



**HAL**  
open science

# Analyse de la transition vers les énergies renouvelables en Tunisie: Risques, enjeux et stratégies à adopter

Amna Omri

## ► To cite this version:

Amna Omri. Analyse de la transition vers les énergies renouvelables en Tunisie: Risques, enjeux et stratégies à adopter. Economies et finances. COMUE Université Côte d'Azur (2015 - 2019); Université de Sfax (Tunisie). Faculté des Sciences économiques et de gestion, 2016. Français. NNT: 2016AZUR0030 . tel-01448219

**HAL Id: tel-01448219**

**<https://theses.hal.science/tel-01448219>**

Submitted on 27 Jan 2017

**HAL** is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.



Université De Sfax  
Ecole doctorale des sciences  
économiques, gestion et informatique  
Unité de recherche en économie de  
développement



Université côte d'azur  
Ecole doctorale de droit et sciences  
politiques, économiques et de gestion  
Le groupe de recherche en droit,  
économie et gestion

# Thèse de doctorat

En cotutelle internationale  
Présentée en vue de l'obtention du grade  
de docteur de l'Université de Sfax  
et  
de docteur de l'Université côte d'azur  
Discipline  
Sciences économiques  
par

## Amna Omri

# Analyse de la transition vers les énergies renouvelables en Tunisie : Risques, enjeux et stratégies à adopter

Dirigée par Nouri Chtourou / Damien Bazin

Soutenue le 5 septembre 2016  
Devant le jury composé de :

Abdallah AKARI	Professeur d'Enseignement Supérieur, Université de Tunis El Manar	Rapporteur
Xavier RICHET	Professeur Emérite, Université de Sorbonne Nouvelle Paris 3	Rapporteur
Damien BAZIN	Maître de Conférences, Université côte d'azur	Directeur de thèse
Nouri CHTOUROU	Professeur d'Enseignement Supérieur, Université de Sfax	Directeur de thèse
Sami HAMMAMI	Professeur d'Enseignement Supérieur, Université de Sfax	Invité

# DEDICACES

Cette thèse est dédiée à mes chers parents qui m'ont encouragée et soutenue tout au long de mon travail de recherche et de mes études. Sans leur affection et patience je n'aurais jamais pu mener à terme cette thèse.

Mon affection et mon attachement s'adressent également à :

Mes deux sœurs Houda et Mouna

En témoignage de leurs sacrifices, conseils et encouragements continus qu'elles ont consentis pour ma réussite. J'espère par ce modeste travail avoir répondu à leur souhait de me voir réussir dans la voie que j'ai choisie.

Mes deux frères Mouez et Nébil

En témoignage de l'effort qu'ils ont déployé pour m'aider, me renforcer et me donner de l'espoir, qu'ils trouvent ici l'expression de ma profonde gratitude et affection.

Mon neveu Youssef et mes nièces Youssr et Mayssène que j'aime tendrement

Mes chères amies : Meriem, Soukaina, Imen, Abir, Sawssan et Manel

# REMERCIEMENTS

Mes remerciements les plus sincères s'adressent à mes directeurs de recherches **Monsieur Nouri CHTOUROU** et **Monsieur Damien BAZIN** de m'avoir soutenue et encouragée. Je suis très reconnaissante pour la pertinence de leurs conseils et leurs explications qui ont contribué à l'amélioration de mes connaissances. Je les remercie, particulièrement, pour la patience qu'ils ont eue à mon égard et pour le temps qu'ils m'ont consacré.

Je remercie également **Monsieur Alain DESROCHES** pour l'excellente formation de management du risque qu'il m'a accordée et pour m'avoir appris la méthode d'Analyse Globale des Risques.

Mes remerciements sont adressés aussi aux membres de jury, pour avoir l'extrême gentillesse de bien vouloir évaluer ce travail.

# SOMMAIRE

<b>INTRODUCTION GENERALE.....</b>	<b>1</b>
<b><u>PARTIE 1. ANALYSE THEORIQUE DE LA TRANSITION VERS LES ENERGIES RENEUVELABLES .....</u></b>	<b><u>12</u></b>
<b>CHAPITRE 1. LA TRANSITION VERS LES ENERGIES RENEUVELABLES : AVANTAGES ET OPPORTUNITES .....</b>	<b>13</b>
SECTION 1. LA TRANSITION VERS LES ENERGIES RENEUVELABLES POUR UN DEVELOPPEMENT DURABLE .....	14
SECTION 2. LA TRANSITION VERS LES ENERGIES RENEUVELABLES POUR UNE « RELANCE VERTE » DE L'ECONOMIE .....	30
<b>CHAPITRE 2. LES APPROCHES D'ANALYSE DE LA TRANSITION VERS LES ENERGIES RENEUVELABLES.....</b>	<b>49</b>
SECTION 1. APPROCHES BASEES SUR L'ANALYSE DE DIFFUSION DES NOUVELLES TECHNOLOGIES .....	50
SECTION 2. APPROCHES BASEES SUR LES ANALYSES ECONOMIQUES ET SOCIALES .....	68
<b>CHAPITRE 3. LES BARRIERES A LA TRANSITION VERS LES ENERGIES RENEUVELABLES..</b>	<b>91</b>
SECTION 1. L'EFFET DU « VERROUILLAGE TECHNOLOGIQUE » .....	92
SECTION 2. LES RISQUES D'INVESTISSEMENTS DANS LES PROJETS D'ENERGIES RENEUVELABLES .....	100
<b>CHAPITRE 4. VERS UNE APPROCHE DU MANAGEMENT DES RISQUES POUR L'ANALYSE DE LA TRANSITION VERS LES ENERGIES RENEUVELABLES.....</b>	<b>117</b>
SECTION 1. LE MANAGEMENT DU RISQUE : NOUVELLE APPROCHE ET NOUVEAUX ENJEUX..	118
SECTION 2. LE MANAGEMENT DU RISQUE POUR LES PROJETS D'ENERGIES RENEUVELABLES .....	131
<b><u>PARTIE 2. LA TRANSITION VERS LES ENERGIES RENEUVELABLES EN TUNISIE.....</u></b>	<b><u>148</u></b>
<b>CHAPITRE 5. LES ENERGIES RENEUVELABLES EN TUNISIE : ETATS DES LIEUX ET PERSPECTIVES .....</b>	<b>149</b>
SECTION 1. LE CONTEXTE ENERGETIQUE EN TUNISIE : DEFIS ET OPPORTUNITES .....	150
SECTION 2. LE SUCCES DU PROJET PROSOL .....	171
<b>CHAPITRE 6. LE CAS DU PROJET DE SOLAIRE THERMODYNAMIQUE A CONCENTRATION « TUNUR » EN TUNISIE .....</b>	<b>182</b>
SECTION 1. LA TECHNOLOGIE DU SOLAIRE THERMODYNAMIQUE A CONCENTRATION.....	183
SECTION 2. LE PROJET DU COMPLEXE SOLAIRE THERMODYNAMIQUE « TUNUR » .....	201
<b>CHAPITRE 7. GESTION DES RISQUES DU PROJET « TUNUR » PAR LA METHODE AGR... </b>	<b>212</b>
SECTION 1. NATURE DE L'AGR ET DESCRIPTION DU SYSTEME ETUDIE .....	213
SECTION 2. LE PROCESSUS DE L'AGR APPLIQUE AU PROJET « TUNUR » .....	224
<b>CHAPITRE 8. RESULTATS DE L'ANALYSE GLOBALE DES RISQUES ET RECOMMANDATIONS .....</b>	<b>241</b>
SECTION 1. INTERPRETATIONS DES RESULTATS DE L'AGR.....	242
SECTION 2. LES STRATEGIES ET LA STRUCTURE DE GOUVERNANCE ENERGETIQUE ADEQUATES POUR LA TUNISIE : VERS UNE GOUVERNANCE DES RISQUES .....	259
<b><u>CONCLUSION GENERALE.....</u></b>	<b><u>282</u></b>
<b><u>REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES .....</u></b>	<b><u>290</u></b>
<b><u>ANNEXES.....</u></b>	<b><u>334</u></b>
<b><u>TABLE DES MATIERES .....</u></b>	<b><u>341</u></b>

# LISTE DES FIGURES

Figure 1. Les éléments clés du développement durable et leurs interactions.....	20
Figure 2. Les emplois dans les secteurs solaire et éolien en 2011 et 2020.....	27
Figure 3. Les composantes vertes des incitations économiques en milliard de dollars.....	37
Figure 4. Les nouveaux investissements (en milliards de dollars) dans l'énergie renouvelable et les biocarburants entre 2004 et 2014.....	41
Figure 5. Les éléments favorisant le développement du secteur des ER.....	43
Figure 6. La théorie du comportement planifié .....	86
Figure 7. Un modèle simple pour la politique énergétique et l'investissement dans le secteur des énergies renouvelables .....	102
Figure 8. Les principales catégories des risques d'investissement dans le secteur des énergies renouvelables.....	106
Figure 9. Les barrières à l'investissement (n=23) .....	114
Figure 10. Relations entre les principes, le cadre organisationnel et le processus de management du risque .....	130
Figure 11. Approche méthodologique .....	145
Figure 12. Importations nettes d'énergie (Mtep) en Tunisie de 1990 à 2012 .....	151
Figure 13. La répartition de l'offre énergétique primaire en Tunisie .....	152
Figure 14. Evolution de la subvention accordée au secteur de l'énergie de 2004 à 2013 (en MDT).....	153
Figure 15. Les émissions de CO <sub>2</sub> provenant des combustibles fossiles en Tunisie .....	156
Figure 16. Production nationale d'électricité en % en 2013.....	159
Figure 17. Prévision de la capacité électrique installée d'origine renouvelable par filière en Tunisie (MW) .....	165
Figure 18. Evolution du marché du CES en Tunisie (1985-2004) .....	172
Figure 19. Les procédures pour obtenir un CES .....	174
Figure 20. Evolution des réalisations dans le marché du CES .....	175
Figure 21. Structure du marché de CES .....	177
Figure 22. Investissements et subventions en MDT pour le projet PROSOL.....	177
Figure 23. Eléments clés du processus de transformation de la chaleur du soleil en électricité par voie thermodynamique .....	184
Figure 24. Les quatre principales technologies de production de chaleur et/ou d'électricité d'origine solaire par voie thermodynamique.....	185
Figure 25. Centrale solaire « Shams 1 » à Abu Dhabi .....	186
Figure 26. Centrale Puerto Errado 2 en Espagne.....	187
Figure 27. Centrale solaire parabolique à Font-Romeu-Odeillo (France).....	188
Figure 28. Centrale CSP à tour d'Ivanpah en Californie.....	189
Figure 29. L'irradiation normale directe en KWh/m <sup>2</sup> /an .....	190
Figure 30. Les régions convenables pour la technologie CSP .....	191
Figure 31. La croissance de la production de l'électricité par voie solaire thermodynamique par région.....	193
Figure 32. Le complexe solaire Noor-Ouarzazate au Maroc.....	198
Figure 33. Le site choisi pour le projet « TuNur » .....	205
Figure 34. Station de mesure solaire à « Réjim Maatoug ».....	206
Figure 35. Le parcours du câble terrestre et sous-marin.....	207
Figure 36. Scénario d'événement redouté .....	215
Figure 37. Processus de l'AGR .....	217
Figure 38. Diagramme d'acceptabilité des risques.....	218

Figure 39. Les phases d'élaboration du projet « TuNur » .....	221
Figure 40. Diagramme d'acceptabilité des risques (Farmer) et échelle de criticité et de décisions associées .....	238
Figure 41. Répartition du nombre des scénarios par criticité initiale et par criticité résiduelle.....	243
Figure 42. Répartition des situations dangereuses de priorité 1 par dangers génériques ..	244
Figure 43. Diagramme de Kiviat de la cartographie des risques initiaux par dangers .....	246
Figure 44. Diagramme de Kiviat de la cartographie des risques résiduels par dangers ....	247
Figure 45. Diagramme de Farmer de la cartographie des risques initiaux moyens par dangers.....	249
Figure 46. Diagramme de Farmer de la cartographie des risques résiduels moyens par dangers.....	249
Figure 47. Répartition des situations dangereuses de priorité 1 par phase du projet .....	250
Figure 48. Diagramme de Kiviat de la cartographie des risques initiaux par phase du système .....	251
Figure 49. Diagramme de Kiviat de la cartographie des risques résiduels par phase du système .....	252
Figure 50. Diagramme de Farmer de la répartition des risques initiaux moyens par phase du système .....	253
Figure 51. Diagramme de Farmer de la Répartition des risques résiduels moyens par phase du système .....	254
Figure 52. Étapes du processus de transition vers les énergies renouvelables en Tunisie	279

# LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1. Revue de littérature sur les risques d'investissement dans les projets d'énergies renouvelables .....	103
Tableau 2. AFEX 2015 pour les énergies renouvelables.....	160
Tableau 3. Projets de la STEG à l'horizon 2020 .....	163
Tableau 4. Investissements cumulés selon les horizons et les filières dans le cadre du PST (M€).....	166
Tableau 5. Financement du PST (M€) .....	166
Tableau 6. Economies cumulées d'énergie primaire dues au PST (Ktep) .....	166
Tableau 7. Evaluation des économies d'énergies et des émissions évitées de CO <sub>2</sub> .....	176
Tableau 8. La répartition régionale des installateurs .....	178
Tableau 9. Progrès réalisé dans la technologie CSP à partir de 2009 .....	192
Tableau 10. Les caractéristiques du projet « TuNur ».....	203
Tableau 11. Les phases et les sous phases de l'étude de faisabilité .....	221
Tableau 12. Les phases et les sous phases de la préparation.....	222
Tableau 13. Les phases et les sous phases de l'exécution .....	223
Tableau 14. Les phases et les sous phases de la mise en service .....	224
Tableau 15. La cartographie des dangers .....	230
Tableau 16. Echelle des interactions dangers/système.....	233
Tableau 17. Extrait de la cartographie des situations dangereuses .....	235
Tableau 18. Tableau de cohérence .....	235
Tableau 19. Echelle de gravité du système étudié.....	237
Tableau 20. Echelle de vraisemblance .....	237
Tableau 21. Référentiel d'acceptabilité des risques .....	238
Tableau 22. Extrait de l'AGR Scénarios.....	239
Tableau 23. Matrice de criticité des risques initiaux .....	242
Tableau 24. Matrice de criticité des risques résiduels .....	243
Tableau 25. Répartition des situations dangereuses et des scénarios par danger.....	245
Tableau 26. Répartition des situations dangereuses et des scénarios par phase du projet	250

# LISTE DES ACRONYMES ET ABREVIATIONS

<b>ADEME</b>	Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Energie
<b>AFEX</b>	<i>Arab Future Energy Index</i>
<b>AGR</b>	Analyse Globale des Risques
<b>AMDEC</b>	Analyse des Modes de Défaillance, de leurs Effets et de leur Criticité
<b>ANME</b>	Agence Nationale pour la Maîtrise de l'Energie
<b>APR</b>	Analyse Préliminaire des Risques
<b>CCNUCC</b>	Convention Cadre des Nations Unies sur les Changements Climatiques
<b>CES</b>	Chauffe-eau Solaire
<b>CO<sub>2</sub></b>	Dioxyde de Carbone
<b>COP21</b>	21 <sup>ème</sup> Conférence des parties à la convention cadre des Nations unies sur les changements climatiques
<b>CSP</b>	<i>Concentrating Solar Power</i> (solaire thermodynamique à concentration)
<b>ER</b>	Energies Renouvelables
<b>EU-MENA</b>	Europe, Moyen-Orient et Afrique du Nord
<b>FEM</b>	Fonds de l'Environnement Mondial
<b>FTE</b>	Fonds de Transition Energétique
<b>FTP</b>	Fonds des Technologies Propres
<b>GES</b>	Gaz à Effet de Serre
<b>GPL</b>	Gaz de pétrole liquéfié
<b>HACCP</b>	<i>Hazard Analysis of Critical Control Points</i>
<b>HAZOP</b>	<i>Hazard and Operability study</i>
<b>HVDC</b>	<i>High Voltage Direct Current</i>
<b>IDE</b>	Investissement Direct à l'Etranger
<b>IDN</b>	Irradiation Directe Normale
<b>IMRF</b>	Instruments de Management des Risques Financiers
<b>IPCC</b>	<i>Intergovernmental Panel on Climate Change</i>
<b>ISO</b>	<i>International Organization for Standardization</i> (Organisation internationale de normalisation)
<b>LCOE</b>	<i>Levelized Cost of Energy</i>
<b>MEDREC</b>	<i>Mediterranean Renewable Energy Center</i>

<b>MENA</b>	<i>Middle East and North Africa</i>
<b>MGB</b>	Modèle Généralisé de Bass
<b>NAMA</b>	<i>National Appropriate Mitigation Actions</i>
<b>NEI</b>	Nouvelle Economie Institutionnelle
<b>NIMBY</b>	<i>Not In My Back Yard</i>
<b>OCDE</b>	Organisation de Coopération et de Développement Economiques
<b>OECD</b>	<i>Organization of Economic Cooperation and Development</i>
<b>ONU</b>	Organisation des Nations Unies
<b>PED</b>	Pays en Développement
<b>PIB</b>	Produit Intérieur Brut
<b>PNUD</b>	Programme des Nations Unies pour le Développement
<b>PNUE</b>	Programme des Nations Unies pour l'Environnement
<b>PPP</b>	Partenariat Public Privé
<b>PROSOL</b>	Programme Solaire
<b>PSM</b>	Plan Solaire Méditerranéen
<b>PST</b>	Plan Solaire Tunisien
<b>PV</b>	Photovoltaïque
<b>REN21</b>	<i>Renewable Energy Policy Network for the 21<sup>st</sup> Century</i>
<b>R&amp;D</b>	Recherches et Développement
<b>RCREEE</b>	<i>Regional Center for Renewable Energy and Energy Efficiency</i>
<b>STEG</b>	Société Tunisienne de l'Electricité et du Gaz
<b>TVA</b>	Taxe sur la Valeur Ajoutée
<b>UE</b>	Union Européenne
<b>UGTT</b>	Union Générale Tunisienne du Travail
<b>UNEP</b>	<i>United Nations Environment Programme</i>
<b>VAN</b>	Valeur Actualisée Nette
<b>WCED</b>	<i>World Commission on Environment and Development</i>

## UNITES DE MESURE

<b>DT</b>	Dinar Tunisien
<b>GW</b>	Gigawatt
<b>GWc</b>	Gigawatt-crête
<b>Km</b>	Kilomètre
<b>KTCO<sub>2</sub></b>	Kilotonne de dioxyde de carbone
<b>KTep</b>	Kilotonne d'équivalent Pétrole
<b>KW</b>	Kilowatt
<b>KWc</b>	Kilowatt-crête
<b>KWh</b>	Kilowatt-heure
<b>M€</b>	Million d'Euros
<b>MDT</b>	Million de Dinars Tunisiens
<b>Mt</b>	Million de tonnes
<b>MTCO<sub>2</sub></b>	Million de Tonnes de Dioxyde de Carbone
<b>MTep</b>	Million de Tonnes d'équivalent Pétrole
<b>MW</b>	Mégawatt
<b>MWc</b>	Mégawatt-crête
<b>MWh</b>	Mégawatt-heure
<b>TCO<sub>2</sub></b>	Tonne de Dioxyde de Carbone
<b>TWh</b>	Térawatt-heure

## INTRODUCTION GENERALE

Toutes les activités humaines, notamment celles qui concourent au développement économique et social, font appel à l'énergie. En effet, le développement d'une société se traduit par la satisfaction croissante d'un certain nombre de besoins : alimentation, éducation, logement, loisirs, santé, transport, etc. Toutes ces activités nécessitent, à des degrés divers, une utilisation d'énergie finale sous différentes formes (carburants, électricité, etc.). Par conséquent, l'accès aux services énergétiques modernes est indispensable au développement économique et social.

Bien que les avantages et les atouts de l'énergie pour notre système économique soient importants et multiples, ce sont plutôt les dégâts causés par nos sociétés énergivores qui méritent le plus d'attention. En effet, selon le dernier rapport élaboré par *Renewable Energy Policy Network for the 21<sup>st</sup> Century* (REN21, 2015a, p.27), la consommation mondiale d'énergie finale est dominée par l'énergie d'origine fossile (le pétrole, le gaz naturel et le charbon) d'environ 78,3%, en 2013.

De ce fait, la demande énergétique est majoritairement couverte par le recours aux énergies fossiles qui sont les principales sources des gaz à effet de serre (GES). L'augmentation observée des concentrations de ces GES est la principale cause du réchauffement climatique [*Intergovernmental Panel on Climate Change* (IPCC), 2007]. Ces changements climatiques se manifestent par des cyclones avec des forces inédites, des canicules, des tempêtes de neige sans précédent, des inondations, etc. En effet, le problème environnemental le plus important lié à l'utilisation de l'énergie est le changement climatique (Dincer et Rosen, 1999). Selon IPCC (2007), la prévention contre les conséquences catastrophiques des changements climatiques nécessite la stabilisation de la concentration atmosphérique du dioxyde de carbone (CO<sub>2</sub>).

En plus des changements climatiques, la consommation mondiale d'énergie ne cesse d'augmenter avec des rythmes inquiétants. En effet, l'*International Energy Agency* (IEA, 2010a) prévoit un taux de croissance de la demande énergétique de 1,4% par an d'ici 2035. La croissance la plus rapide de la demande d'énergie est attendue, surtout dans les pays non membres de l'Organisation de Coopération et de Développement Economiques (OCDE), avec un taux prévu de 2,2% par an, en particulier en Chine et en Inde. Satisfaire cette demande, tout en respectant les stocks existants de ressources fossiles et surtout tout en respectant l'environnement et les engagements des pays lors des différentes conférences

sur le climat, devient la préoccupation de tous les pays développés (en particulier les pays de l'Union européenne et les États-Unis). Nous faisons face donc à un dilemme, d'un côté on doit diminuer la consommation des combustibles fossiles qui sont la principale source de GES et de l'autre côté on doit satisfaire le développement rapide de l'économie mondiale qui exige une croissance continue de la consommation d'énergie.

Ainsi, le défi que tous les pays sont appelés à relever consiste à mettre en œuvre une transition vers un système énergétique plus sûr et moins émetteur de CO<sub>2</sub> sans entraver le développement économique et social (IEA, 2007). La question qui se pose à ce stade est la suivante : **comment satisfaire la demande croissante en énergie finale tout en respectant l'environnement ?**

A partir des années 1980, il y a eu l'émergence du concept de développement durable qui est défini par le *World Commission on Environment and Development* (WCED, 1987, p.8) comme étant un développement qui "... *meets the needs of the present without compromising the ability of future generations to meet their own needs*". Par conséquent, une nouvelle version de la question précédente est apparue : **quel mix énergétique faut-il choisir pour suivre le chemin du développement durable ?**

La réponse à cette question paraît évidente : la transition vers les énergies renouvelables (ER) est le seul chemin à suivre et l'unique réponse à tous nos maux contemporains qui concernent l'environnement et le changement climatique. Bien que la solution soit évidente et facile à trouver, c'est plutôt la concrétisation de cette transition vers les ER qui reste difficile à réaliser.

Ainsi, avec l'apparition du concept de développement durable, un intérêt grandissant a été accordé au secteur des ER et plusieurs pays ont commencé à fixer des objectifs et des stratégies dans ce domaine. En effet, vu que les énergies fossiles ne répondent pas aux exigences du développement durable, il est donc conseillé de chercher une énergie de substitution qui soit propre, inépuisable et qui favorise l'accès à l'énergie pour tous. Cette énergie est offerte gratuitement par la nature : il s'agit des ER. Ces ressources renouvelables sont des sources d'énergie issues de phénomènes naturels provoqués par les astres, principalement le Soleil (rayonnement), mais aussi la Lune (marée) et la Terre (énergie géothermique). Les principales sources d'ER sont : l'hydraulique, la biomasse, l'éolien, la géothermie et le solaire. En effet, le problème d'épuisement des ressources fossiles, la lutte contre le réchauffement climatique et la volonté d'indépendance

énergétique font des ER une priorité politique et un enjeu fort du développement durable. Par conséquent, il y a eu une augmentation remarquable des capacités installées d'ER, à partir des années 1980. Cependant, le système énergétique mondial reste largement dominé par les combustibles fossiles.

Avec la crise économique de 2008, il y a eu l'apparition des concepts de « Nouveau Pacte Vert Mondial », « relance verte », « économie verte », etc. Toutes ces initiatives ont été présentées par les organisations internationales comme l'OCDE, le Programme des Nations Unies pour l'environnement (PNUE) et la Banque Mondiale. Ces initiatives, même si elles ont des appellations différentes, se basent sur un principe unique qui est le fait d'investir dans les secteurs « verts » pour relancer l'économie, après la crise économique, tout en suivant le chemin du développement durable.

La transition vers les ER est un élément primordial et crucial dans toutes ces stratégies (Omri, Chtourou et Bazin, 2015a). Par conséquent, le secteur des ER a été influencé positivement par la crise économique. En effet, il est parmi les rares secteurs qui ont résisté à la période de récession en enregistrant même un record, en 2011, avec un total d'investissement de 279 milliards de dollars dû surtout aux programmes de relance verte [United Nations Environment Programme, Frankfurt School of Finance and Management et Bloomberg New Energy Finance (UNEP, FSFM et BNEF), 2015].

Ainsi, la transition vers les ER a été motivée parfois pour se prémunir contre les chocs pétroliers, d'autres fois pour la réalisation d'un développement durable et récemment pour « la relance verte » de l'économie. Cependant, malgré les efforts fournis par les grandes organisations internationales et par certains pays développés et malgré la multiplication des Conférences sur le climat (de la Conférence de la Terre à Rio, en 1992, jusqu'à la 21<sup>ème</sup> Conférence des parties à la convention cadre des Nations unies sur les changements climatiques « COP21 », en 2015 à Paris), les réalisations faites dans le domaine des ER ne sont pas à la hauteur des attentes.

Bien que les raisons pour le changement de la trajectoire énergétique vers une autre sobre en carbone soient évidentes et les efforts soient importants, les résultats sont loin d'être satisfaisants puisque la part des ER dans le mix énergétique reste faible. Selon le rapport REN21 (2015a), la part des ER dans la production électrique mondiale a atteint 22,8% fin 2014. La part de l'hydroélectricité est de 16,6%, alors que la part des autres ER est de 6,2% (avec 3,1% la part de l'énergie éolienne). Il est clair que la part des ER (hors

hydraulique) dans la production de l'électricité, au niveau mondial, est très faible (6,2%). Cependant, certains pays ont atteint des niveaux très satisfaisants, en 2014, par exemple le Danemark avec une part de l'énergie éolienne de 39,1% et le Portugal avec une part de 27% (REN21, 2015a).<sup>1</sup>

Par conséquent, il est clair que plusieurs pays développés se sont engagés dans la diffusion à grande échelle des ER, mais les pays de la zone Moyen Orient et Afrique du Nord (*Middle East and North Africa* : MENA) sont restés, durant plusieurs décennies, à l'écart de ces réalisations. Cette situation est causée par deux principales raisons qui sont l'abondance des ressources fossiles, dans certains pays, et le manque des moyens financiers pour promouvoir les filières renouvelables, considérées comme coûteuses pour les finances publiques, dans d'autres pays. Néanmoins, la région MENA est l'une des régions les plus favorisées pour le déploiement à grande échelle des ER. En effet, cette région représente des caractéristiques géographiques exceptionnelles, notamment un ensoleillement intense, des précipitations faibles et l'existence des terres plates, inutilisées et qui ne sont pas loin des réseaux électriques et des routes. Ces facteurs géographiques favorables vont permettre de réaliser un rendement en Kilowatt (KW) installé très intéressant et meilleur que d'autres pays, ce qui permettra de compenser largement les coûts de transport du sud vers le nord de la Méditerranée.

La Tunisie est un des rares pays de la zone MENA qui a accordé, dès le milieu des années 1980, un intérêt considérable à l'utilisation des ER (dans le cadre de sa politique de maîtrise de l'énergie) comme étant un moyen de prévention contre le déficit énergétique qui était prévu pour le milieu des années 1990. En fait, l'évolution énergétique en Tunisie a été marquée, depuis l'année 2000, par un changement de statut de pays excédentaire en importateur net d'énergie. Face à cette situation, les ER qui sont des sources abondantes et non polluantes apparaissent comme une option indispensable, surtout que la Tunisie dispose d'un potentiel important de valorisation de l'énergie solaire et de l'énergie éolienne. Cependant, en dépit de ces ressources importantes et de la volonté de l'État de les exploiter, les ER ne représentent encore qu'une part faible de la demande d'énergie primaire. De ce fait, des moyens considérables sont déployés, ces dernières années, pour

---

<sup>1</sup> Ces deux pays ont fixé des objectifs ambitieux et ont appliqué des mécanismes d'incitation aux ER. Le Danemark a eu recours aux pris d'achat garantis, à la facturation nette et aux certificats d'ER négociables alors que le Portugal a eu recours aux normes de portefeuille d'ER, aux prix d'achat garantis et à la facturation nette.

généraliser leur utilisation et pour sensibiliser le public de la nécessité des ER aussi bien pour le développement économique et social que pour la préservation de l'environnement.

Il est à noter que la Tunisie a fait des progrès considérables dans le domaine de l'efficacité énergétique. Par contre, dans le domaine des ER, la Tunisie n'a pas atteint des résultats satisfaisants, surtout en la comparant avec des pays qui ont des caractéristiques économiques et géographiques semblables. Selon l'indice *Arab Future Energy Index* (AFEX 2015) élaboré par le centre régional pour les énergies renouvelables et l'efficacité énergétique (*Regional Center for Renewable Energy and Energy Efficiency* : RCREEE), notre pays est classé 6<sup>ème</sup>, loin derrière le Maroc, la Jordanie, les Émirats arabes unis, l'Égypte et la Palestine (RCREEE, 2015).

Ces dernières années, un effort remarquable a été déployé, dans les pays du Golf et au Maroc, pour promouvoir l'énergie solaire et il y a eu la construction de complexes solaires de grande taille, mais en Tunisie il n'y a pas eu des réalisations qui sont en harmonie avec le potentiel énorme de notre pays. Cette constatation nous amène à poser la question suivante : **quelles sont les barrières à la transition vers les ER en Tunisie ?** En d'autres termes, **quels sont les risques d'investissement dans le secteur des ER en Tunisie ?**

## 1. Objectif de la thèse et questions de recherche

**L'objectif principal de cette thèse est de déterminer les risques d'investissement dans le secteur des ER, en Tunisie, et d'en déduire les stratégies et les mécanismes à adopter pour accélérer le processus de transition vers les ER.** Nous allons donc essayer de répondre, tout au long de cette thèse, aux questions suivantes :

- **Question 1** : Pourquoi la transition vers les ER est-elle nécessaire ?
- **Question 2** : Dans quelles mesures la crise économique est une opportunité pour accélérer l'investissement dans le secteur des ER ?
- **Question 3** : Quelles sont les approches d'analyse de la transition vers les ER ?
- **Question 4** : Quelles sont les barrières qui entravent cette transition ?
- **Question 5** : Quels sont les risques auxquels les investisseurs dans le secteur des ER sont-ils confrontés ?
- **Question 6** : Quels sont les risques et les barrières qui ralentissent le processus de transition vers les ER en Tunisie ?

- **Question 7** : Quels sont les instruments à adopter pour accélérer la transition énergétique vers les ER en Tunisie ?
- **Question 8** : Quelles stratégies et quelles structures de gouvernance pourraient-elles faciliter le développement à grande échelle des ER en Tunisie ?

## 2. Approche méthodologique

Dans cette thèse, nous allons opter pour une approche innovante d'analyse de la transition vers les ER qui est **l'approche du management du risque**. Nous allons détailler, tout d'abord, toutes les approches de transition vers les ER, notamment l'approche de la courbe d'expérience, l'approche de diffusion de l'innovation, l'approche de l'économie de l'environnement, l'approche de l'économie institutionnelle et l'approche psychosociale. Nous allons analyser en détails les apports et les limites de ces approches et nous allons en tirer des recommandations qui vont nous être utiles dans la suite de la recherche. Ainsi, nous allons recourir à une approche interdisciplinaire du management du risque, tout en essayant de bénéficier des apports des autres approches.

Le choix de cette approche émane de deux principaux constats. En premier lieu, les autres approches traitent chacune un seul aspect de la transition vers les ER (aspect technologique, aspect économique, aspect social, etc.). En second lieu, il y a très peu d'études empiriques qui ont procédé à une analyse rigoureuse des risques dans le secteur des ER.

Bien que les fondements de cette thèse soient basés sur l'analyse économique, elle privilégie, plutôt, une approche interdisciplinaire. En effet, nous combinons les approches économiques et l'approche du management des risques afin d'analyser les barrières à la transition vers les ER et les stratégies à adopter. Dans le domaine des sciences économiques, notre travail s'articule autour de l'économie de l'énergie qui est par nature un domaine interdisciplinaire. Par ailleurs, cette thèse fournit un cadre d'analyse qui oriente la prise de décision par les "*energy policy-makers*" dans le domaine de la transition vers les ER, dans les pays en développement (PED), où ce processus se heurte à plusieurs barrières.

Nous allons procéder à une étude de cas d'un projet d'ER en Tunisie, en utilisant la méthode d'Analyse Globale des Risques (AGR), afin de déterminer la cartographie des risques ainsi que les moyens pour les réduire. Il s'agit d'une méthode de nature analytique, inductive (*bottom up*), semi-quantitative et un outil d'analyse *a priori*. En effet, elle permet

d'identifier, dès le début d'une activité ou d'un projet, tous les risques potentiels et les moyens pour les réduire. Le logiciel utilisé pour mener à terme cette analyse est la version « 1.06 de StatCart AGR ». Cette version permet d'avoir la cartographie des risques moyens initiaux afin de déterminer les dangers et les éléments du système les plus critiques et d'hierarchiser les actions de maîtrise des risques. Après avoir déterminé la liste des risques majeurs, nous allons détailler les stratégies et les mécanismes à utiliser, en Tunisie, afin d'accélérer le processus de diffusion des ER. Enfin, nous allons essayer de présenter un cadre d'analyse qui permet de déterminer la structure de gouvernance convenable pour la transition vers les ER en Tunisie.

### **3. Structure de la thèse**

La thèse est structurée sous la forme de deux parties et chaque partie contient 4 chapitres. **La première partie** s'intéresse à tous les aspects théoriques de la transition vers les ER. Elle contient une revue de littérature sur l'impact des ER sur le développement durable et sur « la relance verte » de l'économie. Elle fait le lien aussi entre les approches de la transition vers les ER, les barrières à cette transition et l'importance de l'approche du management des risques pour traiter ces barrières.

**Le chapitre 1** est consacré à la nécessité de la transition vers les ER pour le développement durable et pour « la relance verte » de l'économie. Il permet de répondre aux deux premières questions et il est organisé sous la forme de deux sections comme suit :

- La première section porte sur la nécessité des ER pour le développement durable. Elle contient, tout d'abord, les définitions des concepts d'ER et de développement durable, tout en expliquant les différents types d'ER ainsi que les différentes dimensions et approches du développement durable. Enfin, elle présente une revue de littérature sur l'impact des ER sur les dimensions environnementale, sociale et économique du développement durable.

- La seconde section aborde la nécessité des ER pour « la relance verte » de l'économie. Nous expliquons donc, tout d'abord, le contexte global de double crise (crise économique et crise climatique). Ensuite, nous présentons les principales réponses faites par les organisations internationales (OCDE, Banque Mondiale et PNUE) face à la double crise. Enfin, les forces motrices qui font du développement des ER un élément essentiel de la reprise verte sont présentées.

**Le chapitre 2** détaille les approches de la transition vers les ER. Il apporte donc des éléments de réponse à la question 3. Dans ce chapitre, nous ne contentons pas de citer les

différentes approches qui ont traité le processus de transition vers les ER. Nous procédons, plutôt, à une analyse rigoureuse de ces approches, tout en mettant l'accent sur leurs limites et leurs principaux apports afin d'en tirer des recommandations qui vont être utiles dans la suite de la recherche. Dans le cadre de ce travail de recherche, nous optons pour une classification des approches qui est différente de toutes les classifications déjà faites et qui englobe la quasi-totalité des études existantes : approche de la courbe d'expérience, approche de diffusion de l'innovation, approche basée sur l'économie de l'environnement, approche basée sur l'économie institutionnelle et approche psychosociale. Ce chapitre est divisé en deux sections.

- La première section est consacrée aux approches technologiques, notamment celle de la courbe d'expérience et celle basée sur le modèle de diffusion de l'innovation.

- La seconde section traite, plutôt, les approches axées sur l'étude des aspects sociales, économiques et institutionnels de la transition vers les ER. Elle met l'accent donc sur les approches de l'économie de l'environnement, de l'économie institutionnelle ainsi que l'approche psychosociale.

**Le chapitre 3** analyse les barrières à la transition vers les ER. Il donne des éléments de réponses aux questions 4 et 5. Afin de répondre à ces questions, ce chapitre est organisé sous la forme de deux sections :

- La première section s'intéresse au concept de « verrouillage technologique » (*technological lock-in*) et les explications données à l'existence de cet effet qui sont : l'existence de paradigmes technologiques et les rendements croissants d'adoption. En effet, plusieurs études affirment que le système énergétique actuel se trouve verrouillé en faveur des énergies fossiles. De ce fait, l'économie reste dans un équilibre dans lequel les technologies à fortes émissions de CO<sub>2</sub> dominent le marché, même si elles sont plus polluantes que leurs concurrentes qui sont les ER. Ainsi, il existe des structures techniques, juridiques et institutionnelles qui empêchent l'adoption des nouvelles technologies.

- La seconde section est consacrée aux risques d'investissements dans les projets d'ER comme une manifestation du « verrouillage au carbone » et une barrière à la transition vers les ER. Nous expliquons pourquoi l'investissement dans le secteur des ER est une perspective risquée, tout en détaillant les principales catégories de risques et de barrières qui entravent l'investissement dans ce secteur.

**Le chapitre 4** aborde les concepts de risque et d'incertitude et l'approche du management des risques. L'objectif de ce chapitre est d'expliquer l'approche du management des risques et son application dans le domaine des ER. Il est organisé sous la forme de deux sections :

- La première section présente les différentes définitions données aux concepts de risque et d'incertitude et à l'approche du management des risques, tout en examinant l'historique de son évolution ainsi que son processus. En effet, le management des risques permet de trouver des réponses aux questions suivantes : quels sont les risques de l'activité ? Comment diminuer ces risques pour les rendre tolérables ou acceptables ? Comment gérer les risques résiduels pour garantir leur acceptabilité dans le temps ?

- La seconde section donne des justifications à l'application de l'approche du management des risques dans l'analyse de la transition vers les ER. Nous analysons donc les limites des autres approches et les différentes méthodes d'analyse de risques pour expliquer l'intérêt du recours à l'approche du management des risques et les avantages de la méthode AGR qui va être appliquée. En effet, il y a de l'incertitude et des risques de différents types qui entravent le processus de diffusion des ER ce qui justifie l'approche du management des risques.

**La seconde partie** contient une analyse de la transition vers les ER, en Tunisie, en mettant l'accent sur le contexte actuel, les perspectives, les risques d'investissement et les stratégies à adopter.

**Le chapitre 5** examine d'une manière détaillée le contexte des ER en Tunisie. En effet, nous mettons l'accent sur les principales caractéristiques du contexte énergétique, en général, et le secteur des ER, en particulier, tout en détaillant les réalisations faites ainsi que les orientations stratégiques. Ainsi, ce chapitre est organisé de la manière suivante :

- La première section présente les principaux défis rencontrés dans le secteur énergétique tunisien qui font de la transition vers les ER une priorité dans les années à venir. Ensuite, nous mettons l'accent sur la réalité du secteur des ER, notamment en matière de potentiel, de réalisations faites et d'objectifs à atteindre.

- La seconde section met l'accent sur l'expérience tunisienne dans le domaine du chauffage solaire en détaillant les caractéristiques du projet PROSOL (Programme Solaire) ainsi que les résultats atteints.

**Le chapitre 6** est consacré à l'explication de la technologie de l'énergie solaire thermodynamique à concentration, souvent citée en anglais *Concentrating Solar Power* (CSP), et à l'étude de cas relative au projet « TuNur » qui aura lieu au sud de la Tunisie. Il contient donc deux sections :

- La première section explique la technologie CSP qui est encore peu connue, en mettant l'accent sur son potentiel énorme dans la région MENA, son principe de fonctionnement ainsi que les différents types de technologies CSP et leurs atouts.
- La seconde section analyse en détails un projet de centrale solaire CSP qui va avoir lieu au sud de la Tunisie, il s'agit du projet « TuNur ».

**Le chapitre 7** s'intéresse à l'explication de la démarche de la méthode AGR et son application pour le cas du projet « TuNur » afin de dégager tous les risques qui entravent la réalisation de ce projet.

- La première section explique la nature, les objectifs et le processus de l'AGR pour passer, ensuite, à une description détaillée du système étudié qui est le projet « TuNur ».
- La seconde section détaille toutes les étapes de cette méthode et son application au projet « TuNur ». Nous commençons donc par la cartographie des dangers, la cartographie des situations dangereuses et enfin l'élaboration de l'AGR scénario qui contient tous les scénarios de risques susceptibles d'affecter le projet étudié.

**Le chapitre 8** contient une analyse détaillée des résultats de l'AGR qui vont servir de base pour des recommandations en termes de politiques énergétiques. Ce chapitre donne des réponses aux questions 6, 7 et 8. L'objectif de ce chapitre est de fournir un cadre conceptuel qui peut servir comme base pour les stratégies de transition vers les ER, en Tunisie, et dans les PED en général. Ce chapitre est organisé sous la forme de deux sections.

- La première section est consacrée, tout d'abord, à l'interprétation des résultats de la méthode AGR, en mettant l'accent sur l'analyse et l'évaluation par danger générique et par phase du projet « TuNur ». Ensuite, nous déterminons la liste des risques majeurs ainsi que les causes de ces risques et les actions proposées pour les réduire.
- La seconde section porte sur les principales recommandations tirées des résultats de l'AGR et sur l'explication de la forme de gouvernance la plus adéquate à chaque phase de développement des ER en Tunisie.

Notre principal apport est de proposer l'approche de management du risque pour assurer la transition vers les ER et d'évoluer, ensuite, vers une approche plus globale de gouvernance du risque pour une meilleure diffusion des ER, en Tunisie et dans les PED en général. En fait, notre étude permet de constater que le processus de transition vers les ER est un processus long, risqué et compliqué et qui fait intervenir des « porteurs d'enjeux » avec des perceptions et des attitudes différentes et des intérêts souvent contradictoires. Ceci nécessite le passage d'une approche du management des risques vers une approche plus globale de gouvernance des risques.

**PARTIE 1. ANALYSE THEORIQUE DE LA  
TRANSITION VERS LES ENERGIES  
RENOUVELABLES**

# Chapitre 1. La transition vers les énergies renouvelables : avantages et opportunités

## Introduction

L'intérêt pour les ER est relativement récent. Avant le choc pétrolier de 1973, aucun pays développé ne s'intéressait aux énergies alternatives. Chaque pays exploitait les sources d'énergies dont il disposait facilement : le charbon en Grande Bretagne et le pétrole en France (qui est essentiellement importé d'Afrique). Ce n'est qu'à partir du moment où le prix des hydrocarbures a quadruplé en quelques mois, que les pays développés ont pensé à se tourner vers les énergies alternatives.

Les ER servent à répondre aux mêmes besoins que les autres formes d'énergie. En effet, elles peuvent être utilisées pour générer de l'électricité, dans ce cas elles peuvent alimenter des exploitations agricoles, des habitations et des immeubles. On les utilise aussi pour le chauffage, l'électricité, le transport et l'éclairage. Les ER offrent aussi aux territoires ruraux l'opportunité d'accès à une source d'énergie qui est propre et décentralisée.

Ces dernières années, la transition vers un système énergétique basé sur les ER a été motivée par deux principales raisons. La première raison est liée au souci grandissant d'atteindre un développement durable. La seconde raison concerne l'émergence des concepts de « la reprise verte » et de « l'économie verte » qui ont pris de l'ampleur avec la crise économique de 2008 et ses conséquences qui sont encore présentes de nos jours. En effet, la crise économique de 2008, qui est la plus grave depuis celle de 1929, a été causée par le marché des *subprimes* aux États-Unis. Cette crise a été caractérisée par une chute de la demande globale qui est accompagnée par une montée des taux de chômage partout dans le monde. Afin de sortir de cette crise, plusieurs économistes ont suggéré le recours à l'approche de Keynes qui consiste à relancer la demande globale en augmentant l'investissement et la consommation nationale. Ainsi, l'objectif de « la relance verte » est de permettre, à la fois, la relance de l'économie globale, la création d'emplois « verts » et la protection de l'environnement. Les projets d'ER présentent l'une des principales composantes de « la relance verte » puisqu'ils exigent beaucoup de main d'œuvre « verte » et n'émettent pas les GES.

Ce chapitre essaie de répondre aux questions suivantes : pourquoi la transition vers les ER est-elle nécessaire ? Et dans quelles mesures la crise économique est une opportunité pour accélérer l'investissement dans le secteur des ER ?

Afin de répondre à ces questions, ce chapitre sera organisé sous la forme de deux sections. Dans la première section, nous allons mettre l'accent sur la nécessité des ER pour le développement durable. Pour ce faire, nous allons expliquer les différents types d'ER ainsi que les différentes dimensions et approches du développement durable. Ensuite, nous allons présenter une revue de littérature sur l'impact des ER sur les dimensions environnementale, sociale et économique du développement durable.

Dans la seconde section, nous allons expliquer la nécessité des ER pour « la relance verte » de l'économie. Tout d'abord, nous allons analyser le contexte global de double crise, tout en présentant les principales réponses faites par les organisations internationales (OCDE, Banque Mondiale et PNUE) face à la double crise. Ensuite, les forces motrices qui font du développement des ER un élément essentiel de « la reprise verte » seront présentées. Enfin, nous mettrons l'accent sur « la relance verte », en Chine, appelée par certains économistes « la révolution verte » qui est un phénomène très remarquable ces dernières années.

## **Section 1. La transition vers les énergies renouvelables pour un développement durable**

L'utilisation intensive de l'énergie fossile a provoqué des conséquences néfastes sur l'environnement. La conséquence la plus dangereuse et la plus globale est le phénomène du changement climatique (Dincer, 1999 ; Goldemberg, 2006). En effet, l'énergie consommée dans le monde est en grande partie basée sur les combustibles fossiles (le pétrole, le gaz naturel et le charbon) qui émettent les GES. Ces gaz sont parmi les principales causes du réchauffement climatique (Stern, 2006 ; IPCC, 2007).

Le phénomène du réchauffement de la planète a attiré plus d'attention avec l'émergence de la notion de développement durable, depuis la fin des années 1980. Il est clair que le changement climatique et ses conséquences désastreuses sont un obstacle à la réalisation du développement durable. En effet, le système énergétique actuel qui est basé sur les ressources fossiles est incompatible avec la réalisation des objectifs du développement durable (Midilli, Dincer et Ay, 2006). Face à cette situation, l'utilisation des ER n'est plus un choix mais plutôt une nécessité.

L'objectif principal de cette section est de montrer l'importance de la transition vers les ER pour suivre le chemin du développement durable. Cette section commence par une présentation des ER et de la notion de développement durable en mettant l'accent sur ses principales approches et dimensions. Après cette présentation, une revue de la littérature sur la contribution des ER au développement durable sera fournie.

## **1. Les énergies renouvelables**

### **1.1. Définition**

Les ER sont des formes d'énergie qui proviennent d'une source renouvelable, c'est-à-dire une source qui se renouvelle assez rapidement de telle sorte que l'utilisation actuelle n'ait pas d'impact sur la disponibilité future. Elles présentent des énergies de flux puisqu'elles se régénèrent d'une manière permanente (les flux solaires, le vent, etc.). Par conséquent, elles ont des caractéristiques différentes des énergies fossiles qui sont plutôt des énergies de stock.

La notion d'ER est souvent confondue avec celle d'énergie propre. Or, même si une énergie peut être à la fois renouvelable et propre, toutes les ER ne sont pas nécessairement propres. Mais, généralement les ER n'ont que peu d'impacts négatifs sur l'environnement. En particulier, leur exploitation ne donne pas lieu à des émissions de GES. Ainsi, elles sont l'un des facteurs de lutte contre le changement climatique. En plus, ces énergies présentent un potentiel très important pour la production de l'électricité à grande échelle.

Avant les années 1990, les ER étaient surtout utilisées pour alimenter des sites isolés (les montagnes, les zones désertiques, les zones insulaires, etc.). Suite à la signature du Protocole de Kyoto, les ER ont été conçues comme un moyen de lutte contre le réchauffement climatique. En effet, les technologies d'ER sont de plus en plus prises en considération pour la réalisation d'un développement durable. En Europe et aux États-Unis, elles suscitent un intérêt remarquable puisqu'elles offrent des avantages aussi bien économiques que sociaux et environnementaux.

D'une façon générale, les technologies d'ER sont des modes de production d'énergie qui utilisent des forces ou des ressources dont les stocks sont illimités. Ces sources renouvelables permettent aux pays d'alimenter les zones isolées en électricité, de produire de l'électricité raccordée au réseau et de réaliser leurs objectifs de diminution de GES.

Les principales sources d'ER sont : le solaire, l'éolien, l'hydraulique, la biomasse et la géothermie.

## **1.2. Les principales sources d'énergies renouvelables**

### **1.2.1. L'énergie solaire**

Le soleil est la source principale de l'énergie utilisée puisque, en plus de son action de réchauffement direct, il a des impacts sur le vent, les marées et même les ressources fossiles. Il existe différents procédés qui permettent d'exploiter l'énergie solaire. L'énergie solaire passive, par exemple, est utilisée comme source d'énergie dans l'architecture. Les techniques passives visent à exploiter l'énergie solaire au moyen de grandes fenêtres pour bénéficier au maximum du rayonnement solaire ou de murs qui emmagasinent la chaleur. On obtient donc des maisons solaires passives totalement optimisées d'un point de vue thermique.

L'énergie solaire peut être captée et transformée en chaleur ou en électricité grâce à des capteurs adaptés ou des miroirs. En effet, il existe trois types de technologies d'énergie solaire : l'énergie solaire photovoltaïque (PV), l'énergie solaire thermique basse température et l'énergie solaire thermique haute température. L'énergie solaire PV est utilisée pour la fourniture d'électricité. L'énergie solaire thermique basse température ne produit pas de l'électricité mais de la chaleur, cela permet d'alimenter les chauffe-eau solaires (CES). En ce qui concerne l'énergie solaire thermique haute température, il s'agit de la technologie CSP qui permet de produire de l'électricité à grande échelle. La durée d'ensoleillement, l'irradiation directe normale (IDN), la latitude, l'altitude et la couverture nuageuse sont les principaux facteurs qui doivent être pris en considération dans le cas d'une installation solaire.

### **1.2.2. L'énergie éolienne**

Le principe de l'énergie éolienne est vieux comme les moulins à vent. En effet, la force du vent est utilisée, depuis longtemps, pour moudre le blé et pomper l'eau. Au cours des dernières décennies, ce système a été adopté à la production de l'électricité. Ainsi, des milliers d'éoliennes sont en fonctionnement, de nos jours. Il existe deux principaux types d'éoliennes : les aérogénérateurs domestiques de faible puissance qui fournissent de l'électricité pour des besoins individuels et les éoliennes de grandes puissances qui sont raccordées aux réseaux nationaux.

Plusieurs raisons incitent les pays, à travers le monde, à s'orienter vers cette énergie. Economiquement, c'est une énergie rentable puisque le coût de revient du Kilowatt-heure (KWh) éolien dans des sites bien ventés est de plus en plus proche de celui des énergies fossiles. Les principaux facteurs qui déterminent la viabilité économique d'une éolienne sont les caractéristiques des pales, le rendement du générateur et surtout la vitesse moyenne du vent.

### **1.2.3. L'énergie hydraulique**

Au XX<sup>e</sup> siècle, l'exploitation de la force hydraulique a pris un essor spectaculaire à travers le monde et elle parvient, de nos jours, à fournir une part considérable de l'électricité mondiale. Son principe ressemble à celui de l'énergie éolienne. Cependant, ce n'est plus le vent qui fait tourner une turbine, mais c'est plutôt l'énergie mécanique générée par la chute de l'eau qui fait tourner une turbine liée à un alternateur ce qui permet la transformation de l'énergie mécanique en énergie électrique.

Les principaux facteurs qui déterminent la quantité d'électricité générée par une installation hydraulique sont la hauteur de la chute de l'eau et le débit de l'eau utilisée. Le principal avantage de ce type de technologie d'ER est la longue durée de vie de l'installation et le coût faible par rapport à d'autres technologies plus modernes et plus compliquées.

### **1.2.4. L'énergie géothermique**

L'exploitation de la chaleur qui jaillit par endroits de la terre (sources chaudes, geysers, manifestations volcaniques) remonte seulement au XIX<sup>e</sup> siècle. L'idée principale derrière le développement de cette technologie est d'exploiter l'énergie géothermique emmagasinée dans le sol afin de l'utiliser pour générer de l'électricité ou directement pour les besoins de chauffage.

Par rapport à d'autres sources d'ER, la géothermie présente l'avantage de ne pas dépendre des conditions atmosphériques (pluie, soleil, vent, etc.). En plus, les gisements géothermiques ont une durée de vie de plusieurs dizaines d'années et les installations qui utilisent la géothermie ne polluent pas l'atmosphère. La cogénération, c'est-à-dire la production de l'électricité en même temps que la chaleur, peut encore augmenter l'intérêt de la géothermie.

### 1.2.5. La biomasse

La biomasse est une source d'ER à condition de bien gérer les bois. Les techniques qui permettent l'exploitation énergétique de la biomasse sont multiples, mais les principales utilisations sont au nombre de trois :

- Le bois énergie : la biomasse brûlée permet la production de l'énergie grâce à la combustion dans une chaudière.
- Le biogaz : en se décomposant, sous l'effet des bactéries, certains déchets produisent du biogaz. Ce gaz est en majorité composé de méthane utilisable, une fois épuré, pour alimenter des chaudières ou des véhicules fonctionnant au Gaz Naturel Véhicule (GNV).
- Les biocarburants : les cultures dites énergétiques telles que la betterave, la canne à sucre et le soja ainsi que les huiles végétales recyclées sont utilisées dans plusieurs pays pour produire les biocarburants. On peut citer le cas du Brésil par exemple, où l'éthanol est très utilisé dans le transport.

## 2. Le concept de développement durable

Le développement durable est un processus qui englobe à la fois le développement économique, la préservation de l'environnement et le respect de l'égalité entre les générations présentes et futures et au sein de la même génération. Contrairement à ce que l'on croit souvent, le développement durable ne se limite pas à une prise de conscience de la protection de l'environnement, mais il vise plutôt à établir le meilleur équilibre possible entre les dimensions économique, sociale et environnementale.

La définition la plus connue et la plus citée du développement durable a été donnée, en 1987, par le rapport Brundtland. Depuis ce fameux rapport, une variété de définitions du développement durable et de la durabilité est apparue dans la littérature (Barbier, 1987 ; Goodland et Ledec, 1987 ; Markandya et Pearce, 1988 ; Glavic et Lukman, 2007). Une définition récente est donnée par Glavic et Lukman (2007, p.1884) : *“Sustainable development emphasizes the evolution of human society from the responsible economic point of view, in accordance with environmental and natural processes”*<sup>2</sup>.

---

<sup>2</sup> « Le développement durable met l'accent sur l'évolution de la société d'un point de vue économique responsable, conformément aux procédures environnementales et naturelles » (trad.Auteur).

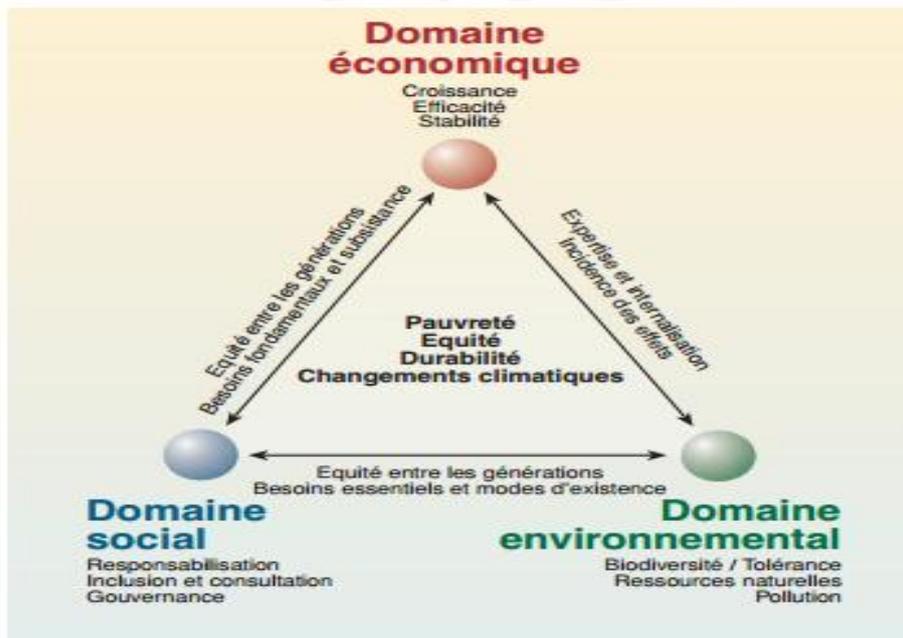
Depuis la popularisation de la notion de développement durable par la Commission mondiale sur l'environnement et le développement en 1987, ce concept est devenu la préoccupation des scientifiques des différentes disciplines (Costanza et Daly, 1992 ; Opschoor et van der Straaten, 1993 ; Beckerman, 1994 ; Osofsky, 2003).

Plusieurs organisations internationales telles que la Banque mondiale (Pezzey, 1992 ; Soubbotina, 2004) et *l'Organization of Economic Cooperation and Development* (OECD, 2001 ; 2006 ; 2007 ; 2010) ont aussi accordé une importance primordiale à ce concept. En plus, de nombreuses conférences internationales (la Conférence des Nations unies sur l'environnement et le développement en 1992, le Sommet mondial sur le développement durable en 2002 et la Conférence des Nations unies sur le développement durable en 2012) ont été organisées pour vulgariser ce concept et réunir le plus grand nombre d'experts.

Il est clair que la littérature qui traite ce concept est en augmentation continue (Daly, 1990 ; 1996 ; Chichilnisky, 1996 ; 1997 ; Howarth, 1997 ; Bossel, 1999 ; Munasinghe, 2001 ; Sneddon, Howarth et Norgaard, 2006 ; Martinet et Doyen, 2007 ; Ayres, 2008 ; Mauerhofer, 2008 ; Sedlacko et Gjoksi, 2009 ; Baumgärtner et Quaas, 2010). Bien que la littérature et les accords internationaux traitant le concept de développement durable soient abondants, ce concept reste encore contesté, ambigu et contenant plusieurs facettes (Lele, 1991 ; Dobson, 1996 ; Jacobs, 1999). Ainsi, il y a un grand défi à relever pour donner à cette notion un contenu à la fois cohérent et opérationnel. Osofsky (2003) a tenté d'expliquer les raisons de l'ambiguïté conceptuelle de ce terme.

Il faut souligner qu'il n'existe pas encore une définition unique et universellement acceptable du développement durable (Munasinghe, 2001 ; Sedlacko et Gjoksi, 2009), mais il y a un large consensus sur les principales dimensions du développement durable qui sont les dimensions environnementale, sociale et économique (Munasinghe, 1993 ; Dyllick et Hockerts, 2002). L'objectif du développement durable est de concilier l'efficacité économique, le progrès social et la préservation de l'écosystème. Ainsi, une stratégie de développement durable consiste à gérer le compromis nécessaire entre ces trois dimensions sans négliger les dimensions politique et institutionnelle qui sont également au cœur de ce concept. Il existe de nombreuses interprétations des interrelations entre ces trois dimensions, pour plus de détails voir Mauerhofer (2008).

Figure 1. Les éléments clés du développement durable et leurs interactions



Source : IPCC (2001, p.133)

L'IPCC (2001) représente le concept de développement durable en utilisant un triangle (Figure 1). La dimension économique est axée essentiellement sur l'amélioration du bien-être humain, notamment par l'augmentation de la production et de la consommation des biens et des services. La dimension environnementale, quant à elle, est axée sur la protection de l'intégrité des écosystèmes et de la biodiversité. Enfin, la dimension sociale est axée sur le renforcement des rapports humains et la bonne gouvernance. Les liens les plus importants entre ces trois dimensions sont indiqués le long des côtés du triangle. A l'intérieur du triangle, se situent des questions très importantes qui sont en interaction avec les trois dimensions, il s'agit de la pauvreté, de l'équité, de la durabilité et des changements climatiques. Cette figure est couramment utilisée, mais elle est également critiquée pour le fait d'indiquer une équité entre les trois dimensions du développement durable et de ne pas montrer clairement les interrelations (Mauerhofer, 2008).

Le développement durable est traité selon deux principales approches qui sont : la durabilité forte et la durabilité faible. La principale différence entre ces deux approches est relative à la substituabilité entre les ressources naturelles et le capital fabriqué par l'homme (Neumayer, 2010).

La durabilité faible, qui est défendue par les économistes néoclassiques, préconise la substituabilité entre le capital naturel et le capital fabriqué par l'homme. Elle est basée sur les travaux de Solow (1974). En fait, selon les économistes néoclassiques, la durabilité est définie comme le maintien dans le temps du niveau du bien-être global dans la société. Ainsi, le stock de capital doit rester intact d'une génération à l'autre afin de maintenir un bien-être des générations futures qui doit être au moins égal à celui des générations présentes (Stiglitz, 1974 ; Pearce et Atkinson, 1993 ; Solow, 1993 ; Weitzman, 1997 ; 1999).

Par conséquent, la réduction du capital naturel (par exemple, l'utilisation d'une ressource épuisable) peut être compensée par une augmentation du capital fabriqué de la même valeur, ce qui fait que le stock de capital reste constant et il y aura la possibilité de créer, à l'avenir, au moins autant de biens et services. Il y a donc un échange qui se déroule dans le temps : la génération actuelle consomme le capital naturel, mais en retour elle lègue aux générations futures une plus grande capacité de production sous la forme de stocks de matériels, de connaissances et de compétences.

Hartwick (1977) a suggéré la politique d'investissement qui permettrait d'atteindre la durabilité. En fait, la règle de Hartwick stipule l'investissement, à chaque date, de la rente qui provient de l'exploitation du capital naturel dans le capital physique.

En ce qui concerne les partisans de l'économie écologique, ils soutiennent plutôt l'idée de la durabilité forte. Le paradigme de la durabilité forte doit beaucoup au travail pionnier de Daly (1992 ; 1996). Cette approche est basée sur l'hypothèse de la complémentarité entre le capital naturel et le capital fabriqué par l'homme (Neumayer, 2010). Ainsi, il est nécessaire de maintenir, au fil du temps, un stock de « capital naturel critique » qui est essentiel pour le bien-être des générations futures (Daly et Cobb, 1989 ; Pearce, Markandya et Barbier, 1989 ; Brekke, 1997). En fait, certaines composantes de l'environnement sont uniques et fournissent des services qui ne peuvent pas être remplacés par des capitaux fabriqués par l'homme.

De nos jours, le terme de durabilité est associé à toutes les préoccupations de la vie moderne. En effet, nous parlons de la durabilité sociale, de la durabilité financière, des emplois durables, des villes durables, des sociétés durables, etc. Cette constatation a amené Daly (1996, p.9) à écrire, avec ironie, dans son célèbre ouvrage *“Beyond Growth, the*

*Economics of Sustainable Development*”: “We expected any day to hear about ‘sustainable sustainability’”<sup>3</sup>.

### **3. L’impact des énergies renouvelables sur le développement durable : un aperçu de la littérature**

#### **3.1. La littérature sur la contribution des énergies renouvelables à la réduction des émissions de GES**

Il est bien connu que le changement climatique est dû principalement aux émissions de CO<sub>2</sub> qui sont émises par l’énergie conventionnelle. Selon *United Nations Department of Economic and Social Affairs* (UN/DESA, 2009), l’énergie est essentielle au développement économique et les ER sont essentielles pour un avenir sans changement climatique. Ainsi, une conversion rapide de l’utilisation des combustibles fossiles vers les ER n’est plus un choix, mais une question urgente pour atteindre la stabilité climatique. En effet, il y a un consensus entre les scientifiques qui stipule que l’utilisation des ER est nécessaire pour atténuer le changement climatique. Les études dans ce domaine sont multiples et variées. La littérature existante a mis l’accent surtout sur la capacité des ER à réduire les émissions de GES (Hernández *et al.*, 2004 ; Tsai et Chou, 2005 ; Reddy *et al.*, 2006 ; Beccali, Cellura et Mistretta, 2007 ; Arent, Wise et Gelman, 2011 ; Economou, 2010 ; Keleş et Bilgen, 2012 ; Karakosta *et al.*, 2013). Cet avantage environnemental est devenu plus intéressant avec la prise de conscience mondiale de la gravité des changements climatiques.

Mathews (2014) considère que l’utilisation des ER est nécessaire pour réduire les émissions de CO<sub>2</sub>. Dincer (2000) réclame qu’il y a un lien profond entre l’utilisation des ER et le développement durable. En fait, les ER sont l’une des solutions les plus efficaces aux problèmes environnementaux actuels. Dincer (2000) présente une analyse détaillée des impacts environnementaux de l’utilisation massive des combustibles fossiles. Les impacts les plus dangereux sont : les pluies acides, la détérioration de la couche d’ozone et l’effet de serre. Il conclue que la meilleure solution possible pour ces problèmes est l’utilisation des ER. La relation entre les ER et le développement durable est analysée à partir d’une étude de cas de la ville de Sarrebruck en Allemagne qui avait mis en place, en 1980, un

---

<sup>3</sup> « Nous nous attendions un jour d’entendre parler de ‘durabilité durable’ » (trad.Auteur).

programme d'énergie qui a gagné "*the local government honor*" lors de la conférence de Rio en 1992.

Dincer et Rosen (1999) affirment qu'il existe un lien fort entre l'énergie, l'environnement et le développement durable. Ils considèrent qu'une société qui vise l'atteinte du développement durable doit utiliser les ER qui n'ont pas d'impacts négatifs sur l'environnement. Kalogirou (2004) a présenté les problèmes environnementaux causés par l'utilisation des combustibles fossiles et la nécessité d'utiliser l'énergie solaire qui a peu ou pas d'impact négatif sur l'environnement. Selon son étude, l'utilisation de l'énergie solaire pour chauffer les bâtiments et pour chauffer l'eau peut empêcher des grandes quantités d'émissions de GES. En effet, Kalogirou (2004) réclame que la réduction des GES est le principal avantage de l'utilisation de l'énergie solaire et il ajoute que les systèmes d'énergie solaire devraient être utilisés autant que possible pour parvenir à un développement durable, tout en pratiquant le principe « penser globalement-agir localement » ("*think globally-act locally*").

Bien que certaines études traitent ce sujet d'une manière générale, d'autres études se concentrent sur des régions spécifiques et/ou des filières spécifiques d'ER afin de déterminer leur impact sur l'atténuation du changement climatique. Plusieurs études mettent l'accent sur les PED et les pays émergents, notamment ceux qui ont un potentiel significatif d'ER. Par exemple, Bilen *et al.* (2008) ont traité la nécessité d'utiliser les ER en Turquie pour réduire les émissions de GES et participer à la limitation de l'ampleur et de l'étendue du changement climatique, surtout que la Turquie bénéficie d'un emplacement géographique favorable à l'utilisation des ER. Il existe aussi beaucoup d'autres recherches qui traitent le cas de la Turquie (Yüksel, 2008 ; Kaygusuz, 2009).

Yu et Qu (2013) traitent le cas de la Chine qui est le plus grand émetteur de CO<sub>2</sub> dans le monde. Leur analyse suggère que l'énergie éolienne et l'énergie solaire peuvent être utilisées comme des outils efficaces pour réduire les émissions de CO<sub>2</sub> et atténuer les effets désastreux du changement climatique.

Il y a aussi de nombreuses études empiriques qui traitent cette question, nous allons mettre l'accent sur les plus récentes d'entre elles. Amponsah *et al.* (2014) présentent une revue détaillée de la littérature concernant l'analyse du cycle de vie des émissions de GES provenant des ER (79 études sont examinées). Les résultats montrent clairement que les émissions de GES à partir des énergies fossiles sont beaucoup plus élevées que celles

émises par les sources d'ER. Ils ont constaté également que la technologie éolienne *offshore* émet le niveau le plus bas d'émissions de GES.

Sapkota *et al.* (2014) traitent les impacts positifs de l'utilisation de certaines ER (comme le biogaz, la micro-hydroélectricité et l'énergie solaire) dans les communautés rurales du Népal. Cette étude utilise le modèle LEAP (*Long-range Energy Alternatives Planning*). Les résultats de ce modèle montrent que l'utilisation de la micro-hydroélectricité pour les 20 prochaines années permettra de réduire les émissions de CO<sub>2</sub> de 2553 millions de tonnes (Mt). Concernant l'utilisation de l'énergie solaire, le biogaz et les cuisinières améliorées, elle permettra une réduction significative des émissions de CO<sub>2</sub> de 5214 Mt, 35 880 Mt et 7452 Mt, respectivement.

Shafiei et Salim (2014) essaient d'explorer les principales causes des émissions de CO<sub>2</sub>. Ils ont utilisé un modèle STIRPAT basée sur des données des pays de l'OCDE (de 1980 jusqu'à 2011). Les résultats empiriques montrent que la consommation d'ER diminue les émissions de CO<sub>2</sub> alors que la consommation d'énergie conventionnelle augmente les émissions de CO<sub>2</sub>. Yadoo et Cruickshank (2012) ont utilisé des indicateurs de durabilité afin d'étudier le rôle des mini-réseaux des ER (au Népal, au Pérou et au Kenya) dans l'atténuation du changement climatique et la réduction de la pauvreté.

Granovskii, Dincer et Rosen (2007) affirment que l'utilisation des énergies éolienne et solaire au lieu du gaz naturel pour produire de l'électricité et de l'hydrogène conduit à une réduction des émissions polluantes. Avec les coûts actuels de l'électricité d'origine éolienne et solaire, il est démontré que, lorsque l'électricité à partir de sources renouvelables remplace l'électricité à partir du gaz naturel, le coût de réduction des émissions polluantes est plus de dix fois inférieur au coût si l'hydrogène à partir de sources renouvelables remplace l'hydrogène produit à partir du gaz naturel.

Creutzig *et al.* (2014) se sont intéressés aux ER en Europe. Ils estiment que la transition vers un système énergétique basé sur les ER peut atténuer, en même temps, le changement climatique et la crise de dette de la zone euro. Afin de favoriser la transition vers les ER, ils suggèrent, en plus des cadres politiques propres à chaque pays, une grande coordination entre les politiques des États membres. Par conséquent, l'utilisation des ER n'est pas seulement un chemin vers l'atténuation du changement climatique, mais elle est aussi un moyen pour réaliser des avantages socio-économiques qui seront détaillés dans ce qui suit.

### **3.2. La littérature sur la contribution des énergies renouvelables aux dimensions sociale et économique du développement durable**

Nous allons évoquer, tout d'abord, la littérature qui a porté sur les répercussions des ER sur les deux dimensions économique et sociale du développement durable, ensuite nous allons mettre l'accent sur les études qui ont analysé la contribution des ER à la création d'emplois.

Selon Kammen, Kapadia et Fripp (2004), l'utilisation à grande échelle des systèmes d'ER offre plusieurs avantages économiques à travers l'innovation et la création de nouveaux emplois. Goldemberg (2006) affirme que les ER sont un facteur clé pour assurer la durabilité. En effet, si le système énergétique mondial continue à être dominé par les combustibles fossiles, alors les problèmes environnementaux aux niveaux régional et mondial et la dépendance envers les importations d'énergie fossile persisteront. Goldemberg (2006) propose, comme solution à ces problèmes, l'augmentation de la part des ER dans le système énergétique mondial en utilisant des politiques de type “*top-down*” (par exemple, le Protocole de Kyoto) et des politiques de type “*bottom-up*” telles que la « norme de portefeuille d'ER » (*Renewable Portfolio Standard*).

Sáenz, González et Vizcaíno (2008) ont analysé l'impact des programmes de soutien de l'électricité renouvelable sur le prix de l'électricité. Ils ont analysé empiriquement le cas de la production de l'énergie éolienne en Espagne. Les résultats montrent qu'il existe une corrélation négative entre la promotion de l'électricité éolienne et le prix de l'électricité en général.

Mathiesen, Lund et Karlsson (2011) ont présenté l'analyse et les résultats de la conception d'un système énergétique basé sur 100% d'ER au Danemark en 2050. Les résultats du modèle d'analyse du système énergétique nommé “*Energy PLAN*” montrent qu'un système énergétique basé sur 100% d'ER est techniquement possible à l'avenir et peut même avoir des résultats technologiques et socio-économiques positifs.

Afin de déterminer l'impact du déploiement des ER sur la durabilité socio-économique, nous devons mettre l'accent sur l'impact des ER sur les indicateurs socio-économiques tels que l'investissement, le niveau général des prix, les salaires, les prix de l'énergie et le produit intérieur brut (PIB). Cependant, la plupart des études existantes ont simplement mis l'accent sur un seul indicateur qui est le PIB. La littérature existante qui étudie la relation entre les ER et le PIB est riche et variée.

Chien et Hu (2007) ont analysé les effets de l'utilisation des ER sur l'efficacité technique de 45 économies entre 2001 et 2002, en utilisant le modèle "Data Envelopment Analysis". Dans ce modèle, le travail, le stock de capital et la consommation d'énergie sont les variables endogènes et le PIB réel est l'unique variable exogène. Les résultats de cette étude sont les suivants : l'augmentation de l'utilisation des ER améliore l'efficacité technique de l'économie, par contre l'augmentation de l'apport de l'énergie conventionnelle diminue l'efficacité technique.

Chien et Hu (2008) ont utilisé une modélisation par équations structurelles afin d'analyser l'effet des ER sur le PIB. Les résultats ont montré qu'il existe une relation positive entre les ER et le PIB (à travers la formation croissante de capital).

La relation entre la consommation d'ER et le PIB a été largement analysée par différentes études empiriques qui analysent différents pays et régions. La plupart des études empiriques ont constaté qu'il y a un lien de causalité de long terme entre la consommation des ER et le PIB (Sadorsky, 2009 ; Apergis et Payne, 2010 ; 2011 ; Apergis *et al.*, 2010 ; Tugcu, Ozturk et Aslan, 2012 ; Al-mulali *et al.*, 2013).

D'autres études ont porté sur la relation entre la production des ER et le PIB. Par exemple, Abanda *et al.* (2012) ont analysé la corrélation entre la production des ER et la croissance économique dans de nombreux blocs du continent africain. Ils ont constaté qu'il existe une corrélation positive entre la production des ER et le PIB, sauf dans le bloc de l'Afrique australe où cette corrélation est négative.

### **3.3. La littérature sur l'impact des énergies renouvelables sur la création d'emplois**

Jones (2009, p.9) indique que : "*Solar panels do not install themselves. Wind turbines don't manufacture themselves. Buildings do not weatherize and retrofit themselves. Urban trees, green roofs and community gardens do not plant themselves. All these activities require human labour. Recognizing this simple fact helps to undermine the myth that ecological restoration must always be at odds with economic performance*"<sup>4</sup>.

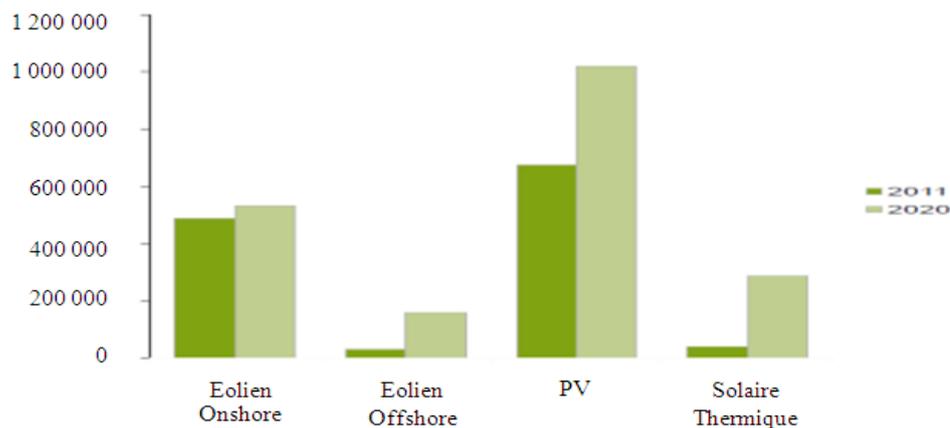
---

<sup>4</sup> « Les panneaux solaires ne s'installent pas tous seuls. Les éoliennes ne se fabriquent pas toutes seules. Les bâtiments ne se protègent pas des intempéries et ne se modernisent pas tous seuls. Les arbres dans les villes, les toits verts et les jardins publics ne s'installent pas tous seuls. Toutes ces activités nécessitent le travail humain. Le fait de reconnaître ce simple fait permet de saper le mythe qui prétend que la restauration écologique doit toujours être en contradiction avec la performance économique » (trad.Auteur).

Selon le rapport de l'UNEP *et al.* (2008), la technologie d'ER qui génère le nombre le plus élevé d'emplois est l'énergie solaire PV avec 7 à 11 emplois en moyenne par Mégawatt (MW) de capacité installée. Ce rapport a indiqué que le nombre d'emplois dans le secteur solaire PV passera de 170 000 en 2006 à 6,3 millions en 2030, alors que le nombre d'emplois dans le secteur de l'énergie éolienne passera de 300 000 en 2006 à 2,1 millions en 2030.

Le rapport élaboré par l'UNEP, FSFM et BNEF (2012) stipule que l'emploi global dans les secteurs de l'énergie éolienne et l'énergie solaire passera de 1,2 million en 2011 à deux millions en 2020. En fait, en 2011, le secteur de l'éolien *onshore* a créé 488 000 emplois, tandis que le secteur solaire PV a créé 675 000. Le secteur de l'éolien *offshore* et le solaire thermique ont créé respectivement 29 000 et 41 000 emplois.

Figure 2. Les emplois dans les secteurs solaire et éolien en 2011 et 2020



Source : UNEP, FSFM et BNEF (2012, p.39)<sup>5</sup>

L'étude faite par Pollin, Heintz et Garrett-Peltier (2009) a montré que l'énergie solaire est plus génératrice d'emplois que l'énergie fossile. En fait, l'énergie solaire permet la création de 5,4 emplois directs par million de dollars de production, tandis que le charbon ne crée que 1,9 emplois directs et le pétrole et le gaz ne créent que 0,8 emplois directs.

Wei, Patadia et Kammen (2010) ont mis l'accent également sur le secteur de l'énergie solaire. Ils ont constaté que l'énergie solaire PV crée plus d'emplois que l'énergie

<sup>5</sup> Basée sur les estimations de *Bloomberg New Energy Finance*, mars 2012

fossile. Même par rapport à d'autres ressources renouvelables, le secteur de l'énergie solaire PV est le plus générateur de main d'œuvre.

De nombreuses études se sont intéressées au potentiel de création d'emplois « verts » dans l'Union européenne (UE). Cet intérêt est dû essentiellement aux objectifs ambitieux de l'UE qui visent que 20% de l'énergie produite, en 2020, sera à partir de sources renouvelables. Par exemple, Blanco et Rodrigues (2009) ont essayé d'estimer le nombre d'emplois directs créés dans le secteur de l'énergie éolienne dans tous les pays de l'UE.

En Europe, l'Allemagne et l'Espagne sont les pays qui ont reçu le plus d'intérêt de la part des chercheurs en raison de leurs stratégies ambitieuses et leurs réalisations importantes dans le domaine des ER. Plusieurs études (Hillebrand *et al.*, 2006 ; Pfaffenberger, Jahn et Djourdjin, 2006 ; Lehr *et al.*, 2008 ; Frondel *et al.*, 2010) traitent le cas de l'Allemagne et visent à déterminer l'effet de la promotion des ER sur l'ensemble de l'économie et surtout sur la création d'emplois.

Concernant le cas de l'Espagne, les études sont aussi nombreuses (Moreno et López, 2008 ; Caldés *et al.*, 2009 ; Sastresa *et al.*, 2010). Ces études portent sur les effets positifs de l'expansion des ER sur l'emploi. Mais, il y a également des études qui critiquent la politique de l'Espagne pour la promotion des ER et tentent de présenter une analyse critique de l'expérience espagnole, on peut citer l'exemple de l'étude faite par Alvarez *et al.* (2009). En fait, les auteurs tentent de répondre à la question « à quel prix ? ». Ils montrent que la stratégie ambitieuse de l'Espagne est très coûteuse (à cause des aides publiques, des subventions, etc.) et surtout destructrice d'emplois dans l'économie.

Depuis la crise économique, les États-Unis ont accordé une grande importance aux concepts de l'économie verte et d'emplois verts. Ainsi, de nombreuses études ont analysé les impacts positifs de la promotion des ER aux États-Unis, principalement en matière de création d'emplois verts (Global Insight, 2008 ; Wei, Patadia et Kammen, 2010 ; Yi, 2013). D'autres études critiquent la stratégie « verte » adoptée par les États-Unis et montrent les impacts négatifs du grand soutien au secteur des ER (Michaels et Murphy, 2009 ; Lesser, 2010). Ces deux études concluent que la promotion des ER causera la perte d'emplois.

Récemment, les études sur l'impact de l'expansion des ER sur le marché du travail traitent le cas de nombreux pays et régions, comme le Moyen-Orient (Van der Zwaan, Cameron et Kober, 2013), la Grèce (Markaki *et al.*, 2013), le Portugal (Oliveira *et al.*, 2013) et la Chine (Cai *et al.*, 2011). Par exemple, Cai *et al.* (2011) ont constaté qu'en 2010,

pour chaque augmentation d'un pour cent de la production d'énergie solaire PV, en Chine, il pourrait y avoir une augmentation de 0,68% de l'emploi total.

Mathiesen, Lund et Karlsson (2011) ont présenté les analyses et les résultats de la conception d'un système de 100% d'ER au Danemark en 2050. Les résultats indiquent que la mise en œuvre d'économies d'énergie et d'ER peut avoir des conséquences socio-économiques positives, créer de nouveaux emplois et potentiellement réaliser des gains importants grâce à l'exportation.

Le niveau élevé d'incertitude entourant les estimations « des emplois verts » dans les études faites est dû à différents facteurs tels que l'ambiguïté de la notion « d'emplois verts » et aussi l'utilisation de modèles et de ratios différents pour estimer la création d'emplois (Gülen, 2011 ; Lambert et Silva, 2012). Les études qui analysent l'impact des ER sur le marché du travail utilisent généralement des méthodes qui peuvent être classées en deux types : les méthodes analytiques et les méthodes d'entrées-sorties (*Input-Output*). Lambert et Silva (2012) ont analysé les avantages et les inconvénients de ces deux méthodes. Ils concluent que les méthodes analytiques sont plus appropriées pour les études régionales alors que les méthodes d'entrée-sortie sont plus commodes à des études nationales et internationales.

Il y a plusieurs façons pour mesurer les emplois créés dans le secteur des ER telles que la mesure des emplois par MW installé chaque année, les emplois par MW installé cumulé, etc. Bien que la mesure du nombre d'emplois créés soit possible en utilisant divers ratios, la détermination de la qualité des emplois créés est une question délicate. Sastresa *et al.* (2010) ont essayé de déterminer la qualité des emplois créés dans le secteur des ER en utilisant un facteur de qualité (*Quality Factor*) pour chaque technologie d'ER, en Aragon (Espagne). Les résultats de cette étude montrent que l'énergie éolienne peut générer des emplois de meilleure qualité que le solaire thermique et le solaire PV.

Selon UNEP *et al.* (2008, p.38), "*Green jobs span a wide array of skills, educational backgrounds, and occupational profiles*"<sup>6</sup>. Rifkin (2011) a aussi accordé un grand intérêt à la qualité et la variété des emplois créés dans le secteur des ER. Dans son livre "*The Third Industrial Revolution: How Lateral Power is Transforming Energy, the Economy, and the World*", il relie les deux technologies du XXI<sup>e</sup> siècle qui sont l'internet et les ER. Ce lien

---

<sup>6</sup> « Les emplois verts couvrent un large éventail de compétences, de domaines d'éducation et de profils professionnels » (trad.Auteur).

va changer la façon avec laquelle l'énergie est distribuée et créer de nouveaux types d'emplois. Selon Rifkin (2011), la main d'œuvre de la « 3<sup>ème</sup> révolution industrielle » devra être qualifiée dans de nouveaux domaines techniques, notamment celui de la gestion du réseau électrique numérique.

En plus de leurs avantages nombreux et irréfutables pour atteindre le développement durable, les ER ont été considérées ces dernières années comme une composante essentielle pour « une reprise verte » suite à la crise économique.

## **Section 2. La transition vers les énergies renouvelables pour une « relance verte » de l'économie**

Bien que la situation économique mondiale semble sombre, la crise économique a été considérée comme une opportunité pour faire face aux défis posés par le changement climatique. Dans ce cas, il a été recommandé d'instaurer des mesures d'incitation fiscale. Ces mesures ne sont pas seulement un moyen pour relancer la demande globale et l'emploi, mais surtout elles sont une opportunité pour changer la trajectoire de l'économie en investissant dans les secteurs « verts » tels que l'efficacité énergétique des bâtiments, le transport écologique et surtout les ER.

L'objectif principal de cette section est de montrer dans quelles mesures la crise économique est une opportunité pour accélérer l'investissement dans le secteur des ER et quelles sont les réalisations faites dans ce secteur depuis l'utilisation des incitations fiscales. Ainsi, nous allons analyser dans ce qui suit le contexte actuel caractérisé par la multiplicité des crises pour expliquer, ensuite, l'importance du secteur des ER dans toutes les initiatives proposées par les organisations internationales, depuis la crise économique de 2008.

### **1. Un contexte de double crise**

Le monde fait face à deux crises de types différents, l'une de nature économique alors que l'autre est plutôt climatique. En effet, la crise financière qui a commencé aux États-Unis s'est vite propagée à d'autres pays et elle s'est transformée en quelques mois en une crise économique d'envergure mondiale. Malgré la gravité de la crise économique, la lutte contre le changement climatique doit rester toujours une préoccupation principale et urgente pour tous les pays.

## 1.1. La crise économique

Comme il est bien connu, le marché américain de l'immobilier a joué un rôle crucial dans le déclenchement de la crise financière et ceci a été détaillé par plusieurs auteurs (Bernanke, 2009 ; Foster et Magdoff, 2009 ; Gokhale, 2009). En effet, la crise financière trouve ses origines dans le marché des *subprimes* aux États-Unis. Ce marché consiste à octroyer des prêts gagés sur l'immobilier résidentiel à une clientèle qui est, généralement, peu solvable. La continuité et le succès de ce système dépend largement du prix de l'immobilier qui est supposé en augmentation continue et aussi de la stabilité des taux d'intérêts. Malheureusement, ces deux conditions ont disparu en même temps puisque le prix de l'immobilier a chuté brusquement et le taux directeur a augmenté d'une manière continue. Face à ces deux événements inattendus, les ménages se sont trouvés dans l'impossibilité de payer leurs emprunts. Par conséquent, les banques ont procédé à une vente massive des logements saisis ce qui a causé la chute du prix de l'immobilier.

A l'été 2007, il y a eu le déclenchement de la crise financière. Les deux principales causes de la rapidité de transmission et de la gravité de la crise de *subprimes* sont la titrisation des créances et les fonds d'investissement. Cette crise a causé des pertes énormes aux banques qui sont estimées à environ 950 milliards de dollars dans le monde [International Monetary Fund (IMF), 2008]. En septembre 2008, deux grandes faillites ont marqué les esprits : l'effondrement de "*Lehman Brothers*" qui est une banque d'investissement américaine et le sauvetage du géant de l'assurance "*American International Group*" (AIG) qui était au bout de la faillite.

A la suite de ces deux événements, il y a eu d'autres faillites et d'autres sauvetages d'institutions financières aussi bien dans les pays développés que dans les PED. Ainsi, ce qui a commencé comme étant une crise dans un seul secteur est devenu, selon Omarova (2009, p.157) "*the world's first truly global financial crisis*"<sup>7</sup>. A la suite des faillites de plusieurs institutions financières, la sphère réelle a été aussi touchée par la crise bancaire ce qui a engendré des faillites de masse dans le cadre des petites et moyennes entreprises qui sont souvent les plus vulnérables. Par exemple aux États-Unis, le nombre d'entreprises qui ont déclaré leurs faillites a augmenté d'une manière spectaculaire en 2009.

---

<sup>7</sup> « La première crise financière réellement mondiale » (trad.Auteur).

Au Japon, la situation était similaire puisque 13 306 entreprises ont tombé en faillite, en 2009, ce qui représente une augmentation de 4,9% par rapport à 2008 (Teikoku Databank, 2010)<sup>8</sup>.

La plupart des économies développées ont souffert de graves récessions avec l'augmentation du taux de chômage et la chute de la demande globale. Selon *International Labour Organization* (ILO, 2010), le nombre de personnes en chômage est estimé à 212 millions, en 2009, ce qui signifie une augmentation de 34 millions par rapport à 2007.

En janvier 2009, 600 000 personnes ont perdu leurs emplois aux États-Unis, il s'agit de la perte mensuelle la plus grave depuis 1974. On a assisté aussi à la perte d'environ 3,6 millions d'emplois entre décembre 2007 et janvier 2009 (ILO, 2009). Par conséquent, le commerce mondial des produits manufacturés a chuté avec des répercussions sur les économies de l'Asie de l'Est. En même temps, la baisse des prix des matières premières a affecté les pays d'Afrique, d'Amérique latine et le Moyen-Orient. Selon la Banque Mondiale (World Bank, 2008a), chaque baisse de 1% du taux de croissance dans les économies en développement engendre 20 millions de personnes prédestinées à la pauvreté.

Alors que l'économie mondiale est confrontée à une crise économique temporaire, le changement climatique constitue une menace permanente et grave aussi bien pour l'être humain que pour l'écosystème.

## **1.2. La crise climatique**

La Convention Cadre des Nations Unies sur les Changements Climatiques (CCNUCC) est la première convention établie par l'Organisation des Nations Unies (ONU) dans le but d'une meilleure compréhension du phénomène du changement climatique et la recherche des stratégies adéquates pour y faire face. Les changements climatiques sont définis par la CCNUCC (1992, p.4) comme étant : «...des changements de climat qui sont attribués directement ou indirectement à une activité humaine altérant la composition de l'atmosphère mondiale et qui viennent s'ajouter à la variabilité naturelle du climat observée au cours de périodes comparables ».

---

<sup>8</sup> Données disponibles sur le site web de *Teikoku Databank* en suivant le lien : [http://www.tdb.co.jp/english/news\\_reports/backnumber/brr09nen.html](http://www.tdb.co.jp/english/news_reports/backnumber/brr09nen.html)

Les changements climatiques concernent toutes les modifications intenses qui ont affecté le climat telles que l'augmentation des températures, des cyclones, etc. Mais, le terme changement climatique est souvent utilisé pour désigner le réchauffement de la planète causé essentiellement par les émissions de GES.

La prise de conscience des dangers du réchauffement climatique a eu lieu au cours des années 1960 et 1970. Pendant cette période, la communauté scientifique a montré la fragilité de l'écosystème et la dépendance de notre bien être du changement du climat. La première conférence mondiale sur le climat a eu lieu, en 1979 à Genève, et elle a réuni principalement les scientifiques qui effectuent des recherches sur les risques des changements climatiques. Le but de la conférence était d'évaluer l'état des connaissances sur les changements climatiques et d'examiner les effets de la variabilité climatique sur l'humanité.

En 1988, l'organisation météorologique mondiale et le PNUE ont créé l'IPCC. Avec la création de l'IPCC et la tenue de la deuxième conférence sur le climat en 1990, le changement climatique n'est plus la préoccupation des scientifiques seulement, mais il est devenu aussi la préoccupation des citoyens et des politiciens.

Malgré que la crise économique et la crise climatique soient causées par les pays développés, ce sont plutôt les pays pauvres qui subissent les conséquences désastreuses (PNUE, 2009). En effet, selon IPCC (2007), les populations pauvres sont les plus vulnérables à la montée du niveau de la mer, à l'augmentation de la fréquence des tempêtes et à l'érosion des côtes. Ceci est très observable, au Bangladesh, qui est considéré comme l'un des pays les plus affectés par les changements climatiques. Ce qui aggrave encore la situation, c'est le fait qu'environ 14% de la population et 21% des habitants des villes dans les PED vivent dans des zones côtières de basse altitude qui sont exposées à ces risques (McGranahan, Balk et Anderson, 2007).

Avec la hausse continue des températures, le changement climatique sera probablement ingérable. Cette grave menace mondiale peut pousser l'écologie à des points de basculement inconnus qui peuvent changer fondamentalement et irréversiblement la façon dont fonctionne notre planète (Lenton *et al.*, 2008). En effet, les résultats obtenus à partir d'un certain nombre d'études ont indiqué que le changement climatique se produit beaucoup plus rapidement que prévu. En particulier, la glace de l'Antarctique a commencé

à disparaître avec un rythme beaucoup plus élevé que celui prévu par les scientifiques (UNEP, 2009).

Bien qu'il y ait une prise de conscience mondiale de la dangerosité du changement climatique, les actions mises en œuvre ne sont pas suffisantes. En effet, les décideurs politiques ont tendance à se concentrer sur le court terme et à essayer de résoudre les problèmes économiques et financiers urgents. L'étendue de la tâche et la difficulté de coordination et de mise en place d'un système pour lutter contre le changement climatique contribuent également à ralentir la lutte contre ce phénomène.

## **2. La relance verte comme solution pour les deux crises**

Depuis la crise économique, de nombreuses organisations internationales ont insisté sur la nécessité de l'expansion de l'investissement dans le secteur des ER, dans tous les pays, afin de stimuler l'économie, créer des emplois et atténuer le changement climatique. De ce fait, de nombreux rapports de l'UNEP (2009 ; 2010 ; 2011) considèrent la crise économique comme une opportunité pour progresser vers « une relance verte » de l'économie. Par conséquent, nous avons assisté à l'émergence de l'initiative de « l'économie verte » du PNUE (UNEP, 2011) et de la stratégie de « croissance verte » de l'OCDE (2011a ; 2011b). L'expansion du secteur des ER est un élément essentiel de toutes ces stratégies (Omri, Chtourou et Bazin, 2015a).

Plusieurs organisations internationales ont appelé à la mise en œuvre d'un programme de « reprise verte » (*green recovery*) ou à « un nouveau pacte vert » (*green new deal*) qui sont constitués d'un ensemble de stratégies qui permettent à la fois la relance de l'économie et la protection de l'environnement ; il s'agit donc d'une « relance verte » de l'économie.

La politique budgétaire est de plus en plus recommandée face à la chute des niveaux de l'investissement et de la consommation privée puisqu'elle est censée permettre la relance de la demande globale. De ce fait, la crise économique peut être considérée comme une opportunité pour faire face à la crise climatique. Dans ce cas, relancer l'économie tout en investissant dans les secteurs « verts » (tels que les ER, l'efficacité énergétique, etc.) permet de faire face à ces deux crises. En effet, l'investissement dans les secteurs « verts » permettra la création de nouveaux emplois et le passage à une économie « verte ». De ce fait, l'OCDE (2011b), l'UNEP (2011) et la Banque Mondiale (World Bank, 2012) ont tous fait appel à la mise en œuvre de stratégies de « croissance verte » (*green growth*), de

« Nouveau Pacte Vert Mondial » (*Global Green New Deal* : GGND) et de « l'économie verte » (*green economy*) dans leurs rapports publiés ces dernières années. Sedlacko et Gjoksi (2009) ont fourni une présentation exhaustive des initiatives européennes et internationales dans le domaine de « la relance verte ».

## 2.1. Le Nouveau Pacte Vert Mondial

Le nouveau pacte vert mondial « *porte sur un ensemble de plans de relance coordonnés de grande envergure et d'actions gouvernementales à l'échelle mondiale susceptibles de déclencher la reprise économique mondiale à court terme tout en jetant les fondations d'une croissance économique soutenue à moyen et long termes* » (PNUE, 2009, p.6). Cette idée est présente dans plusieurs rapports depuis la crise économique (Green New Deal Group, 2008 ; Edenhofer et Stern, 2009) et elle se base sur le principe d'adopter une stratégie mondiale afin de sortir de la crise économique tout en suivant la trajectoire d'une croissance « verte ».

Cette idée de “*Green New Deal*” est inspirée de la fameuse stratégie de “*New Deal*” qui a été proposée, aux États-Unis, par le président Roosevelt comme solution pour sortir de la grande dépression des années 1930. Ce “*New Deal*” a réalisé des succès durant la récession en permettant la stimulation de l'économie et la diminution du taux de chômage.

Le PNUE (2009, p.7) a décrit la crise financière comme étant « *une occasion historique unique* » : « *Nous croyons qu'il existe aujourd'hui une occasion historique unique de créer les bases d'une nouvelle économie verte capable d'allouer le capital naturel et le capital financier d'une façon beaucoup plus efficace et efficiente dans un avenir prévisible* ». Ce rapport insiste sur le fait que « *nous ne devons pas rater la chance qui nous est offerte de changer radicalement la trajectoire de la civilisation humaine* ».

L'optimisme par rapport à l'opportunité présentée par la crise financière vient essentiellement de l'utilisation des incitations fiscales. En effet, les optimistes considèrent ces incitations fiscales comme une opportunité sans précédent qui va permettre l'orientation des fonds vers des investissements « verts ».

## 2.2. Les mesures d'incitation fiscale vertes

Les mesures d'incitation fiscale « vertes » ou les mesures fiscales incitatives « vertes » sont définies par UNEP, FSFM et BNEF (2012, p.79) comme étant : “*The share of government economic recovery packages allocated to “green” initiatives such as*

*renewable energy, energy efficiency, smart power grid, transport, and other clean energy technologies*<sup>9</sup>.

Selon l'étude réalisée par Barbier (2009), l'utilisation de 1% du PIB mondial, au cours des deux prochaines années, pour financer des investissements dans des secteurs « verts » sera suffisante pour « l'environnementalisation » de l'économie mondiale. Cette condition n'est pas difficile à réaliser : 1% du PIB mondial (environ 750 milliards de dollars), c'est-à-dire seulement un quart du volume total des plans de relance économique proposés.

Sur la base des résultats d'un "system dynamics model", l'UNEP (2011) a proposé d'investir 2% du PIB mondial, entre 2010 et 2050, afin de réduire à moitié les émissions de CO<sub>2</sub> liées à l'énergie et d'atteindre les objectifs du millénaire pour le développement de l'ONU.

Plusieurs études ont été consacrées à l'évaluation de la part des investissements « verts » dans les plans de relance telles que les séries de recherches faites par *HSBC Global Research*, notamment celle de Robins, Clover et Singh (2009) et le rapport rédigé par Edenhofer et Stern (2009) qui donne une série de recommandations aux membres du Groupe des vingt (G20). Robins, Clover et Singh (2009) ont fait l'analyse de 20 plans de relance économique dans le but de déterminer la part « verte » dans ces plans. Ils ont trouvé que la composante « verte » dans les plans de relance varie de 0% pour le Chili et l'Inde à 80,5% pour la Corée du Sud. En ce qui concerne les mesures de « relance verte », au niveau mondial, elles représentent environ 19,6% du total des plans de relance dans le monde (environ 436 milliards de dollars).

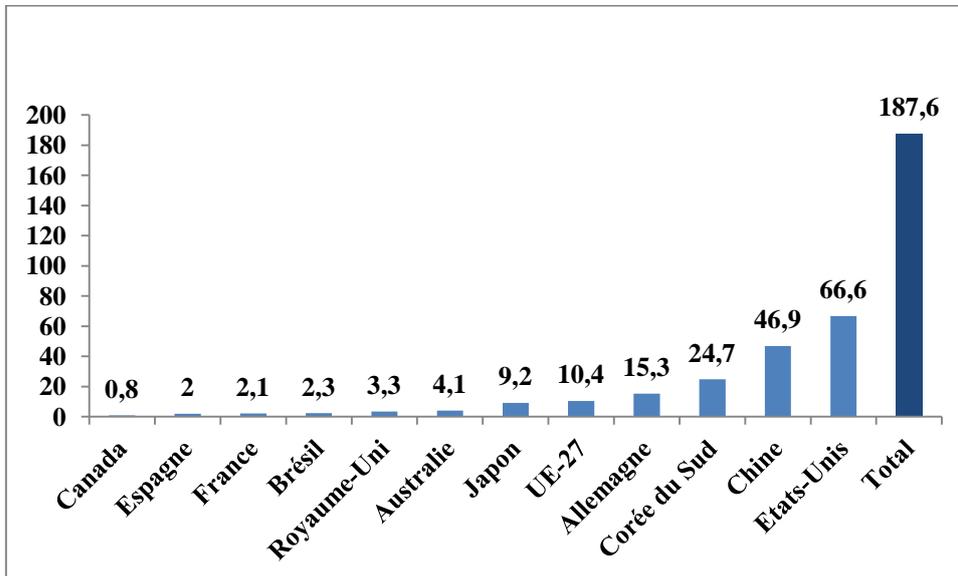
L'étude faite par UNEP et BNEF (2010) a montré que 187,6 milliards de dollars consacrés aux programmes de « relance verte » ont été annoncés par la plupart des pays, depuis le déclenchement de la crise financière en 2008. La figure 3 montre que les États-Unis représentent le plus grand programme de « relance verte » d'environ 66,6 milliards de dollars. La Chine a consacré 46,9 milliards de dollars pour « la relance verte ». A la fin de 2009, seulement 9% du total des plans de « relance verte » a été dépensé (UNEP et BNEF, 2010). A la fin de 2011, 141,8 milliards de dollars ont été dépensés dans ces programmes.

---

<sup>9</sup> « La part des plans de relance gouvernementaux allouée à des initiatives « vertes » comme les énergies renouvelables, l'efficacité énergétique, le réseau électrique intelligent, le transport et d'autres technologies d'énergies propres » (trad.Auteur).

Les États-Unis ont dépensé 42 milliards de dollars alors que la Chine a dépensé 44 milliards de dollars (UNEP, FSFM et BNEF, 2012).

Figure 3. Les composantes vertes des incitations économiques en milliard de dollars



Source : UNEP et BNEF (2010, p.54)<sup>10</sup>

### 2.3. L'initiative de l'économie verte du PNUE

L'étude faite par Pearce, Markandya et Barbier (1989) dans leur livre "*Blueprint for a Green Economy*" a été l'une des premières études qui se sont intéressées aux liens entre le développement durable et « l'économie verte ». Les auteurs affirment que le développement durable est irréalisable en raison de l'utilisation intensive du capital naturel pour assurer la croissance. Ainsi, l'adoption d'une stratégie « d'économie verte » est nécessaire pour assurer le bien être des générations actuelles et futures.

UNEP (2011) indique que le fait de rendre l'économie plus verte n'est pas un frein à la croissance, mais plutôt un nouveau moteur de croissance. Dans ce rapport publié en février 2011, les auteurs affirment que la stratégie « d'économie verte » est créatrice d'emplois verts et qu'elle est aussi indispensable pour l'élimination de la pauvreté. Ce rapport intitulé "*Towards a Green Economy: Pathways to Sustainable Development and Poverty Eradication*" présente une stratégie économique et sociale cohérente pour investir 2% du PIB mondial afin de mettre à « vert » dix secteurs clés de l'économie à savoir : l'agriculture, les bâtiments, l'énergie, la pêche, la foresterie, l'industrie, le tourisme, le transport, les déchets et l'eau.

<sup>10</sup> Données collectées de *Bloomberg New Energy Finance*, 2010

L'initiative « d'économie verte » n'est pas un remplacement pour le développement durable, mais plutôt elle est un chemin qui aboutit à la réalisation de ce développement durable aux niveaux national, régional et mondial. Ce rapport met l'accent sur les emplois verts qui peuvent être créés lors de la transition vers « une économie verte » et comment le fait de mettre l'économie au vert peut être un moyen pour réduire la pauvreté persistante. Cette initiative cite plusieurs stratégies à adopter telles que l'élimination des subventions perverses, la stimulation des investissements dans les secteurs verts, etc.

Selon l'UNEP (2010), « l'économie verte » est le résultat de l'amélioration du bien être humain et de l'équité sociale ainsi que la réduction des risques environnementaux. Dans sa plus simple expression, « une économie verte » est *“low-carbon, resource efficient and socially inclusive”* (UNEP, 2011, p.1)<sup>11</sup>. L'initiative de l'UNEP décrit également la modélisation qui sera adoptée dans le but de quantifier les défis de la transition vers « une économie verte », le modèle utilisé est *“Threshold21 World model”* (T21-World).

#### **2.4. La stratégie de croissance verte de l'OCDE**

La définition donnée à « la croissance verte » par l'OCDE (2011, p.4) est la suivante : *« Une politique de croissance verte consiste à favoriser la croissance économique et le développement tout en veillant à ce que les actifs naturels continuent de fournir les ressources et les services environnementaux sur lesquels repose notre bien-être. Pour ce faire, elle doit catalyser l'investissement et l'innovation qui étayeront une croissance durable et créeront de nouvelles opportunités économiques ».*

L'OCDE a annoncé, en 2009, le développement d'une stratégie de « croissance verte ». Dès lors, l'OCDE a coopéré avec de nombreux partenaires afin de fournir les grandes lignes de cette stratégie. Ainsi, de nombreux rapports ont été publiés par l'OCDE afin d'expliquer la nécessité des stratégies de « croissance verte » et de mesurer les progrès réalisés.

Selon l'OECD (2011b), « la croissance verte » a le potentiel de révéler des nouvelles sources de croissance à travers de nombreux canaux tels que la création de nouveaux marchés, la stimulation de la concurrence des investisseurs et l'innovation. En effet, l'innovation verte est un élément clé de cette stratégie puisqu'elle permet de créer une croissance économique qui tient compte du capital naturel. Il est donc nécessaire que les

---

<sup>11</sup> « ...à faible émission de carbone, efficiente et socialement inclusive » (trad.Auteur).

stratégies de « croissance verte » fournissent des incitations à l'innovation afin de faire face aux défis environnementaux majeurs. Dans cette stratégie, il est très important d'encourager les technologies vertes et l'éco-innovation.

La stratégie de « croissance verte » est un cadre qui explique comment les pays peuvent parvenir à une croissance économique et atténuer le changement climatique en même temps. Cette stratégie comprend de nombreuses mesures telles que la réforme fiscale, les politiques de recherche et d'innovation, les instruments d'atténuation du changement climatique et les mesures d'efficacité énergétique.

Selon Hallegatte *et al.* (2011, p.3), *“Green growth is about making growth processes resource-efficient, cleaner and more resilient without necessarily slowing them”*<sup>12</sup>. Ces auteurs considèrent « la croissance verte » comme une composante nécessaire du développement durable. Dans la même ligne de pensée, dans le rapport de la Banque Mondiale (World Bank, 2012), « la croissance verte » est considérée comme nécessaire et efficace pour suivre le chemin du développement durable. De nombreux papiers examinent plusieurs significations du concept « croissance verte » et fournissent un bref aperçu des réponses des institutions internationales à la double crise (Bina et La Camera, 2011 ; Sterner et Damon, 2011 ; Jänicke, 2012 ; Schmalense, 2012). Par exemple, Schmalense (2012, p.S2) considère que *“‘Green Growth’ is a wonderful slogan. After all, everyone agrees that being green is a good thing, and in the current Great Recession economic growth is even more desirable than usual. So ‘green growth’, which combines these two good things, sounds like a truly great thing”*<sup>13</sup>.

Dans son article *“Sustainable Growth: An Impossibility Theorem”*, Daly (1993, p.267) considère que le terme « croissance durable » est un mauvais oxymore et il précise que même « la croissance verte » n'est pas durable. Il explique cela par le fait qu'il y a une limite au nombre d'arbres que la terre peut supporter. Daly (1993) estime qu'il y a des limites à la croissance économique parce que le monde a une quantité limitée de ressources

---

<sup>12</sup> « La croissance verte est le fait de rendre les processus de croissance efficaces, plus propres et plus résistants sans nécessairement les ralentir » (trad.Auteur).

<sup>13</sup> « ‘ La croissance verte’ est un slogan merveilleux. Après tout, tout le monde est d'accord sur le fait que mettre l'économie au vert est une bonne chose et pendant la grande récession actuelle, la croissance économique est plus souhaitable que d'habitude. Donc « croissance verte » qui combine ces deux bonnes choses a l'air d'être vraiment formidable » (trad.Auteur).

et un flux d'énergie fixe. Il affirme qu'il est illusoire de croire que l'économie peut croître indéfiniment, même si cette croissance est verte ou durable.

### **3. Le secteur des énergies renouvelables : un élément clé de la relance verte de l'économie**

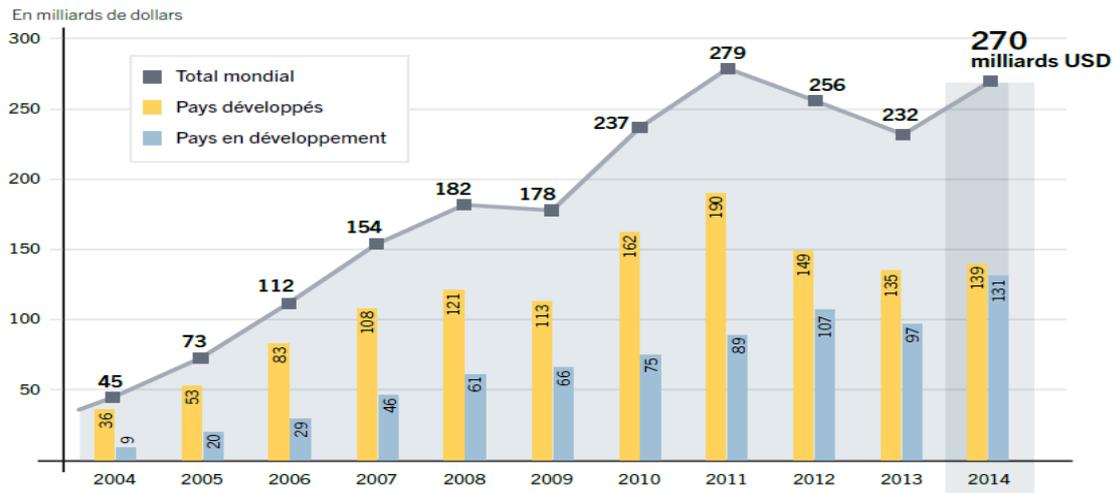
Toutes les initiatives citées qui sont « le nouveau pacte vert mondial », « la croissance verte » et « l'économie verte » ont fait du secteur des ER un élément essentiel et indispensable. Pour ces raisons, on a assisté à une flambée des investissements dans le secteur des ER depuis la crise économique.

La croissance continue de l'investissement dans le secteur des ER est l'aspect le plus visible de la transition vers une économie verte (UNEP, FSFM et BNEF, 2012). En effet, selon PNUE (2009), les mesures d'incitation fiscale appliquées après la crise économique devraient donner la priorité aux secteurs verts, notamment celui des ER.

Grâce aux mesures incitatives appliquées dans plusieurs pays, notamment en Chine et aux États-Unis, le secteur des ER a été influencé positivement par la crise économique. En effet, il s'agit des rares secteurs qui ont résisté à la période de récession en enregistrant même un record, en 2011, avec un total d'investissement de 279 milliards de dollars dû surtout aux programmes de « relance verte ». La figure 4 montre la croissance continue des investissements dans le secteur des ER depuis 2004, avec une stagnation en dépit de la crise de 2008 à 2009 pour croître de nouveau au cours des années 2010 et 2011 (UNEP, FSFM et BNEF, 2015).

L'année 2012 a été marquée par le déclin du niveau des investissements dans les ER. En effet, le montant des investissements a passé de 279 milliards de dollars en 2011 à 256 milliards de dollars (Figure 4). Cette décroissance a été causée par le déclin du niveau de l'investissement dans les pays développés qui a passé de 190 milliards de dollars en 2011 à 149 milliards de dollars en 2012. En effet, la plupart des programmes de subventions et d'aides au secteur des ER qui ont été annoncés par les gouvernements, suite à la crise économique, ont expiré à la fin de l'année 2011. Mais, il est à noter que la baisse enregistrée en 2012 et 2013 n'a pas duré et que le secteur des ER a enregistré de nouveau une croissance à partir de 2014 (UNEP, FSFM et BNEF, 2015).

Figure 4. Les nouveaux investissements (en milliards de dollars) dans l'énergie renouvelable et les biocarburants entre 2004 et 2014



Source : REN21 (2015b, p.28)<sup>14</sup>

L'investissement mondial dans le secteur des ER, sans prendre en compte les grands projets hydro-électriques, était d'environ 270 milliards de dollars en 2014, en enregistrant une croissance de 17% par rapport au niveau d'investissement en 2013. Il s'agit de la première augmentation enregistrée depuis le record de 2011 (279 milliards de dollars). Les bons résultats enregistrés en 2014 sont dus essentiellement à l'augmentation sans précédent des installations solaires en Chine et au Japon ainsi que les projets éoliens *offshore* en Europe (UNEP, FSFM et BNEF, 2015).

En 2014, les ER ont représenté 58,5 % de la capacité électrique ajoutée au niveau mondial. Ce sont l'énergie éolienne, l'énergie solaire PV et l'hydroélectricité qui ont représenté la part la plus élevée de la capacité installée (REN21, 2015a). Une autre caractéristique clé de l'année 2014 est la propagation continue de l'ER à des nouveaux marchés. En effet, l'investissement dans les PED a atteint 131,3 milliards de dollars, en enregistrant une augmentation de 36% par rapport à l'année 2013. En ce qui concerne l'investissement dans les pays développés, il est de l'ordre de 138,9 milliards de dollars (Figure 4).

La diminution des coûts des technologies d'énergie solaire et éolienne a permis de réaliser une forte dynamique pour ces deux technologies en 2014. En effet, l'investissement dans l'énergie solaire a atteint 149,6 milliards de dollars avec une hausse

<sup>14</sup> Données collectées à partir du rapport élaboré par UNEP, FSFM et BNEF (2015)

de 25% par rapport à 2013, alors que l'investissement dans le secteur éolien a progressé de 11% par rapport à 2013 en enregistrant un record de 99,5 milliards de dollar (UNEP, FSFM et BNEF, 2015). L'année 2014 a été l'année des grandes réalisations pour les ER. En effet, le niveau d'investissement a fortement rebondi après deux années de baisse, la capacité installée a dépassé celle d'origine fossile. En plus, l'investissement dans les PED menés par la Chine est devenu très proche des investissements dans les économies développées. Selon le rapport REN21 (2015a), la part des ER dans la production électrique mondiale a atteint 22,8% fin 2014. La part de l'hydroélectricité est de 16,6% alors que la part des autres ER est de 6,2% (avec 3,1% la part de l'énergie éolienne).

Bien qu'au niveau mondial la part des ER dans la production de l'électricité soit assez faible (6,2%), certains pays ont atteint des niveaux très satisfaisants. On peut citer, par exemple, le Danemark avec une part de l'énergie éolienne de 39,1% et le Portugal avec une part de 27%. Concernant l'énergie solaire PV, elle a atteint 7,9% en Italie, 7,6% en Grèce et 7% en Allemagne, en 2014. La Chine, les États-Unis, le Brésil, l'Allemagne et le Canada sont les cinq premiers pays en ce qui concerne la capacité électrique totale installée d'origine renouvelable, en 2014. Au début de 2015, 164 pays ont des objectifs à atteindre dans le domaine des ER et 145 pays ont mis en place des mécanismes et des stratégies de soutien aux ER (REN21, 2015a).

Il est clair que le marché des ER a été relancé, à partir de 2009, grâce aux mesures d'incitation fiscale « vertes », mais ce marché a rebondi de nouveau, à partir de 2014, grâce à d'autres facteurs que nous allons expliquer dans ce qui suit.

### **3.1. Les éléments favorisant le développement du marché des énergies renouvelables**

Au début, l'expansion du secteur des ER a besoin du soutien du gouvernement sous la forme de subventions, de crédits à faible taux d'intérêt et de déductions fiscales. Il est également nécessaire de réduire les subventions perverses dans le secteur des combustibles fossiles et d'augmenter les dépenses de recherche et de développement (R&D) dans le secteur des ER.

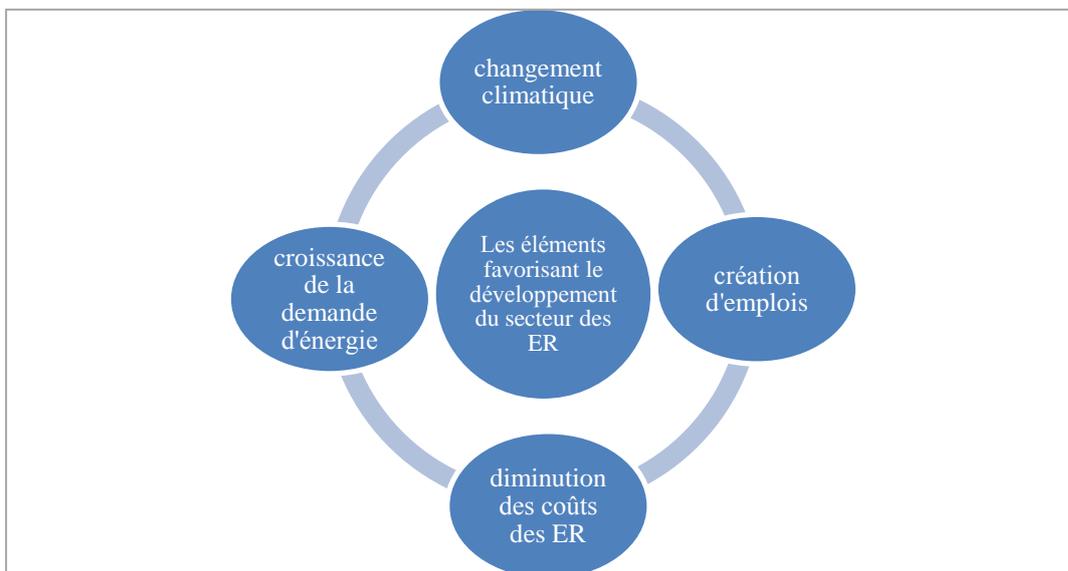
La diminution des prix des ER et la suppression des obstacles à leur adoption permettront d'accélérer le processus d'expansion industrielle. Ensuite, l'augmentation des taux de croissance de la production permettra de réduire les coûts et puis les prix ce qui

rend les ER plus compétitives. A la fin, nous allons atteindre un stade où les subventions pour les ER ne seront plus nécessaires.

Edenhofer et Stern (2009, p.6) suggèrent que si aucune mesure n'est prise pour réduire la dépendance vis-à-vis des combustibles fossiles « *la prochaine crise économique est préprogrammée* » : “*Without the transition towards a low-carbon global energy system, the next economic crisis is pre-programmed. ‘Green’ recovery programmes are not only an option for sound and effective crisis relief; they are a precondition*”<sup>15</sup>. L'utilisation des sources d'ER est donc essentielle dans le contexte actuel caractérisé par : la croissance continue de la demande énergétique, la volatilité des prix du pétrole, les changements climatiques, le taux de chômage élevé et la diminution progressive des coûts des ER. Ainsi, les ER présentent l'énergie de l'avenir.

En plus des différentes stratégies et initiatives qui ont encouragé l'investissement durant les dernières années, il y a d'autres facteurs qui vont favoriser l'expansion de ce secteur durant les prochaines décennies. Les facteurs les plus importants qui favorisent la croissance rapide du secteur des ER sont : l'attention grandissante accordée au changement climatique, le fort potentiel de création d'emplois dans ce secteur, la diminution notable des coûts des ER et la croissance continue de la demande énergétique (Figure 5).

Figure 5. Les éléments favorisant le développement du secteur des ER



Source : Omri, Chtourou et Bazin (2015a, p.68)

<sup>15</sup> « Sans la transition vers un système énergétique mondial faible en carbone, la prochaine crise économique est préprogrammée. Les programmes de relance «verte» ne sont pas seulement une option pour l'allégement efficace et solide de la crise ; ils sont une condition préalable » (trad.Auteur).

### **3.1.1. La 21<sup>ème</sup> Conférence des parties à la convention cadre des Nations unies sur les changements climatiques (COP21)**

La baisse de la croissance due à la crise économique a stagné les émissions mondiales des GES. Toutefois, le changement climatique ne résulte pas des flux des émissions, mais plutôt du stock accumulé depuis des années. Ainsi, même une forte baisse des émissions à court terme va diminuer légèrement les dommages attendus du changement climatique. Pour cette raison, tous les pays doivent s'engager dans une stratégie globale de promotion des ER afin de réduire le stock des GES.

La France a présidé la COP21 qui a eu lieu du 30 novembre au 11 décembre 2015 à Paris. Il s'agit d'une conférence cruciale qui a abouti à un nouvel accord international sur le climat qui vise le maintien du réchauffement climatique en-dessous de 2°C par rapport à l'ère préindustrielle. Les délégués des 195 pays-parties et le délégué de l'UE à la CCNUCC se sont réunis régulièrement pour se mettre d'accord sur le texte qui sera voté à Paris.

Dans le cadre de cette conférence, les ER étaient un élément essentiel de tous les plans d'actions présentés par les différents pays. Par exemple, la France a promis d'octroyer 2 milliards d'euros d'ici 2020 pour les ER en Afrique. En plus, plusieurs gouvernements des pays développés, des banques multilatérales de développement et des fonds multilatéraux pour le climat ont promis le financement de projets d'ER. Lors de cette conférence, 10 pays ont annoncé la participation à la mobilisation de 10 milliards de dollars de financement aux projets d'ER en Afrique d'ici 2020. Ce financement sera sous la forme de prêts et de dons. L'objectif de ce financement est de fournir une capacité supplémentaire d'électricité d'origine renouvelable aux horizons 2020 et 2030. En outre, le roi Mohammed VI a annoncé lors de son intervention dans le cadre de la COP 21 que le Maroc fixe un nouveau objectif d'atteindre 52% d'ER à l'horizon 2030.<sup>16</sup>

Après son adoption à la Conférence de Paris, l'accord sera déposé à l'ONU à New York et ouvert le 22 avril 2016 afin d'être signé. L'accord adopté à Paris regroupe cinq éléments essentiels contenant les actions nécessaires qui permettront de couvrir tous les aspects des changements climatiques. Les actions sont les suivantes :

- Les actions d'atténuation des émissions de GES ;

---

<sup>16</sup> Pour plus de détails voir le site web de la COP21 : <http://www.cop21.gouv.fr/>

- Les actions permettant d'avoir un système de transparence et un bilan mondial afin de comptabiliser l'action climatique des différents pays ;
- Les actions d'adaptation qui vont permettre aux pays de se remettre des impacts négatifs des changements climatiques ;
- Les actions de renforcement des capacités pour faire face aux pertes et dommages causés par les changements climatiques ;
- Les actions de soutien financier pour les pays pauvres.

### **3.1.2. La création d'emplois verts**

Les stratégies de « croissance verte » de l'OCDE et de « l'économie verte » du PNUE ont montré clairement qu'il est possible de lutter contre le changement climatique, maintenir la croissance économique et créer des emplois verts en même temps.

La crise économique a généré des taux de chômage élevés partout dans le monde. Ainsi, la création de nouveaux emplois est urgente dans le contexte actuel. Plusieurs rapports indiquent que le secteur des ER présente une opportunité pour créer des nouveaux emplois. En effet, les technologies des ER nécessitent plus de main d'œuvre que celles des combustibles fossiles. Ainsi, la diffusion des ER aussi bien dans les pays développés que dans les PED va permettre la création des millions d'emplois verts. Selon le dernier rapport élaboré par *International Renewable Energy Agency* (IRENA, 2015), en plus de 1,5 million de personnes qui travaillent dans les grandes centrales hydroélectriques, il existe en 2014 environ 7,7 millions de personnes qui travaillent directement ou indirectement dans le secteur des ER. La Chine abrite la plus grande part des employés dans ce secteur avec 3,4 millions de travailleurs.

### **3.1.3. La diminution progressive des coûts des énergies renouvelables**

En 2008, la production dans l'industrie du solaire PV a atteint un volume de 7,3 Gigawatt-crête (GWc) de modules PV à l'échelle mondiale. En effet, l'industrie du solaire PV est parmi les industries qui ont les taux de croissance les plus rapides dans le monde. Les experts dans ce domaine prévoient la diminution des coûts et par la suite la chute des prix. En fait, grâce à l'augmentation importante de la capacité de production, les baisses des coûts sont de plus en plus remarquables (*European Commission-Renewable Energy Unit*, 2009). Ainsi, les prix des ER sont en baisse rapide due à la demande croissante, aux économies d'échelles et à l'amélioration de la technologie. Par exemple en Europe, chaque doublement dans la capacité de production de l'énergie éolienne fait baisser le prix de

l'électricité produite de 9% à 17% (Krohn, Morthorst et Awerbuch, 2009). Avec chaque augmentation de la production de l'énergie éolienne, les turbines fabriquées deviennent de plus en plus efficaces ce qui fait baisser les coûts de l'électricité produite.

L'une des caractéristiques dominantes de l'industrie de l'ER, en 2014, est la baisse des coûts de la technologie. En effet, le prix des modules PV a baissé de 59% et celui des éoliennes *onshore* a baissé de 11,5 % par rapport à 2009. Cette baisse des coûts a permis de rendre ces deux technologies plus compétitives (UNEP, FSFM et BNEF, 2015).

Le rapport de l'IPCC (2011) a également analysé le rythme avec lequel les coûts de certaines technologies d'ER ont diminué. Les résultats montrent que les prix moyens des modules PV ont chuté de 22 dollars par watt, en 1980, à moins de 1,5 dollar par watt en 2010. Cette énorme réduction des coûts est due essentiellement aux économies d'échelle et aux effets d'apprentissage.

#### **3.1.4. La croissance continue de la demande énergétique**

Il est prévu que la demande mondiale d'énergie primaire va continuer sa croissance avec un rythme élevé dans les années à venir. L'IEA (2010a) prévoit un taux de croissance de la demande énergétique de 1,4% par an jusqu'à 2035. La croissance la plus rapide de la demande d'énergie est attendue dans les pays non membres de l'OCDE avec un taux prévu de 2,2% par an, en particulier en Chine et en Inde.

#### **3.2. La révolution verte en Chine : un exemple à suivre**

Il n'y a pas un chemin unique pour atteindre une économie verte. En fait, la stratégie de transition verte est spécifique pour chaque pays et elle dépend de nombreuses caractéristiques, principalement le capital naturel, le capital humain et le niveau de développement du pays. Ces dernières années aussi bien les pays développés que les PED ont connu une augmentation des investissements dans le secteur des ER.

Les efforts déployés par le gouvernement chinois pour rendre l'économie plus verte sont ambitieux et méritent d'être détaillés. Vu que la Chine est le pays qui émet le plus d'émissions de CO<sub>2</sub>, sa décision de suivre le chemin du développement durable est très importante non seulement pour le peuple chinois, mais pour le reste du monde. Le 11<sup>ème</sup> plan quinquennal du gouvernement chinois (2006-2010) a alloué une partie importante des investissements aux secteurs des ER et de l'efficacité énergétique. En fait, selon Nesbitt *et al.* (2011), au cours du 11<sup>ème</sup> plan quinquennal, entre 700 millions de dollars et 1,4

milliards de dollars ont été investis dans les ER avec 50% consacrés à la R&D dans ce secteur. Ces efforts se sont continués avec le 12<sup>ème</sup> plan quinquennal pour stimuler la transition verte et promouvoir les bonnes pratiques environnementales. Il est estimé que l'investissement dans le secteur des ER va augmenter considérablement d'environ 770 milliards de dollars de 2011 à 2020, y compris un montant estimé de 231 milliards de dollars pour l'énergie éolienne (Pan, Ma et Zhang, 2011).

Accroître l'utilisation des ER est au cœur du plan de la Chine pour faire la transition d'une économie « brune » (*brown economy*) à une économie « verte » (*green economy*). En fait, le gouvernement chinois s'est engagé à produire 16% de son énergie primaire à partir de sources renouvelables d'ici 2020 (UNEP, 2010). Quant à l'investissement total dans le secteur des ER, la Chine est devenue *leader*, en 2011, avec 52 milliards de dollars d'investissement. Concernant la capacité installée, près de 20 Gigawatt (GW) de capacité éolienne a été ajoutée en Chine en 2011 (UNEP, FSFM et BNEF, 2012). La transition vers les ER s'avère donc un chemin inévitable pour une économie verte.

## Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté, dans la première section, la nécessité du recours aux ER pour la réalisation d'un développement durable. Nous avons détaillé la revue de littérature sur les impacts positifs des ER sur les trois dimensions du développement durable. En effet, les ER permettent la diminution des émissions de GES, l'amélioration des conditions de vie dans les zones rurales et surtout la création d'emplois. En ce qui concerne la dimension économique, plusieurs études ont montré l'existence d'une relation de causalité entre la consommation ou la production des ER et le PIB.

Dans la seconde section, nous avons mis l'accent sur la nécessité du recours aux ER pour une « reprise verte » après la crise économique. En effet, la récession économique et la gravité du réchauffement climatique sont à l'origine de l'adoption de stratégies de « relance verte » par la communauté internationale. Dans ce cas, la relance de l'économie, après la crise, doit être considérée comme une opportunité pour orienter l'économie vers la « croissance verte ». La Corée du Sud et la Chine ont fait preuve d'une grande volonté d'investir dans les secteurs verts. En effet, la Chine qui est l'un des pays les plus pollués dans le monde a consacré 40% de son plan de reprise économique à des investissements verts tels que les ER.

Ainsi, le secteur des ER est l'un des principaux composants de « la relance verte » vu ses multiples avantages aux niveaux social, économique et environnemental. Mais pour intégrer le secteur des ER dans cette initiative, nous avons besoin d'une stratégie mondiale et cohérente qui prend en compte les caractéristiques aussi bien des pays développés que des PED. Le « nouveau pacte vert mondial » présente un programme cohérent pour éliminer les principaux obstacles à l'expansion des ER et accélérer le processus de diffusion de cette technologie. Le secteur des ER peut être un moteur de « la croissance verte » en améliorant le revenu par habitant et l'emploi dans les pays du monde entier.

Cependant, il n'y a pas seulement des aspects vertueux de « la reprise verte ». En effet, le processus nécessaire pour rendre l'économie plus verte est très coûteux et il fait face à plusieurs barrières. Selon le rapport de l'UNEP (2011), l'investissement annuel nécessaire, pour mettre à vert l'économie mondiale, est estimé entre 1,05 et 2,59 billions de dollars.

La transition verte nécessite aussi un soutien et un support pour plusieurs années, or la crise de la dette souveraine en Europe à la fin de 2011 et les pressions d'austérité dans de nombreux pays constituent une menace pour la poursuite des investissements dans les secteurs verts. Il y a aussi une autre raison qui fait que certains hommes politiques ne sont pas trop motivés pour passer à « l'économie verte ». En fait, les projets d'ER peuvent créer de nombreux emplois, mais ceux de la fabrication, peuvent être dans un autre pays. Ainsi, les avantages de la transition verte ne sont pas répartis uniformément.

Par conséquent, il est clair que l'atteinte d'un développement durable et la « reprise verte » doivent passer obligatoirement par l'expansion du secteur des ER. Ainsi, la transition vers les ER est un chemin inévitable à suivre par tous les gouvernements afin de mettre l'économie globale dans la voie du développement durable et de « la relance verte ». Nous allons voir, dans ce qui suit, comment cette transition vers les ER a été traitée dans la littérature.

## **Chapitre 2. Les approches d'analyse de la transition vers les énergies renouvelables**

### **Introduction**

La recherche d'une croissance économique qui engloutisse moins de matières premières et d'énergie, qui n'entraîne pas la détérioration de l'environnement et qui permet la répartition équitable des richesses a permis la naissance du concept de développement durable. L'énergie par son triple impact économique, environnemental et social est au cœur de la problématique du développement durable. En effet, les combustibles fossiles apparaissent comme une ressource finie induisant des émissions de GES qui affectent l'environnement et causent le changement climatique. L'atteinte d'un développement durable nécessite le développement de nouvelles sources d'énergies qui sont peu polluantes et non épuisables.

Les ER qui sont issues directement ou indirectement du soleil répondent parfaitement à ces critères. En effet, les ER qui sont des solutions locales et non émettrices de GES permettent, à chacun à son niveau, d'affirmer son engagement dans le développement durable et « la croissance verte ». Ainsi, les ER constituent un important secteur témoignant que l'économie peut rimer avec l'environnement. Les ER présentent l'avantage d'accroître la sécurité de l'approvisionnement énergétique, de réduire la menace du changement climatique, de stimuler la croissance économique, de promouvoir l'équité sociale, de contribuer à la création d'emplois, surtout en milieu rural, et de réduire la pauvreté. Vu tous ces avantages, la transition vers les ER s'avère une priorité.

Il est nécessaire de voir la façon avec laquelle la transition vers les ER a été traitée dans la littérature afin de cerner tous les aspects et les caractéristiques de ce processus. Cependant, il y a très peu d'études qui se sont intéressées à une revue des différentes approches et méthodes utilisées pour étudier la transition vers les ER. On peut citer, par exemple, l'analyse faite par Rao et Kishore (2010) dans laquelle ils ont procédé à la classification suivante des travaux existants qui ont étudié la diffusion des ER : l'approche basée sur la courbe d'expérience, l'approche d'analyse économique des ER et leur viabilité par rapport à d'autres alternatives, l'approche basée sur l'analyse des barrières et l'approche basée sur l'analyse des politiques et leurs influences sur l'adoption des ER. Huh et Lee (2014) ont utilisé une classification différente qui est la suivante : l'application des

modèles de diffusion de l'innovation aux ER, l'utilisation des analyses qualitatives afin d'identifier les facteurs qui permettent de promouvoir ou d'entraver la diffusion des ER, l'utilisation des techniques de simulation pour la prévision des tendances futures et les études de diffusion qui utilisent de l'économétrie.

Dans ce chapitre, nous allons utiliser une classification différente de toutes les classifications déjà faites et qui englobe la quasi-totalité des études existantes. Il s'agit de la classification suivante : l'approche de la courbe d'expérience, l'approche de diffusion de l'innovation, l'approche de l'économie de l'environnement, l'approche de l'économie institutionnelle et l'approche psychosociale. Ce chapitre sera consacré à une analyse détaillée de toutes ces approches en mettant l'accent sur leurs apports et leurs limites.

Pour ce faire, ce chapitre sera divisé en deux sections. La première section sera consacrée aux approches technologiques, notamment celle basée sur la courbe d'expérience et celle basée sur le modèle de diffusion de l'innovation. La seconde section traitera plutôt les approches basées sur l'étude des aspects économiques, sociales et institutionnels de la transition vers les ER. Cette section sera consacrée alors aux approches de l'économie de l'environnement, de l'économie institutionnelle ainsi que l'approche psychosociale.

## **Section 1. Approches basées sur l'analyse de diffusion des nouvelles technologies**

Les approches technologiques de la transition énergétique traitent essentiellement deux aspects qui sont les pré-requis technologiques nécessaires pour favoriser l'émergence d'une nouvelle technologie et les causes techniques du "*lock-in*" d'une nouvelle technologie par une technologie plus mature. Ainsi, ces approches de la transition énergétique tentent de fournir un cadre d'analyse pour mieux cerner les changements technologiques nécessaires pour converger vers un système énergétique plus soutenable.

Afin d'étudier le changement technologique en sciences économiques plusieurs concepts ont été utilisés tels que le paradigme technologique, le régime technologique, la trajectoire technologique, les courbes d'apprentissages et d'expériences et les modèles de diffusion de l'innovation.

## **1. Approche de la courbe d'expérience**

Afin de décrire les dynamiques du changement technologique, certains scientifiques utilisent le terme de trajectoire technologique. Par exemple, Kemp (1994) explique la dominance de certaines trajectoires technologiques (telle que la dominance des énergies fossiles par rapport aux ER) par plusieurs facteurs tels que les effets d'apprentissage. L'analyse faite par Kemp (1994) est appliquée dans le cas des ER. En effet, il essaie d'expliquer pourquoi la diffusion des technologies d'ER est à la fois lente et coûteuse. Les effets d'apprentissage expliquent en grande partie cette dominance en indiquant l'évolution dans l'amélioration des caractéristiques d'une technologie et la diminution des coûts qui en découlent. Cette évolution est due à la croissance de l'industrie et le progrès technologique réalisé.

Les courbes d'apprentissages ou d'expériences sont largement utilisées dans l'ingénierie. Le principe derrière ces courbes est simple : avec l'augmentation de la production, le coût unitaire a tendance à diminuer et ceci est dû aux économies d'échelle, à la standardisation des produits, aux améliorations dans le processus et à l'apprentissage par la pratique en industrie. Appliquées aux technologies d'ER, les effets d'apprentissage expliquent pourquoi ces technologies ont souffert, au début, d'une mauvaise performance et ont eu des avantages limités par rapport aux énergies fossiles. Cependant, avec les années et la croissance de l'industrie, la diffusion s'est accélérée vu que les coûts ont diminué et les caractéristiques techniques se sont améliorées.

Les courbes d'apprentissage et d'expérience sont largement utilisées pour étudier les processus de diffusion des technologies des ER. Le concept de la courbe d'apprentissage représente le progrès technologique associé à une technologie. Ce progrès est réalisé grâce aux améliorations induites par l'expérimentation, la mise en œuvre et les activités de R&D dans l'ensemble du processus de production.

Les études empiriques qui traitent la réduction des coûts de fabrication d'une technologie avec l'expérience acquise ont commencé avec les travaux de Wright (1936). Il a été préoccupé surtout par les opérations d'assemblage et s'est intéressé à l'analyse du taux d'apprentissage concernant les coûts de la main d'œuvre. Il a estimé la relation entre le nombre total des heures de travail et la production cumulée dans le secteur aéronautique. Son approche méthodologique a été utilisée, par la suite, dans différentes études telles que celles de Hirsch (1952) et Alchian (1963) pour analyser d'autres industries.

De nos jours, les études qui utilisent le taux d'apprentissage s'intéressent à modéliser la relation entre le coût de fabrication et le volume cumulé fabriqué. Les études contemporaines utilisent souvent les termes « expérience » et « apprentissage » de façon interchangeable, mais à vrai dire une courbe d'apprentissage utilise le total des heures de travail comme une variable dépendante tandis qu'une courbe d'expérience utilise le coût total (Papineau, 2006).

L'introduction du concept de l'apprentissage technologique dans la littérature économique a été faite avec les travaux d'Arrow (1962). Mais par la suite, le concept de la courbe d'expérience a été décrit d'une manière fréquente dans la littérature (Argote et Epple, 1990 ; Boston Consulting Group, 1968). En effet, l'observation empirique a montré que les coûts ont tendance à diminuer avec un taux presque fixe suite à tout doublement de la production cumulée. Selon Junginger *et al.* (2005, p.402), cette relation peut être décrite mathématiquement par le moyen de la formule suivante :

$$C_{Cum} = C_0 Cum^b$$

$$RP = 2^b$$

Avec :

$C_{Cum}$  : le coût par unité,

$C_0$  : le coût de la première unité produite,

Cum : la production cumulée,

b : l'indice d'expérience (<0),

RP : le ratio de progrès,

1-RP : le taux d'apprentissage

« RP » désigne le ratio de progrès, exprimant le taux de déclin du coût unitaire à chaque doublement de production cumulée. Par exemple un ratio de progrès de 0,7 implique que, suite au doublement de la production cumulée, les coûts unitaires sont réduits à 70% des coûts d'origine, à savoir une diminution des coûts de 30%. La définition de « l'unité » peut varier selon les cas étudiés : dans de nombreux cas un appareil est une unité (par exemple une voiture ou un avion). En ce qui concerne les technologies de l'énergie, le plus souvent l'unité est la capacité énergétique d'une technologie (par exemple

la capacité d'un module solaire ou d'une éolienne) ou la quantité d'électricité produite par une technologie.

### **1.1. L'application des courbes d'expérience dans l'analyse de la transition vers les énergies renouvelables**

Ces dernières années, plusieurs auteurs ont utilisé l'analyse par la courbe d'expérience dans leurs recherches concernant l'évolution des coûts des technologies des ER. En effet, la transition vers un système énergétique durable nécessite le développement et le déploiement de technologies nouvelles et améliorées d'énergie. Ces technologies ont souvent un coût d'investissement plus élevé que les technologies d'énergie traditionnelle. Ainsi, les coûts de ces nouvelles technologies doivent être réduits pour qu'elles puissent être mises en œuvre à grande échelle. Il est donc important d'analyser l'évolution des coûts des technologies des ER pour faciliter les décisions concernant les investissements futurs et la conception de nouveaux systèmes énergétiques. Ceci nécessite l'utilisation de méthodes d'analyse de la dynamique du changement technologique et d'évolution des coûts.

Les courbes d'expérience offrent un moyen d'analyse de l'évolution passée des coûts qui sera adoptée pour prévoir le développement futur des coûts. Les données historiques sur l'évolution des coûts sont utilisées pour développer une courbe d'expérience, c'est-à-dire pour décrire le coût en fonction du nombre cumulé d'unités. Cette courbe est ensuite extrapolée afin de prédire le développement futur des coûts. Pour plus de détails concernant l'utilisation de la courbe d'expérience dans le secteur de l'énergie voir, par exemple, IEA (2000) et Neij (2004).

L'approche basée sur la courbe d'expérience permet l'analyse du développement du coût passé des technologies. Selon ce concept, le développement du coût d'un produit ou d'une technologie est étudié comme une fonction de la production cumulée. Dans le domaine des ER, la courbe d'expérience a été utilisée surtout pour l'analyse du progrès réalisé dans la réduction des coûts de production des modules PV (Matsson et Wene 1997 ; Masini et Frankl, 2003 ; Yu, Sark et Alsema, 2011) et les turbines éoliennes *onshore* et *offshore* (Neij, 1997 ; 1999 ; Milborrow, 2008 ; Berry, 2009 ; Blanco, 2009 ; Bolinger et Wiser, 2009 ; Dinica 2011). Il y a peu d'études qui s'intéressent à d'autres types d'ER vu la non disponibilité des données concernant les technologies qui sont très récentes.

McDonald et Schrattenholzer (2001) ont présenté un aperçu général sur les différentes utilisations de la courbe d'expérience dans le domaine des technologies des ER.

En effet, ces dernières années, on a assisté à une augmentation de l'utilisation des courbes d'expérience dans le cadre des modèles *bottom up* d'énergie (par exemple, le modèle MARGE) avec apprentissage endogène. Ainsi, il est important que les analyses de scénarios énergétiques fournissent des taux d'apprentissage fiables. Mais empiriquement, on remarque que les taux d'apprentissage trouvés diffèrent largement selon les études, ce qui aura des répercussions sur les politiques et les instruments à adopter. En effet, McDonald et Schrattenholzer (2001) ont montré que le taux d'apprentissage des éoliennes varie entre 8% et 18% selon les études. Ces différences existent aussi pour d'autres technologies. Plusieurs études ont essayé d'expliquer ces différences. Par exemple, Ibenholt (2002) a essayé d'analyser les causes des variations dans les estimations des taux d'apprentissage pour la technologie d'énergie éolienne.

Les courbes d'apprentissage sont utilisées afin de quantifier empiriquement l'impact de l'expérience et de l'apprentissage sur le coût d'une technologie donnée. La spécification la plus simple et la plus utilisée de la courbe d'apprentissage dans les études des technologies des ER relie le coût de la technologie à la capacité installée cumulée (Neij, 1999 ; Colpier et Cornland, 2002).

D'autres études plus récentes incluent dans la formulation de la courbe d'apprentissage les dépenses cumulées de R&D (Kouvaritakis *et al.*, 2000) ou le stock de connaissance basé sur la R&D (Klaassen *et al.*, 2005 ; Söderholm et Klaassen, 2007) comme étant des variables explicatives. Ces spécifications sont généralement connues sous l'appellation de modèles de courbes d'apprentissage à deux facteurs et ils permettent d'avoir une estimation du taux d'apprentissage par la recherche. Ce taux montre l'impact du doublement de la valeur des variables qui reflètent la R&D sur les coûts.

Pour les technologies d'ER de production de l'électricité, le système global d'apprentissage de la production de l'électricité peut être appréhendé en trois parties selon le type de coût : les coûts d'investissement, les coûts opérationnels et de maintenance et les coûts de l'électricité. Pour chaque type de coûts, un système d'apprentissage séparé peut être défini. Pour les coûts d'investissements, la courbe d'expérience est la plus difficile à construire vu la faible disponibilité des données et le grand écart dans les coûts d'investissement causé par la différence de configuration des installations des ER. Concernant les coûts opérationnels et de maintenance, ils sont généralement élevés dans la première phase de développement d'un projet d'ER, ils diminuent au cours des années

suivantes mais augmentent après plusieurs années avec l'usure des équipements et des installations.

Selon Junginger *et al.* (2005), il y a plusieurs facteurs qui sont à l'origine de la réduction des coûts : l'apprentissage par la pratique, l'apprentissage par la recherche (les innovations causées par la R&D), l'amélioration des interactions de réseau (entre les instituts de recherche, l'industrie, les utilisateurs finaux, les décideurs, etc.), la standardisation du produit ou de la technologie et la nouvelle conception de la technologie. Dans plusieurs cas, une combinaison de ces facteurs peut avoir lieu, mais la contribution de chaque facteur peut changer au cours du temps selon la phase du développement de la technologie. Plusieurs auteurs font la différence entre les effets d'apprentissage (les trois premiers facteurs) et les effets d'échelle (les deux derniers facteurs).

L'utilisation des courbes d'expérience doit prendre en considération les points suivants :

- Historiquement, les courbes d'expérience ou les courbes d'apprentissage ont été utilisées pour analyser la réduction des coûts par unité de produit standardisé produite par une entreprise individuelle. Aujourd'hui, les courbes d'expérience sont utilisées pour l'analyse et les prévisions des coûts de produits non standardisés produits dans le monde ou à l'échelle nationale. Cela conduit à des incertitudes et à des variations dans les résultats. Cet inconvénient est rarement abordé dans l'analyse critique de la courbe d'expérience, malgré le fait qu'il puisse avoir un impact considérable sur les résultats de l'analyse (van der Zwaan et Seebregts, 2004).
- Afin de comparer les coûts passés aux coûts courants, l'analyse doit prendre en considération l'inflation, donc on utilise le déflateur du PIB ou l'indice des prix à la consommation.
- La courbe d'expérience présente idéalement la réduction des coûts de production. Cependant, en général ces coûts ne sont pas disponibles, dans ce cas, on peut utiliser les prix mais avec des restrictions. En effet, les marges de profit doivent être une part assez constante des prix totaux (IEA, 2000), dans ce cas les prix et les coûts diminuent avec la même vitesse. Ceci sera le cas seulement lorsque le nombre de producteurs, l'élasticité de la demande et le retour sur fonds propres pour les producteurs restent constants. Cependant, les changements dans la structure du marché tels que l'accès au marché et la concurrence stratégique (l'existence d'un oligopole, par exemple) auront une incidence sur les marges (Papineau, 2006).

- Dans le cas où l'accent est mis sur l'analyse de la vitesse avec laquelle les coûts d'une technologie diminuent, il est très important de déterminer si l'expérience a été gagnée seulement à partir du développement intérieur du système étudié ou bien aussi à partir des développements à l'extérieur du système. La non-prise en compte de l'expérience gagnée à l'extérieur du système étudié peut donner lieu à une distorsion des résultats (Junginger, Faaij et Turkenburg, 2005).

## **1.2. Les avantages de l'approche de la courbe d'expérience**

En dépit des points précités, la littérature consacrée à la courbe d'expérience dans le domaine des technologies des ER ne cesse d'augmenter et ceci est dû en grande partie aux multiples atouts de cette approche :

- La courbe d'expérience permet d'illustrer le taux approximatif de réduction des coûts pour les différents types de technologies d'ER.
- L'intégration des courbes d'expérience dans les modèles de l'énergie a rendu plus faciles l'intégration du changement technologique dans l'analyse des systèmes énergétiques et la planification de scénario (Mattson et Wene, 1997 ; Messner, 1997).
- Les courbes d'expérience illustrent clairement la nécessité d'un marché initial afin de réduire les coûts. Ce marché fournit des occasions d'apprentissage qui permettent des réductions de coûts.

Bien que la courbe d'expérience ait des avantages multiples et irréprochables, l'utilisation de cette approche pour l'analyse de l'évolution des coûts a été critiquée dans plusieurs travaux (Neij, 2004 ; Nemet, 2006 ; Söderholm et Sundqvist, 2007 ; Nordhaus, 2009).

## **1.3. Les limites de l'approche de la courbe d'expérience**

Tout d'abord, nous allons mettre l'accent sur les principales limites et critiques adressées à cette approche pour passer, ensuite, aux manières de les dépasser. Selon certains experts, l'analyse basée sur les courbes d'expérience aura plus de sens si chaque source de réduction des coûts est identifiée et analysée séparément (Hall et Howell, 1985 ; Nemet, 2006). En effet, dans la plupart des cas, les forces motrices de réduction des coûts ne sont pas identifiées clairement et l'utilisation du concept de la courbe d'expérience est basée sur une approche agrégée de l'analyse des réductions de coûts.

Une autre critique a été adressée par Neij (2008) qui considère que les courbes d'expérience sont utilisées, souvent, pour prévoir l'évolution des coûts à long terme, par exemple 50 ans. Toutefois, cela n'est pas approprié puisque la courbe d'expérience est un outil d'analyse de tendance et ne convient que pour l'analyse des technologies existantes et des prévisions à moyen terme. Cela signifie que l'utilisation des courbes d'expérience et des outils d'analyse des tendances similaires n'est possible que dans des conditions de faible incertitude et pour des séries d'innovations progressives.

Söderholm et Sundqvist (2007) ont procédé à une critique concernant le choix de la modélisation et des estimations dans les analyses de courbes d'apprentissage. Ainsi, ils identifient et analysent un certain nombre de problèmes théoriques et économétriques liés aux estimations des courbes d'apprentissage. Afin d'illustrer l'importance des problèmes cités, les auteurs comparent les résultats de différentes spécifications de modèles en utilisant le même ensemble de données de panel concernant les coûts d'investissement dans l'énergie éolienne, dans 4 pays européens durant la période 1986-2000. Les résultats de cette comparaison montrent que les estimations des taux d'apprentissage varient largement selon les spécifications des modèles et les approches économétriques utilisées.

Dans ce qui suit, nous allons mettre l'accent sur les critiques adressées par Söderholm et Sundqvist (2007) aux études existantes qui estiment les courbes d'apprentissage en utilisant des techniques économétriques. Ces critiques sont les suivantes :

- Les auteurs choisissent, en général, la capacité cumulée comme un indicateur de l'apprentissage par la pratique, mais ce choix pose des problèmes. En effet, cette variable se caractérise par une forte tendance à la hausse au fil du temps. A ce stade une question se pose : est ce que la capacité cumulée reflète l'impact spécifique des activités d'apprentissage par la pratique ou reflète-elle plutôt un progrès technique général exogène ? La même remarque est faite aussi pour les variables utilisées comme indicateurs de l'apprentissage par la recherche. Söderholm et Sundqvist (2007) proposent comme solution à cette ambiguïté l'inclusion d'une tendance temporelle dans le modèle.
- Concernant l'apprentissage par la recherche et vu l'indisponibilité des données, les études existantes intègrent seulement la R&D publique. La prise en compte de la R&D privée est un important défi à relever dans des études futures, surtout que dans le domaine des ER les activités de R&D faites par les entreprises privées sont énormes.

Cependant, la prise en compte de la R&D publique et privée peut aboutir à un problème de double comptage (*double counting*), vu que dans plusieurs pays un soutien public à la R&D est utilisé pour promouvoir des entreprises privées et faire des projets de démonstration.

- L'importance du recours à des analyses de sensibilité en considérant, par exemple l'impact de la suppression de certaines observations de l'échantillon ou bien l'essai de différentes définitions des variables.
- En général, les modèles de courbe d'apprentissage n'intègrent pas le changement de la politique du gouvernement durant la période considérée. Cependant, le changement de la politique de soutien adoptée par le gouvernement pour accélérer la diffusion des ER peut aussi affecter les activités d'apprentissage. Ceci est en harmonie avec les critiques de Lucas (1976). En effet, il critique le fait d'utiliser un modèle économétrique approprié pour une période de temps afin de prédire ce qui va se passer dans le futur en dépit de l'existence de politiques différentes.

Plusieurs études récentes ont essayé de prendre en considération la plupart des critiques avancées dans les travaux de Nemet (2006), Söderholm et Sundqvist (2007) et Nordhaus (2009). On peut citer, dans ce cadre, l'étude faite par Neij (2008) qui propose d'utiliser la courbe d'expérience avec d'autres méthodes. En effet, la seule façon d'améliorer l'utilisation des courbes d'expérience serait de les combiner avec des méthodes de prévision des coûts. Cet article présente un cadre analytique pour l'analyse du développement des coûts futurs des nouvelles technologies d'énergie pour la production de l'électricité. Le cadre d'analyse est basé sur une évaluation des courbes d'expérience disponibles, complétée par une analyse *bottom-up* des sources de réductions des coûts et, pour certaines technologies, des évaluations d'experts concernant les voies de développement à long terme.

Une autre étude plus récente est faite par Lindman et Söderholm (2012). Cette étude a deux principaux objectifs. Le premier consiste à fournir une revue des spécifications des modèles de courbes d'apprentissage. Le second objectif est d'effectuer une méta-analyse des taux d'apprentissage d'énergie éolienne. Cela permet de faire une évaluation d'un certain nombre de spécifications et de données importantes qui pourraient avoir une influence sur ces taux d'apprentissage. L'analyse économétrique repose sur 113 estimations du taux d'apprentissage par la pratique présentées dans 35 études. La méta-analyse indique que le choix du domaine géographique de l'apprentissage, et donc la présence supposée de

retombées d'apprentissage, est un déterminant important des taux d'apprentissage d'énergie éolienne. Lindman et Söderholm (2012) ont constaté également que l'utilisation des extensions de modèles de la courbe d'apprentissage, par exemple l'intégration des effets de R&D publique, semble conduire à des taux d'apprentissage plus faibles que ceux générés par les modèles de courbe d'apprentissage à facteur unique. Globalement, les résultats empiriques suggèrent que les études futures devraient accorder une attention accrue à la question des retombées de l'apprentissage et de la connaissance dans le domaine des ER ainsi qu'à l'interaction entre l'apprentissage de la technologie et les efforts de R&D.

Bolinger et Wiser (2012) ont étudié l'évolution des prix des turbines aux États-Unis entre 1997 et 2010. Les auteurs partent du constat suivant : le prix moyen des turbines a passé d'à peu près 1600 dollars par KW en 1997 à un prix moyen aux alentours de 750 dollars par KW, durant la période 2000-2002. Mais à partir de 2002, les prix moyens des turbines ont commencé à croître jusqu'à atteindre un pic de 1500 dollars par KW en 2008 qui est la date à partir de laquelle les prix ont commencé de nouveau leur déclin.

En utilisant une analyse *bottom-up*, les auteurs ont analysé 7 inducteurs des prix (*price drivers*) des turbines aux États-Unis, afin d'essayer d'estimer le degré avec lequel chaque inducteur a contribué au doublement des prix des turbines de 2002 jusqu'à 2008 ainsi que le déclin jusqu'à 2010. Les 4 premiers inducteurs de prix étudiés sont considérés comme des facteurs avec une influence endogène puisqu'ils sont en grande partie sous le contrôle de l'industrie éolienne. Ces inducteurs de prix incluent les changements dans les coûts du travail, les clauses de garantie, les marges de profit des fabricants des turbines et la taille des turbines. Les trois autres inducteurs de prix peuvent être considérés comme étant des facteurs exogènes puisqu'ils ne sont pas sous le contrôle de l'industrie éolienne. Ces inducteurs sont les suivants : les prix des matières premières, le prix de l'énergie et le taux de change.

En terme agrégé, les facteurs cités ci-dessus ont expliqué presque 600 dollars par KW de l'augmentation totale d'à peu près 750 dollars par KW dans les prix moyens des turbines, durant 2002-2008, et presque 90 dollars par KW de la décroissance d'à peu près 195 dollars par KW en 2009 et 2010. Selon cette analyse il n'y a pas un seul facteur dominant qui a conduit aux changements dans les prix. Par ailleurs, il y a des facteurs qui ont des influences plus importantes que les autres tels que la taille des turbines et les variations des taux de change. Les prix des matériaux et le coût du travail ont aussi un impact assez important.

Qiu et Anadon (2012) ont utilisé le modèle de la courbe d'apprentissage afin d'estimer l'apprentissage dû à la fois à l'apprentissage par la pratique et à l'apprentissage par la recherche. Il s'agit de la première étude qui décrit l'évolution du prix de l'énergie éolienne, en Chine, et qui fournit des estimations sur l'influence de plusieurs facteurs sur le prix de l'énergie éolienne. Les facteurs étudiés sont les suivants : l'adoption de la technologie, l'expérience dans la construction des projets éoliens, la localisation de la fabrication des turbines et les économies d'échelle des parcs éoliens. Le modèle de la courbe d'apprentissage présenté comprend plusieurs variables importantes de contrôle, à savoir les indicateurs des ressources éoliennes et le prix de l'acier. Les résultats indiquent que l'apprentissage dû à l'adoption de la technologie et l'apprentissage par la pratique grâce à une capacité installée cumulée, la localisation de la fabrication des turbines et les économies d'échelle des parcs éoliens comprennent les trois facteurs les plus importants associés à une réduction du prix de l'énergie éolienne, en Chine, au cours de la période considérée. Les deux types d'apprentissage étudiés sont associés à 4,1% et 4,3% de réduction de prix suite à chaque doublement de la capacité installée. Ce modèle indique également que la grande part de l'apprentissage sur l'installation et l'exploitation des parcs éoliens est commune à l'ensemble de l'industrie (par exemple, ils ont trouvé peu de preuves pour l'apprentissage intra-entreprise).

Partridge (2013) a estimé le taux du déclin des coûts de production des ER dû à l'effet d'apprentissage. Son étude concerne l'énergie éolienne et les petites centrales hydroélectriques en Inde. Le modèle utilisé est la courbe d'expérience à facteur unique (*Single Factor Experience Curve* : SFEC) dans lequel le coût est relié seulement à la capacité installée cumulée. Les résultats trouvés montrent que le coût de production de l'énergie éolienne a diminué de 17,7% pour chaque doublement de la capacité installée cumulée de production d'énergie éolienne. Concernant les petites centrales hydrauliques, il n'y a pas d'effet significatif d'apprentissage. Ensuite, les estimations ont été utilisées afin de faire des projections des coûts de production des ER, en Inde à l'horizon 2020. Ainsi, pour l'énergie éolienne, en se basant sur l'objectif fixé d'atteinte de 30 000 MW en 2020, la diminution prévue du coût de production entre 2012 et 2020 sera de 15,4%. Partridge (2013) a pris en considération les faiblesses de cette approche telles que citées dans les travaux de Söderholm et Sundqvist (2007) ainsi que Nordhaus (2009) afin d'améliorer les projections des coûts. Pour ces raisons il a ajouté une tendance temporelle dans le modèle.

MacGillivray *et al.* (2014) ont utilisé la courbe d'apprentissage améliorée par une analyse de sensibilité. Cette étude met en évidence la sensibilité de l'énergie marine à trois paramètres clés : le coût en capital des premiers dispositifs, le niveau de déploiement avant que la réduction soutenue des coûts émerge et le taux moyen de la réduction des coûts dû au déploiement (taux d'apprentissage). En considérant les coûts actuels et prévus de l'éolien *offshore* comme une référence, les auteurs essaient de montrer les défis de la commercialisation de l'énergie marine tels que l'apprentissage par l'investissement, les incertitudes et les sensibilités mises en jeu et les priorités de la stratégie d'innovation de l'énergie marine.

Bien que les études récentes aient pris en considération la plupart des critiques adressées à l'approche de la courbe d'expérience, ils restent encore plusieurs défis à relever dans l'utilisation de cette approche tels que la prise en compte de la R&D privée et les changements de politique de soutien des ER adoptée par le gouvernement.

Malgré tous les défis et les ambiguïtés qui accompagnent l'utilisation des courbes d'expériences dans le domaine de la transition vers les ER, elles nous permettent, néanmoins, de dégager les constatations suivantes :

**Les courbes d'expérience illustrent clairement la nécessité d'un marché initial afin de réduire les coûts. Ce marché fournit des occasions d'apprentissage (par la pratique, par la R&D, par l'amélioration des interactions de réseau, par la standardisation de la technologie, etc.) qui permettent la réduction des coûts. Ces marchés pourraient être développés par les adoptants précoces "early adopters", les marchés de niche ou les mesures de politiques gouvernementales qui appuient l'expansion du marché. Au fil du temps, les technologies d'ER avec un coût initial élevé peuvent être compétitives avec les technologies d'énergies fossiles déjà établies. Ainsi, les effets d'apprentissage et d'expérience diminuent les coûts et accélèrent le processus de diffusion des ER.**

## **2. Approche basée sur les modèles de diffusion de l'innovation**

Everett Rogers, qui est un grand sociologue, est l'auteur de la théorie de la diffusion de l'innovation qui est expliquée dans son ouvrage "*Diffusion of Innovations*" paru en 1962. Dans cet ouvrage, il étudie le processus d'adoption des innovations par les réseaux de personnes. Ainsi, Rogers (1962) a formulé les fondements théoriques sur le sujet de

diffusion de l'innovation. En fait, il a considéré qu'il existe deux principales sources de la diffusion de l'innovation qui sont les media et les canaux interpersonnels.

Rogers (1962) a présenté le processus de diffusion d'une innovation sous la forme d'une courbe de diffusion appelée courbe en S ou courbe en cloche qui intègre plusieurs profils de consommateurs qui varient selon la phase du processus d'adoption. La courbe en cloche de Rogers représente 5 différents profils de consommateurs qui sont : les innovateurs, les adoptants précoces, la majorité précoce, la majorité retardée et enfin les retardataires.

Les idées de Rogers ont été modélisées sous forme mathématique par Bass (1969) qui s'est intéressé à la diffusion des nouveaux produits dans le domaine du marketing. En effet, la modélisation de la diffusion des innovations a suscité un intérêt grandissant dans le domaine de l'économie et du marketing.

Le modèle de Bass est conçu, en 1969, afin de combiner l'effet d'imitation et celui d'innovation dans la stratégie de diffusion d'un nouveau produit. De ce fait, il a procédé à la distinction entre deux types de comportements dans le processus d'adoption d'un produit nouveau : le comportement « innovateur » et le comportement « imitateur ». Dans le premier cas, aucune influence des adoptants précédents n'est exercée, l'adoption est déclenchée seulement suite à l'influence des actions externes au système social. Par contre, « les imitateurs » adoptent l'innovation sous l'influence du comportement « des innovateurs ».

Le modèle de diffusion de Bass tel que présenté par Mahajan, Muller et Bass (1990, p.4) est décrit par l'équation ci-dessous qui explique l'augmentation temporelle du nombre total d'adoptants :

$$n(t) = \frac{dN(t)}{dt} = \left[ p + q \frac{N(t)}{m} \right] [m - N(t)]$$

Avec :

p : coefficient de communication externe ou coefficient d'innovation,

q : coefficient de communication interpersonnelle ou coefficient d'imitation,

N(t) : le nombre cumulé d'adoptants à la date t,

m : le nombre total d'individus qui adopteront l'innovation (le marché potentiel),

n(t) : le nombre d'adoptants à la date t.

Au début, le modèle de Bass a été surtout appliqué dans le domaine du marketing pour étudier le phénomène de diffusion des biens durables (une lave vaisselle, un téléviseur, etc.). Avec les années, son application s'est étendue à plusieurs autres domaines comme l'économie et il commence à traiter des différents types de biens et de technologies.

Le modèle de Bass a connu beaucoup de succès depuis la date de sa publication. Mahajan, Muller et Bass (1990) ont indiqué l'existence de plus de 150 publications qui concernent des applications et des extensions du modèle de Bass. De nos jours, le nombre d'études qui utilisent ce modèle ou des améliorations de ce modèle sont innombrables. En effet, la simplicité de ce modèle a contribué largement à son succès, mais a suscité aussi une large vague de critiques qui se poursuit jusqu'à nos jours. Parmi les limites signalées, on peut citer :

- La possibilité d'avoir des prévisions biaisées surtout si elles sont faites au début du cycle de vie d'un produit ou d'une technologie. En effet, l'indisponibilité des données conduit souvent à une estimation erronée des paramètres du modèle.
- Ce modèle néglige l'impact des actions de marketing ainsi que des facteurs liés à la conjoncture économique sur le processus de diffusion.
- Ce modèle simplifie trop la réalité en supposant que le coefficient d'innovation « p » et le coefficient d'imitation « q » sont constants tout au long du processus de diffusion. Cette simplification affectera, sans doute, la qualité des prévisions.
- Le marché potentiel « m » est aussi considéré constant, tout au long du processus de diffusion, ce qui est loin d'être vrai puisque le nombre d'adoptants potentiels ne cesse de changer selon les caractéristiques de l'innovation et aussi selon les préférences de la population.
- Il n'y a aucune prise en compte des facteurs politiques, stratégiques ou commerciaux dans la modélisation ce qui constitue une représentation très simplificatrice de la réalité.

Vu ces multiples critiques, une littérature abondante a été consacrée au dépassement de ces limites en introduisant d'autres variables et en améliorant le modèle. En effet, malgré que le modèle de Bass (1969) montre une certaine exactitude des prévisions en le comparant à d'autres modèles de diffusion, il a quelques limitations dues à plusieurs hypothèses sous-jacentes qui sont très restrictives. Pour surmonter ces limites, plusieurs modèles d'extensions ont été développés. Des exemples typiques de ces extensions sont les modèles qui envisagent que le prix a une influence sur les facteurs internes (Horsky, 1990 ;

Jain et Rao, 1990 ; Bass, Krishnan et Jain, 1994) ou qui intègrent la concurrence entre les technologies dans le modèle (Eliashberg et Jeuland, 1986 ; Peterson et Mahajan, 1978 ; Hahn *et al.*, 1994). D'autres modèles reflètent l'effet des circonstances économiques contemporaines (Frank, 2004) ou examinent l'effet des contraintes d'approvisionnement sur les modes de diffusion (Jain, Mahajan et Muller, 1991 ; Ho, Savin et Terwiesch, 2002).

Il est à noter qu'en plus du modèle de Bass, il existe d'autres modèles pour l'étude de la diffusion d'innovation, notamment le modèle épidémiologique, le modèle Probit et le modèle Bayésien.

## **2.1. L'application des modèles de diffusion de l'innovation dans l'analyse de la transition vers les énergies renouvelables**

Les applications des modèles de diffusion de l'innovation dans le domaine des technologies d'ER sont limitées en comparaison de l'approche de la courbe d'expérience. Cependant, avec l'attention croissante accordée à la diffusion des ER durant ces dernières années, de nombreuses études ont appliqué les modèles de diffusion au secteur des ER afin de prévoir leurs modèles de croissance future. On peut citer, par exemple l'étude de Rao et Kishore (2010) qui ont présenté une revue de littérature des différents modèles de diffusion et leur applicabilité à l'analyse de diffusion des technologies des ER.

Purohit et Kandpal (2005) ont analysé les tendances de diffusion de quatre types de technologies d'ER pour le pompage de l'eau d'irrigation en Inde. Les auteurs ont analysé les futurs processus de diffusion en utilisant les modèles suivants : Bass, Gompertz, logistique et Pearl. Ils ont montré que le potentiel des technologies d'ER est atteint le plus rapidement dans le cas du modèle logistique, alors que la diffusion en suivant le modèle de Gompertz est la plus lente. Les deux modèles restants, c'est-à-dire Bass et Pearl représentent une tendance de diffusion intermédiaire par rapport aux deux premiers. Les auteurs ont conclu que, dans le cas de l'Inde, même avec des hypothèses très optimistes, la diffusion des technologies des ER pour le pompage de l'eau d'irrigation ne peut pas atteindre son potentiel maximum estimé dans 25 ans.

Rao et Kishore (2009) se sont intéressés aussi au cas de l'Inde en étudiant les modèles de diffusion de la technologie de l'énergie éolienne, dans plusieurs États indiens, tout en appliquant le modèle de Bass. Les données à l'échelle des États concernant la capacité installée cumulée de l'énergie éolienne sont utilisées pour classer la diffusion dans quatre États. L'indice composite de politique (*Composite Policy Index*) de chaque État est

calculé afin de prouver l'existence d'une corrélation générale entre cet indice et les paramètres de diffusion. Il a été constaté que le modèle de diffusion fournit une bonne base non seulement pour l'étude des marchés de produits de consommation, mais aussi pour l'étude des équipements à forte intensité de capital tels que les générateurs dans le cas de l'énergie éolienne.

Guidolin et Mortarino (2010) ont examiné l'effet du facteur institutionnel et son interaction avec la diffusion des sources d'ER en utilisant le Modèle Généralisé de Bass (MGB). Les auteurs ont modélisé la fonction d'intervention du MGB à travers deux types de fonction de choc : une perturbation drastique a été décrite par une fonction exponentielle alors qu'une perturbation plus stable a été décrite par une fonction rectangulaire. Ils ont analysé les modèles de diffusion du solaire PV pour les onze pays sélectionnés afin de choisir un modèle adapté à chaque pays parmi les différentes variantes du modèle de Bass. Leur analyse a porté uniquement sur les marchés domestiques du solaire PV, sans prendre en compte la dynamique concurrentielle avec d'autres sources d'ER.

Valle et Furlan (2011) ont utilisé un modèle similaire à celui de Guidolin et Mortarino (2010) tout en introduisant les effets d'incitation comme étant des dynamiques exogènes dans le MGB afin d'expliquer les cycles de vie de l'énergie éolienne, aux États-Unis et dans certains pays européens. Les interventions externes représentées par deux fonctions de choc différentes ont été incorporées dans le MGB. Avec ce MGB modifié, les auteurs ont pu identifier les politiques qui correspondent au choc individuel et son impact sur la diffusion de la technologie de l'énergie éolienne. Ils ont également trouvé que, parmi plusieurs modèles de diffusion, le MGB a eu la meilleure performance en matière de précision des prévisions.

Harijan *et al.* (2011) ont fait des prévisions concernant la diffusion de l'énergie éolienne sur le marché pakistanais, jusqu'à 2030, en utilisant le modèle logistique et une approche analogue aux expériences en Inde. Trois scénarios de politique (standard, modéré et optimiste) ont été utilisés afin de prévoir les tendances de diffusion. Ils ont montré qu'environ 42%, 58% et 73% du potentiel du pays pour la production d'énergie éolienne pourrait être exploité en 2030 selon chaque scénario.

Davies et Diaz-Rainey (2011) ont analysé la diffusion de l'énergie éolienne, dans 25 pays de l'OCDE, en testant plusieurs propositions relatives au modèle logistique et au

modèle de Bass. Les auteurs ont examiné la différence entre les modèles de diffusion induits qui intègrent les outils et les mécanismes d'intervention de l'État et les modèles de diffusion classiques avec aucune intervention. Ils ont montré comment les effets de la diffusion induite pourraient être modélisés grâce à une série d'analyses et ils ont suggéré plusieurs implications politiques pour amorcer la diffusion de l'énergie éolienne. Ils ont souligné que, dans des études de cas plus détaillées spécifiques à un pays, il serait souhaitable d'intégrer des facteurs tels que les prix relatifs des facteurs et les technologies concurrentes.

En plus des travaux mentionnés ci-dessus, il est nécessaire de résumer brièvement d'autres recherches sur la diffusion des technologies d'ER. Chen, Chen et Lee (2010) ont analysé le cycle de vie technologique de l'hydrogène et des piles à combustible en intégrant des analyses bibliométriques et des analyses de brevet dans le modèle logistique. Purohit et Michaelowa (2007) et Purohit (2008 ; 2009) ont utilisé le modèle logistique pour estimer le potentiel du mécanisme de développement propre pour la cogénération de bagasse, les petits projets hydroélectriques et les projets de gazéification de biomasse. Lund (2006) a analysé les taux de pénétration du marché de onze différentes technologies énergétiques nouvelles en utilisant le modèle d'influence interne (*Internal Influence Model*). Tous ces articles sont de bons exemples de recherches sur les technologies des ER en utilisant des modèles de diffusion de l'innovation.

Parmi les études les plus récentes et les plus élaborées dans le domaine de l'étude de la diffusion des technologies des ER, on peut citer celle de Huh et Lee (2014). Les auteurs partent du constat suivant : les modèles de diffusion de l'innovation qui étudient les ER ne prennent pas en compte la concurrence entre les différents types d'ER, c'est pour cela que cette étude intègre la concurrence entre cinq types d'ER afin de faire des prévisions plus précises. En effet, une prévision précise de la demande d'une technologie est très importante non seulement pour la finalisation de la stratégie d'une entreprise, mais aussi pour l'élaboration d'une politique nationale. Dans cette étude, la méthode utilisée pour la prévision de la demande et du modèle de croissance des ER est développée sur la base d'un modèle de diffusion de l'innovation. De ce fait, cette méthode se base sur deux étapes de prévision de la demande. La première étape est une estimation du coût actualisé de l'énergie (*Levelized Cost of Energy* : LCOE) de chaque type d'ER, qui est considéré comme un facteur clé de la concurrence. La fonction de prix de Bayus (1993) est utilisée pour l'estimation et la prévision du LCOE. La seconde étape est la prévision des modèles

de croissance des 5 types d'énergie étudiées en utilisant le modèle de diffusion modifié de Hahn *et al.* (1994) qui utilise le LCOE prévu comme une variable.

Bien que l'étude faite par Huh et Lee (2014) soit très bien élaborée, elle présente néanmoins des limites comme toute autre modélisation. En effet, cette étude n'a pas tenu compte des interventions de l'État qui peuvent affecter l'offre des sources d'ER. Elle a plutôt mis l'accent sur le cadre conceptuel et méthodologique et la modélisation en parcimonie. Cependant, la politique du gouvernement affecte fortement la diffusion des sources d'ER. Il est donc recommandé de prévoir la demande selon un environnement futur en supposant plusieurs scénarios de politique, comme suggéré dans Harijan *et al.* (2011).

## **2.2. Les limites de l'approche basée sur les modèles de diffusion de l'innovation**

Malgré que cette approche présente des avantages énormes, elle est souvent critiquée. En effet, les recherches existantes possèdent plusieurs limites :

- La plupart des études faites ont négligé la nature concurrentielle entre les différents types d'ER, qui était absente dans les modèles utilisés. En effet, la plupart des études ont porté sur la diffusion des sources d'ER prises individuellement. Même dans le cas où les prévisions couvrent plusieurs sources d'ER, les interrelations entre eux ne sont pas prises en compte.
- Ces modèles mettent l'accent sur les aspects de la demande dans le processus de diffusion tout en négligeant les aspects liés à l'offre. Ainsi, il y a une certaine surestimation de l'importance de l'impact des différents profils des acquéreurs sur le processus de diffusion.
- En ce qui concerne le facteur qui reflète la concurrence, les modèles de diffusion existants ont considéré la LCOE comme une variable clé. Il sera plus important d'ajouter dans le modèle d'autres facteurs qui peuvent affecter la concurrence entre les sources d'ER afin d'aboutir à des implications politiques plus variées et plus intéressantes.
- Les études existantes ont des contributions intéressantes puisqu'elles fournissent des recommandations de politiques à adopter selon les résultats d'estimation et les améliorations faites au modèle initial. Par exemple, de nombreuses études ont reconnu l'importance de l'intervention de l'État pour la diffusion des technologies des ER, mais

rare sont les études qui ont tenu compte de cet effet dans leurs analyses. De ce fait, il y a l'absence de prise en compte de l'impact de la politique du gouvernement et des différents instruments utilisés sur le processus de diffusion des ER. Ceci est au cœur même de l'approche basée sur l'économie de l'environnement qui sera traitée dans la section suivante.

Cette approche nous permet d'avoir la constatation suivante : **la diffusion des technologies d'ER nécessite l'étude et la compréhension de l'influence des différents facteurs sur ce processus. En effet, le taux de croissance des technologies d'ER dépend de plusieurs facteurs de diffusion tels que le total des adoptants potentiels, la stratégie du gouvernement, la communication et la sensibilisation, les caractéristiques de la technologie et les améliorations technologiques effectuées, etc.**

## **Section 2. Approches basées sur les analyses économiques et sociales**

Bien que les facteurs techniques soient importants, il ne faut en aucun cas négliger les aspects économiques, institutionnels et même sociaux et psychologiques de la transition vers les ER. Tous ces aspects sont au cœur de l'économie de l'environnement, de l'économie institutionnelle ainsi que l'approche psychosociale. Dans cette section, nous allons étudier, en détails, les approches de transition vers les ER basées sur l'économie de l'environnement, sur l'économie institutionnelle ainsi que sur la théorie du comportement planifié.

Les approches basées sur les analyses économique et sociale de la transition vers les ER permettent de dégager les pré-requis économiques, institutionnels et sociaux nécessaires pour favoriser l'émergence et la diffusion à grande échelle des ER. Ainsi, ces approches de la transition vers les ER tentent de fournir un cadre d'analyse pour mieux cerner les instruments économiques, les mécanismes d'incitations et la structure institutionnelle qui permettent de converger vers un système énergétique plus soutenable.

### **1. Approche basée sur l'économie de l'environnement**

L'économie de l'environnement est une branche de l'économie des ressources naturelles. Parmi les principales hypothèses du courant de l'économie de l'environnement et des ressources naturelles est celle qui stipule que l'allocation des ressources naturelles soit réalisée par le marché. Par conséquent, il est nécessaire de faire entrer à l'intérieur de

la sphère marchande ce qui, au départ, lui était extérieur en donnant un prix aux ressources naturelles et aux pollutions : une démarche que les économistes appellent « internalisation des externalités ». Une externalité est définie par Bontems et Rotillon (2007, p.51) comme étant : « une situation où les décisions d'un agent économique affectent un autre agent en dehors du marché. Ainsi, l'externalité n'est pas prise en compte par le système de prix et elle n'est pas intégrée dans les décisions de l'agent qu'en est responsable ».

La démarche de l'internalisation des externalités nécessite la mise en place de mesures réglementaires et d'instruments économiques ce qui permet de faire supporter par les agents pollueurs le coût global de leurs actions.

## **1.1. Les instruments d'internalisation des externalités**

### **1.1.1. Les instruments réglementaires**

Dans ce cas, l'État impose des normes pour assurer l'atteinte du niveau optimal de pollution. Le principal inconvénient des normes est qu'elles ne permettent pas l'incitation à l'innovation. Les types de normes sont les suivants :

- Les normes d'émission : consistent à fixer un plafond d'émission qui ne doit pas être dépassé. L'agent pollueur qui dépasse ce plafond risque d'avoir des sanctions administratives, pénales ou financières.
- Les normes de procédé : imposent aux agents l'utilisation de certains équipements dépolluants.
- Les normes de qualité : fixent les caractéristiques des milieux récepteurs.
- Les normes de produit : imposent des caractéristiques bien déterminées des produits.

### **1.1.2. Les instruments économiques**

Ces instruments permettent de combler l'écart entre le coût privé et le coût social d'une activité. Il existe deux catégories d'instruments économiques : les instruments qui visent une régulation par les prix tels que les taxes ou les subventions et les instruments qui visent une régulation par les quantités tels que les quotas de permis d'émission :

- Les taxes : la taxe pigouvienne (Pigou, 1932) constitue un point de départ pour l'analyse de la taxation des biens polluants. Elle se base sur le principe de la taxation du pollueur à concurrence du dommage marginal créé.
- Les subventions : les subventions sont aussi un moyen de lutte contre la pollution, dans ce cas des aides et des prêts sont accordés aux agents pour les aider dans leurs efforts de

réduction des rejets polluants ou pour les inciter à l'adoption des nouvelles technologies d'ER. Les subventions à l'adoption de nouvelles technologies moins polluantes sont des outils de stimulation des externalités positives. Les subventions peuvent être utilisées avec les taxes ce qui permet de réduire le problème de financement de la subvention.

- Les marchés de droits à polluer : l'absence de marché pour les ressources environnementales telles que l'air, l'eau, etc., conduit à une allocation imparfaite de ces ressources. C'est pour cette raison que certains économistes ont préconisé la mise en place d'un marché boursier où les agents peuvent échanger des titres de propriété des ressources environnementales. L'apparition d'un tel marché fait apparaître un prix d'équilibre pour les droits à polluer et rétablit l'optimalité des décisions de l'entreprise polluante.

## **1.2. Justification des politiques de soutien aux énergies renouvelables**

La principale barrière à la diffusion des ER est leur coût élevé par rapport aux sources conventionnelles. Ceci nécessite l'intervention de l'État soit par les subventions et les aides financières pour encourager l'investissement dans ce secteur soit par d'autres instruments (comme la taxe carbone) pour pénaliser les externalités négatives causées par les combustibles fossiles. Ces instruments sont au cœur de l'économie de l'environnement et des ressources naturelles

Plusieurs technologies d'ER ont réalisé des progrès considérables comme l'éolien et le solaire PV mais d'autres sont encore immatures et elles n'ont pas atteint la performance économique requise. Mais, dans les deux cas, les technologies d'ER sont encore incapables d'entrer en concurrence directe avec les énergies fossiles qui ont bénéficié durant des décennies d'une production de masse et donc des effets d'apprentissage.

Afin d'assurer le développement des technologies des ER, la participation du gouvernement est essentielle, surtout, dans la phase d'émergence afin de les protéger de la concurrence directe avec les technologies conventionnelles. Sans un tel soutien, les forces du marché à elles seules vont entraîner seulement la diffusion limitée des ER dans quelques créneaux de marché. Cette diffusion est insuffisante pour que ces technologies bénéficient d'effets dynamiques d'apprentissage et deviennent compétitives avec les technologies existantes.

A partir des années 1970, plusieurs pays européens ont pratiqué des stratégies pour renforcer le déploiement des ER. Cependant, de nos jours les réalisations dans ces pays

s'avèrent différentes. D'un point de vue théorique, le soutien de l'État aux ER peut être justifié comme un moyen pour corriger les externalités négatives découlant de l'utilisation des combustibles fossiles et pour stimuler le progrès technique.

Nous allons examiner, tout d'abord, la justification des politiques de soutien aux ER sur la base des externalités positives qu'elles génèrent et de leur rôle dans la stimulation du processus d'apprentissage. Ensuite, les instruments sont classés selon la classification classique qui fait la différence entre l'approche basée sur les prix et l'approche basée sur les quantités tout en analysant l'efficacité dynamique et statique de quelques instruments selon différents critères.

### **1.2.1. L'internalisation des externalités environnementales**

Le principal avantage des ER par rapport aux énergies conventionnelles est qu'elles contribuent à la préservation des biens publics, à savoir l'air pur et le climat. Vu que les biens publics sont non-exclusifs et non rivaux, les acteurs privés ne sont pas prêts à investir dans quelque chose qui peut être acquise gratuitement par tout le monde. Dans ces conditions, la diffusion des ER ne peut pas être assurée spontanément par le marché.

La libéralisation du marché de l'électricité peut sembler être une réponse partielle à ce problème d'appropriation en permettant aux consommateurs qui veulent payer pour ce bien environnemental à acheter de l'électricité verte directement auprès d'un fournisseur. Cette solution déjà testé, dans certains pays (l'Allemagne, les États-Unis, les Pays-Bas, etc.), a montré que la plupart des consommateurs ne sont pas prêts à payer un prix plus élevé pour un bien public dont tout le monde sera en mesure d'en bénéficier. En fait, le problème du passager clandestin reste très réel : « *On parle de passager clandestin pour caractériser ce comportement individualiste de sous-déclaration de son intérêt pour le bien* » (Bontems et Rotillon, 2007, p.20). L'expérience a montré que la proportion des acheteurs d'électricité verte est faible, autour de 2% à 3%, sauf dans les cas où il y a de fortes incitations sous la forme d'exonérations fiscales pour les consommateurs d'électricité verte.

La défaillance du marché peut être résolue en internalisant les externalités à travers l'utilisation des normes et des taxes. De ce fait, les prix des énergies fossiles vont refléter leurs coûts sociaux ce qui va encourager une plus grande utilisation des sources d'ER. Théoriquement, la solution la plus logique et la plus efficace est la mise en œuvre d'une taxe environnementale optimale afin de rétablir une concurrence équitable entre les

différents types de production d'énergie et donc corriger les imperfections du marché. Cette taxe est censée réaliser des changements dans le comportement des consommateurs en incitant à l'utilisation des nouvelles technologies d'ER.

Mais, en pratique cette taxe est confrontée à un problème d'acceptabilité politique et elle est surtout insuffisante, quand elle est appliquée toute seule, à stimuler le processus d'apprentissage dynamique nécessaire pour faire baisser les coûts. En plus, la fixation du niveau optimal de la taxe (Pigou, 1932) est confrontée à des barrières qui rendent sa mise en œuvre très difficile. Ces barrières concernent la difficulté à estimer les coûts des dommages environnementaux ainsi que l'existence d'une asymétrie d'information. Ainsi, afin d'encourager l'utilisation des ER, le gouvernement devrait recourir à des différents mécanismes d'incitations afin d'atteindre les objectifs fixés au moindre coût.

### **1.2.2. La stimulation du changement technologique**

La création des conditions de concurrence entre les combustibles fossiles et les sources d'ER qui reflètent tous les coûts privés et sociaux ne peut pas toujours garantir la création d'un processus dynamique et efficace de diffusion des ER. En effet, les technologies d'ER qui sont, comme toute nouvelle technologie, en concurrence avec des technologies déjà bien établies sur le marché, restent longtemps dans une position défavorable. Quand les ER arrivent sur le marché, elles n'ont pas atteint leur performance optimale pour ce qui est du coût et de la fiabilité. Ces performances optimales seront réalisées progressivement grâce au processus d'apprentissage par l'utilisation ou d'apprentissage par la pratique (Arrow, 1962 ; Dosi *et al.*, 1988). En d'autres termes, ce n'est pas parce qu'une technologie particulière est efficace qu'elle soit adoptée, mais plutôt parce qu'elle est adoptée qu'elle deviendra efficace avec le temps (Arthur, 1989). Les systèmes d'incitation sont alors nécessaires afin que les technologies d'ER puissent être adoptées au-delà des créneaux étroits et réalisent des progrès sur leurs courbes d'apprentissage.

D'autres obstacles, qui sont liés aux caractéristiques techniques et économiques des ER, se dressent sur le chemin de leur diffusion, tels que leur profil de forte intensité de capital et leur intermittence. Les nouveaux acteurs dans les marchés libéralisés de l'électricité ont tendance à favoriser les technologies avec la plus faible intensité de capital et avec un approvisionnement en énergie non aléatoire. L'électricité à partir des ER ne présente donc pas la même valeur pour un acteur de marché comme l'électricité produite

par une turbine à gaz qui fournit de l'électricité d'une manière continue. Ce type de concurrence entre les techniques de production de l'électricité constitue une justification suffisante pour fournir le soutien du gouvernement pour les technologies d'ER. Ce soutien public stimule un processus dynamique qui va révéler leur performance et en même temps va permettre d'élargir la gamme de techniques qui peuvent contribuer à la préservation de l'environnement.

### **1.3. Approche basée sur les quantités *versus* approche basée sur les prix**

En créant des incitations pour les producteurs d'électricité pour adopter des technologies d'ER, les politiques publiques visent à stimuler le changement technologique et les processus d'apprentissage qui permettront aux coûts d'atteindre un niveau économiquement compétitif.

Les chercheurs et les analystes qui étudient et évaluent les systèmes de soutien aux technologies d'ER ont utilisé plusieurs façons pour les décrire et les classer<sup>17</sup>. L'une des typologies les plus utilisées est celle qui fait la différence entre les instruments basés sur les prix tels que les prix d'achat garantis et les instruments basés sur les quantités ou les quotas (Hvelplund, 2001 ; Menanteau, Finon et Lamy, 2003 ; Meyer, 2003 ; Haas *et al.*, 2004 ; Lauber, 2004).

La distinction entre les instruments basés sur les prix et les instruments basés sur les quantités a été déclenchée par Weitzman (1974) et depuis cette date une littérature abondante de l'économie de l'environnement a été consacrée à cette distinction. De ce fait, les cadres incitatifs sont basés généralement sur les mêmes approches que les politiques environnementales : l'approche basée sur les prix et celle basée sur les quantités. L'approche basée sur les prix se manifeste par l'application de tarifs d'achat garantis alors que celle basée sur les quantités peut prendre la forme de fixation d'un objectif à atteindre par les pouvoirs publics, l'organisation des appels d'offres, la mise en œuvre de quotas sur les fournisseurs d'électricité et la mise en place d'un système de certificats verts négociables.

Dans le cas de la mise en œuvre d'une méthode de contrôle de pollution et quand toutes les informations nécessaires sont valables, l'approche basée sur les prix et celle basée sur les quantités conduisent à des résultats similaires (Menanteau, Finon et Lamy, 2003). Mais, ces deux approches sont loin d'être équivalentes dans le cas où l'information

---

<sup>17</sup> Pour une typologie détaillée voir Ackermann, Andersson et Söder (2001)

est incomplète et l'incertitude règne (Cropper et Oates, 1992). L'approche basée sur la quantité est la plus efficace dans le contrôle des coûts des mécanismes d'incitations mis en œuvre par le gouvernement. En effet, cette approche permet de maintenir un contrôle direct sur les capacités installées et un contrôle indirect sur le coût marginal de production et donc sur le coût supporté par la communauté. En matière de capacités installées, l'approche basée sur les prix a donné des meilleurs résultats que celle basée sur les quantités (Menanteau, Finon et Lamy, 2003).

Dans le cadre des instruments économiques, on a assisté ces dernières années à la naissance de nouveaux mécanismes qui ont pour objectif de faire décoller les ER. Parmi ces instruments, on peut citer : les normes de portefeuille d'ER (*Renewables Portfolio Standard*), les certificats verts (*Green Certificates*), les tarifs d'achat garantis (*Feed-in Tariffs*), etc.

C'est au cours de la première moitié des années 1990, que les premières politiques de promotion des ER ont vu le jour en Europe. Elles ont émergé dans un contexte où la préservation de l'environnement et la lutte contre le changement climatique deviennent une préoccupation majeure. Bien que les avantages théoriques des instruments appliqués soient clairs, leur mise en œuvre se heurte, en général, à des difficultés opérationnelles que seule l'expérience permettra de les éviter. Plusieurs pays dans le monde ont appliqué ces instruments afin de stimuler la diffusion des ER, ci-dessous quelques exemples :

- La Belgique : les certificats verts à partir de 2002.
- L'Allemagne : les tarifs d'achat garantis pour les ER depuis 2004.
- L'Autriche : les aides à l'investissement pour les nouvelles centrales d'électricité qui utilisent les ER à partir de 2006.
- Le Japon : les normes de portefeuille d'ER à partir de 2002.
- Le Canada : le versement des subventions pour les projets d'ER à partir de 2006.
- Les États-Unis : les exonérations fiscales pour les investissements d'ER à partir de 2004.

Nous allons détailler, dans ce qui suit, les instruments économiques de promotion des ER qui sont les plus utilisés, de nos jours, il s'agit des certificats verts et des tarifs d'achat garantis.

### **1.3.1. Les certificats verts**

Ce dispositif d'incitation relève d'une approche par les quantités. Le principe de fonctionnement des certificats verts est simple. En effet, les opérateurs qui interviennent sur le marché de l'électricité sont obligés de se soumettre à des quotas de production d'électricité verte. Le gouvernement fixe un quota (objectif) de production d'électricité d'origine renouvelable aux compagnies électriques. Les producteurs d'électricité verte reçoivent un nombre de certificats verts qui correspondent à leurs productions en suivant une équivalence bien déterminée, par exemple 50 Mégawatt-heure (MWh) donnent le droit à un certificat vert. Ensuite, les producteurs d'électricité verte valorisent leurs productions de deux manières : la vente de l'électricité verte sur le marché et la vente des certificats verts aux opérateurs soumis aux quotas. Ce mécanisme permet une meilleure intégration des ER dans le marché de l'électricité en agissant comme une sorte de prime à la production de l'électricité verte.

Afin d'introduire de la flexibilité dans le système et réduire les coûts, les opérateurs ont la possibilité d'acheter des certificats verts pour atteindre les objectifs qui leur sont imposés. Ainsi, afin d'atteindre les quotas fixés, les opérateurs ont trois possibilités :

- Produire par eux-mêmes la quantité exigée d'électricité verte ;
- Signer des contrats de long terme avec des producteurs d'ER ;
- Recourir au marché de certificats verts (un marché purement financier) afin d'acheter des certificats verts correspondant à la quantité exigée d'électricité d'origine renouvelable.

La mise en œuvre de ce dispositif possède plusieurs avantages. Tout d'abord, il permet de fixer un objectif quantifié de production de l'électricité verte à l'échelle nationale. Ensuite, il favorise une exploitation des gisements d'ER par ordre de coût croissant. Enfin, il stimule la concurrence entre les producteurs d'ER ce qui incite à la baisse des coûts de production. Quatre pays européens ont créé des marchés de certificats verts : l'Italie, la Belgique, le Royaume Uni et les Pays Bas.

En théorie, ce mécanisme permet de créer une pression concurrentielle permanente entre les producteurs ce qui stimule la décroissance des coûts. Mais en réalité, les agents soumis aux quotas signent des contrats de long terme à prix stable avec des fournisseurs d'électricité verte pour se garantir contre les fluctuations du prix des certificats verts. De ce fait, le marché des certificats verts, en pratique, est étroit et peu liquide ce qui ne permet ni

de stimuler la concurrence ni de baisser les prix. Un autre inconvénient de ce mécanisme, c'est le fait qu'il y a un marché unique de certificats verts pour toutes les technologies d'ER. Ce qui favorise les technologies les moins coûteuses alors que celles qui sont encore trop coûteuses ne peuvent pas s'imposer sur le marché. De ce fait, il est recommandé de définir des quotas spécifiques par filière technologique.

Les certificats verts sont un instrument plus convenable à la stimulation des ER qui ont atteint une certaine maturité. Comparé à d'autres instruments, l'échange de certificats verts fournit la meilleure opportunité pour la distribution d'un objectif global de la manière la plus efficace parmi plusieurs technologies et de l'organisation de développement des ER à l'échelle de plusieurs pays (Menanteau, Finon et Lamy, 2003).

### **1.3.2. Les tarifs d'achat garantis**

Ce dispositif d'incitation relève d'une approche par les prix. Les prix garantis sont appliqués en Allemagne, en Espagne, en France et au Danemark. Cet instrument a prouvé son efficacité à stimuler la production de l'électricité d'origine renouvelable. Le principe de fonctionnement du mécanisme de prix d'achat garanti est le suivant : les distributeurs d'électricité sont obligés d'acheter l'électricité verte produite, sur leur zone de desserte, à un tarif fixé par les pouvoirs publics, et ceci sur une certaine durée qui varie de 10 à 15 ans selon les pays.

Ce mécanisme a été surtout utilisé, ces dernières années, pour stimuler la filière éolienne. Il a prouvé son efficacité aussi bien pour stimuler la capacité installée que pour développer l'industrie locale. Le succès rencontré par l'application des tarifs d'achat garantis est expliqué surtout par le fait que cet instrument encourage les investissements dans le secteur d'ER. En effet, les tarifs sont fixés, généralement, à un niveau assez élevé afin de garantir la rentabilité des projets d'ER. De ce fait, le risque de marché encouru par le développeur du projet est nul et la rentabilité du projet dépend essentiellement de la maîtrise des coûts et de l'atteinte de performance maximale.

Les tarifs d'achat garantis appliqués en Allemagne, au Danemark et en Espagne ont abouti à un développement soutenu de la filière éolienne en stimulant la capacité installée et le tissu industriel (Gutermuth, 2000). Il est à noter aussi que les tarifs d'achat garantis sont extrêmement simples à mettre en œuvre d'un point de vue administratif. Concernant les effets d'apprentissage technologique, ils étaient plus importants pour les fabricants,

dans les pays qui ont appliqué les tarifs d'achat garantis, grâce à la forte croissance dans la génération de capacités.

Ce mécanisme a donc un impact positif sur la production de l'électricité d'origine renouvelable, cependant, il n'incite pas les producteurs à innover vu l'absence de toute pression concurrentielle. Afin de pallier à cet inconvénient, certains pays ont introduit des tarifs incrémentaux décroissants avec la productivité du site.

Ce mécanisme souffre aussi d'autres inconvénients. En effet, le financement du surcoût est couvert par une subvention publique, ce qui rend ce mécanisme très coûteux aussi bien pour les clients que pour le budget de l'État. En plus, il est généralement peu incitatif à la baisse des coûts de production. Mitchell (2000) a mis l'accent sur cet inconvénient en considérant que l'incitation insuffisante à diminuer les coûts des ER est la principale faiblesse des tarifs d'achat garantis alors que le système d'appels d'offres est plus efficace à diminuer les coûts des ER (Mitchell, 2000). Pour dépasser cet inconvénient, il est possible de procéder à une diminution graduelle des tarifs fixés afin de tenir compte du progrès réalisé dans les technologies des ER, comme c'est le cas en France.

Les tarifs d'achat garantis sont efficaces seulement si les décideurs des tarifs ont des informations complètes sur les structures de coûts des investisseurs. En effet, la mise en œuvre des tarifs d'achat garantis comporte des risques pour les décideurs en raison de l'asymétrie d'information entre le décideur et l'investisseur (Lipp, 2007 ; Lesser et Su, 2008). En fait, les tarifs d'achat garantis peuvent facilement conduire à une surcompensation des investisseurs (Kreycik, Couture et Cory, 2011).

#### **1.4. L'application de l'approche de l'économie de l'environnement dans l'analyse de la transition vers les énergies renouvelables**

Menanteau, Finon et Lamy (2003) ont examiné l'efficacité des différents mécanismes d'encouragement au développement des sources d'ER, aussi bien d'un point de vue théorique que pratique. En effet, ils ont comparé l'approche basée sur les prix avec celle basée sur les quantités et ils ont étudié des exemples concrets de la façon avec laquelle ces différents instruments ont été appliqués. Ces auteurs concluent qu'un système de tarifs d'achat garantis est plus efficace qu'un système d'appel d'offres. Ils mettent aussi en évidence l'intérêt théorique des échanges de certificats verts qui doit être confirmé par la pratique, étant donné l'influence des structures de marché et des règles appliquées sur les performances de ce type d'approche.

Becker et Fischer (2013) ont procédé à la comparaison de deux instruments de promotion de l'électricité verte qui sont : les prix d'achat garantis (*Feed-in Tariffs*) et les prix fixés par les enchères (*Auction-Based Tariffs*). Les auteurs analysent trois études de cas qui concernent les expériences de la Chine, de l'Inde et de l'Afrique du Sud dans la promotion de l'énergie solaire PV. Ils partent du constat suivant : l'électricité est primordiale pour le développement économique, surtout pour les PED. Cependant, les coûts additionnels causés par la transition vers les ER sont une question sociale et politique sensible. Par conséquent, des politiques qui encouragent les installations des ER et qui ont un coût raisonnable sont nécessaires pour les PED. Ce papier détaille les expériences de ces trois pays dans l'application des prix d'achat garantis et des prix fixés par les enchères. Il met l'accent sur les causes de l'échec de ces instruments, dans ces pays, qui sont le manque de financement ou les barrières institutionnelles et réglementaires. En effet, chaque pays doit pratiquer les instruments qui conviennent à sa conjoncture économique et il ne faut pas importer les expériences des autres pays et les utiliser telles qu'elles sont. En fait, chaque pays possède ses propres spécificités qu'il faut prendre en considération.

La littérature sur l'utilisation des certificats verts (Currier, 2013 ; Lind et Rosenberg, 2014 ; Pavaloaia, Georgescu et Georgescu, 2015) et des tarifs d'achat garantis (Ari et Sari, 2015 ; Gallego-Castillo et Victoria, 2015 ; Nordensvärd et Urban, 2015) est abondante. Ces études se sont intéressées à plusieurs pays et à différents types d'ER, notamment l'énergie éolienne et l'énergie solaire PV. D'autres travaux se sont intéressés à d'autres instruments récents qui sont utilisés par quelques pays leaders dans le domaine des ER tels que "*Renewables Obligation*" (Foxon et Pearson, 2007) et "*Renewables Portfolio Standard*" (Carley, 2009).

La littérature existante a étudié les différents aspects de ces instruments, aussi bien théoriques que ceux liés à leur mise en œuvre. Cependant, il existe très peu de recherches qui ont critiqué cette approche basée sur l'économie de l'environnement. Par conséquent, nous allons analyser, dans ce qui suit, les principales limites de cette approche.

### **1.5. Limites de l'approche de l'économie de l'environnement**

L'approche basée sur l'économie de l'environnement est la plus utilisée et la plus répondue dans la littérature, mais cela n'empêche pas qu'elle a aussi des limites et des ambiguïtés qu'il faudrait les prendre en considération :

- Les technologies d'ER ont atteint des différents stades de maturité et le type de mécanisme d'incitation apporté à chaque technologie doit donc être bien adapté à son stade de développement (Christiansen, 2001). Cela peut varier d'un encouragement à la R&D pour les technologies émergentes à un renforcement des efforts de communication et d'information pour les technologies qui ont déjà fait preuve de rentabilité. Par conséquent, la réussite ou l'échec d'un mécanisme ne dépend pas seulement de ses caractéristiques mais de plusieurs autres facteurs.
- La plupart des instruments de promotion des ER sont conçus par les pays développés et sont généralement trop coûteux pour les finances publiques. Le fait de copier des modèles réussis, comme ceux de l'Allemagne ou du Danemark, à des PED conduit en général à des échecs considérables. Il faut plutôt tenir compte des spécificités économiques et institutionnelles de chaque pays et d'essayer de créer des nouveaux instruments ou bien d'apporter des modifications aux instruments utilisés par les pays développés.
- La plupart des recherches faites essaient d'étudier l'impact d'un ou de plusieurs instruments sur la diffusion des ER. Il faut, plutôt, suivre un chemin différent puisque c'est à partir de la réalité de ce secteur dans chaque pays qu'il faut proposer les instruments les plus adéquats compte tenu des évolutions passées, des futurs possibles et des interactions entre toutes les parties prenantes.

Afin de dépasser ces limites, Dinica (2006) propose une « approche du point de vue de l'investisseur » (*investor-oriented perspective*) pour analyser le potentiel de diffusion des technologies d'ER dû aux mécanismes d'incitations utilisés. Dinica (2006) considère que les analyses courantes qui traitent l'impact des instruments utilisés sur la diffusion des ER ont plusieurs limites. En effet, les études existantes des instruments de promotion des ER ne permettent pas de comprendre exactement leurs impacts sur la diffusion des ER vu que les classifications et les analyses de ces instruments sont faites d'un point de vue du décideur (*perspective of policy makers*). L'aspect financier des mécanismes utilisés n'est pas suffisamment traité, surtout du point de vue de son impact sur les investisseurs potentiels.

Dinica (2006) essaie de répondre à la question suivante : A quel point les instruments de diffusion des ER sont capables de débloquent les ressources financières des investisseurs potentiels ? L'explication de l'utilisation de cette approche est la suivante : ce n'est pas le type de l'instrument utilisé, mais c'est plutôt ses caractéristiques liées aux risques et à la

profitabilité qui influencent le comportement de l'investisseur et le taux de diffusion. Dinica (2006) propose une approche qui se base sur une analyse des risques des mécanismes de développement des ER en faisant une comparaison entre les tarifs d'achat garantis et le modèle de quotas. Néanmoins, cette étude contient aussi des limites :

- Les investisseurs potentiels doivent être également interviewés et impliqués dans la recherche.
- L'hypothèse qui stipule qu'il n'y a pas d'autres obstacles qui influencent la diffusion des ER, autres que les obstacles financiers et économiques causés par les mécanismes de développement des ER, est une hypothèse très restrictive et ne reflète pas la réalité. En effet, il y a une large panoplie d'obstacles et de risques auxquels les investisseurs potentiels doivent faire face.

Cette approche basée sur l'économie de l'environnement nous permet de faire la constatation suivante : **la diffusion des ER ne peut pas être assurée spontanément par le marché, elle nécessite plutôt un soutien public. Les mécanismes de développement des ER peuvent être justifiés comme un moyen pour corriger les externalités négatives découlant de l'utilisation des combustibles fossiles et pour stimuler le progrès technique. Ainsi, pour encourager l'utilisation des ER, l'État doit recourir à des mécanismes d'incitations qui permettent d'atteindre les objectifs fixés au moindre coût. L'État peut recourir à l'approche basée sur les prix (les tarifs d'achat garantis) ou à l'approche basée sur les quantités (les appels d'offres, les quotas sur les fournisseurs d'électricité, le système de certificats verts négociables, etc.).**

Il est à noter aussi que la plupart des études existantes ont négligé l'importance de l'aspect institutionnel dans la mise en œuvre des mécanismes de soutien des ER. En effet, la mise en œuvre des mécanismes d'incitation aux ER ne peut pas aboutir aux résultats escomptés sans qu'elle soit accompagnée d'une structure institutionnelle adéquate ce qui est au cœur de l'approche de l'économie institutionnelle.

## **2. Approche basée sur l'économie institutionnelle**

La nouvelle économie institutionnelle (NEI) a connu un essor important, depuis les années 1970. Parmi ses pionniers, on peut citer Coase, Langlois, North, Williamson, etc. Ce courant des sciences économiques a un caractère interdisciplinaire puisqu'il intègre des apports d'autres théories, notamment celles de type culturel et politique. Selon la NEI, les institutions économiques, politiques, sociales ou légales sont responsables de la prospérité

ou du déclin d'une économie. En effet, la nature des institutions dans une économie influence les coûts des transactions et le développement économique du pays.

Les travaux de North (1990 ; 1994) montrent clairement le rôle primordial des institutions dans le développement économique et social des nations. Ainsi, la réussite de toute trajectoire économique nécessite une analyse institutionnelle approfondie. Selon la Banque Mondiale (World Bank, 2008b), les institutions peuvent créer des incitations à l'investissement et à l'adoption de nouvelles technologies ce qui stimulera la croissance économique. Cependant, elles peuvent aussi décourager de telles activités ce qui amènera à la stagnation de l'économie. Les institutions peuvent donc être source de croissance ou de stagnation. North (1990, p.3) donne la définition suivante pour les institutions : *“Institutions are the rules of the game in a society or, more formally, are the humanly devised constraints that shape human interaction. In consequence, they structure incentives in human exchange, whether political, social, or economic”*<sup>18</sup>.

Les analyses de la NEI se focalisent surtout sur la nature des institutions et sur la structure des règles qui influencent le comportement des agents économiques. En effet, tout pays doit concentrer ses efforts sur la construction d'un système judiciaire et des droits de propriétés efficaces, tout en appliquant les mécanismes nécessaires pour les mettre en œuvre. Ceci va motiver les agents économiques et créer une atmosphère propice à l'investissement et à l'innovation. En effet, il ne suffit pas qu'une nouvelle technologie apparaisse sur le marché pour avoir un surplus de croissance. Il faut qu'il ait des agents économiques suffisamment motivés qui vont transformer ce fait en une opportunité. La motivation des agents économiques dépend de la nature des institutions et de la structure des règles appliquées dans l'économie.

Il est évident que la croissance économique est le résultat de la productivité dans l'économie, mais pour que les agents économiques soient productifs, il faut absolument avoir des droits de propriété bien définis. Il faut aussi avoir un système politique et un système juridique capables de faire respecter l'exécution des contrats à faible coût. En effet, la NEI ne s'intéresse pas seulement aux marchés économiques, mais aussi à la structure politique puisque c'est elle qui assure la mise en œuvre des règles des jeux au niveau économique. Par conséquent, être productif ne suffit pas, il faut aussi avoir un cadre

---

<sup>18</sup> « Les institutions sont les règles du jeu dans une société ou, plus formellement, elles sont les contraintes humainement conçues qui façonnent l'interaction humaine. En conséquence, elles structurent les incitations dans l'échange humain, qu'il soit politique, sociale ou économique » (trad.Auteur).

institutionnel qui favorise et qui permet de profiter de cette productivité. De ce fait, pour réaliser la performance économique, il faut savoir quels types d'institutions il faut mettre en place.

North (1990) a étudié en profondeur la nature et la façon d'évolution des institutions ainsi que leur impact sur la performance de l'économie. Selon North (1990 ; 1991), les institutions sont susceptibles d'introduire de l'ordre et de réduire l'incertitude et elles sont composées de règles formelles, de contraintes informelles et la manière de les faire appliquer. Les règles formelles sont composées de constitution, de réglementations, de lois et de droits de propriété qui sont mis en œuvre par le gouvernement. Les contraintes informelles sont composées de normes de comportement, de conventions et de codes de conduite issus de la tradition et de la culture.

Les institutions dans une société représentent un ensemble complexe qui peut être décomposé en trois principales structures : la structure politique dans laquelle s'effectue la prise de décision, la structure des droits de propriété qui fixe les incitations et la structure sociale qui comprend les normes et les conventions (North, 2005). De ce fait, les choix des agents économiques sont affectés par les institutions qui définissent les structures d'incitations et d'opportunités des différents acteurs économiques (North, 1991).

En plus du concept des institutions, ce courant de pensée met l'accent sur le concept de « la dépendance au sentier » ou « la dépendance du chemin parcouru » (*path dependency*) qui est considéré comme très important par North (1990). En effet, la dépendance au sentier représente l'héritage culturel du passé. Ainsi, il faut tenir compte de la dépendance du chemin parcouru, si on veut faire une réforme institutionnelle. Par conséquent, il faut comprendre, tout d'abord, la culture, la croyance et les institutions déjà existantes. Ceci va permettre d'évaluer la marge de manœuvre et les institutions qu'il faut améliorer ce qui facilite le changement des règles du jeu du système déjà existant.

## **2.1. L'application de l'approche de l'économie institutionnelle dans l'analyse de la transition vers les énergies renouvelables**

L'approche institutionnelle de la transition énergétique vise l'analyse de la structure institutionnelle qui est la plus convenable pour une convergence rapide vers un système énergétique plus soutenable. Elle s'appuie sur le rôle des différents acteurs (les autorités publiques, les consommateurs, les producteurs, etc.) et des différentes institutions dans le processus de la transition vers les ER.

Plusieurs études se sont intéressées à l'importance des institutions dans la promotion des ER. On peut citer, par exemple celle élaborée par Breukers et Wolsink (2007) qui traite un concept très important qui est « le renforcement de capacité institutionnelle » (*Institutional capacity building*) dans trois cas d'études (l'Allemagne, le Pays-Bas et l'Angleterre). Breukers et Wolsink (2007, p.2737) définissent ce concept comme étant : “*the trajectories followed, taking into account the interdependent and changing political, economic, environmental and planning conditions*”<sup>19</sup>.

Le renforcement de capacité institutionnelle est un outil qui permet de découvrir les relations dynamiques entre le contexte institutionnel, les acteurs et les réalisations faites. En effet, à partir des années 1970, les trois pays européens étudiés ont pratiqué des stratégies pour renforcer le déploiement des ER. Cependant, de nos jours, les trajectoires suivies et les réalisations faites dans ces trois pays s'avèrent trop différentes. Ce papier essaie d'expliquer les différences dans les trajectoires suivies et les réalisations dans ces trois cas, dans le domaine de l'énergie éolienne, d'un point de vue institutionnel.

Breukers et Wolsink (2007) analysent en détails les processus de développement de l'énergie éolienne dans les trois cas afin de mieux comprendre comment l'évolution historique du contexte institutionnel a influencé les réalisations et le développement de l'énergie éolienne. A la base d'enquêtes et d'études, qui s'étendent de 1970 à 2004, les auteurs concluent que les interactions entre plusieurs parties prenantes, dans un contexte institutionnel qui change ont donné résultat à un processus de renforcement de capacité institutionnelle pour l'exécution des projets d'énergie éolienne qui varie d'un pays à un autre. En comparant ces trois cas, les auteurs trouvent que dans le cas de l'Allemagne, il y a eu une relation positive entre le renforcement de capacité institutionnelle et les réalisations dans le secteur de l'énergie éolienne. En effet, dans ce cas, un intérêt particulier a été accordé à la participation à la prise de décision surtout au niveau local. Dans les deux autres cas, un renforcement de capacité institutionnelle limité a été appliqué, dès le début des années 1970, ce qui explique les réalisations faibles dans ces deux pays.

Jacobsson et Johnson (2000) ont montré qu'une diffusion très importante des ER a eu lieu durant les années 1990. Cependant, cette diffusion est très dépendante des interventions de l'État et elle est encore loin d'être auto-entretenu dans la plupart des pays. Ce papier propose un cadre analytique afin de mieux comprendre le processus de

---

<sup>19</sup> « Les trajectoires suivies, en tenant compte de l'interdépendance et du changement dans les conditions politique, économique, environnementale et de planification » (trad.Auteur).

transition vers les ER et de pouvoir cerner les obstacles vers une véritable transformation. En effet, selon Jacobsson et Johnson (2000, p.626), “*the emergence of a new, or transformed, energy system is a slow, painful and highly uncertain process*”<sup>20</sup>. Ce papier souligne l'importance de certains facteurs tels que le changement institutionnel, les réseaux des différents acteurs et l'existence des « initiateurs » (*prime movers*) dans le processus de transformation du système énergétique actuel vers un autre qui contient une large part d'ER.

Gutermuth (2000) considère aussi que le cadre légal et institutionnel est d'une grande importance dans la transition vers les ER. En effet, les facteurs juridiques et institutionnels peuvent être des barrières à la transition vers les ER comme ils peuvent être un moyen pour avoir une transition rapide et efficace. L'auteur s'intéresse à cinq facteurs de nature juridique et institutionnelle qui sont appliqués, en Allemagne, et essaie de les expliquer tout en mettant l'accent sur leurs impacts d'une manière générale. Parmi ces facteurs, on peut citer : la modification de la loi sur l'industrie de l'énergie et des lois antitrust, la création d'agences locales et régionales de l'énergie et d'un centre fédéral pour les informations liées à l'énergie, etc.

En ce qui concerne García (2013), il a essayé de collecter les différents mécanismes institutionnels utilisés pour accélérer la promotion des ER à partir du rapport (IEA, 2008) et de différentes autres études. Ces prescriptions collectées ont été appelées « les meilleures pratiques » et elles ont été comparées à celles appliquées, en Chine, pour voir les points faibles du cadre institutionnel en Chine dans le secteur des ER. Parmi les divergences de la politique chinoise par rapport aux « meilleures pratiques », l'auteur a cité : l'absence de cibles, le manque de stabilité et de transparence des instruments utilisés, la coordination faible, la bureaucratie, la concurrence limitée et l'absence d'incitation à l'innovation.

Une étude récente élaborée par Cifor *et al.* (2015) a été consacrée à l'analyse de l'état actuel du système de l'électricité dans l'ouest des États-Unis, avec un accent sur le paysage juridique et réglementaire qui est en pleine évolution. Ils ont mis l'accent sur les exigences supplémentaires attendus dans le système électrique qui se prépare pour une part élevée de l'électricité d'origine renouvelable, dans les années à venir. Ils ont abordé les obstacles, principalement institutionnels et culturels, à l'élaboration de solutions pour répondre à ces

---

<sup>20</sup> « L'émergence d'un système énergétique nouveau ou transformé est un processus lent, difficile et très incertain » (trad.Auteur).

nouveaux besoins. Enfin, Ils ont décrit un certain nombre de solutions possibles, basées à la fois sur le marché et hors marché.

## 2.2. Limites de l'approche de l'économie institutionnelle

Il existe un cadre institutionnel spécifique à chaque pays donc il n'y a pas un modèle à suivre par tous les pays. Néanmoins, il existe des bonnes pratiques et des grandes lignes qui ont prouvé leur efficacité et qui peuvent être appliquées dans les PED. Afin de déterminer le meilleur cadre institutionnel à mettre en œuvre, la plupart des études existantes ont fait recours à des analyses et à des avis des experts et elles ont négligé l'avis des investisseurs potentiels. En outre, le concept de « dépendance du chemin parcouru » n'a pas suscité l'intérêt mérité. Enfin, la littérature existante n'a pas mis l'accent sur l'acceptation du public et sa perception des différents changements institutionnels mis en œuvre. Malgré ces limites, cette approche nous permet d'avoir les constatations suivantes :

**Le cadre légal et institutionnel est d'une grande importance dans la transition vers les ER. En effet, le changement institutionnel et les réseaux des différents acteurs sont très importants dans le processus de transformation du système énergétique actuel vers un autre qui contient une large part d'ER. Les institutions servent à motiver les agents économiques et à orienter leurs choix vers les technologies d'ER. Cependant, il faut tenir compte de la dépendance du chemin parcouru si on veut faire une réforme institutionnelle. Ce qui fait, qu'il faut comprendre, tout d'abord, la culture, la croyance et les institutions déjà existantes pour arriver, par la suite, à évaluer la marge de manœuvre et les institutions qu'il faut améliorer.**

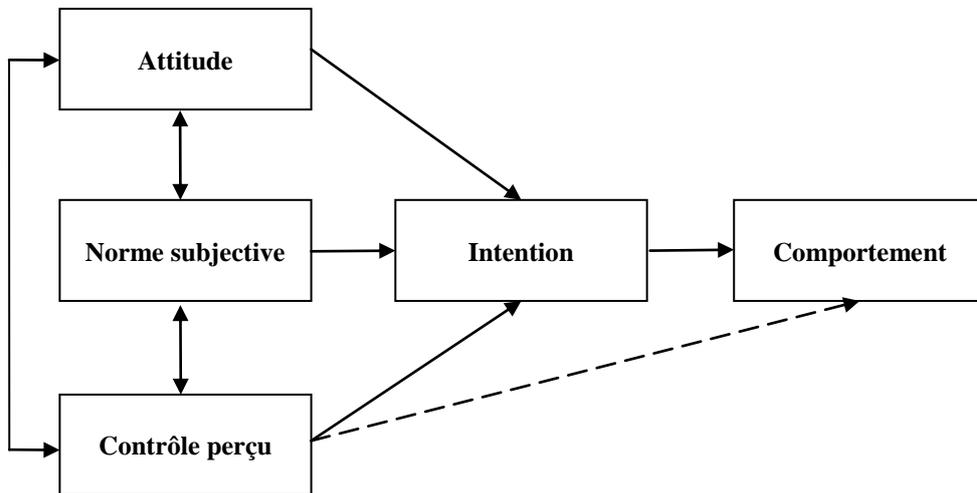
## 3. Approche psychosociale

Bien que les approches précitées soient les plus utilisées pour étudier la transition vers les ER, il existe d'autres approches et d'autres méthodes qui ont été moins utilisées mais qui méritent d'être citées.

Pour comprendre les facteurs socio-psychologiques qui influencent l'acceptation du public et sa volonté d'utiliser les ER, il y a des études qui ont utilisé le modèle psychosocial qui se base sur « la théorie du comportement planifié » (*Theory of Planned Behavior* : TPB) expliquée par Ajzen (1988 ; 1991). Cette théorie présente une extension et un enrichissement pour la théorie de l'action raisonnée (*Theory of Reasoned Action* : TRA). La théorie du comportement planifié présente un modèle psychosocial qui stipule que le

comportement réel d'une personne est directement guidé par son intention de comportement, comme la motivation. L'intention de comportement est déterminée conjointement par l'attitude, la norme subjective et le contrôle perçu (Ajzen, 1991). Cette théorie a pour objectif de comprendre et prédire le comportement des individus.

Figure 6. La théorie du comportement planifié<sup>21</sup>



Source : Ajzen (1991, p.182)

Selon Ajzen (1991), le comportement d'un individu est déterminé d'une manière directe et immédiate par son intention de se comporter d'une certaine manière. Cependant, l'intention n'est pas le seul déterminant du comportement qui dépend aussi du contrôle perçu. Le contrôle perçu désigne la capacité de contrôle qu'un individu pense pouvoir exercer sur le processus qui mène à la réalisation effective du comportement. Concernant l'intention, elle est le résultat de plusieurs facteurs qui sont : l'attitude personnelle envers le comportement, la norme sociale qui désigne la pression sociale perçue à effectuer ou ne pas effectuer le comportement et le contrôle perçu (Figure 6).

Cette approche est très importante pour l'analyse de la transition vers les ER vu qu'on peut utiliser les meilleurs instruments économiques et la meilleure structure institutionnelle, mais s'il n'y a pas une acceptation sociale et une attitude positive envers le changement tous les efforts vont mener à l'échec. Donc, il est très important d'étudier les comportements et les attitudes des agents vis à vis des technologies des ER pour savoir leurs motivations et pouvoir par la suite changer leurs intentions et leurs comportements.

---

<sup>21</sup> Pour faciliter la présentation (Figure 6), les effets de rétroaction possibles de comportement sur les variables antécédentes ne sont pas représentés.

### **3.1. L'application de l'approche psychosociale dans l'analyse de la transition vers les énergies renouvelables**

L'utilisation de l'approche psychosociale dans le domaine des ER est nécessaire vu que la perception du public, la sensibilisation et l'acceptation des ER sont des facteurs sociaux importants, qui doivent être pris en considération dans le développement de systèmes énergétiques futurs et la transition vers les ER.

Ces dernières années, un nombre considérable d'études publiées se sont intéressées aux attitudes du public et des intentions envers les ER aussi bien dans les pays développés (Bang *et al.*, 2000 ; Saphores *et al.*, 2007 ; Dalton, Lockington et Baldock, 2008 ; Klick et Smith, 2010 ; Battaglini *et al.*, 2012) que dans les PED, comme la Chine (Qu *et al.*, 2011), la Jordanie (Zyadin *et al.*, 2012), l'Inde (Khambalkar *et al.*, 2010) et d'autres pays. Ces études s'intéressent aux aspects sociologiques et psychologiques de la transition énergétique en analysant les raisons comportementales, psychologiques et culturelles entraînant la modification d'un régime énergétique existant. En effet, l'acceptation par le public des nouvelles technologies d'ER est cruciale pour leur introduction réussie dans la société.

On peut citer l'étude de Bang *et al.* (2000) qui ont utilisé la théorie de l'action raisonnée comme cadre théorique. Cette recherche étudie la relation entre trois variables (la prise de conscience environnementale, les connaissances sur les ER et les croyances sur les conséquences de l'utilisation des ER) et l'attitude des consommateurs concernant le paiement d'une prime pour les ER. Comme prédit par la théorie de l'action raisonnée, une relation positive a été trouvée entre les croyances sur les conséquences et les attitudes concernant le paiement de plus d'argent pour les ER.

Huijts, Molin et Steg (2012) se sont intéressés aux facteurs psychologiques qui influencent l'acceptation des technologies d'ER. Ce papier met en avant un cadre d'analyse sur l'acceptation de ces nouvelles technologies, en se basant sur un examen des théories psychosociales existantes et sur des études empiriques d'acceptation de la technologie. Le cadre d'analyse vise à expliquer l'intention d'agir en faveur ou contre les nouvelles technologies des ER, qui est supposée être influencée par l'attitude, les normes sociales, la perception du contrôle et la norme subjective. Huijts, Molin et Steg (2012) concluent que l'attitude envers les technologies d'ER est influencée par les coûts perçus, les risques et les avantages, les sentiments positifs ou négatifs vis à vis de ces technologies,

la confiance, la justice procédurale et la justice distributive. Quant à la norme personnelle, elle est influencée par la perception des coûts, les risques et les avantages, les résultats d'efficacité et la sensibilisation aux conséquences néfastes du non recours aux technologies d'ER.

Yazdanpanah, Komendantova et Ardestani (2015) ont utilisé la théorie du comportement planifié afin de dégager les facteurs qui influencent l'intention de l'utilisation des ER, en Iran. Les résultats de cette étude montrent que les normes morales, les attitudes et le contrôle de comportement perçu sont des facteurs importants influençant la volonté d'utiliser les ER et l'acceptation publique des ER, tandis que les normes subjectives et l'identité de soi ne jouent pas un rôle important.

D'autres études ont mis l'accent sur l'acceptation sociale des ER d'une manière générale (Wüstenhagen, Wolsink et Bürer, 2007) ou bien d'un type bien déterminé comme l'énergie éolienne *offshore* (Walker, Wiersma et Bailey, 2014).

### **3.2. Limites de l'approche psychosociale**

Le nombre des travaux scientifiques sur l'acceptation des ER par le public est considérable et les travaux sont très diversifiés et concernent plusieurs pays. Mais, les études qui concernant l'acceptation par certains groupes ou parties prenantes sont très limitées voire inexistantes. En fait, à notre connaissance il n'y a aucune étude qui étudie les facteurs qui influencent les intentions et les perceptions des décideurs politiques ou bien des investisseurs locaux, etc. Cette approche nous permet de faire la constatation suivante :

**L'acceptation sociale est un facteur très important dans le processus de diffusion des ER. Donc, il est très important d'étudier les comportements et les attitudes des agents économiques pour savoir leurs motivations et pouvoir, par la suite, changer leurs intentions et leurs comportements. En effet, la perception du public, la sensibilisation et l'acceptation des ER sont des facteurs sociaux importants qui doivent être pris en considération dans le développement de systèmes énergétiques futurs et la transition vers les ER.**

## **Conclusion**

Les travaux consacrés à la transition vers les ER sont multiples et très diversifiés. Ils traitent tous les aspects aussi bien technologiques, que sociales, économiques et

institutionnels. Dans ce chapitre, nous avons classé les travaux existants en cinq grandes approches.

Dans la première section, nous avons traité les approches technologiques qui sont basées sur la courbe d'expérience et le modèle de diffusion de l'innovation. En effet, ces dernières années, plusieurs auteurs ont utilisé l'analyse par la courbe d'expérience dans leurs recherches concernant l'évolution des coûts des technologies des ER, qui ont souvent un coût d'investissement plus élevé que les technologies d'énergie traditionnelle. Ainsi, les coûts de ces nouvelles technologies doivent être réduits pour qu'elles puissent être mises en œuvre à grande échelle. La littérature consacrée à la courbe d'expérience, dans le domaine des technologies des ER, ne cesse d'augmenter et ceci est dû en grande partie aux multiples atouts de cette approche.

Bien que la courbe d'expérience ait des avantages multiples et irréfutables, l'utilisation de cette approche pour l'analyse de l'évolution des coûts des technologies des ER est critiquée dans plusieurs travaux tels que Neij (2004), Nemet, (2006), Söderholm et Sundqvist (2007), Nordhaus (2009), etc.

Dans la première section, nous avons traité aussi l'approche basée sur le modèle de diffusion de l'innovation, notamment celui de Bass (1969). Les travaux analysés ont des contributions intéressantes, mais ils ont négligé l'aspect concurrentiel entre les différentes technologies d'ER, ainsi que la prise en compte de l'impact de la politique du gouvernement et des différents instruments utilisés sur le processus de diffusion des ER.

Bien que les facteurs techniques soient importants, il ne faut en aucun cas négliger les aspects de type économique, institutionnel et même social et psychologique de la transition vers les ER. Ceci a été l'objet de la seconde section qui a été consacrée aux approches basées sur l'économie de l'environnement, sur l'économie institutionnelle ainsi que sur la théorie du comportement planifié. Les deux premières approches ont permis de traiter les instruments économiques et la structure institutionnelle nécessaires pour la diffusion à grande échelle des ER. La troisième approche a traité les aspects psychosociaux de l'acceptation des ER par le public en se basant sur la théorie du comportement planifié. L'analyse de ces approches a permis de faire les conclusions suivantes :

- Les effets d'apprentissage et d'expériences diminuent les coûts et accélèrent le processus de transition vers les ER.

- Le taux de croissance des technologies d'ER dépend de plusieurs facteurs de diffusion tels que le total des adoptants potentiels, la stratégie du gouvernement, la communication et la sensibilisation, les caractéristiques de la technologie et les améliorations technologiques effectuées, etc.
- La transition vers les ER nécessite la mise en place de mesures réglementaires et d'instruments économiques.
- La transition vers les ER nécessite des mécanismes institutionnels adéquats.
- L'acceptation et la participation sociales facilitent le processus de transition vers les ER.

Toutes les approches traitées, dans ce chapitre, sont intéressantes et chacune d'entre elles a étudié un aspect de la transition vers les ER (technologique, économique, institutionnel ou psychosocial). Bien que ces approches soient différentes, elles ont un point commun qui est le fait de considérer que le processus de transition vers les ER est un processus lent, coûteux et qui fait intervenir des acteurs et des aspects de différents types. Ainsi, ce processus est compliqué et se heurte à plusieurs barrières et risques de différents types. Ce constat nous amène à traiter en détails les barrières qui entravent la diffusion à grande échelle des ER, ce qui fera l'objet du chapitre suivant.

## Chapitre 3. Les barrières à la transition vers les énergies renouvelables

### Introduction

Malgré que les avantages des ER soient clairs et bien connus, le processus de transition vers les ER reste encore lent et incertain. En effet, les ER ont des avantages nombreux et ont bénéficié du soutien des gouvernements, depuis des années. Cependant, leur part est encore faible à cause des barrières qui entravent leur utilisation et leur diffusion à grande échelle. Ce chapitre va mettre l'accent sur la barrière de « verrouillage technologique » en faveur des technologies dominantes qui sont les technologies de combustibles fossiles, par rapport aux nouvelles technologies qui sont les technologies d'ER.

Ce chapitre sera organisé sous la forme de deux sections. La première section va traiter le concept de « verrouillage technologique » (*technological lock-in*) et les explications données à l'existence de cet effet qui sont : l'existence de paradigmes technologiques et les rendements croissants d'adoption. Ensuite, nous allons étudier le rôle du « verrouillage technologique » dans les problèmes environnementaux et en particulier dans le cas des ER, en expliquant le concept de « verrouillage au carbone » (*carbon lock-in*). En effet, il y a une littérature abondante qui s'est intéressée aux concepts de « verrouillage technologique » et de « verrouillage au carbone » comme étant les barrières principales qui entravent la transition vers un système énergétique basé sur les ER.

La seconde section sera consacrée aux risques d'investissements dans les projets d'ER comme une manifestation du « verrouillage au carbone » et une barrière à la transition vers les ER. Pour ce faire, nous allons expliquer pourquoi l'investissement dans le secteur des ER est une perspective risquée. Ensuite, nous allons classer les principaux risques et barrières qui entravent l'investissement dans ce secteur en huit grandes catégories qui sont les suivantes : les risques liés aux sources, les risques opérationnels, les risques de dommage à l'environnement, les risques de type social, culturel et comportemental, les risques techniques, les risques réglementaires, les risques institutionnels, les risques politiques, les risques économiques et financiers et les risques de marché. Enfin, nous allons mettre l'accent sur les barrières à l'investissement dans le secteur des ER en Afrique du Nord.

## Section 1. L'effet de « verrouillage technologique »

L'effet de « verrouillage technologique » a fait l'objet de plus en plus de recherches faites par des économistes, des historiens et des sociologues, depuis le milieu des années 1980 (David, 1985 ; Arthur, 1989 ; Cowan, 1990 ; Liebowitz et Margolis, 1995). Plus récemment, ce concept a attiré l'attention des chercheurs intéressés par les liens entre le changement technologique et l'environnement. Ces chercheurs ont mis l'accent sur les effets négatifs de l'utilisation des combustibles fossiles sur le changement climatique et la difficulté rencontrée par les économies industrialisées pour passer à un système énergétique à faible émission de CO<sub>2</sub>. Cette difficulté est causée par l'effet de « verrouillage au carbone » (Kemp, 1994 ; Rip et Kemp, 1998 ; Unruh, 2000).

L'idée principale sur laquelle se base cet effet est le fait qu'il y a une interaction entre le développement des nouvelles technologies et les cadres de type social, économique et culturel dans lesquels ces technologies sont développées (Rip et Kemp, 1998 ; Kemp, 2000). L'effet de « verrouillage technologique » stipule que l'utilisation d'une nouvelle technologie et sa diffusion dépendent du chemin de son développement. Cette « dépendance au sentier » (David, 1985) intègre les caractéristiques des marchés initiaux, les facteurs réglementaires et institutionnels ainsi que les attentes des consommateurs.

Le plus important est que « la dépendance au sentier » (*path dependency*) favorise les technologies en place contre les nouvelles technologies même si celles-ci présentent des meilleures alternatives. En effet, les rendements croissants à l'adoption (Arthur, 1989) donnent lieu à un verrouillage en faveur des technologies dominantes par rapport aux nouvelles technologies. Le fait qu'une technologie inférieure avec des rendements croissants peut être « verrouillée » grâce à la « dépendance au sentier » a été décrit et expliqué par Arthur (1989).

L'idée centrale de l'effet de « *lock-in* » est que les technologies et les systèmes technologiques suivent des chemins spécifiques et il est surtout très difficile et coûteux d'y échapper. Par conséquent, les technologies mises en place ont tendance à persister, pendant de longues périodes, même face à la concurrence de substituts potentiellement supérieurs, il s'agit de « la dépendance au sentier ». Les explications données à l'existence de l'effet de « verrouillage technologique » peuvent être classées en deux types qui sont : l'existence de paradigmes technologiques et les rendements croissants d'adoption.

## 1. Les paradigmes technologiques

La première explication du « verrouillage technologique » se base sur l'idée que la nature et le sens du progrès technologique sont fortement influencés par le cadre cognitif des acteurs. Nelson et Winter (1977) ont utilisé le terme de « régime technologique » pour décrire ces cadres, alors que Dosi (1982) a utilisé le terme de « paradigme technologique ». Bien que les termes utilisés soient différents, leurs sens se ressemblent. En effet, les deux termes indiquent l'existence de certaines règles ou principes qui définissent les limites de la pensée et de l'action par les membres de la communauté technologique (entreprises, ingénieurs, instituts de technologie, etc.). Ceux-ci englobent, par exemple, des idées d'ingénierie sur la nature du problème technologique et l'ensemble des solutions possibles.

Selon Dosi *et al.* (1988), les pré-requis nécessaires pour la diffusion d'une nouvelle technologie sont assimilés à un ensemble de connaissances technologiques et scientifiques qui sont capables de modifier « un paradigme technologique » existant. Dosi (1988) a parlé du concept de « paradigme technologique » qui a été très influençant dans le domaine de l'économie du changement technique. Selon Dosi (1988, p.1127), “*“A technological’ paradigm defines contextually the needs that are meant to be fulfilled, the scientific principles utilized for the task, the material technology to be used”*<sup>22</sup>.

Nelson et Winter (1977) utilisent le concept de « régime technologique » afin de définir certaines limites pour le progrès technologique et indiquer les directions vers lesquelles le progrès est possible et préférable. Ils donnent plutôt un sens cognitif à ce concept : “*Our concept is more cognitive, relating to technicians’ beliefs about what is feasible or at least worth attempting*” (Nelson et Winter, 1977, p.57)<sup>23</sup>.

Selon Perkins (2003), une conséquence de l'existence de ces cadres mentaux appelés « paradigme technologique » ou « régime technologique » est que les efforts déployés pour faire progresser la performance d'une certaine technologie se concentrent souvent dans des directions spécifiques et bien déterminées qui reposent sur des réalisations, des idées et des connaissances passées. Ceci peut créer des effets d'exclusion puissants envers les possibilités technologiques et les solutions qui se trouvent en dehors « du paradigme

---

<sup>22</sup> « Le paradigme technologique définit, dans un contexte bien déterminé, les besoins qui doivent être satisfaits, les principes scientifiques optés pour cette tâche et le matériel technologique qui doit être utilisé » (trad.Auteur).

<sup>23</sup> « Notre concept est plus cognitif, il concerne les croyances des techniciens sur ce qui est faisable ou, au moins, ce qu'il vaut la peine d'être essayé » (trad.Auteur).

technologique dominant ». Il s'agit du "*exclusion effect*" expliqué par Dosi (1982). Ainsi Perkins (2003) considère que le changement technologique suit un processus qui est très dépendant de la logique dominante et limitée de la communauté technologique.

L'utilisation des concepts de « paradigme technologique » et de « régime technologique » explique l'existence d'un cadre technologique primordial qui est partagé par tous les acteurs technologiques et économiques et sur la base duquel il y aura lieu des améliorations dans l'efficacité des processus et la performance des technologies.

## 2. Les rendements croissants d'adoption

La seconde explication donnée à l'existence de l'effet de « verrouillage technologique » et qui est fortement liée à la première, est l'existence de rendements croissants d'adoption. Ce sont des mécanismes de rétroaction positive qui fonctionnent pour accroître l'attractivité de l'adoption d'une technologie particulière, au fur et à mesure qu'elle est adoptée. Cette idée a été expliquée par David (1985) et Arthur (1989) qui considèrent que, dans une situation où deux ou plusieurs technologies sont en concurrence pour avoir la plus grande part de marché, la présence de rendements croissants implique que l'option qui a bénéficié d'une avance initiale d'adoption peut éventuellement dominer le marché.

En effet, l'adoption précoce peut générer un effet de boule de neige. Ainsi, la technologie préférée, au début, va bénéficier de plus d'améliorations que ses concurrentes, ce qui va stimuler davantage l'adoption, l'amélioration et le leadership éventuel. Par conséquent, dans des conditions de rendements croissants, les technologies qui ne parviennent pas à gagner un succès précoce d'adoption pourraient éventuellement se retrouver en situation de "*lock-out*" du marché et donc incapables de rivaliser avec la technologie améliorée.

Il existe, généralement, quatre grandes classes de rendements croissants d'adoption qui sont impliquées dans l'effet de « verrouillage technologique ». Ces quatre classes sont les suivantes : les économies d'échelle, les économies d'apprentissage, les expectations adaptatives et les externalités de réseaux. Les deux premiers types de rendements croissants qui sont les effets dynamiques d'échelle et d'apprentissage ont été bien étudiés dans le chapitre précédent. Ils sont, généralement, représentés sous la forme de courbes d'apprentissage qui illustrent la réduction des coûts unitaires suite à l'augmentation de la production cumulée. Quant aux expectations adaptatives, elles peuvent être expliquées par

le fait qu'à mesure qu'une technologie est adoptée, il y aura une réduction de l'incertitude concernant sa performance, sa fiabilité ainsi que sa durabilité.

En ce qui concerne les externalités de réseau, qui sont souvent considérées comme l'effet le plus influençant sur le « verrouillage technologique », elles représentent les avantages externes conférés aux utilisateurs d'une technologie par un autre utilisateur de la même technologie. Leur importance provient du fait qu'une technologie fait partie d'un réseau très large composé de multiples technologies interdépendantes et d'infrastructures d'appui. Ces infrastructures comprennent les relations techniques, économiques et institutionnelles qui permettent aux technologies existantes de coopérer ensemble.

Une conséquence importante des interdépendances technologiques est le fait que chaque fois qu'un réseau augmente en taille son attrait augmente pour les utilisateurs potentiels, en donnant lieu à des effets de rétroaction positive. Ainsi, pour prendre un exemple populaire, la valeur d'un téléphone mobile pour un utilisateur individuel augmente avec le nombre de personnes connectées au réseau.

L'importance des externalités de réseau pour le « verrouillage technologique » est basée sur l'idée que ces externalités présentent des barrières à l'entrée pour les technologies dites « radicales » qui ne font pas partie du paradigme technologique dominant. Ceci est expliqué par le fait qu'en présence d'interdépendances technologiques, toute tentative d'introduire une technologie qui est incompatible avec les technologies et les infrastructures existantes exigera des changements dans le reste du système technologique correspondant afin de pouvoir y faire partie (Metcalf, 1997).

Ce changement peut être la source d'un bouleversement considérable puisqu'il implique des coûts importants associés au changement causé par la nécessité de remplacer les éléments physiques du système technologique et les pratiques de travail associées, les compétences et les modes de comportement. C'est pour cette raison que les acteurs qui ont des intérêts acquis, y compris les entreprises, les gouvernements et les consommateurs, peuvent volontairement résister à l'introduction de nouvelles technologies qui ne font pas partie du régime technologique existant. Ainsi, en présence d'externalités de réseau, même si le fait d'opter pour une nouvelle technologie serait profitable, les utilisateurs peuvent continuer à opter pour les options technologiques existantes et inférieures.

Pour résumer, la littérature suggère que « le verrouillage technologique » est causé par deux dynamiques : premièrement, l'existence des paradigmes technologiques qui

incarnent un ensemble commun de compétences, d'habitudes et de perspectives sur la nature et le sens du progrès technologique et, deuxièmement, les rendements croissants d'adoption, dont l'impact est de créer des structures d'incitation qui renforcent les choix précédents.

### **3. Le verrouillage technologique au profit des énergies fossiles**

Le changement climatique menace le bien-être futur et la stabilité économique. Son atténuation exige une réduction drastique des émissions des GES afin de passer d'une économie basée sur les combustibles fossiles à une économie sobre en carbone. Cependant, le système énergétique actuel semble très dépendant des combustibles fossiles.

Le rôle du « verrouillage technologique » dans les problèmes environnementaux a été traité par plusieurs auteurs. En effet, à partir des années 1990, un intérêt grandissant a été accordé à l'effet de « verrouillage au carbone » (*carbon lock-in*) et ses applications dans le domaine des problèmes environnementaux et du changement climatique. Cet effet est considéré comme un obstacle à une transition vers des technologies à faible émission de CO<sub>2</sub> (Ayes, 1991 ; Kemp, 1994 ; Freeman et Soete, 1997 ; Unruh, 2000). En effet, les arguments théoriques et les recherches empiriques suggèrent que le système énergétique actuel se trouve verrouillé en faveur des énergies fossiles (Unruh, 2000 ; Schmidt et Marschinski, 2009 ; Davis, Caldeira et Matthews, 2010 ; IEA, 2011).

De ce fait, l'économie reste dans un équilibre dans lequel les technologies à fortes émissions de CO<sub>2</sub> dominent le marché, même si elles sont plus polluantes que leurs concurrentes qui sont les ER. Ce qui fait que le verrouillage technologique et institutionnel au profit des énergies fossiles est considéré par plusieurs auteurs comme la barrière principale à la diffusion à grande échelle des technologies d'ER.

Mattauch, Creutzig et Edenhofer (2015) confirment le fait que l'obstacle majeur au passage à une économie à faible émissions de CO<sub>2</sub> est l'effet de « verrouillage au carbone ». Ils considèrent que les combustibles fossiles dominent le marché, bien que leurs alternatives non émettrices de CO<sub>2</sub> soient dynamiquement plus efficaces. En effet, plusieurs auteurs ont déclaré que les économies développées sont verrouillées dans un contexte complexe de technologies et d'infrastructures à forte émission de CO<sub>2</sub>, il s'agit du « verrouillage au carbone » (Rip et Kemp, 1998 ; Arentsen, Kemp et Luiten, 2002).

Ce contexte de « verrouillage au carbone » a eu lieu, au début, à cause de l'abondance des combustibles fossiles et les connaissances limitées sur les conséquences

des émissions des GES sur le climat. Cependant, malgré la prise de conscience des impacts négatifs de l'utilisation des combustibles fossiles, les tentatives de se tourner vers des substituts propres se révèlent difficiles. Cela est dû au fait que les énergies fossiles ont bénéficié, durant plusieurs décennies, des économies d'échelle et des effets d'apprentissage grâce aux subventions et aux efforts de R&D. Ainsi, les technologies des énergies fossiles bénéficient de l'appui d'un ensemble d'acteurs et d'institutions qui entravent l'innovation et la diffusion de technologies qui se trouvent en dehors du paradigme technologique dominant.

Ce « verrouillage au carbone » crée un marché et des politiques qui peuvent ralentir ou même bloquer la diffusion des technologies à faibles émissions de CO<sub>2</sub>, en dépit de leurs avantages environnementaux et économiques évidents. Ainsi, il existe des structures techniques, juridiques et institutionnelles qui empêchent l'adoption des nouvelles technologies. On peut citer, par exemple, les difficultés rencontrées par les gouvernements pour éliminer les programmes de subventions qui sont contre-productifs. Kemp (1997) considère que le verrouillage technologique et institutionnel en faveur des énergies fossiles bloque la diffusion à grande échelle des technologies d'ER, même si ces technologies deviennent de plus en plus compétitives. Par conséquent, ce verrouillage va retarder l'adoption des technologies propres.

La situation de « verrouillage au carbone » résulte donc des interactions systémiques entre les technologies et les institutions. Pour expliquer ces idées dans un cadre conceptuel simple, Unruh (2000) a présenté la notion de « complexe technico-institutionnel » (*techno-institutional complex*). Il considère que ce complexe technico-institutionnel se développe à travers un processus co-évolutionnaire qui dépend du « sentier parcouru ». Ce sentier implique des rétroactions positives entre les infrastructures technologiques, les organisations et les institutions. Ce concept a été introduit pour expliquer l'existence d'un système technologique dominant basé sur les énergies fossiles. Unruh (2000) considère le système technologique comme étant un ensemble de composantes interdépendantes connectées en réseau et d'éléments physiques, sociaux et informationnels.

Ces idées du « verrouillage au carbone » peuvent être utilisées pour mieux comprendre et cerner l'adoption et la diffusion à grande échelle des technologies d'ER. Unruh (2000 ; 2002) soutient l'idée que les économies industrialisées sont dans une situation de verrouillage en faveur des énergies fossiles. Ce verrouillage résulte d'un processus de coévolution technologique et institutionnelle guidé par des rendements

d'échelle croissants qui dépendent du chemin parcouru. Les technologies existantes ont bénéficié des rendements croissants durant une longue période. Ces rendements croissants sont renforcés par des facteurs institutionnels. Quant à Unruh (2002), il a essayé d'expliquer d'une manière détaillée les sources du « verrouillage au carbone ». Ces sources peuvent être classées en cinq types qui sont : technologique, organisationnel, industriel, sociétal et institutionnel.

« La dépendance au sentier » qui implique que les événements passés ont un impact sur les choix actuels a conduit à l'existence de la situation de « verrouillage au carbone » dans laquelle le monde est verrouillé en une économie à forte émission de CO<sub>2</sub> (Unruh, 2000). Par exemple, Wüstenhagen et Teppo (2006) ont identifié des preuves de l'existence de « la dépendance au sentier parcouru » dans les investissements en capital-risque, ce qui a ralenti le flux d'investissements en capital-risque dans le secteur émergent des ER.

Lovio, Mickwitz et Heiskanen (2011) ont discuté les effets de « la dépendance au sentier » sur les tentatives de la Finlande à diversifier ses ressources énergétiques, tout en diminuant le recours aux combustibles fossiles. « La dépendance de chemin parcouru » peut, non seulement se produire au niveau des industries ou des systèmes technologiques, mais aussi au niveau de l'entreprise. Par exemple, Pinkse et Buuse (2012) considèrent que les investissements passés dans les énergies fossiles peuvent influencer la perception des décideurs dans les compagnies pétrolières envers le couple rendement-risque, les amenant à voir plus d'opportunités sur leur trajectoire précédente que dans la trajectoire moins familière des ER.

Bien que convaincants et bien fondés, les principes fondateurs du « verrouillage technologique » ont été critiqués par deux économistes qui sont Liebowitz et Margolis (1994 ; 1995). En effet, ils ne confirment pas le fait que les rendements croissants, au cours des stades précoces et très incertaines de la concurrence, peuvent effectivement fournir à une technologie « inférieure » une avance de marché inattaquable. Selon les auteurs, il n'existe pas, dans la pratique, des preuves convaincantes qui soutiennent la présence de ces choix inefficaces du marché.

L'existence de l'effet de « verrouillage au carbone » paraît évidente pour la plupart des économistes. Cependant, le choix des options politiques les mieux placées pour effectuer un changement structurel vers une économie à faible émissions de CO<sub>2</sub> est moins clair. Il existe peu d'études qui ont examiné les réponses politiques qui sont suffisantes

pour éviter le « verrouillage au carbone » (Fischer et Newell, 2008 ; Gerlagh, Kverndokk et Rosendahl, 2009 ; Mattauch, Creutzig et Edenhofer, 2015).

Mattauch, Creutzig et Edenhofer (2015) ont contribué à cette tâche par l'étude de l'impact de l'élasticité de substitution entre le secteur énergétique polluant et celui propre sur les réponses politiques appropriées. Ils ont constaté que les possibilités de substitution entre les deux secteurs ont un effet ambivalent : même si une forte élasticité de substitution nécessite des politiques d'atténuation moins drastiques que celles dans le cas de faible substitution, elle crée une perte de bien-être plus grande à travers « le verrouillage au carbone » en l'absence de réglementation. Ils ont utilisé un modèle d'équilibre général inter temporel à deux secteurs afin d'établir ce résultat et identifier les options politiques qui sont suffisantes pour éviter les pertes élevées de bien-être qui sont dues au « verrouillage au carbone ». Le résultat principal de cette étude est que, même si une élasticité de substitution plus élevée exige des politiques moins agressives d'atténuation, elle crée des pertes plus élevées de bien-être à partir d'un « verrouillage ». La réponse socialement optimale consiste à l'application d'une taxe permanente sur le carbone et d'une subvention de l'apprentissage pour les technologies propres. Les résultats soulignent également que la fourniture d'infrastructures nécessaires est essentielle pour faciliter le passage vers une économie sobre en carbone.

Carley (2011) a essayé de savoir si le secteur de l'électricité, aux États-Unis, est dirigé loin de la situation du « verrouillage au carbone » et de déterminer les facteurs qui contribuent, ou sont susceptibles de contribuer, à une éventuelle réorientation de l'industrie. Avec l'application d'une analyse historique du secteur de l'électricité, cette étude aboutit à la conclusion suivante : bien que ce secteur repose encore, principalement, sur les combustibles fossiles à forte intensité de CO<sub>2</sub>, plusieurs tendances récentes indiquent que le secteur de l'électricité est devenu moins émetteur de CO<sub>2</sub>, avec des systèmes de production plus petits et plus propres. Ces changements sont faits à travers des interactions à différents niveaux. En effet, les firmes, la structure de marché, l'intervention du gouvernement, la participation des citoyens et les modèles de comportement ont joué un rôle important dans ces changements. Ces résultats indiquent que l'évasion complète du secteur de l'électricité du « verrouillage au carbone » bien qu'importante, elle n'est pas encore définitive. Cependant, il reste à voir si ce secteur est en mesure de se transformer entièrement et rapidement avant qu'une catastrophe climatique puisse avoir lieu.

D'autres auteurs ne voient pas dans les ER une solution pour se débarrasser du « verrouillage au carbone ». Par exemple, Karlsson (2012) considère que seule l'énergie nucléaire, sera capable de briser le processus actuel de « verrouillage au carbone », en Chine et dans d'autres PED, mais à condition que plus d'efforts soient déployés pour baisser le coût de cette technologie.

« La dépendance au sentier » aura certainement des implications sur les efforts des décideurs politiques pour stimuler l'investissement dans les ER. Une première recommandation est que les décideurs politiques tiennent compte des trajectoires passées. En effet, les technologies d'ER ne peuvent pas entrer sur le marché brusquement et rapidement. Il faut, plutôt, analyser en détails et prendre en compte les intérêts des parties prenantes et leurs perceptions du risque-rendement. Ces perceptions sont généralement basées sur l'expérience passée et sont déterminants pour les choix présents et futurs.

Il convient de souligner que la situation de « verrouillage au carbone » n'est pas une situation permanente, mais plutôt un état persistant qui crée des barrières à des alternatives pour les technologies dominantes. En effet, cet effet se manifeste dans la réalité par une situation dans laquelle l'investissement dans des projets d'ER rencontre plusieurs risques. Ainsi, l'investissement dans des projets d'ER fait face à plusieurs barrières d'investissements de types différents (économique, institutionnel, social, etc.) qui représentent des risques importants aussi bien pour les investisseurs que pour les bailleurs de fonds. Nous allons, tout d'abord, détailler ces risques pour prouver la nécessité de l'approche du management des risques qui sera utilisée dans cette thèse.

## **Section 2. Les risques d'investissements dans les projets d'énergies renouvelables**

La principale difficulté liée à l'introduction des ER dans le marché découle du fait que ces technologies ne représentent pas une innovation évolutive, mais plutôt une rupture technologique par rapport aux technologies des énergies fossiles qui dominent le marché de l'énergie. En effet, la domination actuelle des énergies fossiles a permis la création d'un contexte socio-économique et institutionnel qui favorise et privilégie les acteurs impliqués dans le paradigme technologique existant basé sur les énergies fossiles. De ce fait, ces technologies sont ancrées dans les structures institutionnelles existantes ce qui rend difficile le passage vers un nouveau paradigme technologique basé sur les ER, puisque ce passage nécessite des changements de type social, institutionnel, industriel, etc.

Par conséquent, il existe un blocage socio-économique, institutionnel et technologique en faveur des technologies des énergies fossiles ce qui retarde les investissements et donc la transition vers des technologies de rupture, comme les technologies des ER. De ce fait, on assiste à une situation dans laquelle les risques d'investissement dans le secteur des ER sont une manifestation du « verrouillage au carbone » et une barrière à la transition vers les ER.

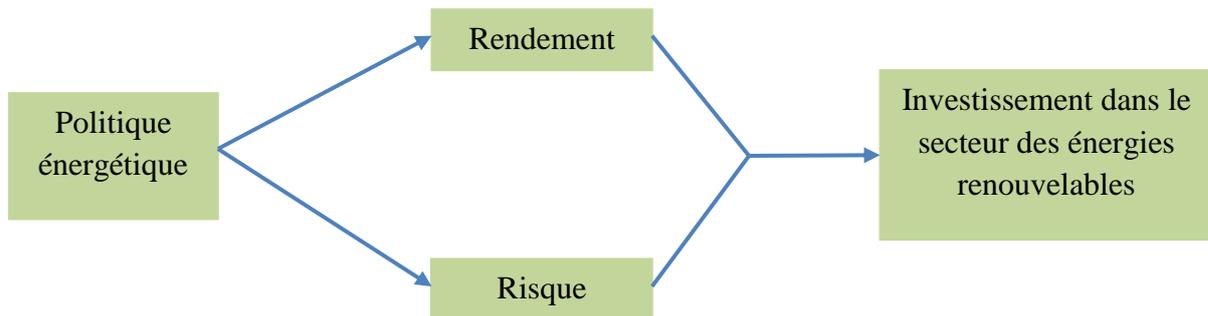
Ainsi, malgré la volonté politique et la richesse des opportunités offertes pour les entreprises dans le secteur des ER, investir dans ce secteur est encore une perspective risquée (Holburn, 2012).

## **1. L'investissement dans les énergies renouvelables : une perspective risquée**

Le défi majeur pour les entreprises dans le domaine des ER, lors de l'examen de nouveaux investissements, est le fait d'équilibrer les gains financiers prévus contre les risques potentiels. Ci-après un schéma représentatif de la manière avec laquelle les politiques, adoptées par le gouvernement, influencent l'investissement dans le secteur des ER, en agissant sur le rendement et le risque. De ce fait, les déterminants essentiels des niveaux actuels et futurs de l'investissement dans le secteur des ER sont le risque, le rendement et la politique énergétique (Figure 7). En effet, les opportunités d'investissement dans les ER ont tendance à être désavantagées par rapport aux énergies conventionnelles à cause de non prise en compte des externalités environnementales. Par conséquent, il est nécessaire de recourir à une politique énergétique pour corriger ces externalités.

L'effet de ces politiques sur l'investissement, selon Wüstenhagen et Menichetti (2012), est de rendre l'équation risque-rendement plus favorable pour les investisseurs dans le secteur des ER. Ceci peut être réalisé en augmentant les rendements des investissements (par exemple, par des tarifs d'achat garantis) ou en réduisant le risque (par exemple, par le biais de garanties de prêts). En fait, le risque et le rendement sont considérés, depuis longtemps, comme étant les déterminants fondamentaux des investissements dans la théorie de la finance.

Figure 7. Un modèle simple pour la politique énergétique et l'investissement dans le secteur des énergies renouvelables



Source : Wüstenhagen et Menichetti (2012, p.4)

Pour les entreprises dans le secteur des ER qui cherchent l'emplacement idéal pour leur prochain investissement, il existe une multitude de revues et de rapports qui offrent les classements des pays sur la base de diverses mesures d'attractivité et de risques. Ces classements prennent en considération, généralement, la taille du marché et sa croissance ainsi que l'importance des incitations accordées par les gouvernements telles que les subventions financières et les exonérations fiscales. On peut citer, par exemple, le rapport annuel de "Ernst and Young" qui donne des indices d'attractivité pour les investissements dans le domaine des ER. Ces rapports sont intéressants, mais ne suffisent pas à eux seuls pour fournir une base pour prendre la décision d'investir ou non dans un pays considéré.

Il existe plusieurs études qui se sont intéressées aux risques et aux barrières d'investissements dans les projets d'ER, aussi bien dans les pays développés que dans les PED (Tableau 1). Certaines études ont traité un type bien particulier d'ER comme l'énergie éolienne [European Wind Energy Association (EWEA), 2010 ; Lüthi et Prassler, 2011] ou l'énergie solaire à concentration (Komendantova *et al.*, 2012 ; Zongxian *et al.*, 2012), d'autres ont traité les ER d'une manière générale (Martin et Rice, 2012). Il y a aussi plusieurs auteurs qui ont choisi un ou plusieurs pays bien déterminés, comme le Pakistan (Mirza *et al.*, 2009), l'Allemagne (Hitzeroth et Megerle, 2013), la Chine (Li, Lu et Wu, 2013), l'Australie (Byrnes *et al.*, 2013), les pays arabes du Golf (Patlitzianas, Doukas et Psarras, 2006), etc. D'autres études se sont penchées, plutôt, sur un type bien particulier de risques tels que les risques financiers qui ont attiré le plus d'attention (Lemming, 2003), les risques réglementaires (Wiser *et al.*, 2004 ; Holburn, 2012) et les risques de non acceptation par le public (Wüstenhagen, Wolsink et Bürer, 2007 ; Musall et Kuik, 2011 ; Hitzeroth et Megerle, 2013).

Tableau 1. Revue de littérature sur les risques d'investissement dans les projets d'énergies renouvelables

Référence	Type de risques et/ou barrières	Pays	Méthodologie utilisée	Type d'ER
Wiser et Pickle (1998)	L'instabilité et l'incertitude dans la politique de promotion des ER	Les États-Unis	Une analyse des stratégies existantes de promotion des ER	Tous les types des ER
UNEP (2004)	Les risques au niveau macro-économique	Tous les pays	Des questionnaires, d'entretiens téléphoniques et des revues de la littérature	Tous les types des ER
Patlitzianas, Doukas et Psarras (2006)	Barrières réglementaires, de marché et de coûts	Les pays arabes du Golf	Collecte de données à partir des organisations internationales, des publications et des avis des experts. L'élaboration d'un questionnaire à choix multiples.	Tous les types des ER
Mirza <i>et al.</i> (2009)	Tous les types de risques	Le Pakistan	Une analyse détaillée du contexte des ER au Pakistan	Tous les types des ER
Sovacool (2009)	Les barrières de type culturel	Les États-Unis	181 entretiens semi-structurés auprès de 82 institutions entre 2005 et 2008.	Tous les types des ER
Haggett (2011)	La non-acceptation sociale	Le Royaume-Uni	Une étude basée sur l'expérience dans le domaine de l'éolien <i>onshore</i>	L'énergie éolienne <i>offshore</i>
Holburn (2012)	Les risques réglementaires	Les États-Unis et le Canada	Études de cas concernant la réglementation à Texas et à Ontario	Tous les types des ER
Lilliestam, Bielicki et Patt (2012)	Tous les risques	Étude générale	Une analyse et une comparaison détaillée de deux types de technologies	la technologie de capture et de stockage de CO <sub>2</sub> et la technologie CSP
Martin et Rice (2012)	Tous les types de risques	Queensland (Australie)	Collecte de données à partir des sites web du gouvernement	Tous les types des ER
Richards, Noble et Belcher (2012)	Tous les types de risques	Saskatchewan (Canada)	Des entretiens semi-structurés avec des experts de l'énergie éolienne et des parties prenantes	L'énergie éolienne
Mezher, Dawelbait et Abbas (2012)	Barrières réglementaires, de marché et de coûts	Les Émirats arabes unis	Une revue de littérature	Tous les types des ER

Zongxian <i>et al.</i> (2012)	Le risque d'investissement	La Chine	Méthode basée sur la logique floue (Fuzzy logic) avec la méthode du processus de hiérarchie analytique (AHP)	La technologie CSP
Hitzeroth et Megerle (2013)	Le risque de non acceptation sociale	L'Allemagne	Etude de cas d'un projet d'ER : une enquête avec une analyse d'impact économique au niveau régional	Tous les types des ER
Li, Lu et Wu (2013)	Le risque d'investissement	La Chine	La méthode Monte Carlo pour la simulation de la valeur actualisée nette et l'analyse de la période de récupération de l'investissement et le taux de rendement interne.	L'énergie éolienne
Byrnes <i>et al.</i> (2013)	Les coûts de connexion au réseau, l'incertitude concernant la réglementation future et l'acceptation sociale	L'Australie	Une analyse détaillée du contexte australien	Tous les types
Ahlborg et Hammar (2014)	Tous les types de risques	La Tanzanie et Le Mozambique	Des interviews semi-structurées réalisées avec les acteurs du secteur de l'énergie au niveau national et local, lors des visites aux utilisateurs hors-réseau d'électricité, en Tanzanie et au Mozambique, pendant huit semaines en 2010	Tous les types des ER
Luthra <i>et al.</i> (2015)	Tous les types de risques	L'Inde	Processus de hiérarchie analytique (AHP) et une analyse de sensibilité	Tous les types des ER
Eleftheriadis et Anagnostopoulou (2015)	Tous les risques	La Grèce	Les barrières sont identifiées à partir d'une revue de littérature approfondie, une large documentation et des interviews à questions ouvertes	L'énergie éolienne et l'énergie PV

Source : Auteur

En plus des études détaillées dans le tableau 1, il y a d'autres études qui ont procédé à une analyse complète et générale concernant toutes les barrières d'investissements dans les projets d'ER. Nous pouvons citer dans ce cadre, l'analyse faite par Painuly (2001) qui propose un cadre théorique pour l'identification de toutes les barrières importantes et pertinentes qui entravent l'adoption des ER à grande échelle. Selon Painuly (2001), les barrières à la diffusion des technologies des ER peuvent être classées en six catégories qui sont les suivantes : les barrières liées à la défaillance ou l'imperfection du marché, les barrières liées aux distorsions du marché, les barrières économiques et financières, les barrières institutionnelles, les barrières techniques, les barrières de type social, culturel et comportemental et d'autres barrières de différents types.

Le rapport établi par UNEP (2004) a identifié un certain nombre de risques clés et d'obstacles qui peuvent menacer l'investissement dans les projets d'ER et empêcher une adoption rapide des technologies propres. Cette étude s'est basée sur des questionnaires, d'entretiens téléphoniques et des revues de la littérature afin de fournir une vue globale des barrières. Au niveau macro-économique, les barrières associées à l'investissement dans les projets d'ER ont été classées selon des thèmes distincts et interdépendants qui sont les suivants :

- Les barrières cognitives qui concernent le faible niveau de sensibilisation et d'attention accordées aux instruments de financement et de gestion des risques des ER.
- Les barrières politiques associées aux questions réglementaires, politiques et de gouvernance.
- Les barrières analytiques qui sont relatives à la qualité et la disponibilité des informations nécessaires à la tarification prudente, au développement de méthodologies pour les instruments de gestion des risques et à la création de modèles de tarification utiles pour les marchés environnementaux tels que les permis d'émission de carbone.
- Les barrières de marché liées au manque de cadres financier, juridique et institutionnel pour soutenir la mise en oeuvre de projets d'ER.

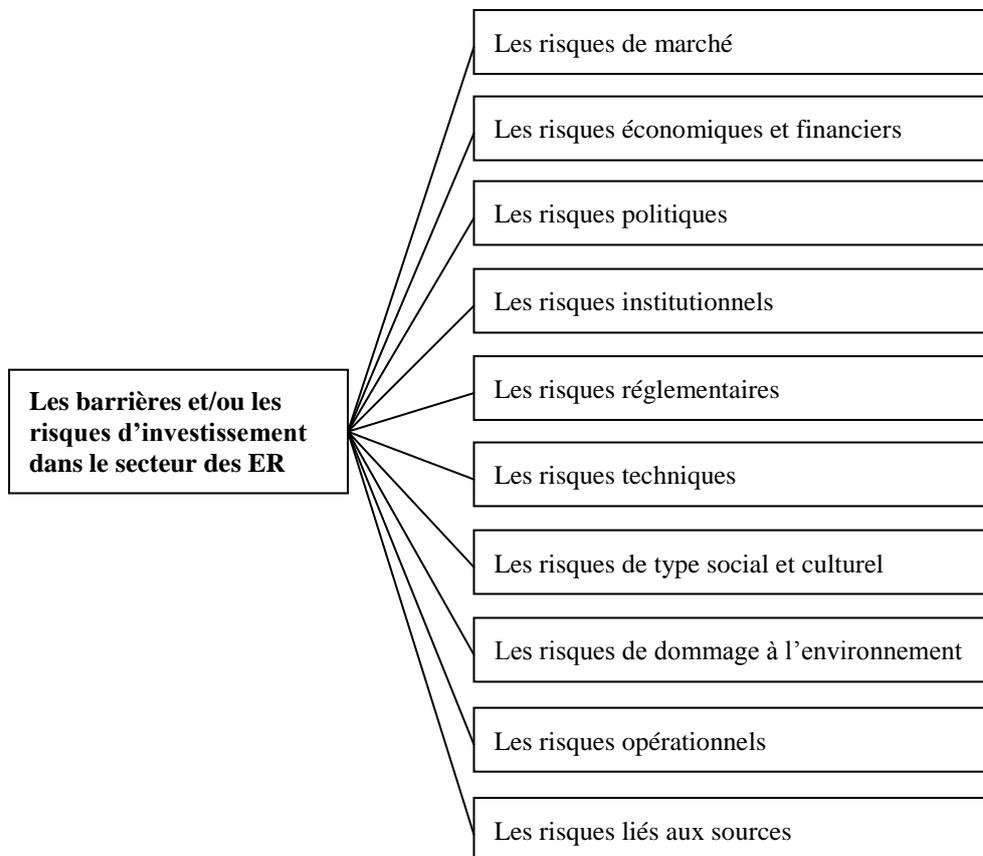
Bien que cette étude soit intéressante, la classification reste trop générale. Dans ce travail, nous allons suivre la même démarche que Painuly (2001), en proposant une analyse plus détaillée et plus pertinente de tous les risques d'investissements dans les projets d'ER. En effet, nous allons classer les risques en dix grandes catégories et nous allons essayer de les expliquer d'une manière plus détaillée. Bien que cette classification soit très

importante, elle est loin d'être exhaustive puisque les barrières varient, en général, selon les types de technologies d'ER, leur maturité et le pays pris en considération.

## 2. Les principales catégories de risques qui entravent l'investissement dans le secteur des énergies renouvelables

L'investissement dans les ER est une affaire risquée pour plusieurs raisons. Tout d'abord, à cause de l'inconvénient du coût élevé de production des ER par rapport aux énergies fossiles, ce qui rend la viabilité commerciale des projets d'ER largement dépendante des régimes réglementaires, des subventions et des aides financières. Ainsi, tout changement des priorités ou des budgets d'appui du gouvernement pour l'énergie verte pourrait conduire à des changements dans la réglementation et donc des impacts sur la rentabilité des projets. Ensuite, la dispersion géographique des projets d'ER peut susciter une forte résistance de type "Not In My Back Yard" (NIMBY), c'est-à-dire « pas dans ma cour », en créant une pression sur le gouvernement afin de refuser les demandes d'approbation.

Figure 8. Les principales catégories des risques d'investissement dans le secteur des énergies renouvelables



Source : Auteur

Dans un secteur aussi jeune et prometteur, estimer tous les risques attendus et prévoir toutes les opportunités à saisir est un grand défi pour les entreprises d'ER, lors de l'évaluation de l'attractivité d'un pays pour leurs investissements.

En s'inspirant de la revue de littérature déjà expliquée, nous allons classer les risques d'investissement dans les projets d'ER en 10 grandes catégories qui sont les suivantes : les risques de marché, les risques économiques et financiers, les risques politiques, les risques institutionnels, les risques réglementaires, les risques techniques, les risques de type social et culturel, les risques de dommage à l'environnement, les risques opérationnels et les risques liés aux sources (Figure 8).

### **2.1. Les risques de marché**

Les risques de marché découlent, essentiellement, de l'existence de défaillance ou d'imperfection dans le marché de l'énergie. En effet, dans plusieurs pays, notamment les PED, le marché des ER souffre de contrôle excessif, d'accès restreint à la technologie, de coûts de transaction élevés et d'absence de concurrence, ce qui rend l'investissement une tâche très difficile et risquée.

Ce qui marque encore les marchés énergétiques est la persistance, dans plusieurs pays, des privilèges accordés aux énergies conventionnelles tels que les subventions, les taxes sur les technologies d'ER, la non considération des externalités et les barrières douanières.

### **2.2. Les risques économiques et financiers**

En général, les investisseurs dans les projets d'ER obtiennent difficilement le financement nécessaire pour leurs projets de grande envergure, surtout dans le cas où les banques trouvent que ces projets ont un risque élevé. Donc, les investisseurs souffrent souvent de difficulté d'accès au capital nécessaire.

Ainsi, les barrières économiques et financières découlent, surtout, du fait que le coût d'investissement dans les projets d'ER est énorme et qu'il y a peu de modes de financement adaptés à ce type d'investissement qui a des caractéristiques bien particulières. En effet, les investisseurs se trouvent, en général, confrontés à des périodes de remboursement longues, à un marché d'ER de petite taille, à un coût de capital élevé, au manque d'accès au capital, au faible accès au crédit pour les consommateurs, au manque d'instruments financiers, à la faible participation du secteur privé, etc.

Dans ce cadre, Del Rio et Gual (2007) et Mendonça (2007) ont examiné l'efficacité de l'instrument *Feed-in Tariff* et ont montré qu'il connaît plus de succès que les autres instruments. Ceci est dû au fait que l'application de ce mécanisme permet de réduire le risque lié au développement du projet ce qui permet d'attirer les investisseurs.

Cependant, il est à noter que l'investissement dans la plupart des technologies d'ER peut faire l'objet d'économies d'échelle importantes. En effet, le coût d'investissement diminue d'une manière considérable avec la taille du projet. De ce fait, les projets ne deviennent vraiment rentables que si la capacité installée atteint plusieurs dizaines, voire des centaines de mégawatts. Mais, pour installer une telle capacité il y aura besoin d'une très grande superficie et surtout d'un capital initial qui peut atteindre plusieurs milliards.

En plus de la difficulté de financement, les méthodologies de souscription existantes dans le marché de l'assurance sont rigides et non adaptées aux projets des ER. Par conséquent, elles entravent la prise d'initiative par les investisseurs et aggravent encore les risques financiers. La convergence continue des marchés de l'assurance et des capitaux, ces dernières années, ouvre des nouvelles possibilités conceptuelles pour lever les capitaux et gérer les risques financiers dans le secteur des ER.

### **2.3. Les risques politiques**

Les risques politiques incluent le faible niveau de stabilité politique dans un pays, l'incertitude concernant le soutien des gouvernements, les changements politiques imprévisibles, le risque de violence ou de guerre civile, etc. Ces dernières années, le risque politique est devenu plus grave que jamais, surtout avec les révolutions dans la région MENA qui ont abouti à des schémas politiques instables ce qui fait fuir les investisseurs.

Tous les grands projets d'ER nécessitent des mesures pour la maîtrise des risques techniques et des risques de marché. Mais, l'investissement en Afrique du Nord se distingue, en plus de ces risques, des risques de type politique (Komendantova, Patt et Williges, 2011).

Al Khattab, Anchor et Davies (2007) ont interrogé des investisseurs étrangers dans des PED. Les résultats du questionnaire ont révélé que le risque politique est le plus mentionné par les investisseurs (76% des investisseurs étrangers). Alors que les risques financiers ont été mentionnés par 63%, les risques culturels par 40% et les risques naturels par 16% des investisseurs.

## 2.4. Les risques institutionnels

Les risques institutionnels découlent surtout de l'effet de « dépendance du chemin parcouru » qui a été expliqué dans la section précédente. En effet, il est très difficile de changer le contexte institutionnel existant, qui est conçu pour les combustibles fossiles, et de le rendre favorable au déploiement des ER. Ceci nécessite des efforts de la part de toutes les parties prenantes, durant de longues années.

Ces barrières institutionnelles se manifestent par le manque d'institutions et de mécanismes adéquats, l'absence d'un cadre juridique et réglementaire, les difficultés dans la mise en œuvre des incitations financières et l'instabilité de l'environnement macro-économique. Ces barrières institutionnelles peuvent être aggravées par le manque d'implication des parties prenantes dans le processus décisionnel, les conflits d'intérêts, l'absence d'une culture de R&D, la non participation du secteur privé, le manque d'institutions professionnelles spécialisées, la corruption, etc.

## 2.5. Les risques réglementaires

Le risque réglementaire se manifeste dans le cas où les futures lois et réglementations ou les révisions d'un contrat de régulation peuvent modifier les avantages ou les charges d'un contrat à l'une des parties considérées. C'est aussi le risque d'un changement dans les politiques publiques (la politique de subventions, par exemple) ce qui va affecter la rentabilité du projet. D'une manière générale, les risques réglementaires les plus préoccupants pour les investisseurs, dans le secteur des ER, sont liés au monopole de l'État, à l'absence de cadre réglementaire stable et à la mauvaise gouvernance publique. En plus, il faut prendre en considération la complexité des procédures administratives. Par exemple, la procédure nécessaire pour obtenir l'autorisation requise pour réaliser le système de transmission électrique est trop complexe et incertaine et elle peut même durer plusieurs années.

Plusieurs recherches ont mis l'accent sur les risques réglementaires et l'incertitude concernant la réglementation future comme étant les principales barrières à l'investissement dans les projets d'ER (Holburn, 2012). En effet, l'inadéquation des mesures de soutien mises en place ainsi que l'incertitude entourant la politique future du gouvernement sont parmi les principaux obstacles au développement à grande échelle des ER. En fait, ce qui est le plus important pour les investisseurs potentiels est l'existence

d'une approche gouvernementale stable à long terme et qui permet de fournir un environnement plus favorable pour la diffusion des nouvelles technologies vertes.

Tandis que les possibilités d'investissement et les opportunités offertes par les différentes juridictions sont souvent faciles à identifier, ce sont, plutôt, les risques réglementaires pour les investisseurs potentiels qui sont les plus difficiles à déterminer avec précision. Ceci est dû à l'utilisation relativement récente de l'énergie verte ce qui signifie qu'il n'y a pas de retour d'expérience qui permet aux investisseurs d'apprendre davantage sur le comportement des différents gouvernements et les risques inhérents aux politiques mises en œuvre.

D'une manière générale, les entreprises qui identifient avec exactitude l'ampleur et les sources du risque réglementaire présenteront un rendement organisationnel supérieur dans le long terme. En effet, comprendre le risque réglementaire dans une juridiction permet aux entreprises de mieux adapter leurs stratégies futures.

## **2.6. Les risques techniques**

Les risques techniques comprennent toutes les incertitudes concernant l'existence et le fonctionnement futur des actifs physiques. Ce risque varie selon le type de technologie utilisée et sa maturité. Les risques techniques sont, par exemple, plus élevés pour la technologie CSP que pour la technologie solaire PV, grâce aux effets d'expériences et d'apprentissages. Ces risques augmentent avec la taille des projets, avec l'association d'une ER avec une autre source d'énergie fossile et avec l'utilisation conjointe de deux sources d'ER. Ce risque peut même menacer la viabilité de l'entreprise dans le cas d'obsolescence technologique.

Ce risque est très dépendant de la technologie utilisée, de la taille de l'installation et du type de transmission. Par exemple, le risque de perturbations dans le fonctionnement d'un parc éolien ou d'une centrale solaire peut augmenter avec la dépendance à une transmission de l'électricité à longue distance et à cause des tempêtes ou d'autres menaces similaires.

## **2.7. Les risques de type social, culturel et comportemental**

L'acceptation sociale est un élément important dans le développement du secteur des ER. Le phénomène « NIMBY » existe dans le cas des parcs éoliens qui ont parfois suscité des oppositions farouches, notamment aux États-Unis et en Allemagne. Plusieurs cas, au

niveau international, ont montré que la participation de la communauté locale au déploiement des ER facilite l'acceptation et le soutien sociaux. En effet, au fur et à mesure que les ER commencent à avoir une part plus importante dans l'offre de l'électricité et que les parties prenantes commencent à se familiariser, de plus en plus, avec les technologies d'ER, il est probable que l'acceptation sociale va s'accélérer.

Ainsi, il est clair que l'augmentation des investissements dans les ER exige des changements importants dans le contexte social et institutionnel (Krewitt *et al.*, 2007). Ceci a été aussi confirmé par Grubb (1990) qui considère que les avancées technologiques et même les percées technologiques sont certainement appréciables, mais la révolution nécessaire est celle des attitudes. Ce changement dans les attitudes concerne une multitude d'acteurs tels que les décideurs politiques, les citoyens, les divers opérateurs du marché et les investisseurs.

En général, au cours de la période d'étude de faisabilité et de planification pour les projets de grande envergure, il n'y a guère de preuves de résistance du public et de l'existence du risque de non-acceptation. Ce n'est que peu de temps avant le début des travaux et parfois au moment du commencement de la construction, que l'opposition sociale se manifeste sous la forme d'émeutes, de manifestations, d'occupations des sites et même de "*sit-in*" dans les lieux des travaux. Ceci peut avoir lieu même dans le cas où les avantages sociaux et environnementaux du projet sont bien communiqués à la communauté locale. A ce stade, on peut même assister à une confrontation entre les opposants et les partisans. Ces manifestations auront des effets négatifs durables pour toutes les parties prenantes, tels que la perte de confiance, les pertes financières pour de nombreux acteurs et la démotivation des acteurs. Ces conflits peuvent même atteindre la phase de confrontations violentes avec des dommages aux personnes et aux biens.

Ainsi, il est clair que l'acceptation sociale des technologies des ER et surtout l'acceptation par la communauté financière, par exemple les banques et les fonds d'investissement, peut être un facteur de succès important pour les politiques énergétiques et climatiques futures (Wüstenhagen, Wolsink et Bürer, 2007).

## **2.8. Les risques de dommage à l'environnement**

Même si les ER sont connues pour le fait d'être propres et vertes, cela n'empêche pas qu'il y a des risques de dommages à l'environnement. Ces risques peuvent varier d'un type d'ER à un autre. Par exemple pour le cas des centrales CSP, il existe le risque causé par

l'utilisation de divers types de fluide, de produits chimiques, du sel fondu, etc. Pour le cas des parcs éoliens, il y a le risque de mort des oiseaux par les éoliennes et aussi d'atteinte à la beauté du paysage.

## **2.9. Les risques opérationnels**

Vu que les ER sont des technologies relativement nouvelles, alors les risques opérationnels associés sont beaucoup plus importants que ceux des technologies matures. Ces risques englobent le manque de standards, de codes et de certifications. En plus, ce secteur souffre de la rareté du personnel qualifié, du manque d'installations d'entretien et du nombre limité d'entrepreneurs intéressés. Les contraintes liées au réseau électrique sont aussi très probables. Par conséquent, on peut assister au risque de fermeture non planifiée et soudaine de l'usine, du parc ou de la centrale en raison de l'indisponibilité des ressources, des dommages dans l'usine ou de défaillance d'un composant.

Les risques opérationnels peuvent aussi être causés par la non atteinte de la performance prévue dans le cas où le parc ou la centrale ne fonctionne pas selon les qualifications prévues et exigées dans les contrats pour ce qui est du temps et de la quantité. Ce risque peut être aggravé dans le cas où la conception de la centrale, du parc ou de l'usine est très compliquée.

Généralement, les pertes financières causées par les retards dans les projets et les dommages pendant la fabrication, le transport, l'installation, la construction et les étapes opérationnelles sont une préoccupation majeure pour les financiers. Les bailleurs de fonds exigent donc une assurance qui couvre la plupart de ces risques. En fait, la police d'assurance est une partie intégrante de l'élaboration de tous les contrats.

## **2.10. Les risques liés aux sources**

Ce risque concerne la baisse de la quantité de l'électricité produite en raison de la diminution de la vitesse du vent ou des heures du rayonnement solaire. Par exemple, dans le cas de la technologie CSP, il ne suffit pas d'avoir une superficie large mais il faut aussi que l'irradiation solaire soit abondante.

Dans le cas des centrales solaires, les déserts ont toutes les caractéristiques nécessaires quant à la superficie et le rayonnement solaire. Cependant, les centrales solaires se heurtent au problème de pénurie d'eau. En fait, l'eau est très nécessaire pour le système de refroidissement ainsi que le nettoyage des miroirs. De ce fait, le risque de non

disponibilité des ressources nécessaires est l'un des risques les plus importants à prendre en considération lors de la phase d'étude de faisabilité et surtout dans le cadre de l'étude sociale et environnementale.

### **3. Les risques spécifiques aux projets d'énergies renouvelables en Afrique du Nord**

La production de l'électricité à grande échelle à partir des centrales solaires, en Afrique du Nord, et sa transmission ultérieure vers l'Europe exigent ce qui est appelé des « méga-projets » qui sont très coûteux (plus d'un milliard de dollars). Ces méga-projets attirent l'attention du public en raison de leur impact important sur les communautés, les budgets et l'environnement (Flyvbjerg, Bruzelius et Rothengatter, 2003).

Ces projets de grande envergure sont particulièrement menacés par les risques de dépassement des coûts prévus. En effet, les projets de grande taille sont caractérisés par des coûts irrécupérables très élevés (ce sont des coûts fixes qui ont déjà été engagés et ne peuvent pas être récupérés) et par des coûts de transaction importants à cause des situations contractuelles complexes. En plus, les méga-projets dans l'infrastructure et l'énergie souffrent souvent d'autres facteurs qui augmentent leurs coûts. Le facteur le plus important est l'influence de la politique sur les prix, ce qui rend les investisseurs très dépendants des gouvernements ou des réglementations qui peuvent renier les engagements initiaux, une fois les investissements ont commencé.

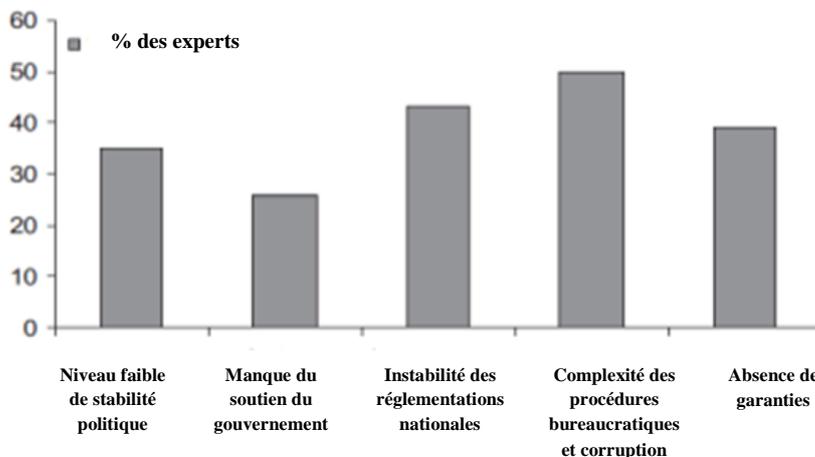
Tous les grands projets d'énergie impliquent des risques techniques et de marché, mais l'investissement dans les pays d'Afrique du Nord peut soulever des préoccupations supplémentaires, à savoir la question des risques politiques. Al Khattab, Anchor et Davies (2007) ont interrogé les parties prenantes actives dans des Investissements Directs à l'Etranger (IDE) dans les PED. Les résultats montrent que les risques politiques, y compris la réglementation et la stabilité politique, ont été identifiés plus fréquemment comme une principale cause de préoccupation (76% de tous les répondants) et dépassent les risques financiers (63%).

La Fondation Bleyzer (2002) a mis l'accent sur trois types de risques qui sont les plus importants pour les acteurs d'IDE : les risques liés aux effets de monopole de l'État, l'absence d'un cadre juridique stable et la mauvaise gouvernance publique et des entreprises, y compris la corruption et les procédures bureaucratiques. En plus des risques

précités, l'investissement dans les pays de l'Afrique du Nord se caractérise par des risques de type géopolitique et de sécurité, notamment le terrorisme.

Komendantova *et al.* (2012) ont interrogé des parties prenantes dans des projets d'ER en Afrique du Nord. Ils ont mené deux séries d'interviews afin d'identifier les risques qui occupent le plus les investisseurs dans le domaine des ER. Tout d'abord, ils ont effectué des interviews non structurés avec 23 parties prenantes qui sont toutes actives dans des projets CSP au nord de l'Afrique. Ils ont demandé aux experts de mentionner les barrières et les risques liés à l'investissement dans des projets d'ER. Plus que la moitié des répondants ont mentionné la complexité des procédures bureaucratiques et la corruption comme étant des risques d'une grande importance. D'autres risques ont été considérés par les experts comme étant des risques d'une grande importance, ces risques sont : l'instabilité des réglementations nationales, l'absence de garanties provenant des gouvernements et de la communauté internationale, le niveau faible de stabilité politique et le manque du soutien du gouvernement.

Figure 9. Les barrières à l'investissement (n=23)



Source : Komendantova *et al.* (2012, p.106)

La deuxième série d'interviews était sous la forme d'entretiens téléphoniques semi-structurés. Les auteurs ont interrogé 18 experts et ils ont demandé de classer les risques en fonction de la gravité et de la probabilité. La liste des risques donnée aux experts pour faire le classement contient 9 classes de risques : technique, de construction, opérationnel, de revenu, financier, force majeure, réglementaire, environnemental et politique. Les résultats des entretiens montrent que seulement trois classes de risques (réglementaire, politique et

force majeure) ont été mentionnées, par au moins un des répondants, comme étant un risque de niveau de gravité élevé. Les autres 6 classes ont été considérées par les experts comme étant des risques de niveau de gravité moyen ou faible. L'évaluation de la gravité des risques ainsi que la probabilité d'occurrence montrent que les procédures bureaucratiques et la corruption sont des risques de gravité élevée et aussi les plus probables d'avoir lieu pour la région de l'Afrique du Nord.

Il est certain que des risques excessifs, dans certains pays ou régions, auront des effets négatifs sur les intentions des investisseurs qui peuvent tarder leurs projets ou même les déplacer vers des pays moins risqués. Ceci peut avoir lieu même si les gouvernements offrent des avantages fiscaux et des subventions pour attirer les capitaux étrangers. Mais, ces stratégies s'avèrent souvent inefficaces, en fait une fois les investisseurs quittent un pays, il sera très difficile de les convaincre d'investir de nouveau.

## **Conclusion**

Il existe une littérature abondante qui s'est intéressée aux concepts de « verrouillage technologique » et de « verrouillage au carbone », comme étant les barrières principales qui entravent la transition vers un système énergétique basé sur les ER. L'idée principale sur laquelle se base cet effet est le fait qu'il y a une interaction entre le développement des technologies et le cadre social, économique et culturel dans lequel ces technologies sont développées (Rip et Kemp, 1998 ; Kemp, 2000). Ceci amène à constater que l'utilisation d'une nouvelle technologie et sa diffusion dépendent du chemin de son développement nommé « dépendance au sentier » (David, 1985), qui intègre les caractéristiques des marchés initiaux, les facteurs réglementaires et institutionnels et les attentes des consommateurs.

Dans la première section, nous avons expliqué cet effet et la façon avec laquelle il est formé. La première explication du « verrouillage technologique » est le « paradigme technologique » qui se base sur l'idée que la nature et le sens du progrès technologique sont fortement influencés par le cadre cognitif des acteurs. Nelson et Winter (1977) ont utilisé le terme de « régime technologique » pour décrire ces cadres alors que Dosi (1982) a utilisé le terme de « paradigme technologique ». La seconde explication donnée à l'existence de l'effet de « verrouillage technologique », et qui est fortement liée à la première, est l'existence de rendements croissants d'adoption. Ce sont des mécanismes de

rétroaction positive qui fonctionnent pour accroître l'attractivité de l'adoption d'une technologie particulière, au fur et à mesure qu'elle est adoptée.

Ensuite, nous avons mis l'accent sur l'effet de « verrouillage au carbone » qui a suscité un intérêt grandissant, à partir des années 1990, dans le domaine des problèmes environnementaux et du changement climatique. En effet, il est considéré comme un obstacle à une transition vers des technologies propres (Ayres, 1991 ; Kemp, 1994 ; Freeman et Soete, 1997 ; Unruh, 2000). En effet, c'est « la dépendance au chemin parcouru » qui a conduit à des situations de « verrouillage au carbone » et plusieurs études ont suggéré que le monde est actuellement verrouillé en une économie à émission intense de carbone, ce qui est difficile à transcender.

Dans la seconde section, nous avons analysé les impacts du « verrouillage au carbone » sur l'investissement dans le secteur des ER. En effet, à cause de cet effet, l'investissement dans des projets d'ER fait face à plusieurs barrières d'investissements de différents types. Nous avons choisi de classer ces risques en 10 catégories : les risques de marché, les risques économiques et financiers, les risques politiques, les risques institutionnels, les risques réglementaires, les risques techniques, les risques de type social et culturel, les risques de dommage à l'environnement, les risques opérationnels et les risques liés aux sources.

Enfin, nous avons mis l'accent sur les risques spécifiques aux projets d'ER, en Afrique du Nord, qui sont surtout les risques de type politique et réglementaire. En effet, la complexité des procédures bureaucratiques, la corruption et le niveau faible de stabilité politique sont les principales préoccupations des investisseurs potentiels.

Notre analyse des différents risques dans le secteur des ER nous amène à la conclusion suivante : **la transition vers les ER est un processus lent, compliqué et qui se heurte à plusieurs barrières et risques de différents types (économique, financier, institutionnel, politique, etc.) sous l'effet de « verrouillage technologique » et de « la dépendance au sentier parcouru ».** Cette constatation confirme la nécessité du recours à une approche du management des risques qui sera détaillée dans le chapitre suivant.

## **Chapitre 4. Vers une approche du management des risques pour l'analyse de la transition vers les énergies renouvelables**

### **Introduction**

Notre époque est caractérisée par une concentration urbaine, un développement rapide du progrès technologique et une multiplication des parties prenantes aux risques (les associations, les consommateurs, les médias, etc.). Par conséquent, les sociétés modernes sont entrées dans une nouvelle ère où il est primordial d'avoir une culture des risques pour pouvoir faire face à des risques complexes et polymorphes. Le sociologue allemand Ulrich Beck (2001) décrit la société moderne comme étant « une société du risque ».

Le domaine de l'environnement et des ER est particulièrement concerné par l'analyse des risques. L'objectif de ce chapitre est d'expliquer l'approche du management des risques et son application dans le domaine des ER. Pour y arriver, nous avons organisé ce chapitre sous la forme de deux sections.

La première section sera consacrée aux concepts de risque et d'incertitude et à l'approche du management des risques, en traitant l'historique de son évolution ainsi que le processus et la démarche à suivre. En effet, le management des risques permet de trouver les réponses aux questions suivantes : quels sont les risques de l'activité ? Comment diminuer ces risques pour les rendre tolérables ou acceptables ? Et comment gérer les risques résiduels pour garantir leur acceptabilité dans le temps ?

La seconde section va être consacrée à l'application de l'approche du management des risques dans l'étude de la transition vers les ER. Nous allons analyser les limites des autres approches et des différentes méthodes d'analyse des risques pour expliquer l'intérêt du recours à l'approche du management des risques et les avantages de la méthode AGR qui va être appliquée. En effet, en plus de l'incertitude et de l'existence d'une information imparfaite, il y a des risques de tout type qui entravent le processus de diffusion des ER, ce qui justifie l'approche du management des risques.

## **Section 1. Le management du risque : nouvelle approche et nouveaux enjeux**

Durant plusieurs décennies, des philosophes (Jonas, 1991), des sociologues (Beck, 2001) et des économistes (Knight, 1921) se sont intéressés aux termes incertitude et risque. Il n'est ni possible ni désirable, dans le cadre de ce travail, de détailler tout le débat qui a entouré ces termes. Nous allons, plutôt, s'intéresser à la distinction entre risque et incertitude et à la prise de décision en présence de risque. Nous allons étudier aussi les concepts d'attitude et de perception des risques, la typologie des risques et la procédure à adopter pour gérer les risques.

### **1. Les concepts de base**

#### **1.1. Les concepts d'incertitude et de risque**

Hillson et Murray-Webster (2007, p.5) ont fait la différence suivante entre risque et incertitude. Ils considèrent le risque comme étant une « incertitude qui compte » (*“uncertainty that matters”*), puisque l'incertitude sans conséquences ne pose aucun risque. Ainsi, Hillson et Murray-Webster (2007, p.5) ont donné une définition plus précise du risque qui est : *“an uncertainty that could affect one or more objectives”*<sup>24</sup>.

L'incertitude et le risque sont indissociables de la vie économique. Pour cette raison, plusieurs économistes se sont intéressés à ces concepts. Ainsi, les différents courants de pensée économique ont essayé d'expliquer et de prévoir le comportement des agents économiques, en situation d'incertitude et de risque. Par Exemple, North (1990) considère qu'il est nécessaire de mettre en place des dispositifs formels et d'autres informels afin d'atténuer les risques. Knight (1921) souligne que la compréhension du fonctionnement du système économique nécessite tout d'abord d'examiner et d'analyser le sens et la portée du concept d'incertitude.

Bien que le concept de risque soit largement utilisé de nos jours, notamment par les hommes politiques, les économistes, les gérants d'entreprise, les investisseurs, les agences de notation et les organisations internationales, il n'y a pas vraiment un consensus sur le sens et la définition à donner à ce terme.

---

<sup>24</sup> « Une incertitude qui pourrait affecter un ou plusieurs objectifs » (trad.Auteur).

Vu que la société est un système complexe ceci va causer une complexité des risques dont elle peut faire face. De ce fait, plusieurs auteurs de toutes les disciplines se sont intéressés au concept de risque et surtout à la manière de le gérer. On assiste aussi à une multiplicité de termes (risque, danger, menace, incertitude, accident, etc.) souvent mal définis, donnant lieu à plusieurs confusions et même à des contradictions. Dans le vocabulaire courant, il y a une grande confusion entre les termes risque, menace et danger. Il est à noter que le danger est un état alors que le risque est l'exposition d'une ressource à un état de danger. Cette confusion se trouve même dans les dictionnaires. En effet, selon le petit Larousse 2010, le terme risque est défini de la manière suivante : « *danger, inconvénient plus ou moins probable auquel on est exposé* ».

Le risque est un concept mal défini et aussi mal utilisé puisque ce même mot est souvent utilisé pour désigner plusieurs sens à la fois. En effet, on l'utilise pour désigner une situation dommageable (exemple : il y a un risque de séisme), tout ou partie des causes d'une situation dommageable (exemple : la machine risque une surcharge électrique), les conséquences de cette situation dommageable (exemple : l'entreprise risque de tomber en faillite), et même il peut faire référence aux victimes potentielles (exemple : cette substance présente un risque majeur aux consommateurs). Dans le cas plus précis de l'entreprise, on peut considérer le risque comme étant un événement aléatoire et redouté affectant les ressources de l'entreprise, tout en ayant un impact négatif sur ses objectifs et ses obligations sociétales. L'OCDE (2003, p.32) donne une définition technique du risque qui est la suivante : « *La notion de risque renvoie à la combinaison de deux facteurs : la probabilité qu'un évènement nuisible se produise et le dommage qui pourrait potentiellement en résulter* ».

Malgré les différences dans les détails, toutes les définitions données au risque mettent l'accent sur deux caractéristiques du risque qui sont les suivantes : tout risque est lié à l'incertitude et il a des conséquences (Hillson et Murray-Webster, 2007, p.5). Même si les définitions du terme risque sont différentes et très diversifiées, la majorité d'entre elles soulignent l'aspect négatif de ce terme.

Cependant, la définition du risque, reste toujours une tâche difficile comme le souligne Beck (2001, p.52), « *lorsqu'il s'agit de définir les risques, la science perd le monopole de la rationalité. Les différents acteurs de la modernisation et les différents groupes exposés au risque ont toujours des objectifs, des intérêts et des points de vue*

*concurrentiels et conflictuels qui sont forcément associés lors de la définition des risques puisque appréhendés comme étant cause ou effet, comme étant à l'origine d'un risque ou soumis à ce risque ».*

Hillson et Murray-Webster (2007, p.5) ont mis l'accent sur l'évolution de la définition donnée au terme risque dans les normes officielles qui concernent le management du risque et la sécurité :

- Avant 1997, la définition donnée au risque met l'accent seulement sur l'aspect négatif du risque, il est alors lié au danger, à la perte, etc. Ainsi, le risque est perçu comme étant une incertitude qui pourrait avoir un effet négatif sur un ou plusieurs objectifs.
- A partir de 1997, la définition donnée au risque est plutôt neutre, il est défini comme étant une incertitude qui pourrait avoir un effet sur un ou plusieurs objectifs sans préciser la nature de l'impact, c'est-à-dire positive ou négative.
- A partir de 2000, le risque est considéré à la fois comme une menace et une opportunité.

Bien que le débat sur la définition du risque continue encore, plusieurs définitions récentes mettent l'accent sur l'aspect général du risque qui englobe à la fois la menace et l'opportunité. De ce fait, la démarche de management du risque a pour vocation de minimiser l'effet négatif du risque (la menace) et de maximiser l'effet positif (l'opportunité) afin d'optimiser l'achèvement des objectifs.

Les risques sont de plus en plus complexes à cause d'une plus grande mobilité des personnes, des biens, des services, des capitaux et de l'information (OCDE, 2003). Ainsi, le risque renvoie à une situation complexe et multidimensionnelle qui fait appel à des attitudes différentes et des points de vue différents de la part de tous les acteurs.

Mais, quelque soit la nature du risque, il a pour origine les actions des êtres humains. En effet, les risques sont souvent causés par les activités humaines soit d'une manière directe ou indirecte. Les individus véhiculent donc du risque : « *Les risques sont souvent le contrecoup de l'activité humaine. Même les risques dits naturels peuvent avoir pour germe l'action de l'homme sur son écosystème* » (Hassid, 2008, p.29). Le risque est le produit même de nos sociétés modernes et il est considéré par Beck (2001), comme étant un phénomène social voire même individuel en considérant que « *la production sociale de richesses est systématiquement corrélée à la production sociale de risques* » (Beck, 2001, p.36).

## 1.2. La typologie des risques

Nous allons classer les risques selon leurs origines ainsi que leurs natures.

- Origine : risques intrinsèques versus risques fonctionnels
  - Les risques intrinsèques ou structurels : ils trouvent leurs origines dans la nature même des éléments du système, en absence de tout fonctionnement. En effet, aussi bien les éléments qui constituent le système que les éléments produits par celui-ci peuvent être sources de danger sans que le système soit nécessairement en fonctionnement.
  - Les risques fonctionnels ou conjoncturels : ils sont causés par le fonctionnement du système et non par les éléments de celui-ci.
- Nature : risques purs versus risques spéculatifs
  - Les risques spéculatifs : ce sont des risques pris volontairement. Ils résultent des choix et des orientations stratégiques fixés par l'entreprise dans le but de gagner plus. Ils concernent, par exemple, l'investissement de capitaux ou le lancement d'un nouveau produit. Les dirigeants doivent donc adopter « une bonne prise de risque » à moins de faire faillite. Ces risques sont subis, suite à une décision raisonnée, la perte potentielle est acceptée en vue du gain et ils sont maîtrisables et contrôlables.
  - Les risques purs : ce sont des risques subis par l'entreprise et découlent de l'activité même de l'entreprise, indépendamment du profil du dirigeant et de ses choix stratégiques. Ils englobent, par exemple, les incendies, les grèves, les pertes de données, etc. Ces risques peuvent entraîner des pertes et sont difficilement contrôlables.

## 1.3. La perception du risque

La perception du risque est un concept important qui a fait l'objet de plusieurs travaux, à partir des années 1970 (Slovic, Fischhoff et Lichtenstein, 1982 ; Slovic, 1987 ; 1993 ; Kermisch, 2010). La perception et l'attitude du public, des investisseurs, des collectivités locales sont des composantes essentielles de toute décision en présence de risque. En effet, le comportement de tout individu face au risque est déterminé sous l'influence de plusieurs facteurs, notamment les besoins, les motivations, la perception et l'attitude. Par conséquent, ce n'est pas la réalité du risque qui motive toute réaction, mais c'est plutôt notre perception du risque qui stimule tout comportement envers une situation de risque. La perception du risque est fondamentale puisqu'elle permet de déterminer si le risque est acceptable ou non pour les parties considérées.

Le processus de perception du risque est souvent influencé par les besoins, les valeurs, la culture, les intérêts et le cadre de référence de l'individu. La perception du risque est souvent individuelle, mais on peut avoir un groupe ou un organisme qui ont la même perception du risque. On peut avoir aussi deux perceptions différentes du même risque qui sont toutes les deux correctes, car elles sont déterminées sous l'influence de facteurs différents. Il est à noter aussi que la perception du même individu face au même risque évolue d'une manière continue.

Les caractéristiques de la perception sont les suivantes :

- La perception est **subjective** : l'acceptation de toute information par l'individu ne se fait que si elle est plus ou moins compatible avec son acquis culturel, l'image qu'il a de lui-même, ses croyances, etc.
- La perception est **sélective** : l'individu est souvent incapable de percevoir tous les aspects d'une situation avec la même intensité.
- La perception est **cumulative** : l'individu est capable d'enregistrer en même temps plusieurs sensations qu'il va les accumuler, par la suite, pour créer un tout unifié.
- La perception est **temporelle** : puisqu'elle concerne généralement le court terme.

Burns *et al.* (1993) ont constaté que la réponse publique vis à vis des risques et une large couverture médiatique sont les deux principaux canaux de l'amplification sociale des risques. En effet, la perception d'un risque de la part des individus est très influencée et alimentée par les médias, ce qui peut entraîner des biais très coûteux pour les parties concernées. Cette idée est confirmée aussi par le rapport de l'OCDE (2003, p.73) qui considère que : « *Le risque est une construction sociale autant qu'une réalité physique, et ces deux aspects sont intimement liés* ».

La perception du risque a un impact important sur son évolution, dans ce sens Desroches *et al.* (2006) précisent qu'une mauvaise perception peut conduire à une sous évaluation d'un risque ou d'une opportunité. Par conséquent, il y aura des impacts de différents types sur l'activité de l'entreprise.

#### **1.4. L'attitude face au risque**

L'attitude désigne la prédisposition à réagir d'une manière favorable ou défavorable face à certains aspects du monde qui nous entoure. La connaissance de l'attitude vis-à-vis du risque permet de prédire les comportements futurs des individus. Selon Hillson et

Murray-Webster (2007, p.6), l'attitude est définie comme étant : *“state of mind, mental view or disposition with regard to a fact or state”*<sup>25</sup>.

Il ne faut jamais négliger la prise en compte de la réaction de la société vis-à-vis des risques. En effet, la réaction de la société influence énormément les conséquences finales aussi bien que les caractéristiques même du risque et peuvent avoir un effet amplificateur. La prise en compte des aspects sociétaux est donc très importante.

Kerebel (2009, p.58) distingue cinq profils psychologiques (en considérant l'attitude face au risque et l'arbitrage risques/opportunités) qui sont les suivants :

- Le profil risquophile : la prise de risque est considérée comme une valeur importante dans l'entreprise et elle est encouragée par les dirigeants. Dans ce cas, la prise de risque est l'un des piliers de la stratégie de l'entreprise.
- Le profil tolérant aux risques : dans ce cas l'organisation encourage la prise de risque, mais tout en appliquant une démarche rigoureuse de management du risque.
- Le profil neutre : l'organisation opte pour une approche structurée en matière d'arbitrage risques/opportunités.
- Le profil moyennement risquophobe : la prise de risque n'est pas trop encouragée par les dirigeants. Le transfert des risques vers les tiers est la stratégie préférée de l'organisation.
- Le profil risquophobe : la prise de risque ne fait pas partie des valeurs de l'organisation. Les risques qui ne peuvent pas être maîtrisés sont supprimés, même si cela peut amener à supprimer certaines activités.

## 2. L'analyse des choix sous incertitude

L'analyse des choix sous incertitude a été et reste toujours au cœur des sciences sociales et surtout des sciences économiques, depuis des décennies (Moureau et Rivaud-Danset, 2004). C'est à Nicolas Bernoulli que revient l'énoncé d'un paradigme probabiliste, en 1713, mais la reformulation mathématique de ce paradigme revient au mathématicien Daniel Bernoulli sous le nom du « paradoxe de Saint-Pétersbourg ». Ainsi, l'approche de base à la décision sous incertitude a été introduite par Bernoulli (1738) et a été modélisée ensuite, formellement, par von Neumann et Morgenstern (1944). Ces derniers sont à

---

<sup>25</sup> « Un état d'esprit, un point de vue mental ou une disposition à l'égard d'un fait ou d'un état » (trad.Auteur).

l'origine des fondements de la théorie de l'utilité espérée qui repose sur le fait que les individus font des choix rationnels, en se basant sur leurs préférences pour le risque et leur connaissance des résultats potentiels et les probabilités respectives.

De ce fait, ce n'est qu'au XX<sup>e</sup> siècle que les fondements axiomatiques de la théorie de l'utilité espérée viennent d'être formulés, aussi bien dans le cas où les probabilités sont connues de l'individu qui prend la décision que dans le cas où les probabilités sont inconnues. En effet, on parle de décision face au risque lorsqu'un individu opte pour des choix dont les conséquences dépendent de la réalisation d'événements auxquels des probabilités sont rattachées, alors qu'on parle de décision face à l'incertitude dans le cas contraire. C'est à l'économiste Knight (1921) que revient la célèbre distinction entre les situations « risquées » où les probabilités sont connues et les situations « incertaines » où les probabilités sont inconnues.

En ce qui concerne le cas des situations où les probabilités sont connues, les fondements axiomatiques sont ébauchés et publiés par Ramsey (1931). La formulation de ces fondements revient à von Neumann et Morgenstern (1944) dans l'ouvrage "*The Theory of Games and Economic Behaviour*". Ils ont fourni les axiomes de base du comportement rationnel (les axiomes de complétude, de transitivité, de continuité et d'indépendance). Ainsi, ces auteurs ont formalisé le critère d'utilité espérée afin de déterminer ce que doit être le comportement idéal et *a priori* d'un individu en situation de prise de décision en présence des risques. Ainsi, ils ont donné les règles de base nécessaires à une prise de décision rationnelle. Par la suite, le mathématicien Savage (1954) a intégré le traitement des situations incertaines au modèle de l'utilité espérée.

A partir des années 1920, la théorie de l'utilité espérée a été appliquée aussi bien par les économistes que les financiers et les mathématiciens, tout en fournissant un outil d'analyse aux fournisseurs et aux assureurs. Cependant, les critiques à cette théorie n'ont pas trop tardé à apparaître, surtout dans les travaux de Allais (1953) et de Kahneman et Tversky (1979). En effet, Allais (1953) est le premier à critiquer le modèle de l'utilité espérée, notamment l'axiome d'indépendance. Il a montré que les préférences des individus vis-à-vis d'un gain donné et donc son utilité varient chaque fois que les probabilités de réalisation de ce gain changent. Il rejette l'idée de base selon laquelle les préférences qui concernent un gain bien déterminé restent stables indépendamment des probabilités liées à ces gains.

Les travaux de Allais (1953) et Kahneman et Tversky (1979) ont attiré l'attention sur les limites de la théorie de l'utilité espérée et ont joué un rôle décisif dans la description et l'explication réaliste des comportements des individus, en présence de risque et d'incertitude. En effet Kahneman et Tversky (1979) ont critiqué la théorie de l'utilité espérée en s'inspirant du paradoxe d'Allais. Ils ont montré empiriquement que les choix, en cas de situations incertaines ou risquées, contredisent les principes de la théorie de l'utilité espérée et obéissent plutôt à une rationalité informelle et intuitive. Ils ont proposé « la théorie des perspectives » afin de dépasser les limites qui sont prouvées empiriquement. En effet, ils ont réalisé des expériences pour étudier le comportement des individus face aux situations risquées, ce qui a permis de remettre en cause plusieurs principes de la théorie de l'utilité espérée et de proposer une nouvelle manière pour la compréhension de l'attitude face au risque. Ils ont établi un modèle descriptif des choix risqués : « la théorie des perspectives ».

Un autre volet de la littérature économique s'est préoccupé par le problème de l'action collective sous incertitude et a proposé les principes essentiels pour le surmonter. Dans leur travail pionnier dans les années 1970, Leonid Hurwicz, Roger Myerson et Eric Maskin ont étudié les mécanismes d'incitation pour atteindre l'efficacité dans les marchés, les organisations et les institutions. Il s'agit de « la théorie des mécanismes d'incitation ». Cette théorie permet de faire la distinction entre les situations dans lesquelles les marchés fonctionnent bien et les autres situations.

Le point essentiel étudié est que les contraintes aux incitations devraient être considérées aussi importantes que le manque de ressources dans la compréhension de la prise de décision en présence d'incertitude. Cette idée est essentielle lors de l'élaboration des meilleures façons de coordonner l'action collective de tout groupe, en particulier, en présence d'asymétrie d'information, des intérêts divergents et une connaissance limitée.

La théorie de « conception des mécanismes » est une déclinaison de la théorie des jeux et elle repose sur le fait qu'il est possible de changer les règles du jeu en modifiant les mécanismes d'incitations (Hurwicz, 1973). Le régulateur doit trouver un mécanisme qui incite les entreprises à révéler leurs informations. Ainsi, la théorie de « conception des mécanismes » prend en compte les asymétries d'information en proposant les différents mécanismes pour les atténuer. Ces mécanismes peuvent prendre la forme de la création d'un marché, d'un système de taxation, d'une vente aux enchères, etc. Un mécanisme

d'incitation est une procédure mise en œuvre par un planificateur ou un médiateur dans le but de faire prendre une décision par un groupe d'agents qui disposent d'informations privées et des préférences conflictuelles. Cette théorie incite les analystes et les décideurs à voir au-delà des ressources en agrégats et de remettre en question ce qui informe et motive les actions des personnes et des organisations, y compris les actions liées au management des risques.

### **3. L'approche du management des risques**

Entreprise et risque sont deux éléments indissociables puisque le risque constitue l'essence de l'entreprise et sa raison d'être. La création d'une entreprise ou d'un projet suppose la prise de risque et la survie de l'entreprise nécessite aussi une gestion des risques quotidienne et efficace. En effet, aucune entreprise n'est à l'abri de la faillite ou des difficultés financières si elle gère mal ses risques, même les multinationales et les entreprises les plus performantes, et les exemples ne manquent pas (Enron, Arthur-Anderson, Alstom, Parmalat, etc.).

A partir de la deuxième guerre mondiale, il y a eu l'apparition de nouveaux systèmes techniques complexes et à haut risque, notamment dans les domaines de l'aéronautique, l'armement et le nucléaire. Ceci a été donc à l'origine de l'apparition de nouveaux risques peu connus et difficiles à gérer. Ainsi, il s'est avéré nécessaire de développer des méthodes de management des risques. C'est dans ce contexte que la compagnie Boeing a élaboré la méthode d'analyse préliminaire des risques, au début des années 1960, et la compagnie américaine des téléphones Bell a développé la méthode de l'arbre des défaillances. Ces deux méthodes sont encore utilisées jusqu'à nos jours. Ces dernières années, on a remarqué l'utilisation des méthodes de management des risques dans d'autres secteurs industriels (chimie, pétrochimie, etc.) et elles sont même utilisées dans le domaine de la santé et de l'environnement.

L'objectif du management des risques n'est pas d'éviter toute prise de risque, mais plutôt de déterminer quels sont les risques qu'on doit prendre. Toute action contient des risques et c'est l'existence de ces risques là qui est à l'origine du succès ou de l'échec de toute action. Selon Hassid (2008, p.3), « *la gestion des risques est une méthode qui aide l'entreprise à bien connaître ses risques et à mesurer leur importance en vue ensuite de les traiter efficacement* ».

La gestion de toute organisation revient, essentiellement, à gérer les risques liés à ses activités. En effet, toute organisation a des objectifs à atteindre et des obligations à respecter. Gérer les risques revient à identifier, quantifier et maîtriser les événements qui auront des impacts aussi bien positifs que négatifs sur les objectifs et les obligations.

Il est à noter que la gestion globale des risques est loin d'être une simple tentative de conformité aux réglementations et aux lois. Elle est, plutôt, une gouvernance basée sur des valeurs et des objectifs bien définis et qui vise le respect des contraintes sociétales. La gestion des risques nécessite, tout d'abord, d'avoir une communication efficace et une réactivité permanente, tout en s'adaptant rapidement à la nature évolutive des risques en matière de fréquence, de gravité et de conséquences sur l'activité de l'organisation.

L'attitude de la société est un point crucial à prendre en compte lors du processus de management des risques. En effet, ce processus doit tenir compte des perceptions et des points de vue de tous les acteurs ainsi que l'évolution des attitudes afin d'instaurer une communication efficace entre les parties prenantes. L'OCDE (2003, p.16) considère que « *La manière dont les diverses positions sont envisagées et prises en compte dans le processus de décision, dont les problèmes et les choix sont portés à la connaissance des intéressés et dont les médias et la collectivité au sens large perçoivent et exploitent ces informations est maintenant une composante incontournable de la gestion des risques* ».

### **3.1. Historique du management du risque**

A partir des années 2000, le management du risque s'est apparu comme la préoccupation principale des organisations, mais il est loin d'être une préoccupation nouvelle. En effet, Henri Fayol considérait déjà, depuis 1898, « les opérations de sécurité » qui visent la protection des biens et des personnes comme étant l'une des six fonctions principales de l'administration. Fayol (1916), dans son ouvrage « Administration industrielle et générale », explique bien cette fonction de sécurité qui est tout simplement ce qu'on appelle, de nos jours, la fonction gestion des risques.

Les années 1970 et 1980 ont été marquées par la montée de la question du management du risque et l'apparition de la fonction “*risk manager*” dans les entreprises. Selon Joffre et Koenig (1985), les entreprises ont été obligées pendant ces deux décennies d'élaborer des stratégies de management du risque sous la pression de deux phénomènes qui sont :

- L'assurantialisation : le recours de plus en plus aux compagnies d'assurance et la pression exercée par celles-ci pour que les entreprises effectuent des stratégies de protection et de prévention contre les risques.
- La financiarisation : c'est le fait de passer d'une économie d'endettement à une économie de marchés financiers. Ce passage qui est accompagné de la complexité des nouveaux modes de financement a obligé les entreprises à investir dans la maîtrise des risques financiers.

Cette préoccupation vis-à-vis du management du risque a été renforcée par les graves accidents qui ont eu lieu pendant cette période, notamment l'accident de Saveso, en Italie en 1976, l'accident de Bhopal, en Inde en 1984, et l'accident de Tchernobyl, en Ukraine en 1986. L'intérêt grandissant des entreprises vis-à-vis du management du risque a diminué un peu, au cours de la décennie 1990, et cette question n'a pas eu la même place primordiale dans les stratégies des entreprises. En effet, le traitement des risques reste un rôle mal défini et flou.

A partir des années 2000 et avec la multiplicité des accidents industriels et des catastrophes naturelles, en plus des attentats terroristes, la question du management du risque s'est réapparue sur la surface en intéressant de nouveau aussi bien les entreprises que les institutions publiques. En effet, à partir du début du troisième millénaire, le monde a fait face à plusieurs types d'accidents graves, à titre d'exemple, on peut citer : le Tsunami en Asie du Sud-est (le 26 décembre 2004), l'ouragan de Katrina (le 25 août 2005), les scandales financiers d'Enron et de la Société générale et les attentats terroristes de *World Trade Center* et de Madrid. Les conséquences lourdes de ces accidents sont dues à des fautes humaines ou à une mauvaise organisation, donc elles auraient pu être évitées sinon au moins allégées s'il y avait eu des procédures efficaces de maîtrise des risques. Cette constatation a été le point de départ vers une nouvelle ère où le management du risque devient à la mode et on en entend parler tous les jours dans les discours aussi bien des dirigeants que des hommes politiques lors de leurs campagnes électorales.

Les risques rencontrés par les entreprises ont changé au fil des années. En effet, au cours des années 1980, se sont plutôt les risques politiques, économiques et industriels qui attirent le plus l'attention des gérants. De nos jours, on voit bien l'apparition des risques informationnels, de sabotage médiatique et aussi les risques liés au personnel (sécurité, santé et droits). En effet, avec la montée en force du pouvoir des syndicats, le respect des

droits des employés devient une obligation pour les entreprises, sinon elles feront face à des problèmes qui peuvent toucher leurs images de marque et même leurs pérennités. Par exemple, l'entreprise Nike a investi des sommes énormes pour sauver son image de marque, notamment à travers les campagnes publicitaires et la mise en place d'une charte éthique, parce qu'elle a été accusée d'employer des enfants dans ses usines.

### 3.2. Processus du management du risque

On ne peut pas parler du management du risque sans évoquer la norme élaboré par l'*International Organization for Standardization* (ISO) qui est « ISO 31000 ». En effet, cette norme présente d'une manière détaillée trois points essentiels qui sont : les principes du management du risque, son cadre organisationnel et le processus du management du risque.

Les principes du management du risque selon la norme ISO 31000 sont les suivants : s'assurer de la création de la valeur, faire partie intégrante des processus organisationnels, être intégré dans la prise de décision stratégique, traiter explicitement de l'incertitude, avoir une approche systématique, structurée et proactive, se baser sur la meilleure information disponible, être construit sur mesure, intégrer les facteurs humains et culturels de l'organisation, être transparent et participatif, être dynamique, itératif et réactif et faciliter l'amélioration et l'évolution continue de l'organisation.

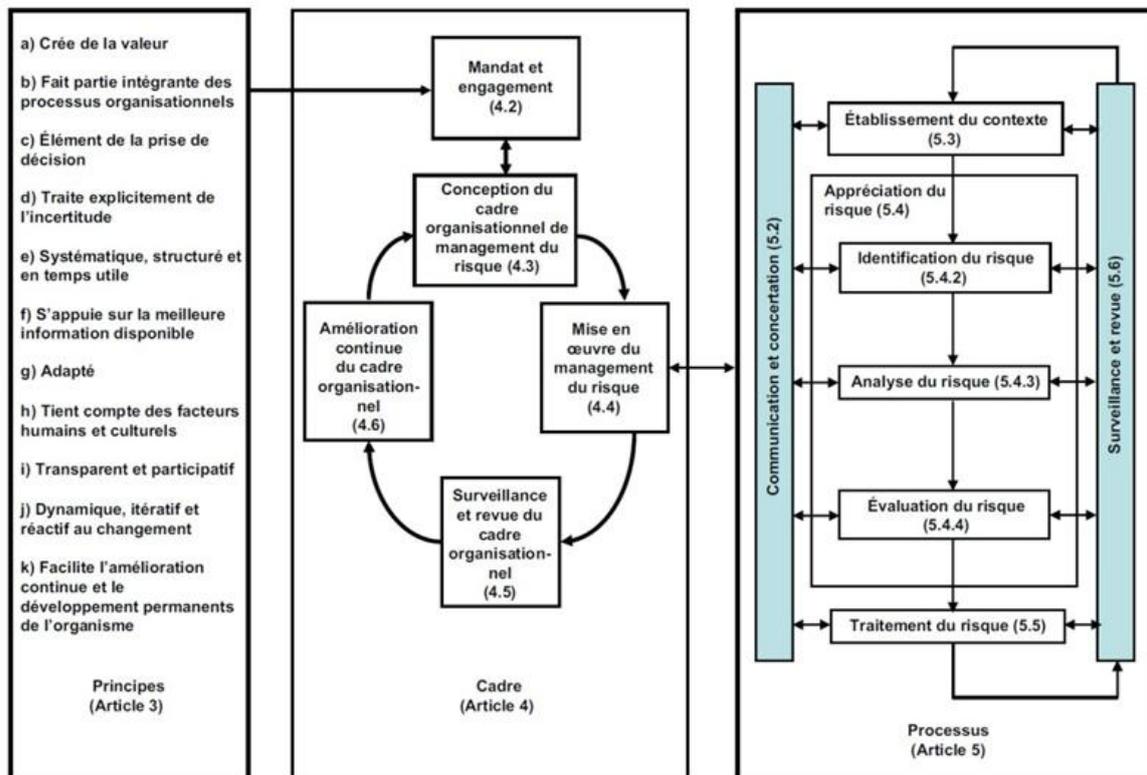
La démarche de management du risque prévue par la norme ISO 31000 (Figure 10) se décompose en cinq points essentiels qui sont les suivants :

- Communication et consultation : cette étape vise l'élaboration d'hypothèses communes avec toutes les parties liées et la communication de ces hypothèses afin d'avoir une vision unique du dispositif du management du risque à mettre en œuvre.
- Etablissement du contexte : cette étape vise à clarifier le contexte aussi bien externe qu'interne dans lequel existe et évolue l'organisation. Ceci va permettre de prendre en compte toutes les contraintes qui s'imposent et les opportunités qui s'offrent à l'organisation.
- Appréciation du risque : cette étape consiste à l'identification, l'analyse et l'évaluation des risques. La norme ISO 31000 concerne aussi bien le "*corporate risk management*" qui traite les risques purs c'est-à-dire aléatoires que le "*business risk management*" qui concerne les risques spéculatifs. Identifier les risques revient à identifier aussi bien les risques purs que les risques spéculatifs. L'analyse des risques consiste à identifier les

causes des risques, leurs impacts ainsi que les probabilités des faits générateurs. L'évaluation des risques consiste à savoir si un tel risque peut être accepté ou non par l'entreprise, c'est-à-dire s'il dépasse ou non le seuil d'acceptabilité établi par l'organisation lors de l'étape établissement du contexte.

- Traitement du risque : consiste à éviter le risque, réduire le risque (protection ou prévention) ou partager le risque avec d'autres parties prenantes.
- Surveillance et revue : cette étape consiste à mettre en œuvre un système d'information management des risques qui permet de faire la surveillance des procédures déjà mises en œuvre pour le traitement des risques.

Figure 10. Relations entre les principes, le cadre organisationnel et le processus de management du risque



Source : ISO 31000 (2009)<sup>26</sup>

La famille ISO 31000 contient 4 principaux éléments qui sont :

- ISO 31000 : 2009, Management du risque – Principes et lignes directrices.
- ISO/CEI 31010 : 2009, Gestion des risques – Techniques d'évaluation des risques.
- ISO Guide 73 : 2009, Management du risque – Vocabulaire.

<sup>26</sup> Figure accessible sur le lien suivant : [www.iso.org/obp/ui/fr/#iso:std:iso:31000:ed-1:v1:fr](http://www.iso.org/obp/ui/fr/#iso:std:iso:31000:ed-1:v1:fr)

- ISO/TR 31004 : 2013, Management du risque – Lignes directrices pour l'implémentation de l'ISO 31000.

Selon la démarche de management du risque, il faut, tout d'abord, déterminer le niveau d'acceptabilité ou de tolérabilité des risques. Ce seuil d'acceptabilité est déterminé par la direction et il reflète le niveau d'appétence des dirigeants face aux risques.

Le dispositif de “*corporate risk management*” concerne la mise en œuvre des modalités nécessaires afin de maîtriser les risques purs appelés aussi les risques de sinistralité. Parmi les risques purs, on peut citer : le risque produit, le risque client, le risque fournisseur, le risque politique, etc. Par ailleurs le dispositif de “*business risk management*” a pour objectif de maîtriser les risques financiers spéculatifs, notamment les risques de change ou de taux d'intérêt. Pour ce faire, il faut utiliser des instruments financiers tels que les swaps ou les options futures. Ces instruments visent à atteindre des plus-values ou bien d'amener les impacts financiers de ces risques à une valeur nulle.

La mise en œuvre d'un dispositif de management du risque efficace est loin d'être l'application d'une méthodologie bien structurée et rigide. Elle nécessite plutôt une adaptation avec l'activité de l'organisation, son appétence pour le risque et sa création de valeur. Pour cela, il est intéressant d'intégrer la gestion des risques dans le quotidien des employés, c'est-à-dire « réfléchir risques ».

En d'autres termes plus simples, la démarche du management du risque contient les étapes suivantes : la définition du risque acceptable, l'identification des risques, l'évaluation des risques, la réduction des risques et la gestion des risques résiduels. Il est à noter aussi que le risque zéro n'existe pas et de ce fait, il est impossible d'éliminer tous les risques.

## **Section 2. Le management du risque pour les projets d'énergies renouvelables**

L'investissement dans le secteur des ER est de plus en plus une perspective risquée. En effet, malgré que la capacité installée dans le monde soit en hausse continue et que les montants investis ne cessent de croître, la part des ER dans le mix énergétique reste faible et ne correspond pas au potentiel énorme de ces ressources. En plus, les pays leaders dans le domaine des ER sont les mêmes depuis des années. En ce qui concerne les PED, ils sont confrontés à la difficulté de trouver une place dans un marché difficile à intégrer et surtout

dans lequel il est difficile de réaliser des profits. Ceci nécessite le recours à une analyse des risques du processus de diffusion des ER afin de saisir les barrières qui entravent cette transition dans des pays qui ont des ressources énormes mais une production faible comme le cas de la Tunisie.

## 1. Les principales méthodes d'analyse des risques

Il existe plusieurs critères de classification des méthodes d'analyses des risques. On peut dire qu'il y a des méthodes inductives (montantes ou *bottom up*) et d'autres déductives (descendantes ou *top down*). On peut les classer aussi selon le caractère quantitatif ou qualitatif de l'analyse. Mais, il y a aussi une typologie plus générale qui permet de classer les méthodes d'analyses des risques en trois grandes catégories :

- Les méthodes d'analyses événementielles : elles permettent la détermination des événements redoutés et des scénarios à risque.
- Les méthodes d'analyses de zones : elles se basent sur la recherche des modes communs et des scénarios de propagation de pannes.
- Les méthodes d'analyses temporelles : elles se basent sur la recherche des durées d'évolution des scénarios à risque.

Parmi les méthodes les plus utilisées, on peut citer : l'arbre des causes, l'arbre des défaillances, l'analyse des modes de défaillance, de leurs effets et de leur criticité (AMDEC), l'analyse du risque et des points de contrôle critiques (*Hazard Analysis of Critical Control Points* : HACCP), *Hazard and Operability study* (HAZOP), la méthode de simulation de Monte Carlo et l'Analyse Préliminaire des Risques (APR).

### 1.1. L'arbre des causes

Il s'agit d'une démarche *a posteriori* : une fois que l'accident ou la défaillance a eu lieu, on commence à chercher et à déterminer les causes de cet événement indésirable afin d'éviter qu'il se produise une autre fois. Pour ce faire, on doit identifier les causes des défaillances d'une manière claire et détaillée, identifier l'enchaînement des faits qui a abouti au dysfonctionnement et déterminer les actions qui doivent être mises en place pour éviter la répétition du même accident. Cette méthode ne sera pas employée, car il a été décidé dans ce travail d'orienter la démarche d'analyse des risques vers une approche *a priori* des risques.

## **1.2. L'arbre des défaillances**

Un arbre des défauts ou des défaillances permet de représenter les enchaînements d'événements qui causent une défaillance bien déterminée. Ainsi, construire cet arbre revient tout d'abord à répondre à la question suivante : quels sont les scénarios possibles qui peuvent causer cette défaillance ? Après avoir déterminé les scénarios possibles de défaillances, on doit déterminer les coupes minimales (la coupe minimale est la plus petite combinaison d'événements élémentaires entraînant l'événement redouté). Enfin, on doit déterminer la vraisemblance de la survenue de la défaillance à partir du calcul de la vraisemblance des événements élémentaires.

Bien que cette méthode se caractérise par une grande facilité de modélisation et de mise en œuvre ainsi qu'une multiplicité des applications possibles, elle possède plusieurs limites. En effet, elle est inadaptée à certains systèmes, notamment les systèmes complexes, les systèmes multi phases et aussi les systèmes composés d'événements dont l'apparition dépend du temps, ce qui la rend inadaptée au cas étudié dans le cadre de cette thèse.

## **1.3. L'analyse des modes de défaillance, de leurs effets et de leur criticité (AMDEC)**

Il s'agit d'une méthode de nature analytique et inductive et elle est à la fois quantitative et qualitative. Son principal objectif est d'identifier les effets des défaillances potentielles au niveau du système et des sous-systèmes. L'AMDEC est un outil intéressant pour détecter les défaillances qui sont susceptibles d'apparaître sur un système. En effet, elle constitue une analyse systématique et très complète des modes de défaillances, de leurs causes et de leurs effets sur le système. Mais, il est à noter que l'AMDEC constitue une analyse dysfonctionnelle préliminaire qui doit être complétée par d'autres méthodes qui permettent d'identifier les combinaisons de défaillances pertinentes. En plus, elle est difficile à appliquer sur un système complexe dans lequel le facteur humain cause de nombreuses défaillances. Elle est plutôt plus adaptée à des systèmes récurrents dont les risques sont connus.

## **1.4. Analyse du risque et des points de contrôle critiques**

L'HACCP a été formulée, dans les années 1960, par l'armée américaine et la *National Aeronautics and Space Administration* (NASA). Elle est reconnue à l'échelle

internationale comme une méthode de gestion de la sécurité alimentaire. L'objectif de l'HACCP est d'identifier et de contrôler les risques lors de la production alimentaire et les procédés de préparation. C'est une méthode axée sur la prévention et qui vise, tout d'abord, la détermination des points de contrôle critiques (*Critical Control Points*) et, ensuite, le contrôle continu de ces points afin de garantir la sécurité alimentaire aux consommateurs.

### **1.5. Hazard and Operability study**

Cette méthode est axée sur l'analyse des risques des systèmes thermo-hydrauliques. Au contraire de l'AMDEC, cette méthode ne traite pas les modes de défaillance, mais plutôt les déviations potentielles des principaux paramètres liés à l'exploitation de l'installation. Pour ce faire, cette méthode vise, tout d'abord, à identifier les causes et les conséquences potentielles de chaque déviation et, ensuite, à déterminer les moyens pour détecter toute déviation et limiter ses effets. Cette méthode peut être complétée par la méthode AMDEC sur certains sous-systèmes.

### **1.6. La méthode de simulation de Monte Carlo**

Il s'agit d'une méthode de simulation qui permet de modéliser le comportement d'un système complexe et dynamique qui passe d'un état à un autre d'une manière aléatoire. Cette méthode nous permet d'avoir toutes les conséquences possibles d'une décision tout en évaluant l'impact du risque.

Il s'agit d'une technique mathématique informatisée et un outil excellent pour la prise en compte du risque dans l'analyse quantitative. Elle est utilisée dans divers domaines, notamment la finance, la gestion de projet, le transport, l'énergie, etc.

### **1.7. L'Analyse Préliminaire des Risques (APR)**

L'APR est une méthode d'analyse des risques qui vise à identifier les éléments dangereux et les éléments vulnérables du système, d'évaluer les conséquences des situations dangereuses et de donner les actions de maîtrise des risques à mettre en œuvre. Il s'agit d'une méthode inductive d'analyse des risques *a priori*.

Elle permet d'identifier aussi bien les risques connus que les risques nouveaux inhérents à une activité ou à un système. Cette méthode permet donc de mettre en évidence les scénarios des risques susceptibles d'avoir lieu et la façon de les traiter. Il s'agit l'une

des méthodes les plus intéressantes puisqu'elle permet d'avoir une analyse détaillée et rigoureuse des risques. Cependant, elle n'est pas trop utilisée vu la complexité des étapes et la nécessité d'une équipe pluridisciplinaire et d'une connaissance approfondie en management du risque.

## **2. L'application des méthodes de management des risques dans le cas de projets d'énergies renouvelables**

Le déploiement de l'approche du management des risques dans le domaine des projets d'ER est rare et aussi récent. Nous allons, dans ce qui suit, présenter une revue des différents travaux théoriques et empiriques ainsi que leurs apports et leurs limites.

Il existe quelques rapports et études qui traitent le management du risque dans le domaine des ER, mais elles restent rares et purement théoriques. On peut citer, par exemple, le rapport élaboré par *International Energy Agency - Renewable Energy Technology Deployment* (IEA-RETD, 2011) qui présente le processus de management du risque dans le cadre des projets d'ER. Il présente une analyse globale contenant les principaux risques (politique, technique, financier, etc.), les moyens de les réduire et les méthodes à utiliser aussi bien pour la collecte des données que pour l'évaluation et la réduction des risques.

Ainsi, une approche détaillée du management des risques a été proposée dans le rapport IEA-RETD (2011) et elle se base sur cinq éléments qui doivent être suivis pour une démarche de management du risque dans les projets d'ER. Les cinq éléments sont les suivants :

- La description du projet : une description détaillée du projet et du contexte dans lequel l'analyse va être effectuée.
- L'identification des risques : au cours de cette étape, il faut s'assurer que tous les risques sont pris en compte et que les leçons tirées des autres projets sont intégrées. L'étape d'identification des risques est primordiale et elle doit surtout prendre en considération les éléments suivants : la maturité de la technologie utilisée, l'intégration de l'électricité produite dans le réseau existant, la dépendance vis-à-vis des conditions climatiques, la forte dépendance vis-à-vis de la politique énergétique appliquée dans le pays d'implantation, la nécessité de grand terrain, la possibilité d'une opposition de la

part des populations locales ou de la société civile, la lenteur des procédures d'obtention des différentes autorisations et l'achat des différents équipements nécessaires.

- L'évaluation des risques : elle doit se baser sur l'analyse et la compréhension des résultats de projets similaires ainsi que le contexte dans lequel le projet va avoir lieu.
- Le contrôle et le suivi des risques : il s'agit d'une étape importante qui permet le suivi de l'activité et la garantie de la pérennité et de la réussite du projet.
- Le retour d'expérience ou la rétroaction : à la fin du projet, le plan de risques établi est comparé aux résultats actuels du projet, des leçons sont donc tirées et incorporées dans les prochaines analyses des risques de projets futurs.

Ce rapport propose aussi des mesures innovantes visant à traiter les principales sources de risques pour les projets d'ER :

- Les risques politiques : qui sont caractérisés par des événements discrets et difficiles à prédire et à contrôler. Pour maîtriser ce type de risques, il faut recourir aux produits dérivés financiers et à l'assurance.
- Les risques économiques : ils peuvent être maîtrisés à travers les mécanismes financiers et l'assurance ainsi que le transfert de certains risques.
- Les risques sociaux : qui intègrent aussi les risques de la santé et de la sécurité ainsi que les risques liés à l'environnement et doivent être traités par des experts dans le domaine, dans le cadre d'un plan de gestion sociale et environnementale.
- Les risques techniques : ils peuvent être maîtrisés à travers le recours aux garanties, à l'assurance ainsi que des accords ou d'autres arrangements organisationnels entre les principales parties prenantes.

Le rapport IEA-RETD (2011) présente une analyse intéressante qui simplifie l'approche du management des risques. Cependant, cette étude reste générale et se contente de la présentation des étapes du processus du management des risques, dans le cas des projets des ER, sans traiter un cas pratique.

Une autre étude faite par Apak, Atay et Tuncer (2011) s'intéresse seulement aux risques financiers rencontrés par les investisseurs dans le secteur des ER. Les auteurs ont essayé de s'inspirer du cadre européen pour déterminer les meilleurs instruments de gestion des risques financiers en Turquie.

En ce qui concerne la littérature empirique, le nombre des études faites est aussi limitée et la plupart d'entre elles se ressemblent. En effet, plusieurs études ont mis l'accent sur l'indicateur de valeur actualisée nette (VAN) et le risque d'obtenir une VAN négative.

Nous allons commencer par une étude assez originale faite par Amato *et al.* (2011) qui ont analysé les risques associés au fonctionnement d'une centrale CSP avec stockage de la chaleur par le sel fondu. L'objectif de cette étude est d'évaluer les risques associés à l'interruption d'activité (perte de production) et à la perte d'actifs en raison de la survenance d'événements internes ou externes indésirables tels que les défaillances de composants, etc.

La méthode utilisée se décompose en trois étapes qui sont l'analyse fonctionnelle du système, la méthode d'identification des dangers « HAZID » (*Hazard Identification*) qui est une méthode qualitative et enfin l'évaluation quantitative des risques.

L'étape d'analyse qualitative de la méthodologie utilisée et qui est basée sur les avis d'experts, a révélé la présence de 113 scénarios de risques, dont 16 sont potentiellement les risques les plus critiques. Par la suite, Amato *et al.* (2011) ont procédé à une analyse quantitative détaillée de ces 16 scénarios de risques critiques. Ils ont trouvé que 15 de ces scénarios vont conduire à des risques inacceptables tels que les risques de dysfonctionnement de la turbine (fuite ou autre) ou la solidification du sel fondu utilisé pour le stockage de la chaleur. Le scénario lié à l'augmentation de la pression (coup de bélier) n'a pas été traité vu que les détails et les informations disponibles concernant la conception de la centrale ne suffisent pas pour évaluer la plausibilité de l'apparition d'un tel phénomène, ni la mesure dans laquelle les actifs sont exposés à ses effets.

Cette recherche est très intéressante, néanmoins elle possède des limites. En effet, les auteurs n'ont pas traité tous les risques, la recherche est limitée aux risques de l'interruption d'activité et la perte d'actifs. Ainsi, cette recherche n'inclue pas les risques financiers, économiques ou informatiques ou les risques liés à la main d'œuvre. Elle ne traite pas aussi les risques liés aux conditions climatiques tels que les tempêtes de sable ou les tornades. Il s'agit donc d'une étude limitée qui traite une partie seulement des risques.

Bien que cette méthode soit très intéressante, elle met l'accent sur l'identification des conséquences des scénarios plus que la description détaillée des scénarios des risques. L'utilisation de cette méthode est aussi rare puisque toutes les autres études utilisent la méthode de Monte Carlo.

Pereira *et al.* (2014) ont essayé de déterminer le risque d'investissement dans deux petits projets d'énergie solaire PV au Brésil. Ils ont utilisé la méthode de simulation de Monte Carlo qui est une méthode d'analyse des risques très utilisée, très intéressante et qui est devenue très aisée avec l'augmentation de la puissance des moyens informatiques. Cette méthode consiste à calculer la VAN et le coût de l'énergie produite qui sont des indicateurs très importants pour les investisseurs potentiels. Les variables indépendantes qui vont influencer les indicateurs choisis sont : le coût initial total, la valeur de l'énergie produite et intégrée au réseau et le taux d'intérêt. Le logiciel utilisé pour effectuer l'analyse est le "Model Risk". La méthode de simulation de Monte Carlo a été utilisée pour générer une fonction de distribution de probabilité pour chacun des indices économiques choisis qui sont la VAN et le coût de l'énergie produite. Les résultats obtenus ont montré que, sans subventions et sans une diminution du taux d'intérêt, les systèmes de production d'énergie PV au Brésil sont encore économiquement non viables en raison du risque d'obtenir une VAN négative et un coût de l'énergie produite très élevé par rapport aux tarifs pratiqués par les utilitaires.

Cette méthode a été appliquée à des systèmes PV de petites tailles de l'ordre de 1,575 KWc. Il sera beaucoup plus intéressant de l'appliquer pour l'analyse des risques d'une grande centrale solaire PV ou un parc éolien pour avoir des résultats qui seront bénéfiques pour les investisseurs potentiels. Cette recherche traite seulement les risques économiques et financiers et néglige les autres types des risques, de ce fait elle ne donne pas une image globale et réelle aux investisseurs potentiels.

La méthode de simulation de Monte Carlo, dans le domaine des ER, a été aussi utilisée par Arnold et Yildiz (2015) pour l'analyse du risque financier d'un projet d'installation de chauffage qui utilise la biomasse, en Allemagne. Elle est aussi appliquée par Li, Lu et Wu (2013) pour le cas de l'énergie éolienne et par Amigun, Petrie et Görgens (2011) pour le cas du bioéthanol, en Afrique du Sud.

Arnold et Yildiz (2015) ont fait une analyse financière complétée par une simulation de Monte Carlo pour l'analyse d'un projet d'ER, en Allemagne. Cette approche permet d'analyser le risque financier pour les investisseurs et les prêteurs, en utilisant la simulation de Monte Carlo appliquée à la VAN du projet. Ce papier étudie seulement le risque financier du projet qui est le fait d'avoir une VAN négative.

Li, Lu et Wu (2013) ont utilisé aussi la méthode de Monte Carlo pour la simulation de la VAN ainsi que pour l'analyse de la période de retour sur investissement et le taux de rentabilité interne. Cette méthode est appliquée à un projet d'énergie éolienne, au Nord de la Chine, afin d'évaluer le risque d'investissement dans ce projet. Ce papier présente aussi des suggestions générales pour la réduction du risque d'investissement dans les projets d'énergie éolienne en Chine.

Bien que ces travaux soient très intéressants, ils n'ont pas mis l'accent sur l'importance primordiale des instruments de management des risques financiers (IMRF) dans l'amélioration de la viabilité économique des projets d'ER. En revanche, une série d'études menées par le PNUE a fait des IMRF une question centrale en élaborant un modèle de simulation de la VAN, par la méthode de Monte Carlo, tout en incorporant le choix des IMRF dans la décision d'évaluation (UNEP, 2007).

Pour accroître les investissements d'ER dans les PED, le PNUE a mis l'accent sur la façon dont les IMRF peuvent être utilisés pour réduire le coût en capital des projets d'ER. Les rapports de l'UNEP (2004 ; 2007) suggèrent que l'utilisation des IMRF permet d'atteindre trois avantages : la réduction du taux de défaut de paiement au minimum, l'atteinte d'une cote de crédit optimale et la réalisation d'un taux de rendement interne élevé pour l'investisseur.

L'étude faite par UNEP (2004) a pour objectif de fournir un aperçu sur les obstacles d'investissement dans les projets d'ER, sur les instruments de gestion des risques financiers qui sont mis en œuvre, actuellement pour le soutien des projets d'ER, et sur les instruments qui pourraient être développés dans le futur pour réduire l'incertitude et faciliter le financement de ces projets. En effet, les auteurs de ce rapport soulignent le fait que les approches actuelles du financement des ER sont insuffisantes pour atteindre le potentiel de ces technologies et pour répondre aux besoins croissants de l'énergie tout en contribuant à atténuer le changement climatique. Il est nécessaire de recourir à une approche nouvelle basée sur le management des risques financiers.

Le modèle de base utilisé dans le rapport de UNEP (2007) est constitué d'informations financières de base pour le projet (par exemple, la structure financière, les hypothèses concernant la taxation, les coûts en capital et le prix d'achat de l'électricité) et des sources de risque qui sont considérées comme des paramètres incertains (par exemple, la production annuelle d'énergie, les retards de construction et le prix de vente de crédit

carbone). Ensuite, les résultats financiers possibles du projet d'ER sont prévus, en utilisant la simulation de Monte Carlo. Les simulations permettent d'obtenir une distribution de probabilité cumulative d'indicateurs de performance clés comme le taux de rendement interne et la VAN du projet. Les effets des IMRF sont jugés par les changements dans les statistiques descriptives des indicateurs de performance clés à la suite de leur utilisation.

Cette approche est très intéressante, mais elle reste encore peu satisfaisante et possède des lacunes. Par exemple, Chang (2013) considère que l'approche adoptée par les rapports du PNUE possède les limites suivantes : les résultats basés sur les différents paramètres considérés pourraient être incompatibles et aucun conseil n'est donné sur la façon de concilier des résultats contradictoires. En plus, le choix des indicateurs, des statistiques et des seuils est arbitraire.

Nous remarquons que les études théoriques restent trop générales, alors que les études empiriques qui traitent et analysent les risques dans le cas des projets d'ER se limitent à l'étude des risques financiers en utilisant la méthode de Monte Carlo. En plus, il n'y a pas vraiment une utilisation de l'approche du management des risques avec toutes les étapes citées dans l'ISO 31000, il s'agit plutôt d'une identification des risques.

Ainsi, il est clair que la plupart des études empiriques faites utilisent la méthode de Monte Carlo. Bien que cette méthode soit intéressante, elle possède néanmoins des limites puisqu'elle est appliquée seulement au risque financier et ne tient pas compte des autres risques. Il s'agit donc d'une analyse financière et non pas d'un vrai processus de management du risque. Mais, il est à noter que l'utilisation de la méthode de Monte Carlo reste relativement rare dans le domaine des ER vu la complexité de la méthode et la nécessité de traitement de données considérables et parfois non disponibles.

Il est à noter aussi que jusqu'à l'écriture de ces lignes il n'y a aucune étude empirique qui traite le management du risque dans un projet d'ER. Les papiers qui existent s'intéressent ou bien aux risques financiers et économiques, ou bien aux risques industriels et elles n'englobent pas tout le processus de management du risque. La plupart des études se limitent seulement à l'évaluation des risques sans recourir au management du risque avec toutes ses étapes nécessaires. Cette recherche a pour vocation de remplir ce vide.

### **3. Justification du choix de l'approche du management des risques et de la méthode AGR**

Nous avons bien expliqué, dans le chapitre 2, le fait que la transition vers les ER a été traitée selon des points de vue différents et selon des approches différentes. Chacune des approches étudiées (l'approche basée sur la courbe d'expérience, l'approche de diffusion de l'innovation, l'approche de l'économie de l'environnement, l'approche de l'économie institutionnelle et l'approche psychosociale) a traité un aspect bien particulier du processus de diffusion des ER. Il s'agit des aspects de type technique, économique, institutionnel et psychosocial.

Le choix de l'approche méthodologique basée sur le management du risque émane des deux constatations suivantes :

- La diffusion des ER est un processus complexe et qui fait intervenir plusieurs aspects et plusieurs acteurs qui sont en interconnexion ce qui nécessite une approche multidisciplinaire.
- La multiplicité des risques d'investissement dans ce secteur, sous l'effet de « verrouillage au carbone » et de « la dépendance au sentier », nécessite le recours à une approche basée sur le management du risque. Cette approche est capable d'intégrer et de traiter, en même temps, tous les aspects déjà cités du processus de la transition vers les ER et surtout de tenir compte du caractère polymorphe et complexe du risque.

En effet, les approches existantes bien que très intéressantes ont des limites qu'il est nécessaire de les dépasser. L'approche de la courbe d'expérience, par exemple, présente plusieurs limites. En effet, dans la plupart des cas étudiés, cette approche analyse d'une manière agrégée les réductions des coûts sans expliquer une à une toutes les forces motrices de cette réduction. En plus, la courbe d'expérience est un outil d'analyse de tendance et ne convient pas pour prévoir l'évolution des coûts à long terme. Cela signifie que l'utilisation des courbes d'expérience et des outils d'analyse des tendances similaires n'est possible que dans des conditions de faible incertitude. En outre, la plupart des études existantes intègrent seulement la R&D publique et la prise en compte de la R&D privée reste un important défi à relever. Enfin, cette approche ne prend pas en compte l'impact du changement de politique de soutien adoptée par le gouvernement pour accélérer la diffusion des ER sur les activités d'apprentissage.

En ce qui concerne l'approche de diffusion de l'innovation, la plupart des études faites ont négligé la nature concurrentielle entre les différents types d'ER ainsi que la prise en compte de l'impact de la politique du gouvernement et des différents instruments utilisés sur le processus de diffusion des ER.

Ce dernier aspect est au cœur même de l'approche basée sur l'économie de l'environnement qui, malgré ses avantages, présente aussi plusieurs limites. Dans le cadre de cette approche, le soutien du gouvernement aux ER est justifié par l'internalisation des externalités négatives découlant de l'utilisation des combustibles fossiles et par la stimulation du progrès technique. Mais, il est à noter que la plupart des instruments et des mécanismes de promotion des ER sont conçus par les pays développés et sont généralement trop coûteux pour les finances publiques des PED et incompatibles avec les spécificités économiques et institutionnelles de ces pays. La plupart des recherches faites essaient d'étudier l'impact d'un ou de plusieurs instruments sur la diffusion des ER. Néanmoins, il faut plutôt suivre un chemin différent puisque c'est à partir de la réalité de ce secteur dans chaque pays qu'il faut proposer les instruments les plus adéquats.

En ce qui concerne l'approche de l'économie institutionnelle, les études faites restent limitées par rapport aux autres approches en raison de la difficulté de la prise en compte de l'aspect institutionnel. La plupart des études existantes ont fait recours à des analyses, à des études de cas et à des avis des experts pour dégager le meilleur cadre institutionnel à mettre en œuvre.

La dernière approche traite le modèle psychosocial qui se base sur la théorie du comportement planifié. Cette approche s'intéresse aux aspects sociologique et psychologique de la transition énergétique, en analysant les raisons comportementales, psychologiques et culturelles entraînant la modification d'un régime énergétique existant basée sur les combustibles fossiles vers un autre plus sobre en carbone. Le nombre des travaux scientifiques sur l'acceptation des ER est considérable et les travaux sont très diversifiés et concernent plusieurs pays. Mais, les études qui concernent l'acceptation par certains groupes ou parties prenantes, notamment les investisseurs potentiels, les décideurs politiques, les bailleurs de fonds, les banques sont très limitées voire inexistantes. La plupart des études faites traitent l'acceptation sociale d'une manière générale.

Le point commun de toutes ces approches c'est le fait qu'elles tirent leurs fondements théoriques dans les pays développés ce qui fait que les changements

technologiques, institutionnels et économiques proposés sont basés sur des systèmes énergétiques dotés de certaines caractéristiques qui n'existent pas, nécessairement, dans les PED. La plupart des analyses et des études empiriques faites sur les instruments favorisant la transition énergétique concernent les pays développés et peu d'études s'intéressent aux PED.

Bien que ces approches aient plusieurs limites, elles nous ont permis de dégager les constatations et les recommandations suivantes qui vont être utiles dans la suite de cette recherche :

- **Les effets d'apprentissage et d'expérience diminuent les coûts et accélèrent le processus de diffusion des ER.**
- **Le taux de croissance des technologies d'ER dépend de plusieurs facteurs de diffusion tels que le total des adoptants potentiels, l'effet d'imitation ainsi que la communication et la sensibilisation.**
- **La nécessité de la mise en place d'un cadre incitatif favorisant le développement à grande échelle des ER : la transition vers les ER nécessite la mise en place de mesures réglementaires et d'instruments économiques.**
- **L'importance de la mise en œuvre d'une structure institutionnelle performante et fiable pour la bonne conduite des politiques de promotion des ER : la transition vers les ER nécessite des mécanismes institutionnels adéquats**
- **La participation du public facilite le processus de diffusion des ER.**

En plus de toutes les limites déjà citées, les approches existantes ont négligé un aspect important qui est l'étude des risques qui entravent et ralentissent le processus de diffusion des ER. En effet, nous avons bien expliqué, dans le chapitre 3, que sous l'effet du « verrouillage technologique » et du « verrouillage au carbone », la transition vers les ER se heurte à plusieurs barrières et les investisseurs dans ce secteur font face à des risques multiples.

Il est à noter que plusieurs études ont traité cet aspect, surtout ces dernières années. Cependant, l'apport de ces études reste limité puisqu'elles énumèrent ou bien d'une manière générale tous les risques et les barrières, ou bien elles traitent des études de cas et analysent les risques pour une certaine technologie d'ER ou un certain pays. Les études les plus intéressantes ont fait recours à des questionnaires pour se rendre compte des avis des experts sur la gravité des différents risques.

De ce fait, il y a de très rares études qui ont fait recours à l'approche du management des risques pour traiter les barrières à la transition vers les ER. Cependant, ces études présentent plusieurs limites. Elles sont, dans la plupart des cas, des études purement théoriques et générales qui expliquent le processus de management du risque à mettre en place dans le cas des projets d'ER. Les études empiriques sont très rares et récentes et elles sont faites par des ingénieurs et traitent surtout l'aspect technique. Les rares études faites par des économistes traitent le risque financier et utilisent la méthode de simulation de Monte Carlo. Nous remarquons que les études faites par les ingénieurs ont étudié les risques techniques alors que les économistes et les financiers ont traité les risques économiques et financiers, en utilisant surtout la VAN comme indicateur de risque. Cette étude est la première qui englobe tous les risques.

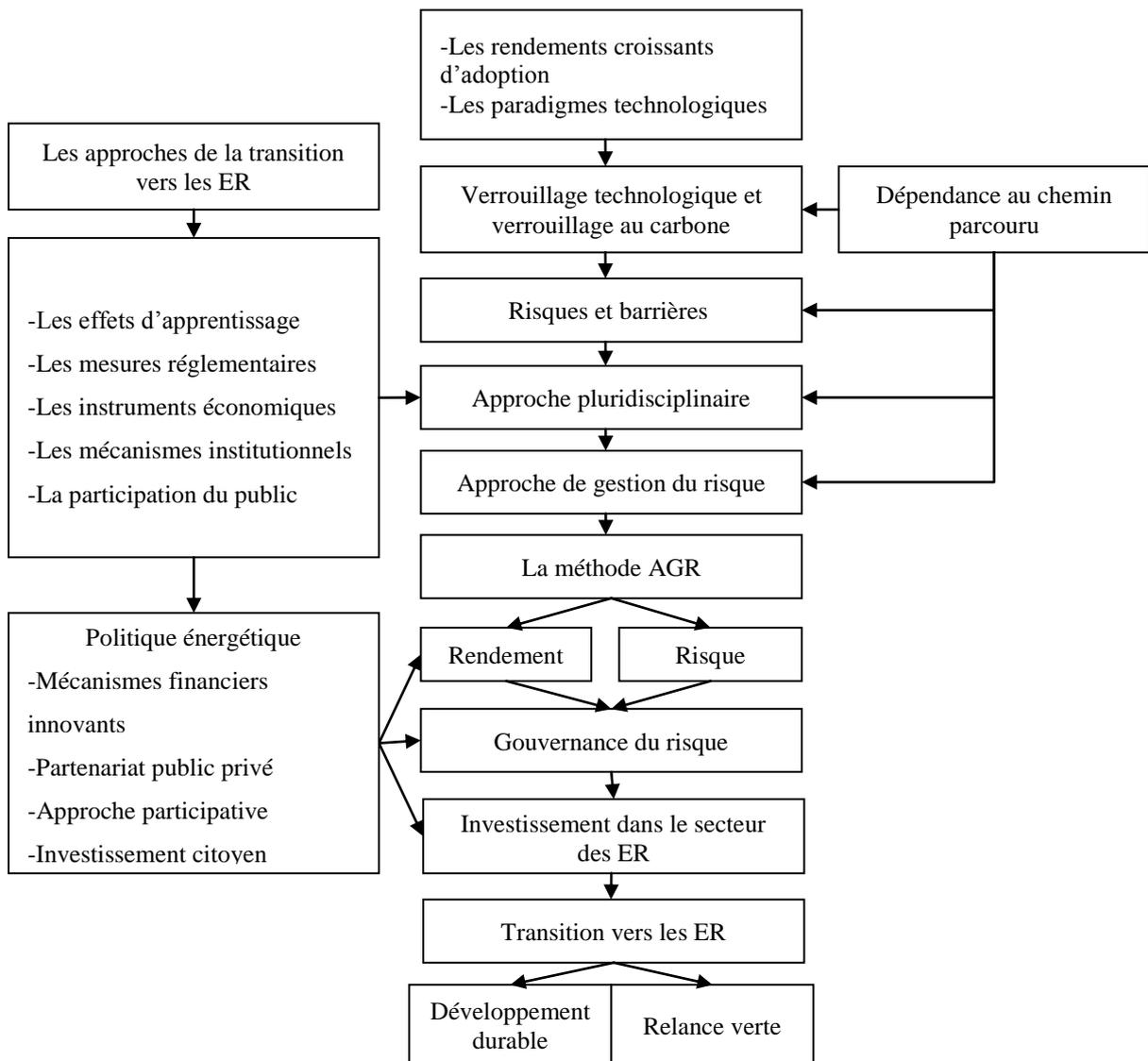
L'approche du management des risques est une **approche multidisciplinaire** qui répond parfaitement à la complexité des systèmes modernes qui a fait naître des risques complexes, qui sont en perpétuel changement et de ce fait sont difficiles à gérer. En effet, la diffusion des ER doit prendre en compte plusieurs éléments inter liés qui sont de natures différentes (économique, sociale, culturelle, technologique, scientifique, géographique, environnementale, etc.) ainsi que plusieurs acteurs ayant des priorités différentes et parfois même contradictoires. Cette approche permet donc une meilleure compréhension et une meilleure adaptation aux exigences des différentes parties prenantes.

Notre étude est la première qui utilise une méthode de management du risque, tout en étudiant tous les types des risques aussi bien techniques que financiers et économiques. Il s'agit de la première étude qui utilise la méthode AGR (une extension de la méthode APR) dans le cadre d'un projet d'ER.

Ainsi, notre choix de l'approche du management des risques et de la méthode AGR vient combler un vide dans la littérature économique. En effet, cette méthode permet d'appliquer toutes les étapes du processus de management du risque, de l'identification des risques initiaux jusqu'à le contrôle des risques résiduels. C'est une méthode qui répond parfaitement à la nature complexe du processus de transition vers les ER. Cette méthode permet d'identifier tous les risques inhérents à un système, tout en ayant la capacité d'analyser les activités présentant à la fois des risques nouveaux et des risques connus dans des systèmes complexes. Elle est donc plus complète que toutes les autres méthodes de gestion des risques.

Au cours de ces dernières années, on a assisté à une mutation des risques. On voit bien l'apparition de nouveaux risques dont les conséquences sont très difficiles à estimer et aussi l'apparition de nouveaux acteurs de risques qui présentent des interactions complexes et compliquées. Ce changement nécessite une évolution des procédures de management du risque et pourquoi pas le passage vers une gouvernance du risque. En effet, les risques ne sont plus la préoccupation des entreprises seulement, mais ils concernent de plus en plus d'autres organisations telles que les collectivités locales, les associations, les institutions publiques, etc. De ce fait, l'entreprise doit coordonner et créer des nouveaux partenariats dans le but de maîtriser les risques. Ainsi, l'entreprise est censée abandonner sa stratégie de management du risque au profit d'une démarche plus globale de gouvernance du risque.

Figure 11. Approche méthodologique



Source : Auteur

## **Conclusion**

Dans ce chapitre, nous avons traité la définition du risque qui est un concept polymorphe. Nous avons fait la différence entre le risque et l'incertitude, tout en mettant l'accent sur la décision en présence d'incertitude dans les sciences économiques. La typologie des risques a été expliquée, en faisant la différence entre les risques purs et les risques spéculatifs ainsi que les risques fonctionnels et les risques intrinsèques. Nous avons aussi étudié les concepts de perception et d'attitude du public, des investisseurs et des collectivités locales comme étant des composantes essentielles de toute décision en présence de risque. En effet, le comportement de tout individu face au risque est déterminé sous l'influence de plusieurs facteurs, notamment les besoins, les motivations, la perception et l'attitude. Ensuite, nous avons étudié le traitement des choix sous incertitude par les différentes théories, à partir des travaux de Bernouilli en 1700, jusqu'à l'apport de la théorie « des mécanismes d'incitations ».

Ensuite, nous avons expliqué l'approche du management des risques, en mettant l'accent sur son historique et son processus. En effet, à partir de la deuxième guerre mondiale, l'apparition de nouveaux systèmes techniques complexes et à haut risque, notamment dans les domaines de l'aéronautique, l'armement et le nucléaire ainsi que l'apparition de nouveaux risques peu connus et donc difficiles à gérer ont rendu nécessaire le développement des méthodes de management des risques.

L'objectif du management des risques n'est pas d'éviter toute prise de risque, mais plutôt de déterminer quels sont les risques qu'on doit prendre. La fonction management des risques a changé beaucoup, depuis la vision de Fayol (1916) jusqu'à nos jours, vu le changement dans les organisations, la multiplicité des parties prenantes et surtout le changement de la nature des risques connus et l'apparition de nouveaux risques.

De nos jours, le management du risque est une approche connue et qui fait même l'objet d'une norme qui est la norme ISO 31000. En effet, cette norme présente d'une manière détaillée trois points essentiels qui sont : les principes du management du risque, son cadre organisationnel et le processus du management du risque.

Dans la seconde section, nous avons traité les possibilités et les avantages du recours à l'approche du management des risques pour traiter et analyser les risques qui ralentissent le processus de passage vers une économie sobre en carbone. Nous avons détaillé les

principales méthodes d'analyses des risques, notamment les plus utilisées qui sont : l'arbre des causes, l'arbre des défaillances, l'AMDEC, l'HACCP, l'HAZOP et l'APR.

Nous avons présenté les limites de ces méthodes afin d'expliquer le choix de la méthode AGR qui est une extension de la méthode APR. En effet, nous remarquons que les études faites par les ingénieurs ont étudié les risques industriels alors que les économistes ont traité les risques économiques et financiers, en utilisant surtout la VAN comme indicateur de risque. Cette étude est la première qui englobe tous les risques ainsi que tous les aspects de la transition vers les ER, notamment les aspects de type institutionnel, politique, social, etc.

Dans la suite de ce travail, nous allons étudier tous les aspects et les barrières à la transition vers les ER en Tunisie, en étudiant le cas d'un projet CSP et en appliquant l'approche du management des risques et la méthode AGR.

## **PARTIE 2. LA TRANSITION VERS LES ENERGIES RENOUVELABLES EN TUNISIE**

## **Chapitre 5. Les énergies renouvelables en Tunisie : états des lieux et perspectives**

### **Introduction**

La Tunisie est un des rares pays en développement qui a accordé, depuis le milieu des années 1980, une grande importance à l'utilisation des ER comme une partie essentielle de sa politique de maîtrise de l'énergie. La Tunisie est un importateur net d'énergie fossile mais qui a un énorme potentiel d'ER. C'est pour cette raison que la Tunisie a accordé, ces dernières années, une grande importance à la promotion des ER. Cependant, les efforts déployés n'ont pas connu un grand succès puisque la part des ER reste très limitée et le mix énergétique est quasi inexistant vu que l'économie tunisienne reste trop dépendante du gaz naturel. La subvention aux énergies fossiles, la dépendance aux importations de gaz naturel et d'autres problèmes de notre système énergétique prouvent que des changements structurels urgents doivent être mis en œuvre.

Ce chapitre contiendra une analyse des principales caractéristiques du contexte énergétique en Tunisie, en général, ainsi que le secteur des ER, en particulier, tout en mettant l'accent sur les réalisations faites et les orientations stratégiques.

La première section sera consacrée à présenter les principaux défis rencontrés dans le secteur énergétique qui font que la transition vers les ER doit être une priorité dans les années à venir. Ensuite, nous allons mettre l'accent sur la réalité du secteur des ER (le potentiel, les réalisations faites et les objectifs à atteindre) tout en détaillant les cas de l'énergie solaire et de l'énergie éolienne.

La seconde section va être consacrée à une analyse détaillée de l'expérience tunisienne dans le domaine du chauffe-eau solaire en détaillant les caractéristiques du programme PROSOL ainsi que les résultats atteints. En effet, ce programme a réalisé un succès considérable, durant ces dernières années, ce qui nécessite de détailler tous ses aspects. Nous allons commencer par analyser en détails les mécanismes financiers et institutionnels qui font le succès de ce programme. Ensuite, nous allons mettre l'accent sur les avantages réalisés suite au lancement de ce programme.

## **Section 1. Le contexte énergétique en Tunisie : défis et opportunités**

Le contexte énergétique tunisien actuel est caractérisé par les aspects suivants : le déficit énergétique, la lourdeur de la subvention accordée au secteur de l'énergie, les émissions de GES dues essentiellement à la combustion de l'énergie fossile et la réglementation qui est incapable de favoriser l'exploitation du potentiel énorme des ER.

### **1. Les principaux défis à relever dans le contexte énergétique tunisien**

#### **1.1. La dépendance énergétique**

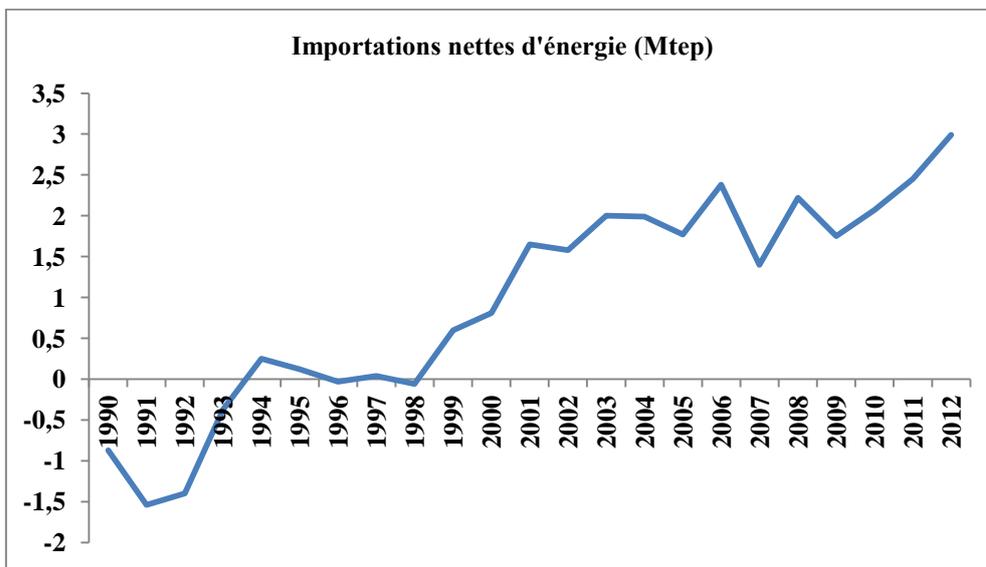
Selon l'Agence Nationale pour la Maîtrise de l'Energie (ANME, 2004), jusqu'au milieu des années 1980, la Tunisie a bénéficié d'une situation énergétique favorable. Pendant cette période, le secteur de l'énergie a joué un rôle important dans la croissance économique en Tunisie. En effet, en 1980, le secteur de l'énergie a présenté environ 13% du PIB et 16% des exportations nationales.

A la fin des années 1980, cette situation favorable a changé en raison de la baisse de la production nationale du pétrole et de l'augmentation rapide de la demande nationale pour les produits énergétiques. En 1994, la Tunisie a enregistré, pour la première fois, un déficit de sa balance énergétique. Cette situation a été résolue en doublant le gazoduc algéro-italien, en 1995. Mais à partir de 1999, le bilan énergétique est redevenu déficitaire en raison de la hausse constante de la demande d'énergie couplée à un approvisionnement stable voire décroissant.

Ainsi, à cause de la stagnation de l'offre nationale d'énergie et de l'augmentation de la demande énergétique, nous avons assisté, ces dernières années, à une dépendance croissante envers les importations d'énergie. En effet, la demande d'énergie primaire a atteint 6789 Kilotonne d'équivalent pétrole (Ktep) en 2002 (hors biomasse), contre seulement 3000 Ktep en 1980, enregistrant un taux de croissance annuel moyen d'environ 4% par an (ANME, 2004). Selon l'étude stratégique de l'ANME (2004), la consommation d'énergie conventionnelle primaire va croître, au cours des trois prochaines décennies, avec un taux annuel moyen d'environ 4,4%, en passant de 6700 Ktep en 2000 à 24 600 Ktep en 2030.

Selon les statistiques de l'OECD/IEA (2014a), les importations nettes d'énergie étaient de 0,25 million de tonnes d'équivalent Pétrole (Mtep), en 1994. Depuis 1999, la quantité des importations nettes n'a pas cessé d'augmenter et a atteint 2,45 Mtep en 2011 et 2,99 Mtep en 2012 (Figure 12).

Figure 12. Importations nettes d'énergie (Mtep) en Tunisie de 1990 à 2012



Source : OECD/IEA (2014a)<sup>27</sup>

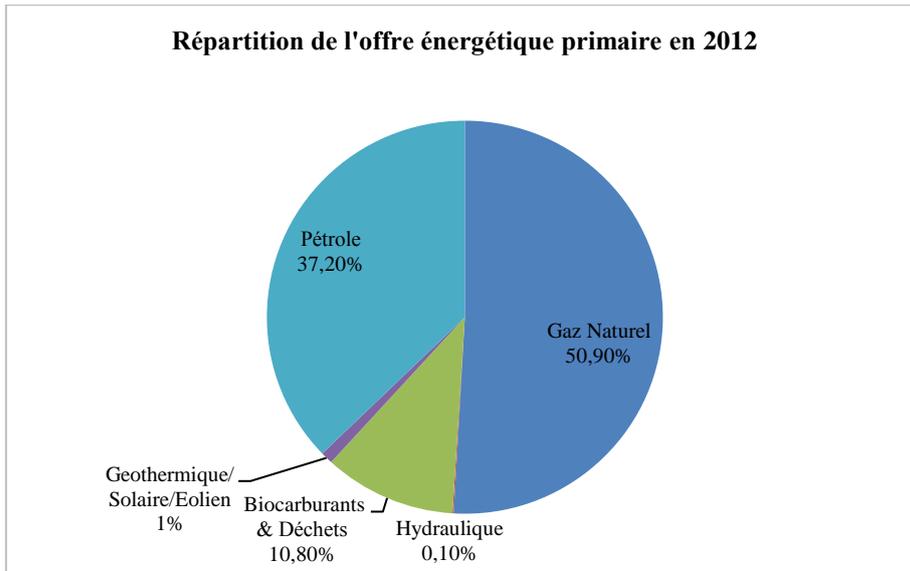
L'offre d'énergie primaire en Tunisie qui était de 9504 Ktep, en 2011, a été dominée par le gaz naturel avec 45,40% et le pétrole avec 39,90%. Concernant l'année 2012 (Figure 13), l'offre d'énergie primaire était de 9894 Ktep, elle est aussi dominée par le gaz naturel avec 50,90% et le pétrole avec 37,20%. La biomasse (essentiellement utilisée pour la cuisson des aliments dans les zones rurales) et les biocarburants contribuent à hauteur de 10,80% de l'offre totale en énergie primaire. Enfin, les ER (géothermie, solaire, éolien) représentent 1% de l'offre d'énergie primaire pour l'année 2012 et l'hydraulique ne représente que 0,1% (OECD/IEA, 2014b).

Selon la Revue Energie n°89 (2014), les ressources nationales d'énergie primaire ont continué leur baisse jusqu'à 2014, pour atteindre un total de 2,76 Mtep. En effet, elles ont diminué de 15% par rapport au niveau du premier semestre de l'année précédente. Cette baisse est causée par la diminution de la production du gaz naturel de 10%, de la

<sup>27</sup> Nous avons élaboré une représentation graphique d'après les données statistiques accessibles à partir des statistiques de l'OECD/IEA, disponibles sur : <http://www.iea.org/statistics/statisticssearch/report/?&country=TUNISIA&year=2011&product=Indicators>.

production du pétrole brut de 13% et du forfait fiscal de 43% (due à la baisse des achats du gaz algérien de la part des clients italiens dont le principal acheteur « ENI »). Concernant la consommation d'énergie primaire, elle a augmenté de 6% en juin 2014 par rapport au juin 2013. Cette hausse est due essentiellement à l'augmentation de la consommation du gaz naturel de 7,6% et des produits pétroliers de 3,6% (Revue Energie n°89, 2014).

Figure 13. La répartition de l'offre énergétique primaire en Tunisie



Source : OECD/IEA (2014b)<sup>28</sup>

Selon les dernières statistiques, la production d'énergie primaire (hors biomasse et énergies renouvelables thermiques) a diminué de 9% en 2014 par rapport à celle de 2013. Par contre, la consommation d'énergie primaire a augmenté de 6% durant la même période. Ces évolutions opposées ont aggravé le déficit énergétique qui a atteint un record de 3,7 Mtep en décembre 2014, enregistrant une hausse de 54% par rapport à celui enregistré en décembre 2013 (Revue Energie n°91, 2015).

Afin de satisfaire l'augmentation continue de la demande d'énergie, la production nationale d'électricité a augmenté de 4% en 2014 par rapport à 2013 et elle a atteint 17 672 GWh. La Société Tunisienne de l'Electricité et du Gaz (STEG) conserve toujours la plus grande part dans la production électrique avec 80% de la production nationale (Revue Energie n°91, 2015).

Si la demande énergétique continue sa hausse avec le même rythme, il est prévu que le déficit de la balance énergétique va atteindre environ 16 Mtep en 2030 (Revue Energie

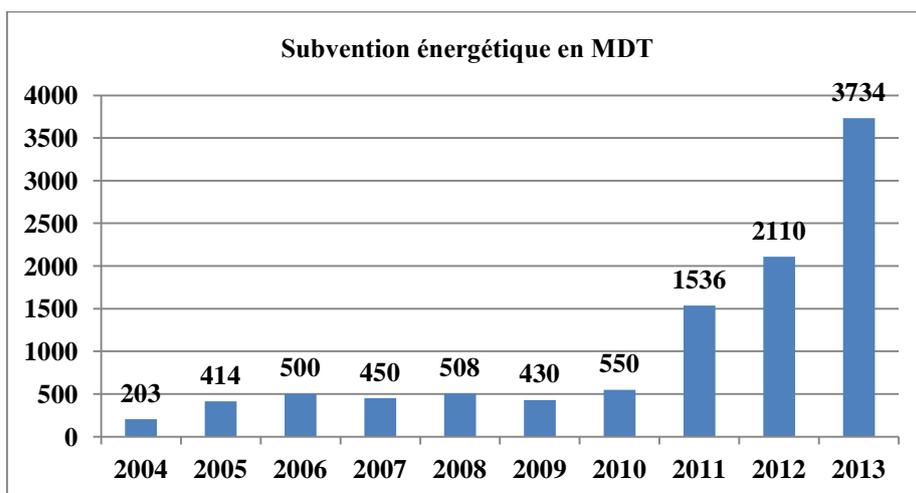
<sup>28</sup> Figure disponible sur le lien suivant : <http://www.iea.org/stats/WebGraphs/TUNISIA4.pdf>

n°90, 2014). Ce déficit énergétique dont souffre la Tunisie aura des répercussions très graves sur le budget de l'État à cause des importations de l'énergie et des subventions accordées aux hydrocarbures.

## 1.2. Les subventions accordées aux énergies fossiles : un fardeau pour le budget de l'État

La dépendance de la Tunisie des importations des hydrocarbures est au cœur des défis des finances publiques qu'il faut relever dans le court terme. Ceci est dû au fait que le montant des subventions allouées par l'État au secteur de l'énergie est devenu de plus en plus une vraie contrainte budgétaire et une source de pression sur les équilibres financiers. En effet, le budget accordé à la subvention de l'énergie a passé de 550 millions de dinars tunisiens (MDT) en 2010 à 3734 MDT en 2013. Ce qui fait que 14% du budget de l'État, soit 5% du PIB sont alloués à la subvention énergétique, en 2013 (Revue Energie n°89, 2014).

Figure 14. Evolution de la subvention accordée au secteur de l'énergie de 2004 à 2013 (en MDT)



Source : Revue Energie n°89 (2014, p.5)

Le déficit énergétique est le facteur endogène et direct qui influence la subvention au secteur de l'énergie. Mais, il y a d'autres facteurs exogènes et plus difficiles à contrôler qui exercent aussi une influence sur le déficit énergétique. Parmi ces facteurs, il y a la redevance gazière qui est souvent ajoutée aux ressources nationales, mais qui dépend en réalité du volume du gaz algérien acheté par l'Italie. La Tunisie n'exerce aucun contrôle sur la redevance qui varie selon des facteurs qui dépassent les pouvoirs de l'État. Les autres facteurs exogènes sont le cours de l'énergie importée qui est en dollar et la parité du

dinar tunisien (DT) face au dollar. En effet, pour satisfaire la demande énergétique nationale, l'État achète les produits énergétiques en dollar sur le marché international pour les vendre, par la suite, sur le marché national en DT et avec des prix subventionnés.

L'exemple de la flambée de la subvention entre 2010 et 2011 illustre parfaitement l'existence de tous ces facteurs. En effet, la subvention a passé de 550 MDT à 1536 MDT. Cette augmentation gigantesque a été causée par les facteurs suivants (Revue Energie n°90, 2014) :

- La production nationale a baissé de 8% ;
- La baisse de 18% de la redevance gazière ;
- Le prix du baril de pétrole a augmenté de 40% et celui de la tonne de gaz a augmenté de 29%.

La Tunisie s'est trouvée donc confrontée à un déficit structurel de la balance énergétique nationale qui est amplifié par des facteurs exogènes incontrôlables et difficiles à prévoir.

Ce qui aggrave encore l'insécurité énergétique, en Tunisie, c'est la volatilité des prix du baril de pétrole qui est très remarquable ces dernières années. Nous remarquons que la volatilité des prix des énergies fossiles, l'augmentation de la consommation nationale d'énergie et la stagnation de la production locale ont causé de nombreuses répercussions économiques négatives. En fait, nous avons assisté à une sortie massive de devises et une augmentation des dépenses publiques (vu que les énergies fossiles sont subventionnées par l'État).

Ce constat alarmant nécessite le recours à des solutions concrètes et efficaces afin de réduire cette subvention sans dégrader le pouvoir d'achat des classes moyennes. Réduire le déficit de la balance énergétique est au cœur de ces solutions. Pour ce faire, il faut, tout d'abord, augmenter nos ressources énergétiques nationales, en prenant surtout la promotion des ER comme une priorité. Ceci nécessite la mise en œuvre d'une stratégie efficace qui favorise une transition rapide vers les ER ce qui va diminuer, progressivement, notre dépendance énergétique et diversifier le mix énergétique.

### **1.3. Absence de mix énergétique en Tunisie**

En Tunisie, on n'a pas vraiment un mix énergétique vu qu'environ 90% de l'électricité est produite à partir du gaz naturel. Cette situation énergétique très dépendante

du gaz naturel rend la Tunisie trop vulnérable aux risques technologiques, de marché et géopolitiques.

Selon Kamel REKIK (Expert International en Energie) dans la revue Energie n°90 (2014, p.24) : « *Présenter le mix énergétique d'un pays ou d'une région donnée, c'est préciser les parts respectives de chacune des différentes formes d'énergie «primaire» qui contribuent à couvrir la demande totale en énergie «finale». On entend par énergie «primaire», ces produits bruts que sont le pétrole, le gaz naturel, le charbon, les renouvelables et autres sources d'énergie ; et par énergie «finale» ces produits finis, prêts à la consommation, qui sont les carburants, le gaz en bouteille (GPL), le gaz du réseau, l'électricité, etc. ».*

La dépendance totale au gaz naturel rend l'économie tunisienne très vulnérable aux aléas économiques et géopolitiques. Par exemple, le volume du gaz en transit de l'Algérie vers l'Italie a chuté depuis 2010, ce qui a engendré la baisse du forfait fiscal attaché au Gazoduc Trans-Tunisien et donc l'aggravation du déficit énergétique.

La question qui se pose face à cette situation est la suivante : est ce qu'on peut compter sur l'abondance des ER en Tunisie pour combler le déficit énergétique et pour diversifier notre mix énergétique ? Surtout que ces sources présentent des avantages irréfutables : elles sont abondantes, propres, inépuisables et peuvent faire l'objet d'une intégration locale.

Malgré tous ces atouts, les ER, en Tunisie, se heurtent à des obstacles de nature économique, technique, financière et réglementaire. La barrière la plus difficile à franchir reste le coût élevé des ER qui ne sont pas encore compétitives avec l'énergie fossile. Les pays qui ont réussi à avoir une part très importante des ER, tels que l'Allemagne, l'Espagne et le Danemark, ont accordé des fortes subventions au secteur des ER afin de couvrir leur surcoût.

En Allemagne par exemple, les subventions sont prises en charge par les consommateurs finaux. En Tunisie, la situation est beaucoup plus compliquée vu que l'électricité produite à partir du gaz naturel est déjà subventionnée par l'État. Pour pouvoir intégrer l'électricité verte d'une manière significative dans le mix énergétique tunisien, l'État doit consacrer une subvention encore plus importante, même si le consommateur final participe à la prise en charge de cette subvention. Mais, il ne faut pas oublier que l'indice d'IDN avantageux, en Tunisie, et la rapidité des innovations technologiques dans

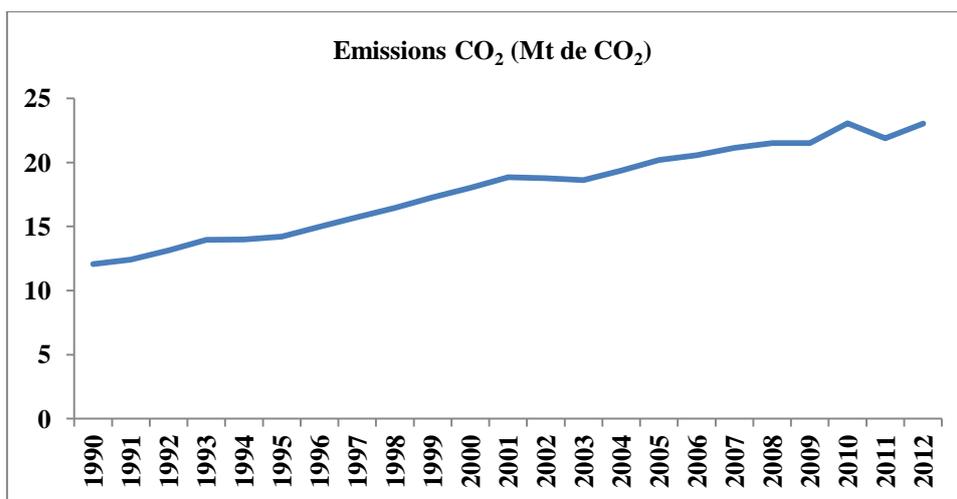
ce domaine peuvent participer considérablement à la diminution des coûts des technologies d'ER, surtout celles d'origine solaire.

#### 1.4. L'engagement de la Tunisie pour réduire les émissions de GES

La position géographique de la Tunisie entre les régions tempérées de l'hémisphère Nord et les régions intertropicales rend ce pays particulièrement vulnérable au changement climatique. Ainsi, le nord de la Tunisie bénéficie d'un climat méditerranéen, le centre ainsi que le golfe de Gabès se caractérisent par un climat semi-aride et le sud du pays connaît un climat aride (*Tunisian Ministry of Environment and Land Planning, 2001*).

La Tunisie s'est engagée, depuis des années, à participer à l'atténuation du changement climatique. En fait, le gouvernement tunisien a signé et a ratifié tous les traités et protocoles internationaux concernant le changement climatique. En effet, la CCNUCC adoptée en 1992 a été ratifiée par la Tunisie en juillet 1993. Le Protocole de Kyoto a été également ratifié en janvier 2003.

Figure 15. Les émissions de CO<sub>2</sub> provenant des combustibles fossiles en Tunisie



Source : OECD/IEA (2014a)<sup>29</sup>

La principale cause des émissions de CO<sub>2</sub> en Tunisie est la combustion des combustibles fossiles. Comme le montre la figure 15, ces émissions étaient seulement de 12,08 Mt de CO<sub>2</sub> en 1990, et ont atteint 21,88 Mt de CO<sub>2</sub> en 2011, et 23,04 Mt, en 2012. Ainsi, les émissions de CO<sub>2</sub> sont en augmentation continue (OECD/IEA, 2014a).

<sup>29</sup> Nous avons élaboré une représentation graphique d'après les données statistiques accessibles à partir des statistiques de l'OECD/IEA, disponibles sur : <http://www.iea.org/statistics/statisticssearch/report/?&country=TUNISIA&year=2011&product=Indicators>.

En ce qui concerne les émissions de CO<sub>2</sub> par habitant et qui sont causées par l'énergie fossile, on constate une légère augmentation des émissions de CO<sub>2</sub> par habitant entre 2000 et 2012. En fait, ces émissions varient autour de 2 tonnes de CO<sub>2</sub> (TCO<sub>2</sub>) par habitant, en passant de 1,88 TCO<sub>2</sub>, en 2000, à 2,14 TCO<sub>2</sub> en 2012(OECD/IEA, 2014a).

Pour réduire les émissions de CO<sub>2</sub> en Tunisie et contribuer à l'atténuation du changement climatique, il y a un seul chemin à suivre qui est le chemin de l'utilisation à grande échelle des ER. Pour cela, il faut mettre en place le cadre institutionnel et réglementaire convenable pour faire décoller ces ressources renouvelables et abondantes.

### **1.5. Une réglementation favorable mais insuffisante à la promotion des énergies renouvelables**

La Tunisie est le premier pays en Afrique du Nord quant à la mise en œuvre d'instruments institutionnels et réglementaires pour la promotion des ER. En fait, depuis le début des années 1980, la Tunisie a mis en place un cadre réglementaire et institutionnel qui concerne l'efficacité énergétique et la promotion des ER (par exemple, la loi n°85-48 relative à la promotion des ER et la loi n°85-8 liée à la maîtrise de l'énergie).

L'ANME est le leader dans l'organisation institutionnelle de la maîtrise de l'énergie en Tunisie. Elle a été créée, en 1985, et elle est une entité publique non administrative qui opère sous l'autorité du ministère de l'industrie, de l'énergie et des mines. La mission de l'ANME consiste à mettre en œuvre la politique nationale dans le domaine de la maîtrise de l'énergie.

Les principaux lois et décrets régissant l'efficacité énergétique et la promotion des ER en Tunisie sont :

- Loi n°2004-72 du 2 août 2004 consacrée à la maîtrise de l'énergie et modifiée par la loi n°2009-7 du 9 février 2009. Elle est consacrée à la production, la transmission et la vente de l'électricité produite à partir des ER.
- Loi n°2005-82 du 15 août 2005 établissant une stratégie de maîtrise de l'énergie. Cette stratégie comprend l'efficacité énergétique, la promotion des ER et la substitution d'énergie.
- Loi n°2005-106 du 19 décembre 2005, cette loi stipule la création d'un fonds national pour la maîtrise de l'énergie (FNME). Ce fonds était créé afin de financer des actions dans le domaine de l'efficacité énergétique et la promotion des ER.

- Décret n°2005-2234 du 22 août 2005 modifié par le décret n°2009-362. Ce décret fixe les taux et les montants des primes concernant les actions incluses dans le plan de maîtrise de l'énergie.
- Décret n°2009-2773 du 28 septembre qui fixe les conditions de la transmission de l'électricité à partir des ER ainsi que les conditions concernant la vente des surplus d'électricité à la STEG.

Cette réglementation s'avère insuffisante et doit être mise à jour afin de répondre aux exigences actuelles. Ainsi, la mise en place d'un nouveau cadre réglementaire et institutionnel, à savoir la loi de production de l'électricité à partir des ER, le fonds de transition énergétique et l'actualisation du code des hydrocarbures doivent être parmi les principales priorités du gouvernement. Il est aussi indispensable de mettre en place un cadre réglementaire qui encourage les investisseurs privés afin de pouvoir atteindre les objectifs fixés, dans le domaine des ER sans alourdir le budget de l'État.

## **2. Le secteur des énergies renouvelables en Tunisie : orientations stratégiques et bonnes pratiques**

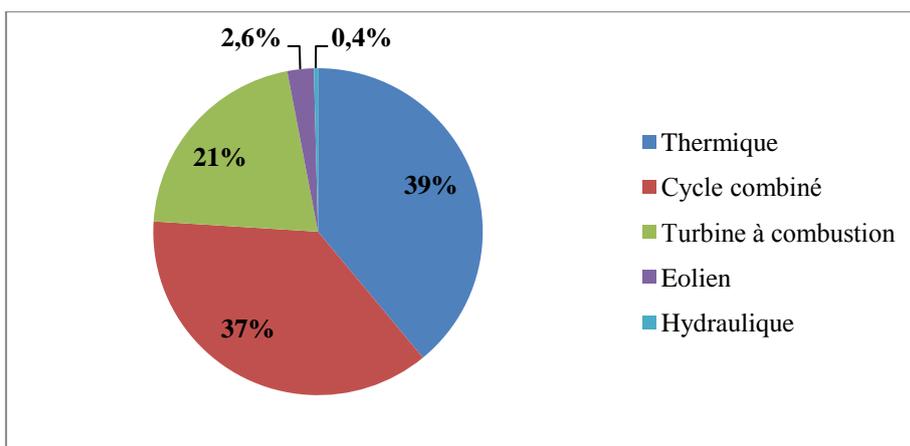
Face à ces différents défis dans le secteur énergétique, il est clair que la Tunisie doit mettre en œuvre une stratégie énergétique qui peut répondre à la croissance continue de la consommation d'énergie primaire, en particulier, dans le contexte actuel de volatilité des prix du pétrole. Face à cette situation, l'utilisation des ER apparaît comme une option essentielle. Vu que le soleil est une source abondante en Tunisie, l'énergie solaire peut être proposée comme une solution pour réduire la dépendance du pays vis-à-vis des sources de combustibles fossiles importées et de contribuer, en même temps, à la protection de l'environnement.

Le développement à grande échelle des ER, en Tunisie, permettra à la fois de s'intégrer dans une approche de croissance verte, de réaliser la sécurité énergétique et la création d'emplois verts. Ceci permettra de suivre le chemin du développement durable et aussi faciliter le recours à la finance carbone sous la forme de fonds verts et de coopération bilatérale.

## 2.1. Développement des énergies renouvelables en Tunisie : contexte et enjeux

La Tunisie a l'avantage d'être exposée à plus de 3000 heures d'ensoleillement par an. L'Irradiation Globale Horizontale (IGH) est comprise entre 1800 KWh/m<sup>2</sup>/an au nord du pays et dépasse 2600 KWh/m<sup>2</sup>/an au sud (STEG, 2014). Ainsi, les valeurs les plus élevées se trouvent dans les régions du sud du pays et aussi dans certaines régions à haute altitude. De ce fait, la Tunisie est dotée de conditions climatiques très favorables pour le développement à grande échelle du solaire PV et du solaire thermique à concentration. L'énergie solaire est considérée comme une source prometteuse pour l'amélioration du bilan énergétique et la protection de l'environnement. En fait, il est clair que la Tunisie est dotée de potentiels énormes d'énergie solaire qui peuvent changer la réalité énergétique en Tunisie, dans les années à venir, d'un importateur net à un exportateur net. Concernant l'énergie éolienne, la Tunisie a l'avantage aussi d'avoir un gisement éolien important (vitesse du vent > 6m/s) et un potentiel éolien de l'ordre de 8000 MW (STEG, 2014). Malgré ce potentiel énorme, les réalisations faites dans le domaine des ER sont timides et ne sont pas en harmonie avec les conditions climatiques très favorables. En effet, selon les derniers chiffres publiés par l'ANME, la capacité d'ER installée reste modeste et elle se répartit de la manière suivante : 245 MW éolien, 65 MW hydraulique et 20 MW PV (solar roofs) (ANME, 2015).

Figure 16. Production nationale d'électricité en % en 2013



Source : STEG (2015)<sup>30</sup>

<sup>30</sup> Figure disponible sur le site de la STEG sur le lien suivant : <http://www.steg.com.tn/fr/institutionnel/produire.html>

En 2013, La production nationale de l'électricité est de 17 087 GWh (contre 16 848 GWh en 2012). Cette production se répartit comme montré sur la figure 16. On remarque donc que la part des ER dans le mix électrique ne dépasse pas 3% en 2013, avec 2,6% éolien et 0,4% hydraulique.

Il est à noter que la Tunisie a fait des progrès considérables dans le domaine de l'efficacité énergétique. Par contre, dans le domaine des ER, la Tunisie a du retard à rattraper surtout en la comparant avec les pays qui ont des caractéristiques économiques et géographiques semblables.

Selon l'indice « AFEX 2015 » qui est élaboré par le centre régional pour les énergies renouvelables et l'efficacité énergétique, notre pays est classé 6<sup>ème</sup>, loin derrière le Maroc, la Jordanie, les Émirats arabes unis (EAU), l'Égypte et la Palestine. Cet indice nous montre que la Tunisie a encore un long chemin à suivre pour réussir sa transition vers les ER, surtout en ce qui concerne la structure du marché et la finance.

Tableau 2. AFEX 2015 pour les énergies renouvelables

Pays	Score final	Structure du marché	Cadre politique	Capacité institutionnelle	Finance et investissement
Maroc	66	48	66	62	87
Jordanie	63	51	68	58	77
EAU	41	28	38	58	40
Égypte	41	43	43	50	26
Palestine	40	29	60	49	24
<b>Tunisie</b>	<b>38</b>	<b>23</b>	<b>46</b>	<b>46</b>	<b>37</b>
Algérie	34	36	29	39	33
Liban	26	11	33	36	23
Yémen	21	12	33	29	12
Arabie Saoudite	21	12	23	39	10
Irak	21	17	24	26	16
Kuwait	20	12	16	44	10
Soudan	20	12	21	29	16
Bahreïn	19	12	11	31	23
Syrie	19	16	20	29	10
Qatar	17	12	17	30	10
Libye	16	10	20	24	10

Source : RCREEE (2015, p.10)

Dans le cadre de la diversification de son mix énergétique, la Tunisie a effectué déjà quelques pas timides dans la valorisation des ER qui sont abondantes en Tunisie, notamment le solaire et l'éolien.

### **2.1.1. L'énergie solaire**

La technologie d'ER la plus développée, en Tunisie, est le chauffe-eau solaire qui sera détaillé dans la section suivante. Ensuite, vient l'énergie éolienne et le solaire PV pour la production de l'électricité. En dernier lieu se trouve l'hydraulique qui n'est plus une priorité dans la stratégie énergétique tunisienne.

Ces dernières années, on a assisté surtout à l'émergence du solaire PV, notamment avec le programme « PROSOL Elec » qui a été mis en place en 2010, afin de développer le solaire PV raccordé au réseau basse tension dans le secteur résidentiel. Ce programme se caractérise par un mécanisme de financement innovant composé de subvention d'investissement (30% du coût de l'investissement de l'installation PV), un crédit avec un taux bonifié, une ligne de crédit spécifique et le remboursement du crédit via la facture de la STEG.

Vu que la ressource solaire est abondante dans notre pays ce qui favorise le déploiement à grande échelle de l'énergie solaire PV, le gouvernement tunisien a initié des mécanismes de soutien pour cette technologie qui ont commencé déjà à donner quelques résultats encourageants. Néanmoins, le marché de l'énergie solaire PV en Tunisie reste encore peu développé avec un manque de stabilité et de transparence puisqu'il se focalise surtout sur les systèmes résidentiels à petite échelle. Les centrales solaires PV de moyenne taille, c'est-à-dire jusqu'à 1 Mégawatt-crête (MWc), et de grande taille (plus que 1 MWc) ne sont pas encore très développées en Tunisie. Pour ces raisons, le gouvernement est en train d'élaborer une nouvelle stratégie afin de développer les centrales PV qui ont une forte capacité.

Il est à noter que le déploiement du solaire PV en Tunisie ne date pas d'hier. En effet, la première centrale solaire PV a été implantée, en 1983, au village de Hammam Biadha, près de Siliana, avec une capacité de 30 Kilowatt-crête (KWc), soit 40 000 KWh/an.

Ces dernières années, le solaire PV a attiré de nouveau l'intérêt des décideurs vu ses nombreux avantages et surtout son coût qui ne cesse de diminuer de manière encourageante. On a assisté donc à deux projets pilotes, le premier concerne les toits solaires pour les bâtiments STEG avec une puissance totale de 35 KWc. Le deuxième qui est plus ambitieux est appelé « PROSOL Elec » qui concerne le développement des toits solaires pour le secteur résidentiel avec une puissance installée de 5 MW. La STEG envisage d'augmenter la capacité installée du solaire PV, dans les années à venir, avec le

développement du PV dans les bâtiments publics afin d'atteindre la capacité de 13 MW en 2016 (STEG, 2014).

En plus du toit solaire, il est envisagé de développer, dans les années à venir, les centrales solaires PV. Selon STEG (2014), deux projets de centrales solaires PV vont voir le jour les années à venir :

- Centrale solaire PV à Tozeur : le gouvernorat de Tozeur a été choisi dans le cadre de la coopération tuniso-allemande pour abriter la plus grande centrale solaire PV dans la région du Maghreb. La capacité de production de cette station est de 10 MW avec une production estimée de 17 GWh/an. Ce projet sera financé par une banque allemande, sous forme de crédit préférentiel. L'entrée en exploitation de cette centrale PV est prévue au milieu de l'année 2016 afin d'être reliée au réseau électrique de la région.
- D'autres centrales solaires PV avec une capacité de 50 MW seront mises en service à partir de 2019.

Concernant le solaire CSP, nous remarquons que jusqu'à nos jours aucune centrale CSP n'est en fonctionnement, malgré les avantages remarquables de cette technologie qui sont claires surtout dans le cas de l'expérience marocaine. Néanmoins, il y a plusieurs projets de centrales CSP qui vont voir le jour, durant les années à venir (ANME, 2011a), on peut citer par exemple :

- Centrale CSP à Akarit (Gabés) avec une capacité de 50 MW avec la possibilité d'extension jusqu'à atteindre 100 MW. La mise en service est prévue pour 2017.
- Centrale CSP combinée solaire/gaz à « El Borma » avec une capacité de 5 MW CSP plus 40 MW Cycle Combiné. Le financement sera principalement d'origine japonaise. Les études de faisabilité ont déjà commencé.
- Centrale CSP d'une capacité de 100 MW CSP destinée à l'exportation dans le cadre du projet ELMED à l'horizon 2016 (interconnexion avec l'Italie).
- L'installation de 100 MW CSP par le secteur privé.

### **2.1.2. L'énergie éolienne**

Dans le but de préserver l'environnement en favorisant la production de l'électricité « verte », la STEG a intégré la technologie éolienne parmi ses choix de production de l'électricité. Dans ce cadre la STEG a construit, en 2000, la première centrale éolienne d'une capacité de 54 MW à Sidi Daoud au nord-est du pays. Une première tranche de 10,56 MW a été mise en service, en 2000. Elle a connu une première extension de 8,72

MW en 2003, ainsi qu'une deuxième extension de 34 MW de puissance, en 2009. Le deuxième parc éolien construit en Tunisie est celui de Bizerte, dont la puissance totale s'élève à 190 MW. Il concerne deux sites, celui de Mételine et celui de Khabta, avec une puissance de 95 MW chacun. La mise en service était en 2013 (STEG, 2014). La capacité éolienne installée s'élève donc à 245 MW seulement ce qui est négligeable par rapport au potentiel éolien du pays ainsi que la demande croissante de l'électricité.

D'autres centrales éoliennes sont envisagées par la STEG, d'ici 2020, avec une puissance globale de l'ordre de 190 MW : centrale éolienne de puissance 80 MW à l'horizon 2017 et une autre de puissance 110 MW à l'horizon 2019 (STEG, 2014).

Tableau 3. Projets de la STEG à l'horizon 2020

	Type du projet	Capacité MW	Production GWh	Date de mise en service
Eolien	Centrale éolienne	80	210	2018
	Centrale éolienne	110	289	2019
Photovoltaïque	Centrale PV Tozeur	10	17	2016
	Toits solaires dans les bâtiments publics	13	21	2016
	Centrale PV	50	85	2019
CSP	Centrale CSP Akarit Gabès	50	132	2017

Source : STEG (2014, p.42)

### 2.1.3. Les mécanismes d'incitation spécifiques aux énergies renouvelables

La stratégie tunisienne en matière des ER envisage une part des ER (hors énergie hydraulique) dans la production électrique de 30% en 2030, contre seulement 3% en 2014. Si cet objectif est réalisé, 10 000 nouveaux emplois peuvent être créés dans ce secteur (Revue Energie n°90, 2014).

Afin d'atteindre les objectifs fixés, le gouvernement a eu recours à plusieurs mécanismes et stratégies pour faire décoller la filière renouvelable, parmi lesquels on peut citer :

- Les mécanismes de financement innovants comme le cas du PROSOL pour le développement des chauffe-eau solaires dans le secteur résidentiel et tertiaire et aussi « PROSOL Elec » pour le développement des installations PV raccordées au réseau. Ces deux programmes ont réalisé de bons résultats malgré quelques inconvénients qui peuvent être évités, dans les années à venir. Il s'agit le plus souvent de mécanismes

- intégrant une combinaison appropriée et cohérente de plusieurs types de mesures et qui est accompagnée d'une organisation institutionnelle qui fait intervenir plusieurs acteurs.
- Le recours aux avantages fiscaux directs et indirects : l'application des droits de douane minimum et la suspension de la taxe sur la valeur ajoutée (TVA) sur les équipements et les produits utilisés pour la maîtrise de l'énergie.
  - Les lignes de crédit spécifiques : on peut citer, par exemple ceux de l'Agence Française de Développement (AFD) et de la Banque Mondiale.
  - Les aides financières publiques : ce sont des incitations à l'investissement et aussi à l'utilisation des technologies d'ER. Elles prennent la forme de subventions directes aux investissements dans les installations renouvelables et aussi des aides octroyées lors de l'installation de technologies renouvelables. Elles visent la réduction des coûts d'investissement et de rendre l'investissement dans les technologies d'ER plus rentable et donc plus attractif. Ces aides publiques peuvent aussi prendre la forme de bonification du taux d'intérêt bancaire afin de réduire le coût du financement pour l'utilisateur.
  - La facturation nette (*net metering*) : ce mécanisme est appliqué dans le cadre du programme « PROSOL Elec ». En effet, les factures sont émises par la STEG sur la base du principe de "*net metering*" qui consiste à faire payer au ménage le solde entre sa consommation électrique et la production fournie par l'installation PV qu'il utilise. Il s'agit d'un système très simple qui se base sur l'autorisation d'un flux bidirectionnel d'électricité entre le réseau de distribution d'électricité et la production personnelle du client.

Bien que ces mécanismes constituent un pas énorme, ils sont encore insuffisants pour atteindre l'objectif de 30% d'ER en 2030 et pour promouvoir les technologies d'ER centralisées comme les grandes centrales solaires PV et CSP. En effet, concernant l'ER centralisée, le chemin reste encore long malgré les avantages offerts par cette solution tels que l'atténuation du déficit énergétique.

Afin d'augmenter la part des ER dans le mix énergétique, la Tunisie a élaboré le plan solaire tunisien (PST) et a renforcé le partenariat et la coopération. En plus, il y a eu un débat national pour la transition vers les ER et l'élaboration de la loi n° 2015-12 du 11 mai 2015 relative à la production de l'électricité à partir des ER. Dans ce qui suit, nous allons détailler tous les efforts qui ont été fournis ces dernières années.

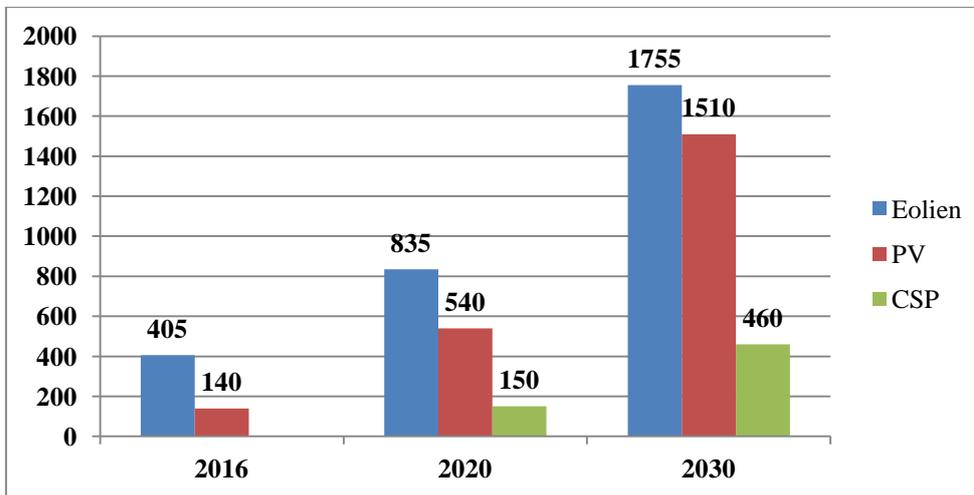
## 2.2. Le plan solaire tunisien : une composante majeure de la stratégie de transition énergétique de la Tunisie

Le PST a été élaboré, en 2009, mais il a été mis à jour après quelques années afin d'être plus cohérent avec le Plan Solaire Méditerranéen (PSM) et aussi avec le contexte économique tunisien d'après révolution. Le PST vient dans le cadre de la stratégie du gouvernement visant la diversification de son mix énergétique, surtout en valorisant efficacement le potentiel énorme dans le domaine de l'énergie solaire.

Le principal objectif du PST est que la part des ER (hors hydraulique) atteint 30% de la production électrique en 2030 contre 2% environ en 2010. Cette part d'ER sera répartie de la manière suivante : 5% CSP, 10% PV et 15% éolien (ANME, 2012a). Le PST vise donc la réalisation des objectifs nationaux en matière du mix électrique puisqu'il concerne seulement la production de l'électricité qui sera raccordée au réseau.

En matière de capacités installées, l'objectif du PST sera comme suit : la capacité installée des technologies d'ER sera de 3725 MW, en 2030, contre seulement 250 MW, en 2012 (ANME, 2012a). Cette capacité installée sera répartie entre 3 technologies d'ER et selon l'horizon temporel comme il est montré sur le graphique suivant.

Figure 17. Prévision de la capacité électrique installée d'origine renouvelable par filière en Tunisie (MW)



Source : ANME (2012a, p.10)

Le coût total du PST, durant la période 2013-2030, est estimé à 4744 millions d'euros (M€), il sera réparti selon les filières et l'horizon temporel comme indiqué sur le tableau 4.

Tableau 4. Investissements cumulés selon les horizons et les filières dans le cadre du PST (M€)

Année	2016	2020	2030
Eolien	179	617	1499
PV	231	738	1567
CSP	-	588	1678
<b>Total</b>	<b>410</b>	<b>1943</b>	<b>4744</b>

Source : ANME (2012a, p.23)

La part la plus importante des investissements sera accordée au CSP vu que cette technologie est encore nouvelle et le coût unitaire est encore assez élevé. La majorité de ces investissements sera financée par le secteur privé soit 4 milliards d'euros dont 3 milliards d'euros d'apports bancaires et le reste sous la forme de fonds propres.

Tableau 5. Financement du PST (M€)

Année	2016	2020	2030
<b>Secteur privé</b>	<b>353</b>	<b>1394</b>	<b>4127</b>
Fonds propres	92	385	1163
Banques	261	1010	2963
<b>État</b>	<b>57</b>	<b>549</b>	<b>617</b>
Subvention d'investissement	19	52	120
Investissement direct	38	497	497
<b>Total</b>	<b>410</b>	<b>1943</b>	<b>4744</b>

Source : ANME (2012a, p.24)

Les économies cumulées d'énergie primaire, durant 2013-2030, seront d'environ 18 000 Ktep. L'essentiel de ces économies sera réalisé grâce à l'éolien avec environ 10 000 Ktep. Le CSP n'aura des effets qu'à partir de 2017 qui est la date de la mise en œuvre d'une centrale CSP de 50 MW de capacité et qui sera réalisée par la STEG (Tableau 6).

Tableau 6. Economies cumulées d'énergie primaire dues au PST (Ktep)

Année	2016	2020	2030
Eolien	735	2332	10 259
PV	108	742	5 116
CSP	-	273	2 401
<b>Total</b>	<b>843</b>	<b>3347</b>	<b>17 775</b>

Source : ANME (2012a, p.24)

La réalisation des objectifs du PST aura des répercussions positives sur l'environnement, notamment la réduction des émissions de CO<sub>2</sub>. Ces émissions seraient de :

- 2 millions de tonnes de CO<sub>2</sub> (MTCO<sub>2</sub>) sur la période 2013-2016 ;
- 8 MTCO<sub>2</sub> sur la période 2013-2020 ;
- 43 MTCO<sub>2</sub> sur la période 2013-2030.

Les impacts environnementaux envisagés de la mise en œuvre du PST (30% d'électricité produite à partir des ER et les différents projets d'efficacité énergétique) sont la réduction des émissions de GES de plus de 160 tonnes de CO<sub>2</sub> (TCO<sub>2</sub>) par GWh par rapport au scénario tendanciel (Revue Energie n°90, 2014).

Le PST va contribuer à la réduction de la subvention accordée au gaz naturel qui est la première source de production de l'électricité. Les subventions cumulées évitées pour l'État grâce au PST seraient de l'ordre 415 M€ en 2016, 2172 M€ en 2020 et 14 100 M€ à l'horizon 2030 (ANME, 2012a).

La mise en œuvre du PST implique la participation des acteurs publics et privés en s'appuyant sur des dispositifs institutionnels, réglementaires et financiers favorables et novateurs, tout en favorisant le partenariat et la coopération internationales.

### **2.3. Partenariat et coopération**

La coopération en Méditerranée a été surtout renforcée à travers les efforts de l'Association Méditerranéenne des Agences pour la Promotion de l'Efficacité énergétique et des Energies Renouvelables (MEDENER) qui est présidée par l'ANME, depuis avril 2014, pour une période de deux ans.

Durant ces dernières années, on a assisté à la multiplication des accords et des coopérations dans le domaine des ER, on peut citer les accords suivants, selon la Revue Energie n°90 (2014) :

- La coopération entre l'ANME et le Programme des Nations Unies pour le Développement (PNUD) : la signature du document de projet de coopération entre l'ANME et le PNUD a eu lieu en décembre 2014. Ce projet vient en appui au PST en proposant des *National Appropriate Mitigation Actions* (NAMA). Ce projet sera financé par un don accordé par le fonds pour l'environnement mondial (FEM) d'un montant de 6,4 MDT. Ce projet a pour but de renforcer le déploiement de trois technologies qui sont : l'énergie éolienne, l'énergie solaire PV et l'énergie CSP. Ceci va permettre de transformer le mix électrique, d'ici 2030, de telle sorte que 30% de l'électricité de la Tunisie serait générée à partir des ER. La NAMA dans le cadre du PST va être concrétisée par la mise en œuvre de deux projets : un projet de 10 MW de solaire PV qui sera financé par le secteur public et un projet de 24 MW d'éoliens qui sera financé par le secteur privé. L'atteinte de ces objectifs va permettre d'éviter 27 MTCO<sub>2</sub> durant la période 2015-2030.

- La coopération énergétique entre la Tunisie et l'Allemagne : ce partenariat énergétique a commencé suite à la signature d'un accord entre les deux gouvernements, en janvier 2012. La mise en œuvre effective de cette coopération a été en janvier 2013 suite à la signature d'une déclaration à Berlin. Ce partenariat vise le renforcement de la transition vers les ER.
- L'accord de coopération entre l'ANME et l'agence de l'environnement et de la maîtrise de l'énergie (ADEME) : il s'agit en fait du renouvellement d'un accord de coopération bilatérale pour la période 2014-2017 vu que les deux agences coopèrent déjà, depuis 1994. Cet accord concerne surtout les axes suivants : la mise en place de plateformes de formation pour le projet PROSOL, le renforcement de la coopération en Méditerranée, etc.

Malgré tous les efforts déployés en matière de ressources financières et de coopération internationale, le contexte énergétique en Tunisie reste encore une préoccupation primordiale vu la complexité du contexte et la multiplicité des parties prenantes. Le débat national sur l'énergie lancé en 2013 est un premier pas dans l'analyse des difficultés dans ce secteur afin de s'engager dans des réformes structurelles efficaces, dans les années à venir.

#### **2.4. Le débat national sur l'énergie**

Vu le contexte énergétique actuel caractérisé par des défis énormes à relever (le déficit énergétique, le montant énorme des subventions), la Tunisie a engagé en 2013 un débat national sur sa politique énergétique. Ce débat porte sur les choix stratégiques qui doivent être adoptés à l'horizon 2030.

Le débat national sur l'énergie a été lancé le 27 juin 2013. Ce débat a été organisé par le ministère de l'industrie, de l'énergie et des mines en partenariat avec l'ANME, la STEG et de plusieurs entreprises opérant dans le secteur de l'énergie.

Ce débat a porté surtout sur le déficit énergétique incontrôlable dont souffre la Tunisie ainsi que la subvention accordée à l'énergie fossile qui devient énorme. Parmi les sujets les plus intéressants lors de ce débat, on peut citer les composantes du futur mix énergétique, le code des hydrocarbures, l'étude de faisabilité de l'utilisation du charbon et du gaz de schiste pour produire de l'électricité, le développement des ER et l'interconnexion électrique avec l'Europe.

En effet, si la Tunisie continue à suivre sa politique actuelle, la demande d'énergie primaire atteindra 19 Mtep en 2030. Mais, si la Tunisie choisit plutôt d'opter pour une politique volontariste la demande d'énergie primaire peut être de 12,5 Mtep seulement en 2030, c'est-à-dire 34% de moins (Revue Energie n°90, 2014).

Lors de ce débat, vingt-sept rencontres ont été organisées avec 2000 experts, des universitaires, des représentants des entreprises publiques et privées, des représentants du ministère de l'industrie, de l'énergie et des mines, des représentants de la société civile et des représentants des institutions professionnelles telles que l'Union Générale Tunisienne du Travail (UGTT) et l'Union Tunisienne de l'Industrie, du Commerce et de l'Artisanat (UTICA).

Parmi les 150 questions traitées et les 550 propositions avancées, près de 50% concernent les ER et l'efficacité énergétique. Le traitement de toutes ces questions a permis de tracer les grandes orientations de la stratégie énergétique, à l'horizon 2030. Cette stratégie se résume en un scénario volontariste qui vise la réduction de la demande d'énergie primaire de 34% et le développement de la production de l'électricité d'origine renouvelable de 30% (soit près de 15% du mix énergétique global).

Le débat national sur l'énergie porte essentiellement sur les thèmes suivants : la réforme du système de subvention pour l'énergie afin de le rendre plus équitable, le renforcement des mesures d'efficacité énergétique et l'augmentation de la part des ER.

Les résultats de ce débat ont montré l'importance d'une transition énergétique en Tunisie. Cette transition nécessite une transformation radicale dans nos modes de production, de consommation et de transformation d'énergie afin de réduire le déficit énergétique et protéger l'environnement. Il est donc nécessaire de diversifier le mix énergétique afin de réduire la dépendance vis-à-vis du gaz naturel. Cependant, une telle diversification ne sera possible qu'avec l'instauration d'un climat favorable pour les ER, notamment en matière de réglementation.

## **2.5. La nouvelle réglementation relative à la production de l'électricité à partir des énergies renouvelables**

La ratification de la nouvelle réglementation sur les ER est un pas primordial pour instaurer un climat d'affaire favorable au déploiement des ER à grande échelle. Nous allons citer brièvement les principaux objectifs et apports de cette loi. Les principaux

objectifs de la loi n° 2015-12 du 11 mai 2015, relative à la production de l'électricité à partir des ER, (selon l'article premier) sont les suivants :

- « ...définir le régime juridique relatif à la réalisation des projets de production d'électricité à partir de sources d'énergie renouvelables, soit pour l'autoconsommation ou pour répondre aux besoins de la consommation locale ou en vue de l'exportation... ».
- « ... définir le régime juridique régissant les installations, les équipements, les biens immeubles et les matériels nécessaires pour assurer la production d'électricité à partir des énergies renouvelables et le transport de celle-ci ».

Cette loi renforce le cadre réglementaire existant aux moyens de trois principales mesures :

- La définition d'un plan national de l'énergie électrique produite à partir d'ER (Article 3) : ce plan sera élaboré par le ministère de l'énergie, de l'industrie et des mines. Ce plan permet de (i) fixer les programmes de production de l'électricité à partir des ER selon les besoins nationaux et la capacité du réseau, (ii) déterminer les réserves d'énergie et les zones de réserve de stockage d'énergie qui sont exploitées dans le cadre de contrats de concession de production de l'électricité à partir des ER, (iii) déterminer le taux minimum d'intégration industrielle des projets programmés et enfin (iiii) fixer un programme de développement des zones qui souffrent d'un déficit en matière de capacité d'intégration du réseau afin de lutter contre les disparités régionales. Selon l'article 40, ce plan national doit être élaboré et approuvé dans un délai qui ne dépasse pas 5 ans à compter de la date d'entrée en vigueur de cette loi.
- L'élargissement du statut d'auto-producteur aux collectivités locales et aux établissements publics et privés (Article 9) : suite à une autorisation, ces entités peuvent produire de l'électricité verte pour leur propre consommation et revendre l'excédent à la STEG selon un prix de revente fixé par arrêté du ministre et ceci tout en respectant un seuil maximum qui est défini par une convention-type.
- L'autorisation de la production d'ER destinée à l'exportation (Article 24 jusqu'à Article 28) : dans le cadre d'un contrat de concession, les sociétés privées peuvent produire de l'électricité verte destinée à l'exportation. Dans ce cas, l'État bénéficie d'une redevance pour l'octroi de la concession ainsi qu'une part de l'électricité produite. Toutes les modalités seront fixées dans le contrat de concession.

## **Section 2. Le succès du projet PROSOL**

La Tunisie est le premiers pays de la région MENA qui a mis en place les mécanismes de financement spécifiques aux ER. Parmi ces mécanismes, on peut citer le mécanisme « PROSOL » pour le CES et le mécanisme « PROSOL Elec » pour le solaire PV. Ces mécanismes sont une combinaison d'instruments financiers et d'outils institutionnels mis en place pour promouvoir une filière bien déterminée, tout en fixant des objectifs bien spécifiques. Récemment, plusieurs pays dans la région ont commencé à mettre en place ce type de mécanismes.

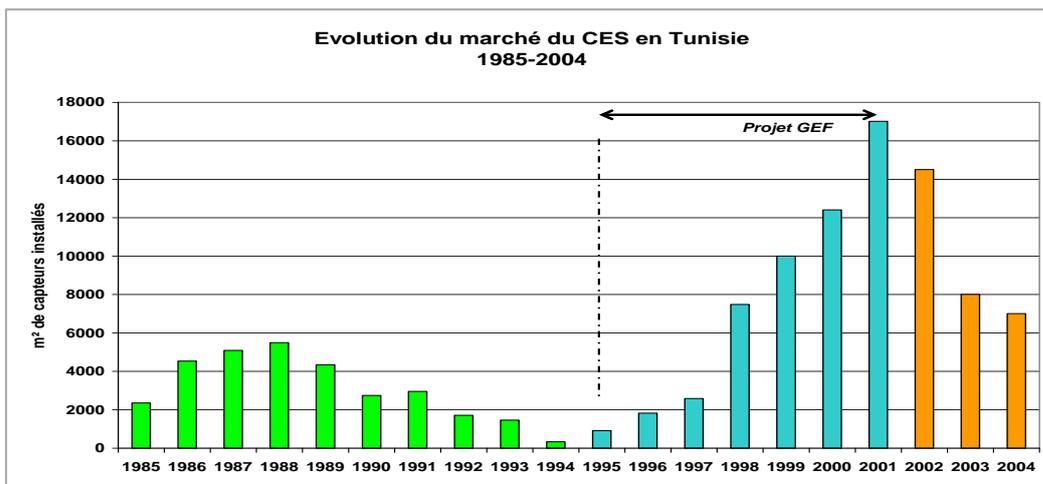
L'énergie solaire est considérée comme une source prometteuse, en Tunisie, qui peut contribuer à l'amélioration du bilan énergétique et la protection de l'environnement. En fait, il est prouvé que la Tunisie est dotée d'énormes potentiels d'énergie solaire. Pour relancer le marché des CES, le gouvernement a décidé de créer, en 2005, un projet ambitieux appelé PROSOL qui a de nombreux avantages environnementaux et socio-économiques. Dans cette section, l'historique du marché du CES est évoquée ainsi que la structure du projet PROSOL et ses principaux mécanismes.

### **1. Principales caractéristiques du projet PROSOL**

Nous allons analyser en détails l'expérience tunisienne en matière de promotion de CES en mettant l'accent sur le projet PROSOL. En fait, nous allons présenter une analyse détaillée de toutes les caractéristiques de ce projet et aussi ses impacts socio-économiques et environnementaux tels que le développement d'une industrie locale, la création d'emplois, la réduction des émissions de CO<sub>2</sub> et les économies d'énergie.

Compte tenu des conditions climatiques favorables qui caractérisent la Tunisie, la technologie du CES a toujours été la technologie d'ER la plus connue et la plus utilisée, depuis 1980. Cependant, son développement a été entravé par le manque de compétitivité par rapport aux systèmes conventionnels, principalement le gaz naturel et le gaz de pétrole liquéfié (GPL). Dans ce contexte, le gouvernement tunisien a continué pendant plus de 25 ans à lancer des plans ambitieux pour développer le marché du CES. Mais, tous ces plans n'ont pas réussi à atteindre les objectifs fixés et à utiliser efficacement l'énorme potentiel d'énergie solaire. L'année 2005 a été une année importante qui a été marquée par un véritable changement d'échelle dans le marché du CES en raison du lancement du projet PROSOL.

Figure 18. Evolution du marché du CES en Tunisie (1985-2004)



Source : ANME (2011b, p.9)

Compte tenu des avantages potentiels de l'énergie solaire, la Tunisie a mis en place, depuis le début des années 1980, certains plans et programmes en vue de promouvoir le marché du CES (Figure 18). En effet, entre 1985 et 1994, le gouvernement a décidé que tous les CES installés soient fabriqués localement par le fabricant publique unique appelé SERPET. Le client reçoit un prêt sur une durée de sept ans pour acheter le CES avec possibilité de remboursement par le biais des factures d'électricité. Cette période a été marquée par de nombreux problèmes techniques dans les CES fabriqués localement donc le marché a décliné rapidement.

En 1995, le gouvernement a lancé le projet du FEM. La principale caractéristique de ce projet était l'octroi d'une subvention de 35% du coût du CES financée par le FEM. Durant la période de 1995 à 2001, le marché a progressé rapidement. Ce projet a été interrompu, en 2001, en raison de l'épuisement des fonds destinés à financer les subventions. Depuis 2001, la diffusion du CES a largement diminué d'environ 17 000 m<sup>2</sup> en 2001 à environ 7 500 m<sup>2</sup> en 2004, et ceci est causée principalement par l'absence d'une stratégie alternative (ANME, 2011b). Ainsi, l'expérience tunisienne montre clairement que le développement du marché du CES a besoin d'un appui continu du gouvernement afin d'atteindre des résultats durables et significatifs.

Le projet PROSOL a été développé, en 2005, en vue de revitaliser le marché du CES tunisien marqué par une baisse continue, depuis la fin du projet FEM en 2001. Le projet PROSOL a été lancé par le ministre tunisien de l'industrie, de l'énergie et des petites et moyennes entreprises et de l'ANME, avec le soutien du PNUE, le centre méditerranéen des

énergies renouvelables (*Mediterranean Renewable Energy Center* : MEDREC) et le ministère italien de l'environnement et du territoire.

Le projet PROSOL a des objectifs quantitatifs et qualitatifs. Quantitativement, il vise l'installation de 222 000 m<sup>2</sup> de capteurs solaires, au cours de la période 2005-2011, en vue de redresser la tendance à la baisse du marché. Qualitativement, ce programme vise la mise en place de mécanismes de financement durables dans le secteur de CES, de meilleures implications des banques sur ce marché et la mise en place d'une charte de qualité (ANME, 2011b).

### **1.1. Les mécanismes institutionnels**

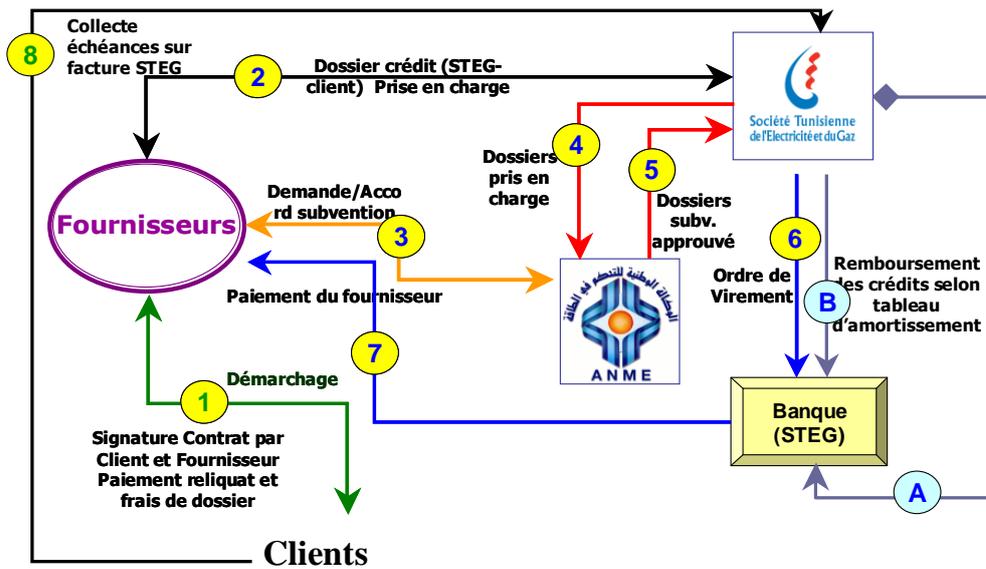
Le projet PROSOL contient les étapes suivantes (Figure 19) :

- La décision d'un client d'acheter un CES à partir d'un fournisseur éligible (c'est-à-dire qui est accrédité par l'ANME).
- Le fournisseur va déposer une demande de prêt à une banque tunisienne participant au projet PROSOL.
- Une fois la banque approuve le prêt, l'installation du CES commence et le client n'a qu'à payer les frais administratifs.
- Après l'installation, le fournisseur reçoit la subvention de l'ANME et aussi un paiement de la banque.
- Le client rembourse le prêt sur une durée de cinq ans grâce aux factures d'électricité de la STEG.

Le PROSOL est constitué d'un cadre institutionnel novateur grâce à l'appui solide de la STEG et l'implication du secteur bancaire. Ces acteurs ont joué avec l'ANME un rôle important dans la mise en œuvre du projet :

- L'ANME est le chef de file du projet et elle est responsable de la mise en œuvre et l'exécution du projet PROSOL grâce à une unité spécifique pour ce programme.
- La STEG permet le recouvrement des prêts via les factures d'électricité. Dans ce cas, la STEG est considérée comme un garant de remboursement des crédits à travers sa facture d'électricité. Par conséquent, les banques allongent les durées de remboursement et réduisent les taux d'intérêt.
- Les banques commerciales fournissent les prêts aux clients, payent les fournisseurs selon un calendrier fixe et récupèrent les crédits par la facture de la STEG.

Figure 19. Les procédures pour obtenir un CES



Source : ANME (2011b, p.11)

## 1.2. Les mécanismes financiers

Les principales caractéristiques du régime de financement dans le projet PROSOL sont :

- Une subvention de 20% du coût du CES, servie par le fonds national pour la maîtrise de l'énergie avec un plafond de 200 DT/m<sup>2</sup>.
- Un crédit auprès des banques commerciales pour financer le coût du CES. Ce crédit est accordé sur une période de cinq années et récupéré à travers la facture d'électricité de la STEG.

Ce mécanisme a l'avantage d'être simple et viable. La partie administrative est entièrement prise en charge par le fournisseur. Le client n'a pas besoin de payer de l'argent et attendre les subventions.

Lancé en Avril 2005, le projet PROSOL a réalisé un succès immédiat. Afin de maintenir ce succès au fil du temps, certains aspects du PROSOL ont été évalués et un nouveau mécanisme appelé « PROSOL II » a commencé, en 2007. Le nouveau mécanisme financier de PROSOL II couvre quatre thèmes essentiels :

- Une subvention de 20% du coût du CES, servi par le fonds national de l'énergie avec un maximum de 100 DT/m<sup>2</sup>.

- Une subvention complémentaire d'environ 80 DT du coût du CES de 300 litres, servi par le ministère italien de l'environnement et du territoire à travers les fonds du MEDREC.
- Le paiement direct par le client de 10% du coût du CES.

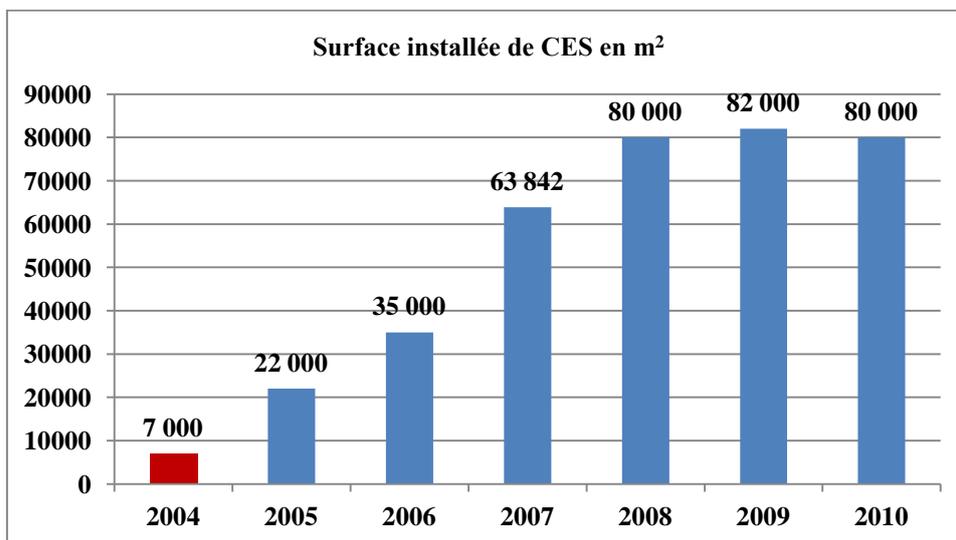
## 2. Résultats : réalisations et impacts du projet PROSOL sur le développement durable

Nous allons analyser, dans ce qui suit, les réalisations dans le marché du CES, depuis 2005, ainsi que les impacts de ces réalisations sur les trois dimensions du développement durable.

### 2.1. Les réalisations

Grâce au projet PROSOL, la surface installée de CES (Figure 20) a augmenté de 7000 m<sup>2</sup> en 2004 à 22 000 m<sup>2</sup> en 2005. Elle a atteint 80 000 m<sup>2</sup> en 2010. La surface totale installée entre 2005 et 2010 a été de 362 842 m<sup>2</sup>. Ainsi, le taux de croissance annuel moyen de la surface installée, entre 2005 et 2010, est d'environ 30% ce qui est très satisfaisant. En ce qui concerne le nombre de CES installés, il a passé de 7300 unités en 2005 à 31 500 en 2010 (ANME, 2012b).

Figure 20. Evolution des réalisations dans le marché du CES



Source : Auteur <sup>31</sup>

<sup>31</sup> Données collectées à partir du rapport ANME (2012b, p.29)

## 2.2. L'évaluation des impacts environnementaux et socio-économiques

En raison de l'indisponibilité de toutes les données nécessaires, nous allons mentionner brièvement les impacts énergétiques et environnementaux et nous allons mettre l'accent sur les impacts socio-économiques, notamment la création d'emplois.

### 2.2.1. Les impacts énergétiques et environnementaux

Selon Baccouche (2014), les économies d'énergie annuelles qui ont résulté de l'utilisation des CES à la place des chauffe-eaux GPL étaient seulement de 9 Ktep en 2004 (avant le commencement du projet PROSOL). En 2010, les économies d'énergie annuelles ont atteint 34 Ktep et elles seront de 70 Ktep en 2016. En ce qui concerne les émissions de CO<sub>2</sub> évitées grâce au marché du CES, elles seront de 185 Kilotonnes de CO<sub>2</sub> (KTCO<sub>2</sub>) en 2016 (Tableau 7).

Tableau 7. Evaluation des économies d'énergies et des émissions évitées de CO<sub>2</sub>

Année	2004	2010	2016
Economies d'énergies (Ktep/an)	9	34	70
Emissions Evitées (KTCO <sub>2</sub> /an)	24	90	185

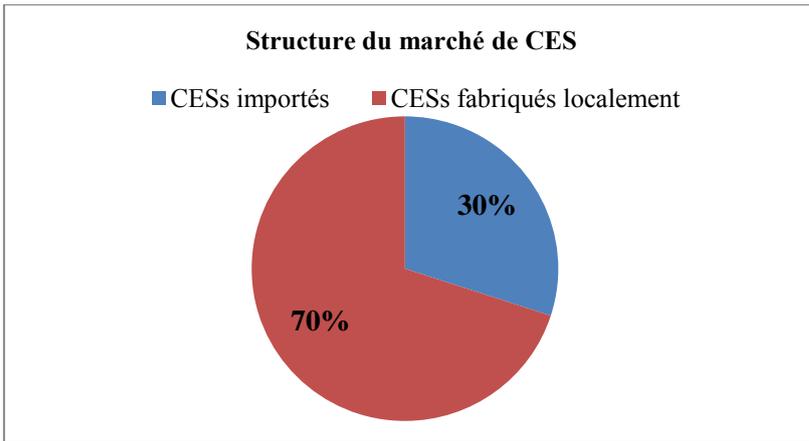
Source : Extrait de Baccouche (2014, p.1633)

### 2.2.2. Les impacts économiques

Depuis le début du projet PROSOL, l'évolution du marché et de l'industrie du CES a été très satisfaisante. En fait, nous avons assisté à une forte croissance dans le marché et dans l'industrie locale du CES. Selon Baccouche (2014), grâce au projet PROSOL, l'industrie locale se compose, de nos jours, de 45 fournisseurs éligibles dont huit fabricants locaux, 1100 installateurs agréés et 206 modèles de systèmes de CES, alors qu'avant le début de PROSOL l'industrie locale des CES ne contient qu'un seul fabricant et 200 installateurs.

La croissance du marché des CES est accompagnée, principalement, par le développement d'une industrie locale (Figure 21). En fait, il existe huit usines qui produisent 70% de tous les CES installés (Baccouche, 2014). Ainsi, seulement 30% de tous les CES installés sont importés (principalement d'Allemagne, de la Grèce, de la Turquie et de la Chine).

Figure 21. Structure du marché de CES

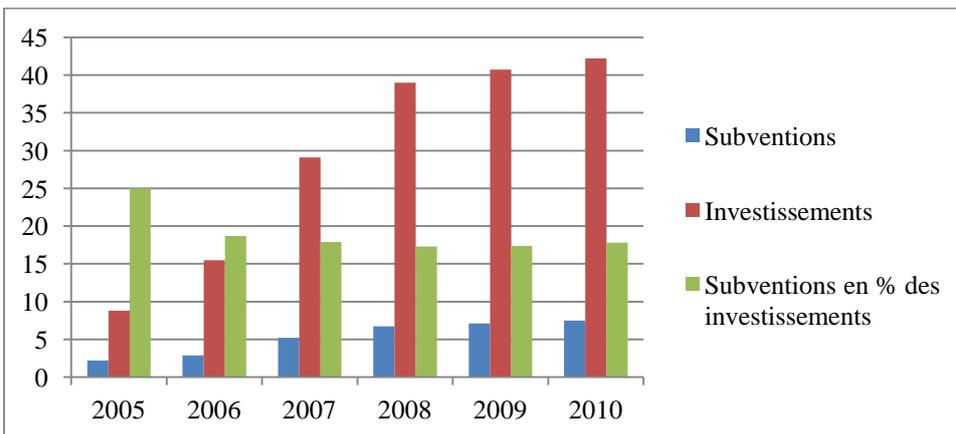


Source : Auteur <sup>32</sup>

Le développement d'une industrie locale des CES n'est pas le seul avantage du projet PROSOL. En fait, le secteur bancaire a également bénéficié de la création d'un grand marché du crédit de haute qualité (le remboursement est certain à travers la facture d'électricité).

Le développement de l'industrie solaire thermique a nécessité un investissement de 175,3 MDT entre 2005 et 2010. Dans la même période, le montant des subventions octroyées est d'environ 31,65 MDT (ANME, 2011b).

Figure 22. Investissements et subventions en MDT pour le projet PROSOL



Source : ANME (2011b, p.22)

Selon ANME (2011b), le montant des subventions a passé de 2,2 MDT, en 2005, à 7,5 MDT, en 2010, alors que le montant des investissements a passé de 8,8 MDT, en 2005, à 42,2 MDT, en 2010. La figure 22 montre une forte augmentation des subventions de

<sup>32</sup> Données collectées à partir de Baccouche (2014)

l'ordre de 27% par an, mais avec une petite réduction de leur part dans les investissements au cours des 5 dernières années. Il est nécessaire de noter que les subventions accordées par le gouvernement ne donnent pas lieu à une dépense publique supplémentaire car elles sont largement compensées par les subventions évitées qui ont été consacrées aux chauffe-eaux GPL.

PROSOL a aussi des effets positifs sur la valeur des exportations dans ce secteur. En effet, la valeur des exportations a augmenté de 25 334 DT, en 2006, à 495 917 DT, en 2010 (ANME, 2011b). Il y a eu une accélération significative des exportations, surtout à partir de 2008. Les CES sont exportés principalement aux pays de l'Afrique du Nord : le Maroc, la Libye et l'Algérie.

### 2.2.3. Les impacts sociaux

Grace au projet PROSOL, le marché de CES s'est complètement rétabli et il a atteint des niveaux records. Cette reprise encourage la création de nouveaux opérateurs industriels et le développement de réseaux d'installateurs. Le secteur de l'énergie solaire a créé une dynamique importante dans le marché du travail, au cours de la dernière décennie. En fait, le projet PROSOL a contribué à la création de nouveaux emplois : 45 fournisseurs et environ 1100 entreprises spécialisées dans l'installation des CES sont impliqués dans ce projet. Le nombre d'emplois créés est d'environ 3000 emplois (Baccouche, 2014).

En effet, le projet PROSOL a créé de nombreux nouveaux emplois pour la conception de projet, l'installation, la maintenance et les fonctions commerciales. Les emplois créés sont, essentiellement, des emplois locaux qui peuvent générer des revenus importants et améliorer les conditions de vie de nombreuses familles. En fait, la répartition géographique des entreprises spécialisées dans l'installation, en 2010, est tout à fait satisfaisante vu qu'il n'y a pas de concentration de la plupart des installateurs dans le nord du pays.

Tableau 8. La répartition régionale des installateurs

Région	Nombre d'installateurs
Grand Tunis	285
Nord Est	149
Nord Ouest	88
Centre Est (inclu Sfax)	362
Centre Ouest	77
Sud Est	96
Sud Ouest	43
<b>Total</b>	<b>1100</b>

Source : ANME (2011b, p.46)

Parmi les impacts sociaux positifs que nous pouvons aussi mentionner, il y a l'amélioration de la qualité du service de l'eau chaude et son accessibilité à toutes les couches sociales. En fait, avec les conditions de paiement avantageuses du projet PROSOL, même la classe pauvre peut accéder à ce service qui est relativement coûteux autour de 1400 DT. Selon une étude portant sur la satisfaction des utilisateurs de CES, menée par un bureau spécialisé, 87% des clients sont satisfaits de ce service.

#### **2.2.4. Les limites du programme PROSOL**

Bien que le projet PROSOL ait réalisé un grand succès, il contient plusieurs lacunes et inconvénients qui doivent être éliminés dans les années à venir. Les limites sont les suivantes :

- Tout d'abord, les objectifs sont fixés d'une manière générale sans tenir compte de la spécificité de chaque région en Tunisie. Il serait préférable de développer des sous-stratégies et des objectifs pour chaque région.
- Ensuite, il convient de noter qu'il y a certaines lacunes et déficiences dans les mécanismes financiers mis en œuvre par le gouvernement pour soutenir le projet PROSOL :
  - Le niveau relativement faible des subventions qui ne dépasse pas 20% du coût de l'investissement et qui est très faible, surtout en comparaison avec d'autres pays méditerranéens où le soutien du gouvernement à l'énergie solaire est plus important.
  - Le service d'installation n'est pas exonéré de la taxe sur la valeur ajoutée.
  - Paiement des droits de douane sur les composants importés pour la fabrication locale des CES.
  - L'absence de taux d'intérêt bonifié de la part des banques comme c'est le cas dans plusieurs pays de l'Europe du Sud.
  - Le manque de soutien spécifique financier et fiscal à l'industrie locale de fabrication des CES.
  - L'absence de politiques visant à contrôler les prix des CES.
- Enfin, des lacunes sont également notées aux niveaux institutionnel et organisationnel, y compris :
  - L'insuffisance des moyens logistiques et humains pour fournir le contrôle et l'entretien efficaces d'équipements installés.

- L'absence de communication avec les clients concernant les étapes à suivre en cas de problèmes.
- Le manque de procédures claires pour la suspension de la subvention en cas de non-conformité de la part des fournisseurs.
- Les efforts déployés par l'ANME dans le domaine de la communication et la sensibilisation sont insuffisantes.
- La nécessité d'une plus grande coordination entre les structures régionales de l'ANME.

## **Conclusion**

La volatilité des prix des énergies fossiles, l'augmentation de la consommation nationale d'énergie et la stagnation de la production locale ont causé de nombreuses répercussions économiques négatives. En fait, nous avons assisté à une sortie massive des devises et une augmentation des dépenses publiques (vu que les énergies fossiles sont subventionnées par l'État).

La seule face lumineuse dans le contexte énergétique tunisien est le fait que la Tunisie est dotée de conditions climatiques très favorables pour le développement à grande échelle des ER, notamment l'énergie solaire (le solaire PV et le solaire CSP). En effet, l'énergie solaire est considérée comme une source prometteuse pour l'amélioration du bilan énergétique et la protection de l'environnement et surtout pour la transformation de la réalité énergétique de la Tunisie d'un importateur net à un exportateur net, dans les années à venir.

La première section nous a permis d'analyser en profondeur le contexte énergétique tunisien en mettant l'accent sur un contexte difficile et plein de défis. En effet, la Tunisie est trop dépendante des exportations des énergies fossiles qui constituent la plus grande part du mix énergétique. Le fait que les énergies fossiles sont fortement subventionnées (14% du budget de l'État, soit 5% du PIB sont alloués à la subvention énergétique, en 2013) constitue aussi une vraie contrainte budgétaire pour l'État. Ce fardeau n'arrête pas de s'aggraver à cause de différents facteurs exogènes, notamment le prix du baril du pétrole et la redevance gazière.

Face à tous ces défis, la Tunisie s'est engagée dans une politique de développement des ER depuis les années 1980. Nous avons essayé de détailler le contexte ainsi que les principaux enjeux rencontrés dans ce secteur. En effet, les réalisations s'avèrent

insignifiantes par rapport au potentiel énorme, notamment pour l'éolien et le solaire (la part des ER dans le mix électrique ne dépasse pas 3% en 2013) et aussi par rapport aux objectifs fixés (la part des ER dans le mix électrique doit être de 30% en 2030).

Pour ces raisons, la Tunisie a fixé un PST qui présente une composante majeure du processus de transition vers les ER. De même, la Tunisie a renforcé ses stratégies de partenariat et de coopération surtout de type Nord-Sud, a instauré un débat national sur l'énergie en 2013 et surtout on a assisté, en 2015, à la ratification d'une nouvelle loi relative à la production de l'électricité à partir des ER.

Après avoir détaillé les principaux défis rencontrés dans le contexte énergétique ainsi que les opportunités présentées par le secteur des ER, nous avons mis l'accent, dans la seconde section, sur le projet PROSL de développement du CES. Ce projet a été un changement d'échelle dans le marché du solaire thermique depuis 2005. En effet, la surface installée de CES a augmenté de 7000 m<sup>2</sup>, en 2004, à 22 000 m<sup>2</sup> en 2005. Elle a atteint 80 000 m<sup>2</sup> en 2010. Ce projet a contribué à la réduction des émissions de GES, à la création de nouveaux emplois (environ 3000 emplois), au développement d'une industrie locale et aussi à l'augmentation de la valeur des exportations dans ce secteur. Vu le succès du PROSOL résidentiel, il a été élargi pour les secteurs tertiaire et l'industrie avec l'ajout de nouveaux mécanismes institutionnels et financiers. Mais, il est à noter que les efforts fournis sont insuffisants et que le développement du marché du solaire thermique se heurte encore à plusieurs obstacles.

Bien que le projet PROSOL soit une initiative réussie, l'expérience tunisienne dans le domaine de l'énergie solaire est loin des expériences réussies d'autres pays comme l'Allemagne, l'Espagne, le Danemark et le Maroc. La Tunisie a toutes les conditions nécessaires : un grand potentiel des ER, une main d'œuvre très qualifiée, etc. Mais, le soutien du gouvernement, les instruments institutionnels et réglementaires et le climat d'affaires restent encore insuffisants et inadéquats pour le développement à grande échelle de l'énergie solaire centralisée telle que la technologie CSP qui va être le sujet du chapitre suivant.

## **Chapitre 6. Le cas du projet de solaire thermodynamique à concentration « TuNur » en Tunisie**

### **Introduction**

La technologie CSP est une technologie prouvée et qui est utilisée, depuis plusieurs décennies. Les premières centrales CSP commerciales ont commencé à fonctionner, en Californie, durant la période 1984-1991. A cette époque, le déploiement de cette technologie a été stimulé par des incitations fiscales et des contrats d'achat de l'énergie à long terme. Une baisse des prix des combustibles fossiles a ensuite conduit plusieurs pays à réduire le support financier accordé ce qui a bloqué le déploiement à grande échelle de cette technologie.

A partir de 2006, la technologie CSP a réapparu de nouveau comme une alternative efficace pour les combustibles fossiles. Cette réapparition a été surtout claire en Espagne et aux États-Unis. Elle vient comme une réponse logique à des mesures gouvernementales telles que les tarifs d'achat garantis, en Espagne, et les grandes orientations stratégiques de plusieurs pays qui visent l'augmentation de la part de l'électricité produite à partir des ER.

Dans ce chapitre, nous allons détailler, dans une première section, tous les aspects de la technologie CSP qui est encore peu connue. Nous allons essayer, tout d'abord, d'expliquer d'une manière simplifiée son principe de fonctionnement et les principaux types de technologies CSP existantes. Ensuite, nous allons mettre l'accent sur les opportunités et les avantages énormes de déploiement de cette technologie dans la zone MENA. En effet, en plus du potentiel énorme dans les déserts de la zone MENA, il existe différents programmes pour encourager l'utilisation de la technologie CSP. On peut citer, par exemple, le programme conçu par le Fonds des Technologies Propres (FTP), le PSM, l'initiative DSERTEC, etc.

Dans la seconde section, nous allons analyser en détails un projet de centrale CSP qui va avoir lieu dans le sud de la Tunisie, il s'agit du projet « TuNur ». En effet, comme nous avons précisé dans le chapitre précédent, il n'y a aucune centrale CSP en fonctionnement en Tunisie. En revanche, des pays comme le Maroc et les Émirats arabes unis ont réalisé d'énormes succès. Il sera donc nécessaire d'étudier un projet CSP qui est envisagé en Tunisie, depuis 2009, mais qui n'a pas encore vu le jour.

## **Section 1. La technologie du solaire thermodynamique à concentration**

L'énergie produite dans les centrales CSP est l'une des ER qui a le plus de potentiel ainsi que les meilleures caractéristiques pour la production de l'électricité à grande échelle. Cette technologie peut aussi venir en appui à d'autres technologies d'ER qui ont l'inconvénient d'être intermittentes.

### **1. Le principe de fonctionnement d'une centrale CSP**

Les centrales solaires de type CSP produisent de l'électricité en utilisant la chaleur. De manière semblable à une loupe, des miroirs concentrent le rayonnement solaire sur un récipient rempli de fluide. La chaleur absorbée par le fluide sert à produire de la vapeur qui actionne une turbine pour produire de l'électricité. La production de l'électricité la nuit est possible en stockant la chaleur excédentaire dans des grands réservoirs isolés, remplis de sel fondu.

La production de l'électricité d'origine solaire par voie thermodynamique suit un processus bien déterminé indépendamment de la technologie utilisée pour la captation du rayonnement solaire (les héliostats, les réflecteurs linéaires de Fresnel, les disques paraboliques ou les réflecteurs cylindro-paraboliques) ou pour la conversion de chaleur en électricité. Ce processus peut être divisé en trois principaux blocs fonctionnels (Figure 23) et qui interagissent entre eux grâce aux fluides thermodynamiques.

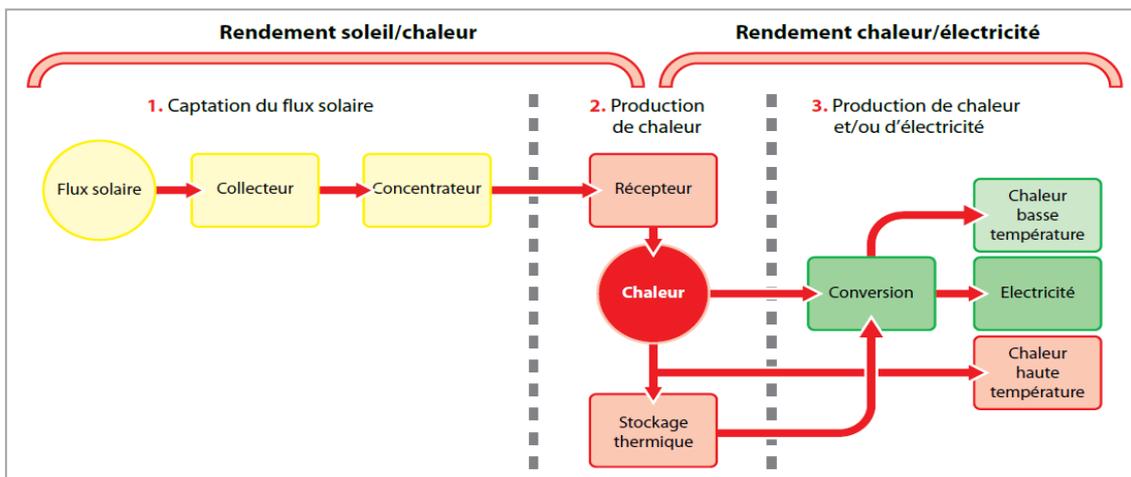
- (1) La collecte du flux solaire via des réflecteurs (des miroirs) et sa concentration sur un récepteur afin de chauffer le fluide de transfert (fluide caloporteur). Cette étape nécessite un rayonnement direct, c'est-à-dire des rayons qui traversent un ciel clair et sec. Cette condition ne peut être satisfaite que dans les régions désertiques.
- (2) La production de la chaleur à haute température (sous la forme de vapeur d'eau ou d'un autre fluide). Il s'agit de convertir le rayonnement solaire en chaleur en utilisant un fluide de transfert (caloporteur). Ce bloc fonctionnel nécessite aussi un système de stockage de la chaleur et un fluide de travail (thermodynamique). Parmi les fluides les plus utilisés de nos jours on peut citer :
  - Les sels fondus (mélange binaire ou ternaire de nitrate de sodum/potassium) : ils sont utilisés pour le stockage intermédiaire de la chaleur dans les quatre types de centrales

CSP à condition que la température du fluide de transfert soit supérieure à 350°C. Dans les centrales à tour, les sels fondus sont utilisés en tant que fluide de transfert.

- Les huiles thermiques : utilisées comme fluide de transfert dans les centrales à capteurs cylindro-paraboliques.
- L'eau et la vapeur d'eau sont utilisées aussi bien en tant que fluide de transfert que fluide de travail.
- L'air est utilisé comme fluide de transfert

(3) La conversion de chaleur en électricité et la production de chaleur basse température. Cette étape peut être accomplie en faisant le choix entre plusieurs technologies qui sont : cycles à fluides organiques (Rankine) ou cycles à haute température (Stirling, Brayton) avec air préchauffé. Le choix de la technologie la plus convenable dépend de la température de la source chaude à l'entrée du système.

Figure 23. Eléments clés du processus de transformation de la chaleur du soleil en électricité par voie thermodynamique

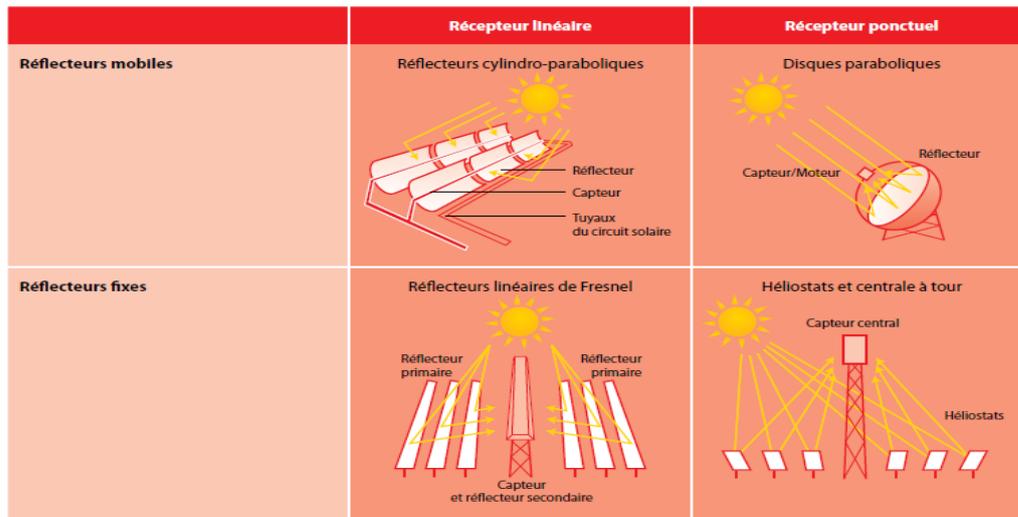


Source : ADEME (2011, p.4)

## 2. Les types de technologies CSP

Selon que les réflecteurs soient fixes ou mobiles et le récepteur soit linéaire ou ponctuel, on distingue quatre principales technologies de collecte et de concentration du flux solaire (Figure 24).

Figure 24. Les quatre principales technologies de production de chaleur et/ou d'électricité d'origine solaire par voie thermodynamique



Source : ADEME (2011, p.5)

## 2.1. Réflecteurs cylindro-paraboliques

Les réflecteurs cylindro-paraboliques (*parabolic troughs*) représentent la plus grande part du marché actuel de la technologie CSP, mais d'autres technologies concurrentes font leur apparition comme les centrales à tour.

Ces centrales ont une capacité de production qui varie entre 50MW et 300MW. L'exploitation commerciale de cette technologie a débuté en 1984. Depuis cette date, cette technologie s'est développée rapidement et, de nos jours, elle est la technologie la plus utilisée sur le marché du CSP. En effet, elle est utilisée dans la plupart des nouvelles centrales installées aussi bien aux États-Unis qu'en Europe (surtout en Espagne) et en zone MENA (Algérie, Maroc, Egypte, les Émirats arabes unis, etc.). La plupart des centrales solaires en fonctionnement de même que celles en construction ou en phase de planification sont de type cylindro-parabolique.

Le principe de fonctionnement de cette technologie est le suivant : des miroirs de forme cylindro-parabolique concentrent les rayons solaires vers un tube absorbeur dans lequel circule un fluide caloporteur (en général, une huile de synthèse qui peut être chauffée à 400°C). Cette technologie permet de produire de l'électricité non seulement durant les heures d'ensoleillement mais aussi après le coucher du soleil (durant 7 h 30 mn après le coucher du soleil). Ceci est dû au stockage de la chaleur dans le sel fondu. Grâce à cet atout majeur, la technologie CSP est facilement intégrée dans le réseau électrique.

Parmi les centrales solaires cylindro-paraboliques qui sont en fonctionnement dans le monde, on peut citer : Andasol 1 (50MW, Espagne), Puertollano (50MW, Espagne), Alvarado (50MW, Espagne), Shams 1(100 MW, les Émirats arabes unis), Nour 1 (160 MW, Maroc). La centrale Shams 1 (Figure 25) de capacité 100 MW représente la plus grande centrale CSP au Moyen-Orient. Sa mise en service était, en 2013, et elle couvre une superficie de 2,5 km<sup>2</sup> qui est équivalente à 285 terrains de football.

Figure 25. Centrale solaire « Shams 1 » à Abu Dhabi



Source : Enerzine<sup>33</sup>

## 2.2. Réflecteurs linéaires de Fresnel

Le principe de fonctionnement de la technologie de réflecteurs linéaires de Fresnel (*Linear Fresnel System*) est relativement simple : des réflecteurs plats et positionnés de façon linéaire concentrent les rayons solaires vers un système absorbeur situé à environ 8 mètres plus haut. Chacun de ces miroirs, appelé réflecteur compact linéaire, pivote en suivant le rayonnement du soleil pour rediriger et concentrer, durant toute la journée, les rayons solaires vers un tube absorbeur.

Le système absorbeur contient un tube dans lequel circule de l'eau. Ainsi, l'eau est chauffée et elle est transformée en vapeur avec une température qui peut atteindre 450°C. Ensuite, cette vapeur sera transformée en énergie électrique grâce à une turbine à vapeur. A

---

<sup>33</sup> Figure disponible sur le site de « Enerzine », accessible sur le lien suivant : <http://www.enerzine.com/1/15456+la-plus-grande-centrale-solaire-a-concentration-au-monde-a-demarre+.html>

la différence des miroirs cylindro-paraboliques, le tube absorbeur est fixe, seuls les miroirs sont mobiles et suivent le rayonnement solaire.

Cette technologie possède l'avantage d'être moins sensible au vent que les autres technologies et elle nécessite aussi moins de terrain et moins d'infrastructures. En plus, les miroirs plats sont plus simples à fabriquer que les miroirs paraboliques et cylindro-paraboliques. Mais, son inconvénient majeur est qu'elle possède des performances optiques inférieures d'environ 30% par rapport aux réflecteurs paraboliques et cylindro-paraboliques.

La centrale Puerto Errado 1 (PE1), en Espagne, est la première centrale à réflecteurs linéaires de Fresnel commerciale en activité. Elle a une capacité de 1,4 MW et elle est fonctionnelle, depuis avril 2009. En août 2012, la centrale Puerto Errado 2 (PE2), en Espagne, a été mise en service pour devenir la plus grande centrale CSP à réflecteurs linéaires de Fresnel, avec une capacité de 30 MW.

Figure 26. Centrale Puerto Errado 2 en Espagne



Source : Novatec Solar<sup>34</sup>

### 2.3. Capteurs paraboliques

La technologie de capteurs paraboliques (*parabolic dish*) est conçue aussi bien pour la production de l'électricité à petite échelle dans les zones isolées que pour celle à grande échelle. Une parabole "*Dish Stirling*" possède une capacité de production qui varie entre 10 KW et 25 KW.

---

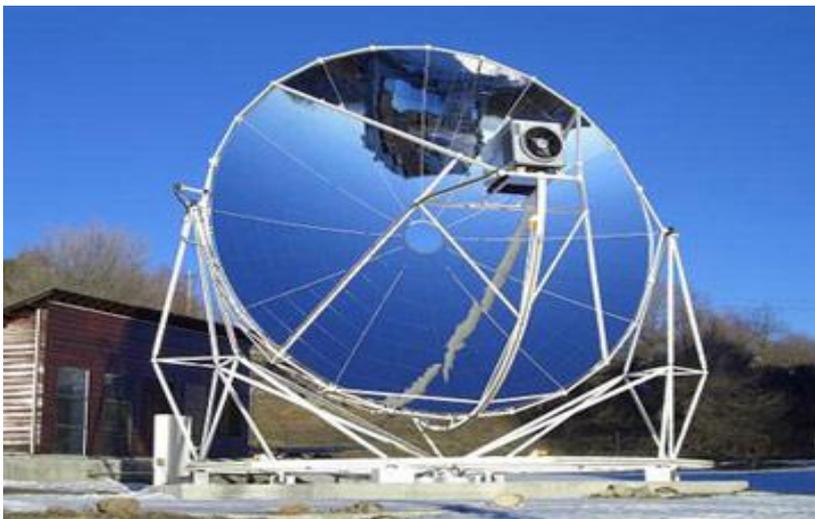
<sup>34</sup> Figure disponible sur le site de « Novatec Solar », accessible sur le lien suivant : <http://www.novatecsolar.com/56-1-PE-2.html>

Le principe de fonctionnement de cette technologie est le suivant : un concentrateur solaire en forme de parabole (la parabole est constituée d'un ensemble de miroirs incurvés) suit le rayonnement solaire et concentre la radiation vers une unité d'absorption de chaleur placée au point focal de la parabole. Cette unité d'absorption de chaleur contient un moteur "stirling" qui utilise un fluide interne.

Les centrales solaires à capteurs paraboliques sont en exploitation, depuis plusieurs décennies. Cette technologie n'utilise pas de l'eau dans le processus de conversion énergétique, donc elle est très convenable pour les régions désertiques où il y a une pénurie d'eau. Parmi les avantages de cette technologie on peut citer aussi : la non exigence de terrain plat, la possibilité de maintenance par unité individuelle sans arrêter le fonctionnement total de la centrale, le faible coût de fabrication par rapport aux autres technologies, etc.

Néanmoins, cette technologie possède l'inconvénient majeur de non stockage de la chaleur donc elle produit une énergie intermittente. En plus, elle nécessite encore des améliorations techniques importantes. En effet, le coût actuel de l'énergie produite par les miroirs paraboliques est presque le double de celle produite par les centrales à réflecteurs cylindro-paraboliques.

Figure 27. Centrale solaire parabolique à Font-Romeu-Odeillo (France)



Source : ecosources<sup>35</sup>

---

<sup>35</sup> Figure disponible sur le site de « ecosources », accessible sur le lien suivant : [http://www.ecosources.info/dossiers/Centrale\\_solaire\\_capteur\\_parabolique](http://www.ecosources.info/dossiers/Centrale_solaire_capteur_parabolique).

## 2.4. Héliostats et centrale à tour

Les centrales à tour (*solar power tower*) ont une capacité qui varie entre 10 MW et 50 MW. L'exploitation commerciale de cette technologie est assez récente. Les centrales solaires PS10 (capacité de 10 MW ; date de mise en service en 2008) et PS20 (capacité de 20 MW ; date de mise en service en 2009), à Séville en Espagne, sont les premières centrales solaires à tour destinées à l'exploitation commerciale en Europe. D'autres centrales à tour sont en fonctionnement, de nos jours, telles que Gemasolar (Espagne, 17 MW).

Le principe de fonctionnement de cette technologie est le suivant : des grands miroirs, appelés héliostats, concentrent le rayonnement solaire vers un récepteur situé en haut d'une tour. Ces miroirs suivent le soleil sur deux axes. La capacité de stockage de ces centrales peut atteindre 15 heures grâce au stockage de la chaleur dans le sel fondu. Il est à noter que le rendement à l'hectare de ces centrales est moins élevé que celui des centrales solaires cylindro-paraboliques. Cependant, cette technologie n'exige pas une surface plane comme la première. Ces centrales exigent un fort ensoleillement et une surface importante, elles sont alors convenables surtout pour les zones désertiques.

Figure 28. Centrale CSP à tour d'Ivanpah en Californie



Source : BrightSource energy<sup>36</sup>

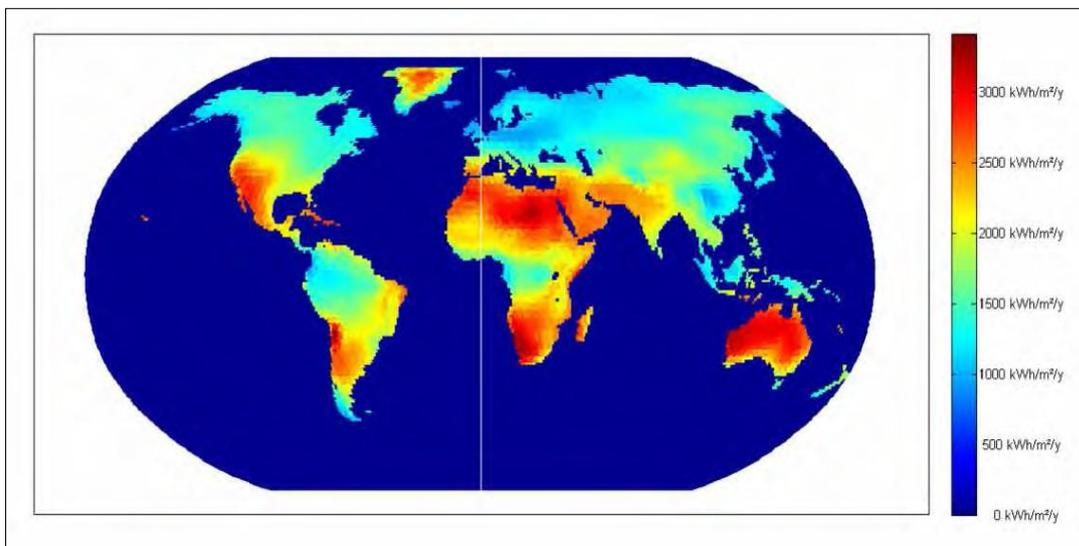
<sup>36</sup> Figure disponible sur le site de « *BrightSource energy* », accessible sur le lien suivant : [http://www.brightsourceenergy.com/stuff/contentmgr/files/0/8a69e55a233e0b7edfe14b9f77f5eb8d/folder/ivanpah\\_fact\\_sheet\\_3\\_26\\_14.pdf](http://www.brightsourceenergy.com/stuff/contentmgr/files/0/8a69e55a233e0b7edfe14b9f77f5eb8d/folder/ivanpah_fact_sheet_3_26_14.pdf)

La plus grande centrale CSP dans le monde utilise la technologie CSP à tour. Elle se situe dans le désert de Mojaves (aux États-Unis) à la frontière entre le Nevada et la Californie et il s'agit de la centrale solaire d'Ivanpah (Figure 28). Elle a été inaugurée en février 2014. Ce complexe solaire a une capacité de 392 MW et il se compose de trois unités avec chacune un tour solaire de 140 mètres de haut. La centrale Ivanpah s'étend sur une surface de 14,2 km<sup>2</sup> elle est composée de 173 500 double-miroirs.

### 3. État des lieux et potentiel mondial de la technologie CSP

Les centrales CSP existent, de nos jours, dans plusieurs pays dans le monde tels que l'Espagne, les États-Unis, les Émirats arabes unis, la Chine, l'Australie, le Maroc, etc. Les régions favorables au développement de cette filière renouvelable sont des régions qui bénéficient d'un ensoleillement direct maximal telles que : l'Afrique du Nord, le Moyen-Orient, l'Asie Centrale, etc.

Figure 29. L'irradiation normale directe en KWh/m<sup>2</sup>/an



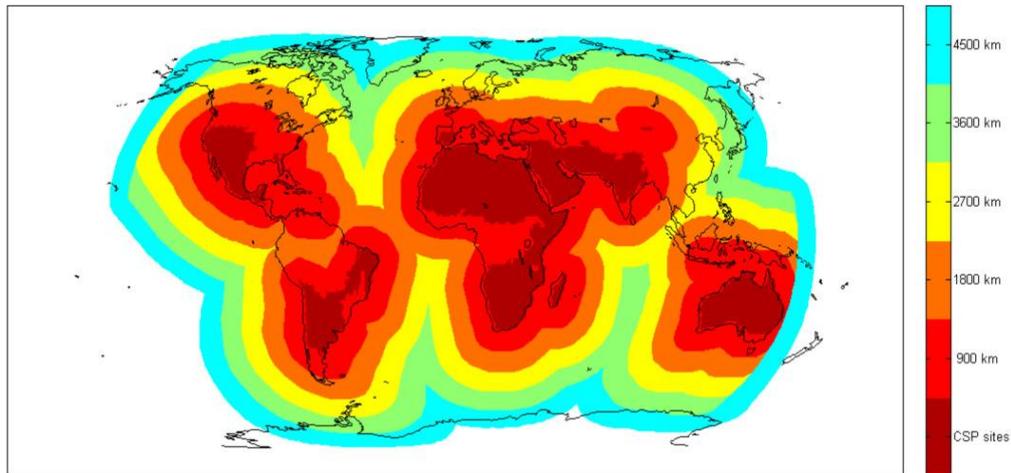
Source : Breyer et Knies (2009, p.2)<sup>37</sup>

La répartition mondiale de l'IND est utilisée pour identifier les sites potentiels favorables aux centrales CSP (Figure 29). La limite solaire exigée pour des sites potentiels est fixée à un rayonnement direct normal d'au moins 2000 KWh/m<sup>2</sup>/an, en raison de contraintes économiques. En effet, les projets d'aujourd'hui sont développés dans les

<sup>37</sup> Basée sur les données de DLR-ISIS (Lohmann *et al.*, 2006)

régions d'au moins 2000 KWh/m<sup>2</sup>/an. Néanmoins, les futures centrales peuvent être construites dans des zones d'au moins 1800 KWh/m<sup>2</sup>/an. Ceci est dû à la baisse des coûts dans l'industrie solaire ce qui va permettre d'améliorer la rentabilité. De nos jours, des centrales CSP peuvent être construites même sur des sites à accès restreint à l'eau en utilisant des tours à refroidissement sec.

Figure 30. Les régions convenables pour la technologie CSP



Source : Breyer et Knies (2009, p.4)

Les plus larges zones dans le monde qui sont convenables pour l'utilisation de la technologie CSP sont situées en Afrique du Nord, Afrique du Sud, Moyen-Orient, Inde, Australie et Amérique du Sud. En Europe, les régions qui conviennent le plus à ce type de technologie sont le Portugal, le sud de l'Espagne et de l'Italie, la Grèce, la Turquie ainsi que certaines régions du sud de la France (Figure 30).

A la différence de la plupart des ressources naturelles, l'énergie solaire sous forme de rayonnement direct normal existe dans tous les continents. En plus, les zones peuplées sont assez proches et peuvent être reliées à ces régions qui ont des excellentes conditions solaires. En effet, l'électricité produite dans les zones les plus ensoleillées de la planète peut être transportée grâce à des lignes de courant continu haute tension (*High Voltage Direct Current* : HVDC) sur plusieurs milliers de kilomètres.

L'Espagne est le leader mondial dans le domaine du CSP avec 2304 MW de capacité installée cumulée, dont 300 MW ont été ajoutés en 2013. Actuellement, les États-Unis se classent deuxième avec 900 MW, à la fin de 2013, et 750 MW ajoutés au début de 2014 (IEA, 2014). Cependant, à cause de la crise économique en Espagne, le manque de

subventions ainsi que les difficultés rencontrées pour trouver des sites convenables pour des centrales de grande taille, l'Espagne sera dépassé bientôt par les États-Unis.

Tableau 9. Progrès réalisé dans la technologie CSP à partir de 2009

	Fin 2009	Fin 2013
Capacité installée globale	600 MW	3,6 GW
Capacité installée annuelle	100 MW	882 MW
Investissement annuel	1,8 milliard de dollars	6,8 milliards de dollars
Nombre de pays avec 50 MW de capacité installée	2	5
Electricité d'origine CSP générée durant l'année en Térawatt-heure (TWh)	0,9 TWh	5,5 TWh

Source : IEA (2014, p.9)

Les plus grands complexes CSP, dans le reste du monde, sont aux Émirats arabes unis, en Inde, au Maroc et en Afrique du Sud. Des centrales solaires plus petites, souvent intégrées dans les grandes centrales à combustibles fossiles, existent aussi en Algérie, en Australie, en Egypte, en Italie et en Iran.

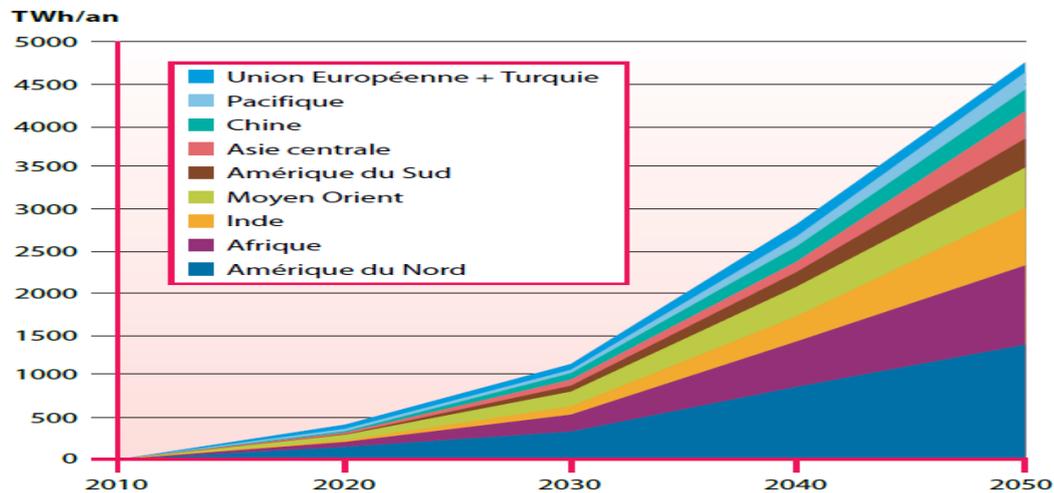
Outre l'Espagne et les États-Unis qui sont des leaders dans la technologie CSP, très peu de pays disposent d'installations de grande taille, c'est-à-dire au dessus de 50 MW. On peut citer l'Inde, les Émirats arabes unis, le Maroc et l'Afrique du Sud qui ont déjà des centrales raccordées au réseau national d'électricité avec une capacité supérieure à 50 MW.

D'autres pays ont annoncé des plans ambitieux de développement de la technologie CSP, dont la Jordanie, le Koweït et l'Arabie saoudite. Par exemple, en 2012, l'Arabie saoudite a annoncé la construction future de centrales CSP générant 32 GW d'ici 2032. La réalisation de ces plans va se traduire par le développement de cette industrie dans la région MENA et la diminution des coûts.

La figure 31 montre les prévisions de l'évolution de la production de l'électricité d'origine solaire thermodynamique dans les régions les plus ensoleillées du globe. On remarque que, jusqu'à 2030, la production de l'électricité augmentera progressivement, mais avec un rythme lent. Ce n'est qu'à partir de 2030 qu'il y aura un vrai décollage de la production de l'électricité d'origine thermodynamique et le rythme de croissance s'accélérera. En 2050, plus des trois quarts de l'énergie électrique d'origine CSP produite dans le monde provient des régions suivantes : Amérique du Nord, Afrique, Inde et Moyen-Orient. Avec ce rythme de croissance de la technologie CSP, il est prévu qu'elle va

fournir de l'électricité de pointe ou demi-pointe, avant 2020, et de l'électricité de base au-delà de 2020 (IEA, 2010b).

Figure 31. La croissance de la production de l'électricité par voie solaire thermodynamique par région du monde en TWh/an



Source : IEA (2010b, p.20)

Selon l'IEA (2010b), la capacité totale installée de la technologie CSP va atteindre 148 GW, en 2020, et va fournir 414 TWh d'électricité par an. Ceci représente 1,3% de l'électricité produite en 2020. Concernant l'horizon 2030, la capacité installée va atteindre 337 GW en fournissant 1140 TWh par an. Ceci va présenter 3,8% de l'électricité totale produite en 2030. En 2050, la capacité totale installée va atteindre 1089 GW en fournissant 4770 TWh par an. Elle va présenter donc 11,3% de la production globale d'électricité (Figure 31).

Les prévisions faites par l'IEA (2010b) ont été actualisées, en 2014, en tenant compte des changements dans le paysage énergétique. Selon l'IEA (2014), la capacité cumulée de 148 GW prévue en 2020 sera achevée entre 7 et 10 ans plus tard. C'est plutôt à partir de 2020, qu'on va assister au déploiement à grande échelle de la technologie CSP avec un taux de croissance élevé.

#### 4. La région MENA : une région pleine de promesses

La région MENA est l'une des régions les plus favorisées pour le déploiement à grande échelle de la technologie CSP. En effet, cette région représente des caractéristiques géographiques exceptionnelles, notamment un ensoleillement intense, des précipitations faibles, surtout dans les zones désertiques, et l'existence de terres plates, inutilisées et qui

ne sont pas loin des réseaux électriques et des routes. Ces facteurs géographiques favorables vont permettre de réaliser un rendement en KW installé de CSP très intéressant et meilleur que d'autres pays. Ceci va permettre de compenser largement les coûts de transport du sud vers le nord de la Méditerranée, en cas d'exportation de l'électricité verte vers l'Europe.

Ainsi, une stratégie ambitieuse de diffusion de la technologie CSP dans la région MENA va permettre à ces pays de tirer des avantages énormes, notamment :

- La création d'un nouveau tissu industriel relatif à la technologie CSP. En effet, les miroirs et les autres composants peuvent être facilement fabriqués localement. De nos jours, le marché des équipements nécessaires pour les centrales CSP est largement dominé par les industriels allemands, espagnols et américains. Les composants nécessaires pour toute centrale CSP sont : les réflecteurs, les récepteurs focalisés sur une ligne ou sur un point, les composants de stockage intermédiaire de chaleur, les capteurs avec leurs transferts thermiques, les composants nécessaires à la conversion de la chaleur en électricité (tels que la turbine, le moteur à combustible externe type *stirling*, etc.) et les fluides caloporteurs. Ainsi, la construction des centrales CSP nécessite aussi bien des technologies traditionnelles que des technologies nouvelles. Les nouvelles technologies à maîtriser sont les suivantes : la conception et la fabrication des réflecteurs, la fabrication des fluides, la conception et la fabrication des machines thermodynamiques, la conception et la fabrication des systèmes de commande des réflecteurs et du cycle thermodynamique.
- La génération de nouveaux emplois dits « verts » qui répondent aux besoins de toutes les phases d'un projet de construction de centrale CSP : la fabrication, l'installation, l'exploitation et la maintenance. Cet avantage est d'une grande importance vu les taux de chômage élevés dont souffrent tous les pays de la région MENA. Selon les prévisions faites par l'*European Solar Thermal Electricity Association* (ESTELA, 2009), l'installation de 20 GW d'électricité solaire thermodynamique à concentration, dans les pays du sud de la Méditerranée, va permettre de générer 235 280 emplois. Ces emplois seront répartis de la manière suivante : 40 000 emplois pour la production en Europe, 40 000 pour la production en Afrique du Nord, 120 000 pour la construction et 35 280 pour la maintenance. Selon l'IEA (2014), une centrale CSP de type cylindro-parabolique d'une capacité de 50 MW nécessite environ 30 employés pour le fonctionnement de la centrale et 10 employés pour la maintenance. Mais, le nombre le

plus important d'employés sera créé lors de la phase de construction et aussi durant la fabrication des composantes.

- La réalisation de la sécurité énergétique surtout pour les pays importateurs d'énergie (notamment la Tunisie et le Maroc).
- L'augmentation des recettes d'exportation en exportant l'électricité verte vers l'Europe.
- L'atténuation de l'impact de l'utilisation des combustibles fossiles sur le changement climatique en utilisant de l'électricité verte au lieu de l'électricité issue du gaz naturel.
- La contribution au développement économique de la région.

#### **4.1. La technologie CSP : au cœur des initiatives internationales**

La technologie CSP est considérée comme étant au cœur de la révolution technologique de demain. Cependant, elle est caractérisée par des coûts en capital élevés et par un niveau de risques élevé. Il est ainsi très important de mettre en œuvre des programmes ambitieux, aussi bien à l'échelle nationale que régionale, pour l'utilisation à grande échelle de cette technologie et donc réduire les coûts. Parmi ces programmes, on peut citer le programme conçu par le FTP, le PSM, l'initiative DSERTEC, etc.

##### **4.1.1. Le programme conçu par le fonds des technologies propres**

Le FTP permet le développement ainsi que le financement des projets qui concernent les technologies à faible intensité de carbone, notamment les ER, et ceci dans les PED. Il s'agit d'un programme d'investissement ambitieux pour la région MENA. Ce programme a pour but d'accélérer l'exploitation du potentiel solaire énorme dans les pays de la rive Sud de la Méditerranée et de faire bénéficier l'Europe d'une électricité verte issue des pays de la région MENA. Ce programme vise aussi le renforcement de la mise en œuvre d'une infrastructure de transport d'électricité aussi bien pour le marché domestique que pour l'exportation. Le financement accordé par le FTP et qui est canalisé par l'intermédiaire de banques multilatérales de développement permet de renforcer la confiance des investisseurs et d'attirer d'autres partenaires.

Ce qui renforce aussi le déploiement à grande échelle de la technologie CSP dans la région MENA c'est le fait qu'elle est au cœur de 2 initiatives importantes qui sont le PSM et DSERTEC.

#### **4.1.2. Le plan solaire méditerranéen**

Le PSM est une initiative phare de l'Union pour la Méditerranée. Ce plan a été lancé lors du Sommet de Paris pour la Méditerranée qui a eu lieu le 13 juillet 2008. Il vise la promotion de l'utilisation des ER et le renforcement des mesures d'efficacité énergétique dans le bassin méditerranéen. Ainsi, le PSM permettra de réduire l'insécurité énergétique dans toute la région ainsi que les émissions de GES.

Les principaux objectifs du PSM sont :

- La mise en œuvre, d'ici 2020, de 20 GW de capacité additionnelle d'électricité verte dans les pays du Sud et de l'Est de la Méditerranée.
- Le développement des lignes d'interconnexion électriques afin de transporter l'électricité d'origine renouvelable des pays de la zone MENA vers l'Europe.
- Le renforcement des mécanismes de l'efficacité énergétique.

Le PSM vise en particulier l'énergie solaire. En effet, la technologie CSP et la technologie de solaire PV présentent un potentiel énorme et sont prometteuses quant à la création de nouveaux emplois et de nouveaux marchés, le transfert technologique et la diminution des coûts.

Afin d'atteindre les objectifs fixés, le PSM devrait traiter le développement des cadres législatifs, réglementaires et institutionnels ainsi que la promotion de la coopération technologique internationale comme étant des actions prioritaires. Parmi les principaux acteurs participants au PSM, on peut citer : les États membres de l'Union pour la Méditerranée, les investisseurs et les développeurs de projets, les fonds publics et privés, les organisations financières bilatérales et multilatérales, etc.

#### **4.1.3. L'initiative DESERTEC**

L'idée de base derrière le concept DESERTEC, selon Dr. Gerhard Knies, est le fait que l'énergie solaire reçue par les déserts, pendant 6 heures, est supérieure à celle consommée par l'humanité pendant une année.

Ce concept s'est développé, entre 2003 et 2007, par un réseau international de politiciens, d'universitaires et d'économistes. Les études de base relatives à DESERTEC ont été menées par le Dr Franz Trieb et ont été financées par le ministère allemand de l'environnement. Ce concept démontre la façon à assurer la protection de l'environnement, la sécurité énergétique et le développement de la production d'énergie verte sur des sites où

les ER sont très abondantes. Tous les types de sources d'ER seront utilisés dans l'initiative DESERTEC, mais l'énergie solaire produite dans les déserts joue un rôle crucial.

En 2007, les résultats des études relatives à DESERTEC ainsi que les propositions d'action concernant la mise en œuvre de ces études dans la région Europe, Moyen-Orient et Afrique du Nord (EU-MENA) ont été résumés dans un "White-book", qui a été présenté au Parlement européen.

La Fondation DESERTEC a été créée le 20 Janvier 2009, il s'agit d'une fondation à but non lucratif qui a pour principal but de promouvoir la mise en œuvre du concept DESERTEC. Les membres fondateurs de la fondation DESERTEC sont l'association allemande du Club de Rome, des scientifiques ainsi que des partisans et des promoteurs privés engagés de longue date à l'idée DESERTEC.

*DESERTEC Industrial Initiative* (Dii) a été créé en 2009. Il s'agit d'un consortium d'industriels qui veille sur la création des conditions économiques et industrielles favorables à la mise en œuvre du concept DESERTEC. Il vise un approvisionnement énergétique durable pour une grande partie du monde en exploitant d'une manière optimale le potentiel solaire énorme des déserts.

Le but principal de cette initiative est de faciliter et renforcer les partenariats dans la région EU-MENA. Elle donne des conseils sur l'intégration de la puissance solaire du désert dans le marché européen, en mettant en évidence les conditions nécessaires de types politiques, réglementaires et technologiques. Ainsi, *DESERTEC Industrial Initiative* n'est pas un investisseur, ni un développeur de projets, mais plutôt il aide à développer et à renforcer le marché des ER dans la zone EU-MENA.

Cependant, il est à noter que 2014 a marqué la fin des ambitions très élevées du *Desertec Consortium* qui a été créé en 2009. En effet, le projet a fait face à une réalité dure surtout avec les incertitudes politiques qui ont frappé la région MENA, suite aux révolutions qui ont viré au cauchemar dans plusieurs pays. En plus, il y a eu l'impact de la crise économique sur les partenaires ainsi que la difficulté à gérer et à faire coopérer plusieurs sociétés et partenaires dans une quinzaine de pays. Ainsi, *Desertec Consortium* a annoncé la fin de ses activités lors d'une conférence qui a eu lieu le 13 octobre 2014 à Rome. Seulement trois actionnaires ont décidé de continuer l'aventure sous une forme plus adaptée et plus réaliste en créant une société de *consulting* qui aura comme vocation le soutien des projets solaires en Afrique et au Moyen-Orient.

## 4.2. Le complexe solaire de Noor-Ouarzazate au Maroc : un exemple à suivre

En plus des pays leaders dans le domaine du CSP qui sont l'Espagne et les États-Unis, on assiste ces dernières années, à de plus en plus de projets CSP qui sont planifiés ou en cours de construction dans le monde, notamment au Chili, en Afrique du Sud, en Inde, en Chine, aux Émirats arabes unis et surtout au Maroc qui devient, récemment, un des pays leaders dans le domaine de la technologie CSP.

En effet, la mise en service de la troisième tranche du complexe solaire Noor-Ouarzazate (figure 32), d'ici 2018, fera du Maroc une superpuissance solaire puisqu'il va abriter l'un des plus grands complexes CSP dans le monde. Ce complexe sera composé de trois centrales, avec une capacité installée qui va atteindre plus de 500 MW à l'horizon 2018, c'est-à-dire de quoi approvisionner en électricité 1,1 million de Marocains. La tranche initiale a une capacité de 160 MW, sa mise en service était en décembre 2015, alors que la deuxième et la troisième tranche d'une capacité de 350 MW seront mises en service entre 2018 et 2020. La technologie utilisée est la technologie cylindro-parabolique avec stockage qui est la technologie la plus utilisée dans le monde.

Figure 32. Le complexe solaire Noor-Ouarzazate au Maroc



Source : Banque Mondiale<sup>38</sup>

Les trois centrales Nour I, II et III seront dotées d'un dispositif de stockage thermique afin d'assurer une insertion plus efficace dans le mix électrique. Contrairement à

---

<sup>38</sup> Figure disponible sur le site de la Banque Mondiale, accessible sur le lien suivant : <http://www.banquemondiale.org/fr/news/feature/2015/11/20/morocco-to-make-history-with-first-of-its-kind-solar-plant>

la centrale Nour I qui utilise le refroidissement humide, les deux autres centrales vont utiliser le refroidissement à sec ce qui va permettre de réaliser des économies considérables dans la consommation d'eau. Grâce à la mise en œuvre de ces centrales CSP, le Maroc va diminuer son déficit énergétique tout en exploitant des sources renouvelables et propres.

Durant la première phase, le complexe a bénéficié d'un grand appui de la part des institutions financières internationales, notamment en matière d'emprunts à faible taux. En effet, ces taux préférentiels octroyés par le FTP et par d'autres institutions financières permettent de réduire le coût du projet par rapport au financement proposé par les banques commerciales. En plus, l'appui international accordé au complexe solaire par la banque mondiale, le FTP et la Banque Africaine de Développement a permis de réduire considérablement le poids de ce projet sur les finances publiques au Maroc. Il est à noter aussi que la construction et l'exploitation du complexe solaire s'effectuent dans le cadre d'un Partenariat Public Privé (PPP).

### **4.3. Les atouts de la technologie CSP**

Les principaux atouts et avantages offerts par l'utilisation de la technologie CSP sont les suivants :

- Le stockage de l'énergie thermique qui permet d'écarter le surplus de production au cours des périodes de la journée à fort ensoleillement et d'utiliser ce surplus pendant la nuit. Cet atout est indispensable pour l'insertion des centrales CSP dans le réseau électrique. Ainsi, cette énergie est non intermittente à la différence des autres ER. Les centrales CSP ont donc la capacité de satisfaire la demande d'électricité jour et nuit ainsi qu'en périodes de pointe. Par conséquent, elles sont une solution efficace et propre pour assurer la stabilité du système électrique, tout en atténuant les effets du changement climatique. A partir de 2006, il y a eu l'émergence des systèmes de stockage thermique dans les centrales CSP. A partir de 2010, la plupart des centrales construites utilisent le stockage thermique qui est un vrai atout de la technologie CSP par rapport à la technologie solaire PV.
- Cette technologie offre aussi la possibilité de cogénération, c'est-à-dire la production simultanée de vapeur ou d'eau dessalée et de l'électricité. Ainsi, les centrales CSP peuvent produire d'importantes quantités de chaleur à haute température pour les procédés industriels et peuvent aussi aider à répondre à la demande croissante de dessalement de l'eau dans les régions arides.

- Les coûts de cette technologie ont diminué rapidement par rapport aux années 1980. Il est prévisible que ces coûts vont diminuer davantage, dans les années à venir, grâce aux effets d'apprentissage, aux économies d'échelles, aux innovations technologiques, à l'augmentation de la capacité de stockage, etc. Ces coûts sont différents selon le type de technologie utilisée. En effet, l'utilisation des réflecteurs cylindro-paraboliques est la moins chère, mais selon les experts, les coûts de la technologie des centrales à tour vont diminuer considérablement, durant les prochaines années, surtout dans les PED. Ceci est dû au fait qu'il est plus facile et plus rentable de fabriquer les composants d'une centrale à tour dans un PED que la fabrication des composants d'une centrale à réflecteurs cylindro-paraboliques. Selon (IEA, 2010b), en considérant un taux d'apprentissage de 10%, les coûts d'investissements dans la technologie CSP vont diminuer d'environ 50% entre 2010 et 2020.
- Les composants utilisés dans les centrales CSP sont classiques, non compliqués et faciles à fabriquer tels que les échangeurs, les fluides, les turbines, les réflecteurs, etc. Pour bien exploiter cette technologie, une stratégie mondiale à long terme est nécessaire. Ceci va permettre de bénéficier du savoir faire, de l'expérience et des ressources de financement des pays du Nord ainsi que du potentiel énorme dans les pays du Sud.
- En plus de son utilisation à grande échelle (utilisation centralisée), la technologie CSP peut être utilisée efficacement dans des marchés niches. En effet, des centrales CSP de taille moyenne peuvent être utilisées dans les installations éloignées comme les mines et les usines de ciment. D'autres installations CSP de petite taille (notamment les réflecteurs paraboliques) peuvent être utilisées pour fournir l'électricité à des maisons qui sont loin du réseau électrique. Les réflecteurs paraboliques peuvent aussi être utilisés pour la cuisson, surtout dans les pays africains où la pollution à l'intérieur des maisons est très élevée à cause de l'utilisation du bois pour la cuisine ce qui se traduit par des problèmes de respirations très graves.
- Le recyclage des installations est faisable et simple après démantèlement de la centrale.

#### **4.4. Enjeux et barrières pour la région MENA**

Les barrières qui peuvent contrarier la production de l'électricité d'origine renouvelable, en général, et d'origine CSP, en particulier, dans les pays de la zone MENA sont les suivantes :

- Un cadre légal et réglementaire non adéquat à la promotion des ER (il existe une volonté de changer mais l'incertitude réglementaire règne encore).
- Le niveau élevé des subventions accordées au secteur de l'énergie fossile.
- Le problème de disponibilité en eau dans les régions désertiques. Il est possible d'utiliser l'énergie produite par la centrale pour le dessalement de l'eau ce qui nécessite un surdimensionnement de la centrale. Sinon, dans les régions arides et semi-arides, on peut utiliser le refroidissement à sec ou bien le refroidissement hybride (sec/ humide).
- L'interconnexion par des lignes HVDC entre les pays de l'Afrique du Nord et l'Europe reste un défi.
- Un faible intérêt manifesté de la part du secteur privé dû à l'absence de stabilité politique et à la lourdeur des investissements initiaux. La participation du secteur privé au financement de ces projets nécessite la mise en place de mécanismes incitatifs qui assurent un retour rapide et intéressant sur les capitaux privés investis.
- Les coûts de production élevés : le coût de KWh de CSP est beaucoup plus élevé que celui d'une centrale à cycle combiné au gaz. Cependant, il existe un potentiel énorme de réduction des coûts, dans les années à venir, sous l'effet des économies d'échelles et d'avancées technologiques. Afin de baisser le coût de l'électricité produite par les centrales CSP, il est nécessaire d'augmenter la taille de la centrale. En fait, ceci va permettre de réduire la contribution relative des coûts de fonctionnement et donc atténuer les prix exorbitants de l'électricité verte. Selon IEA (2014), les coûts d'investissement varient entre 4000 dollars par KW et 9000 dollars par KW et ils dépendent de l'abondance de la ressource solaire, de la technologie utilisée, de la taille du champ solaire et aussi du système de stockage. Cependant, il est prévu que ces coûts vont diminuer progressivement, dans les années à venir, avec un taux d'apprentissage de 10%.

## **Section 2. Le projet du complexe solaire thermodynamique « TuNur »**

Le projet « TuNur » est un projet de grande envergure qui vise l'installation d'un complexe solaire CSP au sud de la Tunisie et le transport de l'électricité produite vers l'Europe. Dans cette section, nous allons analyser en détails tous les aspects et les caractéristiques de ce projet ainsi que ses impacts positifs sur l'économie tunisienne.

## 1. La société « TuNur »

« Nur Energie » est un développeur de centrales solaires multi-technologies et il a été créé, en 2008. Ce développeur s'intéresse surtout à trois technologies qui sont : le solaire PV, le solaire PV concentré et le solaire CSP. Les actionnaires de « Nur Energie » sont « Armonia LLC », « Low carbon Ltd », l'équipe de gestion et quelques investisseurs privés.

« Nur energie » a des projets d'ER en France, en Italie, en Grèce et au Maroc et elle est présente en Tunisie, depuis 2009. La société « TuNur » a été créée, en novembre 2011, afin de développer un projet d'énergie solaire en Tunisie. Il s'agit d'une *joint-venture* entre « Nur Energie » et un groupe d'investisseurs tunisiens et maltais dans le domaine du pétrole et du gaz. Ce groupe d'investisseurs est mené par « Zammit Group » (un groupe de sociétés maltais qui est actif dans divers secteurs tels que les voitures, le transport maritime, le pétrole et le gaz, etc.) et « Glory Clean Energy » (une société à responsabilité limitée franco-tunisienne récemment créée dans le but de promouvoir et développer des projets dans le domaine des technologies vertes).

« TuNur » est un actionnaire dans l'initiative Medgrid<sup>39</sup> et un associé de la Fondation Desertec. La société « TuNur » a pour vocation le développement d'un mégaprojet d'installation de centrales CSP et l'exportation de l'énergie produite vers l'Europe à travers des lignes HVDC : il s'agit du projet « TuNur » qui va être détaillé dans la suite de cette section.

## 2. Présentation du projet « TuNur »

Le projet « TuNur » consiste à produire de l'électricité à partir de l'énergie solaire dans le désert de la Tunisie et de l'exporter aux marchés électriques européens. Ce projet aura lieu dans la région de « Regim Maatoug » au gouvernorat de « Kebili », au sud de la Tunisie. Ce projet consiste à construire un grand complexe solaire qui est constitué de plusieurs centrales CSP qui permettent de produire de l'électricité d'une manière continue grâce à la capacité de stockage de la chaleur. La capacité totale de ces centrales sera de 2250 MW et sa construction prévue s'étalera sur la période 2016-2022.

---

<sup>39</sup> MEDGRID est une société par actions simplifiée qui a été créée en 2011 dans le cadre du PSM. Ses principaux objectifs sont le développement d'un réseau d'interconnexion, à travers des lignes HVDC, entre l'Europe et les pays de l'Afrique du Nord et l'accompagnement des projets d'interconnexions de l'électricité « verte » dans le bassin méditerranéen.

Le projet « TuNur » consiste aussi à installer une ligne électrique terrestre et maritime de 1000 Kilomètres (Km) de longueur pour relier le complexe solaire, du désert tunisien au réseau italien d'électricité. Le démarrage des opérations d'exportation d'électricité vers l'Europe est prévu à partir de 2018. La période d'étude du projet a démarré, en 2009, et le coût global du projet s'élève à environ 10 milliards d'euros, c'est-à-dire environ 22 milliards DT (TuNur, 2015).

Tableau 10. Les caractéristiques du projet « TuNur »

Nom du projet	« TuNur »
Développeur du projet	TuNur ltd
Emplacement	« Regim Maatoug »
Superficie du terrain	10 000 hectares
Puissance	2250 MW
Coût d'investissement	10 milliards d'euros
Technologie	Centrale solaire à tour
Date de mise en œuvre	A partir de 2018
Génération d'électricité prévue par an	9000 GWh/an
Type de refroidissement	Sec
Capacité de stockage thermique	5 heures
Matériaux de stockage thermique	Le sel fondu

Source : Nur Energie<sup>40</sup>

Pour financer ce projet, les développeurs vont recourir à la Banque africaine de développement ainsi qu'au groupe de la Banque mondiale, notamment le FTP et l'Agence Multilatérale de Garantie des Investissements (MIGA) afin d'obtenir des crédits avec des taux préférentiels.

Il était prévu au début, que la construction va commencer, à partir de 2013, et que l'exportation de l'électricité verte vers l'Europe serait à partir de 2015. Le commencement de la construction a été reportée à 2014, mais vu l'absence de cadre légal en Tunisie pour l'exportation de l'électricité à partir des ER, le projet a été reporté plusieurs fois jusqu'au mai 2015 qui est la date de promulgation de la loi sur la production de l'électricité à partir des ER.

---

<sup>40</sup> Données collectées à partir du site de « Nur Energie » : <http://www.nurenergie.com/>

Jusqu'à 2016, les initiateurs de ce projet attendent encore l'accord du gouvernement pour démarrer la phase d'ingénierie (préparation) et la phase de construction qui s'étalera normalement sur une période de 6 ans. Le démarrage des exportations d'électricité aura lieu à partir de 2018, si les initiateurs obtiennent la licence dans les mois à venir.

Une fois le projet réalisé, il aura des répercussions positives sur l'économie tunisienne. En effet, ce projet présente plusieurs avantages :

- Il présente une illustration parfaite du partenariat Sud-Nord.
- Le coût total du projet est de 10 milliards d'euros, une grande partie de ce montant sera injectée dans l'économie tunisienne. La monnaie qui sera injectée dans l'économie tunisienne durant la durée de vie du projet est de l'ordre de 150 millions d'euros par an (TuNur, 2012).
- Il est envisagé que 60% des besoins du projet seront fabriqués en Tunisie, ce qui va permettre de transférer le savoir faire vers la Tunisie. En effet, les 825 000 héliostats nécessaires pour produire 2 GW seront fabriqués en Tunisie (TuNur, 2012). Ceci va permettre la création d'une zone industrielle pour les technologies propres au Sud de la Tunisie et va permettre même à la Tunisie de devenir un exportateur de matériaux solaires.
- La création entre 15 000 et 23 000 emplois directs et indirects durant les différentes phases du projet : l'étude de faisabilité et l'ingénierie, la construction, la fabrication d'équipements et la fourniture de services, l'installation des équipements et l'exploitation des centrales (TuNur, 2013). 1000 emplois directs seront créés durant la phase de construction qui va durer 6 ans, 500 emplois directs durant la phase opérationnelle du projet (à partir de 2018) et 20 000 emplois indirects (TuNur, 2012).
- La réduction du coût de l'énergie solaire, en Tunisie, ce qui va ouvrir la porte à d'autres projets de ce type.

### **3. Les étapes du projet « TuNur »**

Le projet « TuNur » contient trois principales étapes :

- La construction des centrales CSP qui produisent de l'énergie propre dans le désert : cette phase s'étalera sur la période 2016-2022.
- L'installation d'un câble terrestre et un autre sous-marin transportant de l'électricité verte vers l'Europe. Le câble sous-marin qui permet de relier la Tunisie et l'Italie a une

longueur de 600 Km. Les pertes de transmission sont d'à peu près 3 % par 1000 Km avec la technologie de câble HVDC.

- La vente de l'électricité aux clients en Europe : elle est prévue à partir de 2018. « TuNur » fournira de l'électricité d'origine renouvelable, à grande échelle et avec des prix compétitifs, à l'Europe, soit environ 2,5 millions de foyers européens d'Italie, d'Allemagne, de Suisse, de France et d'Angleterre. Cette électricité transportée va répondre à la demande de pointe et sera moins chère que de nombreuses alternatives telles que l'éolien *offshore* et l'énergie nucléaire (Nur Energie).

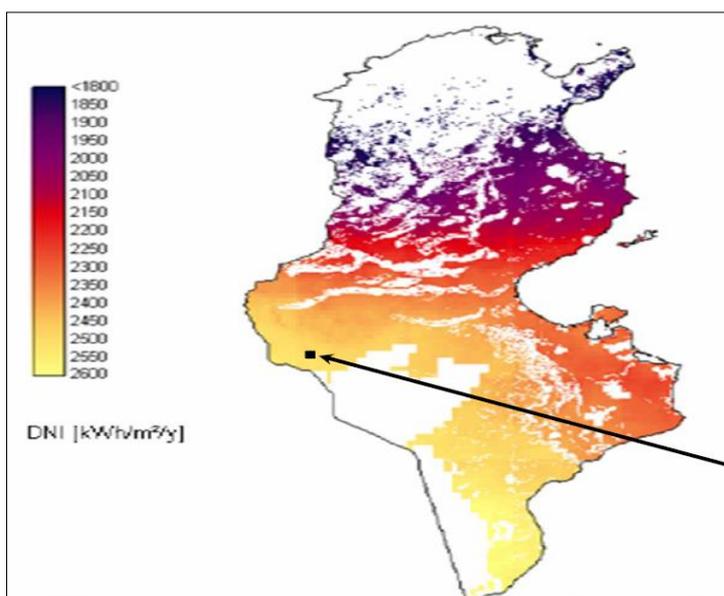
### 3.1. La construction du complexe solaire CSP

#### 3.1.1. Le choix du site

La société « TuNur » a identifié le site convenable pour ce projet depuis 2009, il s'agit d'un site de 10 000 hectares dans la région de « Réjim Maatoug » au gouvernorat de « Kebili » au sud de la Tunisie.

A partir de 2010, « TuNur ltd » a commencé les études requises, notamment celles qui concernent la disponibilité des ressources en eau, les aspects géotechniques et socio-économiques ainsi que l'impact environnemental. Ces études sont toutes achevées. « TuNur ltd » a aussi achevé l'étude et l'analyse de l'irradiation solaire par satellite. La technologie CSP choisie pour ce projet est le CSP à tour avec stockage thermique.

Figure 33. Le site choisi pour le projet « TuNur »



Source : TuNur (2012, p.4)

Le site choisi pour le projet « TuNur » se situe entre « Chott Jrid » et les frontières avec l'Algérie. Cette zone géographique est caractérisée par une IDN élevée qui est de l'ordre de 2400 KWh/m<sup>2</sup>/an. Cette caractéristique est très favorable pour l'implantation des centrales CSP. Le site de « Rejim Maatoug » a été retenu pour les raisons suivantes :

- Un indice d'IDN de l'ordre de 2400 KWh/m<sup>2</sup>/an, ce qui fait que ce site bénéficie d'un ensoleillement très important et présente donc un emplacement idéal pour un tel projet.
- La topographie du site est très convenable pour ce type de technologie. En effet, il s'agit d'un terrain plat et à bas risque sismique.
- L'installation du complexe solaire « TuNur » ne va engendrer aucun déplacement de population ou d'activité économique.
- Le site se situe à l'écart de toute zone naturelle protégée.
- Ce site est situé dans le domaine de l'État.

Figure 34. Station de mesure solaire à « Réjim Maatoug »



Source : TuNur (2013, p.6)

### **3.1.2. Le choix de la technologie**

Le complexe solaire va être constitué de plusieurs centrales solaires d'une capacité qui varie entre 133 MW et 250 MW chacune. Le choix de la technologie CSP à tour avec stockage thermique grâce au sel fondu est fait pour plusieurs raisons. Tout d'abord, les héliostats peuvent être installés en gardant la végétation existante dans le désert. En plus, cette technologie ne nécessite pas un terrain plat. En outre, il n'y a pas d'utilisation de fluides sur le champ solaire ce qui va réduire les risques environnementaux. La technologie CSP à tour possède un potentiel énorme de réduction des coûts dans le futur.

Le choix de la technologie a été effectué en tenant compte aussi des caractéristiques géographiques de la région. Vu la pénurie d'eau dans les zones désertiques, le refroidissement à sec (*dry cooling*) a été choisi au lieu du refroidissement humide. Le choix du refroidissement à sec va réduire la consommation de l'eau de 90% par rapport au choix du refroidissement humide qui est très consommateur d'eau. Dans ce cas, l'air du désert est utilisé pour refroidir l'eau. Le fonctionnement de cette centrale nécessite un apport en combustible fossile afin de conserver le sel fondu à haute température et d'éviter sa solidification qui se fait à 110°C (Nur Energie).

### 3.2. L'installation des câbles et le transport de l'électricité

Ce projet vise aussi l'installation de câbles terrestres et sous marins d'une longueur de 1000 Km. Ce câble va permettre de transporter 2250 MW d'électricité en courant continu haute tension (Figure 35).

Un bureau d'étude italien appelé « CESI » a confirmé la possibilité d'intégration de 2GW au réseau électrique italien. Pour ce faire, « TuNur Ltd » a déjà fait une étude détaillée afin d'identifier les options possibles d'itinéraire du câble. Cette étude a permis la détermination du parcours général du câble terrestre ainsi que celui du câble sous-marin qui va permettre la connexion entre la région de « Réjim Maatoug » et l'Italie.

Figure 35. Le parcours du câble terrestre et sous-marin



Source : Nur Energie<sup>41</sup>

<sup>41</sup> Figure disponible sur le site de « Nur Energie », accessible sur le lien suivant : <http://www.nurenergie.com/tunur/index.php/english/project/transmission>

Une autre étude a été menée par des spécialistes en génie maritime « Metoc » afin de déterminer les chemins possibles du câble sous-marin, tout en précisant les contraintes environnementales et techniques. Afin de déterminer la route sous-marine optimale et sa faisabilité, une autre étude a été faite par “Statnett Engineering” (la compagnie nationale d’électricité norvégienne). La longueur du câble sous marin sera de 600 Km.

### **3.3. La vente de l’électricité**

L’électricité qui sera produite par les centrales « TuNur » est d’environ 9000 GWh par an. Cette électricité va être injectée, tout d’abord, au réseau italien et transportée, ensuite, vers d’autres pays, notamment l’Allemagne, la Suisse, la France et la Grande Bretagne.

Pour bien mener cette étape, une étude de faisabilité technique et légale de la vente de l’électricité sur le marché européen a été faite. « TuNur ltd » a même effectué des discussions concernant les contrats d’achats d’électricité avec les gouvernements et avec les grandes compagnies d’électricité. Les discussions et les études ont atteint des stades avancés, surtout en Grande Bretagne et en Suisse :

- La Grande Bretagne a déjà donné son accord pour l’ouverture de son marché aux importations des ER.
- Selon les études faites, l’électricité verte produite par le projet « TuNur » est capable de concurrencer les prix de l’électricité produite dans les parcs d’éolien *offshore*.
- Des discussions sont menées sur la possibilité de l’application de contrats d’achat à prix minimums garantis par le gouvernement britannique (*Contracts for differences*).
- Un groupe de travail a été formé afin de discuter et d’établir les termes ainsi que les conditions de la mise en œuvre d’un contrat d’achat de l’électricité (*Power Purchase Agreement* : PPA) pour l’achat de 500 MW par des compagnies d’électricité suisses.

## **4. Le cadre réglementaire**

Le projet « TuNur » doit être en mesure de respecter les exigences réglementaires qui concernent les projets d’ER aussi bien dans l’UE qu’en Tunisie :

- La Directive 2009/28/CE du Parlement européen et du Conseil du 23 avril 2009 qui est consacrée au développement des utilisations des ER. Cette Directive fixe des objectifs contraignants pour les États membres (l’atteinte d’une part de 20% de l’énergie

provenant de sources renouvelables dans l'offre énergétique de l'UE d'ici 2020) et autorise aussi l'atteinte de ces objectifs par l'importation des ER à partir d'autres pays non membres de l'UE (Article 9 relatif aux projets communs entre États membres et pays tiers).

- La loi n°2015-12 du 11 mai 2015, relative à la production de l'électricité à partir des ER contient plusieurs articles qui sont destinés à définir le régime juridique relatif à la mise en œuvre des projets de production de l'électricité à partir des ER en vue de l'exportation, qui est le cas du projet « TuNur ». Les articles sont les suivants :
  - Selon l'Article 5 (Chapitre III), le producteur de l'électricité à partir des ER doit créer une société de projet qui a la forme d'une Société anonyme (SA) ou une Société à responsabilité limitée (SARL) avec comme objet la production de l'électricité à partir des ER.
  - Selon l'Article 6 (Chapitre III), le producteur de l'électricité d'origine renouvelable en vue de l'exportation est autorisé à installer une ligne de transport de l'électricité en respectant les obligations fixées dans la présente loi.
  - Toute la Section 3 (Article 24 jusqu'à Article 28) de la présente loi concerne les dispositions relatives à la production de l'électricité à partir des ER pour l'exportation et elle présente de ce fait le principal apport de cette loi par rapport aux lois antérieures.
  - L'Article 24 stipule que les projets qui concernent la production de l'électricité à partir des ER en vue de l'exportation doivent être réalisés sous la forme de contrats de concession.
  - L'Article 25 fixe les modalités à suivre pour conclure le contrat de concession, en précisant le rôle de la commission technique ainsi que la commission supérieure de production privée de l'électricité. Cet article fixe aussi les parties contractantes du contrat de concession qui sont la société de projet, le ministère de l'industrie, de l'énergie et des mines et le ministère des domaines de l'État et des affaires foncières (dans le cas où le projet sera réalisé sur une partie du domaine de l'État).
  - L'Article 26 énumère les éléments essentiels du contrat de concession tels que le montant de la redevance, la part de l'électricité produite qui doit être donnée à l'État, la durée de la concession, etc.

- L'Article 27 précise qu'en plus de la redevance, une part de l'électricité exportée doit être fournie à l'État. Cette part peut être remplacée par une partie en nature et une partie en numéraire ou bien une contrepartie en numéraire seulement.
- L'Article 28 fixe les modalités de transport de l'électricité destinée à l'exportation. En effet, l'électricité produite peut être transportée à travers le réseau électrique national s'il possède la capacité technique nécessaire, comme elle peut être exportée à travers une ligne directe qui sera réalisée et entretenue à la charge du concessionnaire et elle sera transférée à titre gratuit à l'organisme public dès l'achèvement de sa réalisation.

## **Conclusion**

La Tunisie est dotée de conditions climatiques très favorables pour le développement à grande échelle du solaire PV et du solaire CSP. En effet, l'énergie solaire est considérée comme une source prometteuse pour l'amélioration du bilan énergétique et la protection de l'environnement. L'exploitation de la technologie CSP est capable de changer la réalité énergétique en Tunisie, dans les années à venir, d'un importateur net à un exportateur net. En effet, la technologie CSP est une technologie mature et commercialisée avec succès dans plusieurs pays. Une expérience de longues années a amélioré considérablement l'efficacité des installations ce qui permettra d'avoir des installations futures plus rentables que les précédentes.

L'atout principal de cette technologie est la production de l'électricité non seulement durant les heures d'ensoleillement, mais aussi après le coucher du soleil grâce au stockage de la chaleur dans le sel fondu. Grâce à cet atout majeur, la technologie CSP est facilement intégrée dans le réseau électrique. Selon l'IEA (2010b), en 2050, la capacité totale installée va atteindre 1089 GW en fournissant 4770 TWh par an. Elle va présenter donc 11,3% de la production globale d'électricité. Néanmoins, le développement de cette filière renouvelable va dépendre encore, pendant une ou deux décennies, des aides gouvernementales avant qu'elle devienne compétitive.

Nous avons essayé dans ce chapitre d'expliquer, dans une première section, tous les types, les caractéristiques et les atouts de cette technologie. En effet, nous avons analysé en détails le fonctionnement, les avantages et les inconvénients des quatre types de technologie CSP qui sont les réflecteurs cylindro-paraboliques, les réflecteurs linéaires de Fresnel, les capteurs paraboliques et les héliostats. Ensuite, nous avons mis l'accent sur les

réalisations faites dans ce secteur ainsi que le potentiel mondial énorme, tout en mettant l'accent sur la région MENA qui est très convenable à l'implantation de tels projets. En effet, outre l'Espagne et les États-Unis qui sont des leaders dans le domaine de la technologie CSP, très peu de pays dans la zone MENA disposent d'installations de grande taille, c'est-à-dire au dessus de 50 MW. On peut citer les Émirats arabes unis et le Maroc (avec les centrales solaires cylindro-paraboliques appelées, respectivement, Shams et Noor) qui sont déjà raccordées au réseau national de l'électricité avec une capacité supérieure à 50 MW.

Dans la seconde section, nous avons mis l'accent sur le projet « TuNur » qui va avoir lieu dans la région de « Réjim Maatoug » dans le sud de la Tunisie. Nous avons expliqué en détails toutes les étapes de ce projet, allant de la construction jusqu'à la vente de l'électricité en Europe. Ensuite, nous avons détaillé les avantages attendus de ce projet tels que la création d'emplois locaux, le développement d'une industrie locale, etc. Parmi ces avantages on peut citer : la création d'une zone industrielle pour les technologies propres au sud de la Tunisie, la création entre 15 000 à 23 000 d'emplois directs et indirects durant les différentes phases du projet et la réduction du coût de l'énergie solaire ce qui va ouvrir la porte à d'autres projets de ce type.

Nous avons expliqué aussi le cadre réglementaire qui régit ce projet aussi bien dans l'UE qu'en Tunisie. En effet, en Tunisie, ce projet est régi par la nouvelle loi sur la production de l'électricité à partir des ER promulguée en 2015. En fait, les dispositions relatives à la production de l'électricité à partir des ER pour l'exportation présentent le principal apport de cette loi par rapport aux lois antérieures.

Il est à noter que malgré les initiatives internationales pour promouvoir cette filière ainsi que le potentiel énorme dans la région MENA, seulement deux pays ont réussi à franchir le cap (le Maroc et les Émirats arabes unis). En Tunisie, on n'a encore aucune centrale CSP en fonctionnement et même ce projet ambitieux a été reporté plusieurs fois puisque la construction prévue, en 2013, n'a pas encore commencé. Ceci nous pousse donc à s'intéresser aux barrières et aux risques d'investissement dans cette technologie en Tunisie. Pour ce faire nous allons appliquer, dans le chapitre suivant, une méthode de management du risque sur le projet « TuNur » afin d'extraire les principaux risques et les manières de les réduire.

## Chapitre 7. Gestion des risques du projet « TuNur » par la méthode AGR

### Introduction

Le management des risques est de plus en plus indispensable afin d'atteindre la performance et la sécurité des produits, des projets et des entreprises. Ces dernières années, l'utilisation des méthodes de management du risque dans le domaine de l'environnement est devenue de plus en plus fréquente. Parmi les méthodes les plus répandues, on peut citer la méthode AGR.

L'AGR est une méthode d'analyse des risques *a priori* qui a pour but de faire une analyse préliminaire et générale des risques sans entrer trop dans les détails. Son principal objectif est de mettre en évidence les risques majeurs qui sont susceptibles d'avoir un impact sur le système étudié. Cette étude se fait, généralement, au début du lancement d'un projet ou de la conception d'un système. Cette méthode ne nécessite pas une description très détaillée et minutieuse du système étudié, mais plutôt une description globale.

L'AGR est une variante de l'APR qui a été expliquée, dans le chapitre 4, et elle possède le même processus. De ce fait, la méthode AGR est une réactualisation de la méthode APR, il s'agit du nouveau nom donné par Desroches (2013), suite aux améliorations importantes et aux évolutions faites à l'APR. En effet, selon Desroches (2013), cette méthode a l'avantage de couvrir un périmètre d'analyse des risques plus vaste tout en couvrant tout le cycle de vie du système étudié. L'AGR permet de traiter des risques de types différents (structurels, fonctionnels et conjoncturels) dans un contexte caractérisé aussi bien par la complexité des systèmes que par l'émergence de nouveaux risques.

Dans la première section, nous allons expliquer la nature, les objectifs et le processus de l'AGR pour passer, ensuite, à une description détaillée du système étudié qui est le projet « TuNur ».

Dans la seconde section, nous allons procéder à une application de toutes les étapes de cette méthode au projet « TuNur ». Pour ce faire, nous allons commencer par la cartographie des dangers, la cartographie des situations dangereuses et enfin l'élaboration de l'AGR scénario qui contient tous les scénarios des risques susceptibles d'affecter le projet étudié.

## Section 1. Nature de l'AGR et description du système étudié

Dans cette section, nous allons mettre l'accent sur les concepts basiques à saisir afin d'appliquer la méthode AGR d'une manière correcte et d'éviter l'ambiguïté qui entoure certaines notions. Par la suite, nous allons expliquer, la nature, les objectifs et le processus de la méthode AGR. Enfin, nous allons analyser le système étudié qui est le projet « TuNur », en clarifiant le périmètre étudié ainsi que les différents éléments du système pris en compte dans l'analyse.

### 1. Les concepts de base

Dans cette thèse, nous allons utiliser les notions de base du management des risques et de l'AGR telles que présentées dans les travaux de Desroches, notamment Desroches, Baudrin et Dadoun (2009), Desroches (2013) et Delmotte et Desroches (2014).

- **Un système** est un ensemble d'éléments (naturels, humains, sociaux, techniques, matériels, logiciels, financiers, commerciaux) en interaction, organisé pour remplir une activité donnée et atteindre des objectifs dans des conditions données (délais, financières, environnement, etc.).
- **Le danger** ou **la menace** est un potentiel de préjudice ou de dommage qui porte atteinte aux personnes, aux biens ou à l'environnement. Le danger est considéré comme aléatoire alors que la menace est déterministe.
- **Le risque** est associé à l'occurrence d'un événement indésirable ou redouté, il présente donc une mesure de la situation dangereuse ou accidentelle. Le risque est une grandeur à deux dimensions (p, g), avec « p » est la probabilité d'occurrence du risque et « g » est la gravité des conséquences qui peuvent être causées par le risque. Vu cette nature bidimensionnelle du risque, toute décision qui concerne le risque doit prendre en compte les deux composantes en même temps. En plus de cette nature bidimensionnelle, le risque a deux aspects : un aspect qualitatif et un autre quantitatif. Le premier concerne l'origine du risque, c'est-à-dire l'exposition du système au danger et la survenue d'une situation dangereuse. Le deuxième concerne la mesure de l'événement redouté, en matière de probabilité et de gravité. Une définition plus technique présente le risque comme étant la probabilité de dépassement d'un seuil donné de gravité et s'écrit :  $p = \Pr(G > g)$

Avec :

g : la valeur de la gravité G des conséquences

$p$  : la probabilité qui mesure l'incertitude sur le dépassement de  $G$

- **La situation dangereuse** est l'état d'un système donné en présence de danger ou de menace. Elle présente l'exposition du système au danger ou en d'autres termes l'intersection entre le danger et le système. L'évènement contact qui est un facteur de perturbation cause l'exposition du système au danger.
- **L'accident** est un évènement redouté qui est susceptible de causer un dommage au système par son niveau élevé de dangerosité. Il est à noter que l'évènement redouté est traité à l'instant présent alors que la gravité concerne ses conséquences au futur et la probabilité concerne l'occurrence de ses causes au passé.
- **Le scénario d'accident** ou **scénario d'évènement redouté** est l'enchaînement de plusieurs évènements qui aboutit à des conséquences. L'enchaînement commence par l'exposition du système au danger à cause d'un évènement contact (facteur initiateur). Cette exposition crée une situation dangereuse, qui exposée à un évènement amorce (facteur déclenchant), donne lieu à un évènement redouté, ce qui fait naître un accident qui aura des conséquences (Figure 36).
- **L'évènement contact** appelé aussi facteur initiateur, facteur d'exposition ou de déstabilisation, il s'agit d'un évènement programmé et attendu.
- **L'évènement amorce** appelé aussi facteur déclenchant ou facteur d'initiation de la dangerosité, il s'agit d'un évènement non programmé ou non attendu.
- **La criticité du risque** représente le résultat de la fonction de décision suivante :  $C=f_D(G, V)$

Avec :

$G$  : la gravité des conséquences du risque ;

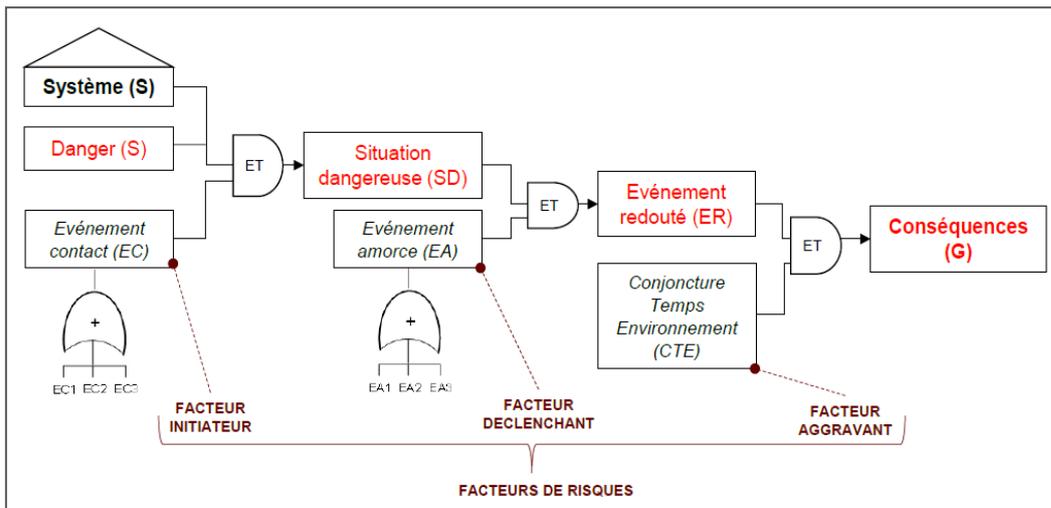
$V$  : la vraisemblance de l'occurrence du risque ;

Domaine de définition de  $f_D$  : ensemble des couples  $(G, V)$  ;

Domaine des valeurs de  $f_D$  :  $\{C1, C2, C3\}$  ;

$f_D$  est associée à une échelle de contraintes de différentes natures : politique, sociale, religieuse, éthique, économique, etc.

Figure 36. Scénario d'événement redouté



Source : Delmotte et Desroches (2014, p.2)

## 2. Description de la méthode AGR

### 2.1. Nature et objectifs de l'AGR

Dans tout ce qui suit, nous allons décrire la méthode AGR selon ce qui a été présenté dans l'ouvrage de Desroches, Baudrin et Dadoun (2009) ainsi que Desroches (2013). L'AGR est une méthode de nature analytique, inductive et semi-quantitative.

L'AGR est **une méthode analytique** car elle contient une analyse détaillée du système étudié et de son environnement. Elle permet de traiter des problèmes complexes en les décomposant en petits éléments simples et compréhensibles.

L'AGR est **une méthode inductive (bottom up)** car elle part du particulier vers le général. En effet, elle traite, tout d'abord, les éléments du système pour arriver, ensuite, aux sous systèmes et au système entier.

L'AGR est **une méthode semi-quantitative**, ceci est dû au fait que le processus de l'AGR contient plusieurs échelles d'index semi-quantitatifs (échelle de gravité, échelle de vraisemblance, échelle des pertes et des efforts). En effet, ces échelles contiennent des relations d'ordre entre les éléments qui les composent.

L'AGR est **une méthode d'analyse a priori**, en effet l'AGR permet d'identifier, dès le début d'une activité ou d'un système, tous les risques potentiels et les moyens de les réduire.

Le logiciel utilisé pour mener à terme cette analyse est la version 1.06 de StatCart AGR. Cette version permet d'avoir la cartographie des risques afin de déterminer les dangers et les éléments du système les plus critiques et ainsi hiérarchiser les actions de maîtrise des risques.

Les entrées nécessaires qui doivent être fournies au début de l'AGR sont : l'analyse fonctionnelle du système, la définition du périmètre du système étudié et son environnement et un retour d'expérience concernant des systèmes similaires. A la fin du processus de l'AGR on aura les éléments suivants : l'identification des scénarios d'accident possibles, la liste préliminaire des actions de réduction des risques, le catalogue préliminaire des paramètres de sécurité et la liste des 5 à 10 risques majeurs.

Les principaux objectifs de la méthode AGR sont les suivants :

- La définition détaillée du système et de ses phases.
- L'identification des éléments suivants : les dangers, les éléments dangereux, les situations dangereuses, les risques associés et les scénarios d'accident potentiels (notamment les causes-contact et les causes amorces).
- L'évaluation des principaux risques pendant la vie opérationnelle du système.
- La détermination des scénarios d'accidents potentiels.
- La détermination des actions de réduction des risques initiaux et les actions de gestion des risques résiduels.

## **2.2. Processus de l'AGR**

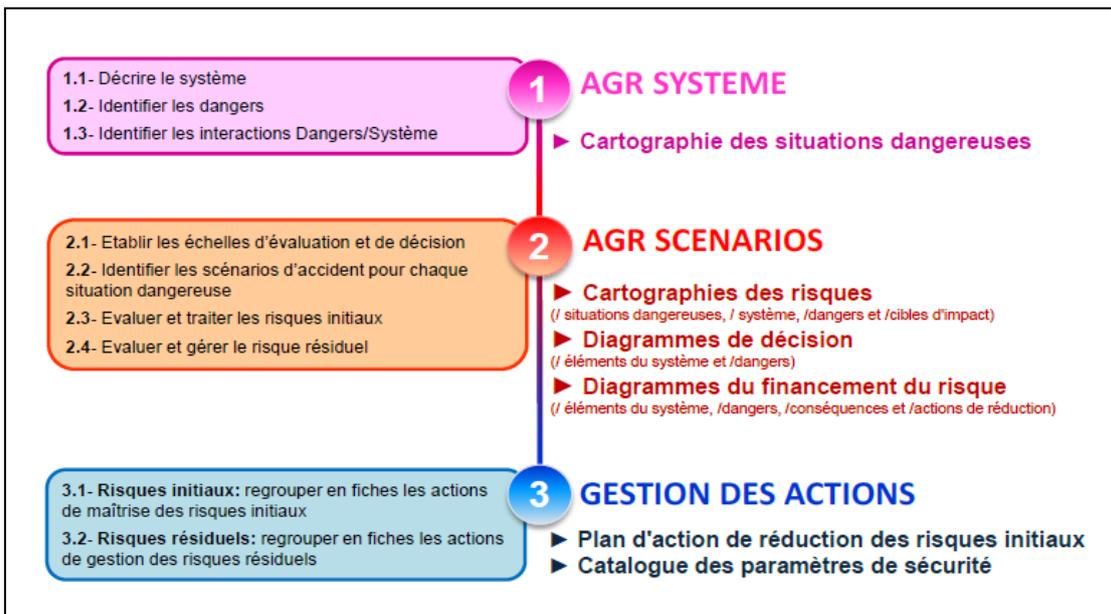
L'AGR permet d'identifier les situations dangereuses et les scénarios d'accidents potentiels et d'en déduire des plans de réduction des risques initiaux et des actions de gestion des risques résiduels. L'AGR contient trois principales étapes :

- L'AGR système qui permet l'identification des situations dangereuses et l'élaboration de la cartographie des situations dangereuses,
- L'AGR scénarios qui permet d'avoir la cartographie des risques après avoir analysé les scénarios relatifs à chaque situation dangereuse,
- La gestion des risques initiaux en élaborant les plans d'actions de réduction des risques initiaux et la gestion des risques résiduels en élaborant les catalogues des paramètres de sécurité.

Pour mener à terme ces 3 étapes, il faut suivre la démarche suivante (Figure 37) :

- La détermination du périmètre du système étudié ;
- La détermination des différentes phases et sous phases du processus étudié ;
- L'identification des dangers et des éléments dangereux liés au système étudié ;
- L'élaboration de la cartographie des situations dangereuses et la cotation des interactions système/danger ;
- La définition des échelles de gravité, de vraisemblance et de criticité ;
- L'élaboration de l'AGR-scénarios qui nous permet d'identifier et d'hierarchiser les scénarios d'accidents ;
- L'élaboration des fiches d'action de réduction des risques et des fiches de paramètres de sécurité ;
- La détermination des risques majeurs.

Figure 37. Processus de l'AGR



Source : Delmotte et Desroches (2014, p.3)

### 2.2.1. L'AGR système

L'AGR système comprend les étapes suivantes :

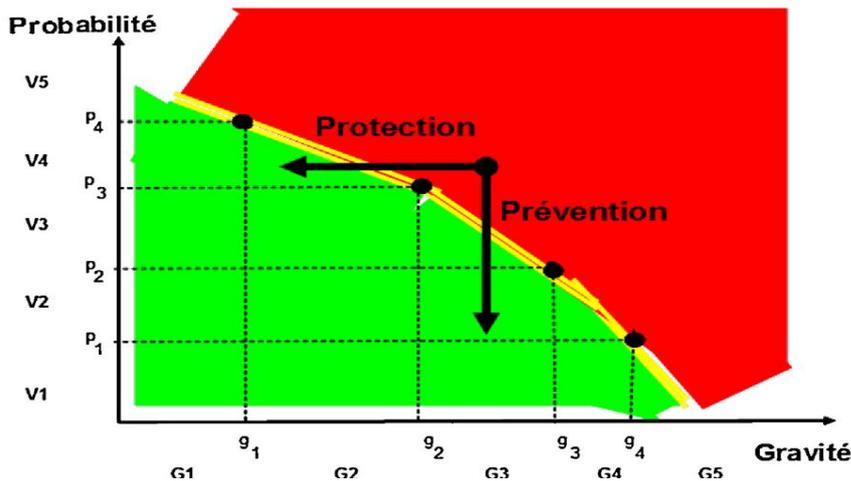
- La définition du périmètre de l'analyse système. Il est à noter que la description du système étudié doit être menée aussi loin que nécessaire afin de pouvoir identifier tous les éléments vulnérables du système.
- La décomposition du système en fonctions, sous systèmes ou en phases et sous phases.

- L'élaboration de la cartographie des dangers qui représente une liste structurée des dangers. La cartographie des dangers contient les dangers génériques qui représentent des domaines dans lesquels les dangers sont susceptibles d'avoir lieu (exemple : politique, environnement, stratégie, etc.). Elle contient aussi les dangers spécifiques qui représentant des sous classes de chaque danger générique (exemple pour le danger générique politique, on trouve les dangers spécifiques politique internationale et politique nationale) et les éléments dangereux.
- La détermination des situations dangereuses qui correspondent à l'interaction entre les dangers et le système. Pour chaque situation dangereuse on doit attribuer un indice de priorité qui permet de prioriser les actions à entreprendre. On va avoir donc la cartographie des situations dangereuses.

### 2.2.2. L'AGR scénarios

L'AGR scénarios permet d'avoir les cartographies des risques en analysant chaque scénario d'accident d'une manière détaillée. Les entrées sont la cartographie des situations dangereuses déjà élaborée dans l'AGR système, les échelles de gravité, de vraisemblance, d'effort et de pertes et le tableau de criticité. Les sorties sont les cartographies des risques initiaux et des risques résiduels sous la forme du diagramme de Farmer et du diagramme de Kiviat et les listes des actions de gestion des risques initiaux et résiduels.

Figure 38. Diagramme d'acceptabilité des risques



Source : Desroches (2013, p.199)

Dans le cadre de cette étape, on procède par la protection ou par la prévention ou même les deux à la fois afin de passer d'un risque inacceptable à un risque acceptable (Figure 38).

- La prévention : consiste à modifier le système étudié ou la façon dont il est exploité afin de diminuer la probabilité d'occurrence de l'événement redouté et transformer le risque inacceptable en risque acceptable.
- La protection : consiste à modifier le système étudié ou la façon dont il est exploité afin de diminuer la gravité des conséquences de l'événement redouté et transformer le risque inacceptable en risque acceptable.

### **2.2.3. La gestion des actions**

La gestion des actions nous permet d'avoir des fiches qui contiennent les plans d'action de réduction des risques initiaux et les catalogues des paramètres de sécurité (pour les risques résiduels). Les actions de maîtrise des risques initiaux sont présentées sous la forme de fiches d'actions qui sont gérées dans un tableau de bord de suivi d'indicateurs. Les actions de gestion des risques résiduels sont présentées sous la forme des fiches du catalogue des paramètres de sécurité qui sont gérées dans un tableau de bord de suivi d'indicateurs.

L'élaboration de ces fiches nécessite le recours à plusieurs données et détails sur la société « TuNur » (son organisation, le personnel, leurs fonctions et leurs responsabilités, etc.) ce qui n'est pas possible pour notre cas. Par conséquent, nous n'allons pas élaborer ces fiches par manque de données.

## **3. La collecte des données**

La méthode AGR nécessite une connaissance approfondie du système étudié qui est le projet « TuNur » ainsi qu'un retour d'expérience de systèmes similaires, c'est-à-dire d'autres centrales CSP (dans des pays similaires comme le Maroc, par exemple).

Dans le cadre de ce travail de recherche, l'application de cette méthode a été faite lors d'un stage de six mois au siège de l'ANME, à Tunis. Ce stage a facilité les rencontres avec plusieurs experts, surtout lors des multiples congrès organisés par l'ANME durant la période de stage. En plus, ce stage a été une occasion pour bénéficier des connaissances et des conseils du directeur des études et de planification à l'ANME et aussi des ingénieurs en ER. Nous avons aussi effectué des interviews ouvertes avec les acteurs du projet, notamment M. Till Stenzel, qui est le président directeur général de « TuNur ». En plus, nous avons fait recours à un examen des données fournies par l'ANME, la STEG et d'une compilation de sources secondaires (ouvrages, articles scientifiques, rapport élaborées par des organisations internationales, articles de presse, etc.).

En se basant sur l'avis des experts dans le domaine, des gestionnaires et des ingénieurs en ER ainsi que le retour d'expérience, nous avons pu effectuer toutes les étapes de l'AGR qui nécessitent une équipe pluridisciplinaire.

## **4. Description du système étudié et analyse fonctionnelle**

Cette étape nécessite une description détaillée du projet « TuNur », en détaillant toutes les phases et les sous phases du projet ainsi que le périmètre étudié.

### **4.1. Le périmètre du système**

Le système étudié est le projet « TuNur » qui aura lieu à « Rjim Maatoug » dans le gouvernorat de « Kebili » au sud de la Tunisie. Ce projet comporte des centrales CSP de 2250 MW de capacité sur un terrain de 100 km<sup>2</sup>. Le projet « TuNur » consiste à :

- Construire des centrales CSP produisant de l'électricité verte à partir du rayonnement solaire au désert,
- Transporter l'énergie propre vers l'Europe grâce à des câbles terrestres et autres sous-marins de type HVDC,
- Vendre l'électricité aux clients en Europe.

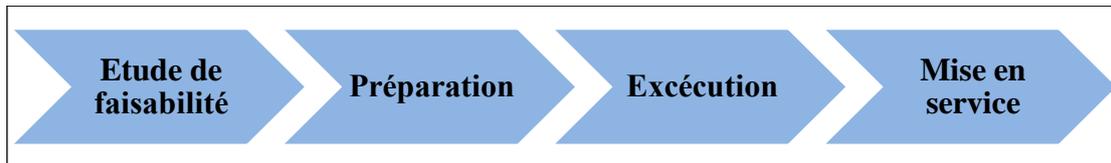
Le système étudié englobe toutes les phases de la réalisation du projet « TuNur ». Il englobe donc les éléments suivants :

- L'élément humain : englobe tous les employés qui interviennent dans toutes les phases, les partenaires du projet qui sont « Nur Energie » qui est le développeur britannique de projets d'ER, la société à responsabilité limitée franco-tunisienne appelée « *Glory Clean Energy* » et « le groupe Zammit », les riverains et la collectivité locale.
- L'élément technique et matériel : cet élément englobe tous les équipements et matériels utilisés dans les centrales, les camions, les miroirs, la tour, la turbine, les réservoirs, les fluides, le sel fondu, etc.
- L'élément logiciel : englobe le système d'information et le réseau informatique.
- L'élément financier : contient, notamment le coût de la construction, la tarification de l'énergie produite, le coût du transport de l'électricité, les investisseurs privés, les banques, les bailleurs de fonds, etc.

## 4.2. Les phases du système

Pour réaliser sa mission, le système étudié englobe les phases suivantes : l'étude de faisabilité, la préparation, l'exécution ou la construction et la mise en service (Figure 39). Dans ce qui suit, nous allons expliquer, en détails, ces quatre étapes.

Figure 39. Les phases d'élaboration du projet « TuNur »



Source : Auteur

### 4.2.1. L'étude de faisabilité

Cette phase comporte l'identification du site, l'estimation de la ressource, l'estimation de la possibilité de raccordement ainsi que les études économique et environnementale (Tableau 11). Cette étape a démarré en 2009.

Tableau 11. Les phases et les sous phases de l'étude de faisabilité

<b>Etude de faisabilité (A)</b>	Identification du site	Déterminer les sites disponibles
		Le choix du site
	Estimation de la ressource	Estimation du rayonnement solaire
		Estimation de la production électrique
	Estimation de la possibilité de raccordement	Estimation de la puissance qui peut être raccordée
		Discussion avec l'opérateur de réseau sur les coûts d'interconnexion
	Etude économique	Estimation du coût du projet
		Estimation de la demande potentielle
		Estimation de la rentabilité du projet
	Etude Environnementale	Etude des caractéristiques géologiques du site

Source : Auteur

Selon Kevin SARA le Président Directeur Général de « Nur Energie », toutes les études de faisabilités économiques, techniques et environnementales ont confirmé la possibilité de réaliser le projet en Tunisie, notamment en ce qui concerne les impacts environnementaux. En effet, le projet ne nécessitera pas des matériaux de construction nuisibles au désert tunisien. En plus, le projet occupera seulement 0,2% du désert tunisien. Cette étape est primordiale et sur laquelle se base la réussite ou l'échec du projet. En effet, une mauvaise estimation du rayonnement solaire et /ou un mauvais choix du site peuvent

entraîner des pertes énormes à long terme. Ainsi, il faut mettre les appareils de mesure de rayonnement sur le site pendant au moins une année pour avoir des données fiables.

#### 4.2.2. La préparation

Tableau 12. Les phases et les sous phases de la préparation

<b>Préparation (B)</b>	Etude technique	Caractérisation fiable des données solaires ponctuelles
		Fixation des caractéristiques techniques des miroirs utilisés
		Déterminer les équipements nécessaires
	Etude environnementale et sociale	Etude des impacts environnementaux
		Etude des impacts sociaux
	Choix des partenaires	Identification des partenaires
		Partage des rôles
		Organisation de la coordination entre les partenaires
		Constituer une équipe de base pour développer le projet
	Elaboration d'un plan de financement	Détermination du coût global du projet
		Identification des aides financières disponibles
		Détermination du montant des subventions possibles
		Détermination du montant des emprunts
		Fixation des modalités de remboursement
	Effectuer les démarches administratives	Les négociations foncières
		Demande de permis de construire
		Le choix de la structure légale de l'unité porteuse de projet
		La signature des contrats
		L'accord sur la tarification
	Déterminer un plan d'action	Organisation des réunions de travail
Fixation de la durée du projet		
Détermination des phases de construction		
Fixation des dates de début et d'achèvement		
Mobiliser les ressources humaines nécessaires	Entretien d'embauche	
Communication	Communication avec la collectivité locale	
	Médiatisation du projet	

Source : Auteur

Cette phase comporte les études technique et sociale, le choix des partenaires, l'élaboration d'un plan de financement, les démarches administratives et la mobilisation des ressources humaines nécessaires (Tableau 12). Cette phase est la plus importante et la

plus longue dans tout projet d'ER. Elle peut durer quelques années, même dans les pays où les projets d'ER sont fréquents tels que l'Allemagne ou l'Espagne.

Dans les PED, plusieurs projets s'arrêtent dans cette phase à cause de la complexité des procédures administratives. Dans ce cas, les développeurs des projets quittent le pays pour un autre dans lequel les procédures administratives sont moins compliquées. Le projet « TuNur » s'est arrêté dans cette phase, depuis l'année 2011, et il n'y a eu aucun avancement. Heureusement en 2015, il y a eu la promulgation de la nouvelle loi sur les ER qui vient donner un cadre réglementaire propice au développement de ce projet, notamment pour ce qui est de la possibilité d'exportation des ER.

### 4.2.3. La construction

Cette phase comporte la préparation des voies d'accès pour les véhicules du chantier, l'aménagement du site, l'alimentation du site en eau, l'acquisition de l'équipement nécessaire, la construction du champ solaire, de la tour et de l'ouvrage de stockage, le raccordement au réseau électrique national et l'implantation des lignes *HVDC* entre la Tunisie et l'Italie (Tableau 13).

Tableau 13. Les phases et les sous phases de l'exécution

<b>Exécution (C)</b>	Installation	Sélection d'un développeur en charge de la construction
		Assurer les voies d'accès pour les véhicules du chantier
		Aménagement du site
		Alimentation du site en eau
		Acquisition de l'équipement nécessaire
		Construction du champ solaire et de la tour
		Construction du générateur
		Construction du dispositif d'évacuation de l'énergie
		Construction de l'ouvrage de stockage
		Installation de l'infrastructure associée
	Raccordement au réseau électrique national	
	Préparation de l'infrastructure nécessaire	
	Implantation des lignes <i>HVDC</i> entre la Tunisie et l'Italie	

Source : Auteur

La construction est prévue, à partir de 2016, après avoir été reportée plusieurs fois et elle sera faite par tranches. Si les phases précédentes sont bien faites, cette phase aura toutes les chances d'être effectuée dans les délais. En effet, la construction n'est pas très

compliquée et ne nécessite pas vraiment des technologies de pointe. Vu le retard qui a eu lieu dans la phase précédente, la construction n'a pas encore commencé.

#### 4.2.4. La mise en service

Cette phase comporte la génération de l'électricité, le raccordement au réseau national, l'exportation de l'électricité vers l'Italie et le remboursement des crédits. Si la licence de construction ne tardera pas encore alors l'exportation de l'électricité vers l'Europe sera prévue en 2020 (Tableau 14).

Tableau 14. Les phases et les sous phases de la mise en service

<b>Mise en service (D)</b>	La génération de l'électricité	Collecte du flux solaire via des miroirs
		Concentration du flux sur un récepteur
		Chauffer le fluide
		Production de la chaleur sous la forme de vapeur d'eau
		Conversion de la chaleur en électricité
		Stockage de la chaleur dans le sel fondu
	Raccordement au réseau national	
	Exportation de l'électricité vers l'Italie	
	Remboursement des crédits	

Source : Auteur

Après avoir bien expliqué le projet « TuNur » et ses étapes, nous allons appliquer dans ce qui suit la méthode AGR afin de faire une analyse des risques qui entravent la mise en œuvre de ce projet.

## Section 2. Le processus de l'AGR appliqué au projet « TuNur »

Le processus de l'AGR contient l'AGR système et l'AGR scénario. La première étape va permettre l'identification de tous les dangers susceptibles d'affecter la réalisation du projet ce qui nous donne la cartographie des dangers (Tableau 15) et aussi l'identification des interactions dangers/système ce qui va nous permettre d'avoir la cartographie des situations dangereuses.

La deuxième étape qui est l'AGR scénario se compose de la description détaillée des scénarios d'accident, le traitement des risques initiaux et la gestion des risques résiduels afin d'avoir les cartographies des risques sous la forme du diagramme de Kiviat et du diagramme de Farmer.

## **1. L'AGR système**

### **1.1. La liste structurée des dangers génériques et spécifiques du système : la cartographie des dangers**

Nous avons essayé dans cette thèse de traiter de la manière la plus exhaustive possible les dangers génériques ainsi que les dangers spécifiques et les éléments dangereux qui sont liés au projet « TuNur ». L'analyse de l'environnement du système étudié nous a permis d'identifier et de comprendre les dangers redoutés.

Les dangers se répertorient en trois grandes classes : les dangers génériques, les dangers spécifiques et les événements ou les éléments dangereux. Les dangers sont classés en 4 principales catégories : externes à l'entreprise, gouvernance de l'entreprise, moyens techniques de l'entreprise, études et production de l'entreprise. Nous allons expliquer en détails, les 14 classes de dangers qui sont présentées dans la cartographie des dangers (Tableau 15). Les dangers traités sont les suivants :

- Les dangers externes à l'entreprise : contiennent les dangers de type politique, environnement, insécurité et image.
- Les dangers liés à la gouvernance de l'entreprise : contiennent les dangers de type management, stratégique, technologique, communication et crises, juridique et financier.
- Les dangers liés aux moyens techniques de l'entreprise : contiennent les dangers de type matériels et équipements, infrastructures et locaux et système d'information.
- Les dangers liés aux études et production de l'entreprise : ce sont les dangers de type physico-chimique.

#### **1.1.1. Le danger politique**

Le danger politique est le danger qui préoccupe le plus les investisseurs, depuis la révolution. En fait le cadre politique tunisien se caractérise par l'instabilité, les changements récurrents dans le gouvernement et surtout l'absence des garanties par le gouvernement pour soutenir les projets d'ER, à long terme. Ainsi, le contexte politique tunisien a tout ce qui peut faire fuir les investisseurs dans le domaine des ER. En plus des dangers précités qui ont pour cause la révolution, il y a d'autres dangers qui caractérisent tous les PED tels que la corruption, la mauvaise gouvernance des entreprises publiques et la bureaucratie. Ces caractéristiques du schéma tunisien, ont fait que les agences de

notation ont dégradé plusieurs fois la note accordée à la Tunisie ce qui a découragé davantage les investisseurs.

### **1.1.2. Le danger lié à l'environnement naturel**

Les projets d'énergie solaire CSP sont très vulnérables à tout changement dans l'environnement naturel. En effet, ces projets nécessitent un rayonnement direct très élevé, donc même si le ciel est partiellement couvert de quelques nuages, durant quelques heures, ceci va avoir des répercussions sur la productivité et la rentabilité de la centrale. En fait, le rayonnement solaire est le moteur et la raison d'être des centrales CSP. En plus du rayonnement solaire, les miroirs et même les autres composantes comme la tour peuvent avoir un dysfonctionnement à cause de la foudre ou les tempêtes de sables qui sont très fréquentes au désert. En effet, à cause des tempêtes de sable, les miroirs sont couverts de sable ce qui affecte négativement la productivité de la centrale et augmente encore les frais liés au nettoyage des miroirs, surtout que l'eau est rare au désert.

### **1.1.3. Le danger lié à l'insécurité**

Dans le cadre de la cartographie des dangers, nous avons traité deux types d'insécurité. Le premier concerne l'insécurité informatique vu que ces centrales utilisent des systèmes informatiques trop compliqués, donc toute défaillance ou même un virus peut causer l'arrêt de la centrale pendant des heures ou même des jours. Le second concerne l'insécurité matérielle, notamment le terrorisme qui est un danger très grave et très préoccupant pour les investisseurs. En effet, ce projet aura lieu au désert de la Tunisie pas trop loin des frontières libyennes ce qui augmente la probabilité d'une attaque terroriste avec enlèvement d'étrangers, par exemple, comme c'était le cas à « Ain Amenas » en Algérie.

### **1.1.4. Le danger lié à l'image**

Ce danger peut avoir lieu dans le cas où il y a un manque de support médiatique pour le projet, une absence de sensibilisation sur les avantages des ER ou une apparition des témoignages défavorables sur les réseaux sociaux et la presse. Il est à noter que ce projet a eu un support médiatique très important dans la presse nationale et internationale et les médias qui ont mis l'accent sur le fait que ce projet fera de la Tunisie le premier exportateur d'ER dans le monde. Cependant, il y a eu, quand même, quelques journaux électroniques qui ont critiqué ce projet en le considérant comme une sorte d'exploitation de nos ressources et même une nouvelle sorte de colonisation.

### **1.1.5. Le danger lié au management**

Ce danger est parmi les dangers qui doivent être pris au sérieux par les développeurs de la centrale CSP. Tout d'abord, parce que ce projet nécessite des procédures administratives très compliquées et très longues ce qui exige une très bonne organisation des tâches à faire, un planning détaillé et réaliste et le recours à des compétences locales dans le domaine du "*project management*" qui ont une très bonne expérience aussi bien dans le domaine des ER que dans le domaine des projets de grande envergure. Ensuite, vu que les ressources humaines qui seront recrutées seront, principalement, des Tunisiens et des Britanniques, il faut donner une grande importance à la gestion des ressources humaines et aux difficultés qui peuvent être rencontrées en matière de communication puisque la Tunisie est un pays francophone.

### **1.1.6. Le danger stratégique**

Le danger stratégique peut être causé par une mauvaise coopération avec les différents partenaires, qui sont multiples dans le cadre du projet « TuNur ». En effet, les développeurs du projet doivent avoir des relations solides et bien déterminées avec les différents partenaires, surtout les bailleurs de fonds aussi bien internationaux que nationaux. Au niveau national, les développeurs du projet doivent entretenir une coopération solide et un soutien de la part de la STEG-ER (STEG Energies Renouvelables), l'ANME, le fonds national pour la maîtrise de l'énergie ainsi que les collectivités locales.

### **1.1.7. Le danger technologique**

Le danger technologique peut avoir ses origines ou bien dans le choix de la technologie et le processus même de la production de l'électricité ou bien dans le cadre du matériel informatique utilisé pour organiser tout le processus. Dans le cadre de ce projet, le danger le plus redoutable concerne la technologie CSP à tour qui n'a pas encore la maturité suffisante comme c'est le cas des centrales cylindro-paraboliques. En effet, les centrales à tour sont encore peu utilisées dans le monde et même si leur efficacité est confirmée, la technologie de centrale à tour nécessite encore des améliorations. Ce qui aggrave encore la situation, c'est le fait que la centrale « TuNur » va utiliser le refroidissement à sec de la tour, vu la rareté de l'eau au désert, ce qui peut aussi poser des problèmes technologiques imprévus.

### **1.1.8. Le danger lié à la communication et aux crises**

La communication aussi bien interne qu'externe est primordiale pour la réussite de toutes les phases précitées. Il est à noter que jusqu'à nos jours, les responsables du projet ont réussi à communiquer d'une manière efficace avec les bailleurs du fonds et les autres partenaires potentiels. En effet, les responsables du projet, notamment Kevin Sara et Till Stenzel, ont participé à plusieurs rencontres et congrès internationaux et nationaux, à des interviews télévisées et ils ont même discuté avec les collectivités locales et les riverains. Même si les efforts faits sont remarquables, nous ne pouvons pas encore juger de leur réussite puisque les problèmes de communication affectent le plus le projet, à partir de la phase de construction, c'est-à-dire le commencement effectif du projet. En effet, à ce stade là il y a plus de probabilité d'avoir des problèmes aussi bien avec le personnel que les autres parties prenantes, notamment les riverains qui peuvent s'opposer même à la construction de la centrale.

### **1.1.9. Le danger juridique**

Le danger juridique et réglementaire est le danger qui préoccupe le plus les investisseurs d'ER, surtout dans les PED. Ce danger est omniprésent dans toutes les phases du projet, depuis l'étude de faisabilité jusqu'à la mise en œuvre de la centrale et le remboursement des crédits. En effet, ce type de projet nécessite la signature de plusieurs contrats avec plusieurs parties prenantes. Mais, ce qui reste très difficile à gérer c'est le danger lié à la réglementation nationale. En fait, en Tunisie la réglementation n'autorise pas l'exportation de l'électricité produite à partir des ER. Il a fallu donc attendre de 2009 jusqu'à 2015 pour qu'une nouvelle loi qui autorise l'exportation de l'électricité verte soit votée par l'Assemblée des représentants du peuple. Tout ce temps perdu a eu des répercussions sur le coût du projet et a causé un retardement récurrent. Ainsi, une mauvaise estimation de la part du développeur lui a coûté des coûts considérables, durant ces cinq dernières années.

### **1.1.10. Le danger financier**

Le danger financier concerne la difficulté à trouver le financement nécessaire vu que le coût de ce projet est énorme (environ 10 milliards d'euros). Ce qui aggrave encore la situation, c'est le fait qu'en Tunisie le marché boursier est peu développé, les instruments de gestion des risques financiers sont inexistants et même les procédures comme le "*project finance*" ne sont pas encore mis en œuvre. Ce danger peut aussi concerner tous les

facteurs qui sont en lien avec le remboursement des crédits tels que la fluctuation du taux de change, l'augmentation du taux d'intérêt et l'arrêt du soutien de l'État. Ces facteurs auront des répercussions sur le rendement du projet et donc l'incapacité à rembourser les crédits dans les délais prévus.

#### **1.1.11. Le danger lié aux infrastructures, aux locaux, aux matériels et aux équipements**

Bien que ce danger ne soit pas, en général, la préoccupation principale des investisseurs et des développeurs dans le domaine des ER, il ne faut en aucun cas le négliger puisqu'il peut être la source de risques graves. En effet, il faut avoir des locaux adaptés au stockage aussi bien des produits fragiles comme les miroirs que les produits dangereux comme les fluides qui seront utilisés pour le transport de la chaleur. En plus, il faut très bien gérer tout ce qui est en lien avec la maintenance régulière pour éviter des coûts énormes, en cas d'absence de maintenance préventive.

#### **1.1.12. Le danger lié au système d'information**

Bien que les systèmes d'information soient de plus en plus performants et efficaces, ceci n'empêche pas qu'on peut avoir des failles et des dysfonctionnements même dans les systèmes les plus performants. Les exemples des dysfonctionnements ne manquent pas, notamment dans les banques et d'autres organismes. Ce danger informatique peut trouver ses origines dans le réseau d'internet, les bases de données, le système même et les logiciels utilisés. En fait, dans ce type de projet même la rotation des miroirs pour suivre le rayonnement solaire se fait selon des logiciels pour garantir le maximum d'efficacité et de productivité du champ solaire.

#### **1.1.13. Le danger physico-chimique**

Dans le cas de la cartographie des dangers, nous avons classé les dangers physico-chimiques en 6 catégories qui sont : électrique, mécanique, thermique, hydraulique, chimique et biologique. Ce type de danger est à prendre au sérieux dans le cadre des centrales CSP. En fait, dans ce type de centrale, il y a tous les facteurs qui peuvent amener à des explosions, des incendies ou d'autres accidents graves qui peuvent même affecter la vie des employés. En plus, dans le processus de ces centrales, il y a la vapeur à haute pression et il y a aussi l'utilisation des fluides qui peuvent être inflammables. Dans ce cas, il faut bien se prévenir contre ce type de danger, surtout en matière de surtension, de fuite de fluide, de corrosion, d'inflammabilité et de toxicité.

Tableau 15. La cartographie des dangers

Dangers génériques	Abréviation	Dangers spécifiques	Événements ou éléments dangereux
Politique	POL	Internationale	Arrêt de l'appui de la Banque Mondiale aux projets CSP
			Baisse du prix de l'énergie fossile
			Les agences de notation
			Non-conformité avec le cadre réglementaire européen de l'électricité
		Nationale	Mauvais choix du site d'installation
			Complexité des procédures bureaucratiques
			Corruption
			Mauvaise gouvernance des entreprises publiques
			Instabilité politique
			Absence des garanties en provenance du gouvernement
			Révolution
			Incertitude politique
			Augmentation des subventions accordées aux CF
			Récurrence des grèves et des <i>sit-in</i> en Tunisie
			Changements récurrents dans le gouvernement
			Absence ou retard de décision par le gouvernement tunisien
Absence de transparence			
Absence / Retard des décisions sur l'amélioration des voies d'accès			
Environnement	ENV	Naturel	Tempête de sable
			La profondeur de la Méditerranée
			Vent violent
			Erosion
			Séisme
			Foudre
Insécurité	INS	Informatique	Virus informatique
			Usurpation d'identité
		Matérielle	Terrorisme
			Vols des matériels
Image	IMA	Médias	Manque de support médiatique pour le projet
			Manque de sensibilisation sur les avantages des ER
			Témoignages défavorables sur les réseaux sociaux
Management	MAN	Organisation	Mauvaise organisation du travail
			Une période d'observation du site insuffisante

			Un calendrier d'exécution du projet peu réaliste		
			Sous estimation du temps de traitement des dossiers		
			Retard dans la construction		
			Indisponibilité des chefs du projet		
		Ressources humaines			Conseillers techniques non expérimentés dans le domaine des grands projets
					Mauvaise formation du personnel
					Mauvaise maîtrise de la langue anglaise
					Mauvaise maîtrise de la langue arabe
					Non recrutement d'employés locaux
					Mauvaise connaissance de l'activité
		Facteur humain			Non respect des consignes de sécurité
					Conditions de travail non confortables
					Mauvaise décision
					Surcharge de travail
Stress					
Stratégique	STR	Coopération	Mauvaise coopération avec la Banque Africaine de Développement		
			Mauvaise coopération avec le fonds national de maîtrise de l'énergie		
			Mauvaise coopération avec Desertec		
			Mauvaise coordination avec la Banque Mondiale		
			Mauvais choix des partenaires (ex : non solides financièrement)		
			Mauvaise coopération avec STEG-ER		
			Mauvaise coopération avec les collectivités locales		
Technologique	TECH	Processus	Mauvais choix de la technologie utilisée		
			Une technologie au stade R&D		
		Informatique	Matériel informatique très compliqué		
Communication et crises	COM	Interne	Absence d'une cellule de communication de crise		
			Absence d'approche participative		
			Absence de communication écrite		
			Mauvaise gestion des alertes		
			Manque de panneaux schématiques		
		Externe			Mauvaise relation avec la collectivité locale
					Mauvaise relation avec les partenaires (conflits d'intérêts)
					Absence de communication des consignes de sécurité aux riverains
					Manque de communication sur les retombées positives du projet
					Mauvaise coordination avec les bailleurs de fonds

Juridique	JUR	Responsabilité pénale	Poursuite juridique de la part des populations
			Manque de précision dans les contrats (ex : contrat de construction et / ou fourniture d'équipements)
			Non respect des contrats avec les partenaires
		Responsabilité civile	Non respect de la réglementation
		Réglementation	Absence de cadre juridique stable (pour l'exportation ou l'importation des ER)
			Cadre réglementaire n'autorise pas l'exportation des ER
Règlement interne	Non respect des modalités internes		
	Non respect des chartes (ex : charte paysage ou autre)		
Financier	FIN	Subventions	Retard ou absence des subventions
		Crédits	Incapacité de rembourser les crédits
			Augmentation du taux d'intérêt
			Fluctuation du taux de change
			Retard dans l'octroi des crédits
		Budget	Coût d'investissement élevé
			Inflation
			Mauvaise estimation du budget prévisionnel
Coût de construction sous estimé			
Dépenses	Dépenses imprévues		
Infrastructures et locaux	INFRA	Locaux	Locaux inadaptés au stockage des produits fragiles
			Locaux inadaptés au stockage des produits dangereux
Matériels et équipements	MAT	Logistique	Défaillance du réseau téléphonique
			Pièces défectueuses
			Absence / Mauvaise gestion des différents stocks
			Absence / Mauvaise gestion des entrepôts
		Maintenance	Absence de maintenance préventive
			Absence de fonds de maintenance
Maintenance préventive mal gérée			
Système d'information	SI	Réseau	Coupure de la connexion internet
		Données	Données incomplètes ou erronées
			Erreur de classement des données
			Perte de dossiers
			Mauvais archivage des retours d'expériences
			Absence des données
		Défaut d'anonymisation des données	
		Système	Système ne répond pas aux réalités du terrain
Logiciel	Logiciels très compliqués		

Physico-chimique	PHYS	Electrique	Surtension
			Coupure d'électricité
			Insuffisance d'électricité
			Court-circuit
		Mécanique	Bruit
			Chute
			Explosion
			Rupture de canalisation
			Mauvais colmatage
			Vibration
		Thermique	Incendie
			Point chaud
		Hydraulique	Surpression
			Fuite
			Rupture
		Chimique	Pollution
			Corrosion
			Réaction chimique
			Explosion
			Oxydation
			Inflammabilité
Biologique	Toxicité		

Source : Auteur

## 1.2. La cartographie des situations dangereuses et la priorisation des actions

Dans la suite de l'étude, nous allons se baser sur l'identification des dangers effectuée dans la partie précédente. Les situations dangereuses s'identifient par l'interaction entre les événements dangereux (identifiés dans la cartographie des dangers) et les éléments vulnérables du système.

Tableau 16. Echelle des interactions dangers/système

Indice de priorité	Interaction dangers/système	Décision d'analyse, d'évaluation et de traitement
	Aucune interaction	
1	Forte à très forte interaction	Immédiatement
10	Forte à très forte interaction	Ultérieurement
2	Faible à moyenne interaction	Dans un deuxième temps

Source : Auteur

- La case correspondant à la situation dangereuse est vide dans le cas où il n'y a pas d'interaction entre le danger et le système.
- La case correspondant à la situation dangereuse contient l'indice de priorité « 1 » dans le cas où l'interaction entre le système et le danger est forte et la situation dangereuse doit être résolue de manière prioritaire.
- La case correspondant à la situation dangereuse contient l'indice de priorité « 10 » dans le cas où l'interaction entre le système et le danger est forte et la situation dangereuse va être traitée ultérieurement.
- La case correspondant à la situation dangereuse contient l'indice de priorité « 2 » dans le cas où l'interaction entre le système et le danger est faible et le traitement de la situation dangereuse va être fait dans un deuxième temps.

L'élaboration de la cartographie des situations dangereuses est l'étape la plus importante et la plus difficile dans tout le processus de l'AGR. En fait, elle nécessite une analyse rigoureuse afin de pouvoir déterminer toutes les situations dangereuses possibles, c'est-à-dire toutes les interactions possibles entre les phases et sous phases du système et les éléments dangereux. Ensuite, nous devons accorder un indice de priorité pour chaque situation dangereuse (1, 2 ou 10).

Dans le cas de notre étude, nous avons réussi à déterminer 169 situations dangereuses qui sont réparties de la manière suivante : 33 situations dangereuses avec un indice de priorité « 1 », 62 situations dangereuses avec un indice de priorité « 2 » et 74 situations dangereuses avec un indice de priorité « 10 ». Dans le reste des étapes, nous allons analyser seulement les situations dangereuses de priorité « 1 », c'est-à-dire celles qui présentent une forte interaction entre les éléments dangereux et les éléments vulnérables du système et dont la décision d'analyse, d'évaluation et de traitement doit être faite immédiatement.

Durant cette phase, le recours à plusieurs experts et à des ingénieurs est primordial puisque cette analyse nécessite des connaissances diversifiées. Nous avons aussi fait recours au retour d'expérience, surtout le cas de la centrale « Ouerzazate » au Maroc, ce qui nous a permis de collecter plusieurs données indispensables à la gestion des risques.

Tableau 17. Extrait de la cartographie des situations dangereuses

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P	Q	R	S	T	U	V	W	X	Y	Z	AA	AB	AC	AD	AE	AF	AG	AH	AI	AJ		
1	Cartographie et gestion des risques de la centrale solaire thermique à concentration de Fijm Maatoug			Etude de faisabilité (A)										Préparation (B)																								
2	33	62	74	Identification du site	Estimation de la ressource	Estimation de la puissance qui peut être raccordée	Discussion avec l'opérateur de réseau sur les coûts d'interconnexion	Estimation du coût du projet	Estimation de la demande potentielle	Estimation de la rentabilité du projet	Etude des caractéristiques géologiques du site	Caractérisation fiable des données solaires ponctuelles	Fixation des caractéristiques techniques des miroirs utilisés	Déterminer les équipements nécessaires	Etude des impacts environnementaux	Etude des impacts sociaux	Identification des partenaires	Partage des rôles	Organisation de la coordination entre les partenaires	Constituer une équipe de base pour développer le projet	Détermination du coût global du projet	Identification des aides financières disponibles	Détermination du montant des subventions possibles	Détermination du montant des emprunts	Fixation des modalités de remboursement	Les négociations foncières	Demande de permis de construire	Le choix de la structure légale de l'unité porteuse de projet	La signature des contrats	L'accord sur la tarification	Organisation des réunions de travail	Fixation de la durée du projet	Détermination des phases de construction	Fixation des dates de début et d'achèvement				
3	DANGERS GENERIQUES	Dangers Spécifiques	Evénements ou éléments dangereux	Déterminer les sites disponibles	Le choix du site	Estimation du rayonnement solaire	Estimation de la production électrique	Estimation de la puissance qui peut être raccordée	Discussion avec l'opérateur de réseau sur les coûts d'interconnexion	Estimation du coût du projet	Estimation de la demande potentielle	Estimation de la rentabilité du projet	Etude des caractéristiques géologiques du site	Caractérisation fiable des données solaires ponctuelles	Fixation des caractéristiques techniques des miroirs utilisés	Déterminer les équipements nécessaires	Etude des impacts environnementaux	Etude des impacts sociaux	Identification des partenaires	Partage des rôles	Organisation de la coordination entre les partenaires	Constituer une équipe de base pour développer le projet	Détermination du coût global du projet	Identification des aides financières disponibles	Détermination du montant des subventions possibles	Détermination du montant des emprunts	Fixation des modalités de remboursement	Les négociations foncières	Demande de permis de construire	Le choix de la structure légale de l'unité porteuse de projet	La signature des contrats	L'accord sur la tarification	Organisation des réunions de travail	Fixation de la durée du projet	Détermination des phases de construction	Fixation des dates de début et d'achèvement		
4	Politique	Internationale	Arrêt de l'appui de la Banque Mondiale au projet CSP																																			
5			Baisse du prix de l'énergie fossile									10																										
6			Les agences de notation									2																										
7			Non-conformité avec le cadre réglementaire européen de									2																										
8		Nationale	Mauvais choix de site d'installation						10																													
9			la compléxité des procédures bureaucratiques									2																										
10			Corruption									10																										
11			Mauvaise gouvernance des entreprises publiques									1																										
12			Instabilité politique																																			
13			Absence de garanties en provenance du gouvernement										2																									
14			Révolution										2																									
15			Inertitude politique																																			
16			Augmentation des subventions accordées aux CF																																			
17			Réurrence des grèves et des sit in en Tunisie																																			

Source : Auteur

Après l'analyse des différentes situations dangereuses, nous retrouvons sur le tableau de cohérence le nombre des situations dangereuses et le nombre des scénarios par phase et par danger générique.

Tableau 18. Tableau de cohérence

Intitulés des dangers génériques	Abrév	nSD	nSc	nSc	nSD	Intitulés des éléments système	Abrév
Politique	POL	10	10	3	3	Etude de faisabilité (A)	A
Environnement	ENV	2	2	12	12	Préparation (B)	B
Insécurité	INS	1	1	8	8	Exécution (C)	C
Image	IMG	1	1	10	10	Mise en service (D)	D
Management	MAN	2	2				
Stratégique	STR	3	3				
Technologique	TEC	1	1				
Communication et crises	COM	1	1				
Juridique	JUR	2	2				
Financier	FIN	3	3				
Infrastructures et locaux	INF	1	1				
Matériels et équipements	MAT	1	1				
Système d'information	SI	1	1				
Physico-chimique	PCH	4	4				
		33	33	33	33		

Source : Auteur

Le nombre des situations dangereuses doit être inférieur ou égal au nombre des scénarios. Cela justifie la cohérence de l'étude qui est menée, car pour une situation dangereuse correspond au moins un scénario dangereux. Le nombre des situations dangereuses ainsi que le nombre des scénarios dangereux identifiés est de l'ordre de 33. Ce résultat signifie que pour chaque situation dangereuse, nous avons dégagé un seul scénario dangereux, mais nous pouvons avoir, dans d'autres cas, 2 ou 3 scénarios pour une même situation dangereuse.

## **2. L'AGR Scénario**

Cette étape du processus nécessite l'élaboration des échelles d'évaluation et de décision, la description détaillée des scénarios d'accidents, le traitement des risques initiaux et la gestion des risques résiduels. Cette étape va nous permettre d'avoir les cartographies des risques sous la forme du diagramme de Kiviat et du diagramme de Farmer.

### **2.1. Eléments d'évaluation et de décision**

L'évaluation des risques est basée sur deux aspects :

- La gravité des conséquences en se basant sur une échelle de gravité qui est composée de 5 niveaux d'index.
- L'incertitude de l'occurrence en se basant sur une échelle d'index de vraisemblance.

#### **2.1.1. Echelle de gravité**

L'échelle de gravité est composée de 5 niveaux d'index (Tableau 19). Chaque niveau correspond à une nature déterminée des conséquences. La gravité des conséquences des événements redoutés notée « G » est présentée dans une échelle en 5 niveaux (G1, G2, G3, G4 et G5).

Le chiffre « 13 » correspond au nombre d'intitulés de conséquences qui sont différents et qui apparaissent à l'AGR Scénario. Le chiffre « 33 » correspond au nombre d'intitulés de conséquences déduites dans l'AGR Scénarios correspondant aux intitulés préétablis dans l'échelle de gravité.

Tableau 19. Echelle de gravité du système étudié

A	B	C	E	F
Classe de gravité	Intitulé de la classe	Index de G	Intitulé des conséquences	Resultats
G1	Mineure	1	10Aucun impact sur les performances et la sécurité de l'activité	0
			11Diminution acceptable des performances sans impact sur l'activité	
			12Contraintes opérationnelles acceptables	1
			13Indisponibilité de structure ou d'équipements	
			14Accident de travail sans arrêt de travail	
G2	Significative	2	15	
			20Dégradation des performances du système sans impact sur la sécurité	0
			21Indisponibilité des services ou d'équipements à la date prévue	1
			22Indisponibilité d'équipements, de locaux ou de personnels inférieur à une semaine	
			23Accident de travail avec arrêt de travail inférieur à 21 jours	2
G3	Grave	3	24Pollution contrôlable	1
			25	
			30Forte dégradation ou échec des performances du système sans impact sur la sécurité	0
			31Dégradation inacceptable des performances	4
			32Activité très dégradée ou échouée	2
G4	Critique	4	33Contraintes opérationnelles importantes	9
			34Dommages importants sur les infrastructures ou les biens	1
			35Accident de travail avec arrêt de travail supérieur à 21 jours	
			40Dégradation de la sécurité ou de l'intégrité du système	0
			41Blessure grave ou invalidité temporaire	
G5	Catastrophique	5	42Destruction partielle d'infrastructures ou de biens	1
			43Dommages importants sur l'environnement	1
			44Invalidité temporaire du personnel	
			45Retard dans l'exécution du projet	6
			50Forte dégradation ou échec de la sécurité ou perte du système	0
			51Perte de vie humaine ou invalidité	
			52Destruction totale d'infrastructures ou de biens	1
			53Dommages irréversibles sur l'environnement	
			54Perte financière énorme	3
			55Arrêt définitif du projet	
			13	33 100%

Source : Auteur

### 2.1.2. Echelle de vraisemblance

L'échelle de vraisemblance (Tableau 20) contient 5 niveaux de vraisemblance auxquels est associée une période de récurrence.

Tableau 20. Echelle de vraisemblance

Echelle de Vraisemblance				
Classe de Vraisemblance	Intitulé de la classe	Index de V	Intitulés des vraisemblances	T
V1	Très improbable	1	Moins d'1 fois par T1	
			T1 -->	20 ans
V2	Très peu probable	2	Entre 1 fois par T1 et 1 fois par T2	
			T2 -->	4 ans
V3	Peu probable	3	Entre 1 fois par T2 et 1 fois par T3	
			T3 -->	1 an
V4	probable	4	Entre 1 fois par T3 et 1 fois par T4	
			T4 -->	1 mois
V5	Très probable à certain	5	Plus d'1 fois par T4	

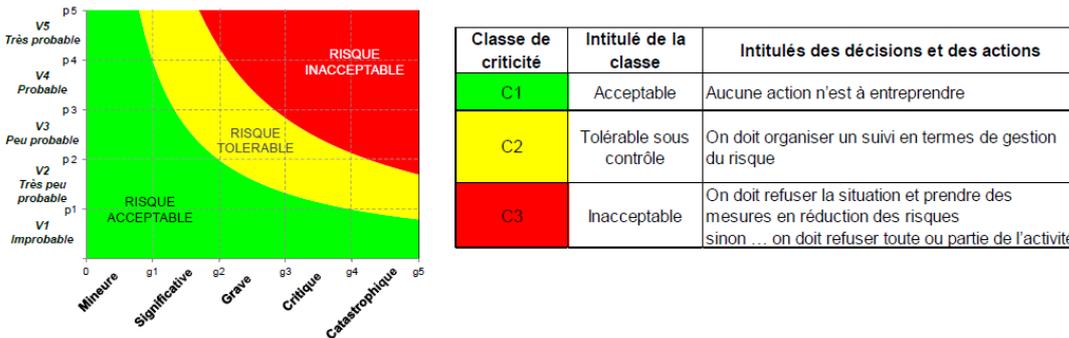
Source : Auteur

### 2.1.3. Echelle de criticité

La criticité est le résultat d'une fonction de décision qui est liée à une échelle de valeur (politique, sociale, humaine, etc.). La première étape qui est la plus importante consiste à répartir l'ensemble des risques liés au projet en trois catégories. Les classes de

criticité sont de l'ordre de 3 : C1, C2 et C3 de couleurs respectives vert, jaune et rouge. A chaque classe de criticité correspond une action bien définie. La criticité varie selon les pays, selon le temps et les personnes. En effet, ce qui était acceptable en 2010 peut ne plus être acceptable de nos jours.

Figure 40. Diagramme d'acceptabilité des risques (Farmer) et échelle de criticité et de décisions associées



Source : Delmotte et Desroches (2014, p.3)

Le référentiel d'acceptabilité des risques (Tableau 21) est une présentation en deux dimensions qui présente les deux composantes du risque : la vraisemblance en fonction de la gravité. Il permet d'associer à chaque couple gravité-vraisemblance une classe de criticité. Ainsi une gravité de niveau 5 associée à une vraisemblance de niveau 5 correspond à un niveau de criticité maximal C3.

Tableau 21. Référentiel d'acceptabilité des risques

		Gravité				
		1	2	3	4	5
Vraisemblance	5	1	2	3	3	3
	4	1	2	2	3	3
	3	1	1	2	2	3
	2	1	1	1	2	2
	1	1	1	1	1	1

Source : Auteur

Après avoir déterminé les échelles d'évaluation, nous pouvons élaborer l'AGR scénarios (Annexe 1) qui vise à détailler les différents éléments constitutifs d'un scénario d'accident comme présenté dans le tableau 22. Ainsi, pour chaque situation dangereuse nous allons détailler toutes les composantes du scénario du risque qui sont : le danger, la cause contact, l'événement redouté, la cause amorce et les conséquences. Par la suite, nous allons déterminer les actions de réduction du risque initial et les actions de gestion du

risque résiduel. Cette analyse sera faite seulement sur les situations dangereuses de priorité « 1 ».

Tableau 22. Extrait de l'AGR Scénarios

A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P	Q	R
XY	Dangers	Système	Situation dangereuse	Causes contact	Événement redouté	Causes amorce	Traitements déjà existants dont moyens de détection ou d'alerte	Conséquences	G	V	C	Actions de réduction des risques et identification de l'autorité de décision de leur application	PE	Gr	Vr	C	Gestion du risque résiduel
III1	POL	A	Lenteur des procédures	STEG est monopole	La non obtention du permis de construire	Le cadre réglementaire tunisien n'autorise pas l'exportation des énergies renouvelables	Absence de moyens	45Retard dans l'exécution du projet	4	4	3	A1 A2 A1: Entamer des discussions avec les responsables gouvernementaux pour changer le cadre réglementaire et faciliter les procédures avec STEG A2: La formation d'une équipe de spécialistes pour discuter de tous les points nécessaires avec les responsables du STEG.	2	4	2	2	P1 P1: Un contrôle continu de l'avancement des discussions avec le gouvernement
F38 06	MAN	A	Une estimation erronée de la ressource	Première expérience dans le désert tunisien	Surestimation du rendement du projet	Une période d'observation du site inférieure à une année	Absence de moyens	54Perte financière énorme	5	2	2	A3 A4 A3: Exiger une période d'observation du site égale à une année A4: Le recours à des professionnels expérimentés pour évaluer la capacité et le rendement énergétique de l'installation	3	2	2	1	
167	STR	A	L'exigence de coûts exorbitants pour le raccordement	STEG est monopole	L'augmentation du coût du projet	La bureaucratie	Absence de moyens	31Dégratation inacceptable des performances	3	3	2	A5 A6 A5: vendre une partie de l'électricité produite au marché national A6: opter pour le mécanisme d'achat à prix garanti	2	2	2	1	
56	POL	B	Le découragement des investisseurs privés	Dégradation de la notation souveraine de la Tunisie par les agences de notation	Peu ou pas de bailleurs de fonds intéressés par un projet en Tunisie	Problèmes politiques	Absence de moyens	33Contraintes opérationnelles importantes	3	4	2	A7 A8 A7: Le choix de partenaires financièrement solides tel que Desentec A8: Le recours à la Banque Mondiale et à la Banque africaine de développement	2	2	3	1	

Source : Auteur

L'objectif est de passer des risques inacceptables (criticité C3) à des risques tolérables sous contrôle (criticité C2) ou acceptables (criticité C1). Pour ce faire, nous allons procéder par la prévention (diminution de la probabilité), la protection (diminution de la gravité des conséquences) ou l'assurance.

## Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons commencé par donner les définitions des concepts de base qui sont nécessaires pour la compréhension et l'application de la méthode AGR tels que le concept de système, de risque, de situation dangereuse, etc. Nous avons aussi clarifié les différences entre plusieurs concepts qui sont souvent utilisés comme des synonymes, comme c'est le cas pour les termes danger et menace qui sont les deux considérés comme potentiel de préjudice ou de dommage. Nous avons clarifié que la différence réside dans le fait que le danger est aléatoire alors que la menace est plutôt déterministe.

Ensuite, nous avons décrit les principales caractéristiques de la méthode AGR. Il s'agit d'une méthode analytique, inductive, semi-quantitative et d'analyse des risques *a priori*. Nous avons aussi expliqué les objectifs de cette méthode, les entrées nécessaires, le logiciel à utiliser et le processus à suivre. Enfin, nous avons procédé à une description

minutieuse du projet « TuNur », en détaillant toutes les phases et les sous phases du projet ainsi que le périmètre étudié. En fait pour réaliser sa mission, le système étudié englobe les phases suivantes : l'étude de faisabilité, la préparation, la construction et la mise en service.

La seconde section a été consacrée à détailler toutes les démarches suivies pour appliquer l'AGR système et l'AGR scénario au cas du projet « TuNur ». Nous avons commencé, tout d'abord, par traiter de la manière la plus exhaustive possible les dangers génériques, les dangers spécifiques et les éléments dangereux qui sont liés au projet « TuNur » et qui font l'objet de la cartographie des dangers. Nous avons classé les dangers génériques en 14 classes qui sont : politique, environnement naturel, insécurité, image, management, stratégique, technologique, communication et crises, juridique, financier, infrastructures et locaux, matériels et équipements, système d'information et physico-chimique.

Dans la suite du chapitre, nous avons utilisé l'identification des dangers effectuée dans l'étape précédente afin de déterminer les situations dangereuses et de les prioriser selon l'échelle des interactions dangers/système. Nous avons réussi à déterminer 169 situations dangereuses qui sont réparties de la manière suivante : 33 situations dangereuses avec un indice de priorité « 1 », 62 situations dangereuses avec un indice de priorité « 2 » et 74 situations dangereuses avec un indice de priorité « 10 ». Nous avons limité notre analyse aux situations dangereuses de priorité « 1 », c'est-à-dire celles qui présentent une forte interaction entre les éléments dangereux et les éléments vulnérables du système et dont la décision d'analyse, d'évaluation et de traitement doit être faite immédiatement. Ceci nous a permis d'avoir la cartographie des situations dangereuses.

Ensuite, nous avons passé à l'AGR scénario qui nécessite l'élaboration des échelles d'évaluation et de décision, la description détaillée des scénarios d'accident, le traitement des risques initiaux et la gestion des risques résiduels. Cette étape nous a permis d'avoir les cartographies des risques, sous la forme du diagramme de Kiviat et du diagramme de Farmer, qui vont être expliquées dans le chapitre suivant ainsi que tous les autres résultats.

## **Chapitre 8. Résultats de l'analyse globale des risques et recommandations**

### **Introduction**

L'application de la méthode AGR au projet « TuNur », en suivant toutes les étapes qui ont été expliquées dans le chapitre précédent, va nous permettre de dégager les principaux risques susceptibles d'affecter ce projet, les scénarios qui amènent à ces risques et les moyens nécessaires pour les réduire.

L'objectif de ce chapitre est de dégager les principaux risques d'investissement dans le projet « TuNur » et de fournir un cadre conceptuel qui peut servir de base pour les stratégies de transition vers les ER, en Tunisie et dans les PED en général. C'est à partir de l'analyse des risques qui entravent l'investissement dans ce projet, que nous allons proposer les stratégies convenables pour l'encouragement des investisseurs et la diffusion à grande échelle des ER. Pour cela nous allons interpréter les résultats de la méthode AGR et en tirer des recommandations et des stratégies à appliquer pour la mise en œuvre d'un climat propice pour le développement du secteur des ER. Ce chapitre sera organisé sous la forme de deux sections.

La première section sera consacrée, tout d'abord, à l'analyse et à l'évaluation par danger générique et par phase du projet « TuNur ». Cette évaluation va nous permettre d'avoir la répartition des situations dangereuses et des risques selon le type du danger générique (politique, financier, juridique, etc.) et selon les phases du projet (étude de faisabilité, préparation, construction et mise en service). Par la suite, nous allons déterminer la liste des risques majeurs (qui sont au nombre de 8 dans notre cas), les causes de ces risques et les actions proposées pour les réduire.

La seconde section va porter sur les principales recommandations tirées des résultats de l'AGR ainsi que la forme de gouvernance la plus adéquate à chaque phase du développement des ER, en Tunisie. Cette section va porter sur les implications en termes de politiques énergétiques. En effet, la détermination des risques majeurs et des stratégies pour les éliminer va nous servir de base pour proposer des recommandations en termes de politiques énergétiques pour accélérer le processus de transition vers les ER.

## Section 1. Interprétations des résultats de l'AGR

L'application de la méthode AGR au projet « TuNur » nous a permis de faire une analyse des risques qui entravent la mise en œuvre de ce projet. Les résultats trouvés seront expliqués en détails dans cette section.

### 1. Répartition des criticités initiales et résiduelles

Les tableaux suivants (23 et 24) présentent le nombre des scénarios analysés selon le couple « gravité-vraisemblance » ainsi qu'avant et après les actions de maîtrise des risques initiaux. Nous remarquons qu'avant de commencer les actions de maîtrise des risques initiaux (Tableau 23), nous avons un seul risque initial de criticité C1 (risque acceptable en l'état), 22 risques initiaux de criticité C2 (tolérable sous contrôle) et 10 risques initiaux de criticité C3 (inacceptable).

Tableau 23. Matrice de criticité des risques initiaux

		Gravité				
		1	2	3	4	5
Vraisemblance	5	1		2		
	4		4	7	6	
	3			7	2	2
	2					2
	1					
<b>33</b>						
	<b>C1</b>	1				
	<b>C2</b>	22				
	<b>C3</b>	10				
<b>33</b>						

Source : Auteur

Les actions de maîtrise des risques initiaux vont nous permettre de réduire la criticité pour avoir des risques résiduels avec une criticité C1 ou C2, c'est-à-dire on doit avoir seulement des risques résiduels acceptables ou tolérables sous contrôle et aucun risque résiduel inacceptable. Ceci est bien respecté dans notre analyse puisque nous avons eu 10 risques résiduels de criticité C2 (tolérables sous contrôle), 23 risques résiduels de criticité C1 (acceptables) et aucun risque résiduel inacceptable, c'est-à-dire de criticité C3 (Tableau 24).

Tableau 24. Matrice de criticité des risques résiduels

		Gravité				
		1	2	3	4	5
Vraisemblance	5	1				
	4			2		
	3	4	7	6		
	2		5	5	2	
	1			1		
						<b>33</b>

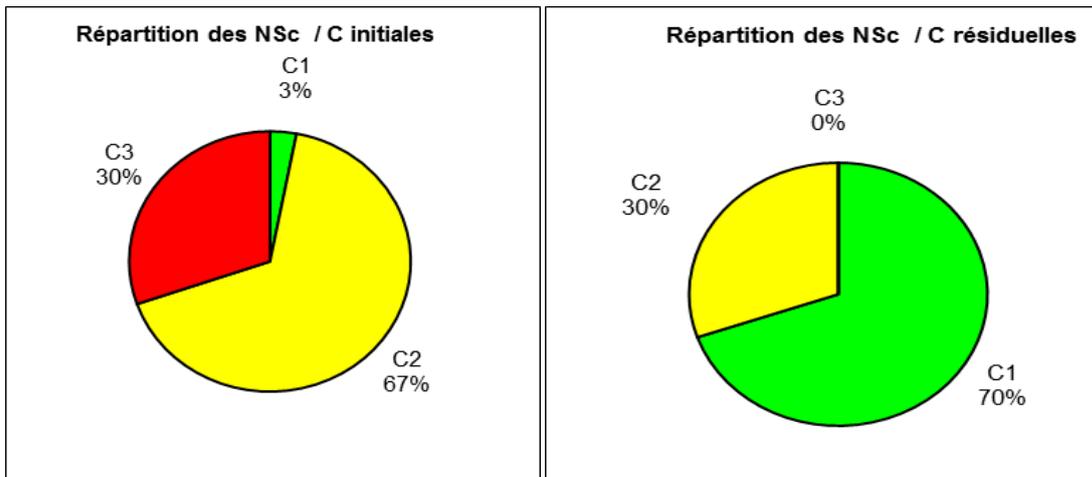
  

<b>C1</b>	23
<b>C2</b>	10
<b>C3</b>	0
<b>33</b>	

Source : Auteur

La figure 41 illustre une autre façon de représentation du nombre des scénarios par criticité initiale et par criticité résiduelle. Chaque classe de criticité est représentée en fonction de sa part relative dans la cartographie générale des risques.

Figure 41. Répartition du nombre des scénarios par criticité initiale et par criticité résiduelle



Source : Auteur

Les criticités des risques initiaux sont réparties comme suit :

- 3 % (1/33) des scénarios présentent un risque acceptable en l'état (C1),
- 67 % (22/33) des scénarios présentent un risque tolérable sous contrôle (C2),
- 30 % (10/33) des scénarios présentent un risque inacceptable (C3).

Les résultats obtenus après la mise en œuvre des actions de réduction des risques initiaux sont les suivants :

- 70% (23/33) des scénarios présentent un risque acceptable en l'état (C1),

- 30% (10/33) des scénarios présentent un risque tolérable sous contrôle (C2),
- Aucun scénario ne présente un risque inacceptable (C3).

On remarque donc que le nombre des scénarios à risques inacceptables passe de 10 (30 % du total) à aucun, alors que le nombre des scénarios à risques tolérables sous contrôle passe de 22 (67 %) à 10 (30%). Par conséquent, la réduction s'avère significative.

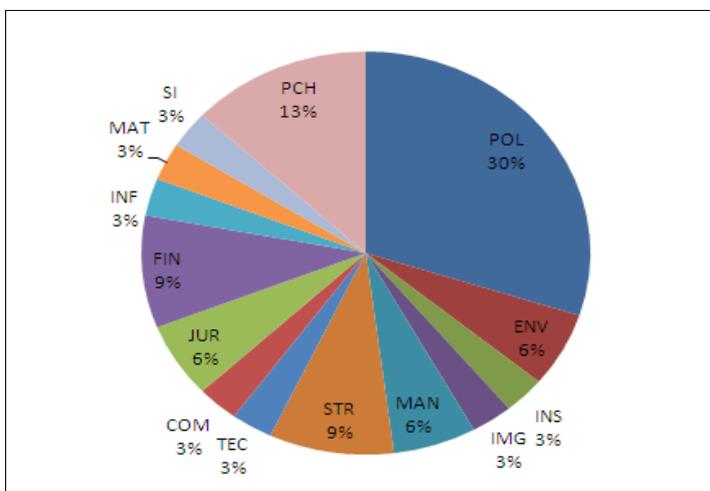
## 2. Analyse et évaluation par dangers

### 2.1. Répartition des situations dangereuses de priorité « 1 » par dangers

La cartographie des situations dangereuses a permis d'identifier 169 situations dangereuses parmi lesquelles 33 étaient cotées en priorité « 1 » (soit 19%), 62 étaient cotées en priorité « 2 » (soit 37%) et 74 en priorité « 10 » (soit 44%). Nous allons détailler dans ce qui suit les situations dangereuses de priorité « 1 » vu la gravité des conséquences qu'elles peuvent engendrer sur le système étudié. Les 33 situations dangereuses de priorité « 1 », réparties par types de dangers génériques, sont présentées en pourcentage dans la figure 42. Cette représentation fait apparaître deux groupes de dangers qui peuvent être classés selon leur importance relative :

- Proportion élevée : les dangers politiques (30%), physico-chimiques (13%), financiers (9%), stratégiques (9%), environnement (6%), management (6%) et juridiques (6%).
- Proportion moyenne à faible : les dangers liés aux matériels et équipements (3%), système d'information (3%), infrastructures et locaux (3%), communication et crise (3%), technologiques (3%), image (3%) et insécurité (3%).

Figure 42. Répartition des situations dangereuses de priorité 1 par dangers génériques

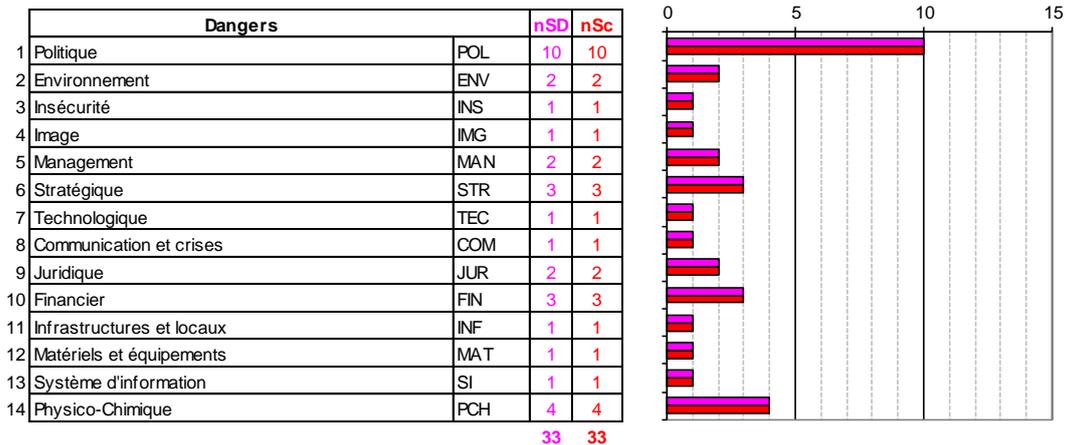


Source : Auteur

Il est clair donc que le système étudié (l'élaboration du projet « TuNur ») est trop exposé au danger politique, vu que ce dernier engendre le plus de situations dangereuses. Ceci est tout à fait logique vu la situation actuelle de la Tunisie caractérisée par l'instabilité politique.

Tableau 25. Répartition des situations dangereuses et des scénarios par danger

Nombres de Situations Dangereuses identifiées et de scénarios analysés



Source : Auteur

L'AGR scénarios nous a permis d'identifier 33 scénarios à partir des situations dangereuses de priorité « 1 » (Tableau 25). Nous remarquons que le danger politique est susceptible de causer le nombre le plus élevé de situations dangereuses. Les dangers physico-chimiques, financiers et stratégiques viennent en deuxième lieu. Ces résultats sont conformes avec la plupart des études faites, surtout pour ce qui est de l'importance des dangers politiques et financiers. Cependant, cette étude a mis l'accent sur le danger physico-chimique qui est souvent négligé dans les études qui concernent les ER.

## 2.2. Diagramme de Kiviat

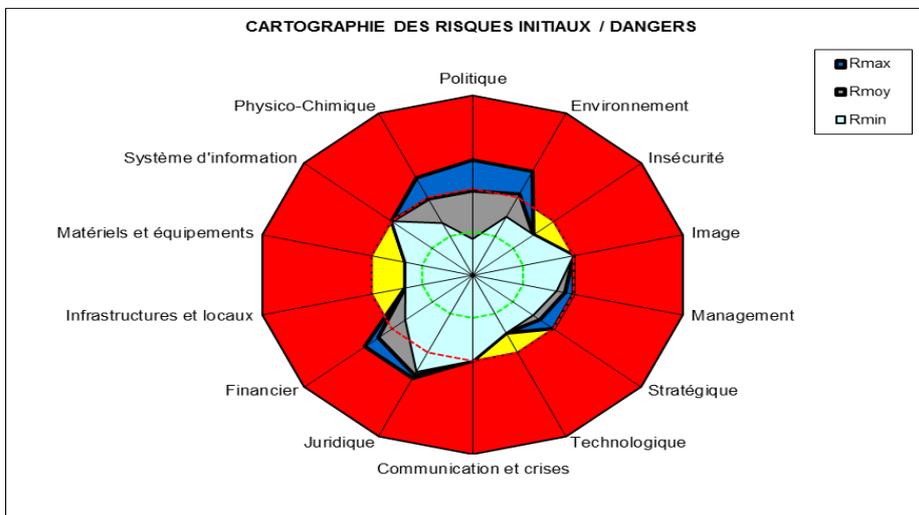
Le diagramme de Kiviat permet d'obtenir une vue globale des risques liés au projet « TuNur » et facilite leur comparaison. En effet, le diagramme de Kiviat présente une analyse détaillée des risques initiaux et résiduels relatifs aux dangers génériques ou aux éléments du système. Le diagramme de Kiviat, appelé aussi le diagramme radar, permet d'avoir une représentation globale des différents dangers et risques liés au projet « TuNur », tout en facilitant leur comparaison. Cette représentation permettra une prise de décision convenable au contexte général et à la vulnérabilité du projet étudié.

Le rayon du diagramme de Kiviat indique l'index de risque qui correspond au produit de la vraisemblance (V1 à V5) par la gravité (G1 à G5) qui varie de 0 à 25. Le diagramme fait apparaître aussi les trois zones de criticité du risque (C1, C2 et C3), qui sont déjà définies sur la matrice de criticité et sur lesquelles sont positionnées les valeurs minimales, moyennes et maximales des différents risques considérés.

- Rmin : index de risque minimum correspondant à la plus petite valeur d'index de risque de l'ensemble des scénarios,
- Rmoy : index de risque moyen évalué à partir de l'ensemble des scénarios,
- Rmax : index de risque maximum correspondant à la plus grande valeur d'index de risque de l'ensemble des scénarios.

L'étendue de la zone colorée en bleu foncé, gris et bleu clair au fond du diagramme permet de visualiser, respectivement, la proportion des risques maximum, moyen et minimum. Selon l'approche d'analyse par dangers, les axes du diagramme de Kiviat (Figure 43 et Figure 44) représentent les 14 classes de dangers génériques qui ont été présentées dans la cartographie des dangers ainsi que les risques minimum, moyen et maximum correspondant à chaque classe de danger.

Figure 43. Diagramme de Kiviat de la cartographie des risques initiaux par dangers



Source : Auteur

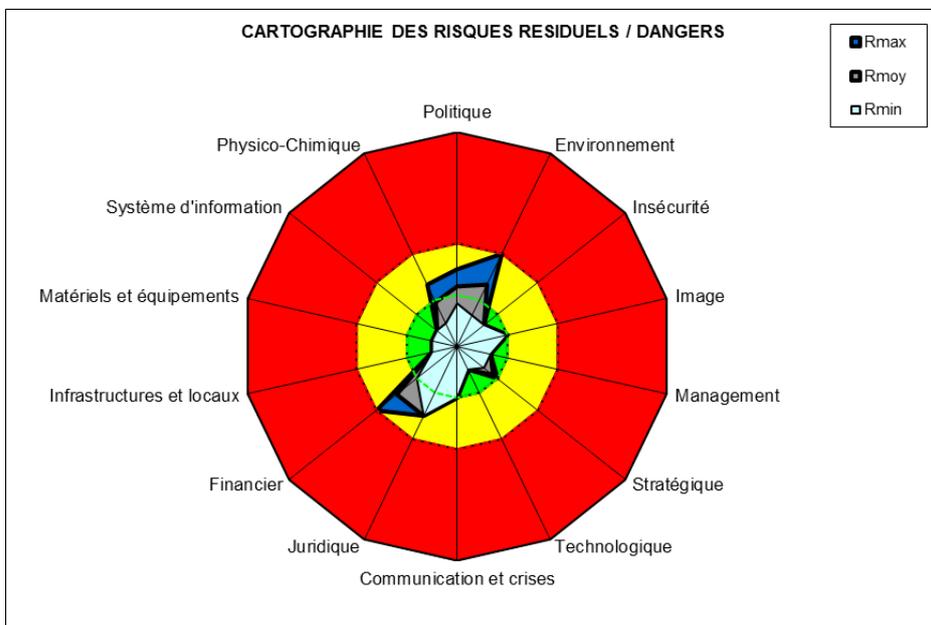
D'après le diagramme de Kiviat (Figure 43), nous pouvons faire l'interprétation suivante :

Les scénarios issus des dangers environnement, politique, physico-chimique, financier, juridique, stratégique et management ont un index de risque maximum de

criticité C3 (inacceptable). Ainsi, les risques issus de ces types de dangers doivent être une priorité pour les responsables du projet afin d'éviter des conséquences graves. Parmi les types de dangers précités, seulement, les scénarios issus des dangers financier, juridique et environnement ont un index de risque moyen de criticité C3 (inacceptable), ce qui nécessite donc d'accorder beaucoup plus d'importance à ces trois types de dangers. Parmi ces trois classes de dangers, seulement, le danger juridique peut causer des scénarios de risque avec index de risque minimum de criticité C3 (inacceptable). Ceci nous amène à remarquer que le danger juridique est un danger à prendre très au sérieux par les investisseurs, vu que les scénarios de risque issus de ce danger ont les index de risque minimum, moyen et maximum de criticité C3 (inacceptable). Ainsi, même si la part des scénarios de risque issus du danger juridique n'est pas très élevée (6% seulement par rapport à 30% pour le danger politique et 13% pour le danger physico-chimique), ce danger peut causer des risques avec des conséquences catastrophiques et donc inacceptables par les responsables du projet.

Le diagramme de Kiviat suivant (Figure 44) permet de juger de l'efficacité et de l'ampleur des actions de maîtrise des risques initiaux qui ont été proposées et bien expliquées dans l'AGR scénarios.

Figure 44. Diagramme de Kiviat de la cartographie des risques résiduels par dangers



Source : Auteur

Après la mise en œuvre des actions de réduction des risques initiaux, nous pouvons faire les remarques suivantes :

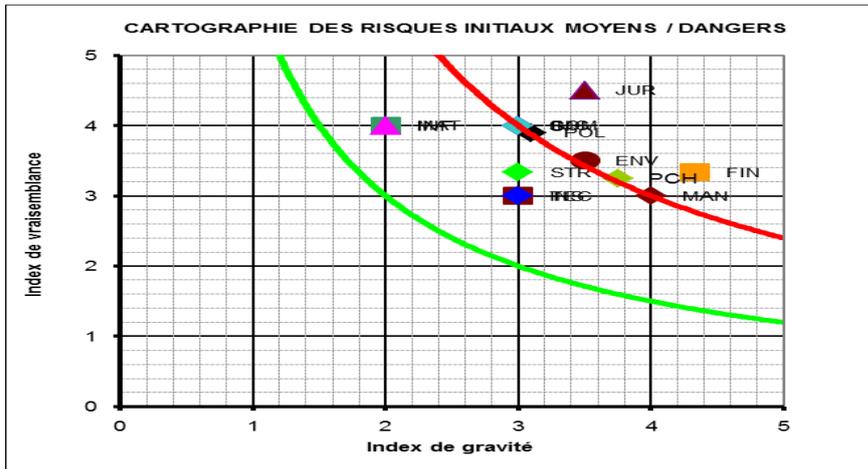
- Aucun des index des risques résiduels (minimum, moyen ou maximum) qui sont issus de tous les types de dangers n'a une criticité C3 (inacceptable). Ainsi, les actions de réduction des risques mises en œuvre ont réussi à amener tous les index de risque à des niveaux de criticité C2 (tolérable sous contrôle) ou C1 (acceptable). Ce résultat prouve l'efficacité des actions appliquées.
- Les risques résiduels issus des dangers de type politique, financier, juridique et environnement ont un index de risque moyen résiduel de criticité C2 (tolérable sous contrôle). Ainsi, les risques résiduels issus de ces dangers sont tolérables sous contrôle et nécessitent de ce fait des actions de contrôle comme l'assurance.
- Le risque résiduel issu du danger juridique est le seul qui a un index de risque minimum de criticité C2 (tolérable sous contrôle). Par conséquent, même après la mise en œuvre des actions de réduction des risques initiaux, les risques résiduels issus du danger juridique doivent être toujours sous le contrôle et le suivi continu de la direction, en appliquant des actions de contrôle qui sont expliquées dans l'AGR scénarios.
- Les risques issus des dangers politique, environnement, juridique et financier sont les seuls qui possèdent un index de risque moyen résiduel de criticité C2 (tolérable sous contrôle).
- Les risques résiduels issus des dangers environnement et financier possèdent l'index de risque maximum résiduel le plus élevé.

### **2.3. Diagramme de Farmer**

Le diagramme de Farmer est une autre façon de présenter, d'une manière globale, les risques initiaux et résiduels par rapport aux 14 classes de dangers génériques ou par rapport aux quatre phases du projet. Ce diagramme contient deux axes avec l'index de gravité en abscisse et l'index de vraisemblance en ordonnée. Le diagramme de Farmer illustre aussi les trois zones de criticité C1, C2 et C3 qui sont définies selon le référentiel de décision. L'aire au dessous de la courbe verte correspond à la zone de criticité C1 (acceptable), l'aire au dessus de la courbe rouge correspond à la zone de criticité C3 (inacceptable) et l'espace entre les 2 courbes rouge et verte représente la zone de criticité C2 (tolérable sous contrôle).

Selon la figure 45, nous remarquons que les risques initiaux moyens des scénarios issus des dangers juridique, financier, management, physico-chimique, stratégique, environnement, politique et communication appartiennent au domaine à risque inacceptable (C3).

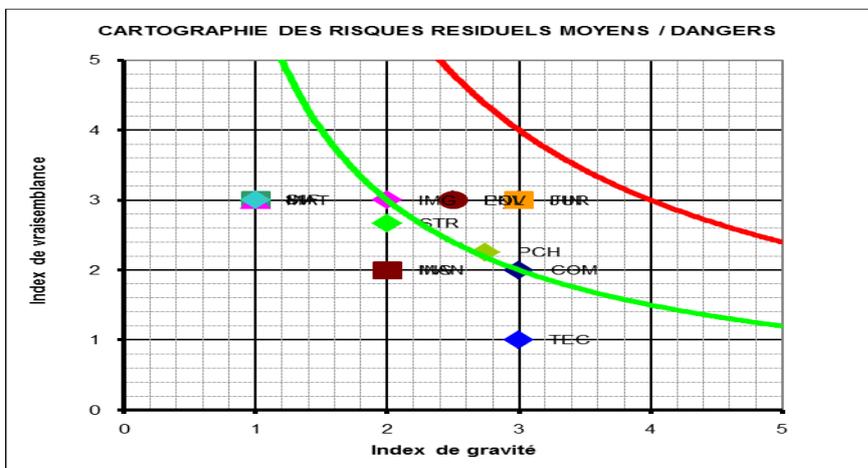
Figure 45. Diagramme de Farmer de la cartographie des risques initiaux moyens par dangers



Source : Auteur

Après l'application des actions de réduction des risques initiaux, aucun risque résiduel moyen n'appartient encore à la zone C3 qui correspond au risque inacceptable (Figure 46). Les risques résiduels moyens des scénarios issus des dangers de type juridique, financier, physico-chimique, environnement, politique et communication appartiennent au domaine à risque tolérable sous contrôle (C2). Par conséquent, les risques résiduels issus de ces dangers nécessitent des actions de contrôle pour qu'ils ne quittent pas la zone C2 et retournent à la zone C3.

Figure 46. Diagramme de Farmer de la cartographie des risques résiduels moyens par dangers



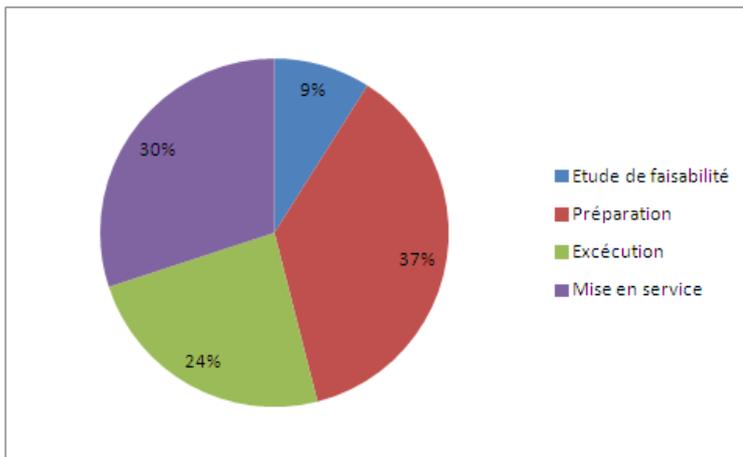
Source : Auteur

### 3. Analyse et évaluation par système

#### 3.1. Répartition des situations dangereuses de priorité « 1 » par phase

Nous allons détailler, dans ce qui suit, seulement les situations dangereuses de priorité « 1 » vu la gravité des conséquences qu'elles peuvent avoir sur le système étudié. Les 33 situations dangereuses de priorité « 1 » réparties par phase du système sont présentées en pourcentage dans la figure 47. Selon la figure ci-dessous, nous remarquons que les deux phases de préparation et de mise en service contiennent les parts les plus élevées de situations dangereuses.

Figure 47. Répartition des situations dangereuses de priorité 1 par phase du projet



Source : Auteur

La figure 47 fait apparaître deux types de phases qu'il est possible de classer selon leur importance relative, de la manière suivante :

- Phases avec proportion élevée de situations dangereuses : la phase de préparation (37%) et la phase de mise en service (30%).
- Phases avec proportion moyenne à faible de situations dangereuses : la phase de construction (24%) et la phase de l'étude de faisabilité (9%).

Tableau 26. Répartition des situations dangereuses et des scénarios par phase du projet

Nombres de Situations Dangereuses identifiées et de scénarios analysés

Système		nSD	nSc
1	Etude de faisabilité (A)	3	3
2	Préparation (B)	12	12
3	Exécution (C)	8	8
4	Mise en service (D)	10	10
		33	33

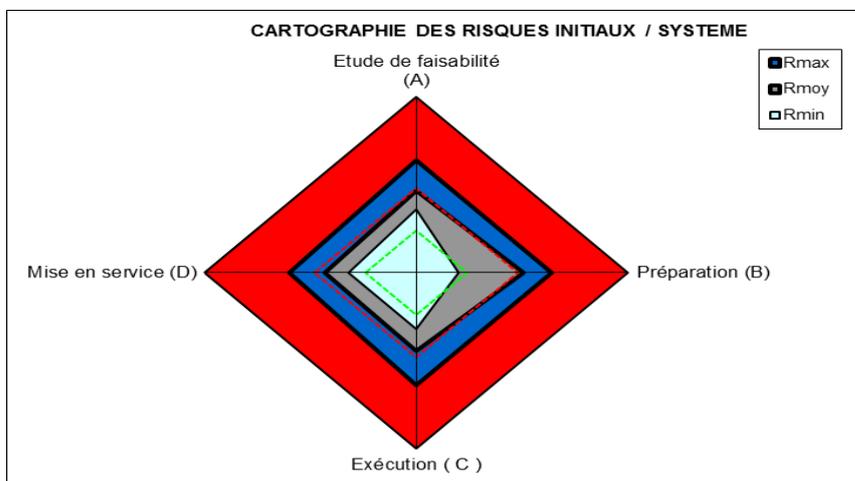
Source : Auteur

Il est clair que les phases de préparation et de mise en service du projet « TuNur » contiennent le nombre le plus élevé de situations dangereuses. La phase de préparation est la phase la plus exposée aux 14 classes de dangers puisqu'elle est exposée à 12 situations dangereuses de priorité « 1 » et 12 scénarios de risques possibles (Tableau 26). Ceci est logique vu la complexité des procédures administratives, juridiques et financières obligatoires pour avoir toutes les autorisations nécessaires et les accords des différentes parties prenantes. En effet, cette phase est décisive pour la mise en œuvre du projet. D'ailleurs, depuis 4 ans, le projet est bloqué dans cette phase sans aucun avancement vers la phase de construction. Ce résultat prouve la délicatesse de la phase de préparation et sa forte vulnérabilité aux différentes classes de dangers génériques.

### 3.2. Diagramme de Kiviat

Selon l'approche d'analyse par système, les axes des diagrammes de Kiviat (Figure 48 et Figure 49) représentent les 4 phases du projet (étude de faisabilité, préparation, exécution et mise en service) qui ont été présentées et expliquées dans l'analyse détaillée du système. Les axes contiennent aussi les index de risques minimum, moyen et maximum correspondant à chaque phase du système.

Figure 48. Diagramme de Kiviat de la cartographie des risques initiaux par phase du système



Source : Auteur

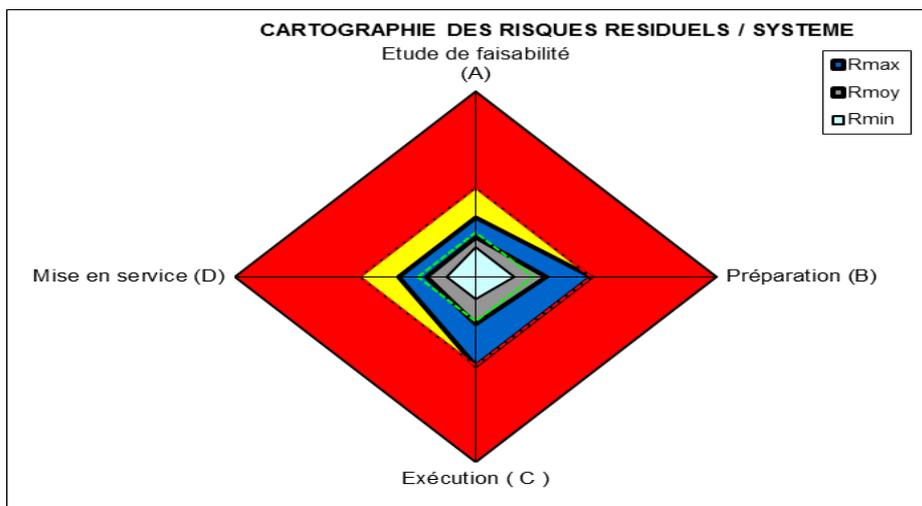
D'après le diagramme de Kiviat (Figure 48), nous pouvons faire l'interprétation suivante :

Les scénarios de risques initiaux qui sont issus des quatre phases du projet ont tous des index de risque maximum de criticité C3 (inacceptable). Ainsi, toutes les quatre phases doivent être une priorité pour les responsables du projet afin d'éviter des conséquences

graves. Parmi les quatre phases, seulement les scénarios de risques initiaux issus de la phase de préparation ont un index de risque moyen de criticité C3 (inacceptable). Ce résultat confirme encore la vulnérabilité de cette phase qui nécessite plus d'importance que les trois autres phases.

Le diagramme de Kiviat suivant (Figure 49) permet de juger de l'efficacité et de l'ampleur des actions de maîtrise des risques initiaux qui ont été proposées et bien expliquées dans l'AGR scénarios.

Figure 49. Diagramme de Kiviat de la cartographie des risques résiduels par phase du système



Source : Auteur

Après la mise en œuvre des actions de réduction des risques initiaux, nous pouvons faire les remarques suivantes :

- Aucun des index des risques résiduels (minimum, moyen ou maximum) qui sont issus des quatre phases n'a une criticité C3 (inacceptable). Ainsi, les actions de réduction des risques mises en œuvre ont réussi à amener tous les index des risques à des niveaux de criticité C2 (tolérable sous contrôle) ou C1 (acceptable). Ce résultat prouve l'efficacité des actions appliquées.
- Les risques résiduels issus des phases de préparation et d'exécution ont un index de risque moyen résiduel de criticité C2 (tolérable sous contrôle). Par conséquent, les risques résiduels issus de ces phases sont tolérables sous contrôle et nécessitent des actions de contrôle telles que l'assurance.

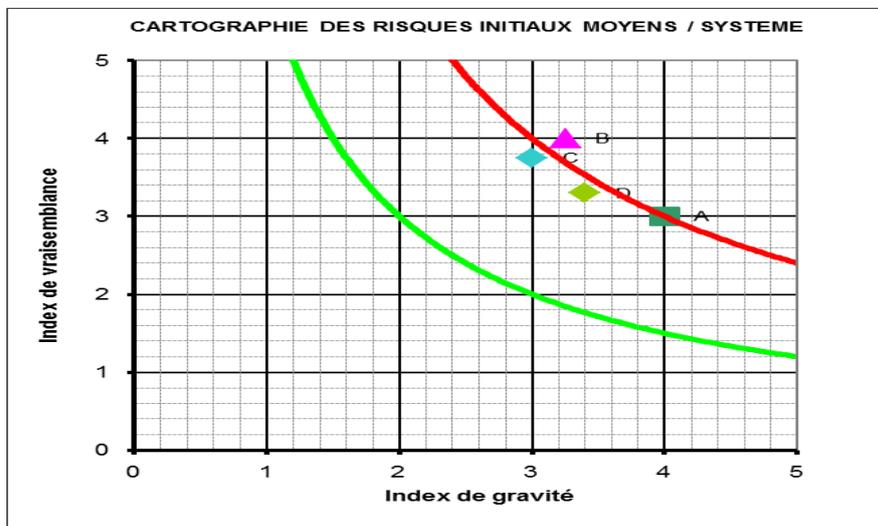
Selon les deux diagrammes de Kiviat ci-dessus, nous remarquons que l'index de risque moyen initial des scénarios de la phase de préparation est le seul qui a une criticité

initiale C3 (inacceptable). A la suite des actions de réduction, le risque moyen résiduel des scénarios de la phase préparation est le seul qui a une criticité résiduelle C2 (tolérable sous contrôle). Ce constat nous amène à insister sur la forte vulnérabilité de la phase de préparation aux différents dangers expliqués.

### 3.3. Diagramme de Farmer

Les deux diagrammes de Farmer (Figure 50 et Figure 51) permettent de présenter d'une manière globale les risques initiaux et résiduels par rapport aux quatre phases du projet et selon les trois zones de criticité C1, C2 et C3.

Figure 50. Diagramme de Farmer de la répartition des risques initiaux moyens par phase du système

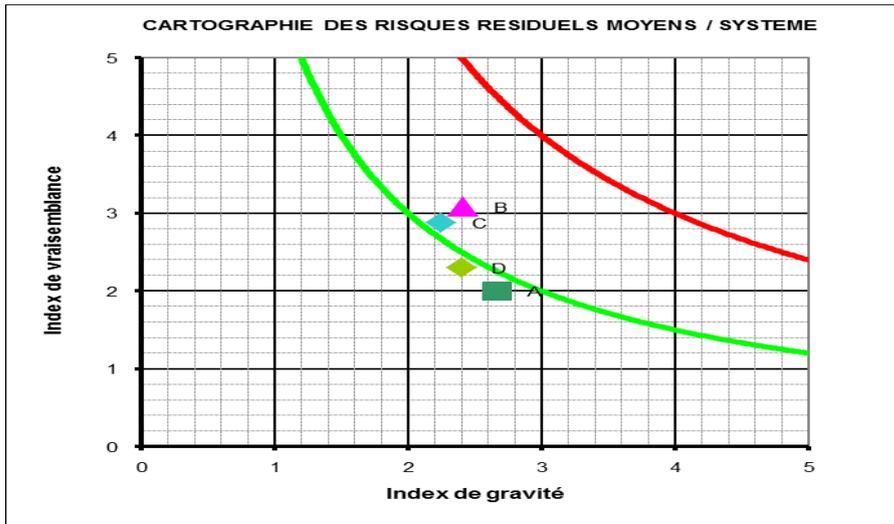


Source : Auteur

Selon la figure 50, nous remarquons que les risques initiaux moyens des scénarios issus des phases de l'étude de faisabilité (A) et de préparation (B) appartiennent au domaine à risque inacceptable (C3). Ainsi, ces deux phases sont les plus vulnérables aux différents dangers étudiés.

Après l'application des actions de réduction des risques initiaux (Figure 51), aucun risque résiduel moyen n'appartient encore à la zone à risque inacceptable (C3). Les risques résiduels moyens des scénarios issus des phases de préparation (B) et d'exécution (C) appartiennent au domaine à risque tolérable sous contrôle (C2). Donc, les risques résiduels issus de ces deux phases nécessitent des actions de contrôle pour qu'ils ne quittent pas la zone à risque tolérable (C2) et retournent à la zone à risque inacceptable (C3).

Figure 51. Diagramme de Farmer de la Répartition des risques résiduels moyens par phase du système



Source : Auteur

#### 4. La liste des risques majeurs

Il y a toute une démarche à suivre pour déterminer la liste des 5 à 10 risques majeurs susceptibles d'affecter le projet « TuNur ». Les étapes de cette démarche sont les suivantes :

- Nous allons retenir, à partir des 33 scénarios de risques déterminés, les scénarios de risques de criticité initiale C3 (inacceptable) ;
- A partir des scénarios choisis, nous allons retenir seulement ceux qui ont un risque moyen supérieur à un seuil fixé (qui est égal à 15 dans notre cas) ;
- Ensuite, nous allons seulement retenir ceux qui ont une gravité supérieure ou égale au seuil prédéterminé (qui est égal à 4 dans notre cas) ;
- Si le nombre de risques majeurs dépasse le nombre de 10, nous allons prendre seulement ceux qui ont une vraisemblance supérieure ou égale à un seuil prédéterminé (5 ou 4).

Après avoir fait cette démarche, nous avons trouvé que les risques majeurs, dans le cas du projet « TuNur », sont au nombre de 8. Ces risques seront détaillés dans ce qui suit.

##### 4.1. Le risque de non obtention de l'autorisation de construction de la centrale

- Les causes du risque : ce risque est causé surtout par l'absence d'un cadre légal pour l'exportation de l'électricité produite à partir des ER en Tunisie, le monopole de la STEG,

la corruption et la complexité des procédures administratives. En plus, l'instabilité politique, depuis la révolution, et le manque de transparence sont tous des facteurs qui ont aggravé la situation. En effet, la Société « TuNur » a dû attendre de 2009 jusqu'à mai 2015 qui est la date de promulgation de la nouvelle loi qui offre un cadre juridique pour l'exportation de l'électricité produite à partir des ER. Selon cette loi (Article 25), la commission technique examine le cahier des charges et l'offre relative au projet de production de l'électricité verte pour l'exportation et soumet ses résultats et ses propositions à la commission supérieure de production privée d'électricité pour octroyer ou refuser de donner l'autorisation de réalisation du projet. Certains experts considèrent cette démarche comme étant une indication de transparence, mais d'autres considèrent que ces nouvelles procédures sont un alourdissement des procédures administratives pour les investisseurs étrangers.

- Les actions de réduction du risque : il est nécessaire d'entamer des discussions avec les responsables gouvernementaux pour changer le cadre réglementaire et faciliter les procédures avec les responsables dans le ministère concerné. En plus, la formation d'une équipe de spécialistes pour discuter de tous les points nécessaires avec les responsables de la STEG s'avère nécessaire. Il faut aussi former une cellule de crise chargée de communication avec les responsables politiques, les députés de l'Assemblée des représentants du peuple et les administrations publiques en ce qui concerne le cadre légal convenable à l'exportation des ER.

#### **4.2. Le risque de non respect des délais**

- Les causes du risque : puisque la construction sera faite par tranches, tout retard dans la construction de la première tranche aura des répercussions sur les autres tranches. Le retard peut être surtout causé par la bureaucratie, la corruption, les procédures administratives longues et compliquées, le retard dans la signature des contrats et la mauvaise estimation du temps de traitement des dossiers. Ce retard peut être aussi causé par la mauvaise gouvernance dans les administrations publiques tunisiennes. La nouvelle loi sur la production de l'électricité à partir des ER a alourdi encore les procédures administratives.

- Les actions de réduction du risque : il est conseillé de former une équipe d'experts tunisiens de disciplines différentes, notamment juridique et financière, afin de se charger de toutes les procédures administratives, tout en respectant les délais fixés et le planning

initial de l'exécution du projet. En plus, il sera intéressant d'établir un plan d'action détaillé de toutes les procédures administratives nécessaires et les délais à ne pas dépasser.

### **4.3. Le risque de non-atteinte de la performance désirée**

-Les causes du risque : ce risque peut être causé par l'utilisation de la technologie CSP à tour qui n'est pas encore mature, le réchauffement à sec qui n'est pas encore largement expérimenté et l'utilisation de câbles *HVDC* sous terrains pour le transfert de l'électricité de la Tunisie vers Malte, avec une profondeur qui peut atteindre 2000 m. En plus, il y a l'absence de retour d'expérience en Tunisie, puisque c'est le premier projet CSP d'une grande taille. Ce risque peut aussi être causé par un problème dans la réflectivité des miroirs qui peuvent être non conformes avec les exigences et les spécifications requises.

La non-atteinte de la performance désirée peut être aussi causée par la solidification ou la corrosion du sel fondu et par les conditions climatiques (foudre ou tempête de sable) qui peuvent affecter considérablement le fonctionnement des miroirs et de la tour. En général, la tour et le cycle de vapeur sont les principaux points de défaillances.

-Les actions de réduction du risque : l'assurance, le recours à des fournisseurs de renommée internationale et le recours à la maintenance préventive et régulière, même si les coûts de la maintenance sont élevés, sont toutes des actions nécessaires. Un suivi continu concernant le respect des cahiers des charges pour tout le matériel qui sera fabriqué en Tunisie vu l'absence d'expérience dans ce domaine.

### **4.4. Le risque de difficulté de financement**

- Les causes du risque : le développeur du projet peut rencontrer, durant la phase d'exploitation, des difficultés pour couvrir le financement du différentiel du coût de production. Ce risque peut être causé par les changements des réglementations dans les pays concernés par l'achat de l'électricité ou par l'absence d'un engagement ferme. Il peut être causé aussi par un changement dans le paysage politique qui peut influencer les politiques environnementales et les orientations stratégiques dans un pays.

- Les actions de réduction du risque : ce risque peut être atténué par l'engagement des différents gouvernements européens concernés par l'achat de l'électricité produite par la centrale « TuNur ». Cet engagement se matérialise, notamment, par la mise en œuvre du mécanisme "*Feed-in Tariff*" afin de résorber ce gap. Ce risque peut être aussi atténué par

une excellente coordination entre les différents bailleurs de fonds. Le recours à des mécanismes de financements spécifiques est aussi recommandé.

#### **4.5. Le risque fiduciaire initial**

- Les causes du risque : ce risque est causé par la complexité des procédures financières et la multiplicité des bailleurs de fonds pour un tel méga projet. Ce projet nécessite un mécanisme de gestion commune de toutes les ressources financières mobilisées ce qui aggrave encore le risque fiduciaire. Il faut donc que la société de projet créée sera capable d'assurer la bonne gestion financière du projet.

- Les actions de réduction du risque : la spécification des clauses de responsabilité financière qui concernent les accords entre la société de projet et les différents bailleurs de fonds. Les bailleurs de fonds doivent s'assurer, avant le décaissement, de la finalisation par l'emprunteur d'un dispositif de comptabilité et de gestion financière jugé satisfaisant. Le recours au FTP et à la banque africaine de développement est fortement conseillé afin de bénéficier des privilèges dans l'obtention des crédits.

#### **4.6. Le risque d'explosion ou le risque d'incendie**

- Les causes du risque : ce risque peut être causé par l'utilisation des combustibles fossiles (gaz ou gas-oil) dans ce type de centrale afin de conserver le sel fondu à haute température et le maintenir à l'état liquide (la solidification se fait à 110°C) ainsi que pour l'alimentation d'appoint de la centrale. En plus, ce risque peut être causé par l'existence de vapeur à haute pression.

- Les actions de réduction du risque : les consignes de sécurité doivent être placées dans tout le site et elles doivent être écrites dans la langue arabe et anglaise pour éviter toute confusion. La souscription à une assurance, la maintenance régulière du système de stockage de la chaleur et la prise de toutes les précautions concernant l'utilisation et le stockage des combustibles fossiles dans le site de la centrale sont fortement conseillées.

#### **4.7. Le risque d'attentats terroristes**

- Les causes du risque : l'existence des étrangers de différentes nationalités sur le site du complexe solaire peut être une opportunité pour les terroristes pour la prise d'otages afin de demander la libération de terroristes qui sont déjà arrêtés par les forces de l'ordre.

- Les actions de réduction du risque : la limitation du nombre des étrangers sur le site, le renforcement des mesures de sécurité et la souscription à une assurance.

#### **4.8. Le risque de conflits avec les riverains ou risque de non acceptation sociale**

-Les causes du risque : cette région a souffert, pendant des années, de l'absence totale de tout signe de développement et par la dégradation de l'infrastructure de base. Depuis 2011, cette région a été le théâtre de plusieurs manifestations et *sit-in* par les habitants qui réclament leur droit au développement afin de diminuer l'isolement de cette région. Nous allons citer, dans ce cadre, un exemple concret. En effet, depuis quelques années, l'État a commencé un projet qui vise la mise en valeur de 2500 hectares de terre désertique par le biais de sa plantation en palmiers dattiers, en octroyant à chacun des agriculteurs locaux 1,5 hectares et un logement rural. Ce projet a suscité récemment des émeutes par les jeunes bénéficiaires qui réclament la régularisation de la situation foncière des lotissements obtenus. Il faut donc tenir au sérieux la relation avec les riverains en visant surtout l'emploi local. Mais la question qui se pose y'aura t'il dans cette région les compétences nécessaires pour un tel projet ?

Cette région est marginalisée, ainsi les manifestations et les protestations sont récurrentes ce qui nécessite toute une approche participative pour éviter tout conflit potentiel avec les riverains. En effet, il ne faut jamais sous estimer le risque de non acceptation qui peut mener à des confrontations avec les habitants locaux.

-Les actions de réduction du risque : la diminution de ce risque se fait grâce à deux principales actions qui sont la création de l'emploi local et le recours à l'approche participative. Ainsi, il faut miser sur l'emploi local, notamment durant la phase de construction qui nécessite un nombre élevé de main d'œuvre peu qualifié. Ces emplois peuvent être directs et indirects. En effet, le projet va permettre l'augmentation de l'activité des entreprises locales pour la fourniture de matériaux et d'équipements nécessaires pour les travaux de construction, pour le logement et pour la restauration des travailleurs. Les petites et moyennes entreprises locales doivent être favorisées pour participer aux différentes prestations, notamment la construction des logements pour les travailleurs permanents, la maintenance, le gardiennage, le nettoyage, etc.

Il sera aussi très recommandé de créer une commission d'emploi chargée d'étudier la meilleure façon de favoriser l'emploi local et d'organiser des formations de courte durée pour les jeunes diplômés afin d'acquérir les nouvelles compétences et les qualifications

requis pour ce projet, tout en essayant de réaliser une certaine parité entre l'emploi des femmes et des hommes.

La deuxième action concerne la mise en œuvre d'une approche participative. Il sera indispensable donc d'organiser des consultations publiques d'information et de concertation. Ces consultations seront ouvertes à la population locale, aux députés qui représentent la région ou le gouvernorat dans l'Assemblée des représentants du peuple, aux représentants des différents ministères concernés par le projet (Ministère des investissements et de la coopération internationale, Ministère des domaines de l'état et des affaires foncières, Ministère de l'environnement et du développement durable, Ministère de l'industrie, de l'énergie et des mines, etc.), aux représentants de la STEG et de l'ANME et aux différentes autres parties prenantes. L'objectif de ces consultations sera la représentation des résultats de l'étude d'impact environnemental et social, la collecte des différentes questions et des principales occupations de la population locale et la discussion de ces préoccupations avec les différentes parties prenantes afin de satisfaire les attentes des citoyens.

Afin de maintenir l'acceptabilité du projet et la coopération des parties prenantes locales, tout au long de la vie du complexe solaire, il faut élaborer une stratégie spécifique à la gestion des relations avec les parties prenantes et à la communication pour accompagner le projet.

## **Section 2. Les stratégies et la structure de gouvernance énergétique adéquates pour la Tunisie : vers une gouvernance des risques**

En se basant sur les résultats de l'AGR, nous allons proposer les stratégies à mettre en œuvre afin de faire face aux risques majeurs déjà mentionnés. Nous allons, par la suite, proposer un cadre d'analyse pour la transition vers les ER, en Tunisie, en se basant sur la structure de gouvernance adéquate pour chaque phase du processus de transition. En effet, la notion de gouvernance a connu une énorme popularité, ces dernières années, surtout dans la littérature qui concerne l'environnement et les risques.

Bagnasco et Le Galès (1997, p.38) définissent la gouvernance comme étant « *un processus de coordination d'acteurs, de groupes sociaux, d'institutions pour atteindre des buts propres discutés et définis collectivement dans des environnements fragmentés et*

*incertains* ». Moujahid (2011, p.51) considère que « *le concept de gouvernance aborde la question des politiques publiques et des mécanismes de gestion en termes de processus souples dont la finalité serait la prise en compte des intérêts exprimés par les différents intervenants économiques, politiques et sociaux (y compris les plus minoritaires)* ». D'une manière générale, le terme de gouvernance désigne l'évolution des formes de l'action publique.

## **1. Recommandations et stratégies à adopter**

### **1.1. L'application de mécanismes innovants de financement et d'incitations spécifiques aux énergies renouvelables en Tunisie**

La Tunisie doit opter pour des mécanismes innovants qui sont convenables au contexte tunisien. En fait, importer les stratégies et les instruments qui ont réussi dans d'autres pays ne sera pas une solution efficace. Les mécanismes innovants représentent la combinaison de plusieurs mesures incitatives et d'une organisation institutionnelle basée sur plusieurs acteurs qui sont en cohérence avec le contexte socio-économique et institutionnel du pays.

Parmi les mécanismes innovants appliqués en Tunisie, on peut citer le mécanisme PROSOL pour le développement de la filière de CES (Omri, Chtourou et Bazin, 2015b) et le mécanisme PROSOL-Elec pour le développement des installations PV qui sont raccordées au réseau. Il sera très souhaitable de créer et d'appliquer un mécanisme innovant pour la diffusion de la technologie CSP. Nous proposons de créer un mécanisme pour promouvoir la technologie CSP décentralisée dans les zones isolées, pour la cuisson, par exemple, afin d'avoir des effets d'apprentissages, de diminuer les coûts et surtout d'acquérir l'expérience nécessaire pour implanter des projets de grande taille.

En plus, le gouvernement doit recourir à des mécanismes tels que les avantages fiscaux indirects, la subvention publique à l'investissement aux usagers, le système de crédit spécifique, la ligne de crédit dédiée ainsi que la facturation nette (*net metering*) et l'évolution progressive vers le tarif d'achat garanti.

Pour assurer le financement des grands projets d'ER pour la production de l'électricité par le secteur privé dans le cadre de PPP, plusieurs pays font recours à l'approche de "*project finance*" ou le financement de projet. Cette approche consiste à collecter et organiser les divers apports de fonds (privés, publics ou mixtes) nécessaires

pour des mégaprojets d'ER (des parcs éoliens ou des centrales CSP) en veillant sur leur viabilité financière. Cette approche se distingue par le fait que la rémunération des apports de fonds sera majoritairement faite par les *cash-flows* générés par le projet lui-même. Le financement de projet permet à l'investisseur de bénéficier de la déconsolidation du coût initial de l'investissement du bilan vu l'importance des fonds mis au début, de recourir à la combinaison de fonds propres et de dette bancaire et de faire supporter la majorité des risques liés au projet par la société de projet. Cette approche reste encore assez compliquée et elle n'est pas encore appliquée en Tunisie, mais elle est appliquée surtout au Maroc, donc il n'est pas impossible de la transférer vers la Tunisie.

Bien que le "*project finance*" soit appliqué dans plusieurs pays, il reste une procédure assez compliquée qui requiert un niveau d'expertise élevé de la part des banques ainsi qu'une étude approfondie des aspects financiers, juridiques et contractuels liés au projet. Cette analyse approfondie est appelée phase de "*Due Diligence*" et elle nécessite le recours à des cabinets d'avocats d'affaires et des consultants externes.

## **1.2. Le renforcement du partenariat public privé dans le secteur des énergies renouvelables**

La Tunisie fait face à des grands défis économiques et sociaux puisqu'elle doit accélérer le développement économique en présence de contraintes budgétaires sérieuses. Cette situation délicate nécessite le renforcement du PPP en permettant au secteur privé de participer à la réalisation de projets d'utilité publique, dans le domaine des ER, ce qui va alléger les charges de l'État. Les PPP sont donc une opportunité pour répondre à des besoins nationaux urgents comme la création d'emplois et la mise en place de projets de développement, notamment dans les régions marginalisées.

Le PPP est un contrat à long terme entre une entité publique et une entité privée (constituée par une ou plusieurs entreprises privées) dans le but de fournir un service qui est traditionnellement fourni par le secteur public. C'est un partenariat qui permet la participation du secteur privé, selon des niveaux différents (du financement jusqu'à l'exploitation), tout en permettant à chaque partie de faire ce qu'elle fait de mieux.

Même si le recours aux PPP a des inconvénients et a échoué à atteindre les objectifs escomptés dans quelques pays, il reste, néanmoins, une solution indispensable pour faire décoller les ER, en Tunisie, sans alourdir le budget de l'État. En effet, les PPP ont fait preuve de réussite dans plusieurs pays, notamment en Amérique latine. En plus, plusieurs

baillleurs de fonds internationaux exigent du PPP pour financer les projets d'ER et aussi pour octroyer des subventions.

Le secteur privé représente un relais de transition vers les ER qu'il faut soutenir et encourager, en mettant en place un climat des affaires qui encourage les investisseurs nationaux et étrangers. La participation du secteur privé aux projets d'ER permettra au gouvernement de réaliser ses objectifs (30% d'ER d'ici 2030) dans un contexte difficile de contraintes budgétaires. Les PPP sont une solution intéressante pour la Tunisie qui n'a pas les moyens ni pour couvrir les pertes financières des entreprises publiques ni pour investir dans la rénovation et l'extension de son réseau d'électricité. En effet, grâce aux meilleures compétences humaines et financières des opérateurs privés, il sera possible d'offrir de meilleurs services à un plus grand nombre d'utilisateurs et surtout avec un meilleur prix. Ainsi, l'intégration d'un partenaire privé peut être une opportunité pour faire face aux retards, aux surcoûts et à l'absence de toute sorte d'innovation et de créativité par les entreprises publiques tunisiennes.

Il existe, dans les pays de la zone MENA, plusieurs projets d'ER qui sont financés dans le cadre d'un PPP. On peut citer la centrale thermo-solaire de « Hassi R'MEL » d'une capacité de 25 MW (Algérie), le parc éolien du Golf du Suez de 250 MW (Egypte), le parc éolien de « Koudia Bida » de 50 MW (Maroc) et la centrale CSP « d'Ouarzazate » de 160 MW (Maroc).

Il existe déjà, en Tunisie, des projets de PPP qui ont fait preuve de réussite tels que les centrales d'électricité qui vendent l'électricité à la STEG selon des tarifs fixés par un cahier des charges. En effet, il existe actuellement, en Tunisie, neuf projets de type PPP qui ont été réalisés, entre 1990 et 2014, avec un total d'investissement de l'ordre de 7052 millions de dollars. Tous les projets sont opérationnels et concernent quatre secteurs : l'énergie (4), le transport (1), les télécommunications (3) ainsi que l'eau, l'assainissement et le traitement (1). La participation du secteur privé tunisien est dans deux projets uniquement (Banque Mondiale, 2016).<sup>42</sup>

Auparavant, les projets de type PPP étaient encadrés par des lois sectorielles et des décrets qui ont pour but d'expliquer les procédures de passation des grands projets. Afin d'instaurer un climat favorable aux PPP, un projet de loi relatif aux PPP vient d'être adopté

---

<sup>42</sup> Données collectées à partir du site de la Banque Mondiale, accessibles sur le lien suivant : <http://ppi.worldbank.org/snapshots/country/tunisia>

le 13 octobre 2015 par la commission des finances, de la planification et du développement relevant de l'Assemblée des représentants du peuple. Ce projet de loi est censé faciliter, clarifier et organiser les procédures des PPP et surtout assurer une gestion efficace des risques contractuels qui sont omniprésents dans ce type de contrats complexes. L'objectif de cette loi est de fournir un cadre législatif et institutionnel unifié qui incite au développement des PPP afin de pouvoir offrir des meilleurs services à la population avec des tarifs abordables.

Cette loi n'a pas fait l'unanimité, en Tunisie, et elle est même considérée par l'UGTT comme dangereuse pour l'économie tunisienne et comme une sorte de « privatisation déguisée » des services publics. En effet, plusieurs experts estiment que l'économie tunisienne n'est pas encore prête pour la formule des PPP et que ceci va causer beaucoup plus de dégâts que de bénéfices. Ils stipulent que la conjoncture économique actuelle n'est pas encore adaptée à ce genre de partenariat. Il faut, plutôt, attendre jusqu'à avoir un climat d'affaires plus sain avec plus de transparence et moins de corruption.

Les contrats des PPP varient de la construction jusqu'à l'exploitation, selon la formule adoptée, et peuvent de ce fait avoir des répercussions sur les prix des services fournis. C'est cette répercussion qui est controversée. Certains stipulent que les PPP vont diminuer les prix des services grâce à la concurrence et à une meilleure gestion, d'autres estiment qu'ils vont plutôt causer une augmentation des prix.

Pour garantir la réussite des PPP, la Tunisie doit mettre en place un environnement propice à leur développement. En effet, les PPP peuvent jouer un rôle important dans le développement durable et la transition vers les ER à condition de mettre en place des conditions favorables et un environnement propice, notamment pour ce qui est des cadres juridiques, institutionnels et budgétaires.

En se basant sur les rapports élaborés par l'OCDE (2015a ; 2015b), nous pouvons dire que l'instauration d'un climat favorable aux PPP, en Tunisie, nécessite les actions suivantes :

- L'allègement des procédures administratives d'accès des investisseurs privés aux marchés qui sont d'habitude longues et compliquées en Tunisie.
- La mise en place d'un système financier solide et stable.
- La stabilité politique ce qui va encourager les investisseurs et diminuer le risque pays.

- La disponibilité des ressources humaines nécessaires pour l'évaluation et la gestion des projets de PPP. En effet, la planification, l'évaluation et l'exécution des projets PPP nécessitent des équipes hautement qualifiées qui sont capables d'assurer une gestion et un contrôle efficaces pour des projets de grande envergure, aussi bien au niveau national que régional. Il faut, donc, avoir des conseillers expérimentés en financement et en gestion des projets de PPP.
- Le recours à des fonds internationaux d'assistance tels que le fonds de conseil en infrastructure publique-privée (*Public-Private Infrastructure Advisory Facility* : PPIAF) qui appartient au groupe de la Banque Mondiale.
- La mise en place d'un cadre institutionnel clair qui favorise et encourage les PPP. En effet, dans la phase d'évaluation des projets, il sera primordial de s'assurer d'une allocation efficace des dépenses de l'État en mettant un cadre institutionnel et juridique qui permet de respecter la concurrence et d'éviter toute sorte de corruption.
- La réalisation d'une meilleure coordination des autorités publiques est primordiale pour réaliser un cadre propice aux PPP, surtout dans les phases de planification et de préparation des projets. Cette coordination nécessite l'instauration de mesures pratiques pour renforcer la coopération entre les parties prenantes (notamment les ministères concernés, les entreprises publiques, etc.) comme, par exemple, la création d'une entité chargée des PPP dans les ministères concernés, notamment le ministère des finances.
- La mise en place d'un suivi actif de la mise en œuvre des projets PPP et l'évaluation continue de tous les défis rencontrés afin d'avoir un retour d'expérience qui sera utilisé pour des projets futurs.

### **1.3. Le recours aux approches participatives**

Les problèmes d'environnement et de développement durable nécessitent une participation accrue de tous les acteurs au processus de décision vu leurs caractéristiques spécifiques. Les approches participatives sont souvent avancées comme des outils de gouvernance pour les questions environnementales bien que leur application reste encore limitée aux pays développés.

Concernant les projets d'ER, ils sont souvent confrontés à une opposition locale ce qui peut reporter ou arrêter leur mise en œuvre et ceci malgré le fait que ces projets bénéficient, en général, d'un support public élevé. Plusieurs études ont traité le phénomène de "*Nimbysism*" comme étant responsable de la différence entre l'attitude positive des

autorités publiques et l'attitude négative des habitants locaux (Devine-Wright, 2005 ; Wolsink, 2006 ; 2007).

La participation locale au financement et à la prise de décision peuvent augmenter le support local pour les projets d'ER (Devine-Wright, 2005). En effet, la participation à la prise de décision facilite la mise en œuvre des projets d'ER en comparaison à la prise de décision de type "Top-Down". Cependant, l'approche participative ne va pas transformer les opposants en des partisans, mais plutôt elle va permettre à des associations et à des citoyens de donner leurs avis sur certains aspects du projet pour qu'il soit mieux adapté aux besoins de la population locale ce qui va faciliter son acceptation.

Il est à noter que l'approche participative doit être privilégiée dans toutes les étapes du projet. Ce qui nécessite d'identifier, tout d'abord, les parties prenantes concernées par le projet et de faire, ensuite, un planning des approches participatives à mettre en œuvre et des manières de collaboration avec les autorités locales. En effet, il faut organiser des focus-groupes, des consultations et des ateliers, à partir de l'élaboration de l'étude socio-économique et tout au long de l'exécution du projet. L'objectif primaire de ces méthodes sera de collecter les informations nécessaires concernant les attentes de la population locale, leurs besoins et leurs inquiétudes. Mais, il ne faut pas oublier de faire appel aux autorités locales administratives, aux associations et aux représentants de la population locale afin d'intégrer le processus décisionnel participatif.

En général, les grands projets d'ER bénéficient d'une perception positive de la part des différents acteurs, mais il ne faut jamais négliger les attentes très élevées des riverains, sinon la situation peut dégénérer. En effet, la population locale exprime des attentes élevées pour de tels projets telles que l'emploi des jeunes, l'intégration des femmes, la formation et le développement local de la région. Pour ces raisons, il faut avoir une communication régulière entre les acteurs locaux et les représentants du projet. En plus, l'approche participative ne doit pas se limiter seulement à la collecte des informations de base, mais elle doit accompagner tout le processus décisionnel.

Les approches participatives sont une manière de réunir des acteurs différents et qui sont concernés par un même sujet afin de contribuer de façon significative au processus décisionnel. Ces approches se différencient par le degré de participation des acteurs et le degré d'influence sur le processus décisionnel. D'une manière générale, on parle d'approche participative si le processus décisionnel fait intervenir les associations, les

syndicats, les scientifiques, les industriels et les citoyens, c'est-à-dire tous les acteurs qui sont extérieurs au cercle décisionnel classique qui est purement politico-administratif.

La participation des “*stakeholders*” (les porteurs d'enjeux) peut être à une ou plusieurs phases du processus décisionnel, selon la nature du problème à traiter. Ainsi, la participation peut être présente, depuis la phase d'identification du problème jusqu'à le contrôle et la révision de la décision, comme elle peut considérer seulement la phase de l'élaboration des solutions potentielles.

Les approches participatives sont multiples et le choix de l'approche convenable s'avère de plus en plus difficile et doit tenir compte du problème à traiter, de la nature et de l'urgence de la décision à prendre et du contexte culturel et social d'un pays ou d'une communauté. En fait, la même démarche participative peut aboutir à des résultats différents selon les cas. Parmi les approches participatives, on peut citer les ateliers multi-acteurs, les audiences publiques, les “*focus groups*”, les interfaces experts/décideurs, les jurys de citoyens, la médiation, la négociation réglementaire, les panels de citoyens, etc. Ces approches se différencient par le degré de participation des acteurs et par la nature des acteurs qui interviennent au cours du processus décisionnel et qui peuvent être des simples citoyens, des experts ou plusieurs types d'acteurs.

Le recours aux approches participatives dans le cas des projets d'ER a plusieurs avantages. Tout d'abord, la participation des différents acteurs au processus décisionnel, qui concerne la construction d'une centrale solaire ou d'un parc éolien, donne une certaine légitimité à cette décision et de ce fait diminue le risque de non acceptation de la décision par ces mêmes acteurs. En plus, l'approche participative permet aux décideurs d'accéder à une base informationnelle très intéressante qui concerne les préférences et les attentes des différents acteurs, surtout pour ce qui est de l'emploi local, la notoriété de la région d'implantation du projet et le développement de la région. Enfin, la participation des différents acteurs à la prise de décision va rendre le processus décisionnel plus transparent et donc plus crédible aux yeux des participants.

#### **1.4. Promouvoir l'investissement citoyen**

L'investissement citoyen dans le cas des projets d'ER vise le développement d'initiatives collectives et citoyennes pour la mise en œuvre et le financement de ce type de projets. Dans ce cas, les habitants d'une région peuvent investir dans des petits projets comme une toiture PV, par exemple, ou même dans des projets de moyenne taille comme

un petit parc éolien. Cette mutualisation des moyens ne permet pas seulement de diversifier les sources de financement, mais aussi d'améliorer la prise de conscience des citoyens. En effet, au cours de ce processus, les citoyens acquièrent des connaissances sur l'importance des ER, leurs modes de production et de consommation et leurs impacts locaux et globaux. L'investissement citoyen permet, donc, d'avoir des citoyens actifs dans la lutte contre le changement climatique et dans le processus de transition vers les ER.

Ce type d'investissement existe surtout en Allemagne, en Belgique, au Danemark et récemment en France. Mais dans les PED, il est très rare vu la complexité des procédures nécessaires et la nécessité d'un niveau de conscience élevé de la part des citoyens. En effet, l'investissement citoyen nécessite toute une démarche de mise en œuvre de mécanismes et d'outils adaptés pour promouvoir des projets d'ER développés par des petits développeurs locaux, des groupements de personnes ou des collectivités locales.

Pour les projets de taille moyenne, l'investissement citoyen peut avoir lieu suite à l'initiative d'un groupe de citoyens ou d'un développeur local qui veut participer au développement des ER dans sa région en faisant recours aux ressources financières des habitants de cette région. En ce qui concerne les grands projets d'ER, il sera possible aussi de mettre en place un système de livret d'épargne « énergies renouvelables » via le secteur bancaire afin de mobiliser l'épargne publique pour des grands projets d'ER. Dans ce cas, les investisseurs s'adressent à l'ensemble des citoyens pour leur proposer d'investir une partie de leurs économies dans des projets de grande envergure pour la production de l'électricité d'origine renouvelable en contrepartie du versement d'intérêts à un taux modéré mais garanti.

Un livret d'épargne peut être aussi totalement dédié à une région, dans ce cas un livret d'épargne pour investir dans des projets d'ER dans les régions intérieures et défavorisées, en Tunisie, sera souhaitable et bénéfique pour réduire les disparités régionales. Cette procédure doit être accompagnée de transparence et de visibilité pour permettre aux investisseurs citoyens d'avoir les informations nécessaires sur la traçabilité de l'utilisation de leur épargne, la nature des projets financés et l'avancement dans les projets.

En plus des recommandations et des stratégies citées ci-dessus, il est nécessaire aussi de promouvoir la coopération internationale et méditerranéenne et de consacrer plus de

ressources pour la R&D. Nous allons citer brièvement les autres stratégies nécessaires pour faire décoller les ER en Tunisie :

- Assurer un financement à long terme pour la R&D dans toutes les technologies d'ER, pour toutes les applications (électricité, chauffage, etc.) et à toutes les échelles (les grands projets et les applications décentralisées) ce qui va permettre de réduire davantage les coûts.
- Solliciter l'appui des institutions financières internationales et des organisations internationales pour réduire les coûts de financement des grands projets.
- Renforcer la coopération internationale et méditerranéenne.
- Mettre en œuvre une communication adéquate et efficace. En effet, les citoyens et tous les acteurs concernés par le secteur des ER doivent avoir les informations nécessaires et actualisées sur les objectifs du gouvernement, les moyens mis en œuvre, le cadre réglementaire et législatif et les réalisations faites. Afin d'assurer une telle communication, il faut mettre en place un site internet actualisé, des forums de discussion, des ateliers au niveau national et régional, etc.
- Promouvoir les associations de représentation des professionnels dans le secteur des ER (producteurs, installateurs, distributeurs de matériels et autres) afin de défendre les droits de ces professionnels et prendre en compte leurs attentes et leurs soucis.
- Organiser des formations dédiées aux différents métiers en lien avec les ER, notamment les installateurs, les bureaux d'études et d'ingénierie, les contrôleurs techniques, les banques, les assureurs, etc.
- Mettre en place des technopôles spécialisés dans les ER pour favoriser le rapprochement entre les laboratoires de recherches et les entreprises, le partage de savoir faire et la mise en place d'équipes communes.
- Favoriser le développement et l'émergence d'un tissu industriel dédié aux ER.

## **2. La structure de gouvernance énergétique en Tunisie : vers une gouvernance des risques**

Dans ce qui suit, nous allons présenter les différentes formes de gouvernance énergétique qui permettent de faciliter la diffusion des ER, en Tunisie. En effet, la gouvernance énergétique peut être formulée à travers quatre étapes : la gouvernance d'autorité, la participation du secteur privé à la gouvernance énergétique, la gouvernance participative locale et la gouvernance des risques.

## 2.1. La gouvernance d'autorité

Dans cette forme de gouvernance, le processus décisionnel est organisé autour de l'État qui est considéré comme le garant de l'intérêt général. Elle se caractérise, donc, par l'omniprésence de l'État, par une centralisation de la gestion des affaires publiques et par l'exclusion des individus et des communautés du processus décisionnel. Froger (2006) a qualifié cette forme de gouvernance de « gouvernance d'autorité ».

Cette forme de gouvernance se base sur une stratégie verticale de transition vers les ER qui est élaborée et mise en œuvre par le gouvernement et les agences publiques spécialisées, sans la participation ni du secteur privé ni des autres parties prenantes. En Tunisie, ceci a été le cas durant plusieurs années. Dans ce cas, le gouvernement fixe les objectifs à atteindre, les stratégies à mettre en œuvre et les mécanismes institutionnels et financiers à adopter. La STEG, l'ANME et le fonds de transition énergétique (FTE) sont les organismes publics spécialisés dans la mise en œuvre des stratégies qui concernent les ER. Ainsi, la stratégie de diffusion des ER et tout ce qui concerne la création d'un marché de technologies d'ER, la garantie de sa croissance et de sa pérennité et la stratégie de communication et de stimulation de la demande sont la vocation du gouvernement et des agences publiques. L'autorité publique est considérée comme étant la pierre angulaire de la transition vers les ER, en créant, gérant et contrôlant le marché des ER. Cette stratégie s'avère très efficace dans les premiers stades de transition vers les ER où le processus est encore risqué et nécessite un grand soutien public.

Cependant, cette forme de gouvernance possède plusieurs limites. En effet, elle permet de créer un marché restreint, non durable à long terme, qui dépend entièrement des dépenses de l'État et qui n'assure pas la complémentarité des ressources publiques et privées. En plus, sous cette structure de gouvernance, tous les risques et les coûts de transaction sont totalement supportés par les agences publiques. Enfin, cette structure fournit des coûts élevés causés par la bureaucratie et le manque de transparence. C'est pour cela qu'il s'avère de plus en plus nécessaire d'intégrer le secteur privé comme acteur principal et actif dans la stratégie de promotion des ER.

La STEG est le principal acteur dans le processus de transition vers les ER. En effet, la STEG est monopole de la production, du transport et de la distribution de l'électricité depuis sa création, en 1962. Au cours des années 1990, il y a eu une ouverture progressive avec l'introduction des auto-producteurs et des producteurs indépendants sur le marché.

Jusqu'à nos jours, la STEG reste l'acheteur unique et le distributeur unique de l'électricité. La loi de maîtrise de l'énergie de 2009 autorise les auto-producteurs à produire de l'électricité à partir des ER et à vendre le surplus à la STEG. Mais cette loi n'offre pas vraiment des conditions de rachat incitatives pour les auto-producteurs. La loi de 2015 contient une extension pour les collectivités locales et les établissements publics qui peuvent produire de l'électricité d'origine renouvelable et ont le droit de transporter l'électricité produite via le réseau national et aussi de vendre l'excédent de production à la STEG.

La STEG est confrontée toute seule à des défis majeurs. En effet, elle est censée fournir l'électricité nécessaire à des tarifs acceptables et dans un contexte difficile de dépendance énergétique et de contraintes budgétaires de l'État. Face à cette situation, le bilan de la STEG est déficitaire et elle souffre d'énormes problèmes financiers dus à une relation de non confiance de la part de ses clients qui amène souvent à un refus de paiement des factures.

Par conséquent, la STEG est incapable de poursuivre toute seule les investissements dans le domaine des ER sans la participation d'acteurs privés. En plus, la STEG est caractérisée par une gestion de type technocratique qui n'intègre ni la société civile ni les usagers au processus décisionnel qui concerne les orientations stratégiques de l'entreprise. En effet, après la révolution, il y a eu une revendication de plus de transparence et même des demandes de clarification sur un certain nombre de scandales et de mauvaises gestions, mais ceci n'a pas abouti à des modifications dans la structure de gestion de l'entreprise ni dans la relation avec les usagers. Une plus grande décentralisation a été demandée surtout en ce qui concerne les politiques de développement régional, mais il paraît que ceci n'est pas encore une urgence pour le gouvernement qui se penche sur les fondamentaux institutionnels.

Pour un pays comme la Tunisie qui a entamé sa stratégie de promotion des ER, depuis le milieu des années 1980, il s'avère qu'on a acquis suffisamment d'expérience et qu'il est temps que le gouvernement fait intervenir d'autres acteurs pour participer au processus de transition vers les ER, notamment le secteur privé. En plus, le contexte national ainsi que méditerranéen de promotion des ER nécessite la libéralisation de ce secteur vu que la STEG est incapable à elle seule de coopérer d'une manière efficace dans le cadre des grands projets tels que le PSM ou la construction d'une ligne à haute tension entre la Tunisie et l'Italie. Ce nouveau contexte nécessite l'émergence d'acteurs privés et

d'une nouvelle organisation du marché de l'électricité, ce qui va se traduire nécessairement par une mutation du statut de la STEG comme acteur majeur ou, peut être à long terme, le changement de son statut d'entreprise publique.

## **2.2. Participation du secteur privé à la gouvernance énergétique**

Face aux contraintes budgétaires de l'État, financer et subventionner des projets d'ER devient un fardeau, ce qui nécessite de faire appel aux acteurs privés comme acteurs principaux à côté des acteurs publics pour assurer la diffusion à grande échelle des ER. On passe donc à une nouvelle forme de gouvernance de la transition vers les ER qui est la forme basée sur les PPP. Cette structure de gouvernance accélère la promotion des ER à travers la participation des acteurs privés à des degrés différents depuis le financement jusqu'à l'exploitation. Le but initial d'un tel partenariat est de fournir les ressources financières nécessaires pour financer les projets d'ER, tout en diminuant la part du secteur public dans le financement de tels projets. En plus de participer au financement, les acteurs privés ont la capacité de mieux diffuser les innovations et de créer un marché d'ER plus développé. Au cours des années, ceci va permettre d'aller au-delà des niches de marché de technologies d'ER qui sont créés par les autorités publiques et qui sont fortement dépendants du niveau des dépenses de l'État, tout en diversifiant l'offre et en créant une industrie locale.

La participation du secteur privé permet d'avoir une meilleure gestion financière puisque l'objectif principal pour ces acteurs reste la rentabilité. Les PPP permettent de mieux prendre en compte les disparités et les spécificités des communautés locales et leurs dotations en ressources puisque ces facteurs ont des effets directs sur la rentabilité et la pérennité des projets d'ER. En plus, en cas de participation du secteur privé, l'État évalue, contrôle et même pénalise en cas de défaillance, mais si le projet est réalisé entièrement par des structures publiques, l'échec est entièrement supporté par l'État.

La STEG ne possède plus le monopole de production des ER, depuis 2009, grâce à la loi n° 2009-7 qui autorise l'autoproduction d'électricité verte et la vente de l'excédent à la STEG. La nouvelle loi de 2015 sur la production des ER va permettre d'élargir la possibilité d'autoproduction aux collectivités locales et aux entreprises publiques et surtout d'autoriser les entreprises privées à produire de l'électricité à partir des ER. Ainsi, une part du marché des ER en Tunisie va être sous l'emprise du secteur privé. Mais, il est à noter que la participation du secteur privé sera limitée à la production et que la STEG garde le

monopole de la distribution de l'électricité qu'elle soit d'origine renouvelable ou non renouvelable. De ce fait, la baisse des prix de l'électricité grâce à la concurrence n'est pas envisagée à ce stade puisque seule la libéralisation de la distribution permet d'atteindre un tel objectif.

En Tunisie, le PPP dans le secteur des ER est introduit d'une manière progressive. Cette stratégie prudente de libération progressive du secteur de l'énergie a été adoptée, dans plusieurs pays, puisque la libéralisation totale du secteur des ER, en Allemagne ou au Danemark, a eu des conséquences sur la volatilité des prix de l'électricité et la hausse des prix à court terme.

La libération progressive et prudente du secteur des ER se manifeste, par exemple, par la création de la filiale STEG-ER, en mai 2010, pour se charger du développement des ER. La STEG possède 35% des parts de cette filiale. Les autres actionnaires sont des bureaux d'études, des industriels, des banques et des institutions. La STEG-ER se charge surtout de la mise en œuvre du PST, en construisant et en exploitant des parcs éoliens et des centrales PV et CSP. Les activités principales confiées à la STEG-ER sont l'étude, la réalisation, l'exploitation et la maintenance des installations d'ER.

Parmi les avantages escomptés des PPP est d'effectuer des projets d'ER dans les régions marginalisées à l'intérieur de la Tunisie. Mais cet impact ne sera réel que par une vraie participation des acteurs locaux, ce qui va leur permettre d'exprimer leurs besoins et leurs attentes et même participer au processus décisionnel. En effet, le PPP est incapable à lui seul d'assurer la transition vers les ER, donc il est indispensable d'intégrer les populations locales et la société civile dans un tel processus.

### **2.3. Gouvernance participative locale**

Les stratégies des gouvernements en matière de développement durable et de transition vers les ER font souvent face à des conflits et des malentendus à cause de l'existence d'une multiplicité de points de vue souvent contradictoires. Quant à la procédure de prise de décision, il n'existe pas un modèle standardisé à suivre, mais ce qui est sûr est que le processus de décision traditionnel de type "top down" n'est plus convenable. Il faut plutôt recourir à la gouvernance participative car les besoins et les stratégies en matière d'environnement et d'ER ne peuvent être accomplis que par la participation de tous les acteurs. Il est essentiel alors de mettre en place une gouvernance qui est basée sur des processus participatifs multi-acteurs afin d'élaborer des politiques de

transition vers les ER qui sont ambitieuses, réalisables et qui bénéficient d'une large acceptation publique.

Il faut donc recourir à une gouvernance participative locale qui intègre les communautés locales dans la prise de décision qui concerne la transition vers les ER. De ce fait, cette forme de gouvernance se base sur une coordination des efforts des autorités publiques, des investisseurs privés et des communautés locales. En effet, la participation de ces derniers a un effet non négligeable sur l'acceptation des décisions concernant les choix énergétiques futurs, au niveau local. En plus, la gouvernance participative locale permet de réduire les coûts de transaction, en introduisant les acteurs locaux, dès le début, dans le processus décisionnel ce qui va éviter tous les conflits et les malentendus dans le futur.

Ainsi, si l'approche participative ne se caractérise pas par une circulation bidirectionnelle de l'information et par une interaction forte entre des points de vue divergents, elle ne sera ni constructive ni créatrice de solutions. Dans la plupart des cas des PED, le rôle de l'approche participative reste seulement informatif et n'a aucun impact direct sur la décision prise par les autorités qui demeure l'apanage des décideurs politiques et administratifs. Ainsi, d'une manière générale, le degré d'influence sur la décision est plus au moins faible et ne dépasse pas les recommandations qui peuvent ou non être prises en compte. La gouvernance participative locale doit donner aux citoyens la possibilité de s'impliquer dans les projets d'ER, en mobilisant l'épargne citoyenne au service des projets locaux.

En Tunisie, on n'a pas encore recouru à la gouvernance participative locale, mais il y a, quand même, des initiatives dans ce sens, bien qu'elles soient timides et limitées. Cependant, elles reflètent une intention du gouvernement de faire participer toutes les parties prenantes dans le processus de transition vers les ER. On peut citer le cas du débat national sur l'énergie qui a été lancé le 27 juin 2013. Ce débat a été organisé par le ministère de l'industrie, de l'énergie et des mines en partenariat avec l'ANME, la STEG et plusieurs entreprises opérant dans le secteur de l'énergie. Parmi les sujets discutés lors de ce débat, on peut citer les composantes du futur mix énergétique, l'interconnexion électrique avec l'Europe et les ER. Bien que cette initiative soit intéressante, on est encore loin d'avoir une vraie gouvernance participative.

La Tunisie a commencé aussi un programme de développement urbain et de gouvernance locale qui concerne les 264 municipalités tunisiennes et qui soutient le plan

d'investissement municipal du gouvernement durant la période 2014-2019. Ce programme bénéficie de l'appui de la Banque Mondiale et vise de soutenir le processus de décentralisation en Tunisie. Ce projet a pour objectif de doter les municipalités des moyens pour prendre les décisions, de renforcer leur capacité à fournir des services et de les rendre plus responsables

L'objectif principal de la gouvernance participative locale est d'améliorer les conditions de vie des populations locales tout en renforçant les capacités institutionnelles et de communication. Elle implique la participation des citoyens au processus de décision et le passage du statut de simples citoyens au statut de citoyens actifs dans la gestion des affaires publiques locales. La gouvernance locale renvoie à un processus de décentralisation qui nécessite que l'État transfère certains de ses pouvoirs aux collectivités locales. L'application d'une gouvernance participative locale nécessite la mise en œuvre de tous les moyens et les institutions capables de permettre aux citoyens de communiquer leurs besoins, de participer à la prise de décision au niveau local et d'apporter un plus au développement de leurs communautés.

La participation est loin d'être la panacée à tous les problèmes liés à l'environnement et au développement durable. En effet, la mise en œuvre de ces approches est souvent entachée des risques et des difficultés qu'il ne faut pas négliger. La participation en tant que principe ne peut être que bénéfique, mais c'est plutôt l'application de cette approche et son adaptation aux problèmes étudiés qui peuvent être sources de problèmes, ce qui nécessite le recours à la gouvernance des risques.

#### **2.4. La gouvernance des risques**

La complexité des questions environnementales, l'augmentation de l'incertitude et des risques, la multiplicité des acteurs concernés, les différentes perceptions des problèmes environnementaux et la multiplicité des conflits d'intérêts font que le processus décisionnel doit être de plus en plus proactif. En effet, il doit intégrer le retour d'expérience et gérer au mieux les différents risques inhérents au processus décisionnel, ce qui nécessite le recours à la gouvernance des risques.

La transition vers les ER est un processus qui comporte plusieurs risques et même l'adoption des instruments financiers convenables ainsi que les PPP et les approches participatives comportent aussi des risques divers. Il faut donc opter pour la gouvernance

des risques qui est une démarche globale de transition vers les ER et qui contient une combinaison d'instruments politiques, institutionnels et financiers de réduction des risques.

Dans ce qui précède, nous avons analysé les différents risques et barrières qui entravent la diffusion à grande échelle des technologies des ER. Il est clair que le succès de la diffusion des ER est très dépendant de la mise en œuvre réussie et harmonieuse de plusieurs mécanismes financiers, technologiques, de marché et institutionnels qui permettent de franchir les barrières et de réduire les risques perçus par les investisseurs comme étant des risques graves. Par conséquent, les politiques de promotion des ER doivent intégrer une approche multidimensionnelle, pluridisciplinaire et multi-acteurs qui met l'accent sur les facteurs qui diminuent les coûts technologiques, stabilisent le marché des ER et fournissent des institutions fiables et stables. Ainsi, une gouvernance énergétique adéquate doit être mise en place pour réduire les risques d'investissement, stimuler le développement des ER et augmenter leur part dans le mix énergétique.

La gouvernance des risques devient donc indispensable afin de faciliter l'éradication des barrières qui bloquent la diffusion des ER, ce qui va augmenter leur part sur le marché et améliorer le processus d'apprentissage. Par exemple dans le cas des PPP, il existe plusieurs risques contractuels qui sont dus à la complexité de ce type de contrats et à la divergence des intérêts des deux parties. Par conséquent, il faut assurer une allocation équilibrée des risques par les deux partenaires dans ce type de contrats très compliqués. En effet, dans le cas de faillite du partenaire privé, il ne faut en aucun cas que l'État subira toute seule les pertes. Les approches participatives comportent aussi plusieurs risques qu'il ne faut pas négliger et qui doivent être bien gérés pour garantir la réussite de ces approches.

En plus de la multiplicité des risques, le paysage sociopolitique actuel est de plus en plus diversifié, compliqué et dans lequel interagissent une multitude d'acteurs avec des perceptions et des attitudes différentes des risques et qui ont des effets plus ou moins directs sur les processus de décision, de management du risque et d'analyse du risque. De ce fait, le modèle classique de l'analyse des risques qui se limite à l'évaluation et la gestion des risques est insuffisant pour couvrir la diversité des acteurs et des processus régissant le risque dans les sociétés contemporaines. Ainsi, avec la complexité grandissante des risques et des contextes ainsi que la multiplicité des acteurs avec des intérêts le plus souvent convergents, il s'avère nécessaire d'adopter une nouvelle approche de gouvernance des risques. Il est recommandé donc de passer d'une approche du management des risques vers

une approche de gouvernance des risques qui est plus adaptée au contexte actuel. Par conséquent, la gouvernance des risques met l'accent sur la diversité des acteurs, la diversité de leurs rôles et de leurs logiques d'action, les relations multiples entre eux et tous les types de réseaux dynamiques émergents de ces relations et les conflits qui en résultent.

La gouvernance des risques intègre les institutions, les régimes formels et les arrangements informels. Elle fait référence à l'ensemble des acteurs, des règles, des conventions, des processus et des mécanismes concernés par la façon avec laquelle l'information pertinente sur le risque est collectée, analysée et communiquée et comment les décisions en présence des risques sont prises (IRGC, 2005 ; 2008a). Selon Renn, Klinke et van Asselt (2011), la gouvernance des risques désigne, à la fois, la structure institutionnelle et le processus politique qui guident et qui encadrent les activités collectives d'un groupe, de la société ou même de la communauté internationale afin de gérer et de contrôler les risques.

Selon Sidortsov (2014), il ne suffit pas d'avoir l'opportunité de discuter des risques liés aux questions de l'énergie, il est plutôt nécessaire de recourir à une solution plus globale, c'est-à-dire un cadre qui met l'accent non seulement sur l'évaluation et la gestion des risques, mais aussi sur la transparence, la responsabilité et la légitimité en tant que principes clés pour la prise de décisions en présence des risques. Renn, Klinke et van Asselt (2011) considèrent que la gouvernance des risques est un cadre qui combine l'analyse des risques et la prise de décision.

En effet, le cadre d'analyse de la gouvernance des risques proposé par l'IRGC (2005 ; 2008a) fournit une base conceptuelle et normative pour la façon de faire face à des risques qui sont de plus en plus incertains, complexes et ambigus. Ce cadre d'analyse a été utilisé pour évaluer les politiques dans plusieurs domaines du secteur de l'énergie. Ces évaluations comprennent des études sur la gouvernance des risques dans le domaine des politiques de bioénergie (IRGC, 2007) et les questions entourant la capture et le stockage du CO<sub>2</sub> (IRGC, 2008b).

## **2.5. Les stratégies de transition vers les énergies renouvelables en Tunisie**

En s'inspirant des travaux de Rai, Victor et Thurber (2010) ainsi que Thiam et Moll (2012), nous allons présenter le processus de transition vers les ER sous la forme de 4 étapes (Figure 52). En effet, la transition vers les ER, en Tunisie et dans les PED d'une

manière générale, doit se faire selon des étapes. En fait, au début et avec l'absence de l'expérience et les coûts élevés des technologies des ER, l'État doit être le principal acteur et même l'acteur unique qui se charge de la stratégie de promotion des ER. De ce fait, l'État fixe les objectifs, la stratégie à mettre en œuvre, les moyens financiers à mettre à disposition compte tenu du budget de l'État et l'unité publique qui va se charger de cette stratégie (c'est le cas de l'ANME, en Tunisie). Ainsi, il y aura la création des marchés de niche, qui sont étroits et caractérisés par une faible concurrence, pour promouvoir certains types de technologies, par exemple le chauffe-eau solaire. Cette action publique unilatérale repose sur l'utilisation d'instruments réglementaires et économiques comme les subventions et l'exonération de la TVA. Avec les années, il y aura l'acquisition de l'expérience dans certaines technologies ainsi que des effets d'apprentissage.

Bien que ce type de gouvernance s'avère efficace et convenable au stade initial de diffusion des ER, il est soumis à plusieurs critiques. En effet, cette structure de gouvernance est incapable de créer un marché durable sur le long terme puisqu'elle ne garantit pas la complémentarité des ressources.

Vu qu'au début, l'adoption des nouvelles technologies d'ER nécessite des coûts élevés et c'est aussi un processus coûteux et risqué, la stratégie de diffusion des ER doit commencer par les autorités publiques. Une fois les infrastructures nécessaires sont disponibles et les incertitudes sont diminuées, l'intégration des acteurs privés peut être encouragée afin de rendre la prise de décision optimale. En plus, les contraintes budgétaires de l'État nécessitent le recours au secteur privé pour promouvoir les ER au delà des marchés de niche. Les PPP s'imposent donc à ce stade. Mais, il est à noter que l'intégration des acteurs privés bien qu'elle soit bénéfique, elle doit être bien préparée en matière de structure institutionnelle, de solidité du secteur bancaire, de réglementation et surtout de la stabilité politique pour attirer les investisseurs étrangers. Ce qui nécessite, tout d'abord, l'identification des barrières et des risques rencontrés par les investisseurs et qui contraignent la diffusion des ER à grande échelle. Ensuite, la mise en œuvre de stratégies claires basées sur la gouvernance énergétique afin d'éliminer les barrières et d'attirer les investisseurs privés. Cette phase, si elle est bien préparée, elle va permettre de diffuser les ER à grande échelle. En effet, puisque le marché énergétique nécessite des composantes techniques, économiques et sociales, une harmonisation des actions est nécessaire pour une prise de décision optimale.

La forme de gouvernance basée sur les PPP possède aussi plusieurs autres avantages, notamment le respect des contraintes budgétaires de l'État, la diminution du besoin d'endettement, l'amélioration de la rentabilité des projets d'ER en assurant une meilleure évaluation des coûts et une meilleure gestion financière, la modernisation du secteur de l'énergie, la création d'emplois verts, la réalisation rapide des projets d'ER, etc. Mais, il est à noter que la structure de gouvernance basée sur les PPP ne prend pas en compte ni les disparités des ressources locales, ni les spécificités des communautés locales. En effet, avec l'émergence des projets de grande envergure, les oppositions des populations commencent à avoir lieu ce qui nécessite le recours aux approches participatives, surtout au niveau local, afin d'intégrer les citoyens et la société civile dans le processus de décision.

De ce fait le passage à la gouvernance participative locale s'impose pour deux principales raisons. Tout d'abord, pour faire participer les citoyens au processus de décision afin d'éviter tout conflit d'intérêt. Ensuite, pour saisir les besoins, les attentes et les opportunités qui existent dans les régions marginalisées qui ont souffert pendant des décennies du manque de toute sorte de développement.

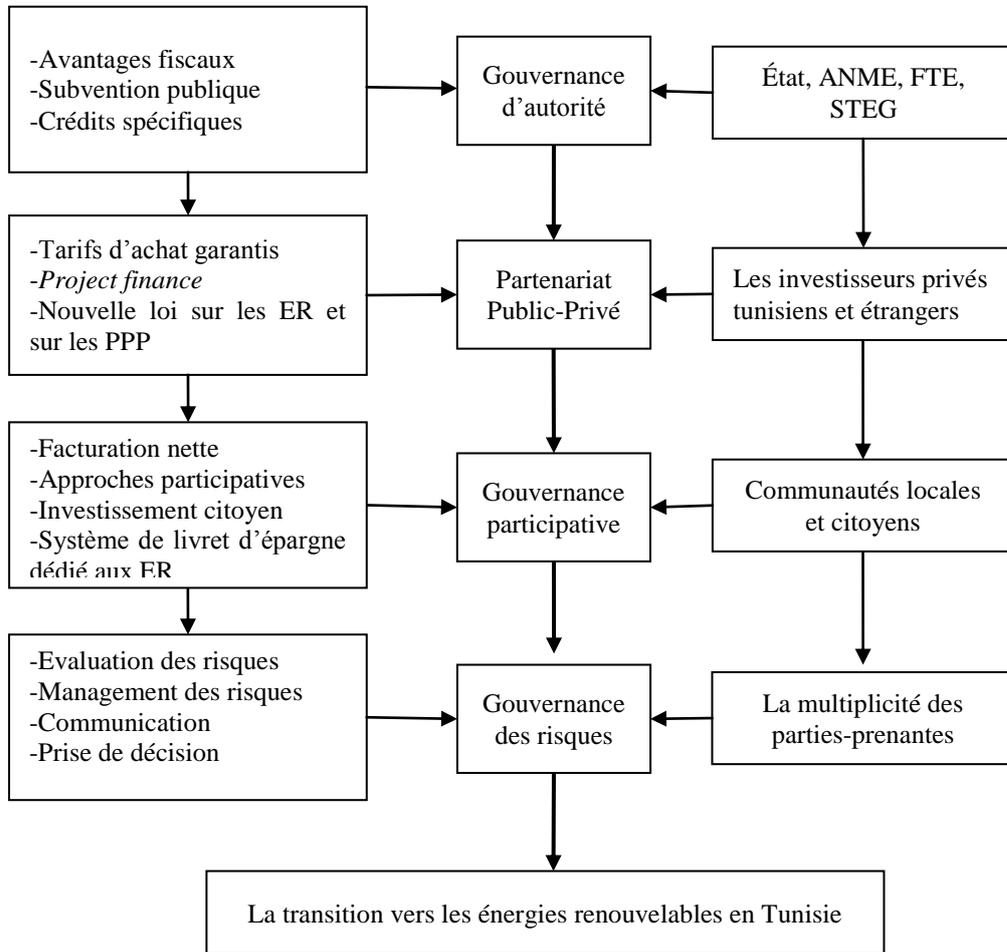
L'application des approches participatives doit se faire progressivement. Au début, elles peuvent avoir un simple rôle informatif (les sondages, les enquêtes, etc.) pour passer, par la suite, à des ateliers multi-acteurs ou des "*focus groups*". Mais avec les années, une vraie participation des citoyens et de la société civile doit avoir lieu.

Après avoir acquis des connaissances nécessaires sur les technologies d'ER, on peut même passer à la phase de projets citoyens, dans laquelle les citoyens choisissent le projet d'ER qui est le plus convenable à leur région et participent à la finance de ce projet. On passe donc à une diffusion des ER qui se fait par les citoyens eux-mêmes.

Avec la multiplication des parties prenantes (l'État, les acteurs privés, la société civile, les citoyens, etc.), la complexité des problèmes énergétiques et environnementaux et la multiplicité des conflits d'intérêts et des attitudes envers les sujets traités, la gouvernance des risques s'impose. En effet, l'existence d'un réseau complexe avec de multiples acteurs ayant des intérêts contradictoires et des perceptions différentes rend de plus en plus difficile la compréhension des causes des risques et l'influence de chaque acteur sur les conséquences de ces risques. A ce stade, la gouvernance des risques devient nécessaire afin de faciliter le processus de transition vers les ER en assurant

l'harmonisation des différents acteurs et mécanismes impliqués dans le marché des ER, ce qui aura des impacts aussi bien sur la demande que sur l'offre des ER.

Figure 52. Etapes du processus de transition vers les énergies renouvelables en Tunisie



Source : Auteur

## Conclusion

Ce chapitre a été consacré à l'interprétation des résultats de l'AGR et à l'explication des principales recommandations pour la diffusion des ER à grande échelle, en Tunisie. La première section nous a permis d'analyser en profondeur tous les risques qui entravent la réalisation du projet « TuNur ». Nous avons commencé, tout d'abord, par interpréter les résultats de l'analyse et de l'évaluation par type de danger générique. Ceci nous a permis de constater que le projet est très exposé aux dangers politiques, financiers et physico-chimiques. Le diagramme de Kiviat nous a permis de constater que le danger juridique est un danger à prendre très au sérieux par les investisseurs vu que les scénarios de risques issus de ce danger ont les index de risque minimum, moyen et maximum de criticité C3

(inacceptable). Ainsi, ce danger peut causer des risques avec des conséquences catastrophiques et donc inacceptables par les responsables du projet. En ce qui concerne l'analyse et l'évaluation par phase du système, elle nous a permis de constater que les deux phases de préparation et de mise en service contiennent les parts les plus élevées de situations dangereuses. Le diagramme de Kiviat nous a permis de constater que, parmi les quatre phases, seulement les scénarios de risques initiaux issus de la phase de préparation ont un index de risque moyen de criticité C3 (inacceptable). Ceci prouve encore la vulnérabilité de cette phase ce qui nécessite de lui accorder plus d'importance que les autres trois phases. En effet, cette phase englobe toutes les procédures administratives concernant les autorisations de construction et de connexion au réseau de l'électricité et elle peut même durer des années. En Tunisie, le cas est encore plus grave puisque le projet est bloqué dans cette phase depuis 2009.

Ensuite, nous avons déterminé la liste des risques majeurs susceptibles d'affecter le projet « TuNur » et qui sont les suivants : le risque de non obtention de l'autorisation de construction de la centrale, le risque de non respect des délais, le risque de non atteinte de la performance désirée, le risque de difficulté de financement, le risque fiduciaire initial, le risque d'explosion ou d'incendie, le risque d'attentats terroristes et le risque de conflits avec les riverains ou les collectivités locales. Nous avons expliqué, ensuite, les causes de ces risques et les moyens pour les réduire.

La seconde section a permis d'expliquer les principales stratégies et mécanismes à mettre en œuvre et la forme de gouvernance convenable pour la transition vers les ER. Nous avons recommandé l'application des mécanismes innovants de financement et d'incitation spécifiques aux ER, le renforcement du PPP dans le secteur des ER, le recours aux approches participatives, l'encouragement de l'investissement citoyen, le financement à long terme pour la R&D, le renforcement de la coopération internationale et méditerranéenne et la mise en œuvre d'un système de communication adéquat et efficace.

Ensuite, nous avons présenté les différentes formes de gouvernance énergétique qui permettent de faciliter la diffusion des ER en Tunisie. Vu qu'au début, l'adoption des nouvelles technologies d'ER nécessite des coûts élevés et c'est aussi un processus coûteux et risqué, la stratégie de diffusion des ER doit commencer par les autorités publiques. Ensuite, l'intégration du secteur privé s'impose pour une diffusion à grande échelle des ER.

Bien que la participation du secteur privée soit indispensable, elle reste insuffisante puisqu'elle ne permet pas de prendre en considération les besoins et les attentes des citoyens et des collectivités locales. En fait, tenir compte des réalités culturelles et socio-économiques des populations locales va diminuer les risques de conflits entre les parties prenantes et diminuer les coûts de transaction. Il faut donc mettre en place les approches participatives qui sont la base d'une gouvernance participative locale.

Avec la multiplication des parties prenantes, la complexité des problèmes énergétiques et environnementaux et la multiplicité des conflits d'intérêts, la gouvernance des risques devient indispensable. Ainsi, il devient nécessaire de passer d'une approche du management des risques vers une approche plus globale de gouvernance des risques, qui est caractérisée par une structure complexe et un processus multi-acteurs et multidisciplinaire, afin de faire face aux risques qui entravent la transition vers les ER.

## **CONCLUSION GENERALE**

### **1. Aperçu général**

L'énergie est devenue, en moins d'un siècle, un enjeu économique et stratégique majeur et un symbole du succès du développement économique. En effet, des relations étroites existent entre l'énergie et le développement économique. Cependant, le développement des industries à forte consommation énergétique n'a pas répondu à une satisfaction correcte des besoins et a entraîné des graves atteintes à l'environnement. Le changement climatique, l'épuisement des combustibles fossiles et les risques géopolitiques rendent inévitable le passage aux ER.

Ces dernières années, les ER ont continué de se développer d'une manière satisfaisante, dans un contexte marqué par la crise économique, la forte croissance de la consommation énergétique et la volatilité des cours pétroliers. En effet, la plupart des pays sont de plus en plus sensibilisés à la nécessité du recours aux ER comme moyen de lutte contre les changements climatiques. Au début de 2015, 164 pays ont des objectifs à atteindre dans le domaine des ER et 145 pays ont mis en place des mécanismes et des stratégies de soutien aux ER (REN21, 2015a).

Avec l'apparition du concept de développement durable, à la fin des années 1980, ainsi que les initiatives de « l'économie verte » et de « la croissance verte », suite à la crise économique, le développement des ER est motivé par des nouvelles raisons autres que celles relatives à la seule lutte contre les changements climatiques. En effet, les ER permettent de créer des nouvelles opportunités économiques, de créer des nouveaux emplois dits « verts » dans un monde qui souffre des taux de chômage élevés et de faciliter l'accès à l'électricité dans les zones rurales et isolées.

Malgré tous ces avantages et les efforts énormes déployés, la part des ER reste assez faible (à l'exception de quelques pays développés tels que l'Allemagne, le Danemark, etc.) et les réalisations ne sont pas en cohérence avec le potentiel énorme dont bénéficient certaines régions.

Mais, il est à noter que l'année 2014 a été l'année des grandes réalisations pour les ER. En effet, le niveau d'investissement a fortement rebondi après deux années de baisse et la capacité installée a dépassé celle d'origine fossile. En plus, l'investissement dans les PED est devenu très proche des investissements dans les économies développées (en 2014,

les investissements dans les PED sont de 131,3 milliards de dollars alors que ceux effectués dans les économies développées représentent 138,9 milliards de dollars). Il y a eu aussi des statistiques records pour les financements de l'énergie solaire en Chine, au Japon, au Maroc et aux Émirats arabes unis et de l'éolien *offshore* en Europe. Bien que l'Europe reste un marché important et un centre pour l'innovation dans les technologies des ER, l'activité commence à se déplacer vers d'autres régions du monde telles que l'Afrique du Sud, le Brésil, la Chine et l'Inde (REN21, 2015b).

La Tunisie est restée à l'écart de toutes ces réalisations malgré l'abondance des ressources renouvelables. Néanmoins, la transition vers les ER, en Tunisie, est une nécessité aussi bien pour atteindre le développement durable que pour se prémunir contre les conséquences désastreuses du changement climatique et des risques géopolitiques liés à la dépendance énergétique.

Malgré tous les avantages qui peuvent résulter de la transition vers un système énergétique sobre en carbone, ce processus s'avère long et risqué et nous restons encore bloqués dans un système énergétique à forte dépendance des combustibles fossiles. En effet, les réalisations faites dans le domaine des ER sont timides et ne sont pas en harmonie avec les conditions climatiques très favorables. Selon les derniers chiffres publiés par l'ANME, la capacité installée d'ER reste modeste et elle est classée de la manière suivante : 245 MW éolien, 65 MW hydraulique et 20 MW PV (ANME, 2015).

Ce constat nous a amenés à étudier les barrières et les risques qui entravent la transition vers les ER, en Tunisie, ainsi que les principales stratégies pour les dépasser, ce qui a présenté l'objectif principal de cette thèse.

## **2. Les grandes lignes traitées et les principaux résultats**

Notre travail de recherche est composé de deux grandes parties dépendantes et complémentaires. La première partie est consacrée à tous les aspects théoriques de la transition vers les ER. Alors que la seconde partie traite le processus de transition vers les ER, en Tunisie, en mettant l'accent sur le potentiel des ER, les perspectives, les barrières et les stratégies à adopter.

Dans notre analyse des aspects théoriques de la transition vers les ER, nous avons commencé, dans le chapitre 1, par expliquer les raisons et les faits qui font du développement des ER un chemin inévitable. En se basant sur une revue de littérature aussi bien théorique qu'empirique, nous avons constaté que la transition vers les ER est

indispensable aussi bien pour atteindre le développement durable (la croissance économique, la création d'emplois, la diminution des GES, etc.) que pour la « relance verte » après la crise économique de 2008.

Après avoir montré les avantages et les privilèges offerts par une telle transition, nous avons procédé, dans le chapitre 2, à l'étude des aspects théoriques de ce processus de transition vers les ER. Nous avons donc effectué une analyse théorique de toutes les approches de la transition vers les ER qui sont : l'approche de la courbe d'expérience, l'approche de diffusion de l'innovation, l'approche de l'économie de l'environnement, l'approche de l'économie institutionnelle et l'approche psychosociale. Cette analyse nous a permis de dégager les constatations suivantes :

- **Les effets d'apprentissage et d'expérience diminuent les coûts et accélèrent le processus de diffusion des ER.**
- **La diffusion des technologies d'ER dépend de plusieurs facteurs de diffusion tels que le total des adoptants potentiels, la stratégie du gouvernement, la communication et la sensibilisation, les caractéristiques de la technologie et les améliorations technologiques effectuées.**
- **La transition vers les ER nécessite la mise en place de mesures réglementaires et d'instruments économiques.**
- **La transition vers les ER nécessite des mécanismes institutionnels adéquats.**
- **La participation du public facilite le processus de diffusion des ER.**

Après avoir traité les aspects de type technologique, économique, institutionnel et psychosocial de la transition vers les ER, nous avons consacré le chapitre 3 à l'étude des barrières qui entravent le passage vers une économie sobre en carbone. Nous avons mis l'accent sur les concepts de « verrouillage technologique » et de « verrouillage au carbone », comme étant les barrières principales qui entravent la transition vers un système énergétique basé sur les ER. En effet, le monde est actuellement verrouillé en une économie à utilisation intense de combustibles fossiles qui émettent du CO<sub>2</sub>, ce qui est difficile à transcender. Ensuite, nous avons étudié l'impact de l'effet de « verrouillage au carbone » sur l'investissement dans le secteur des ER. Nous avons constaté qu'à cause de cet effet l'investissement dans les projets d'ER fait face à plusieurs barrières d'investissements de types différents. Notre analyse nous a permis de faire la constatation suivante : **la transition vers les ER est un processus lent, compliqué et qui se heurte à**

**plusieurs risques de différents types (économique, financier, institutionnel, politique, etc.) sous l'effet de « la dépendance au sentier » et du « verrouillage au carbone ».**

Ce constat nous a amenés au choix de l'approche du management des risques pour traiter le processus de transition vers les ER en Tunisie. Ainsi, nous avons consacré le chapitre 4 à l'étude de cette approche et ses applications dans le domaine des ER. Nous avons commencé par expliquer le concept de risque et les ambiguïtés qui l'entourent. Pour passer, par la suite, à détailler l'approche du management des risques, en mettant l'accent sur l'historique de cette approche, le processus à suivre ainsi que les applications faites dans le domaine des ER.

Au terme de cette analyse théorique, dans la première partie de notre travail de recherche, nous avons fait le constat suivant : **le processus de transition vers les ER est un processus qui fait intervenir des éléments de natures différentes (économiques, institutionnelles, sociales et technologiques). En plus, ce processus se heurte à plusieurs barrières et risques de différents types sous l'effet du « verrouillage au carbone ».**

Cette constatation nous a permis de conclure que limiter l'étude du processus de transition vers les ER à un seul aspect comme la plupart des études existantes n'est ni important ni suffisant. De ce fait, nous avons choisi de recourir à une approche interdisciplinaire et pluridisciplinaire du management des risques. Cette approche est très convenable pour traiter tous les aspects de ce processus, en mettant l'accent sur les risques qui entravent la transition vers les ER quelles que soient leurs natures aussi bien politique que technologique et économique. En plus, elle va nous permettre de proposer les mesures nécessaires pour éliminer ces risques.

Après avoir traité les aspects théoriques de la transition vers les ER, dans la première partie, nous avons passé, dans la seconde partie, à une étude approfondie concernant le développement des ER en Tunisie. On a effectué donc une analyse détaillée de tous les aspects du secteur des ER tels que le potentiel, les perspectives et les risques d'investissement.

Dans le chapitre 5, notre analyse a été axée sur le potentiel énorme d'ER dont bénéficie la Tunisie et sur les caractéristiques du système énergétique tunisien (déficit énergétique, dépendance aux importations du gaz naturel, subventions accordées aux combustibles fossiles, etc.) qui font du recours aux ER un choix stratégique inéluctable et

non pas une simple option. Ensuite, nous avons mis l'accent sur les bonnes pratiques qui ont eu lieu, ces dernières années, et qui peuvent changer le paysage énergétique tunisien. Ces pratiques sont le débat national sur l'énergie, le PST ainsi que la nouvelle réglementation sur la production de l'électricité à partir des ER.

Afin d'étudier les barrières à la transition vers les ER en Tunisie, nous avons choisi d'analyser les risques d'investissement dans ce secteur. Pour ce faire, nous avons décidé d'étudier, dans le chapitre 6, le cas d'un projet de centrale CSP qui est envisagé au sud de la Tunisie. Le choix du projet et de la technologie est loin d'être arbitraire. En effet, ce projet est en situation de "*stand-by*", depuis 2011, ce qui prouve l'existence de barrières à l'investissement qui entravent le développement à grande échelle des ER. Nous avons étudié donc un cas concret qui illustre l'existence de barrières à l'investissement malgré la volonté des investisseurs à investir en Tunisie.

En ce qui concerne la technologie CSP, il s'agit d'une technologie testée et commercialisée avec succès. L'atout principal de cette technologie est la production de l'électricité non seulement durant les heures d'ensoleillement, mais aussi après le coucher du soleil grâce au stockage de la chaleur dans le sel fondu. Il est à noter que malgré les initiatives internationales pour promouvoir cette filière ainsi que le potentiel énorme dans la région MENA, seulement deux pays ont réussi à franchir le cap (les Émirats arabes unis et le Maroc). En Tunisie, on n'a aucune centrale CSP en fonctionnement et même ce projet ambitieux a été reporté plusieurs fois et la construction prévue, en 2013, n'a pas encore commencé. Ceci nous pousse à s'intéresser aux barrières et aux risques d'investissement dans cette technologie en Tunisie.

Pour ce faire, nous avons appliqué, dans le chapitre 7, une méthode de management du risque (la méthode AGR) sur le projet « TuNur » afin d'extraire les principaux risques et la manière de les réduire. Nous avons commencé par expliquer cette méthode et appliquer son processus au projet étudié. L'AGR système nous a permis de dégager les 4 phases du projet ainsi que les sous phases et de traiter en détails les 14 classes de dangers qui sont les suivantes : politique, environnement naturel, insécurité, image, management, stratégique, technologique, communication et crises, juridique, financier, infrastructures et locaux, matériels et équipements, système d'information et physico-chimique. L'AGR scénarios consiste, quant à elle, à traiter tous les scénarios des risques potentiels.

L'interprétation des résultats de l'AGR et l'explication des principales recommandations pour la diffusion des ER à grande échelle ont fait l'objet du chapitre 8. L'analyse par type de danger générique nous a permis de constater que le projet est très exposé aux dangers politiques, financiers et physico-chimiques. Le diagramme de Kiviat nous a permis de constater que le danger juridique est un danger à prendre très au sérieux par les investisseurs vu que les scénarios des risques issus de ce danger ont les index de risque minimum, moyen et maximum de criticité C3 (inacceptable). Ainsi, ce danger peut causer des risques avec des conséquences catastrophiques et donc inacceptables par les responsables du projet. En ce qui concerne l'analyse et l'évaluation par phase du système, elle nous a permis de constater que les deux phases de préparation et de mise en service contiennent les parts les plus élevées de situations dangereuses. Elles représentent, ainsi, les phases les plus risquées de ce projet.

Ensuite, nous avons déterminé la liste des risques majeurs susceptibles d'affecter le projet « TuNur » qui sont les suivants : le risque de non-obtention de l'autorisation de construction de la centrale, le risque de non-respect des délais, le risque de non atteinte de la performance désirée, le risque de difficulté de financement, le risque fiduciaire initial, le risque d'explosion, le risque d'attentats terroristes et le risque de conflits avec les riverains ou les collectivités locales. Nous avons expliqué aussi les causes de ces risques et les moyens pour les réduire.

Les principales stratégies pour réduire ces risques sont les suivantes : l'application de mécanismes innovants pour stimuler la technologie CSP (comme c'est le cas pour PROSOL et PROSOL Elec), le renforcement des PPP dans le secteur des ER, la mise en œuvre des approches participatives et la promotion de l'investissement citoyen, etc.

### **3. Les implications en termes de politiques énergétiques**

Dans le cadre de cette thèse, nous avons présenté les différentes formes de gouvernance énergétique qui permettent de faciliter la diffusion des ER en Tunisie. Nous avons expliqué que la politique énergétique de diffusion des ER doit être faite par les autorités publiques, au début, mais elle doit progresser rapidement vers d'autres formes de gouvernance. Elle doit donc évoluer progressivement vers la participation du secteur privé et la gouvernance locale participative jusqu'à arriver à un stade où la gouvernance des risques devient nécessaire.

En effet, au début, l'adoption des nouvelles technologies d'ER nécessite des coûts élevés et c'est aussi un processus risqué. Par conséquent, la stratégie de diffusion des ER doit commencer par les autorités publiques. Ensuite, l'intégration du secteur privé s'impose pour une diffusion à grande échelle des ER. Mais, cette participation reste insuffisante puisqu'elle ne permet pas de prendre en considération les besoins et les attentes des citoyens et des collectivités locales. En fait, tenir compte des réalités culturelles et socio-économiques des populations locales va diminuer les risques de conflits entre les parties prenantes et les coûts de transaction. Il faut donc mettre en place les approches participatives qui sont la base d'une gouvernance participative locale.

Avec la multiplication des parties prenantes, la complexité des problèmes énergétiques et environnementaux et la multiplicité des conflits d'intérêts, la gouvernance des risques devient indispensable. Il est nécessaire alors de passer d'une approche du management des risques à une approche plus globale caractérisée par une structure complexe et un processus multi-acteurs et multidisciplinaire pour faire face à tous les types de risques, il s'agit de la gouvernance des risques.

L'idée de la gouvernance des risques reconnaît que le gouvernement n'est pas le seul acteur dans la gestion et l'organisation des solutions sociales et politiques. Le passage à la gouvernance des risques est mieux compris comme réponse aux nouveaux défis tels que la mondialisation, l'augmentation de la coopération internationale, les changements sociétaux, y compris la participation accrue des citoyens, la montée du rôle des organisations non-gouvernementales (ONG), l'évolution du rôle du secteur privé, la complexité grandissante des questions politiques et la difficulté de la prise de décisions.

Par conséquent, la gouvernance des risques implique le transfert des principes de base et de l'essentiel de la gouvernance vers le contexte du risque et la prise de décision face aux risques (IRGC, 2005).

#### **4. Les limites et les nouvelles pistes de recherches**

Notre étude comporte des limites comme tout travail de recherche. En effet, cette thèse s'est limitée à une étude semi quantitative (puisque'il y a les indices de gravité et de vraisemblance). En plus, notre étude n'a pas intégré une phase très importante de toute démarche de management du risque qui est le financement du risque. Enfin, cette recherche reste générale, sans mettre l'accent sur les risques financiers qui sont parmi les risques les plus graves et les plus préoccupants pour les investisseurs dans le secteur des ER. Afin de

dépasser ces limites, dans des prochaines recherches, nous proposons d'opter pour l'une des deux alternatives suivantes :

- Une étude quantitative du risque financier en utilisant les indicateurs suivants : le taux de rentabilité interne et la période de retour sur investissement et l'utilisation de la méthode de Monte Carlo pour la simulation. Mais, il est à noter qu'une telle étude approfondie nécessite des données qui ne sont pas encore disponibles pour l'instant.
- Il sera aussi très recommandé de compléter cette recherche par la méthode AGR quantitative (AGRq). L'utilisation de cette méthode sera très intéressante dans le cas de disponibilité des probabilités relatives aux facteurs de risques. Il s'agit d'une variante de l'AGR qui a été développée récemment. L'apport principal de cette méthode est la possibilité d'avoir une représentation probabiliste des risques et une évaluation financière des rapports coûts/risques.

Les faits passés ont montré que les économies développées ont réussi à changer le paradigme technologique dominant vers un autre moins polluant en passant, par exemple, du charbon au gaz naturel. Mais, la vraie question qui se pose : est-ce-que les économies développées sont capables de passer vers un paradigme technologique basé sur les ER assez rapidement pour pouvoir se prévenir des conséquences désastreuses du changement climatique avant que ça soit trop tard ?

## REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- ABANDA Henry, Austine NG'OMBE, Ramin KEIVANI et Joseph TAH (2012). "The Link between Renewable Energy Production and Gross Domestic Product in Africa: A Comparative Study between 1980 and 2008". *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol.16(4), pp.2147-2153, May, DOI : 10.1016/j.rser.2012.01.005.
- ACKERMANN Thomas, Göran ANDERSSON et Lennart SÖDER (2001). "Overview of Government and Market Driven Programs for the Promotion of Renewable Power Generation". *Renewable Energy*, vol.22(1-3), pp.197-204, January-March, DOI : 10.1016/S0960-1481(00)00015-X.
- Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Energie (ADEME), (2011). *Feuille de route solaire thermodynamique*, disponible sur : [http://www.ademe.fr/sites/default/files/assets/documents/77920\\_feuilledeROUTE\\_solaire\\_thermodynamique.pdf](http://www.ademe.fr/sites/default/files/assets/documents/77920_feuilledeROUTE_solaire_thermodynamique.pdf) (page consultée le 12 septembre 2012).
- Agence Nationale pour la Maîtrise de l'Energie (ANME), (2004). *Etude stratégique sur le développement des énergies renouvelables en Tunisie aux horizons 2010, 2020, 2030*. Août, 200 pages.
- Agence Nationale pour la Maîtrise de l'Energie (ANME), (2011a). Les énergies renouvelables en Tunisie. Présentation au 7<sup>ème</sup> rencontre Tuniso-allemande sur les énergies renouvelables. Tunis, 30 novembre 2011. Disponible sur : [http://www.ahk-balt.org/fileadmin/ahk\\_tunesien/06\\_Events/EEE2011/01\\_Le\\_Energies\\_Renouvelables\\_en\\_Tunisie.pdf](http://www.ahk-balt.org/fileadmin/ahk_tunesien/06_Events/EEE2011/01_Le_Energies_Renouvelables_en_Tunisie.pdf) (page consultée le 15 septembre 2013).
- Agence Nationale pour la Maîtrise de l'Energie (ANME), (2011b). *Appui à la diffusion à grande échelle de la filière "chauffe-eau solaire en Tunisie" dans le secteur résidentiel : état des lieux et évaluations du programme PROSOL II*. Décembre, 65 pages.
- Agence Nationale pour la Maîtrise de l'Energie (ANME), (2012a). *Nouvelle version du plan solaire tunisien : programmation, conditions et moyens de la mise en œuvre*. Avril, 37 pages.
- Agence Nationale pour la Maîtrise de l'Energie (ANME), (2012b). *Elaboration d'un plan d'action pour le développement des énergies renouvelables en Tunisie*. Mai, 91 pages.

- Agence Nationale pour la Maîtrise de l'Energie (ANME), (2015). *Développement des énergies renouvelables en Tunisie : contexte et enjeux*. Juin, 21 pages.
- AHLBORG Helene et Linus HAMMAR (2014). "Drivers and Barriers to Rural Electrification in Tanzania and Mozambique Grid-Extension, Off-Grid, and Renewable Energy Technologies". *Renewable Energy*, vol.61, pp.117-124, January, DOI : 10.1016/j.renene.2012.09.057.
- AJZEN Icek (1988). *Attitudes, Personality, and Behavior*. 1<sup>ère</sup> éd., Chicago : Dorsey Press, 175 pages.
- AJZEN Icek (1991). "The Theory of Planned Behavior". *Organizational Behavior and Human Decision Processes*, vol.50(2), pp.179-211, December, DOI : 10.1016/0749-5978(91)90020-T.
- AL KHATTAB Adel, John ANCHOR et Eleanor DAVIES (2007). "Managerial Perception of Political Risks in International Projects". *International Journal of Project Management*, vol.25(7), pp.734-743, October, DOI : 10.1016/j.ijproman.2007.03.006.
- ALCHIAN Armen (1963). "Reliability of Progress Curves in Airframe Production". *Econometrica*, vol.31(4), pp.679-693, October, DOI : 10.2307/1909166.
- ALLAIS Maurice (1953). "Le Comportement de l'homme rationnel devant le risque : critique des postulats et axiomes de l'école américaine". *Econometrica*, vol.21(4), pp.503-546, octobre, DOI : 10.2307/1907921.
- AL-MULALI Usama, Hassan G. FERREIDOUNI, Janice Y. LEE et Che N. SAB (2013). "Examining the Bi-Directional Long Run Relationship between Renewable Energy Consumption and GDP Growth". *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol.22, pp.209-222, June, DOI : 10.1016/j.rser.2013.02.005.
- ALVAREZ Gabriel C., Raquel M. JARA, Juan R.R. JULIAN et José I.G. BIELSA (2009). *Study of the Effects on Employment of Public Aid to Renewable Energy Sources*. King Juan Carlos University (Spain), March, disponible sur : <http://instituteeforenergyresearch.org/wp-content/uploads/2015/05/090327-employment-public-aid-renewable.pdf> (page consultée le 14 mars 2012).
- AMATO Andrea, Michele COMPARE, Maurizio GALLISTO, Augusto MACCARI, Mauro PAGANELLI et Enrico ZIO (2011). "Business Interruption and Loss of Assets Risk Assessment in Support of the Design of an Innovative Concentrating Solar Power Plant". *Renewable Energy*, vol.36(5), pp.1558-1567, May, DOI : 10.1016/j.renene.2010.10.019.

- AMIGUN Bamikole, Daniel PETRIE et Johann GÖRGENS (2011). “Economic Risk Assessment of Advanced Process Technologies for Bioethanol Production in South Africa: Monte Carlo Analysis”. *Renewable Energy*, vol.36(11), pp.3178-3186, November, DOI : 10.1016/j.renene.2011.03.015.
- AMPONSAH N. Yaw, Mads TROLDBORG, Bethany KINGTON, Inge AALDERS et Rupert L. HOUGH (2014). “Greenhouse Gas Emissions from Renewable Energy Sources: A Review of Lifecycle Considerations”. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol.39, pp.461-475, November, DOI : 10.1016/j.rser.2014.07.087.
- APAK Sudi, Erhan ATAY et Güngör TUNCER (2011). “Financial Risk Management in Renewable Energy Sector: Comparative Analysis between the European Union and Turkey”. *Procedia-Social and Behavioral Sciences*, vol.24, pp.935-945, DOI : 10.1016/j.sbspro.2011.09.013.
- APERGIS Nicholas et James E. PAYNE (2010). “Renewable Energy Consumption and Growth in Eurasia”. *Energy Economics*, vol.32(6), pp.1392-1397, November, DOI : 10.1016/j.eneco.2010.06.001.
- APERGIS Nicholas et James E. PAYNE (2011). “Renewable and Non-Renewable Electricity Consumption–Growth Nexus: Evidence from Emerging Market Economies”. *Applied Energy*, vol.88(12), pp.5226-5230, December, DOI : 10.1016/j.apenergy.2011.06.041.
- APERGIS Nicholas, James E. PAYNE, Kojo MENYAH et Yemane WOLDE-RUFAEL (2010). “On the Causal Dynamics between Emissions, Nuclear Energy, Renewable Energy, and Economic Growth”. *Ecological Economics*, vol.69(11), pp.2255-2260, September, DOI : 10.1016/j.ecolecon.2010.06.014.
- ARENT Douglas J., Alison WISE et Rachel GELMAN (2011). “The Status and Prospects of Renewable Energy for Combating Global Warming”. *Energy Economics*, vol.33(4), pp.584-593, July, DOI : 10.1016/j.eneco.2010.11.003.
- ARENTSEN Maarten, René KEMP et Esther LUITEN (2002). *Technological Change and Innovation for Climate Protection: The Governance Challenge*, in: KOK Marcel, Walter VERMEULEN, Andre FAAIJ et David DE JAGER (eds.). *Global Warming and Social Innovation: The Challenge of a Climate Neutral Society*, London : Earthscan, pp.59-82.
- ARGOTE Linda et Dennis EPPLE (1990). “Learning Curves in Manufacturing”. *Science*, vol.247(4945), pp.920-924, February, DOI : 10.1126/science.247.4945.920.

- ARI Izzet et Ramazan SARI (2015). "The Role of Feed-in Tariffs in Emission Mitigation: Turkish Case". *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol.48, pp.768-775, August, DOI : 10.1016/j.rser.2015.04.006.
- ARNOLD Uwe et Özgür YILDIZ (2015). "Economic Risk Analysis of Decentralized Renewable Energy Infrastructures-A Monte Carlo Simulation Approach". *Renewable Energy*, vol.77, pp.227-239, May, DOI : 10.1016/j.renene.2014.11.059.
- ARROW Kenneth J. (1962). "The Economic Implications of Learning by Doing". *Review of Economic Studies*, vol.29(3), pp.155-173, June, DOI : 10.2307/2295952.
- ARTHUR W. Brian (1989). "Competing Technologies: Increasing Returns and Lock-in by Historical Events". *Economic Journal*, vol.99(394), pp.116-131, March, DOI : 10.2307/2234208.
- Association Européenne de l'Electricité Solaire Thermodynamique à Concentration (ESTELA), (2009). *Electricité solaire thermodynamique : valoriser le potentiel méditerranéen*. Belgique, disponible sur : <http://www.abhatoo.net.ma/maalama-textuelle/developpement-durable/economie-durable/energie/source-d-energie/energie-renouvelable/electricite-solaire-thermodynamique-valoriser-le-potentiel-mediterraneen> (page consultée le 17 février 2014).
- AYRES Robert U. (1991). "Evolutionary Economics and Environmental Imperatives". *Structural Change and Economic Dynamics*, vol.2(2), pp.255-273, December, DOI : 10.1016/S0954-349X(05)80002-5.
- AYRES Robert U. (2008). "Sustainability Economics: Where Do We Stand?". *Ecological Economics*, vol.67(2), pp.281-310, September, DOI : 10.1016/j.ecolecon.2007.12.009.
- BACCOUCHE Abdelkader (2014). "The Tunisian Solar Thermal Market: A Change of Scale". *Energy Procedia*, vol.48, pp.1627-1634, DOI : 10.1016/j.egypro.2014.02.183.
- BAGNASCO Arnaldo et Patrick LE GALES (1997). *Les villes européennes comme société et comme acteur*, in : BAGNASCO Arnaldo et Patrick LE GALES (eds.), *Villes en Europe*, Paris : La découverte, pp.7-46.
- BANG Hae-Kyong, Alexander E. ELLINGER, John HADJIMARCOU et Patrick A. TRAICHAL (2000). "Consumer Concern, Knowledge, Belief, and Attitude toward Renewable Energy: An Application of the Reasoned Action Theory". *Psychology and Marketing*, vol.17(6), pp.449-468, June, DOI : 10.1002/(SICI)1520-6793(200006)17:6<449::AID-MAR2>3.0.CO;2-8.

- BARBIER Edward B. (1987). "The Concept of Sustainable Economic Development". *Environmental Conservation*, vol.14(2), pp.101-110, May, DOI : 10.1017/S0376892900011449.
- BARBIER Edward B. (2009). *Rethinking the Economic Recovery: A Global Green New Deal*. Report prepared for the Economics and Trade Branch, Division of Technology, Industry and Economics, United Nations Environment Programme, April, disponible sur : <http://www.sustainable-innovations.org/GE/UNEP%20%5B2009%5D%20A%20global%20green%20new%20deal.pdf> (page consultée le 18 septembre 2012).
- BASS Frank M. (1969). "A New Product Growth for Model Consumer Durables". *Management Science*, vol.15(5), pp.215-227, January, disponible sur : [https://math.la.asu.edu/~dieter/courses/APM\\_598/Bass\\_69.pdf](https://math.la.asu.edu/~dieter/courses/APM_598/Bass_69.pdf) (page consultée le 11 juin 2015).
- BASS Frank M., Trichy V. KRISHNAN et Dipak C. JAIN (1994). "Why the Bass Model Fits without Decision Variables". *Marketing Science*. Vol.13(3), pp.203-223, August, DOI : 10.1287/mksc.13.3.203.
- BATTAGLINI Antonella, Nadejda KOMENDANTOVA, Patricia BRTNIK et Anthony PATT (2012). "Perception of Barriers for Expansion of Electricity Grids in the European Union". *Energy Policy*, vol.47, pp.254-259, August, DOI : 10.1016/j.enpol.2012.04.065.
- BAUMGÄRTNER Stefan et Martin QUAAS (2010). "Sustainability Economics – General versus Specific and Conceptual versus Practical". *Ecological Economics*, vol.69(11), pp.2056-2059, September, DOI : 10.1016/j.ecolecon.2010.06.018.
- BAYUS Barry L. (1993). "High-Definition Television: Assessing Demand Forecasts for a Next Generation Consumer Durable". *Management Science*, vol.39(11), pp.1319-1333, November, DOI : 10.1287/mnsc.39.11.1319.
- BECCALI Marco, Maurizio CELLURA et Marina MISTRETTA (2007). "Environmental Effects of Energy Policy in Sicily: The Role of Renewable Energy". *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol.11(2), pp.282-298, February, DOI : 10.1016/j.rser.2005.02.001.
- BECK Ulrich (2001). *La société du risque : sur la voie d'une autre modernité*. Traduit de l'allemand par Laure BERNARDI, 2<sup>ème</sup> édi., Paris : Aubier, (1<sup>ère</sup> édi., Suhrkamp Verlag. 1986), 521 pages.

- BECKER Bastian et Doris FISCHER (2013). "Promoting Renewable Electricity Generation in Emerging Economies". *Energy Policy*, vol.56, pp.446-455, May, DOI : 10.1016/j.enpol.2013.01.004.
- BECKERMAN Wilfred (1994). "Sustainable Development: Is it a Useful Concept?" *Environmental Values*, vol.3(3), pp.191-209, August, DOI : 10.3197/096327194776679700.
- BERNANKE Ben S. (2009). *Four Questions about the Financial Crisis*. Speech by Federal Reserve Chairman at the Morehouse College, Atlanta, Georgia, disponible sur : <http://www.federalreserve.gov/newsevents/speech/bernanke20090414a.htm> (page consultée le 13 avril 2011).
- BERNOULLI Daniel (1738). "Specimen theoriae novae de mensura sortis", traduit in BERNOULLI Daniel (1954). "Exposition of a New Theory on the Measurement of Risk", *Econometrica*, vol.22(1), pp.23-36, January, DOI : 10.2307/1909829.
- BERRY David (2009). "Innovation and the Price of Wind Energy in the US". *Energy Policy*, vol.37(11), pp.4493-4499, November, DOI : 10.1016/j.enpol.2009.05.071.
- BILEN Kadir, Omer OZYURT, Kadir BAKIRCI, Suleyman KARSLI, Sadik ERDOGAN, Mehmet YILMAZ et Omer COMAKLI (2008). "Energy Production, Consumption and Environmental Pollution for Sustainable Development: A Case Study in Turkey". *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol.12(6), pp.1529-1561, August, DOI : 10.1016/j.rser.2007.03.003.
- BINA Olivia et Francesco LA CAMERA (2011). "Promise and Shortcomings of a Green Turn in Recent Policy Responses to the 'Double Crisis'". *Ecological Economics*, vol.70(12), pp.2308-2316, October, DOI : 10.1016/j.ecolecon.2011.06.021.
- BLANCO María I. (2009). "The Economics of Wind Energy". *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol.13(6-7), pp.1372-1382, August-September, DOI : 10.1016/j.rser.2008.09.004.
- BLANCO María I. et Glória RODRIGUES (2009). "Direct Employment in the Wind Energy Sector: An EU Study". *Energy Policy*, vol.37(8), pp.2847-2857, August, DOI : 10.1016/j.enpol.2009.02.049.
- BOLINGER Mark et Ryan WISER (2009). "Wind Power Price Trends in the United States: Struggling to Remain Competitive in the Face of Strong Growth". *Energy Policy*, vol.37(3), pp.1061-1071, March, DOI : 10.1016/j.enpol.2008.10.053.

- BOLINGER Mark et Ryan WISER (2012). “Understanding Wind Turbine Price Trends in the U.S. over the Past Decade”. *Energy Policy*, vol.42, pp.628-641, March, DOI : 10.1016/j.enpol.2011.12.036.
- BONTEMS Philippe et Gilles ROTILLON (2007). *Economie de l'environnement*. 3<sup>ème</sup> édi., Paris : La Découverte, 119 pages.
- BOSSEL Hartmut (1999). *Indicators for Sustainable Development: Theory, Method, Applications*. A Report to the Balaton Group, published by the International Institute for Sustainable Development, disponible sur : <https://www.iisd.org/pdf/balatonreport.pdf> (page consultée le 11 octobre 2012).
- Boston Consulting Group (1968). *Perspectives on Experience*. Boston: Boston Consulting Group Inc, 1<sup>ère</sup> édi, 109 pages.
- BREKKE Kjell A. (1997). “Hicksian Income from Resource Extraction in an Open Economy”. *Land Economics*, vol.73(4), pp.516-527, November, DOI : 10.2307/3147243.
- BREUKERS Sylvia et Maarten WOLSINK (2007). “Wind Power Implementation in Changing Institutional Landscapes: An International Comparison”. *Energy Policy*, vol.35(5), pp.2737-2750, May, DOI : 10.1016/j.enpol.2006.12.004.
- BREYER Christian et Gerhard KNIES (2009). “Global Energy Supply Potential of Concentrating Solar Power”. Article présenté au colloque *Proceedings Solar PACES*, Berlin, September, disponible sur [http://www.trec-uk.org.uk/reports/Breyer\\_paper\\_SolarPACES\\_GlobalEnergySupplyPotentialCSP\\_final\\_090630\\_proc.pdf](http://www.trec-uk.org.uk/reports/Breyer_paper_SolarPACES_GlobalEnergySupplyPotentialCSP_final_090630_proc.pdf) (page consultée le 15 novembre 2013).
- BURNS William J., Paul SLOVIC, Roger E. KAPERSON, Jeanne X. KAPERSON, Ortwin RENN et Srinivas EMANI (1993). “Incorporating Structural Models into Research on Social Amplification of Risk: Implications for Theory Construction and Decision Making”. *Risk Analysis*, vol.13(6), pp.611-623, December, DOI : 10.1111/j.1539-6924.1993.tb01323.x
- BYRNES Liam, Colin BROWN, John FOSTER et Liam D. WAGNER (2013). “Australian Renewable Energy Policy: Barriers and Challenges”. *Renewable Energy*, vol.60, pp.711-721, December, DOI : 10.1016/j.renene.2013.06.024.
- CAI Wenjia, Can WANG, Jining CHEN et Siqiang WANG (2011). “Green Economy and Green Jobs: Myth or Reality? The Case of China’s Power Generation Sector”. *Energy*, vol.36(10), pp.5994-6003, October, DOI : 10.1016/j.energy.2011.08.016.

- CALDES Natalia, Manuel VARELA, Marta SANTAMARIA et Rosa SAEZ (2009). "Economic Impact of Solar Thermal Electricity Deployment in Spain". *Energy Policy*, vol.37(5), pp.1628-1636, May, DOI : 10.1016/j.enpol.2008.12.022.
- CARLEY Sanya (2009). "State Renewable Energy Electricity Policies: An Empirical Evaluation of Effectiveness". *Energy Policy*, vol.37(8), pp.3071-3081, August, DOI : 10.1016/j.enpol.2009.03.062.
- CARLEY Sanya (2011). "Historical Analysis of U.S. Electricity Markets: Reassessing Carbon Lock-in". *Energy Policy*, vol.39(2), pp.720-732, February, DOI : 10.1016/j.enpol.2010.10.045.
- CHANG Chen-Yu (2013). "A Critical Analysis of Recent Advances in the Techniques for the Evaluation of Renewable Energy Projects". *International Journal of Project Management*, vol.31(7), pp.1057-1067, October, DOI : 10.1016/j.ijproman.2013.03.001.
- CHEN Yu-Heng, Chia-Yon CHEN et Shun-Chung LEE (2010). "Technology Forecasting of New Clean Energy: The Example of Hydrogen Energy and Fuel Cell". *African Journal of Business Management*, vol.4(7), pp.1372-1380, July, disponible sur : [http://www.academicjournals.org/article/article1380732484\\_Chen%20et%20al.pdf](http://www.academicjournals.org/article/article1380732484_Chen%20et%20al.pdf) (page consultée le 15 novembre 2012).
- CHICHILNISKY Graciela (1996). "An Axiomatic Approach to Sustainable Development". *Social Choice and Welfare*, vol.13(2), pp.231-257, April, DOI : 10.1007/BF00183353.
- CHICHILNISKY Graciela (1997). "What is Sustainable Development?" *Land Economics*, vol.73(4), pp.467-491, November, disponible sur : <http://www.chichilnisky.com/pdfs/papers/142.pdf> (page consultée le 22 novembre 2012).
- CHIEN Taichen et Jin-Li HU (2007). "Renewable Energy and Macroeconomic Efficiency of OECD and non OECD Economies". *Energy Policy*, vol.35(7), pp.3606-3615, July, DOI : 10.1016/j.enpol.2006.12.033.
- CHIEN Taichen et Jin-Li HU (2008). "Renewable Energy: An Efficient Mechanism to Improve GDP". *Energy Policy*, vol.36(8), pp.3045-3052, August, DOI : 10.1016/j.enpol.2008.04.012.
- CHRISTIANSEN Atle (2001). *Technological Change and the Role of Public Policy: An Analytical Framework for Dynamic Efficiency Assessments*. Report of the Fridtjof Nansen Institute, 74 pages, disponible sur : <http://www.isn.ethz.ch/Digital->

[Library/Publications/Detail/?ots591=0c54e3b3-1e9c-be1e-2c24-](http://Library/Publications/Detail/?ots591=0c54e3b3-1e9c-be1e-2c24-a6a8c7060233&lng=en&id=96626)

[a6a8c7060233&lng=en&id=96626](http://Library/Publications/Detail/?ots591=0c54e3b3-1e9c-be1e-2c24-a6a8c7060233&lng=en&id=96626) (page consultée le 15 octobre 2014).

- CIFOR Angela, Paul DENHOLM, Erik ELA, Bri-Mathias HODGE et Adam REED (2015). “The Policy and Institutional Challenges of Grid Integration of Renewable Energy in the Western United States”. *Utilities Policy*, vol.33, pp.34-41, DOI : 10.1016/j.jup.2014.11.001.
- COLPIER Ulrika C. et Deborah CORNLAND (2002). “The Economics of the Combined Cycle Gas Turbine—an Experience Curve Analysis”. *Energy Policy*, vol.30(4), pp.309-316, March, DOI : 10.1016/S0301-4215(01)00097-0.
- COSTANZA Robert et Herman E. DALY (1992). “Natural Capital and Sustainable Development”. *Conservation Biology*, vol.6(1), pp.37-46, February, DOI : 10.1046/j.1523-1739.1992.610037.x.
- COWAN Robin (1990). “Nuclear Power Reactors: A Study in Technological Lock-in”. *The Journal of Economic History*, vol.50(3), pp.541-567, September, disponible sur : <http://i.unu.edu/media/unu.edu/news/8673/cowan1990.pdf> (page consultée le 18 juillet 2015).
- CREUTZIG Felix, Jan Christoph GOLDSCHMIDT, Paul LEHMANN, Eva SCHMID, Felix von BLÜCHER, Christian BREYER, Blanca FERNANDEZ, Michael JACOB, Brigitte KNOPF, Steffen LOHREY, Tiziana SUSCA et Konstantin WIEGANDT (2014). “Catching Two European Birds with One Renewable Stone: Mitigating Climate Change and Eurozone Crisis by an Energy Transition”. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol.38, pp.1015-1028, October, DOI : 10.1016/j.rser.2014.07.028.
- CROPPER Maureen L. et Wallace E. OATES (1992). “Environmental Economics: A Survey”. *Journal of Economic Literature*, vol.30(2), pp.675-740, June, disponible sur : <http://studentresearch.wcp.muohio.edu/economics/articles/EconSurvey.pdf> (page consultée le 26 mai 2014).
- CURRIER Kevin M. (2013). “A Regulatory Adjustment Process for the Determination of the Optimal Percentage Requirement in an Electricity Market with Tradable Green Certificates”. *Energy Policy*, vol.62, pp.1053-1057, November, DOI : 10.1016/j.enpol.2013.07.032.
- DALTON Gordon, David LOCKINGTON et Tom BALDOCK (2008). “A Survey of Tourist Attitudes to Renewable Energy Supply in Australian Hotel

- Accommodation”. *Renewable Energy*, vol.33(10), pp.2174-2185, October, DOI : 10.1016/j.renene.2007.12.016.
- DALY Herman E. (1990). “Toward Some Operational Principles of Sustainable Development”. *Ecological Economics*, vol.2(1), pp.1-6, April, DOI : 10.1016/0921-8009(90)90010-R.
- DALY Herman E. (1992). *Steady-State Economics: Second Edition with New Essays*. 2<sup>ème</sup> édi., London : Earthscan, 297 pages.
- DALY Herman E. (1993). *Sustainable Growth: an Impossibility Theorem*, in DALY Herman E. et Kenneth TOWNSEND (Eds.): *Valuing the Earth: Economics, Ecology, Ethics*, 2<sup>ème</sup> édi., Cambridge : The MIT Press, pp.267-274.
- DALY Herman E. (1996). *Beyond Growth: The Economics of Sustainable Development*. 3<sup>ème</sup> édi., Boston : Beacon Press, 253 pages.
- DALY Herman E. et John COBB (1989). *For the Common Good Redirecting the Economy toward Community, the Environment and a Sustainable Future*. 1<sup>ère</sup> édi., Boston : Beacon Press, 482 pages.
- David Paul A. (1985). “Clio and the Economics of QWERTY”. *American Economic Review*, vol.75(2), pp.332-337, May, disponible sur : [www.iei.liu.se/nek/730A22/filarkiv-2013/del-1a-andersson/1.516337/DavidClioecofQWERTY.pdf](http://www.iei.liu.se/nek/730A22/filarkiv-2013/del-1a-andersson/1.516337/DavidClioecofQWERTY.pdf) (page consultée le 25 septembre 2015).
- DAVIES Stephen W. et Ivan DIAZ-RAINEY (2011). “The Patterns of Induced Diffusion: Evidence from the International Diffusion of Wind Energy”. *Technological Forecasting and Social Change*, vol.78(7), pp.1227-1241, September, DOI : 10.1016/j.techfore.2011.03.012.
- DAVIS Steven J., Ken CALDEIRA et H. Damon MATTHEWS (2010). “Future CO<sub>2</sub> Emissions and Climate Change from Existing Energy Infrastructure”. *Science*, vol.329(5997), pp.1330-1333, September, DOI : 10.1126/science.1188566.
- DEL RIO Pablo et Miguel A. GUAL (2007). “An Integrated Assessment of the Feed-in Tariff System in Spain”. *Energy Policy*, vol.35(2), pp.994-1012, February, DOI : 10.1016/j.enpol.2006.01.014.
- DELMOTTE Sébastien et Alain DESROCHES (2014). “L’Analyse Globale des Risques Quantitative (AGRq)”. Article présenté au 19<sup>ème</sup> Congrès de Maîtrise des Risques et Sûreté de fonctionnement, Dijon, Octobre, disponible sur : <http://www.mad->

- [environnement.com/Datas/lm19\\_com\\_5B-3\\_043\\_S\\_Delmotte.pdf](http://environnement.com/Datas/lm19_com_5B-3_043_S_Delmotte.pdf) (page consultée le 10 octobre 2015).
- DESROCHES Alain (2013). “Le management des risques par l’analyse globale des risques”. *Transfusion Clinique et Biologique*, vol.20(2), pp.198-210, May, DOI : 10.1016/j.tracli.2013.02.002.
- DESROCHES Alain, Alain LEROY, Jean-François QUARANTA et Frédérique VALLEE (2006). *Dictionnaire d’analyse et de gestion des risques*. 1<sup>ère</sup> édi., Paris : Hermès-Science et Lavoisier, 479 pages.
- DESROCHES Alain, Dominique BAUDRIN et Michel DADOUN (2009). *Analyse préliminaire des risques : principes et pratiques*. 1<sup>ère</sup> édi., Paris : Hermès-Science et Lavoisier, 311 pages.
- DEVINE-WRIGHT Patrick (2005). “Beyond NIMBYism: Towards an Integrated Framework for Understanding Public Perceptions of Wind Energy”. *Wind Energy*, vol.8(2), pp.125-139, April/June, DOI : 10.1002/we.124.
- DINCER Ibrahim (1999). “Environmental Impacts of Energy”. *Energy Policy*, vol.27(14), pp.845-854, December, DOI : 10.1016/S0301-4215(99)00068-3.
- DINCER Ibrahim (2000). “Renewable Energy and Sustainable Development: A Crucial Review”. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol.4(2), pp.157-175, June, DOI : 10.1016/S1364-0321(99)00011-8.
- DINCER Ibrahim et Marc A. ROSEN (1999), “Energy, Environment and Sustainable Development”. *Applied Energy*, vol.64(1-4), pp.427-440, September, DOI : 10.1016/S0306-2619(99)00111-7.
- DINICA Valentina (2006). “Support Systems for the Diffusion of Renewable Energy Technologies—an Investor Perspective”. *Energy Policy*, vol.34(4), pp.461-480, March, DOI : 10.1016/j.enpol.2004.06.014.
- DINICA Valentina (2011). “Renewable Electricity Production Costs – A Framework to Assist Policymakers’ Decisions on Price Support”. *Energy Policy*, vol.39(7), pp.4153-4167, July, DOI : 10.1016/j.enpol.2011.04.021.
- DOBSON Andrew (1996). “Environmental Sustainabilities: An Analysis and a Typology”. *Environmental Politics*, vol.5(3), pp.401-428, September, DOI : 10.1080/09644019608414280.
- DOSI Giovanni (1982). “Technological Paradigms and Technological Trajectories: A Suggested Interpretation of the Determinants and Directions of Technical Change”.

- Research Policy*, vol.11(3), pp.147-162, June, DOI : 10.1016/0048-7333(82)90016-6.
- DOSI Giovanni (1988). “Sources, Procedures and Micro-Economic Effects of Innovation”. *Journal of Economic Literature*, vol.26(3), pp.1120-1171, September, disponible sur : <http://venus.unive.it/mvolpe/Dosi%201988.pdf> (page consultée le 24 septembre 2014).
- DOSI Giovanni, Christopher FREEMAN, Richard NELSON, Gerald SILVERBERG et Luc SOETE (1988). *Technical Change and Economic Theory*, 1<sup>ère</sup> édi., London : Pinter Publishers, 646 pages.
- DYLLICK Thomas et Kai HOCKERTS (2002). “Beyond the Business Case for Corporate Sustainability”. *Business Strategy and Environment*, vol.11(2), pp.130-141, March, DOI : 10.1002/bse.323.
- ECONOMOU Agisilaos (2010). “Renewable Energy Resources and Sustainable Development in Mykonos (Greece)”. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol.14(5), pp.1496-1501, June, DOI : 10.1016/j.rser.2009.11.008.
- EDENHOFER Ottmar et Nicholas STERN (2009). *Towards a Global Green Recovery: Recommendations for Immediate G20 Action*. Potsdam Institute for Climate Impact Research et Grantham Research Institute on Climate Change and the Environment, Report for the German Foreign Office, rapport présenté au *G20 London Summit-2 April*, disponible sur : [http://www.pik-potsdam.de/members/edenh/publications-1/global-green-recovery\\_pik\\_lse](http://www.pik-potsdam.de/members/edenh/publications-1/global-green-recovery_pik_lse) (page consultée le 20 décembre 2012).
- ELEFTHERIADIS Lordanis M. et Evgenia G. ANAGNOSTOPOULOU (2015). “Identifying Barriers in the Diffusion of Renewable Energy Sources”. *Energy Policy*, vol.80, pp.153-164, May, DOI : 10.1016/j.enpol.2015.01.039.
- ELIASHBERG Jehoshua et Abel P. JEULAND (1986). “The Impact of Competitive Entry in a Developing Market upon Dynamic Pricing Strategies”. *Marketing Science*, vol.5(1), pp.20-36, December, disponible sur : [https://www.researchgate.net/profile/Jehoshua\\_Eliashberg/publication/227442594\\_The\\_Impact\\_of\\_Competitive\\_Entry\\_in\\_a\\_Developing\\_Market\\_Upon\\_Dynamic\\_Pricing\\_Strategies/links/550add990cf265693cee2d75.pdf](https://www.researchgate.net/profile/Jehoshua_Eliashberg/publication/227442594_The_Impact_of_Competitive_Entry_in_a_Developing_Market_Upon_Dynamic_Pricing_Strategies/links/550add990cf265693cee2d75.pdf) (page consultée le 19 avril 2014).
- European Commission-Renewable Energy Unit (2009). *PV Status Report 2009*. August, disponible sur : <http://iet.jrc.ec.europa.eu/remea/pv-status-report-2009> (page consultée le 9 avril 2011).

- European Wind Energy Association (EWEA), (2010). *Wind Barriers: Administrative and Grid Access Barriers to Wind Power*. July, disponible sur : [http://www.windbarriers.eu/fileadmin/WB\\_docs/documents/WindBarriers\\_report.pdf](http://www.windbarriers.eu/fileadmin/WB_docs/documents/WindBarriers_report.pdf) (page consultée le 22 avril 2013).
- FAYOL Henri (1916). *Administration industrielle et générale*. 2<sup>ème</sup> édi., Paris : Dunod, 1999, 133 pages.
- FISCHER Carolyn et Richard G. NEWELL (2008). “Environmental and Technology Policies for Climate Mitigation”. *Journal of Environmental Economics and Management*, vol.55(2), pp.142-162, March, DOI : 10.1016/j.jeem.2007.11.001.
- FLYVBJERG Bent, Nils BRUZELIUS et Werner ROTHENGATTER (2003). *Megaprojects and Risk: An Anatomy of Ambition*. Cambridge : Cambridge University Press, 1<sup>ère</sup> édi., 215 pages.
- FOSTER John et Fred MAGDOFF (2009). *The Great Financial Crisis: Causes and Consequences*. 1<sup>ère</sup> édi., New York : Monthly Review Press, 144 pages .
- FOXON Timothy J. et Peter J.G. PEARSON (2007). “Towards Improved Policy Processes for Promoting Innovation in Renewable Electricity Technologies in the UK”. *Energy Policy*, vol. 35(3), pp.1539-1550, March, DOI : 10.1016/j.enpol.2006.04.009.
- FRANK Lauri D. (2004). “An Analysis of the Effect of the Economic Situation on Modeling and Forecasting the Diffusion of Wireless Communications in Finland”. *Technological Forecasting and Social Change*, vol.71(4), pp.391-403, May, DOI : 10.1016/S0040-1625(02)00392-X.
- FREEMAN Chris et Luc SOETE (1997). *The Economics of Industrial Innovation*. 3<sup>ème</sup> édi., Cambridge : MIT Press, 480 pages.
- FROGER Géraldine (2006). “Significations et ambiguïtés de la gouvernance dans le champ du développement durable”. *Mondes en développement*, vol.4(136), pp.11-28, DOI : 10.3917/med.136.0011.
- FRONDEL Manuel, Nolan RITTER, Christoph M. SCHMIDT et Colin VANCE (2010). “Economic Impacts from the Promotion of Renewable Energy Technologies: The German Experience”. *Energy Policy*, vol.38(8), pp.4048-4056, August, DOI : 10.1016/j.enpol.2010.03.029.
- GALLEGO-CASTILLO Cristobal et Marta VICTORIA (2015). “Cost-Free Feed-in Tariffs for Renewable Energy Deployment in Spain”. *Renewable Energy*, vol.81, pp.411-420, DOI : 10.1016/j.renene.2015.03.052.

- GARCIA Clara (2013). "Policies and Institutions for Grid-Connected Renewable Energy: "Best Practice" and the Case of China". *Governance: An International Journal of Policy, Administration, and Institutions*, vol.26(1), pp.119-146, January, DOI :10.1111/j.1468-0491.2012.01603.x.
- GERLAGH Reyer, Snorre KVERNDOKK et Knut E. ROSENDAHL (2009). "Optimal Timing of Climate Change Policy: Interaction between Carbon Taxes and Innovation Externalities". *Environmental and Resource Economics*, vol.43(3), pp.369-390, July, DOI : 10.1007/s10640-009-9271-y.
- GLAVIC Peter et Rebeka LUKMAN (2007). "Review of Sustainability Terms and their Definitions". *Journal of Cleaner Production*, vol.15(18), pp.1875-1885, December, DOI : 10.1016/j.jclepro.2006.12.006.
- Global Insight (2008). *Current and Potential Green Jobs in the U.S. Economy*. Rapport préparé pour *United States Conference of Mayors and the Mayors Climate Protection Center*, October, disponible sur : <http://www.usmayors.org/pressreleases/uploads/greenjobsreport.pdf> (page consultée le 26 mars 2012).
- GOKHALE Jagadeesh (2009). "Financial Crisis and Public Policy". *Policy Analysis*, n°634, March, disponible sur : <http://object.cato.org/sites/cato.org/files/pubs/pdf/pa634.pdf> (page consultée le 17 novembre 2012).
- GOLDEMBERG José (2006). "The Promise of Clean Energy". *Energy Policy*, vol.34(15), pp.2185-2190, October, DOI : 10.1016/j.enpol.2005.03.009.
- GOODLAND Robert et George LEDEC (1987). "Neoclassical Economics and Principles of Sustainable Development". *Ecological Modelling*, vol.38(1-2), pp.19-46, September, DOI : 10.1016/0304-3800(87)90043-3.
- GRANOVSKII Mikhail, Ibrahim DINCER et Marc A. ROSEN (2007). "Air Pollution Reduction via Use of Green Energy Sources for Electricity and Hydrogen Production". *Atmospheric Environment*, vol.41(8), pp.1777-1783, March, DOI : 10.1016/j.atmosenv.2006.10.023.
- Green New Deal Group (2008). *A Green New Deal, Joined-up Policies to Solve the Triple Crunch of the Credit Crisis, Climate Change and High Oil Prices*. London: New Economics Foundation, July, disponible sur : [http://www.i-r-e.org/bdf/docs/a008\\_a-green-new-deal.pdf](http://www.i-r-e.org/bdf/docs/a008_a-green-new-deal.pdf) (page consultée le 24 Septembre 2012).

- GRUBB Michael J. (1990). "The Cinderella Options. A Study of Modernized Renewable Energy Technologies. Part 2\_ Political and Policy Analysis". *Energy Policy*, vol.18(8), pp.711-725, October, DOI : 10.1016/0301-4215(90)90024-X.
- GUIDOLIN Mariangela et Cinzia MORTARINO (2010). "Cross-Country Diffusion of Photovoltaic Systems: Modelling Choices and Forecasts for National Adoption Patterns". *Technological Forecasting and Social Change*, vol.77(2), pp.279-296, February, DOI : 10.1016/j.techfore.2009.07.003.
- GÜLEN Gürcan (2011). "Defining, Measuring and Predicting Green Jobs". Center for Energy Economics, Bureau of Economic Geology, the University of Texas at Austin, disponible sur : <http://s3.documentcloud.org/documents/262778/ccc-green-jobs.pdf> (page consultée le 14 mars 2012).
- GUTERMUTH Paul-Georg (2000). "Regulatory and Institutional Measures by the State to Enhance the Deployment of Renewable Energies: German Experiences". *Solar Energy*, vol.69(3), pp.205-213, DOI : 10.1016/S0038-092X(00)00060-8.
- HAAS Reinhard, Wolfgang EICHHAMMER, Claus HUBER, Ole LANGNISS, Arturo LORENZONI, Reinhard MADLENER, Philippe MENANTEAU, Erik MORTHORST, Alvaro MARTINS, Anna ONISZK, Joachim SCHLEICH, Adrian SMITH, Zoltan VASS et Aviel VERBRUGGEN (2004). "How to Promote Renewable Energy Systems Successfully and Effectively". *Energy Policy*, vol.32(6), pp.833-839, April, DOI : 10.1016/S0301-4215(02)00337-3.
- HAGGETT Claire (2011). "Understanding Public Responses to Off Shore Wind Power". *Energy Policy*, vol.39(2), pp.503-510, February, DOI : 10.1016/j.enpol.2010.10.014.
- HAHN Minhi, Sehoon PARK, Lakshman KRISHNAMURTHI et Andris A. ZOLTNER (1994). "Analysis of New Product Diffusion Using a Four-Segment Trial-Repeat Model". *Marketing Science*, vol.13(3), pp.224-247, August, DOI : 10.1287/mksc.13.3.224.
- HALL Graham et Sydney HOWELL (1985). "The Experience Curve from the Economist's Perspective". *Strategic Management Journal*, vol.6(3), pp.197-212, July-September, DOI : 10.1002/smj.4250060302.
- HALLEGATTE Stéphane, Geoffrey HEAL, Marianna FAY et David TREGUER (2011). "From Growth to Green Growth-A Framework". The World Bank, Policy Research Working Paper 5872, November.

- JONAS Hans (1991). *Le principe responsabilité : Une éthique pour la civilisation technologique*. Paris : Les Editions du cerf, 2<sup>ème</sup> édi., 336 pages (traduction de la version allemande de 1979 par Jean GREISCH).
- HARIJAN Khanji, Mohammad A. UQAILI, Mujeebuddin MEMON et Umar K. MIRZA (2011). "Forecasting the Diffusion of Wind Power in Pakistan". *Energy*, vol.36(10), pp.6068-6073, October, DOI : 10.1016/j.energy.2011.08.009.
- HARTWICK John M. (1977). "Intergenerational Equity and the Investing of Rents from Exhaustible Resources". *The American Economic Review*, vol.67(5), pp.972-974, December, disponible sur : [http://lib.cufe.edu.cn/upload\\_files/other/4\\_20140527033434\\_50\\_hartwick.pdf](http://lib.cufe.edu.cn/upload_files/other/4_20140527033434_50_hartwick.pdf) (page consultée le 18 janvier 2012).
- HASSID Olivier (2008). *La gestion des risques*, 2<sup>ème</sup> édi., Paris : Dunod, 148 pages.
- HERNANDEZ Félix, Miguel Á. GUAL, Pablo DEL RIO et Alejandro CAPARROS (2004). "Energy Sustainability and Global Warming in Spain". *Energy Policy*, vol.32(3), pp.383-394, February, DOI : 10.1016/S0301-4215(02)00308-7.
- HILLEBRAND Bernhard, Hans G. BUTTERMANN, Jean M. BEHRINGER et Michaela BLEUEL (2006). "The Expansion of Renewable Energies and Employment Effects in Germany". *Energy Policy*, vol.34(18), pp.3484-3494, December, DOI : 10.1016/j.enpol.2005.06.017.
- HILLSON David et Ruth MURRAY-WEBSTER (2007). *Understanding and Managing Risk Attitude*. 2<sup>ème</sup> édi., Aldershot, England : Gower Publishing, 180 pages.
- HIRSCH Werner Z. (1952). "Manufacturing Progress Functions". *Review of Economics and Statistics*, vol.34(2), pp.143-155, May, DOI : 10.2307/1928465.
- HITZEROTH Marion et Andreas MEGERLE (2013). "Renewable Energy Projects: Acceptance Risks and their Management". *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol.27, pp.576-584, November, DOI : 10.1016/j.rser.2013.07.022.
- HO Teck-Hua, Sergei SAVIN et Christian TERWIESCH (2002). "Managing Demand and Sales Dynamics in New Product Diffusion under Supply Constraint". *Management Science*, vol.48(2), pp.187-206, February, DOI : 10.1287/mnsc.48.2.187.257.
- HOLBURN Guy L.F. (2012). "Assessing and Managing Regulatory Risk in Renewable Energy: Contrasts between Canada and the United States". *Energy Policy*, vol.45, pp.654-665, June, DOI : 10.1016/j.enpol.2012.03.017.

- HORSKY Dan (1990). "A Diffusion Model Incorporating Product Benefits, Price, Income and Information". *Marketing Science*, vol.9(4), pp.342-365, November, DOI : 10.1287/mksc.9.4.342.
- HOWARTH Richard B. (1997). "Sustainability as Opportunity". *Land Economics*, vol.73(4), pp.569-579, November, DOI : 10.2307/3147246.
- HUH Sung-Yoon et Chul-Yong LEE (2014). "Diffusion of Renewable Energy Technologies in South Korea on Incorporating their Competitive Interrelationships". *Energy Policy*, vol.69, pp.248-257, June, DOI : 10.1016/j.enpol.2014.02.028.
- HUIJTS Nicole M.A., Eric J.E. MOLIN et Linda STEG (2012). "Psychological Factors Influencing Sustainable Energy Technology Acceptance: A Review-Based Comprehensive Framework". *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol.16(1), pp.525-531, January, DOI : 10.1016/j.rser.2011.08.018.
- HURWICZ Leonid (1973). "The Design of Mechanisms for Resource Allocation". *American Economic Review*, vol.63(2), pp.1-30, May, disponible sur : <http://down.cenet.org.cn/upfile/34/2007430143510179.pdf> (page consultée le 15 septembre 2015).
- HVELPLUND Frede (2001). "Political Price or Political Quantities?" *New Energy*, vol.5, pp.18-23, disponible sur : [http://www.wind-works.org/articles/EFLMinimumPriceSystembyFredeHvelplund\\_NE.pdf](http://www.wind-works.org/articles/EFLMinimumPriceSystembyFredeHvelplund_NE.pdf) (page consultée le 16 avril 2014).
- IBENHOLT Karin (2002). "Explaining Learning Curves for Wind Power". *Energy Policy*, vol.30(13), pp.1181-1189, October, DOI : 10.1016/S0301-4215(02)00014-9.
- Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC), (2001). *Climate Change 2001: Synthesis Report*. Contribution of Working Groups I, II and III to the Third Assessment Report of the IPCC. WATSON Robert and the Core Writing Team (eds.). Cambridge : Cambridge University Press, 398 pages.
- Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC), (2007). *Climate Change 2007: Impacts, Adaptation and Vulnerability*. Contribution of Working Group II to the Fourth Assessment Report of the IPCC. PARRY Martin, Osvaldo CANZIANI, Jean PALUTIKOF, Paul VAN DER LINDEN and Clair HANSON (eds.). Cambridge : Cambridge University Press, 982 pages.
- Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC), (2011). *Renewable Energy Sources and Climate Change Mitigation*. Prepared by Working Group III of the IPCC. EDENHOFER Ottmar, Ramón MADRUGA, Youba SAKONA, Kristin SEYBOTH,

Patrick EICKEMEIER, Patrick MATSCHOSS, Gerrit HANSEN, Susanne KADNER, Steffen SCHLÖMER, Timm ZWICKEL and Christoph VON STECHOW (eds.), New York and Cambridge : Cambridge University Press, 1075 pages.

International Energy Agency (IEA), (2000). *Experience Curves for Energy Technology Policy*. Paris : OECD Publishing, 120 pages, July, DOI : 10.1787/9789264182165-en.

International Energy Agency (IEA), (2007). *World Energy Outlook 2007, China and India Insights*. Paris : OECD/IEA Publishing, France, 663 pages.

International Energy Agency (IEA), (2008). *Deploying Renewables: Principles for Effective Policies*. Paris : OECD/IEA Publishing, 198 pages, disponible sur : [www.iea.org/publications/freepublications/publication/DeployingRenewables2008.pdf](http://www.iea.org/publications/freepublications/publication/DeployingRenewables2008.pdf) (page consultée le 12 aout 2013).

International Energy Agency (IEA), (2010a). *World Energy Outlook 2010*. Paris : OECD/IEA Publishing, 731 pages, disponible sur : <http://www.worldenergyoutlook.org/media/weo2010.pdf> (page consultée le 6 juin 2012).

International Energy Agency (IEA), (2010b). *Technology Roadmap: Concentrating Solar Power*. Paris : OECD/IEA Publishing, 45 pages, disponible sur : [www.iea.org/publications/freepublications/publication/csp\\_roadmap.pdf](http://www.iea.org/publications/freepublications/publication/csp_roadmap.pdf) (page consultée le 12 novembre 2014).

International Energy Agency (IEA), (2011). *World Energy Outlook 2011*. Paris : OECD/IEA Publishing, 659 pages, disponible sur : [www.iea.org/publications/freepublications/publication/WEO2011\\_WEB.pdf](http://www.iea.org/publications/freepublications/publication/WEO2011_WEB.pdf) (page consultée le 7 janvier 2012).

International Energy Agency (IEA), (2014). *Technology Roadmap: Solar Thermal Electricity*. Paris : OECD/IEA Publishing, 46 pages, disponible sur : [http://www.iea.org/publications/freepublications/publication/technologyroadmapsolarthermalelectricity\\_2014edition.pdf](http://www.iea.org/publications/freepublications/publication/technologyroadmapsolarthermalelectricity_2014edition.pdf) (page consultée le 10 septembre 2015).

International Energy Agency-Renewable Energy Technology Deployment (IEA-RETD), (2011). *Risk Quantification and Risk Management in Renewable Energy Projects*. June, disponible sur : <http://iea-retd.org/wp-content/uploads/2011/11/RISK-IEA-RETD-2011-6.pdf> (page consultée le 20 septembre 2015).

- International Labour Organization (ILO), (2009). *Global Employment Trends: January 2009*. International Labour Office, Geneva, 52 pages, disponible sur : [http://www.ilo.org/wcmsp5/groups/public/---dgreports/---dcomm/documents/publication/wcms\\_101461.pdf](http://www.ilo.org/wcmsp5/groups/public/---dgreports/---dcomm/documents/publication/wcms_101461.pdf) (page consultée le 21 décembre 2012).
- International Labour Organization (ILO), (2010). *Global Employment Trends: January 2010*. International Labour Office, Geneva, 84 pages, disponible sur : [http://www.ilo.org/wcmsp5/groups/public/---ed\\_emp/---emp\\_elm/---trends/documents/publication/wcms\\_120471.pdf](http://www.ilo.org/wcmsp5/groups/public/---ed_emp/---emp_elm/---trends/documents/publication/wcms_120471.pdf) (page consultée le 21 décembre 2012).
- International Monetary Fund (IMF), (2008). *Global Financial Stability Report: Containing Systemic Risks and Restoring Financial Soundness*. Washington DC, April, 192 pages, disponible sur : [www.imf.org/External/Pubs/FT/GFSR/2008/01/pdf/text.pdf](http://www.imf.org/External/Pubs/FT/GFSR/2008/01/pdf/text.pdf) (page consultée le 15 mars 2012).
- International Renewable Energy Agency (IRENA), (2015). *Renewable Energy and Jobs - Annual Review 2015*. Abu Dhabi, May, 16 pages, disponible sur : [http://www.irena.org/DocumentDownloads/Publications/IRENA\\_RE\\_Jobs\\_Annual\\_Review\\_2015.pdf](http://www.irena.org/DocumentDownloads/Publications/IRENA_RE_Jobs_Annual_Review_2015.pdf) (page consultée le 17 septembre 2015).
- International Risk Governance Council (IRGC), (2005). *Risk Governance: Towards an Integrative Approach*. White Paper n°1, Author RENN Ortwin with Annexes by Peter GRAHAM. Geneva : IRGC, September, 156 pages, disponible sur : [http://www.irgc.org/IMG/pdf/IRGC\\_WP\\_No\\_1\\_Risk\\_Governance\\_reprinted\\_version.pdf](http://www.irgc.org/IMG/pdf/IRGC_WP_No_1_Risk_Governance_reprinted_version.pdf) (page consultée le 23 novembre 2015).
- International Risk Governance Council (IRGC), (2007). *Governing the Risks and Opportunities of Bioenergy*. Geneva : IRGC, August, 16 pages, disponible sur : [http://www.irgc.org/IMG/pdf/IRGC\\_ConceptNote\\_Bioenergy\\_1408.pdf](http://www.irgc.org/IMG/pdf/IRGC_ConceptNote_Bioenergy_1408.pdf) (page consultée le 23 novembre 2015).
- International Risk Governance Council (IRGC), (2008a). *An Introduction to the IRGC Risk Governance Framework*. Geneva : IRGC, 23 pages, disponible sur : [http://www.irgc.org/IMG/pdf/An\\_introduction\\_to\\_the\\_IRGC\\_Risk\\_Governance\\_Framework.pdf](http://www.irgc.org/IMG/pdf/An_introduction_to_the_IRGC_Risk_Governance_Framework.pdf) (page consultée le 23 novembre 2015).
- International Risk Governance Council (IRGC), (2008b). *Regulation of Carbon Capture and Storage*. Geneva : IRGC, February, 31 pages, disponible sur :

- <http://www.ccsassociation.org/docs/2008/IRGC%20Policy%20Brief%20CCS%20Regulation%20Feb%2008.pdf> (page consultée le 23 novembre 2015).
- ISO 31000 : 2009. *Management du risque – Principes et lignes directrices*. Disponible sur : [www.iso.org/obp/ui/fr/#iso:std:iso:31000:ed-1:v1:fr](http://www.iso.org/obp/ui/fr/#iso:std:iso:31000:ed-1:v1:fr) (page consultée le 15 juin 2013).
- JACOBS Michael (1999). *Sustainable Development as a Contested Concept*. In: DOBSON Andrew (ed.). *Fairness and Futurity: Essays on Environmental Sustainability and Social Justice*. 1<sup>ère</sup> édi., Oxford : Oxford University Press, pp.21-45.
- JACOBSSON Staffan et Anna JOHNSON (2000). “The Diffusion of Renewable Energy Technology: An Analytical Framework and Key Issues for Research”. *Energy Policy*, vol.28(9), pp.625-640, July, DOI : 10.1016/S0301-4215(00)00041-0.
- JAIN Dipak C. et Ram C. RAO (1990). “Effect of Price on the Demand for Durables: Modeling, Estimation, and Findings”. *Journal of Business and Economic Statistics*, vol.8(2), pp.163-170, April, DOI : 10.2307/1391978.
- JAIN Dipak C., Vijay MAHAJAN et Eitan MULLER (1991). “Innovation Diffusion in the Presence of Supply Restrictions”. *Marketing Science*, vol.10(1), pp.83-90, February, DOI : 10.1287/mksc.10.1.83.
- JÄNICKE Martin (2012). “Green Growth: From a Growing Eco-Industry to Economic Sustainability”. *Energy Policy*, vol.48, pp.13-21, September, DOI : 10.1016/j.enpol.2012.04.045.
- JOFFRE Patrick et Gérard KOENIG (1985). *Stratégie d'entreprise- Antimanuel*, 1<sup>ère</sup> édi., Paris : Economica, 248 pages.
- JONES Van (2009). “Green Collar Jobs”. *Our Planet*, the Magazine of the United Nations Environment Programme, pp.8-9, February, disponible sur : <http://www.unep.org/PDF/OurPlanet/2009/Feb/EN/OP-2009-02-en-FULLVERSION.pdf> (page consultée le 17 October 2012).
- JUNGINGER Martin, Andre FAAIJ et Wim TURKENBURG (2005). “Global Experience Curves for Wind Farms”. *Energy Policy*, vol.33(2), pp.133-150, January, DOI : 10.1016/S0301-4215(03)00205-2.
- JUNGINGER Martin, Andre FAAIJ, Rolf BJÖRHEDEN et Wim C. TURKENBURG (2005). “Technological Learning and Cost Reductions in Wood Fuel Supply Chains in Sweden”. *Biomass and Bioenergy*, vol.29(6), pp.399-418, December, DOI : 10.1016/j.biombioe.2005.06.006.

- KAHNEMAN Daniel et Amos TVERSKY (1979). "Prospect Theory: An Analysis of Decisions under Risk", *Econometrica*, vol.47(2), pp.263-292, March, DOI : 10.2307/1914185.
- KALOGIROU Soteris A. (2004). "Environmental Benefits of Domestic Solar Energy Systems". *Energy Conversion and Management*, vol.45(18-19), pp.3075-3092, November, DOI : 10.1016/j.enconman.2003.12.019.
- KAMMEN Daniel M., Kamal KAPADIA et Matthias FRIPP (2004). *Putting Renewables to Work: How Many Jobs Can the Clean Energy Industry Generate?* RAEI report, University of California, Berkeley, April, disponible sur : [http://rael.berkeley.edu/old\\_drupal/sites/default/files/very-old-site/renewables.jobs.2006.pdf](http://rael.berkeley.edu/old_drupal/sites/default/files/very-old-site/renewables.jobs.2006.pdf) (page consultée le 24 juillet 2012).
- KARAKOSTA Charikleia, Charalampos PAPPAS, Vangelis MARINAKIS et John PSARRAS (2013). "Renewable Energy and Nuclear Power towards Sustainable Development: Characteristics and Prospects". *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol.22, pp.187-197, June, DOI : 10.1016/j.rser.2013.01.035.
- KARLSSON Rasmus (2012). "Carbon Lock-in, Rebound Effects and China at the Limits of Statism". *Energy Policy*, vol.51, pp.939-945, December, DOI : 10.1016/j.enpol.2012.09.058.
- KAYGUSUZ Kamil (2009). "Energy and Environmental Issues Relating to Greenhouse Gas Emissions for Sustainable Development in Turkey". *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol.13(1), pp.253-270, January, DOI : 10.1016/j.rser.2007.07.009.
- KELES Sedat et Selçuk BILGEN (2012). "Renewable Energy Sources in Turkey for Climate Change Mitigation and Energy Sustainability". *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol.16(7), pp.5199-5206, September, DOI : 10.1016/j.rser.2012.05.026.
- KEMP René (1994). "Technology and the Transition to Environmental Sustainability: The Problem of Technological Regime Shifts". *Futures*, vol.26(10), pp.1023-1046, December, DOI : 10.1016/0016-3287(94)90071-X.
- KEMP René (1997). *Environmental Policy and Technical Change – A Comparison of the Technological Impact of Policy Instruments*. 1<sup>ère</sup> édi., Cheltenham : Edward Elgar, 360 pages.
- KEMP René (2000). *Technology and Environmental Policy: Innovation effects of Past Policies and Suggestions for Improvement*. In OECD (ed.), *Innovation and the Environment*, Paris : Publications OECD, pp.35-62.

- KEREBEL Pascal (2009). *Management des risques inclus secteurs banque et assurance*. 1<sup>ère</sup> édi., Paris : Eyrolles, 187 pages.
- KERMISCH Céline (2010). *Les paradigmes de la perception du risque*. 1<sup>ère</sup> édi., Paris : TEC et DOC, 248 pages.
- KHAMBALKAR Vivek P., Sachin S. KATKHEDE, Shilpa DAHATONDE, N. D. KORPE et Sandip M. NAGE (2010). “Renewable Energy: An Assessment of Public Awareness”. *International Journal of Ambient Energy*, vol.31(3), pp.133-142, March, DOI : 10.1080/01430750.2010.9675112.
- KLAASSEN Ger, Asami MIKETA, Katarina LARSEN et Thomas SUNDQVIST (2005). “The Impact of R&D on Innovation for Wind Energy in Denmark, Germany and the United Kingdom”. *Ecological Economics*, vol.54(2-3), pp.227-240, August, DOI : 10.1016/j.ecolecon.2005.01.008.
- KLICK Holly et Eric R.A.N. SMITH (2010). “Public Understanding of and Support for Wind Power in the United States”. *Renewable Energy*, vol.35(7), pp.1585-1591, July, DOI : 10.1016/j.renene.2009.11.028.
- KNIGHT Frank H. (1921). *Risk, Uncertainty and Profit*. 1<sup>ère</sup> édi., Boston : Hart, Schaffner and Marx, 260 pages.
- KOMENDANTOVA Nadejda, Anthony PATT et Keith WILLIGES (2011). “Solar Power Investment in North Africa: Reducing Perceived Risks”. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol.15(9), pp.4829-4835, December, DOI : 10.1016/j.rser.2011.07.068.
- KOMENDANTOVA Nadejda, Anthony PATT, Lucile BARRAS et Antonella BATTAGLINI (2012). “Perception of Risks in Renewable Energy Projects: The Case of Concentrated Solar Power in North Africa”. *Energy Policy*, vol.40, pp.103-109, January, DOI : 10.1016/j.enpol.2009.12.008.
- KOUVARITAKIS Nikolaos, Antonio SORIA, Stephane ISOARD et Claude THONET (2000). “Endogenous Learning in World Post-Kyoto Scenarios: Application of the POLES Model under Adaptive Expectations”. *International Journal of Global Energy Issues*, vol.14(1-4), pp.222-248, DOI : 10.1504/IJGEI.2000.004419.
- KREWITT Wolfram, Sonja SIMON, Wina GRAUS, Sven TESKE, Arthouros ZERVOS et Oliver SCHÄFER (2007). “The 2° C Scenario—a Sustainable World Energy Perspective”. *Energy Policy*, vol.35(10), pp.4969-4980, October, DOI : 10.1016/j.enpol.2007.04.034.

- Kreycik Claire, Toby D. COUTURE et Karlynn S. CORY (2011). *Innovative Feed-In Tariff Designs that Limit Policy Costs*. National Renewable Energy Laboratory, Colorado, June, disponible sur : <http://www.nrel.gov/docs/fy11osti/50225.pdf> (page consultée le 9 mars 2014).
- KROHN Soren, Poul-Eric MORTHORST et Shimon AWERBUCH (2009). *The Economics of Wind Energy*. The European Wind Energy Association, March, disponible sur : [http://www.ewea.org/fileadmin/files/library/publications/reports/Economics\\_of\\_Wind\\_Energy.pdf](http://www.ewea.org/fileadmin/files/library/publications/reports/Economics_of_Wind_Energy.pdf) (page consultée le 4 mai 2013).
- LAMBERT Rosebud J. et Patrícia P. SILVA (2012). “The Challenges of Determining the Employment Effects of Renewable Energy”. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol.16(7), pp.4667-4674, September, DOI : 10.1016/j.rser.2012.03.072.
- LAUBER Volkmar (2004). “REFIT and RPS: Options for a Harmonized Community Framework”. *Energy Policy*, vol.32(12), pp.1405-1414, August, DOI : 10.1016/S0301-4215(03)00108-3.
- LEHR Ulrike, Joachim NITSCH, Marlene KRATZAT, Christian LUTZ et Dietmar EDLER (2008). “Renewable Energy and Employment in Germany”. *Energy Policy*, vol.36(1), pp.108-117, January, DOI : 10.1016/j.enpol.2007.09.004.
- LELE Sharachchandra M. (1991). “Sustainable Development: A Critical Review”. *World Development*, vol.19(6), pp.607-621, June, DOI : 10.1016/0305-750X(91)90197-P.
- LEMMING Jacob (2003). “Financial Risks for Green Electricity Investors and Producers in a Tradable Green Certificate Market”. *Energy Policy*, vol.31(1), pp.21-32, January, DOI : 10.1016/S0301-4215(02)00114-3.
- LENTON Timothy M., Hermann HELD, Elmar KRIEGLER, Jim W. HALL, Wolfgang LUCHT, Stefan RAHMSTORF et Hans J. SCHELLNHUBER (2008). “Tipping Elements in the Earth’s Climate System”. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, vol.105(6), pp.1786-1793, February, DOI : 10.1073/pnas.0705414105.
- LESSER Jonathan A. (2010). “Renewable Energy and the Fallacy of ‘Green’ Jobs”. *The Electricity Journal*, vol.23(7), pp.45-53, August-September, DOI : 10.1016/j.tej.2010.06.019.
- LESSER Jonathan A. et Xuejuan SU (2008). “Design of an Economically Efficient Feed-in Tariff Structure for Renewable Energy Development”. *Energy Policy*, vol.36(3), pp.981-990, March, DOI : 10.1016/j.enpol.2007.11.007.

- LI Cun-bin, Gong-shu LU et Si WU (2013). “The Investment Risk Analysis of Wind Power Project in China”. *Renewable Energy*, vol.50, pp.481-487, February, DOI : 10.1016/j.renene.2012.07.007.
- LIEBOWITZ Stan J. et Stephen E. MARGOLIS (1994). “Network Externality: An Uncommon Tragedy”. *Journal of Economic Perspectives*, vol.8(2), pp.133-150, Spring, DOI : 10.1257/jep.8.2.133.
- LIEBOWITZ Stan J. et Stephen E. MARGOLIS (1995). “Path Dependence, Lock-in and History”. *Journal of Law, Economics and Organization*, vol.11(1), pp.205-226, April, disponible sur : [http://papers.ssrn.com/sol3/papers.cfm?abstract\\_id=1706450](http://papers.ssrn.com/sol3/papers.cfm?abstract_id=1706450) (page consultée le 16 juillet 2015).
- LILLIESTAM Johan, Jeffrey M. BIELICKI et Anthony G. PATT (2012). “Comparing Carbon Capture and Storage (CCS) with Concentrating Solar Power (CSP): Potentials, Costs, Risks, and Barriers”. *Energy Policy*, vol.47, pp.447-455, August, DOI : 10.1016/j.enpol.2012.05.020.
- LIND Arne et Eva ROSENBERG (2014). “How do Various Risk Factors Influence the Green Certificate Market of Norway and Sweden?” *Energy Procedia*, vol.58, pp.9-15, DOI : 10.1016/j.egypro.2014.10.402.
- LINDMAN Asa et Patrik SÖDERHOLM (2012). “Wind Power Learning Rates: A Conceptual Review and Meta-Analysis”. *Energy Economics*, vol.34(3), pp.754-761, May, DOI : 10.1016/j.eneco.2011.05.007.
- LIPP Judith (2007). “Lessons for Effective Electricity Policy from Denmark, Germany and the United Kingdom”. *Energy Policy*, vol.35(11), pp.5481-5495, November, DOI : 10.1016/j.enpol.2007.05.015.
- LOHMANN Sina, Christoph SCHILLINGS, Bernhard MAYER et Richard MEYER (2006). “Long-Term Variability of Solar Direct and Global Irradiance Derived from ISCCP Data and Comparison with Re-Analysis Data”. *Solar Energy*, vol.80, pp.1390-1401, May, DOI : 10.1016/j.solener.2006.03.004.
- LOVIO Raimo, Per MICKWITZ et Eva HEISKANEN (2011). *Path Dependence, Path Creation and Creative Destruction in the Evolution of Energy Systems*. In: WÜSTENHAGEN Rolf and Robert WUEBKER (eds.), *Handbook of Research on Energy Entrepreneurship*. 1<sup>ère</sup> édi., New York : Edward Elgar, pp.274-304.
- LUCAS Robert E. (1976). *Econometric Policy Evaluation: A Critique*. In: BRUNNER Karl and Allan MELTZER (eds.), *The Phillips Curve and the Labor Market*. Amsterdam : North Holland Publishing Co, pp.104-130.

- LUND Peter (2006). "Market Penetration Rates of New Energy Technologies". *Energy Policy*, vol.34(17), pp.3317-3326, November, DOI : 10.1016/j.enpol.2005.07.002.
- LÜTHI Sonja et Thomas PRÄSSLER (2011). "Analyzing Policy Support Instruments and Regulatory Risk Factors for Wind Energy Deployment \_ A Developers' Perspective". *Energy Policy*, vol.39(9), pp.4876-4892, September, DOI : 10.1016/j.enpol.2011.06.029.
- LUTHRA Sunil, Sanjay KUMAR, Dixit GARG et Abid HALEEM (2015). "Barriers to Renewable/Sustainable Energy Technologies Adoption: Indian Perspective". *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol.41, pp.762-776, January, DOI : 10.1016/j.rser.2014.08.077.
- MACGILLIVRAY Andrew, Henry JEFFREY, Mark WINSKEL et Ian BRYDEN (2014). "Innovation and Cost Reduction for Marine Renewable Energy: A Learning Investment Sensitivity Analysis". *Technological Forecasting and Social Change*, vol.87, pp.108-124, September, DOI : 10.1016/j.techfore.2013.11.005.
- MAHAJAN Vijay, Eitan MULLER et Frank M. BASS (1990). "New Product Diffusion Models in Marketing: A Review and Direction for Research", *Journal of Marketing*, vol.54(1), pp.1-26, January, DOI : 10.2307/1252170.
- MARKAKI Maria, Athena BELEGRI-RABOLI, Panayotis MICHAELIDES, Sevastianos MIRASGEDIS et Dimitris P. LALAS (2013). "The Impact of Clean Energy Investments on the Greek Economy: An Input-Output Analysis (2010-2020)". *Energy Policy*, vol.57, pp.263-275, June, DOI : 10.1016/j.enpol.2013.01.047.
- MARKANDYA Anil et David PEARCE (1988). "Natural Environments and the Social Rate of Discount". *Project Appraisal*, vol.3(1), March, pp.2-12, DOI : 10.1080/02688867.1988.9726647.
- MARTIN Nigel J. et John L. RICE (2012). "Developing Renewable Energy Supply in Queensland, Australia: A Study of the Barriers, Targets, Policies and Actions". *Renewable Energy*, vol.44, pp.119-127, August, DOI : 10.1016/j.renene.2012.01.006.
- MARTINET Vincent et Luc DOYEN (2007). "Sustainability of an Economy with an Exhaustible Resource: A Viable Control Approach". *Resource and Energy Economics*, vol.29(1), pp.17-39, January, DOI : 10.1016/j.reseneeco.2006.03.003.
- MASINI Andrea et Paolo FRANKL (2003). "Forecasting the Diffusion of Photovoltaic Systems in Southern Europe: A Learning Curve Approach". *Technological*

- Forecasting and Social Change*, vol.70(1), pp.39-65, January, DOI : 10.1016/S0040-1625(01)00183-4.
- MATHEWS Alexander P. (2014). “Renewable Energy Technologies: Panacea for World Energy Security and Climate Change?” *Procedia Computer Science*, vol.32, pp.731-737, DOI : 10.1016/j.procs.2014.05.483.
- MATHIESEN Brian V., Henrik LUND et Kenneth KARLSSON (2011). “100% Renewable Energy Systems, Climate Mitigation and Economic Growth”. *Applied Energy*, vol.88(2), pp.488-501, February, DOI : 10.1016/j.apenergy.2010.03.001.
- MATTAUCH Linus, Felix CREUTZIG et Ottmar EDENHOFER (2015). “Avoiding Carbon Lock-in: Policy Options for Advancing Structural Change”. *Economic Modelling*, vol.50, pp.49-63, November, DOI : 10.1016/j.econmod.2015.06.002.
- MATTSSON Niclas et Clas-Otto WENE (1997). “Assessing New Energy Technologies Using an Energy System Model with Endogenized Experience Curves”. *International Journal of Energy Research*, vol.21(4), pp.385-393, March, DOI : 10.1002/(SICI)1099-114X(19970325)21:4<385::AID-ER275>3.0.CO;2-1.
- MAUERHOFER Volker (2008). “3-D Sustainability: An Approach for Priority Setting in Situation of Conflicting Interests towards a Sustainable Development”. *Ecological Economics*, vol.64(3), pp.496-506, January, DOI : 10.1016/j.ecolecon.2007.09.011.
- MCDONALD Alan et Leo SCHRATTENHOLZER (2001). “Learning Rates for Energy Technologies”. *Energy Policy*, vol.29(4), pp.255-261, March, DOI : 10.1016/S0301-4215(00)00122-1.
- MCGRANAHAN Gordon, Deborah BALK et Bridget ANDERSON (2007). “The Rising Tide: Assessing the Risks of Climate Change and Human Settlements in Low Elevation Coastal Zones”. *Environment and Urbanization*, vol.19(1), pp.17-37, April, DOI : 10.1177/0956247807076960.
- MENANTEAU Philippe, Dominique FINON et Marie-Laure LAMY (2003). “Prices versus Quantities: Choosing Policies for Promoting the Development of Renewable Energy”. *Energy Policy*, vol.31(8), pp.799-812, June, DOI : 10.1016/S0301-4215(02)00133-7.
- MENDONCA Miguel (2007). *Feed-in Tariffs: Accelerating the Deployment of Renewable Energy*. 1<sup>ère</sup> édi., London : Earthscan, 172 pages.

- MESSNER Sabine (1997). “Endogenised Technological Learning in an Energy Systems Model”. *Journal of Evolutionary Economics*, vol.7(3), pp.291-313, November, DOI : 10.1007/s001910050045.
- METCALFE John S. (1997). *On Diffusion and the Process of Technological Change*. In: ANTONELLI Gilberto and Nicola DE LISO (eds), *Economics of Structural and Technological Change*. 1<sup>ère</sup> édi., London-New York : Routledge, pp.120-141.
- MEYER Niels I. (2003). “European Schemes for Promoting Renewables in Liberalised Markets”. *Energy Policy*, vol.31(7), pp.665-676, June, DOI : 10.1016/S0301-4215(02)00151-9.
- MEZHER Toufic, Gihan DAWELBAIT et Zeina ABBAS (2012). “Renewable Energy Policy Options for Abu Dhabi: Drivers and Barriers”. *Energy Policy*, vol.42, pp.315-328, March, DOI : 10.1016/j.enpol.2011.11.089.
- MICHAELS Robert et Robert MURPHY (2009). *Green Jobs: Factor Fiction?* Institute for Energy Research, January, disponible sur : <http://instituteforenergyresearch.org/wp-content/uploads/2009/01/IER%20Study%20-%20Green%20Jobs.pdf> (page consultée le 8 avril 2012).
- MIDILLI Adnan, Ibrahim DINCER et Murat AY (2006). “Green Energy Strategies for Sustainable Development”. *Energy Policy*, vol.34(18), pp.3623-3633, December, DOI : 10.1016/j.enpol.2005.08.003.
- MILBORROW David (2008). “Dissecting Wind Turbine Costs”. *Wind Stats Newsletter*, vol.21(4), pp.3-5, disponible sur : [https://inis.iaea.org/search/search.aspx?orig\\_q=RN:30010041](https://inis.iaea.org/search/search.aspx?orig_q=RN:30010041) (page consultée le 14 mars 2014).
- MIRZA Umar K., Nasir AHMAD, Khanji HARIJAN et Tariq MAJEED (2009). “Identifying and Addressing Barriers to Renewable Energy Development in Pakistan”. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol.13(4), pp.927-931, May, DOI : 10.1016/j.rser.2007.11.006.
- MITCHELL Catherine (2000). “The England and Wales Non-Fossil Fuel Obligation: History and Lessons”. *Annual Review of Energy and the Environment*, vol.25, pp.285-312, November, DOI : 10.1146/annurev.energy.25.1.285.
- MORENO Blanca et Ana J. LOPEZ (2008). “The Effect of Renewable Energy on Employment: The Case of Asturias (Spain)”. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol.12(3), pp.732-751, April, DOI : 10.1016/j.rser.2006.10.011.

- MOUJAHID Abdelfettah (2011). *Regards croisés sur la gouvernance*. 1<sup>ère</sup> édi., France : Lulu.com, 500 pages.
- MOUREAU Nathalie et Dorothée RIVAUD-DANSET (2004). *L'incertitude dans les théories économiques*. 1<sup>ère</sup> édi., Paris : La découverte, 128 pages.
- MUNASINGHE Mohan (1993). *Environmental Economics and Sustainable Development*. World Bank Environment Paper number 1. The World Bank, Washington, D.C., USA, July, disponible sur : [http://www-wds.worldbank.org/external/default/WDSContentServer/WDSP/IB/1999/09/17/000178830\\_98101911254293/Rendered/PDF/multi\\_page.pdf](http://www-wds.worldbank.org/external/default/WDSContentServer/WDSP/IB/1999/09/17/000178830_98101911254293/Rendered/PDF/multi_page.pdf) (page consultée le 15 mai 2013).
- MUNASINGHE Mohan (2001). “Sustainable Development and Climate Change: Applying the Sustainomics Transdisciplinary Meta-Framework”. *International Journal of Global Environmental Issues*, vol.1(1), pp.13-55, DOI : 10.1504/IJGENVI.2001.000970.
- MUSALL Fabian D. et Onno KUIK (2011). “Local Acceptance of Renewable Energy—A Case Study from Southeast Germany”. *Energy Policy*, vol.39(6), pp.3252-3260, June, DOI : 10.1016/j.enpol.2011.03.017.
- NEIJ Lena (1997). “Use of Experience Curves to Analyse the Prospects for Diffusion and Adoption of Renewable Energy Technology”. *Energy Policy*, vol. 25(13), pp.1099-1107, November, DOI : 10.1016/S0301-4215(97)00135-3.
- NEIJ Lena (1999). “Cost Dynamics of Wind Power”. *Energy*, vol.24(5), pp.375-389, May, DOI : 10.1016/S0360-5442(99)00010-9.
- NEIJ Lena (2004). “The Development of the Experience Curve Concept and its Application in Energy Policy Assessment”. *International Journal of Energy Technology and Policy*, vol.2(1-2), pp.3-14, DOI : 10.1504/IJETP.2004.004584.
- NEIJ Lena (2008). “Cost Development of Future Technologies for Power Generation—A Study Based on Experience Curves and Complementary Bottom-up Assessments”. *Energy Policy*, vol.36(6), pp.2200-2211, June, DOI : 10.1016/j.enpol.2008.02.029.
- NELSON Richard R. et Sidney G. WINTER (1977). “In Search of Useful Theory of Innovation”. *Research Policy*, vol.6(1), pp.36-76, January, DOI : 10.1016/0048-7333(77)90029-4.
- NEMET Gregory F. (2006). “Beyond the Learning Curve: Factors Influencing Cost Reductions in Photovoltaics”. *Energy Policy*, vol.34(17), pp.3218-3232, November, DOI : 10.1016/j.enpol.2005.06.020.

- NESBITT Elizabeth R., Paul THIERS, Johnway GAO, Sharon SHOEMAKER, Manuel GARCIA-PEREZ, Julie CARRIER, Joy DORAN-PETERSON, John MORGAN, Guangyi WANG, Pierre Christian WENSEL et Shulin CHEN (2011). “China’s Vision for Renewable Energy: The Status of Bioenergy and Bioproduct Research and Commercialization”. *Industrial Biotechnology*, vol.7(5), pp.336–348, October, DOI : 10.1089/ind.2011.7.336.
- NEUMAYER Eric (2010). *Weak versus Strong Sustainability: Exploring the Limits of Two Opposing Paradigms*. 3<sup>ème</sup> édi., Cheltenham-New York : Edward Elgar, 288 pages.
- NORDENSVÄRD Johan et Frauke URBAN (2015). “The Stuttering Energy Transition in Germany: Wind Energy Policy and Feed-in Tariff Lock-in”. *Energy Policy*, vol.82, pp.156-165, July, DOI : 10.1016/j.enpol.2015.03.009.
- NORDHAUS William D. (2009). “The Perils of the Learning Model for Modeling Endogenous Technological Change”. *NBER Working Paper Series*, n°14638, January, DOI : 10.3386/w14638.
- NORTH Douglass C. (1990). *Institutions, Institutional Change and Economic Performance*. 1<sup>ère</sup> édi., Cambridge : Cambridge University Press, 159 pages.
- NORTH Douglass C. (1991). “Institutions”. *Journal of Economic Perspectives*, vol.5(1), pp.97-112, Winter, DOI: 10.1257/jep.5.1.97.
- NORTH Douglass C. (1994). “Economic Performance through Time”. *American Economic Review*, vol.84(3), pp.359-368, June, disponible sur : <http://www.ppge.ufrgs.br/giacomo/arquivos/diremp/north-1994.pdf> (page consultée le 25 novembre 2014).
- NORTH Douglass C. (2005). *Le processus du développement économique*. Traduit de l’anglais par LE SEAC’H Michel, Paris : Editions d’Organisation, 237 pages.
- OLIVEIRA Carla, Dulce COELHO, Patrícia P. DA SILVA et Carlos ANTUNES (2013). “How Many Jobs Can the RES-E Sectors Generate in the Portuguese Context?” *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol.21, pp.444-455, May, DOI : 10.1016/j.rser.2013.01.011.
- OMAROVA Saule T. (2009). “The new Crisis for the New Century: Some Observations on the ‘Big-Picture’ Lessons of the Global Financial Crisis of 2008”. *North Carolina Banking Institute Journal*, vol.13, pp.157-165, March, disponible sur : [http://papers.ssrn.com/sol3/papers.cfm?abstract\\_id=1905800](http://papers.ssrn.com/sol3/papers.cfm?abstract_id=1905800) (page consultée le 22 avril 2013).

- OMRI Emna, Nouri CHTOUROU et Damien BAZIN (2015a). "Rethinking the Green Recovery through Renewable Energy Expansion". *International Journal of Sustainable Development*, vol.18(1-2), pp.59-76, DOI : 10.1504/IJSD.2015.066787.
- OMRI Emna, Nouri CHTOUROU et Damien BAZIN (2015b). "Solar Thermal Energy for Sustainable Development in Tunisia: The Case of the PROSOL Project". *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol.41, pp.1312-1323, January, DOI : 10.1016/j.rser.2014.09.023.
- OPSCHOOR Hans et Jan VAN DER STRAATEN (1993). "Sustainable Development: An Institutional Approach". *Ecological Economics*, vol.7(3), pp.203-222, June, DOI : 10.1016/0921-8009(93)90004-P.
- Organisation for Economic Co-operation and Development (OECD), (2001). *Sustainable Development: Critical Issues*. Paris : OECD Publishing, juillet, 420 pages.
- Organisation for Economic Co-operation and Development (OECD), (2006). *Good Practices in the National Sustainable Development Strategies of OECD Countries*. Paris : OECD Publishing, juillet, 35 pages, disponible sur : <http://www.oecd.org/greengrowth/36655769.pdf> (page consultée le 28 mai 2014).
- Organisation for Economic Co-operation and Development (OECD), (2007). *OECD Contribution to the United Nations Commission on Sustainable Development 15: Energy for Sustainable Development*. Paris : OECD Publishing, 104 pages, disponible sur : <http://www.oecd.org/greengrowth/38509686.pdf> (page consultée le 19 mai 2014).
- Organisation for Economic Co-operation and Development (OECD), (2010). *Guidance on Sustainability Impact Assessment*. Paris : OECD Publishing, 34 pages, disponible sur : <http://www.oecd.org/greengrowth/46530443.pdf> page consultée le 16 juillet 2012).
- Organisation for Economic Co-operation and Development (OECD), (2011a). *Towards Green Growth: A Summary for Policy Makers*. Paris : OECD Publishing, May, 23 pages, disponible sur : <http://www.oecd.org/greengrowth/48012345.pdf> (page consultée le 14 octobre 2012).
- Organisation for Economic Co-operation and Development (OECD), (2011b). *Towards Green Growth*. Paris : OECD Publishing, June, 144 pages.
- Organisation for Economic Co-operation and Development/International Energy Agency (OECD/IEA), (2014a). "Statistics on the Web 2014". Disponible sur :

<http://www.iea.org/statistics/statisticssearch/report/?&country=TUNISIA&year=2011&product=Indicators> (page consultée le 15 octobre 2015).

Organisation for Economic Co-operation and Development/International Energy Agency (OECD/IEA), (2014b). “Statistics on the Web 2014”. Disponible sur : <http://www.iea.org/stats/WebGraphs/TUNISIA4.pdf> (page consultée le 15 octobre 2015).

Organisation de Coopération et de Développement Economiques (OCDE), (2003). *Les risques émergents au XXI<sup>e</sup> siècle : vers un programme d'action*. Paris : Les éditions de l'OCDE, août, 332 pages, disponible sur : <http://www.oecd.org/fr/sti/prospective/perspectivesmondiales/37388661.pdf> (page consultée le 15 octobre 2014).

Organisation de Coopération et de Développement Economiques (OCDE), (2011). *Vers une croissance verte : résumé à l'intention des décideurs*. Paris : Les éditions de l'OCDE, mai, 24 pages, disponible sur : <http://www.oecd.org/fr/croissanceverte/48537006.pdf> (page consultée le 8 mars 2012).

Organisation de Coopération et de Développement Economiques (OCDE), (2015a). *Les partenariats public-privé en Tunisie*. Paris : Les éditions de l'OCDE, août, 39 pages, disponible sur : [www.oecd.org/fr/daf/inv/politiques-investissement/PPP-Tunisie-Volume-1.pdf](http://www.oecd.org/fr/daf/inv/politiques-investissement/PPP-Tunisie-Volume-1.pdf) (page consultée le 18 octobre 2015).

Organisation de Coopération et de Développement Economiques (OCDE), (2015b). *Les partenariats public-privé en Tunisie : analyse des cadres juridique et institutionnel*. Paris : Les éditions de l'OCDE, août, 114 pages, disponible sur : [www.oecd.org/fr/daf/inv/politiques-investissement/PPP-Tunisie-Volume-2.pdf](http://www.oecd.org/fr/daf/inv/politiques-investissement/PPP-Tunisie-Volume-2.pdf) (page consultée le 18 octobre 2015).

OSOFSKY Hari M. (2003). “Defining Sustainable Development after Earth Summit 2002”. *Loyola of Los Angeles International and Comparative Law Review*, vol.26, pp.91-106, disponible sur : [http://papers.ssrn.com/sol3/papers.cfm?abstract\\_id=976543](http://papers.ssrn.com/sol3/papers.cfm?abstract_id=976543) (page consultée le 3 mars 2012).

PAINULY Jyoti P. (2001). “Barriers to Renewable Energy Penetration; a Framework for Analysis”. *Renewable Energy*, vol.24(1), pp.73-89, September, DOI : 10.1016/S0960-1481(00)00186-5.

- PAN Jiahua, Haibing MA et Ying ZHANG (2011). *Green Economy and Green Jobs in China: Current Status and Potentials for 2020*. Worldwatch Report 185, Washington, D.C., disponible sur : <http://www.worldwatch.org/system/files/185%20Green%20China.pdf> (page consultée le 15 avril 2013)
- PAPINEAU Maya (2006). “An Economic Perspective on Experience Curves and Dynamic Economies in Renewable Energy Technologies”. *Energy Policy*, vol.34(4), pp.422-432, March, DOI :10.1016/j.enpol.2004.06.008.
- PARTRIDGE Ian (2013). “Renewable Electricity Generation in India—A Learning Rate Analysis”. *Energy Policy*, vol.60, pp.906-915, September, DOI : 10.1016/j.enpol.2013.05.035.
- PATLITZIANAS Konstantinos D., Haris DOUKAS et John PSARRAS (2006). “Enhancing Renewable Energy in the Arab States of the Gulf: Constraints and Efforts”. *Energy Policy*, vol.34(18), pp.3719-3726, December, DOI : 10.1016/j.enpol.2005.08.018.
- PAVALOAI Leontina, Iuliana GEORGESCU et Mircea GEORGESCU (2015). “The System of Green Certificates - Promoter of Energy from Renewable Resources”. *Procedia - Social and Behavioral Sciences*, vol.188, pp.206-213, May, DOI : 10.1016/j.sbspro.2015.03.374.
- PEARCE David W. et Giles D. ATKINSON (1993). “Capital Theory and the Measurement of Sustainable Development: An Indicator of “Weak” Sustainability”. *Ecological Economics*, vol.8(2), pp.103-108, October, DOI : 10.1016/0921-8009(93)90039-9.
- PEARCE David, Anil MARKANDYA et Edward BARBIER (1989). *Blueprint for a Green Economy*. 1<sup>ère</sup> édi., London : Earthscan, 208 pages.
- PEREIRA J.D.S. Edinaldo, João T. PINHO, Marcos A.B. GALHARDO et Wilson N. MACEDO (2014). “Methodology of Risk Analysis by Monte Carlo Method Applied to Power Generation with Renewable Energy”. *Renewable Energy*, vol.69, pp.347-355, September, DOI : 10.1016/j.renene.2014.03.054.
- PERKINS Richard (2003). “Technological Lock-in”. International Society for Ecological Economics, Internet Encyclopedia of Ecological Economics, February, disponible sur : <http://isecoeco.org/pdf/techlkin.pdf> (page consultée le 23 juillet 2015).

- PETERSON Robert et Vijay MAHAJAN (1978). *Multi-Product Growth Models*. In: SHETH Jagdish (ed.), *Research in Marketing: An Annual Compilation of Research Vol 1*. 1<sup>ère</sup> édi., Connecticut : JAI Press, pp.201-231.
- PEZZEY John (1992). *Sustainable Development Concepts: An Economic Analysis*. World Bank Environment paper number 2, the World Bank, Washington, D.C., disponible sur : [http://www-wds.worldbank.org/servlet/WDSContentServer/WDSP/IB/1999/10/21/000178830\\_98101911160728/Rendered/PDF/multi\\_page.pdf](http://www-wds.worldbank.org/servlet/WDSContentServer/WDSP/IB/1999/10/21/000178830_98101911160728/Rendered/PDF/multi_page.pdf) (page consultée le 14 juin 2012).
- PFAFFENBERGER Wolfgang, Karin JAHN et Martha DJOURDJIN (2006). *Renewable Energies– Environmental Benefits, Economic Growth and Job Creation: Case Study Paper*. Bremen : Bremer Energie Institut, February, disponible sur : [http://www.estif.org/fileadmin/estif/content/press/downloads/060506\\_Bremer\\_institut\\_e\\_impact\\_jobs\\_renewable\\_energies.pdf](http://www.estif.org/fileadmin/estif/content/press/downloads/060506_Bremer_institut_e_impact_jobs_renewable_energies.pdf) (page consultée le 18 octobre 2014).
- PIGOU Arthur (1932). *The Economics of Welfare*. 4<sup>ème</sup> édi., London : Macmillan, 837 pages.
- PINKSE Jonatan et Daniel V.D. BUUSE (2012). “The Development and Commercialization of Solar PV Technology in the Oil Industry”. *Energy Policy*, vol.40, pp.11-20, January, DOI : 10.1016/j.enpol.2010.09.029.
- POLLIN Robert, James HEINTZ et Heidi GARRETT-PELTIER (2009). *The Economic Benefits of Investing in Clean Energy: How the Economic Stimulus Program and New Legislation Can Boost U.S. Economic Growth and Employment*. Department of Economics and Political Economy Research Institute (University of Massachusetts) and Center for American Progress, June, disponible sur : [http://www.peri.umass.edu/fileadmin/pdf/other\\_publication\\_types/green\\_economics/economic\\_benefits/economic\\_benefits.PDF](http://www.peri.umass.edu/fileadmin/pdf/other_publication_types/green_economics/economic_benefits/economic_benefits.PDF) (page consultée le 14 février 2012).
- Programme des Nations Unies pour l’Environnement (PNUE), (2009). *Nouveau Pacte Mondial : Note d’orientation*. Mars, Genève, 38 pages, disponible sur : <http://www.adequations.org/IMG/pdf/NouveauPacteVert.pdf> (page consultée le 12 novembre 2012).
- PUROHIT Pallav (2008). “Small Hydropower Projects under Clean Development Mechanism in India: A Preliminary Assessment”. *Energy Policy*, vol.36(6), pp.2000-2015, June, DOI : 10.1016/j.enpol.2008.02.008.

- PUROHIT Pallav (2009). "Economic Potential of Biomass Gasification Projects under Clean Development Mechanism in India". *Journal of Cleaner Production*, vol.17(2), pp.181-193, January, DOI : 10.1016/j.jclepro.2008.04.004.
- PUROHIT Pallav et Axel MICHAELAWA (2007). "CDM Potential of Bagasse Cogeneration in India". *Energy Policy*, vol.35(10), pp.4779-4798, October, DOI : 10.1016/j.enpol.2007.03.029.
- PUROHIT Pallav et Tara C. KANDPAL (2005). "Renewable Energy Technologies for Irrigation Water Pumping in India: Projected Levels of Dissemination, Energy Delivery and Investment Requirements Using Available Diffusion Models". *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol.9(6), pp.592-607, December, DOI : 10.1016/j.rser.2004.07.002.
- QIU Yueming et Laura D. ANADON (2012). "The Price of Wind Power in China during its Expansion: Technology Adoption, Learning-by-Doing, Economies of Scale, and Manufacturing Localization". *Energy Economics*, vol.34(3), pp.772-785, May, DOI : 10.1016/j.eneco.2011.06.008.
- QU Mei, Pirkkoliisa AHPONEN, Liisa TAHVANAINEN, David GRITTEN, Blas MOLA-YUDEGO et Paavo PELKONEN (2011). "Chinese University Students' Knowledge and Attitudes Regarding Forest Bio-energy". *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol.15(8), pp.3649-3657, October, DOI : 10.1016/j.rser.2011.07.002.
- RAI Varun, David G. VICTOR et Mark C. THURBER (2010). "Carbon Capture and Storage at Scale: Lessons from the Growth of Analogous Energy Technologies". *Energy Policy*, vol.38(8), pp.4089-4098, August, DOI : 10.1016/j.enpol.2010.03.035.
- RAMSEY Frank P. (1931). *The Foundations of Mathematics and other Logical Essays*, 1<sup>ère</sup> édi., London : Routledge, 292 pages.
- RAO K. Usha et V.V.N. KISHORE (2009). "Wind Power Technology Diffusion Analysis in Selected States of India". *Renewable Energy*, vol.34(4), pp.983-988, April, DOI : 10.1016/j.renene.2008.08.013.
- RAO K. Usha et V.V.N. KISHORE (2010). "A Review of Technology Diffusion Models with Special Reference to Renewable Energy Technologies". *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol.14(3), pp.1070-1078, April, DOI : 10.1016/j.rser.2009.11.007.
- REDDY V. Ratna, Juha I. UITTO, Dirk R. FRANS et Nilufar MATIN (2006). "Achieving Global Environmental Benefits through Local Development of Clean Energy?"

- The Case of Small Hilly Hydel in India”. *Energy Policy*, vol.34(18), pp.4069-4080, December, DOI : 10.1016/j.enpol.2005.09.026.
- Regional Center for Renewable Energy and Energy Efficiency (RCREEE), (2015). *Arab Future Energy Index, AFEX 2015: Renewable Energy*. RCREEE, Egypt, disponible sur : [http://www.rcreee.org/sites/default/files/afex\\_re\\_2015\\_v2\\_1st\\_edition\\_wo\\_1.pdf](http://www.rcreee.org/sites/default/files/afex_re_2015_v2_1st_edition_wo_1.pdf) (page consultée le 2 août 2016).
- Renewable Energy Policy Network for the 21<sup>st</sup> Century (REN21), (2015a). *Renewables 2015: Global Status Report*. Paris : REN21, disponible sur : [http://www.ren21.net/wp-content/uploads/2015/07/REN12-GSR2015\\_Onlinebook\\_low1.pdf](http://www.ren21.net/wp-content/uploads/2015/07/REN12-GSR2015_Onlinebook_low1.pdf) (page consultée le 19 mai 2015).
- Renewable Energy Policy Network for the 21<sup>st</sup> Century (REN21), (2015b). *Rapport sur le statut mondial des énergies renouvelables 2015 : faits essentiels 2015*. Paris : REN21, disponible sur : [http://www.ren21.net/wp-content/uploads/2015/06/GSRKF\\_2015\\_FR.pdf](http://www.ren21.net/wp-content/uploads/2015/06/GSRKF_2015_FR.pdf) (page consultée le 19 mai 2015).
- RENN Ortwin, Andreas KLINKE et Marjolein VAN ASSELT (2011). “Coping with Complexity, Uncertainty and Ambiguity in Risk Governance: A Synthesis”. *AMBIO*, vol.40(2), pp.231-246, February, DOI : 10.1007/s13280-010-0134-0.
- Revue de l’Energie n°89 (2014). République Tunisienne, Ministère de l’Industrie de l’Energie et des Mines, août, disponible sur : [http://www.tunisieindustrie.gov.tn/upload/download/revue\\_energie/revue-energie-dec2014-fr.pdf](http://www.tunisieindustrie.gov.tn/upload/download/revue_energie/revue-energie-dec2014-fr.pdf) (page consultée le 20 avril 2015).
- Revue de l’Energie n°90 (2014). République Tunisienne, Ministère de l’Industrie de l’Energie et des Mines, décembre, disponible sur : <http://data.industrie.gov.tn/wp-content/uploads/revue-energie-n90-dec-2014.pdf> (page consultée le 20 avril 2015).
- Revue de l’Energie n°91 (2015). République Tunisienne, Ministère de l’Industrie de l’Energie et des Mines, juin, disponible sur : <http://data.industrie.gov.tn/wp-content/uploads/revue-energie-N91-fr.pdf> (page consultée le 15 août 2015).
- RICHARDS Garrett, Bram NOBLE et Ken BELCHER (2012). “Barriers to Renewable Energy Development: A Case Study of Large-Scale Wind Energy in Saskatchewan, Canada”. *Energy Policy*, vol.42, pp.691-698, March, DOI : 10.1016/j.enpol.2011.12.049.

- RIFKIN Jeremy (2011). *The Third Industrial Revolution: How Lateral Power is Transforming Energy, the Economy, and the World*. 1<sup>ère</sup> édi., New York : Palgrave Macmillan, 304 pages.
- RIP Arie et René KEMP (1998). *Technological Change*. In: RAYNER Steve et Elizabeth MALONE (eds.), *Human Choice and Climate Change-Volume 2: Resources and Technology*. Columbus : Battelle Press, pp.327-399.
- ROBINS Nick, Robert CLOVER et Charanjit SINGH (2009). *A Climate for Recovery: The Colour of Stimulus Goes Green*. HSBC Global Research, London, February, disponible sur : [http://www.globaldashboard.org/wp-content/uploads/2009/HSBC\\_Green\\_New\\_Deal.pdf](http://www.globaldashboard.org/wp-content/uploads/2009/HSBC_Green_New_Deal.pdf) (page consultée le 22 Octobre 2012).
- ROGERS Everett (1962). *Diffusion of Innovations*. 1<sup>ère</sup> édi., New York : The Free Press, 367 pages.
- SADORSKY Perry (2009). “Renewable Energy Consumption and Income in Emerging Economies”. *Energy Policy*, vol.37(10), pp.4021-4028, October, DOI : 10.1016/j.enpol.2009.05.003.
- SAENZ D. M. Gonzalo, Pablo D. R. GONZALEZ et Ignacio VIZCAINO (2008). “Analysing the Impact of Renewable Electricity Support Schemes on Power Prices: The Case of Wind Electricity in Spain”. *Energy Policy*, vol.36(9), pp.3345-3359, September, DOI : 10.1016/j.enpol.2008.04.022.
- SAPHORES Jean-Daniel M., Hilary NIXON, Oladele A. OGUNSEITAN et Andrew A. SHAPIRO (2007). “California Households’ Willingness to Pay for ‘Green’ Electronics”. *Journal of Environmental Planning and Management*, vol.50(1), pp.113-133, February, DOI :10.1080/09640560601048549.
- SAPKOTA Alka, Zhibo LU, Haizhen YANG et Juan WANG (2014). “Role of Renewable Energy Technologies in Rural Communities’ Adaptation to Climate Change in Nepal”. *Renewable Energy*, vol.68, pp.793-800, August, DOI : 10.1016/j.renene.2014.03.003.
- SASTRESA E. Llera, Alfonso A. USON, Ignacio Z. BRIBIAN et Sabina SCARPELLINI (2010). “Local Impact of Renewables on Employment: Assessment Methodology and Case study”. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol.14(2), pp.679-690, February, DOI : 10.1016/j.rser.2009.10.017.
- SAVAGE Leonard J. (1954). *The Foundations of Statistics*. 1<sup>ère</sup> édi., New York : John Wiley and Sons, 294 pages.

- SCHMALENSE Richard (2012). "From 'Green Growth' to Sound Policies: An Overview". *Energy Economics*, vol.34, Supplement 1, pp.S2–S6, November, DOI : 10.1016/j.eneco.2012.08.041.
- SCHMIDT Robert C. et Robert MARSCHINSKI (2009). "A Model of Technological Breakthrough in the Renewable Energy Sector". *Ecological Economics*, vol.69(2), pp.435-444, December, DOI : 10.1016/j.ecolecon.2009.08.023.
- SEDLACKO Michal et Nisida GJOKSI (2009). *Sustainable Development and Economic Growth: Overview and Reflections on Initiatives in Europe and Beyond*. European Sustainable Development Network Quarterly Report, December, disponible sur : [http://www.sd-network.eu/quarterly%20reports/report%20files/pdf/2009-December-Sustainable development and economic growth.pdf](http://www.sd-network.eu/quarterly%20reports/report%20files/pdf/2009-December-Sustainable%20development%20and%20economic%20growth.pdf) (page consultée le 4 avril 2012).
- SHAFIEI Sahar et Ruhul A. SALIM (2014). "Non-Renewable and Renewable Energy Consumption and CO<sub>2</sub> Emissions in OECD Countries: A Comparative Analysis". *Energy Policy*, vol.66, pp.547-556, March, DOI : 10.1016/j.enpol.2013.10.064.
- SIDORTSOV Roman (2014). "Reinventing Rules for Environmental Risk Governance in the Energy Sector". *Energy Research and Social Science*, vol.1, pp.171-182, March, DOI : 10.1016/j.erss.2014.03.013.
- SLOVIC Paul (1987). "Perception of Risk". *Science*, vol.236(4799), pp.280-285, April, disponible sur : <http://heatherlench.com/wp-content/uploads/2008/07/slovic.pdf> (page consultée le 15 juillet 2015).
- SLOVIC Paul (1993). "Perceived Risk, Trust, and Democracy". *Risk Analysis*, vol.13(6), pp.675-682, December, DOI : 10.1111/j.1539-6924.1993.tb01329.x.
- SLOVIC Paul, Baruch FISCHHOFF et Sarah LICHTENSTEIN (1982). "Why Study Risk Perception?" *Risk analysis*, vol.2(2), pp.83-93, June, DOI : 10.1111/j.1539-6924.1982.tb01369.x.
- SNEDDON Chris, Richard B. HOWARTH et Richard B. NORGAARD (2006). "Sustainable Development in a Post-Brundtland World". *Ecological Economics*, vol.57(2), pp.253-268, May, DOI : 10.1016/j.ecolecon.2005.04.013.
- Société Tunisienne de l'Electricité et du Gaz (STEG), (2014). *Production de l'électricité en Tunisie, une transition énergétique s'impose pour un futur meilleur*. Mars, disponible sur : <http://www.oitsfax.org/files/AApresentationHDR20140323.pdf> (page consultée le 11 février 2015).

- SÖDERHOLM Patrik et Ger KLAASSEN (2007). “Wind Power in Europe: A Simultaneous Innovation-Diffusion Model”. *Environmental and Resource Economics*, vol.36(2), pp.163-190, February, DOI : 10.1007/s10640-006-9025-z.
- SÖDERHOLM Patrik et Thomas SUNDQVIST (2007). “Empirical Challenges in the Use of Learning Curves for Assessing the Economic Prospects of Renewable Energy Technologies”. *Renewable Energy*, vol.32(15), pp.2559-2578, December, DOI : 10.1016/j.renene.2006.12.007.
- SOLOW Robert M. (1974). “Intergenerational Equity and Exhaustible Resources”. *Review of Economic Studies*, vol.41(5), pp.29-45, DOI : 10.2307/2296370.
- SOLOW Robert M. (1993). “An Almost Practical Step toward Sustainability”. *Resources Policy*, vol.19(3), pp.162-172, February, DOI : 10.1016/0301-4207(93)90001-4.
- SOUBBOTINA Tatyana P. (2004). *Beyond Economic Growth an Introduction to Sustainable Development*. The World Bank, Washington, D.C., June, disponible sur : [http://www.worldbank.org/depweb/english/beyond/beyondco/beg\\_all.pdf](http://www.worldbank.org/depweb/english/beyond/beyondco/beg_all.pdf) (page consultée le 4 mars 2011).
- SOVACOOOL Benjamin K. (2009). “The Cultural Barriers to Renewable Energy and Energy Efficiency in the United States”. *Technology in Society*, vol.31(4), pp.365-373, November, DOI : 10.1016/j.techsoc.2009.10.009.
- STERN Nicholas (2006). *The Stern Review Report: The Economics of Climate Change*. London HM Treasury, October, 603 pages, disponible sur : [http://webarchive.nationalarchives.gov.uk/20100407172811/http://www.hm-treasury.gov.uk/stern\\_review\\_report.htm](http://webarchive.nationalarchives.gov.uk/20100407172811/http://www.hm-treasury.gov.uk/stern_review_report.htm) (page consultée le 15 avril 2011).
- STERNER Thomas et Maria DAMON (2011). “Green Growth in the Post-Copenhagen Climate”. *Energy Policy*, vol.39(11), pp.7165-7173, November, DOI : 10.1016/j.enpol.2011.08.036.
- STIGLITZ Joseph.E. (1974). “Growth with Exhaustible Natural Resources: Efficient and Optimal Growth Paths”. *The Review of Economic Studies*, vol.41(5), pp.123-137, July, DOI : 10.2307/2296377.
- THIAM Djiby-Racine et Henri C. MOLL (2012). “The Constraints in Managing a Transition towards Clean Energy Technologies in Developing Nations: Reflections on Energy Governance and Alternative Policy Options”. *International Journal of Technology, Policy and Management*, vol.12(2-3), pp.115-134, May, DOI : 10.1504/IJTPM.2012.046922.

- TSAI Wen-Tien et Yuan-Hwa CHOU (2005). "Overview of Environmental Impacts, Prospects and Policies for Renewable Energy in Taiwan". *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol.9(2), pp.119-147, April, DOI : 10.1016/j.rser.2004.01.014.
- TUGCU Can Tansel, Ilhan OZTURK et Alper ASLAN (2012). "Renewable and Non-Renewable Energy Consumption and Economic Growth Relationship Revisited: Evidence from G7 Countries". *Energy Economics*, vol.34(6), pp.1942-1950, November, DOI : 10.1016/j.eneco.2012.08.021.
- Tunisian Ministry of Environment and Land Planning (2001). *Initial Communication of Tunisia under the United Nations Framework Convention on Climate Change. Summary Version*, October, disponible sur : <http://unfccc.int/resource/docs/natc/tunnclsum.pdf> (page consultée le 10 avril 2011).
- TuNur (2012). "TuNur: Solar Energy Export from Tunisia to Europe". TuNur, June, 14 pages.
- TuNur (2013). "Le Projet TuNur". Article présenté aux *Journées de l'énergie*, Tunis, Octobre.
- TuNur (2015). "The TuNur Project". Présentation au *UK-Tunisia Trade and Investment Forum*, October, Tunis, disponible sur : [http://www.developingmarkets.com/sites/default/files/Sess%203%20S%204%2020151020\\_TuNur%20Presentation\\_UK-Tunisia%20Trade%20and%20Investment.pdf](http://www.developingmarkets.com/sites/default/files/Sess%203%20S%204%2020151020_TuNur%20Presentation_UK-Tunisia%20Trade%20and%20Investment.pdf) (page consultée le 15 décembre 2015).
- United Nations Department of Economic and Social Affairs (UN/DESA), (2009). *A Global Green New Deal for Climate, Energy and Development*. December, 20 pages, disponible sur : [http://www.un-energy.org/sites/default/files/share/une/cc\\_global\\_green\\_new\\_deal.pdf](http://www.un-energy.org/sites/default/files/share/une/cc_global_green_new_deal.pdf) (page consultée le 11 juin 2012).
- United Nations Environment Programme (UNEP), (2004). *Financial Risk Management Instruments for Renewable Energy Projects*. Oxford : Words and Publications, UK, 52 pages, disponible sur : [http://www.unep.org/pdf/75\\_Risk\\_Management\\_Study.pdf](http://www.unep.org/pdf/75_Risk_Management_Study.pdf) (page consultée le 19 juillet 2013).
- United Nations Environment Programme (UNEP), (2007). *Assessment of Financial Risk Management Instruments for Renewable Energy Projects*. Working Group 1 Study Report, UNEP, July.

- United Nations Environment Programme (UNEP), (2009). *UNEP Year Book 2009: New Science and Developments in our Changing Environment*. UNEP February, 68 pages, disponible sur : [http://www.unep.org/yearbook/2009/PDF/FR-GEO\\_09-Low.pdf](http://www.unep.org/yearbook/2009/PDF/FR-GEO_09-Low.pdf) (page consultée le 12 Novembre 2012).
- United Nations Environment Programme (UNEP), (2010). *Green Economy: Developing Countries Success Stories*. UNEP, France, 25 pages, disponible sur : [http://www.unep.org/pdf/greeneconomy\\_successstories.pdf](http://www.unep.org/pdf/greeneconomy_successstories.pdf) (page consultée le 25 mars 2013).
- United Nations Environment Programme (UNEP), (2011). *Towards a Green Economy: Pathways to Sustainable Development and Poverty Eradication. A Synthesis for Policy Makers*. UNEP, France, 44 pages, disponible sur : [http://www.unep.org/greeneconomy/Portals/88/documents/ger/GER\\_synthesis\\_en.pdf](http://www.unep.org/greeneconomy/Portals/88/documents/ger/GER_synthesis_en.pdf) (page consultée le 4 décembre 2012).
- United Nations Environment Programme, Frankfurt School of Finance and Management et Bloomberg New Energy Finance (UNEP, FSFM et BNEF), (2012). *Global Trends in Renewable Energy Investment 2012*. June, 82 pages, disponible sur : <http://fs-unep-centre.org/sites/default/files/publications/globaltrendsreport2012.pdf> (page consultée le 12 novembre 2012).
- United Nations Environment Programme, Frankfurt School of Finance and Management et Bloomberg New Energy Finance (UNEP, FSFM et BNEF), (2015). *Global Trends in Renewable Energy Investment 2015, Key findings*. March, 16 pages, disponible sur : [http://fs-unep-centre.org/sites/default/files/attachments/key\\_findings.pdf](http://fs-unep-centre.org/sites/default/files/attachments/key_findings.pdf) (page consultée le 15 mai 2015).
- United Nations Environment Programme, International Labour Organization, International Organisation of Employers and International Trade Union Confederation (UNEP, ILO, IOE and ITUC), (2008). *Green Jobs: Towards Decent Work in a Sustainable Low Carbon World*. Worldwatch Institute, Washington DC, September, 350 pages, disponible sur : [http://www.unep.org/PDF/UNEPGreenjobs\\_report08.pdf](http://www.unep.org/PDF/UNEPGreenjobs_report08.pdf) (page consultée le 7 novembre 2012).
- United Nations Environment Programme et Bloomberg New Energy Finance (UNEP et BNEF), (2010). *Global Trends in Renewable Energy Investment 2010*. July, 61 pages, disponible sur : [http://www.unep.org/pdf/dtie/GlobalTrendsSustainableEnergy\\_2010.pdf](http://www.unep.org/pdf/dtie/GlobalTrendsSustainableEnergy_2010.pdf) (page consultée le 17 décembre 2012).

- Convention Cadre des Nations Unies sur les Changements Climatiques (CCNUCC), (1992). Nations Unis, disponible sur : <http://unfccc.int/resource/docs/convkp/convfr.pdf> (page consultée le 18 décembre 2012).
- UNRUH Gregory C. (2000). “Understanding Carbon Lock-in”. *Energy Policy*, vol.28(12), pp.817-830, October, DOI : 10.1016/S0301-4215(00)00070-7.
- UNRUH Gregory C. (2002). “Escaping Carbon Lock-in”. *Energy Policy*, vol.30(4), pp.317-325, March, DOI : 10.1016/S0301-4215(01)00098-2.
- VALLE Alessandra D. et Claudia FURLAN (2011). “Forecasting Accuracy of Wind Power Technology Diffusion Models across Countries”. *International Journal of Forecasting*, vol.27(2), pp.592-601, April-June, DOI : 10.1016/j.ijforecast.2010.05.018.
- VAN DER ZWANN Bob et Ad SEEBREGTS (2004). “Endogenous Learning in Climate-Energy-Economic Models—An Inventory of Key Uncertainties”. *International Journal of Energy, Technology and Policy*, vol.2(1-2), pp.130-141, February, DOI : 10.1504/IJETP.2004.004591.
- VAN DER ZWANN Bob, Lachlan CAMERON et Tom KOBER (2013). “Potential for Renewable Energy Jobs in the Middle East”. *Energy Policy*, vol.60, pp.296-304, September, DOI : 10.1016/j.enpol.2013.05.014.
- VON NEUMANN John et Oskar MORGENSTERN (1944). *Theory of Games and Economic Behavior*. 1<sup>ère</sup> édi., Princeton : Princeton University Press, 741 pages.
- WALKER Benjamin J.A., Bouke WIERSMA et Etienne BAILEY (2014). “Community Benefits, Framing and the Social Acceptance of Off Shore Wind Farms: An Experimental Study in England”. *Energy Research and Social Science*, vol.3, pp.46-54, September, DOI : 10.1016/j.erss.2014.07.003.
- WEI Max, Shana PATADIA et Daniel M. KAMMEN (2010). “Putting Renewables and Energy Efficiency to Work: How Many Jobs Can the Clean Energy Industry Generate in the US?” *Energy Policy*, vol.38(2), pp.919-931, February, DOI : 10.1016/j.enpol.2009.10.044.
- WEITZMAN Martin L. (1974). “Prices vs. Quantities”. *Review of Economic Studies*, vol.41(4), pp.477-491, October, disponible sur : [http://scholar.harvard.edu/files/weitzman/files/prices\\_vs\\_quantities.pdf](http://scholar.harvard.edu/files/weitzman/files/prices_vs_quantities.pdf) (page consultée le 9 décembre 2013).

- WEITZMAN Martin L. (1997). "Sustainability and Technical Progress". *Scandinavian Journal of Economics*, vol.99(1), pp.1-13, February, DOI : 10.1111/1467-9442.00043 .
- WEITZMAN Martin L. (1999). "Pricing the Limits to Growth by Mineral Depletion". *Quarterly Journal of Economics*, vol.114(2), pp.691-706, DOI : 10.1162/003355399556025.
- WISER Ryan H. et Steven J. PICKLE (1998). "Financing Investments in Renewable Energy: The Impacts of Policy Design". *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol.2(4), pp.361-386, December, DOI : 10.1016/S1364-0321(98)00007-0.
- WISER Ryan, Devra BACHRACH, Mark BOLINGER et William GOLOVE (2004). "Comparing the Risk Profiles of Renewable and Natural Gas-Fired Electricity Contracts". *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol.8(4), pp.335-363, August, DOI : 10.1016/j.rser.2003.11.005.
- WOLSINK Maarten (2006). "Invalid Theory Impedes our Understanding: A Critique on the Persistence of the Language of NIMBY". *Transactions of the Institute of British Geographers New Series*, vol.31(1), pp.85-91, March, DOI : 10.1111/j.1475-5661.2006.00191.x.
- WOLSINK Maarten (2007). "Wind Power Implementation: The Nature of Public Attitudes: Equity and Fairness Instead of 'Backyard Motives'". *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol.11(6), pp.1188-1207, August, DOI : 10.1016/j.rser.2005.10.005.
- World Commission on Environment and Development (WCED), (1987). *Our Common Future*. 1<sup>ère</sup> édi., Oxford : Oxford University Press, 416 pages.
- World Bank (2008a). "Global Financial Crisis and Implications for Developing Countries". Article présenté au *G20 Finance Ministers' Meeting*, November, São Paulo, Brazil, disponible sur : <http://www.worldbank.org/financialcrisis/pdf/G20FinBackgroundpaper.pdf> (page consulté le 5 décembre 2012).
- World Bank (2008b). *Governance, Growth, and Development Decision-making*. The World Bank, Washington, D.C., April, disponible sur : <http://siteresources.worldbank.org/EXTPUBLICSECTORANDGOVERNANCE/Resources/governanceandgrowth.pdf> (page consultée le 17 juillet 2014).
- World Bank (2012). *Inclusive Green Growth: The Pathway to Sustainable Development*. The World Bank, Washington, DC, May, disponible sur :

[http://siteresources.worldbank.org/EXTSDNET/Resources/Inclusive\\_Green\\_Growth\\_May\\_2012.pdf](http://siteresources.worldbank.org/EXTSDNET/Resources/Inclusive_Green_Growth_May_2012.pdf) (page consulté le 3 décembre 2012).

- WRIGHT Theodore P. (1936). "Factors Affecting the Cost of Airplanes". *Journal of the Aeronautical Sciences*, vol.3(4), pp.122-128, February, DOI : 10.2514/8.155.
- WÜSTENHAGEN Rolf et Emanuela MENICHETTI (2012). "Strategic Choices for Renewable Energy Investment: Conceptual Framework and Opportunities for Further Research". *Energy Policy*, vol.40, pp.1-10, January, DOI : 10.1016/j.enpol.2011.06.050.
- WÜSTENHAGEN Rolf et Tarja K. TEPPPO (2006). "Do Venture Capitalists Really Invest in Good Industries? Risk-Return Perceptions and Path Dependence in the Emerging European Energy VC Market". *International Journal of Technology Management*, vol.34(1-2), pp.63-87, January, DOI : 10.1504/IJTM.2006.009448.
- WÜSTENHAGEN Rolf, Maarten WOLSINK et Mary J. BÜRER (2007). "Social Acceptance of Renewable Energy Innovation: An Introduction to the Concept". *Energy Policy*, vol.35(5), pp.2683-2691, May, DOI : 10.1016/j.enpol.2006.12.001.
- YADOO Annabel et Heather CRUICKSHANK (2012). "The Role for Low Carbon Electrification Technologies in Poverty Reduction and Climate Change Strategies: A Focus on Renewable Energy Mini-Grids with Case Studies in Nepal, Peru and Kenya". *Energy Policy*, vol.42, pp.591-602, March, DOI : 10.1016/j.enpol.2011.12.029.
- YAZDANPANA Masoud, Nadejda KOMENDANTOVA et Roshanak S. ARDESTANI (2015). "Governance of Energy Transition in Iran: Investigating Public Acceptance and Willingness to Use Renewable Energy Sources through Socio-Psychological Model". *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol.45, pp.565-573, May, DOI : 10.1016/j.rser.2015.02.002.
- YI Hongtao (2013). "Clean Energy Policies and Green Jobs: An Evaluation of Green Jobs in U.S. Metropolitan Areas". *Energy Policy*, vol.56, pp.644-652, May, DOI : 10.1016/j.enpol.2013.01.034.
- YU Chunfai F., Wilfried V. SARK et Eric A. ALSEMA (2011). "Unraveling the Photovoltaic Technology Learning Curve by Incorporation of Input Price Changes and Scale Effects". *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol.15(1), pp.324-337, January, DOI : 10.1016/j.rser.2010.09.001.
- YU Xiao et Hang QU (2013). "The Role of China's Renewable Powers against Climate Change during the 12<sup>th</sup> Five-Year and until 2020".

*Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol.22, pp.401-409, June, DOI : 10.1016/j.rser.2013.02.008.

YÜKSEL Ibrahim (2008). “Global Warming and Renewable Energy Sources for Sustainable Development in Turkey”. *Renewable Energy*, vol.33(4), pp.802-812, April, DOI : 10.1016/j.renene.2007.05.040.

ZONGXIAN Zou, Wei YANG, Sun XIAOFEI et Zeng MING (2012). “Risk Assessment of Concentrating Solar Power Based on Fuzzy Comprehensive Evaluation”. *Systems Engineering Procedia*, vol.4, pp.99-106, DOI : 10.1016/j.sepro.2011.11.054.

ZYADIN Anas, Antero PUHAKKA, Pirkkoliisa AHPONEN, Tarja CRONBERG et Paavo PELKONEN (2012). “School Students’ Knowledge, Perceptions, and Attitudes toward Renewable Energy in Jordan”. *Renewable Energy*, vol.45, pp.78-85, September, DOI : 10.1016/j.renene.2012.02.002.

## ANNEXES

## Annexe 1 : AGR-Scénarios

Dangers	Système	Situation dangereuse	Causes contact	Événement redouté	Causes amorce	Traitements déjà existants dont moyens de détection ou d'alerte	Conséquences	G	V	C	Actions de réduction des risques et Identification de l'autorité de décision de leur application	P	G	V	C	Gestion du risque résiduel
POL	A	Lenteur des procédures	STEG est monopole	La non-obtention du permis de construire	Le cadre réglementaire tunisien n'autorise pas l'exportation des énergies renouvelables	Absence de moyens	45Retard dans l'exécution du projet	4	4	3	A1 A2 A1: Entamer des discussions avec les responsables gouvernementaux pour changer le cadre réglementaire et faciliter les procédures avec la STEG A2: La formation d'une équipe de spécialistes pour discuter de tous les points nécessaires avec les responsables de la STEG.	2	4	2	2	P1 P1: Un contrôle continu de l'avancement des discussions avec le gouvernement
MAN	A	Une estimation erronée de la ressource	Première expérience dans le désert tunisien	Surestimation du rendement du projet	Une période d'observation du site inférieure à une année	Absence de moyens	54Perte financière énorme	5	2	2	A3 A4 A3: Exiger une période d'observation du site égale à une année A4: Le recours à des professionnels expérimentés pour évaluer la capacité et le rendement énergétique de l'installation	3	2	2	1	
STR	A	L'exigence de coûts exorbitants pour le raccordement	STEG est monopole	L'augmentation du coût du projet	La bureaucratie	Absence de moyens	31Dégradation inacceptable des performances	3	3	2	A5 A6 A5: Vendre une partie de l'électricité produite au marché national A6: Opter pour le mécanisme d'achat à prix garanti	2	2	2	1	

POL	B	Le découragement des investisseurs privés	Dégradation de la notation souveraine de la Tunisie par les agences de notation	Peu ou pas de bailleurs de fonds intéressés par un projet en Tunisie	Instabilité politique	Absence de moyens	33Contraintes opérationnelles importantes	3	4	2	A7 A8 A7: Le choix de partenaires financièrement solides A8: Le recours à la Banque Mondiale et à la Banque africaine de développement	2	2	3	1	
POL	B	Démarches administratives trop lentes	La mauvaise gouvernance des administrations publiques tunisiennes	Retard dans l'octroi de l'autorisation de construction de la centrale	Changements récurrents dans le gouvernement	Absence de moyens	45Retard dans l'exécution du projet	4	4	3	A9 A10 A9: Former une équipe d'experts tunisiens chargée d'accélérer les procédures administratives A10: Etablir un plan décrivant la procédure pour obtenir les différents permis et autorisations nécessaires	2	3	3	2	P2 P2 : Etablir une liste de contrôle des différents permis et autorisations nécessaires
POL	B	Un plan d'action peu fiable	Absence de transparence	Un plan d'action non réalisable	La révolution tunisienne	Absence de moyens	12Contraintes opérationnelles acceptables	1	5	1						
POL	B	Absence de visibilité à court terme et moyen terme	Incertitude politique	Absence de plan d'action détaillé et définitif	Des obstacles réglementaires	Absence de moyens	33Contraintes opérationnelles importantes	3	4	2	A11 A11: Ajustement continu du plan d'action	2	2	3	1	
POL	B	Démarches administratives lentes	Absence d'engagement politique clair dans la promotion des énergies renouvelables	Augmentation du coût du projet	Absence de transparence	Absence de moyens	31Dégradation inacceptable des performances	3	5	3	A12 A13 A12: Former une cellule de crise chargée de communication avec les responsables politiques et les administrations publiques A13: Diminuer au maximum les dépenses pendant cette phase de préparation (voyages, locaux, etc.)	2	3	3	2	P3 P3 : Mette en œuvre une procédure de suivi et d'évaluation continus de l'avancement dans les démarches administratives
POL	B	Augmentation du coût du projet	Augmentation des dépenses	Tendance à la hausse du coût du projet	Absence de volonté politique	Absence de moyens	54Perte financière énorme	5	3	3	A14 A15 A14: Diminuer au maximum tous les frais en phase de préparation A15: Diminuer le nombre du personnel pendant la phase de préparation	2	3	3	2	P4 P4 : Etablir un plan de contrôle de l'application des procédures d'austérité

ENV	B	Absence de retour d'expérience	<i>Le premier projet de transmission de l'électricité avec une profondeur de 2000m</i>	Incertitude concernant la réussite de cette première expérience	<i>Technologie en phase de recherche et développement</i>	Absence de moyens	32Activité très dégradée ou échouée	3	3	2	A16 A16 : Obtenir les garanties nécessaires du fabricant que les câbles HVDC supportent la profondeur de 2000m	2	2	2	1	
MAN	B	Mauvais choix du système de refroidissement	<i>la prise en compte seulement de l'aspect environnemental</i>	Le choix du refroidissement à sec qui est moins efficace que le refroidissement humide	<i>La pénurie d'eau au désert</i>	Absence de moyens	33Contraintes opérationnelles importantes	3	4	2	A17 A17: Etablir un suivi continu de l'efficacité du refroidissement à sec	2	2	2	1	
STR	B	Retard dans la signature des contrats	<i>STEG est monopole</i>	Non respect des délais	<i>Mauvaise estimation du temps de traitement des dossiers</i>	Absence de moyens	33Contraintes opérationnelles importantes	3	3	2	A18 A18: Elaborer des contrats clairs qui définissent d'une manière détaillée les responsabilités de chaque partie.	2	2	3	1	
JUR	B	Difficulté à trouver des partenaires	<i>Instabilité politique</i>	Difficulté à attirer les investisseurs privés	<i>Absence de cadre réglementaire pour l'exportation des énergies renouvelables</i>	Absence de moyens	33Contraintes opérationnelles importantes	3	5	3	A19 A20 A19: Accélérer les discussions avec le gouvernement A 20: Organiser des séminaires avec les investisseurs privés et des membres du gouvernement pour discuter et s'assurer de la volonté du gouvernement de changer la réglementation en vigueur	2	3	3	2	P5 P5 : Mettre les investisseurs privés à jour de tous les avancements faits dans les discussions avec le gouvernement
JUR	B	La lenteur des discussions avec les responsables politiques	<i>Absence de volonté politique</i>	Non respect des délais prévus	<i>Absence de décision ferme</i>	Absence de moyens	45Retard dans l'exécution du projet	4	4	3	A21 A22 A21: Intensifier les discussions avec les responsables politiques pour changer la réglementation A22: Donner le maximum de garanties au gouvernement sur les avantages attendus de ce projet sur l'emploi local	2	3	3	2	P6 P6 : Exercer un contrôle continu sur l'avancement des discussions et sur les obstacles à surmonter

FIN	B	Besoin énorme en financement	<i>Un projet énorme</i>	Difficulté de collecte des fonds nécessaires	<i>Pas de participation de l'Etat tunisien au financement</i>	Absence de moyens	45Retard dans l'exécution du projet	4	4	3	A23 A24 A25 A23 : La construction par tranches A24 : Le recours à la Banque Mondiale A25 : Le recours à la Banque africaine de développement	3	3	4	2	P7 P8 P7 : Réduire les coûts de construction et de montage P8 : Réduire les coûts des opérations de maintenance
POL	C	Retard dans la livraison des équipements nécessaire	<i>Mauvaise organisation</i>	Discontinuité dans la construction	<i>Des petits entrepôts par rapport à la taille du projet</i>	Absence de moyens	33Contraintes opérationnelles importantes	3	3	2	A26 A27 A26: Construire des entrepôts qui répondent aux besoins du projet A27: Recruter un gestionnaire de stock	2	3	2	1	
POL	C	Des voies d'accès non adaptées aux gros camions	<i>La lenteur des procédures</i>	Accidents de route	<i>Trafic routier à cause du chantier</i>	Absence de moyens	23Accident de travail avec arrêt de travail inférieur à 21 jours	2	4	2	A28 A29 A30 A28 : Choisir les horaires des opérations de manutention hors horaire de pointe. A29 : Mettre en place des plaques de signalisation et des signes de réduction de la vitesse de circulation A30 : Les véhicules lourds et légers devront justifier d'un contrôle technique récent	1	2	3	1	
ENV	C	Des conditions de travail difficiles	<i>Absence de barrières autour du chantier</i>	Arrêt temporaire des travaux	<i>Absence de drainage permanent</i>	Absence de moyens	45Retard dans l'exécution du projet	4	4	3	A31 A32 A31 : Etablir des barrières autour du site A32: Informer les chauffeurs et les employés si les prévisions météorologiques indiquent la possibilité de tempête de sable	1	3	4	2	P9 P10 P9 : Drainage permanent du site P10 : Contrôle continu des prévisions météorologiques
IMG	C	Des affrontements avec les riverains qui sont contre l'installation	<i>Absence d'approche participative</i>	des conflits d'intérêts	<i>L'existence des habitants qui utilisent le site pour les chameaux</i>	Absence de moyens	33Contraintes opérationnelles importantes	3	4	2	A33 A34 A35 A33 : La collaboration avec les autorités locales A34 : Former des focus groupes A35 : Informer les bergers du début du chantier pour adapter les déplacements de leurs troupeaux	1	2	3	1	

FIN	C	Difficulté de financement	Non-conformité au cahier de charges	Non respect des délais de construction	arrêt temporaire de la construction	Absence de moyens	45Retard dans l'exécution du projet	4	4	3	A36 A36 : Etablir un rapport d'activité et un rapport financier intérimaire chaque semestre	2	3	3	2	P 11 P11 : Audit financier pour s'assurer de la conformité entre le cahier de charge, l'avancement de la réalisation, les décaissements et l'accord de prêt
INF	C	L'existence de produits dangereux dans les entrepôts	Le stockage des combustibles fossiles et du sel fondu	Pollution du sol	Fuite	Absence de moyens	24Pollution contrôlable	2	4	2	A37 A38 A37 : Zone de stockage imperméabilisée et équipée de rétentions de volumes adéquats A38: Elaborer un programme de suivi environnemental	1	1	3	1	
PCH	C	Nuisances sonores	Besoins importants en équipements	Conditions de travail difficiles	Augmentation des poussières et des rejets atmosphériques	Absence de moyens	23Accident de travail avec arrêt de travail inférieur à 21 jours	2	4	2	A39 A40 A41 A39: Maintenir les véhicules du chantier en bon état A40 : Equiper les travailleurs de protection acoustique A41 : Un arrosage léger des pistes d'accès pour limiter le soulèvement de poussières	1	1	3	1	
PCH	C	Dégradation de la qualité de l'air	Les engins et les camions du chantier	Pollution de l'air	Une longue durée de construction	Absence de moyens	43Dommages importants sur l'environnement	4	3	2	A42 A43 A44 A42 : Les engins et les camions du chantier doivent être bien entretenus A43 : les camions doivent respecter les lois en vigueur en matière d'émission de gaz d'échappement A44: La mise en œuvre d'un cahier de charges relatif aux normes du chantier	1	3	2	1	

POL	D	Non-conformité avec la réglementation du pays qui va acheter l'électricité	Absence ou retard de suivi de tous les changements dans la réglementation européenne	Arrêt temporaire de l'activité	Lenteur des discussions	Absence de moyens	33Contraintes opérationnelles importantes	3	3	2	A45 A45 : Essayer d'entamer des discussions avec le gouvernement Suisse pour l'achat de l'électricité en cas des problèmes avec les autres pays européens	2	2	3	1
INS	D	La possibilité d'actes de violence par des extrémistes	L'existence de groupes extrémistes qui sont contre les compagnies étrangères	Retard dans l'exécution du projet	Absence de stabilité politique	Absence de moyens	34Dommages importants sur les infrastructures ou les biens	3	3	2	A46 A47 A48 A46 : Communication régulière entre les représentants du projet et les acteurs locaux A47: Créer une perception positive du projet (emploi, renommée de la ville, etc.) A48: Souscription d'une assurance de risque politique auprès de l'Agence Multilatérale de garantie des investissements (Banque Mondiale)	2	2	2	1
STR	D	Mauvais service de la STEG	Absence de clauses qui pénalisent la STEG en cas de mauvais service	Réurrence des conflits	Manque de précision dans les contrats	Absence de moyens	31Dégradation inacceptable des performances	3	4	2	A49 A49: Définir clairement les responsabilités de chaque partie et les pénalités en cas de non respect des engagements	1	2	3	1
TEC	D	Non atteinte de la performance désirée	Des câbles HVDC jamais utilisés pour cette profondeur	Non respect des engagements	Technologie en phase de recherche et développement	Absence de moyens	32Activité très dégradée ou échouée	3	3	2	A50 A50 : Le recours à des industriels connus pour fabriquer des câbles qui supportent cette profondeur	2	3	1	1
MAT	D	diminution de la fréquence de la maintenance préventive	stratégie de diminution des coûts	Réurrence des pannes	absence d'un fonds de maintenance	Absence de moyens	21Indisponibilité des services ou d'équipements à la date prévue	2	4	2	A51 A52 A51 : La création d'un fonds de maintenance A52 : Un plan de maintenance sera établi annuellement et mis à jour mensuellement	2	1	3	1

FIN	D	Incapacité de remboursement des crédits	Les fluctuations du taux de change et du taux d'intérêt	L'augmentation des dettes	crise économique	Absence de moyens	54Perte financière énorme	5	2	2	A53 A54 A53 : Conclure un contrat SWAP et un contrat Forward Rate Agreement A54 : Utiliser le mécanisme de Feed-in Tariff	3	3	2	1	
SI	D	Faute de la part des employés	Formation courte	Réurrence des fautes	La langue utilisée est l'anglais	Absence de moyens	31Dégradation inacceptable des performances	3	4	2	A55 A55 : Exiger une connaissance excellente en anglais	1	1	3	1	
PCH	D	L'utilisation des combustibles fossiles	Conserver le sel fondu à haute température	Incendie	Fuite	Absence de moyens	42Destruction partielle d'infrastructures ou de biens	4	3	2	A56 A57 A58 A59 A56 : La mise à disposition du matériel absorbant à proximité du transformateur et des entrepôts A57 : Interdiction de fumer A58 : Mise en place d'extincteurs A59: Souscription d'une assurance incendie	3	3	2	1	
PCH	D	Fonctionnement sous pression et à chaud de la turbine	Existence de vapeur à haute pression	Explosion	Un mégot jeté au niveau du filtre d'admission d'air	Absence de moyens	52Destruction totale d'infrastructures ou de biens	5	3	3	A60 A61 A62 A63 A60 : Habilitations électriques A61 : Interdiction de fumer A62 : Mise en place d'extincteurs A63 : Elaborer un plan de gestion sécurité incendie	3	4	2	2	P12 P13 P12 : L'accès au chantier sera interdit au public P13: Une zone tampon de 10 m de large au minimum entourera tout le projet.
COM	D	Gêne des riverains	le bruit du chantier	les plaintes des riverains	le trafic routier	Informers les riverains du début du chantier et de la durée	33Contraintes opérationnelles importantes	3	4	2	A64 A65 A64 : Mettre en place une cellule de gestion des plaintes des riverains A65 : Employer les ressources locales dans la mesure où cette population offre les compétences exigées	1	3	2	1	

## TABLE DES MATIERES

INTRODUCTION GENERALE.....	1
<b>PARTIE 1. ANALYSE THEORIQUE DE LA TRANSITION VERS LES ENERGIES RENEUVELABLES.....</b>	<b>12</b>
CHAPITRE 1. LA TRANSITION VERS LES ENERGIES RENEUVELABLES : AVANTAGES ET OPPORTUNITES.....	13
SECTION 1. LA TRANSITION VERS LES ENERGIES RENEUVELABLES POUR UN DEVELOPPEMENT DURABLE.....	14
1. Les énergies renouvelables.....	15
1.1. Définition.....	15
1.2. Les principales sources d'énergies renouvelables.....	16
1.2.1. L'énergie solaire.....	16
1.2.2. L'énergie éolienne.....	16
1.2.3. L'énergie hydraulique.....	17
1.2.4. L'énergie géothermique.....	17
1.2.5. La biomasse.....	18
2. Le concept de développement durable.....	18
3. L'impact des énergies renouvelables sur le développement durable : un aperçu de la littérature.....	22
3.1. La littérature sur la contribution des énergies renouvelables à la réduction des émissions de GES.....	22
3.2. La littérature sur la contribution des énergies renouvelables aux dimensions sociale et économique du développement durable.....	25
3.3. La littérature sur l'impact des énergies renouvelables sur la création d'emplois.....	26
SECTION 2. LA TRANSITION VERS LES ENERGIES RENEUVELABLES POUR UNE « RELANCE VERTE » DE L'ECONOMIE.....	30
1. Un contexte de double crise.....	30
1.1. La crise économique.....	31
1.2. La crise climatique.....	32
2. La relance verte comme solution pour les deux crises.....	34
2.1. Le Nouveau Pacte Vert Mondial.....	35
2.2. Les mesures d'incitation fiscale vertes.....	35
2.3. L'initiative de l'économie verte du PNUE.....	37
2.4. La stratégie de croissance verte de l'OCDE.....	38
3. Le secteur des énergies renouvelables : un élément clé de la relance verte de l'économie.....	40
3.1. Les éléments favorisant le développement du marché des énergies renouvelables... ..	42
3.1.1. La 21 <sup>ème</sup> Conférence des parties à la convention cadre des Nations unies sur les changements climatiques (COP21).....	44
3.1.2. La création d'emplois verts.....	45
3.1.3. La diminution progressive des coûts des énergies renouvelables.....	45
3.1.4. La croissance continue de la demande énergétique.....	46
3.2. La révolution verte en Chine : un exemple à suivre.....	46
CHAPITRE 2. LES APPROCHES D'ANALYSE DE LA TRANSITION VERS LES ENERGIES RENEUVELABLES.....	49
SECTION 1. APPROCHES BASEES SUR L'ANALYSE DE DIFFUSION DES NOUVELLES TECHNOLOGIES.....	50
1. Approche de la courbe d'expérience.....	51
1.1. L'application des courbes d'expérience dans l'analyse de la transition vers les énergies renouvelables.....	53

1.2. Les avantages de l'approche de la courbe d'expérience .....	56
1.3. Les limites de l'approche de la courbe d'expérience .....	56
2. Approche basée sur les modèles de diffusion de l'innovation.....	61
2.1. L'application des modèles de diffusion de l'innovation dans l'analyse de la transition vers les énergies renouvelables.....	64
2.2. Les limites de l'approche basée sur les modèles de diffusion de l'innovation .....	67
SECTION 2. APPROCHES BASEES SUR LES ANALYSES ECONOMIQUES ET SOCIALES .....	68
1. Approche basée sur l'économie de l'environnement.....	68
1.1. Les instruments d'internalisation des externalités.....	69
1.1.1. Les instruments réglementaires .....	69
1.1.2. Les instruments économiques.....	69
1.2. Justification des politiques de soutien aux énergies renouvelables.....	70
1.2.1. L'internalisation des externalités environnementales.....	71
1.2.2. La stimulation du changement technologique .....	72
1.3. Approche basée sur les quantités <i>versus</i> approche basée sur les prix .....	73
1.3.1. Les certificats verts .....	75
1.3.2. Les tarifs d'achat garantis.....	76
1.4. L'application de l'approche de l'économie de l'environnement dans l'analyse de la transition vers les énergies renouvelables .....	77
1.5. Limites de l'approche de l'économie de l'environnement.....	78
2. Approche basée sur l'économie institutionnelle .....	80
2.1. L'application de l'approche de l'économie institutionnelle dans l'analyse de la transition vers les énergies renouvelables .....	82
2.2. Limites de l'approche de l'économie institutionnelle .....	85
3. Approche psychosociale.....	85
3.1. L'application de l'approche psychosociale dans l'analyse de la transition vers les énergies renouvelables.....	87
3.2. Limites de l'approche psychosociale .....	88
CHAPITRE 3. LES BARRIERES A LA TRANSITION VERS LES ENERGIES RENOUVELABLES .....	91
SECTION 1. L'EFFET DU « VERROUILLAGE TECHNOLOGIQUE » .....	92
1. Les paradigmes technologiques .....	93
2. Les rendements croissants d'adoption .....	94
3. Le verrouillage technologique au profit des énergies fossiles .....	96
SECTION 2. LES RISQUES D'INVESTISSEMENTS DANS LES PROJETS D'ENERGIES RENOUVELABLES .....	100
1. L'investissement dans les énergies renouvelables : une perspective risquée .....	101
2. Les principales catégories de risques qui entravent l'investissement dans le secteur des énergies renouvelables.....	106
2.1. Les risques de marché .....	107
2.2. Les risques économiques et financiers .....	107
2.3. Les risques politiques .....	108
2.4. Les risques institutionnels .....	109
2.5. Les risques réglementaires .....	109
2.6. Les risques techniques.....	110
2.7. Les risques de type social, culturel et comportemental.....	110
2.8. Les risques de dommage à l'environnement .....	111
2.9. Les risques opérationnels .....	112
2.10. Les risques liés aux sources.....	112
3. Les risques spécifiques aux projets d'énergies renouvelables en Afrique du Nord....	113

CHAPITRE 4. VERS UNE APPROCHE DU MANAGEMENT DES RISQUES POUR L'ANALYSE DE LA TRANSITION VERS LES ENERGIES RENOUVELABLES .....	117
SECTION 1. LE MANAGEMENT DU RISQUE : NOUVELLE APPROCHE ET NOUVEAUX ENJEUX..	118
1. Les concepts de base .....	118
1.1. Les concepts d'incertitude et de risque .....	118
1.2. La typologie des risques .....	121
1.3. La perception du risque .....	121
1.4. L'attitude face au risque .....	122
2. L'analyse des choix sous incertitude .....	123
3. L'approche du management des risques .....	126
3.1. Historique du management du risque .....	127
3.2. Processus du management du risque .....	129
SECTION 2. LE MANAGEMENT DU RISQUE POUR LES PROJETS D'ENERGIES RENOUVELABLES .....	131
1. Les principales méthodes d'analyse des risques .....	132
1.1. L'arbre des causes .....	132
1.2. L'arbre des défaillances.....	133
1.3. L'analyse des modes de défaillance, de leurs effets et de leur criticité (AMDEC) .	133
1.4. Analyse du risque et des points de contrôle critiques .....	133
1.5. Hazard and Operability study .....	134
1.6. La méthode de simulation de Monte Carlo .....	134
1.7. L'Analyse Préliminaire des Risques (APR).....	134
2. L'application des méthodes de management des risques dans le cas de projets d'énergies renouvelables .....	135
3. Justification du choix de l'approche du management des risques et de la méthode AGR	141
<b><u>PARTIE 2. LA TRANSITION VERS LES ENERGIES RENOUVELABLES EN TUNISIE.....</u></b>	<b>148</b>
CHAPITRE 5. LES ENERGIES RENOUVELABLES EN TUNISIE : ETATS DES LIEUX ET PERSPECTIVES.....	149
SECTION 1. LE CONTEXTE ENERGETIQUE EN TUNISIE : DEFIS ET OPPORTUNITES .....	150
1. Les principaux défis à relever dans le contexte énergétique tunisien .....	150
1.1. La dépendance énergétique .....	150
1.2. Les subventions accordées aux énergies fossiles : un fardeau pour le budget de l'État	153
1.3. Absence de mix énergétique en Tunisie.....	154
1.4. L'engagement de la Tunisie pour réduire les émissions de GES .....	156
1.5. Une réglementation favorable mais insuffisante à la promotion des énergies renouvelables.....	157
2. Le secteur des énergies renouvelables en Tunisie : orientations stratégiques et bonnes pratiques .....	158
2.1. Développement des énergies renouvelables en Tunisie : contexte et enjeux.....	159
2.1.1. L'énergie solaire .....	161
2.1.2. L'énergie éolienne .....	162
2.1.3. Les mécanismes d'incitation spécifiques aux énergies renouvelables .....	163
2.2. Le plan solaire tunisien : une composante majeure de la stratégie de transition énergétique de la Tunisie.....	165
2.3. Partenariat et coopération.....	167
2.4. Le débat national sur l'énergie .....	168

2.5. La nouvelle réglementation relative à la production de l'électricité à partir des énergies renouvelables.....	169
SECTION 2. LE SUCCES DU PROJET PROSOL.....	171
1. Principales caractéristiques du projet PROSOL.....	171
1.1. Les mécanismes institutionnels.....	173
1.2. Les mécanismes financiers.....	174
2. Résultats : réalisations et impacts du projet PROSOL sur le développement durable	175
2.1. Les réalisations.....	175
2.2. L'évaluation des impacts environnementaux et socio-économiques.....	176
2.2.1. Les impacts énergétiques et environnementaux.....	176
2.2.2. Les impacts économiques.....	176
2.2.3. Les impacts sociaux.....	178
2.2.4. Les limites du programme PROSOL.....	179
CHAPITRE 6. LE CAS DU PROJET DE SOLAIRE THERMODYNAMIQUE A CONCENTRATION « TUNUR » EN TUNISIE.....	182
SECTION 1. LA TECHNOLOGIE DU SOLAIRE THERMODYNAMIQUE A CONCENTRATION.....	183
1. Le principe de fonctionnement d'une centrale CSP.....	183
2. Les types de technologies CSP.....	184
2.1. Réflecteurs cylindro-paraboliques.....	185
2.2. Réflecteurs linéaires de Fresnel.....	186
2.3. Capteurs paraboliques.....	187
2.4. Héliostats et centrale à tour.....	189
3. État des lieux et potentiel mondial de la technologie CSP.....	190
4. La région MENA : une région pleine de promesses.....	193
4.1. La technologie CSP : au cœur des initiatives internationales.....	195
4.1.1. Le programme conçu par le fonds des technologies propres.....	195
4.1.2. Le plan solaire méditerranéen.....	196
4.1.3. L'initiative DESERTEC.....	196
4.2. Le complexe solaire de Noor-Ouarzazate au Maroc : un exemple à suivre.....	198
4.3. Les atouts de la technologie CSP.....	199
4.4. Enjeux et barrières pour la région MENA.....	200
SECTION 2. LE PROJET DU COMPLEXE SOLAIRE THERMODYNAMIQUE « TUNUR ».....	201
1. La société « TuNur ».....	202
2. Présentation du projet « TuNur ».....	202
3. Les étapes du projet « TuNur ».....	204
3.1. La construction du complexe solaire CSP.....	205
3.1.1. Le choix du site.....	205
3.1.2. Le choix de la technologie.....	206
3.2. L'installation des câbles et le transport de l'électricité.....	207
3.3. La vente de l'électricité.....	208
4. Le cadre réglementaire.....	208
CHAPITRE 7. GESTION DES RISQUES DU PROJET « TUNUR » PAR LA METHODE AGR.....	212
SECTION 1. NATURE DE L'AGR ET DESCRIPTION DU SYSTEME ETUDIE.....	213
1. Les concepts de base.....	213
2. Description de la méthode AGR.....	215
2.1. Nature et objectifs de l'AGR.....	215
2.2. Processus de l'AGR.....	216
2.2.1. L'AGR système.....	217
2.2.2. L'AGR scénarios.....	218
2.2.3. La gestion des actions.....	219

3. La collecte des données.....	219
4. Description du système étudié et analyse fonctionnelle .....	220
4.1. Le périmètre du système.....	220
4.2. Les phases du système.....	221
4.2.1. L'étude de faisabilité .....	221
4.2.2. La préparation.....	222
4.2.3. La construction .....	223
4.2.4. La mise en service .....	224
SECTION 2. LE PROCESSUS DE L'AGR APPLIQUE AU PROJET « TUNUR ».....	224
1. L'AGR système.....	225
1.1. La liste structurée des dangers génériques et spécifiques du système : la cartographie des dangers .....	225
1.1.1. Le danger politique.....	225
1.1.2. Le danger lié à l'environnement naturel.....	226
1.1.3. Le danger lié à l'insécurité .....	226
1.1.4. Le danger lié à l'image .....	226
1.1.5. Le danger lié au management.....	227
1.1.6. Le danger stratégique.....	227
1.1.7. Le danger technologique .....	227
1.1.8. Le danger lié à la communication et aux crises.....	228
1.1.9. Le danger juridique.....	228
1.1.10. Le danger financier .....	228
1.1.11. Le danger lié aux infrastructures, aux locaux, aux matériels et aux équipements	229
1.1.12. Le danger lié au système d'information .....	229
1.1.13. Le danger physico-chimique.....	229
1.2. La cartographie des situations dangereuses et la priorisation des actions.....	233
2. L'AGR Scénario.....	236
2.1. Eléments d'évaluation et de décision .....	236
2.1.1. Echelle de gravité .....	236
2.1.2. Echelle de vraisemblance .....	237
2.1.3. Echelle de criticité .....	237
CHAPITRE 8. RESULTATS DE L'ANALYSE GLOBALE DES RISQUES ET RECOMMANDATIONS..	241
SECTION 1. INTERPRETATIONS DES RESULTATS DE L'AGR.....	242
1. Répartition des criticités initiales et résiduelles .....	242
2. Analyse et évaluation par dangers.....	244
2.1. Répartition des situations dangereuses de priorité « 1 » par dangers.....	244
2.2. Diagramme de Kiviat .....	245
2.3. Diagramme de Farmer.....	248
3. Analyse et évaluation par système .....	250
3.1. Répartition des situations dangereuses de priorité « 1 » par phase .....	250
3.2. Diagramme de Kiviat .....	251
3.3. Diagramme de Farmer.....	253
4. La liste des risques majeurs.....	254
4.1. Le risque de non obtention de l'autorisation de construction de la centrale .....	254
4.2. Le risque de non respect des délais .....	255
4.3. Le risque de non-atteinte de la performance désirée .....	256
4.4. Le risque de difficulté de financement .....	256
4.5. Le risque fiduciaire initial .....	257
4.6. Le risque d'explosion ou le risque d'incendie.....	257

4.7. Le risque d'attentats terroristes .....	257
4.8. Le risque de conflits avec les riverains ou risque de non acceptation sociale.....	258
SECTION 2. LES STRATEGIES ET LA STRUCTURE DE GOUVERNANCE ENERGETIQUE ADEQUATES POUR LA TUNISIE : VERS UNE GOUVERNANCE DES RISQUES .....	259
1. Recommandations et stratégies à adopter .....	260
1.1. L'application de mécanismes innovants de financement et d'incitations spécifiques aux énergies renouvelables en Tunisie .....	260
1.2. Le renforcement du partenariat public privé dans le secteur des énergies renouvelables .....	261
1.3. Le recours aux approches participatives .....	264
1.4. Promouvoir l'investissement citoyen .....	266
2. La structure de gouvernance énergétique en Tunisie : vers une gouvernance des risques 268	
2.1. La gouvernance d'autorité.....	269
2.2. Participation du secteur privé à la gouvernance énergétique .....	271
2.3. Gouvernance participative locale .....	272
2.4. La gouvernance des risques.....	274
2.5. Les stratégies de transition vers les énergies renouvelables en Tunisie.....	276
<u>CONCLUSION GENERALE .....</u>	<u>282</u>
<u>REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES .....</u>	<u>290</u>
<u>ANNEXES .....</u>	<u>334</u>
<u>TABLE DES MATIERES.....</u>	<u>341</u>