Mettre à jour le programme ProSol avec une visibilité de son évolution à long terme	Éviter les arrêts brusques du programme, et permettre au secteur de se préparer aux évolutions prévues	ANME		☐	MT

Financement et mesures incitatives						
5	Définir un système de subvention/incitation pour bonifier le taux d'intégration locale	Encourager le développement de l'industrie locale et le partenariat avec les opérateurs étrangers	ANME	MI Ministère des finances		MT
6	Instaurer des mesures spécifiques d'incitations (Subvention, incitation fiscales) aux investissements des industriels dans la production des équipements et composants des énergies renouvelables	Offrir un cadre d'investissement réduisant ou compensant le risque pour l'investisseur	ANME	MI Ministère des finances		MT
Création de capacités						
7	Mettre en place un programme d'assistance à la certification des produits en ciblant les fabricants.	Faciliter l'accès à la certification (qui n'est pas actuellement le point fort des industriels tunisiens), car elle constitue l'une des conditions requises pour accéder aux marchés internationaux et affronter la concurrence étrangère	CSNER	INNORPI Centres techniques	□	ST
8	Renforcer les capacités techniques, matérielles et financières des laboratoires de contrôle et d'essai des équipements et des composants	Accélérer le développement de nouveaux produits par les industriels tunisiens, afin d'avoir plus d'atouts dans leur quête marchés internationaux	MI / MES	ANME Centres techniques CSNER	□	ST
9	Encourager les opérations de partenariat avec les acteurs internationaux notamment les associations	Permettre le transfert de technologie et l'accès à des activités à plus forte valeur ajoutée	ANME	CEPEX/ FIPA Coopérations internationale		ST/MT

*Court terme : moins de 12 mois | Moyen terme : Entre 1 et 3 ans | Long terme : plus de 3 ans

compétitivité de l'industrie nationale, il convient d'encourager activement la mise en réseau des parties prenantes tunisiennes (p. ex industrie, associations, ANME, R&D) (rec. 9). Cela peut être réalisé grâce à l'organisation de groupes de travail sur une demi-journée à intervalles réguliers. Dans ce cadre, les fabricants pourraient échanger leurs idées et leurs expériences, p. ex. en ce qui concerne l'obtention du label Solar Keymark. La connexion de la R&D et de l'industrie permettra également aux fabricants de réduire leurs coûts et d'évoluer le long de la chaîne de valeur. De toute évidence, cela nécessite un financement solide de la R&D. Par exemple, des projets de recherche conjoints entre l'industrie et la R&D peuvent permettre l'élaboration de solutions appliquées et un transfert efficace du savoir.

Plan d'action

La synthèse de l'ensemble des travaux et analyses du solaire thermique permettent de qualifier le secteur de

mature en Tunisie, car ce dernier a bénéficié de l'existence d'un marché développé (grâce aux programmes incitatifs) et a pu se développer sur les différents maillons de sa chaîne de valeur. Les enjeux à venir pour ce secteur consisteront d'une part à capitaliser sur les acquis du marché local et à évoluer sur les aspects qualitatifs (certifications, innovation...) pour pouvoir se développer à l'export et faire face à la concurrence internationale. C'est dans cette optique que le plan d'actions (ci-dessous) a été élaboré pour le solaire thermique. Ce plan d'action serait porté principalement par l'ANME et le Ministère de l'Industrie, qui auront pour responsabilité de dresser une stratégie claire et détaillée du secteur, et impliquerait fortement l'INNORPI et les centres techniques et de recherches, qui assureront le saut qualitatif de l'industrie (innovation, certification...), clé de l'accès à l'export.

11.3 Le photovoltaïque (PV)

Le paysage photovoltaïque international est actuellement en proie à de nombreux changements, comme le montre la baisse des prix des modules (particulièrement en 2012), la consolidation et la croissance incertaine du marché. Encouragé par le passé par des incitations gouvernementales au sein des pays européens, le marché semble plus amené à se développer à l'avenir hors des frontières de l'Europe. De pair avec la pression importante qui pèse sur les coûts de production, les risques associés à cette technologie sont actuellement élevés pour les entreprises. Dans le même temps, les coûts d'investissement, en particulier au début de la chaîne de valeur, les exigences élevées en termes de savoir-faire (fabrication) et en termes de qualité contribuent à élever les barrières à l'entrée pour cette technologie. Dans la mesure où ceci touche particulièrement les entreprises, le gouvernement tunisien devrait considérer l'éventualité d'un soutien plus important (p. ex. à l'aide de mesures d'incitation). En effet, c'est surtout au niveau des segments situés en aval de la chaîne de valeur que les principaux effets sur l'emploi pourront se faire sentir.

Le marché du photovoltaïque en Tunisie n'a pas encore dépassé la phase embryonnaire de son développement. En effet, toutes les lignes de fabrication existantes sont des lignes de fabrication de modules qui sont installées depuis peu de temps. Néanmoins, elles sont pourvues d'équipements à la pointe de la technologie et semi-automatisées pour permettre une certaine flexibilité au niveau du montage des composants. Un certain degré d'automatisation est cependant nécessaire pour accroître le niveau d'efficacité et d'intégration de la production de certains composants (y compris le verre, les films, les backsheets, les boîtes de jonction et les cellules) actuellement importés. Le marché mondial du photovoltaïque passe actuellement par une phase de consolidation et présente beaucoup d'incertitudes quant aux demandes en volume et à la croissance. Les capacités de fabrication existantes (amont) en Asie constituent une barrière à l'entrée, notamment sur l'aspect coût, pour les nouveaux entrants. Bien qu'il n'existe guère de compétence de fabrication de photovoltaïque en Tunisie, les industries de câblage et de métallurgie sont bien développées. Selon les responsables interrogés, ces industries n'ont aucune chance de s'intégrer le marché du photovoltaïque en l'absence d'un système d'incitations fiable. Parmi les autres faiblesses relevées, nous retrouvons l'absence d'une main d'œuvre qualifiée et la faible connexion entre la R&D et l'industrie.

L'attention pourrait aussi être portée sur les activités en aval, telle que la planification et la maintenance des installations photovoltaïque, qui sont génératrices d'emplois

et offrent des possibilités de coopération avec les acteurs internationaux.

Les consolidations que connaît le secteur du photovoltaïque à l'échelle mondiale force les acteurs internationaux à rechercher de nouvelles opportunités d'affaires et de nouveaux marchés. Son niveau d'ensoleillement élevé et sa proximité à l'Europe placent la Tunisie dans une position attractive, moyennant des mesures de soutien à mettre en place.

Tableau 36 ci-dessous reprend les principales conclusions des rapports précédents.

Suite aux considérations ci-dessus, l'accent devrait être mis sur des recommandations concernant le développement et le support d'un marché national (politique, cadre légal) entraîné par un système de mesures d'incitation bien conçu basé sur une politique nationale (rec. 1). Les premiers pas ont déjà été faits avec l'étude citée ci-dessus et la révision actuelle du Plan solaire tunisien. D'après celle-ci, le marché tunisien du photovoltaïque devrait atteindre 140 MW en 2016, 540 MW en 2020 et finalement 1 500 MW en 2030. En moyenne, le volume du marché devrait augmenter d'environ 100 MW par an. Vu les conditions actuelles et les surcapacités du marché international du photovoltaïque, il est très peu probable que ces objectifs attirent les fabricants en amont. Dans le même temps, des emplois pourraient être créés en aval. Pour encourager la fabrication de photovoltaïque en Tunisie, soit en attirant les IDE, soit en soutenant les investissements des fabricants locaux, il convient de définir des objectifs de développement plus ambitieux.

GWS 2012 assume, qu'en partant des objectifs politiques actuels (par exemple Plan Solaire Tunisien), le taux d'importation pour les systèmes PV pourrait rester élevé jusqu'à la 2030. En raison de la dynamique du marché mondial cité ci-dessus tous chiffres absolus retenus pourraient sembler arbitraire. Le taux d'investissements dans des unités de fabrication de PV en Tunisie dépend de la croissance des marchés mondiaux de photovoltaïque (par exemple de la stimulation) tout particulièrement dans la région MENA. En outre, les pays de la région seraient comme la Tunisie intéressés par la création d'une industrie locale qui engendrerait des emplois. Compte tenu des coûts très avantageux de l'énergie et de leurs marchés plus larges ceux-ci constitueraient de sérieux concurrents. Ainsi pour élargir le marché de production de photovoltaïque en Tunisie en attirant les investissements soit étrangers soit locaux des objectifs plus ambitieux devraient être définis. Comme souligné ci-dessus, la fabrication en aval présente plus d'opportunités de création d'emplois alliés à moins de barrières d'entrée. Concernant le développement

Tableau 36 : Résumé des aspects essentiels du développement de l'industrie du photovoltaïque

Marché international et perspectives industrielles	
Marché	- Forte croissance jusqu'en 2011, évolution actuelle incertaine - Marchés traditionnels stimulés par des mesures d'incitation (Europe), marchés émergents en dehors de l'Europe. - Faible marché national (MENA)
Industrie	- Technologie commercialisée - Capacités élevées en Asie, déclin des activités de fabrication en Europe
Coûts	- Coûts d'investissement différents selon l'étape dans la chaîne de valeur (coûts élevés de fabrication en amont, faibles en aval)
Fabrication	- Haut niveau d'intégration verticale - Capacités élevées (> 1 GW) pour des coûts de production faibles - Savoir-faire technologique partiellement élevé nécessaire - Qualité certifiée requise (standards internationaux) - Fabrication en aval (Balance of system et services) avec potentiel élevé de valeur ajoutée nationale et d'effets sur l'emploi
Potentiel de la Tunisie	
Composants attractifs	- Verre : capacités de traitement du verre existantes, investissements d'équipement nécessaires pour la production de verre photovoltaïque, probabilité plus élevée avec le développement du marché national/régional (coûts logistiques), pas de verre flotté - Modules : production existante, concentration sur produits de niche (intégration au bâti) - Câblage : activités de câblage existantes, production de câbles pour le marché de l'automobile, investissements nécessaires en R&D et en équipement pour répondre aux exigences du câble photovoltaïque - Onduleurs et autres composants électriques : inexistant dans la qualité requise mais présence d'industries annexes - Structures de support : savoir-faire existant, mais investissements nécessaires en équipement
Facteurs encourageants	- Fabricants de modules existants - Producteurs de câble et de composants électriques et électroniques existants - Bonne capacités de R&D en particulier pour les composants électriques et électroniques mais également activités de R&D pour les cellules - Conditions géographiques favorables (ensoleillement) - Expérience de l'installation et du service pour les systèmes photovoltaïques
Barrières	- Manque d'expertise locale pour les composants essentiels en aval (polysilicium, wafers et cellules) - Manque de main d'œuvre qualifiée - Financement insuffisant de la R&D - Manque de transparence de la politique du photovoltaïque - Manque d'installations de test - Risque financier élevé

plus poussé de marchés nous nous accordons comme GWS 2012 à penser que la nécessité d'importer des services en aval pourrait devenir quasi inexistante d'ici 2030.

Dans tous les cas, les systèmes d'incitation actuels doivent être revus et une planification fiable pour les installations photovoltaïques devrait être établie (p. ex. dans le cadre de la révision du Plan solaire Tunisien) comme indiqué plus haut dans la recommandation 2. L'expérience internationale dans le domaine de l'incitation pour les différents types d'énergies renouvelables montre qu'il convient de porter la plus grande attention à la conception de ces mesures. Il s'agit de prendre en considération les conditions locales en termes d'ensoleillement, de coûts

de fabrication d'énergie, de réseaux de transmission et de savoir-faire industriel. Cette analyse est nécessaire pour mettre en place un schéma non seulement attractif du point de vue financier mais également solide du point de vue de sa faisabilité (en ce qui concerne les coûts engagés par le gouvernement). L'introduction de contenus nationaux peut également être prise en considération afin de stimuler la coopération entre les entreprises nationales et internationales (rec. 4). Comme indiqué plus haut, une analyse détaillée est indispensable. Dans la mesure où les compétences industrielles sont faibles en Tunisie pour ce qui est de la fabrication des composants en amont, il peut être utile d'attirer les IDE pour lancer le développement du savoir-faire (rec. 7). Dans la mesure où les effets

sur l'emploi sont plus importants en aval, la création d'un marché local se montrera plus efficace. Par contre, les fabricants existants de modules photovoltaïques (qui ont créés les emplois en amont) devraient être soutenus p. ex. grâce à des projets de référence qui permettront de présenter leurs modules, ou en les mettant en contact avec la R&D (rec. 10). D'autres mesures efficaces de création de capacités incluent la mise en réseau des principales parties essentielles (rec. 9). Pour que la Tunisie puisse tirer un bénéfice économique de ses objectifs de développement du photovoltaïque, une collaboration étroite entre les institutions gouvernementales, l'industrie et les associations est nécessaire. Une plateforme de communication officielle peut permettre de tirer meilleur parti des potentiels locaux existants comme les capacités de production, les ressources humaines, la R&D et les ressources financières. Un encouragement de la collaboration entre les acteurs internationaux et les entreprises locales serait également avantageux en ce qui concerne le transfert des connaissances et la création de capacités.

Plan d'action

L'objectif de cette section est de présenter des recommandations spécifiques à chaque technologie. Malgré les différences entre les technologies, les responsables et parties prenantes identifiés sont les mêmes. Les acteurs principaux sont les suivants :

- ANME et différents ministères concernés (Industrie, Finances, Éducation) pour ce qui est de la stratégie, de la planification et du financement
- Les structures responsables de la mise en place des actions et de l'application des mesures (STEG, CNSER, INNORPI) et de la promotion du secteur (CEPEX, ANPR)
- Les centres de recherche (CSER) et les centres techniques pour ce qui est de la réalisation de la R&D et des actes d'homologation et de certification

Dans la mesure où ces parties prenantes sont essentielles pour les trois types de technologies, le paragraphe précédent ne sera pas répété par la suite.

Le solaire photovoltaïque reste, en Tunisie, un secteur à potentiel mais peu développé. Le positionnement sur la chaîne reste marqué par des produits à faible valeur ajoutée, car la montée en VA nécessiterait des investissements matériels et immatériels lourds. La Tunisie gagnerait à soutenir davantage les industriels de ce secteur, afin qu'ils deviennent plus attractifs pour les acteurs mondiaux du photovoltaïque (et profiter ainsi des mouvements internationaux de consolidation) et à encourager les activités de service en aval de la chaîne de valeur. Ces activités pourraient, moyennant des actions de mise à niveau et de qualification, se développer rapidement, en s'appuyant

sur le tissu existant de compétences et d'opérateurs de service. Le plan d'action présenté ci-après, a pour objectif de traduire ce positionnement, avec un rôle de leader de l'ANME et du Ministère de l'Industrie dans la définition de la stratégie et des objectifs du secteur, un appui de la part du Ministère de Finances pour l'incitation financière notamment des industriels à développer leur activité, et des actions promotionnelles fortes de la part du CEPEX et de la FIPA pour introduire l'industrie PV tunisienne auprès des acteurs majeurs du secteur.

11.4 Les centrales solaires thermiques (CSP)

L'enjeu principal autour de la technologie CSP porte sur son rendement et son positionnement en tant que technologie gagnante, surtout que cette dernière est la moins mature et la moins compétitive actuellement. Les marchés sont en grand partie dépendants des mesures d'incitation gouvernementale. En l'absence de ces mesures, ces marchés n'ont pu atteindre une taille importante qu'en Espagne et aux États-Unis. Les barrières à l'entrée sont élevées sur ces marchés du fait des coûts de la propriété intellectuelle ainsi que des investissements élevés et du haut niveau de savoir-faire nécessaires. Par conséquent, la plupart des projets existants de par le monde sont aux mains d'un petit nombre d'entreprises spécialisées.

L'analyse du potentiel local de fabrication des composants solaires en Tunisie démontre que l'industrie de la technologie CSP reste encore non établie. En effet, aucune ligne de fabrication pour ses composants n'existe en Tunisie et très peu d'acteurs du marché sont actuellement en mesure de fabriquer ses composants. De tels constats ont révélé d'importantes lacunes notamment en termes d'absence de maîtrise technique de la technologie à tous les niveaux (industrie, formation, recherche...), d'expertise humaine et d'activités de R&D. En conséquence, ce n'est qu'à long terme que le CSP peut représenter une option valable pour le tissu industriel tunisien.

Comparé au photovoltaïque, les marchés internationaux sont de petite envergure et les activités de développement de projet représentent un risque élevé pour les investisseurs.

Néanmoins, la Tunisie constitue une destination à fort potentiel théorique pour les centrales CSP, en raison de ses conditions géographiques favorables (niveau d'ensoleillement, proximité de l'Europe).

Comme indiqué plus haut, le marché et l'industrie du CSP sont pratiquement inexistantes en Tunisie. Dans le même temps, les scénarios de politique énergétique suggérés actuellement prévoient une capacité de 110 MW en 2016,

Tableau 37: Plan d'action pour le développement de la technologie photovoltaïque en Tunisie

N°	Action	Argumentaire de l'action	Entité Responsable	Entités impliquées	Prioritaire ?	Horizon de l'action*
Politique						
1	Définir et mettre en place une stratégie à long terme intégrée avec les initiatives nationales (PST) et internationales (PSM, DESERTEC) incluant la part du photovoltaïque dans le mixe énergétique de la Tunisie	- Offrir de la visibilité aux structures publiques et aux opérateurs privés, sur les marchés et la demande à venir, pour planifier leur activité - Envoyer un message fort aux acteurs internationaux clés du secteur, pour placer la Tunisie dans leurs plans de développement	MI/ANME	STEG CSER	☐	MT
2	Mettre à jour le programme PROSOLELEC		ANME	MI STEG	☐	ST
Cadre légal						
3	Mettre en place une entité de régulation pour le marché de l'électricité	Préparer le terrain pour l'installation d'opérateurs photovoltaïque décentralisés privés, dont la production est destinée au marché national ou à l'export	MI	ANME STEG		MT
4	Définir un cadre réglementaire pour la production de l'électricité photovoltaïque connecté au réseau par des acteurs privés (destinée à la consommation nationale ou à l'export)		MI	ANME STEG	☐	MT
Financement et mesures d'incitation						
5	Analyser l'introduction d'un système de tarifs de rachat	Permettre aux opérateurs d'avoir des projets financièrement soutenables	ANME	MI Ministère des finances		MT
6	Voir si un système de subvention/incitation pour bonifier le taux de contenu local des installations photovoltaïque est faisable	Permettre, dans un premier temps, aux industriels locaux de se développer en adressant le marché local	ANME	MI STEG Ministère des finances		MT
7	Améliorer les conditions d'attribution des crédits (plafond, taux d'intérêt) pour les systèmes PV > 2 kW	Permettre aux industriels du photovoltaïque d'avoir accès à un marché qui a les moyens de consommer la technologie	ANME	MI STEG Banques		ST/MT



8	Instaurer des mesures spécifiques d'incitations (subvention, incitation fiscales) aux investissements dans les équipements et composants photovoltaïques	Permettre aux industriels d'avoir des projets financièrement soutenables, de développer un savoir-faire, en vue de se développer localement et se préparer à des partenariats avec des leaders internationaux	MI	ANME Ministère des finances	☐	MT
Création de capacités						
9	Développer des programmes R&D pour encourager la fabrication locale des composants photovoltaïques (onduleurs, régulateurs, supports, câble) et le développement de nouvelles applications	Augmenter le taux de couverture de la chaîne de valeur et améliorer la valeur ajoutée	ANME	ANPR Centres de recherches Centres techniques		MT
10	Renforcer le système de formation professionnelle et universitaire par l'intégration de filières spécialisées dans les technologies photovoltaïques	Mettre à disposition des acteurs locaux et étrangers un vivier de ressources humaines les	ANME	Universités / Écoles d'ingénieurs Centres de formation		MT

Tableau 38 : Résumé des aspects essentiels du développement de l'industrie CSP

WP 1, 2 : Évolution du marché et analyse de la chaîne de valeur	
Marché	- Marché concentré régionalement (Europe, États-Unis) - Fortement dépendant des mesures d'incitation - Premiers projets en région MENA
Industrie	- Peu d'entreprises, situées en Europe et aux États-Unis - Forte concurrence internationale
Coûts	- Coûts d'investissement élevés, baisse des coûts attendue - Incertitude concernant la meilleure technologie CSP représente un risque pour les investissements
Fabrication	- Haut niveau de savoir-faire requis pour la fabrication - Exigences de qualité élevées - Besoins élevés en R&D
WP 3 : Composants attractifs pour la Tunisie et mesures de soutien	
Composants attractifs	- Aucun à court terme, miroirs et structures de support comme option potentielle en fonction de l'évolution du marché - Récepteurs pour capteur cylindro-parabolique
Facteurs encourageants	- Expérience existante dans l'industrie du métal et de verre - DESERTEC - Avantage potentiel en tant que pionnier dans la région
Barrières	- Industrie inexistante - Technologie CSP non mature - Manque de main d'œuvre qualifiée - Manque de R&D - Évolution du marché incertaine

330 MW en 2020 pour atteindre 460 MW en 2030. Malgré cela correspond à un taux annuel d'installation relativement modeste, la difficulté, vu le risque élevé pour les entreprises et le manque de savoir-faire local, est d'attirer les investisseurs. En accord avec GWS 2012, nous estimons que le système de quotas d'importation pour les CSP restera très élevé et se maintiendra à ce niveau jusqu'en la 2030. En outre, sur la base des conclusions de cette étude, le quota actuel, le long de la chaîne des valeurs restera proche des 100%. On peut toutefois se demander si, en accord avec GWS 2012, en amont de la chaîne des valeurs, compte tenu du modeste taux d'installations nécessaires celui-ci va chuter de manière substantielle à cause du risque entrepreneurial élevé. Pour les services en aval la situation se présente différemment car les barrières d'entrée sont plus faibles et par ce qu'il existe des synergies avec les centrales fossiles et quelques centrales photovoltaïques. Si le scénario de politique énergétique est maintenu. Un schéma attractif de mesures d'incitations devrait donc être mise en place (rec. 1). Dans la mesure où les technologies CSP ne sont pas encore matures, la conception de tels schémas comporte un certain nombre de défis comme le choix de la technologie, le calcul des coûts de production, une agence de mise en application, etc. (rec. 3).

À la lumière de ces conclusions, des recommandations concernant la création de capacités sont données, en ce qui concerne les organisations gouvernementales (rec. 8) et l'industrie. Un savoir-faire externe est requis. Il peut être acquis par le biais d'organisations internationales ou en attirant les IDE. Alors que l'installation de parcs CSP peut générer de la création d'emplois, il convient de prévoir que les effets sur l'emploi liés à la fabrication de composants se feront sentir uniquement sur le moyen à long terme, afin de diminuer les risques annexes. Malgré cette approche plutôt générale, une communication transparente au sujet des parcs CSP tunisiens est particulièrement recommandée afin d'attirer le savoir-faire étranger. D'une manière générale, la quantité et l'intensité des efforts déployés pour le CSP doivent être moins importants que pour le photovoltaïque et le CES. Vu les barrières élevées à l'entrée et les risques associés à cette technologie, une étude pointue de faisabilité devrait être réalisée pour examiner comment la Tunisie pourrait profiter au mieux (emploi, valeur ajoutée) de ses objectifs CSP.

Plan d'action

La Tunisie est positionnée aujourd'hui en mode d'observation vis-à-vis des technologies CSP, et ce en raison des prérequis techniques, technologiques et financiers inhérents au CSP et au niveau de certitude faible lié à la technologie. Ce positionnement pourrait être amendé par un renforcement des activités de veille et d'observation des évolutions technologiques, l'amélioration de l'attrac-

tivité du pays comme destination pour l'expérimentation et les essais techniques, en capitalisant sur son potentiel d'ensoleillement (afin d'avoir des éléments concrets sur les technologies à choisir) et le développement d'un cadre réglementaire pour préparer le terrain au développement d'une production électrique sur la base de cette énergie. L'ANME, le Ministère de l'Industrie et la STEG joueront un rôle majeur dans la mise en œuvre de cette stratégie, l'élaboration du cadre réglementaire et la préparation au développement des sites pilotes. L'ANPR et les centres de recherches traduiront la volonté forte d'observer de près ce secteur et d'évaluer la pertinence et l'adéquation des technologies CSP aux besoins énergétiques en Tunisie (localement et à l'export).

11.5 Conclusion

Vu les conditions actuelles du marché, la concurrence industrielle, les risques pour les entreprises et le niveau technologique de chacune des technologies solaires, le CES semble être la technologie la plus prometteuse et la mieux adaptée pour la Tunisie. En plus d'une bonne couverture existante de la chaîne de valeur en Tunisie, le système PROSOL a créé un marché attrayant. Ainsi, les deux activités en amont et en aval devraient être renforcées pour accroître la valeur ajoutée locale et créer des emplois. Dans le même temps, le système d'incitation devrait être amélioré, par exemple, concernant la transparence et les contrôles de qualité, de maintenir et/ou stimuler la croissance du marché.

Le photovoltaïque, pour sa part, est non seulement beaucoup moins représenté dans le paysage industriel tunisien, mais il fait également face à une forte consolidation et à une évolution incertaine du marché. Cependant, vu la position géographique favorable de la Tunisie (ensoleillement élevé) et l'existence d'industries annexes, le photovoltaïque peut offrir certaines opportunités. Compte tenu de la baisse du taux d'emplois créés et des barrières à l'entrée élevées le long de la partie en amont de la chaîne de valeur, la priorité devrait être mise sur le développement des activités en aval. Ceci nécessite un important marché local stimulé par des incitations.

Le fait que la technologie CSP n'ait pas encore atteint son point de maturité commerciale et les efforts élevés qu'elle demande en termes de R&D et d'investissements représentent actuellement des barrières à l'entrée importantes pour la Tunisie. Dans la mesure où aucun composant CSP n'est fabriqué actuellement en Tunisie, des discussions d'ordre général sur l'agenda tunisien en termes de politique énergétique devraient précéder toute approche visant à des actions détaillées dans ce domaine. Les activités PV en aval présentent un potentiel élevé de création

Tableau 39 : Plan d'action pour le développement de la Technologie CSP en Tunisie

N°	Action	Argumentaire de l'action	Entité Responsable	Entités impliquées	Prioritaire ?	Horizon de l'action*
Politique						
1	Définir et mettre en place une stratégie à long terme intégré avec les initiatives nationales (PST) et internationales (PSM, DESERTEC)	Offrir de la visibilité aux structures publiques et aux opérateurs privés pour planifier leur activité, à travers une définition du poids / position du CSP	MI/ANME	STEG CSER	□	MT
2	Évaluer les tendances mondiales, les variantes technologiques et les risques générés par l'intégration locale des activités CSP	S'assurer de se positionner sur les technologies CSP gagnantes et à plus fort potentiel, avant de se lancer dans les travaux d'opérationnalisation	MI	ANME STEG	□	ST/MT
3	Exiger un taux d'intégration minimal pour la création de la valeur locale lors des projets CSP	Assurer un effet d'entraînement de l'industrie locale lors de l'implémentation des projets CSP	ANME	MI STEG		MT/LT
Cadre légal						
4	Définir un cadre réglementaire pour la production de l'électricité à travers la technologie CSP (destinée à la consommation nationale ou à l'export)	Préparer le terrain pour l'installation d'opérateurs CSP décentralisés privés, dont la production est destinée au marché national ou à l'export. Ce cadre doit être aligné sur les évaluations des tendances, à réaliser en priorité	MI	ANME STEG		MT/LT
Création de capacités						
5	Assurer une veille sur les technologies CSP à travers des activités de R&D	Rester à l'affût des avancées technologiques, pour assurer le meilleur positionnement technologique	ANME	ANPR Centres de recherches Centres techniques		ST/MT
6	Créer et maintenir un site web sur les tendances internationales et l'actualité du marché et des technologies CSP		ANME			ST



7	Mettre en place des programmes pilotes de sites CSP	Offrir un terrain favorable à l'implantation des activités d'expérimentation et d'essai CSP, en préparation à l'industrialisation de la technologie	ANME	STEG/ CR-TEn/Centres techniques/ Unités de recherche		MT
8	Encourager les expérimentations de toutes les technologies CSP par les opérateurs locaux ou étrangers (dans ou en dehors des sites pilotes)		ANME	STEG/ CR-TEn/Centres techniques/ Unités de recherche		ST/MT
9	Améliorer les infrastructures matérielles, technologiques et humaines dédiées aux projets CSP	Préparer le terrain et les ressources, en vue de l'implantation d'opérateurs CSP et de réalisation de projets de centrales CSP	MI/MES	ANME STEG/ CR-TEn/Centres techniques/ Unités de recherche		ST/MT
10	Renforcer les mécanismes de communication et de collaboration entre les centres de recherches et les entreprises	Faciliter l'industrialisation des produits et renforcer l'innovation en entreprise	ANME	ANPR/ CR-TEn/ Centres techniques		ST/MT

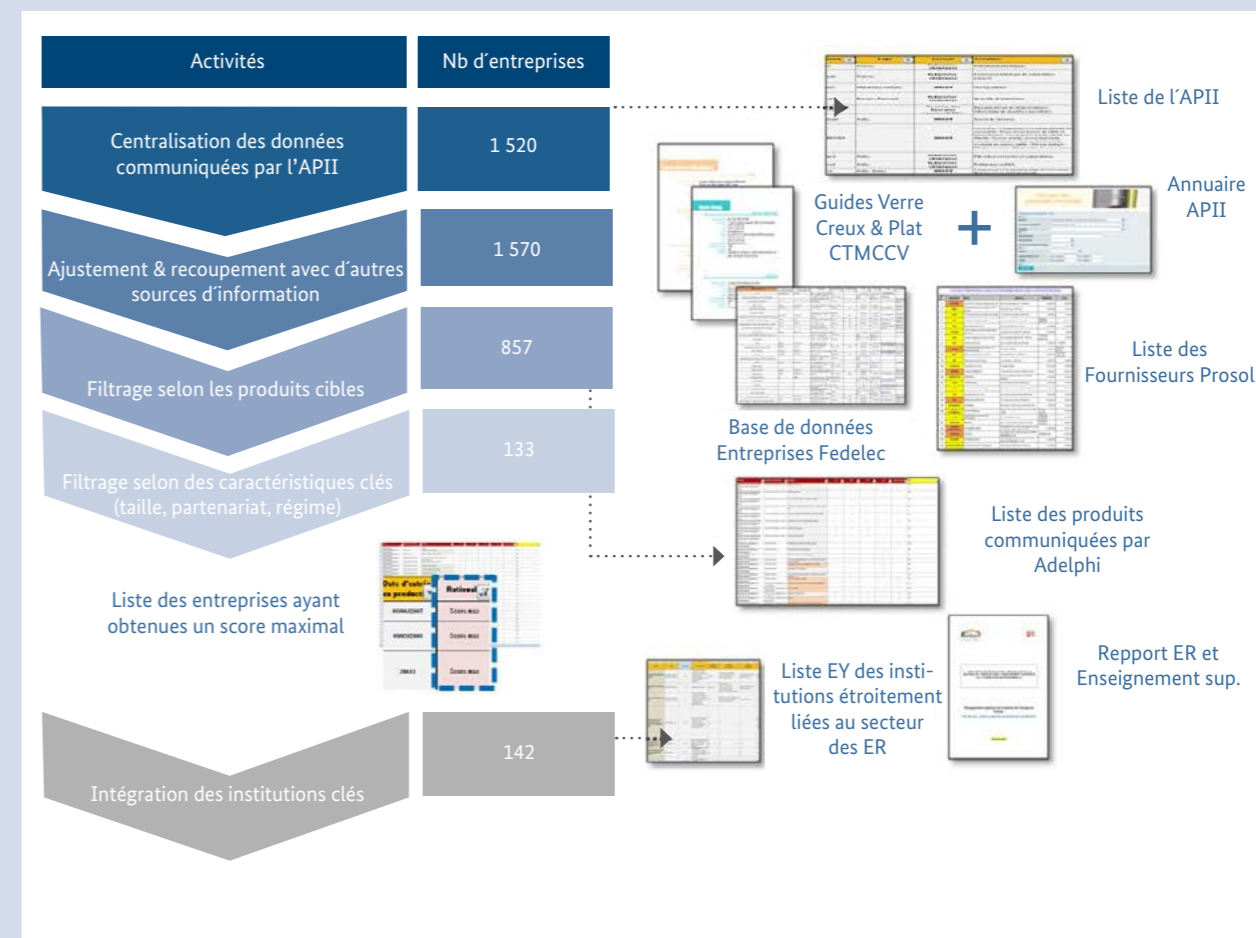
d'emplois et de valeur ajoutée locale. En outre, le renforcement de capacités est nécessaire au sein des institutions gouvernementales, de l'industrie et du système éducatif (universités, par exemple).

En conclusion, les SWTH représentent le secteur des technologies solaires le plus attrayant pour la Tunisie dans le court terme et devraient donc bénéficier d'une plus grande attention de la part des décideurs de l'industrie.

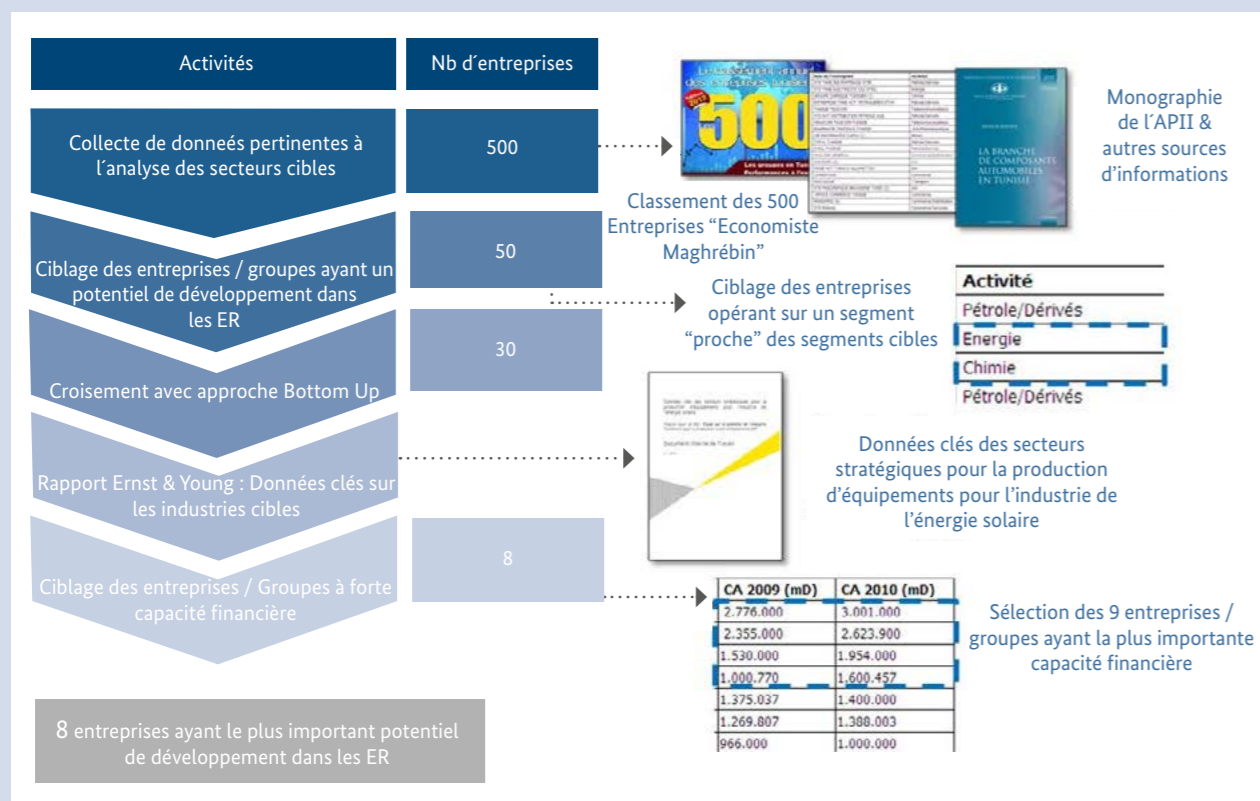
En tant que technologie la plus mature et la plus commercialisée, le segment PV présente de faibles obstacles à l'entrée et donc une opportunité à moyen terme suivi par le segment CSP qui est le moins développé - globalement et localement. Toutefois, la planification stratégique et la mise en œuvre de PV et des CSP devrait commencer dès aujourd'hui.

Annexes

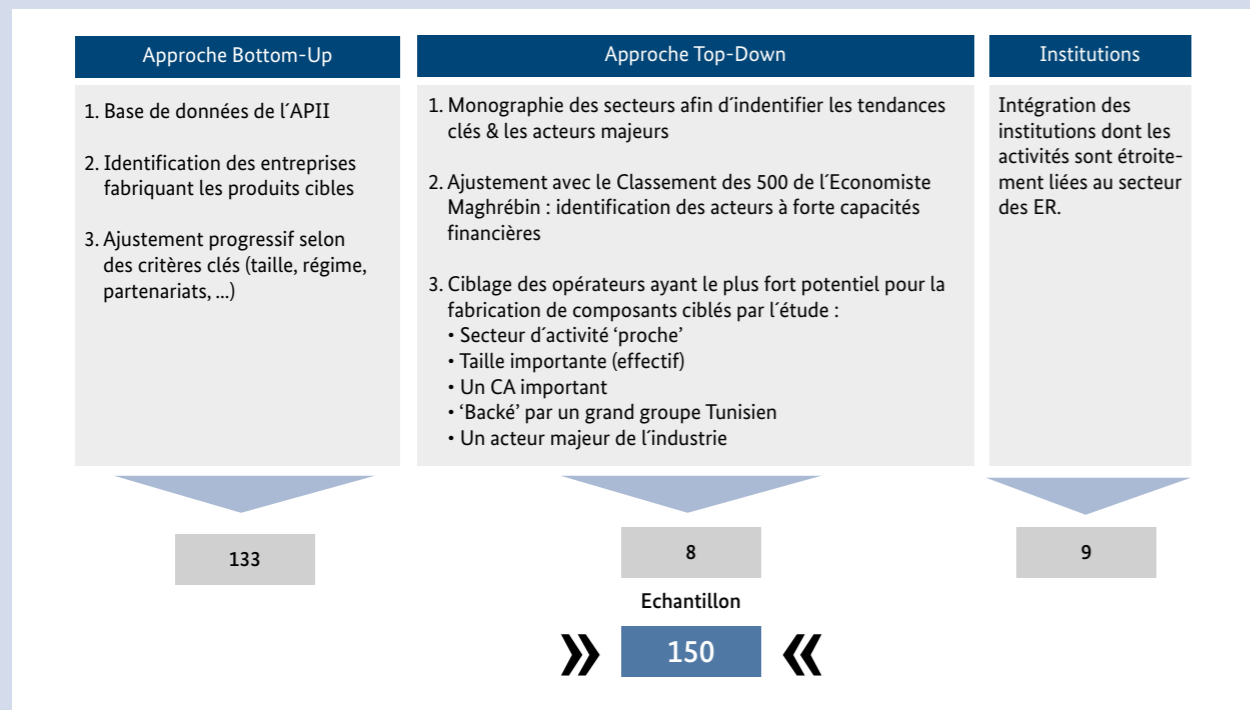
1. Vue synthétique de l'approche Bottom-Up



2. Vue synthétique de l'approche Top-Down



3. Récapitulatif de l'approche globale de sélection de l'échantillon cible



4. Alignement de la distribution sectorielle de la population finale à celle de l'échantillonnage initial

Secteur d'activités	Nombre d'entreprises interrogées	% d'entreprises interrogées	% des entreprises de l'échantillon initial
IC : Industrie chimiques	12	16%	21%
IMCCV : Industrie des matériaux de Construction, de la Céramique et du Verre	6	8%	10%
IEE : Industrie Electrique et Électronique	27	37%	39%
IMM : Industrie Mécanique et Métallurgique	22	30%	26%
IER : Industrie des Energies Renouvelables	7	9%	4%
TOTAL	74	100%	100%

5. Mode opératoire de l'enquête

La phase de collecte de données a été déclenchée à la fin du mois de Mai 2012 et clôturée en début du mois de Juillet 2012 et ce, pour couvrir 81 acteurs clés représentatifs (entre-prises et institutions) du tissu industriel cible.

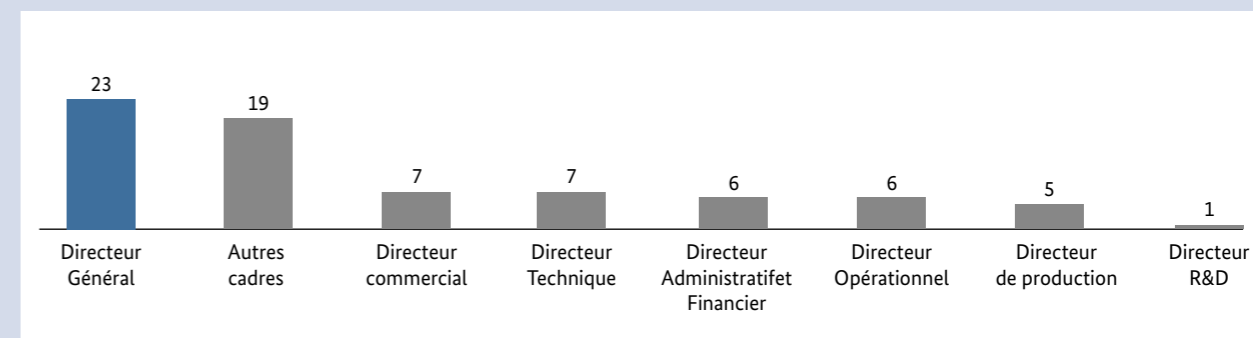
Afin de répondre aux objectifs de l'enquête, un mode opératoire composé de trois phases a été adopté :

a) Ciblage des profils de répondants : Afin de s'assurer de la fiabilité des données requises par le projet, les profils ayant un degré de séniorité assez élevé ont été privilégiés. Ainsi, les plus hauts cadres des entreprises ont été ciblé pour interview : Plus de 74% des personnes interviewées occupent des positions stratégiques aux seins des entreprises ciblées.

b) Prise de contact : Une fois les répondants identifiés, le processus de la prise de contact se déclenche par l'envoi d'un courrier électronique personnalisé. Son objet, est de présenter le contexte et les objectifs de l'enquête afin de susciter l'intérêt de la personne ciblée et l'encourager à participer à l'enquête.

c) Réalisation de l'entretien : Une fois le rendez vous fixé, le questionnaire ainsi que les différents annexes (utiles pour une meilleure compréhension du volet technologique) sont envoyés au répondant. Après confirmation de la date du rendez-vous, nous nous entretenons avec le répondant, sur la base du questionnaire préalablement envoyé, en s'assurant que la totalité des informations requises sont collectées et documentées et en poussant la réflexion via des relances afin d'enrichir l'analyse.

Profil des répondants



6. Liste des entreprises visitées

Entreprise	Secteur	Produit
STE DE VERRE PLAT (SOVEP)	Industries des Matériaux de Construction, de la Céramique et du Verre	Verre plat - Façonnage et transformation du verre plat - Verres de sécurité, trempés ou contrecollés - Vitrage isolant - Miroirs en verre - Autres verres plats.
SOFTEN	Industrie des Energies Renouvelables	Capture – Chauffe-eau solaire
Société Internationale de l'Energie et des Sciences	Industrie des Energies Renouvelables	Chauffe-eaux solaire
AURASOL Tunisie	Industrie des Energies Renouvelables	Panneaux photovoltaïques
KBE SCS	Industrie des Energies Renouvelables	Câblage photovoltaïque
STE NIEF PLASTIC TUNISIA	Industries Chimiques	Pièces techniques en matières plastiques
LCOMPTOIR NATIONAL DU PLASTIQUE	Industries Chimiques	Plaques, feuilles, pellicules, bandes en matières plastiques, housses en matières plastiques, Caisses et cageots en matières plastiques, Meubles pour jardins,
LA CROIX ELECTRONIQUE TUNISIE	Industries Electriques, Electroniques et de l'Electroménager	Cartes électronique pour application industrielles, défense et armée.
Fitelec Tunisie	Industries Electriques, Electroniques et de l'Electroménager	Selfs, bobines condensateurs, condensateurs filtrés, filtres RFI, jeux câbles
COFICAB	Industries Electriques, Electroniques et de l'Electroménager	Câbles pour automobiles
STE D'ETUDES ET DE CONSTRUCTION METALLIQUE	Industries Mécaniques et Métallurgiques	Ossatures métalliques pour la construction, Autres constructions métalliques
PHILBERT TUNISIE	Industries Mécaniques et Métallurgiques	Conduite en acier, moules pour produits en béton, charpentes,...
STE DE TRANSFORMATION DE METAUX (EL FAHS)	Industries Mécaniques et Métallurgiques	Tube en acier soudé/ structures métalliques

7. Liste des institutions interviewées

Institutions	Segment	Principales missions
Ecole Nationale d'Ingénieurs de Tunis	Etablissement universitaire	Enseignement & formation.
Centre de Recherche et des Technologie de l'Energie (CRTE) : Technopole de Borj Cedria	Centre de Recherche	Formation, veille technologique, R&D, certificats de conformité (chauffe-eaux solaires, dessalement solaire de l'eau, technologies et systèmes photovoltaïques.
Centre Technique des Matériaux de Construction, de la Céramique et du Verre (CTMCCV)	Centre technique	Laboratoire d'essai & d'analyse chimique, contrôle technique, Elaboration des normes Tunisienne.
Centre Technique des Industries Mécaniques et Electriques (CETIME)	Centre technique	Etude préalable à l'investissement en équipement de production, contrôle qualité, Maintenance des installations et équipements.
Technopole de Sousse	Pôle de compétitivité	- Ecole Nationale d'ingénieurs de Sousse. - Un Centre de Recherche spécialisé en Nanotechnologie et Microélectronique doté d'une salle blanche - Un Centre de Ressources Technologiques (CRT) en Microélectronique destiné à compléter la chaîne de valeur en mettant à la disposition des entreprises un centre de prototypage rapide. Ce CRT est géré par le CETIME.
Agence Nationale de Promotion de la Recherche Scientifique (ANPR)	Centre de recherche	Promotion de la recherche
Laboratoire de physique de la matière condensée : Université Tunis el manar-faculté des sciences	Etablissement universitaire & laboratoire de recherche	Laboratoire de recherche matériaux.

8. Structure du questionnaire des entreprises

Sections	Objectifs	Nombre de questions
1. Informations générales	Recueillir les informations nécessaires à la compréhension du contexte de l'entreprise. Ces informations, concernent aussi bien l'entreprise que l'interviewé lui-même.	1 question à 23 rubriques
2. Connaissance et développement actuel dans le secteur du solaire	Comprendre l'implication actuelle de l'entreprise dans le secteur des Energies solaires ainsi que ses différents facteurs de freins/ motivations pour un positionnement sur l'industrie solaire.	1
3. Capacités technologiques	Etudier le potentiel technologique de l'entreprise en évaluant le degré d'alignement aux normes internationales (ISO 9001, ISO TS16 949...) ainsi que le niveau de sophistication des processus de production et/ ou d'assemblage.	8
4. Capacités Financières et Business Plan	Dresser un état des lieux des capacités financières actuelles de l'entreprise.	6
5. Capacités de R&D	Analyser la capacité de R&D de l'entreprise notamment pour les technologies solaires (photovoltaïque, thermique, CSP).	4
6. Marché, concurrence et partenariat	Approfondir le positionnement stratégique de l'entreprise aussi bien sur le marché local qu'à l'international.	9
Annexes : Panorama des technologies solaires ciblées pour cette étude		

9. Structure du questionnaire des institutions

Sections	Objectifs	Nombre de questions
1. Informations générales	Recueillir les informations nécessaires à la compréhension du contexte de l'étude de l'institution. Ces informations, concernent aussi bien l'institution enquêtée que l'interviewé lui-même.	1 question à 20 rubriques
2. Activités dans le secteur solaire	Comprendre l'implication actuelle de l'institution cible dans le secteur des Energies solaires ainsi que les pistes de développement.	3
3. Coopération industrielle	Etudier la nature de la relation existante entre l'institution enquêtée et le tissu industriel cible d'une part, puis sa relation avec les autres institutions d'autre part.	3
4. Capacités R & D	Analyser le positionnement stratégique de l'institution sur le marché du travail relatif à son domaine d'activité (nombre de diplômés, secteur d'activité, durée moyenne d'obtention du premier emploi, profil de l'employeur...)	6
5. Capacités techniques	Evaluer la pertinence des portefeuilles clients, certifications et services offerts.	4
Annexes : Panorama des technologies solaires ciblées pour cette étude		

10. Composants solaires à fort potentiel

Sector	Situation actuelle	Court Terme	Moyen Terme	Long Terme
Industrie solaire	<ul style="list-style-type: none"> • capteur solaire • ballon stockage PV <ul style="list-style-type: none"> • modules 	CES <ul style="list-style-type: none"> • capteur solaire • ballon stockage PV <ul style="list-style-type: none"> • modules 	CES <ul style="list-style-type: none"> • capteur solaire • ballon stockage • station pompage PV <ul style="list-style-type: none"> • modules (niche) 	CES <ul style="list-style-type: none"> • capteur solaire • ballon stockage • station pompage PV <ul style="list-style-type: none"> • modules
Industrie du verre	CES <ul style="list-style-type: none"> • transformation du verre 	CES <ul style="list-style-type: none"> • transformation du verre 	CES <ul style="list-style-type: none"> • transformation du verre PV <ul style="list-style-type: none"> • transformation du verre 	CES <ul style="list-style-type: none"> • transformation du verre PV <ul style="list-style-type: none"> • transformation du verre CSP <ul style="list-style-type: none"> • cintrage des miroirs et traitement
Industrie mécanique et métallurgique	CES <ul style="list-style-type: none"> • système de montage 	CES <ul style="list-style-type: none"> • système de montage PV <ul style="list-style-type: none"> • système de montage 	CES <ul style="list-style-type: none"> • système de montage PV <ul style="list-style-type: none"> • système de montage CSP <ul style="list-style-type: none"> • tuyauterie • composants bloc alimentation 	CES <ul style="list-style-type: none"> • système de montage PV <ul style="list-style-type: none"> • système de montage CSP <ul style="list-style-type: none"> • tuyauterie • composants bloc alimentation
Industrie électrique et électronique	CES <ul style="list-style-type: none"> • contrôleurs électronique • connecteurs • composants électriques 	CES <ul style="list-style-type: none"> • contrôleurs électronique • composants électriques • connecteurs • câbles CSP <ul style="list-style-type: none"> • connecteurs • câbles 	CES <ul style="list-style-type: none"> • contrôleurs électronique • composants électriques • connecteurs • câbles CSP <ul style="list-style-type: none"> • connecteurs • câbles 	CES <ul style="list-style-type: none"> • contrôleurs électronique • composants électriques • connecteurs • câbles CSP <ul style="list-style-type: none"> • connecteurs • câbles

Références

6WResearch (2012): www.6wresearch.com (5.4.2012).

A.T. Kearney (2010): Solar Thermal Electricity 2025, Clean Electricity on Demand: Attractive STE Cost Stabilize Energy Production, Report for ESTELA, Duesseldorf.

Aalborg (2011): Solar tower receiver, www.aalborgcsp.com (6.6. 2012).

ANME (Agence Nationale pour la Maîtrise de l'Energie) (2009): Promotion de L'Autoproduction D'Electricite par L'Energie Solaire Photovoltaïque, Project PROSOL ELEC, February 2010. http://www.steg.com.tn/dwl/Procedures_PROSOL_ELEC_fev_2010.pdf.

ANME (Agence Nationale pour la Maitrise de l'Energie) (2012): L'Energie Solaire Photovoltaïque en Tunisie, <http://www.anme.nat.tn/anme1/wd1/photovoltaïque/photo-voltaïque/> (5.4.2012).

APPA, Asociación de Productores de Energías Renovables (2011): Estudio del Impacto Macroeconómico de las Energías Renovables en España, <http://www.appa.es/descargas/APPA2011web.pdf> (28.8.2012).

Banse, Stephanie; Berner, Joachim (2012): Kosten senken, Effizienz bewahren, in: Sonne, Wind & Wärme, 4:12, p. 64-68.

BINE Informationsdienst (2012): Solare Wärme, <http://www.bine.info/hauptnavigation/themen/erneuerbare-energien/solare-waerme/> (16.7.12).

Bloomberg (2010): Turkish Parliament Approves Renewable Energy Law Guaranteeing Price Levels, <http://www.bloomberg.com/news/2010-12-30/turkish-parliament-approves-renewable-energy-law-guaranteeing-price-levels.html> (28.8.2012).

BMU (2011): Renewable Energy Sources Act – EEG, http://www.bmu.de/files/english/pdf/application/pdf/eeg_2012_en_bf.pdf (28.8.2012).

BMU (2012): Die wichtigsten Änderungen der EEG-Novelle zur Photovoltaik 2012, http://www.erneuerbare-energien.de/files/pdfs/allgemein/application/pdf/aenderungen_eeg_120628_bf.pdf (28.8.2012)

Brown, Adam; Müller, Simon; Dobrotkova, Zuzana (2011): Renewable Energy – Markets and Pro-spects by Technology, Paris: IEA.

BSW Solar (2012): Statistische Zahlen der deutschen Solarstrombranche (Photovoltaik), http://www.solarwirtschaft.de/fileadmin/media/pdf/bsw_solar_fakten_pv.pdf (28.8.2012)

Centrotherm (2009) Webcast: Centrotherm's "grid parity factory", www.centrotherm.de (15.5.2012).

CSP Today (2012): CSP to dominate Dubai's 1GW solar park, <http://social.csptoday.com/emerging-markets/csp-dominate-dubai-1gw-solar-park> (20.3.2012).

CSP World (2012): CSP Guide – R&D, available at <http://www.csp-world.com/guide-categories/rd> (last visit: August 28th, 2012).

CTF, Clean Technology Fund (2010): Update on the CSP-MNA Investment Plan, Washington D.C. (USA), <http://www.cleaninvestmentfunds.org> (12.11.2012).

DCTI, Deutsches CleanTech Institute (2009): Solar Energy, <http://www.solarthermalworld.org/node/40131> (5.3.12).

Dena, Deutsche Energieagentur (2009): Länderprofil Türkei, Berlin: Dena.

DLR (Deutsches Institut für Luft und Raumfahrt) (2005): MED CSP - Concentrating Solar Power for the Mediterranean Region. Study prepared for the German Federal Ministry for the Environment, Nature Conservation and Nuclear Safety, Edited by Franz Trieb, <http://www.dlr.de/tt/tans-csp>. Stuttgart (28.8.12).

Dobrott, Nikolai (2008): How to Create and Maintain a Renewable Cluster – A German Case Study at 1st Global Renewable Energy Summit 2008, in: Invest in Germany.

Du Toit, Hendrik Jacobus (2010): A Value Chain Analysis of the Solar Water Heater Industry in the Western Cape Provinces of South Africa, 00_ACV_Solar_Final.doc http://scholar.sun.ac.za/bitstream/handle/10019.1/17475/Du%20Toit_Value%20Chain_2010.pdf?sequence=1 (13.5.12).

Egger, Christiane; Öhlinger, Christine (2012): Kick-Starting Solar Process Heat in Europe, <http://www.renewableenergyworld.com/rea/news/article/2012/02/kick-starting-solar-process-heat-in-europe> (13.5.2012).

EIS, Solar Energy Development Programmatic (2012): Description of solar photovoltaic technologies on the homepage, EIS, available at: <http://solareis.anl.gov/guide/solar/pv/index.cfm> (22.3.2012).

Energytrend (2012): Global CPV Market, <http://www.energytrend.com/node/3083> (29.3.2012).

EPIA, European Photovoltaic Industry Association (2011): Global Market Outlook for Photovoltaics until 2015, EPIA, <http://www.epia.org/index.php?id=18> (22.3.2012).

EPIA, European Photovoltaic Industry Association (2012): Market Report 2011, EPIA, <http://www.epia.org/index.php?id=18> (22.3.2012).

Epp, Baerbel (2009): Linuo New Materials: Capacity for 30 Million Vacuum Tubes, <http://www.solarthermalworld.org/node/40131> (12.4.12).

Epp, Baerbel (2010): Algeria – A sunny state still waiting its turn, Global Solar Thermal Energy Council, submitted 4-12-2010, <http://www.solarthermalworld.org/node/1169>.

Epp, Baerbel (2010b): Germany – Minitec sells assembly line with certified collector, <http://www.solarthermalworld.org/node/46021> (15.5.12).

Epp, Baerbel (2012): Tunisia – CDM to fund solar water heaters, Global Solar Thermal Energy Council, submitted 3-26-2012, <http://www.solarthermalworld.org/node/3367> (15.5.2012).

ESMAP, Energy Sector Management Assistant Programme (2011): Middle East and North Africa Region Assessment of the Local Manufacturing Potential for Concentrated Solar Power (CSP) Projects, January 2011, http://www.google.de/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=4&cad=rja&ved=0CD4QFjAD&url=http%3A%2F%2Farabworld.worldbank.org%2Fcontent%2Fdam%2Fawi%2Fpdf%2FCSP_MENA_report_17_Jan2011.pdf&ei=zLv_UPa2H8jVsgb14oCgAg&usq=AFQjCNH6u4WOMEFfkiDhQLSO8O_dDZruA&sig2=NEcHNTzaA6QJxa3HfAf8oQ&bvm=bv.41248874,d.Yms (23.1.2013)

ESTELA (European Solar Thermal Electricity Association) (2009): Solar Power from the Sun Belt, The Solar Thermal Electricity Industry's proposal for the Mediterranean Solar Plan, Brussels.

Flabeg (2010a): Description parabolic trough mirrors, <http://flabeg.de/index.php?id=104&L=1> (23.3.2012).

Flabeg (2010b): Description of processes, <http://flabeg.de/index.php?id=106&L=1> (30.3.2012).

Flagsol (2010): Technological Quantum Leap – Automation of Collector Production, <http://www.flagsol.com/flagsol/english/technology/parabolic-trough-collectors/index.html> (23.3.2012).

Germany Trade And Invest (2011): The Photovoltaic Industry in Germany, http://www.gtai.de/GTAI/Content/EN/Invest/_SharedDocs/Downloads/GTAI/Industry-overviews/industry-overview-photovoltaic-industry.pdf (28.8.2012)

GIZ, Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit (2013): Ministère de l'Industrie et de la Technologie, ANME, GIZ: Stratégie nationale du mix énergétique pour la production électrique aux horizons 2020 et 2030 Choix, impacts et conditions d'opérationnalisation (not yet published)

Global Chance (2007): Les Cahiers de Global Chance – Energies Renouvelables, Développement et Environnement: Chauffe-eau solaires en Tunisie, le programme PROSOL, <http://www.global-chance.org/IMG/pdf/GC23.pdf> (28.8.2012).

GRE, Green Rhino Energy (2012): www.greenrhinoenergy.com (30.3.2012).

Green Prophet (2011): Europe's Biggest Solar Farm To Be Built in Turkey, http://www.greenprophet.com/2011/04/europes-biggest-solar-farm-to-be-built-in-tur-key/?utm_source=feedburner&utm_medium=feed&utm_campaign=Feed%3A+greenprophet+%28Green+Prophet%29 (28.8.2012)

GTM, GreenTechMedia (2011): Collection Results: 2010 Cell, Module Production Explodes Past 20 GW, <http://www.greentechmedia.com/articles/read/pv-news-annual-data-collection-results-cell-and-module-production-explode-p/> (29.3.2012).

GTM, GreenTechMedia (2011b): The Global PV Inverter Landscape: Technology and Market Trends, 2011-2015, <http://www.greentechmedia.com/research/report/the-global-pv-inverter-landscape> (5.4.2012).

GTM (2012): Prior, B., Campbell, C.: Polysilicon 2012-2016: Supply, Demand & Implications for the Global PV Industry, GTM Research, 2012.

GtZ, Deutsche Gesellschaft für Technische Zusammenarbeit (2009): Solar Thermal Applications in Egypt, Jordan, Lebanon, Palestinian Territories, Syria and Tunisia: Technical Aspects, Frame-work Conditions and Private Sector Needs, Cairo 23-25 March 2009, Workshop Report. http://www.enpi-info.eu/library/sites/default/files/attachments/200908_SWH_WS_2009.pdf (15.5.2012).

Guardian (2010): Egypt plans 100MW solar power plant, <http://www.guardian.co.uk/environment/2010/jul/12/egypt-solar-power> (20.5.2012)

GWJ, GreenWorldInvestor (2012): Another European Solar Wafer Manufacturing Location (Jena) closes under Chinese Price War – 290 Germans loses Green, <http://www.greenworldinvestor.com/2012/01/12/another-european-solar-wafer-manufacturing-location-jena-closes-under-chinese-price-war-290-germans-loses-green-jobs/> (15.6.2012).

GWS, Gesellschaft für Wirtschaftliche Strukturforchung (2012): Energie renouvelable et efficacité énergétique en Tunisie – emploi, qualification et effets économique – passé, présent et futur – Rapport 3 – Développement futur, Osnabrück, Tunis.

Häberle, Andreas; Zahler, Christian; Lerchenmüller, Hansjörg; Mertins, Max; Wittwer, Christof; Trieb, Franz; Dersch, Jürgen (2002): The Solarmundo line focusing Fresnel collector, optical and thermal performance and cost calculations, http://www.solarpaces.org/CSP_Technology/docs/solarpaces_fresnel_9_2002.pdf (15.5.2012).

Müller, Simon; Marmion, Ada; Beerepoot, Milou (2011): Renewable Energy – Markets and Prospects by Region, Paris: IEA.

Müller-Steinhagen, Hans; Trieb, Franz (2004): Concentrated Solar Power. A review of the technology. Ingenia – Quarterly of the Royal Academy of Engineering, No.18, February/March 2004.

Navigant (2010): Solar Water Heating Supply Supply Chain Market Analysis, <http://city.milwaukee.gov/ImageLibrary/Groups/cityMilShines/Documents/2010/SHWSupplyChainFinalReport.pdf> (16.7.12).

Novatec (2012): <http://novatec-solar.de/20-1-Nova-1.html> (20.3.2012).

NREL, National Renewable Energy Laboratory (2010): Parabolic Trough Thermal Energy Storage Technology, http://www.nrel.gov/csp/troughnet/thermal_energy_storage.html?print (28.3.2012).

NSF, National Steel Fabrication Company (2012): Kuraymat solar power plant, <http://www.nsfegypt.com/kuraymatsolarpowerplant> (20.3.2012).

Observatoire Méditerranéen de l'Energie (OME), GEF, UNEP (2011): Initial Market Assessment Report North Africa & Middle East, <http://www.solarthermalworld.org/files/Regional%20Market%20Assessment%20report%20%28OME-Africa%20and%20Middle%20East%29.pdf?download>.

Ölz, Samantha (2011): Fostering Solar Water Heating – Policy Experiences and Lessons Learnt from South Africa and Tunisia, in: Haselip, James; Nygaard, Ivan; Hansen, Ulrich; Ackom, Emmanuel: Diffusion of Renewable Energy Technologies – Case Studies of Enabling Frameworks in developing countries, p. 3-32, Roskilde: UNEP Risoe.

OME, Observatoire Méditerranéen de l'Energie; GEF, Global Environment Facility; UNEP, United Nations Environment Programme (2011): Global Solar Water Heating Market Transformation and Strengthening Initiative, Initial Market Assessment Report, <http://www.docstoc.com/Docs/DownloadFile.aspx?docId=112258032&key=&pass=> (30.4.2012).

Pacheco, James (2011): Modular and Scalable Base load CSP Molten Salt Plant and Conceptual Design and Feasibility Study, eSolar, http://www1.eere.energy.gov/solar/pdfs/csp_pr2011_esolar.pdf (15.5.2012).

Patterson, John (2012): Solar Hot Water Basics, <http://moosolar.com/images/Solar%20Hot%20Water%20Basics.pdf> (17.6.12).

Photon (2011): Rays of hope, Photon International, 08-08-2011, p. 260.

Photon (2011): The right chemistry, Photon International, 08-08-2011, p. 280.

Pilkington (2010): NSG Group: Pilkington and the Flat Glass Industry 2010, www.pilkington.com (1.4.2012).

Protermosolar (2012): Socios, <http://www.protermosolar.com/socios.php> (August 28.8.2012)

PV Exchange (2012): http://www.pvexchange.com/priceindex/priceindex.aspx?template_id=1&langTag=de-DE (29.5.2012).

PV Insider (2012): <http://news.pv-insider.com/photovoltaics/pv-intelligence-brief-12-%E2%80%93-25-september-2012> (17.10.2012)

PV Insider (2012): How CPV trumps CSP in high DNI locations, <http://news.pv-insider.com/concentrated-pv/how-cpv-trumps-csp-high-dni-locations> (5.3.2012).

PV Legal (2012): Final PV Industry Survey results – Graphs, <http://www.pvlegal.eu/results/pv-industry-survey.html> (28.8.2012)

PV Mag (2012): PV Magazine: Polysilicon prices continue to drop for solar, www.pv-magazine.com (18.8.2012).

PV Mag (2012b): MENA region holds great solar potential, as West faces uncertain 2012 http://www.pv-magazine.com/news/details/beitrag/mena-region-holds-great-solar-potential--as-west-faces-uncertain-2012_100005893/#axzz1wGOb2x5l (30.5.2012).

PVMag (2012c): Rise and Shine, http://www.pv-magazine.com/archive/articles/beitrag/rise-and-shine-_100006305/501/#axzz1wGOb2x5l (30.5.2012).

PVTech (2011): Apollo Solar recognizes US\$390 million revenues for turnkey a-Si equipment in 2010, www.pvtech.org (18.8.2012).

Ramlow, Bob; Nusz, Benjamin (2010): Solar Water Heating - A comprehensive guide to solar water and space heating systems, New Society Publisher.

Rech, Bernd (2010): Dünnschichtsolarzellen und neue Konzepte (SS 2010), TU Berlin, http://renknownet2.iwes.fraunhofer.de/pages/photovoltaics/data/th2003_Photovoltaiik.pdf.

REN21 (2011): Global Status Report, http://www.ren21.net/Portals/97/documents/GSR/REN21_GSR2011.pdf (28.8.2012).

Renewable Energy World (2011): Turkey Adopts Limited Feed Law, <http://www.renewableenergyworld.com/rea/news/article/2011/01/turkey-adopts-limited-feed-law> (28.8.2012).

RESSIAD (2005): Law on utilization of Renewable Energy Sources for the Purpose of Generating Electrical Energy, www.ressiad.org.tr/doc/YenilenebilirKanuningilizce.doc (28.8.2012)

Rosemberg, Anabella (2010): Building a Just Transition: The linkages between climate change and Employment, International Journal of Labour Research, 2:2, 125-162, <http://www.uncsd2012.org/content/documents/Climate%20change%20and%20labour.pdf> (18.12.12).

Saint-Gobain (2012): Mirrors for Thermosolar, available at: <http://www.saint-gobain-solar-power.com/mirrors-solar-glass-7> (20.3.2012).

Sargent & Lundy (2009): Assessment of Parabolic Trough, Power Tower, and Dish Solar Technology, Cost and Performance Forecasts – 2008, Final Draft Prepared for Department of Energy and Sandia National Laboratory, Main authors: Knoebel, Richard; Charles, Robert; Smith, Joseph; Ungate, Christopher; Geenen, Patrick, Chicago, IL (USA).

Schletter (2012): www.schletter.de (5.4.2012).

Schott (2011): Schott PTR 70 Receiver, Setting the Benchmark, www.schott.com (18.8.2012).

Schwartz, Alan (2010): Molten Salt Pump Overview, Presentation by Pratt & Whitney, http://www1.eere.energy.gov/solar/pdfs/csp_prm2010_hamilton_sundstrand.pdf (15.3.2012).

Sener (2012): CPV & CSP two axes solar tracker, Product Brochure, Madrid: Sener.

Siemens (2011): Power Blocks for Concentrated Solar Power Plants, Product Brochure, published by Siemens, Erlangen, www.siemens.com (18.8.2012).

Siemer, Jochen (2012): It's a long way down, Photon International, February 2012, p. 64-67.

Sims, Ralf; Mercado, Pedro; Krewitt, Wolfram; Bhuyan, Gouri; Flynn, Damian; Holttinen, Hannele; Jannuzzi, Gilberto; Khennas, Smail; Liu, Yongqian; O'Malley, Mark; Nilsson, Lars; Ogden, Joan; Ogimoto, Kazuhiko; Outhred, Hugh; Ulleberg, Øystein; van Hulle, Frans (2011): Integration of Renewable Energy into Present and Future Energy Systems, in: IPCC Special Report on Re-newable Energy Sources and Climate Change Mitigation, Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, Chapter 8.

Solarbuzz (2012): Incentive Cutbacks in Europe, Falling Prices, Create Major Corporate Challenges in 2012, <http://www.prweb.com/releases/NPD/Solarbuzz/prweb9297383.htm> (2.4.2012).

Solarnovus (2012): Dropping Silicon Prices Threaten CPV Industry, http://www.solarnovus.com/index.php?option=com_content&Itemid=242&id=4404:dropping-silicon-prices-threaten-cpv-industry&catid=63:business-features&view=article (5.3.2012).

SolarThinFilms (2012): www.solarthinfilms.com (5.4.2012).

Solutia (2008): Therminoil VP-1, Vapor Phase/Liquid Phase/Heat Transfer Fluid, Product Brochure, St. Luis, MO (USA): Solutia.

Spanish Government (2007): Real Decreto 661/2007, <http://www.boe.es/boe/dias/2007/05/26/pdfs/A22846-22886.pdf> (28.8.2012)

Spanish Government (2008): Real Decreto 1578/2008, <http://www.boe.es/boe/dias/2008/09/27/pdfs/A39117-39125.pdf> (28.8.2012)

Spanish Government (2012): Real Decreto 1/2012, <http://www.boe.es/boe/dias/2012/01/28/pdfs/BOE-A-2012-1310.pdf> (28.8.2012)

STEG, Societé Tunisienne de l'Ectricité et du Gaz (2010): Mécanismes de Développement du Chauffe Eau Solaire, http://www.steg.com.tn/dwl/03_MECANISMES_DEVELOPPEMENT_CHAUFFE_EAU_SOLAIRE.pdf (28.8.2012)

Stenzel, Till (2012): CSP in North Africa, Low carbon, sustainable and cost competitive electricity, Project "TuNur", Solar export from North Africa to Europe, Presentation of the TuNur-Project at the 3rd Desertec Briefing, Frankfurt.

Stuart, Becky (2011): Tunisia opens its first PV module factory, PV magazine, December 2011, http://www.pv-magazine.com/news/details/beitrag/tunisia-opens-its-first-pv-module-factory_100005221/#axzz1rAh3cZSg (5.4.2012).

Sustainable Energy Development Authority Malaysia (2012): Feed-in Tariff (FiT) rates, <http://www.seda.gov.my/go-home.php?omaneg=0001010000000101010100010000100000000000000000000000&s=3> (28.8.2012).

Sustainable Energy Development Authority Malaysia (2012): Incentives for End-Users, <http://www.seda.gov.my/go-home.php?omaneg=0001010000000101010100010000100000000000000000000000&s=116> (28.8.2012).

Sustainable Energy Development Authority Malaysia (2012): RE Quota, <http://www.seda.gov.my/go-home.php?omaneg=0001010000000101010100010000100000000000000000000000&s=160> (28.8.2012).

Tenaris (2012): Steel pipes and production process, <http://www.tenaris.com/AboutUs/ProductionProcesses.aspx> (20.3.2012).

The Malaysian Reserve (2012): RE industry may see change in feed-in-tariff, says SEDA, http://themalaysianreserve.com/main/index.php?option=com_content&view=article&id=1449:re-industry-may-see-change-in-feed-in-tariff-says-seda&catid=36:corporate-malaysia&Itemid=120 (28.8.2012).

TMWAT, Thüringer Ministerium für Wirtschaft, Arbeit und Technologie (2012): Strategiepapier für die thüringische Solarwirtschaft, Erfurt: TMWAT.

Turkish Association of Energy Experts (2010): Electricity Market Report, http://www.epdk.gov.tr/documents/elektrik/rapor_yayin/ElectricityMarketReport2010.pdf (28.8.2012).

Viebahn, Peter; Kronshage, Stefan; Trieb, Fran; Lechon, Yolanda (2008): Final report on the technical data, costs, and life cycle inventories of solar thermal power plants, NEEDS Project, <http://www.needs-project.org> (15.5.2012).

Wacker (2007): High Purity Poly-Silicon, www.wacker.com (15.5.2012).

Weiss, Werner (2006): Solar Thermal – Untapped Potential, in: Renewable Energy World, January-February 2006, p. 68-74.

Weiss, Werner; Mauthner, Franz (2012): Solar Heat Worldwide – Markets and Contribution to the Energy Supply 2010, International Energy Agency Solar Heating and Cooling Programme, Paris: IEA-SHC, <http://www.aee-intec.at/0uploads/dateien832.pdf> (28.8.2012)

WoodTV (2012): UniSolar, parent file for bankruptcy, http://www.woodtv.com/dpp/news/local/montcalm_county/unisolar-parent-file-for-bankruptcy, (5.4.2012).

Registered offices

Bonn and Eschborn, Germany

T +49 228 44 60-0 (Bonn)

T +49 61 96 79-0 (Eschborn)

Dag-Hammarskjöld-Weg 1-5

65760 Eschborn, Germany

T +49 61 96 79-0

F +49 61 96 79-11 15

E info@giz.de

I www.giz.de