

Mémoire présenté en vue d'obtenir le **MASTER 2 MANAGEMENT**
Administration des Entreprises - Cycle Cadre

Pierre BOESCH
Sébastien SCHLADENHAUFEN
Matthieu SCHIFF
Benoît THOMANN

Transition énergétique : un avenir entre ciel & Terre

Vers un nouveau mix énergétique
intégrant la technologie solaire spatiale

Directeur de mémoire : M. Frédéric CAMBECEDES, intervenant à l'EM STRASBOURG

Décembre 2018



~ Remerciements ~

Ce travail de recherche et plus encore cette expérience de vie ont été rendus possibles grâce au soutien de personnes à qui nous exprimons notre reconnaissance.

Nos premières pensées vont à M. Frédéric CAMBECEDDES, directeur de mémoire, et à Mme Laurence VIALE, directrice de formation MAE CADRE. Tous les deux se sont rendus disponibles pour nous prodiguer leurs conseils, entendre nos réflexions et nous transmettre leurs expériences, ceci avec empathie. Mme Laurence VIALE a véritablement accompagné notre pérégrination intellectuelle et relationnelle : sa disponibilité n'a d'égal que son engagement pour ses étudiants.

Nous souhaitons adresser nos sincères remerciements aux intervenants du MAE CADRE sans qui notre esprit critique et notre capacité d'analyse n'auraient été aussi aiguisés. Une pensée particulière pour Mme Géraldine BROYE et Mme Brigitte TRIBOUT qui sont intervenues à des moments charnières du mémoire avec disponibilité, curiosité et bienveillance.

Merci aux personnes qui ont fait naître l'idée d'un tel sujet : Dr Hugh HILL et Dr Fabian EILINGSFELD, Mme RIESTER, tous actifs à l'International Space University (ISU).

Un remerciement particulier à Mme Nathalie GRISLIN pour sa patience et sa rigueur lors de ses relectures.

Le sujet abordé est très peu connu. Aussi, les personnes qui ont consacré un peu de leur temps pour répondre à notre enquête, mais aussi les élus et les scientifiques avec lesquels nous avons pu échanger ont permis l'enrichissement de notre recherche. Sans eux, le travail n'aurait pas eu la même consistance ni la même saveur, et nous les en remercions.

Bien entendu, nous adressons nos remerciements appuyés à nos familles respectives. Elles nous ont soutenus dans nos choix d'orientation au printemps 2017, dans nos moments d'inquiétude, en particulier lorsque la fatigue et les tensions ont rendu notre parcours plus périlleux. Un immense merci à nos enfants qui ont parfois pâti de l'absence de leur père.

Enfin, merci à toutes les personnes ayant eu l'indulgence et la politesse de nous écouter conter, parfois à n'en plus finir, notre expérience et nos états d'âme.

Table des matières

PREAMBULE : L'HISTOIRE OUBLIEE DE NAURU

INTRODUCTION

I.	CADRE THEORIQUE : L'ENERGIE ELECTRIQUE DURABLE.....	4
A.	L'ENERGIE ET SES MULTIPLES FACETTES.....	4
1.	Définition du concept d'énergie.....	4
2.	Les grandes phases de l'évolution en matière d'énergie.....	7
3.	Les différents enjeux de l'énergie : la politique omniprésente	10
B.	DES ENERGIES RENOUVELABLES AU DEVELOPPEMENT DURABLE	22
1.	Le développement durable	22
2.	La transition énergétique vers le « renouvelable »	26
3.	Les limites des énergies renouvelables (EnR)	32
C.	L'APPROCHE FINANCIERE DE L'ENERGIE ELECTRIQUE.....	34
1.	Le principe de fabrication de l'électricité.....	34
2.	Le coût de l'énergie primaire	35
3.	Le coût de l'investissement	36
4.	La prise en compte des déchets et des externalités	40
5.	Le transport de l'énergie vers les consommateurs.....	40
6.	Totalisation et comparaisons entre énergies.....	41
D.	COMPARATIF DES RESSOURCES ENERGETIQUES ELECTRIQUES	43
1.	Les techniques de production d'électricité comparées	43
2.	Une approche par facteurs clés de succès	43
3.	Les critères de comparaison.....	45
4.	Tableau de scoring.....	49

II.	HYPOTHESE : LE SOLAIRE SPATIAL, UN CONCEPT DEVENU TANGIBLE	50
A.	LA TECHNOLOGIE SOLAIRE SPATIALE : PRESENTATION ET ANALYSE	50
1.	Introduction.....	50
2.	Définition et genèse du concept	51
3.	Résurgence du concept	53
4.	Freins et limites	54
5.	Approche financière	55
6.	Approche macroéconomique, le modèle PESTEL	57
B.	LE CONSTAT : UNE TECHNOLOGIE A DYNAMISER.....	61
C.	LE SOLAIRE SPATIAL : MODELISATION DU PROCESSUS DE DEVELOPPEMENT	62
1.	Principe général choisi.....	62
2.	Le SBSP rapporté au modèle d'Edison	64
III.	VERIFICATION ET CONFRONTATION DE LA RECHERCHE TERRAIN.....	70
A.	DES METHODES DE RECHERCHES DIVERSIFIEES	70
3.	La recherche de données statistiques.....	70
4.	La méthode d'entretien non directif ou libre.....	71
5.	Le questionnaire	73
6.	Justifications des choix de la recherche	74
B.	LA PRESENTATION DES DONNEES ET DES RESULTATS.....	76
1.	Les résultats chiffrés.....	76
2.	Les données politiques	80
3.	Les données scientifiques.....	82
4.	Les données économiques	84
C.	ANALYSE ET PROSPECTIVE DU SOLAIRE SPATIAL.....	89
1.	La technologie SBSP : état et comparaison finale	89

2.	Les conditions d'un développement futur du SBSP	90
3.	Nos recommandations et perspectives.....	94
CONCLUSION		97
BIBLIOGRAPHIE ET WEBOGRAPHIE		99
WEBOGRAPHIE SPECIFIQUE AU SCORING		103
TABLE DES ILLUSTRATIONS.....		106
ANNEXES.....		ERREUR ! SIGNET NON DEFINI.
Annexe 1 : Tableau des contacts sollicités		Erreur ! Signet non défini.
Annexe 2 : Compte-rendu des entretiens politiques		Erreur ! Signet non défini.
Annexe 3 : Compte-rendu des entretiens technologiques		Erreur ! Signet non défini.
Annexe 4 : Questionnaire enquête quantitative (capture d'écran)		Erreur ! Signet non défini.
Annexe 5 : Analyse des coûts du SBSP		Erreur ! Signet non défini.

Liste des acronymes

Acronyme	Signification
ADEME	Agence de l'environnement et de la maîtrise de l'énergie
ANCRE	Alliance nationale de coordination de la recherche pour l'énergie
ARENH	Accès régulé à l'énergie nucléaire historique
CNDP	Commission nationale du débat public
COP	Conférence des Parties
CPEQ	Conseil patronal de l'environnement du Québec
EDF	Electricité de France
EJP	Effacement des jours de pointe
EMS	Eurométropole de Strasbourg
EnR	Energie renouvelable
ERDF	Électricité réseau distribution France
ESA	European Space Agency (Agence européenne spatiale)
GDP	<i>Gross Domestic Product</i> (= PIB)
GEO	<i>Geostationary Earth Orbit</i> (orbite géostationnaire)
GES	Gaz à effet de serre
IEA	International Energy Agency (Agence internationale de l'énergie)
IESEG	Institut d'économie scientifique et de gestion (IESEG School of Management Lille)
IFP	Institut français du Pétrole
ITER	<i>International Thermonuclear Experimental Reactor</i> (réacteur thermonucléaire expérimental international)
kWh	Kilowatt-heure
LCOE	<i>Levelized Cost of Energy</i> (coût actualisé de l'énergie)
LEO	<i>Low Earth Orbit</i> (orbite terrestre basse)
MIT	Massachusetts Institute of Technology
NOME	Nouvelle organisation des marchés de l'électricité
NOx	Oxydes d'azote
ONU	Organisation des Nations unies
PCAET	Plans climat-air-énergie territorial
PPE	Plan pluriannuel de l'énergie
RNCREQ	Regroupement national des conseils régionaux de l'environnement du Québec
RSE	Responsabilité sociale des entreprises
RTE	Réseau de transport électrique
SBSP	<i>Space Based Solar Power</i>
SPS	Satellite de puissance solaire
SRADDET	Schémas régionaux d'aménagement, de développement durable et d'égalité du territoire
Tep	Tonne équivalent pétrole
TURPE	Tarif d'utilisation des réseaux publics d'électricité
WPT	<i>Wireless Power Transmission</i> (transmission d'énergie à distance)

Préambule :

L'HISTOIRE OUBLIEE DE NAURU

Située dans le pacifique, cette île n'avait aux yeux de ses découvreurs occidentaux en 1798 pas plus de valeur que sa surface, à savoir insignifiante. Ce petit bout de terre de quelque 21 km² avait néanmoins l'avantage de proposer une vision enchantée. Ce n'est qu'un siècle plus tard, en 1899, que des Australiens découvraient qu'au-delà de ses paysages idylliques, lui valant au passage le surnom de « *Pleasant Island* », cette île possédait une richesse jusqu'alors ignorée : du phosphate.

Ce minerai, utilisé comme engrais dans l'agriculture australienne, y était présent en quantité incomparable aux autres gisements connus à l'époque et il était d'un degré de pureté quasi parfait. Cette immense richesse attisa les convoitises du monde entier. Ainsi, n'ayant pas les moyens de sa défense, Nauru devint un enjeu stratégique. L'île fut occupée par l'Allemagne, l'Angleterre, l'Australie et finalement par le Japon durant la Seconde Guerre mondiale. Ce dernier déporta une grande partie de la population sur l'île Fraser bien plus grande, mais exempte de toute ressource minière.

Durant les années 1950, les Nauruans cherchèrent à reprendre possession de leur île, et par de hautes luttes, ils parviendront à obtenir leur indépendance en 1968.

Hammer DEROBURT, premier président, créa un Etat fondé sur le collectivisme : chaque besoin, financier ou matériel, de chaque habitant était pris en charge. L'eau et l'électricité devinrent gratuites pour tous, les citoyens furent dispensés de travailler et exonérés de tout impôt. Les ressources de l'Etat étaient assurées par le négoce du phosphate extrait des entrailles de l'île par des immigrants chinois. Hôpital ultra moderne, femmes de ménage, l'imagination de l'Etat de Nauru devint sans limites lorsqu'il s'agissait d'offrir gracieusement des commodités à ses citoyens.

En 1970, chaque foyer comptait 6 ou 7 voitures en moyenne ; il n'était pas nécessaire de les réparer en cas de panne, puisqu'en lieu et place, il était possible d'en faire livrer de nouvelles. La télévision vint définitivement achever le peu de tradition dont les Nauruans disposaient

encore. En se cloitrant chez eux pour fixer le grand écran, les Nauruans virent leurs relations sociales fondre comme neige au soleil.

Plongé dans une société dirigée par l'oisiveté, l'obésité, le consumérisme à outrance et sans se soucier de toute gestion de ses ressources, l'Etat de Nauru atteint en 1974 la deuxième place mondiale du PIB par habitant.

Mais dès la fin des années 1960, le gouvernement nauruan fit le constat que le rythme d'exploitation du phosphate en cours ne permettait d'entrevoir que trente ans de production au maximum. Dès lors, faute de compétences et gangrené par la corruption, l'Etat de Nauru se lança dans une série d'investissements aussi hasardeux qu'improductifs. En vingt ans, toute la fortune accumulée fut inlassablement gaspillée en compagnies aériennes, buildings en Australie et autres projets fantasques proposés et gérés par des hommes d'affaires venus du monde entier.

Dès les années 1990, commença donc la descente aux enfers. Ressources de phosphate épuisées, investissements calamiteux, écocide généralisé à toute l'île sont autant de causes qui ont mené cette île paradisiaque à sa perte. L'Etat en fut réduit d'abord à emprunter massivement pour subvenir à ses besoins, puis à céder la moitié de son territoire à l'Australie afin de pouvoir rembourser les intérêts colossaux dont il était redevable.

Après le record de richesse de 1974, Nauru fait maintenant face à des chiffres d'un autre ordre : 90 % de taux de chômage, 80 % des citoyens qui souffrent d'obésité et 40 % de diabète de type II.^{1,2}

Et si, à son échelle, le drame de Nauru était un des « futuribles » de nos sociétés ?

¹<https://philitt.fr/2018/04/23/le-futur-a-deja-eu-lieu-a-nauru/>

²<http://geopolis.francetvinfo.fr/lile-de-nauru-du-reve-au-cauchemar-42405>

Introduction

En 1869, Jules Verne faisait paraître *Autour de la Lune*. Un siècle plus tard, la mission Apollo 11 permettait à deux hommes d'y marcher. Voyager sur la Lune a longtemps été un fantasme. Dès le II^e siècle, Lucien de Samosate évoque dans *Histoires vraies* un tel voyage. Le ton y est satirique, l'auteur se moquant des voyages extraordinaires relatés par les auteurs antiques. Le roman de Jules Verne, quoiqu'écrit sur un ton ludique, porte en triomphe la science et les innovations technologiques de la révolution industrielle. Son roman s'est avéré prémonitoire, malgré quelques erreurs techniques.

Quels sont les leviers qui ont permis de transformer ce rêve en réussite ? Les progrès technologiques et les organisations techniques et humaines mises en œuvre bien sûr, mais également l'adhésion des populations des Etats-Unis et de l'URSS aux décisions politiques liées à cette « course à l'espace », dans un contexte de guerre froide et de médiatisation de ces enjeux.

Depuis 1950, la population mondiale a triplé. La consommation totale d'énergie a été multipliée par sept. En 2017, l'énergie consommée était à 85,5 % d'origine fossile. La part des énergies renouvelables ne s'élevait qu'à 3,2 % (source IEA). La demande en énergie va encore considérablement croître, et il apparaît donc nécessaire de trouver de nouvelles sources au mix énergétique.

La technologie du solaire spatial constitue un complément de réponse aux enjeux de développement durable. Sommairement, son principe est le suivant : il consiste à mettre en orbite une centrale de panneaux solaires et à diriger sur Terre l'énergie électrique récoltée. C'est une innovation de rupture puisqu'elle constitue la première exploitation d'une énergie externe à la planète. De fait, elle modifie la relation entre l'homme, l'espace et l'énergie exploitée. Il nous paraît pertinent d'étudier cette opportunité.

Ce mémoire a pour vocation de mettre en évidence les points forts et les limites du solaire spatial (SBSP) face aux enjeux du développement durable. A ce jour, aucune technologie permettant de faire évoluer le mix énergétique de manière significative n'a encore émergé. Aussi, quelques questions apparaissent :

- Quels sont les leviers qui favorisent un tel développement ?
- Comment une nouvelle technologie peut-elle aujourd'hui se développer et, à terme, se substituer aux énergies dites « classiques » ?
- Selon quels critères les technologies énergétiques sont-elles et devraient-elles être évaluées et comparées ?
- Quel est le coût complet lié à l'utilisation de chaque énergie, en s'inscrivant dans une démarche de développement durable ?

Afin de répondre à ces questions, nous présenterons dans une première partie le cadre théorique de notre recherche : l'énergie, et principalement l'énergie électrique. Nous nous attacherons tout d'abord à définir le concept d'énergie, de ses multiples facettes aux enjeux et à ses effets.

Après avoir discuté des notions de développement durable, de transition énergétique et d'énergie renouvelable et exposé leurs enjeux, nous verrons que la transition énergétique vers « le renouvelable » doit faire face à des mix énergétiques nationaux très hétéroclites, basés majoritairement sur les énergies fossiles, et que cette notion comprend des limites techniques et sociologiques. L'approche financière de la production de l'énergie électrique sera ensuite abordée en détail.

Pour terminer cette première partie, un tableau comparatif des ressources énergétiques électriques sera élaboré. Notre objectif sera de classer les technologies de production d'énergie actuelles au travers de trois prismes : sociétal, économique et technique.

La seconde partie traitera de la technologie solaire spatiale et de son potentiel de développement afin d'envisager sa possible intégration à un nouveau mix énergétique. En premier lieu, nous aborderons l'historique du solaire spatial et ses caractéristiques, puis ses freins et ses limites. Nous y proposerons une approche économique et une estimation des influences de l'environnement macroéconomique.

Après avoir fait le constat que cette technologie de production d'énergie reste à dynamiser, nous proposerons une modélisation du processus de son développement, en nous inspirant de l'histoire de l'électrification des Etats-Unis par Thomas EDISON.

La méthodologie de recherche introduira la troisième partie. Dans cette dernière, nous présenterons les résultats de nos prospections et nous en déduirons des recommandations.

Sur la base des critères de comparaison utilisés précédemment, nous intégrerons parmi les autres systèmes de production la technologie du solaire spatial. L'intention sera de suggérer des axes de progrès à privilégier pour favoriser son développement.

I. CADRE THEORIQUE : L'ENERGIE ELECTRIQUE DURABLE

A. L'ENERGIE ET SES MULTIPLES FACETTES

1. Définition du concept d'énergie

Le dictionnaire français *Le Petit Larousse* indique que le mot « énergie » provient du grec ancien « *energia* » qui signifie « force en action ». Et bien qu'étant un concept très ancien dans le langage courant, ce n'est que vers la seconde moitié du XIX^e siècle qu'il est défini de manière scientifique. Pour les physiciens, ce terme désigne la capacité à modifier un état ou à produire un travail qui va entraîner un mouvement, un rayonnement électromagnétique ou de la chaleur.

Dans le Système international (SI), l'unité permettant de quantifier l'énergie s'exprime en joule (défini par James JOULE en 1843). Néanmoins, elle s'exprime plus couramment en kilowatt-heure (kWh) ou en tonne équivalent pétrole (tep).

Les principes de la thermodynamique régissent les transformations de l'énergie lors des phénomènes physiques et chimiques : l'énergie d'un système fermé se conserve. En somme, « rien ne se perd, rien ne se crée, tout se transforme » comme le formule Lavoisier, qui avait paraphrasé le philosophe grec Anaxagore, ce qui témoigne bien de l'ancienneté de la notion d'énergie.

L'énergie existe sous différentes formes. L'énergie mécanique est liée au mouvement d'un corps ; l'énergie potentielle chimique contenue dans un combustible est libérée lors de sa combustion ; l'énergie solaire issue des photons peut être transformée sous forme d'électricité ou de chaleur, qui elles aussi sont deux formes d'énergies supplémentaires.

Les sources d'énergie sont également multiples, et elles sont à lier aux formes d'énergies. On pense naturellement à nos propres muscles ou aux animaux que l'on peut exploiter, au vent ou aux courants d'eau qui permettent de créer de l'énergie mécanique en faisant tourner des pales de moulin ou des hélices. D'autres sources d'exploitation plus récentes à l'échelle de l'humanité, comme le pétrole ou le charbon que l'on appelle communément les énergies fossiles, ont la caractéristique de générer de l'énergie thermique par leur combustion. La source « nucléaire », mise en évidence par les travaux de recherche d'Albert Einstein, est issue de la transformation des éléments fondamentaux constitutifs de la matière ; elle permet de produire de l'énergie thermique puis électrique en générant des sous-produits radioactifs

dangereux qu'il faut gérer à long terme. Le soleil, les sources d'eaux chaudes des profondeurs terrestres sont considérées comme renouvelables, et elles permettent aussi de récupérer de la chaleur. Toutes ces sources d'énergie vont bien souvent être à l'origine de la production d'énergie électrique artificielle, à usage domestique ou industriel, après plusieurs transformations successives. L'objectif est de les rendre accessibles facilement. Le vent va faire tourner des éoliennes équipées d'un alternateur qui va générer *in fine* du courant électrique qui sera distribué aux consommateurs finaux. Le tableau ci-dessous synthétise la relation entre une source et une forme d'énergie :

Formes d'énergie	Sources d'énergie
Énergie mécanique (force motrice, mouvement, vitesse)	La gravitation, les muscles, le vent, l'eau, la vapeur (pression), les moteurs thermiques et électriques, les machines.
Énergie thermique (chaleur, radiations thermiques)	Le soleil, la combustion du bois, des énergies fossiles (charbon, pétrole, gaz), ou d'autres produits riches en carbone (alcools, huiles...), l'énergie électrique (effet joule), l'énergie nucléaire (dans les centrales).
Énergie électrique	La foudre, l'électricité statique, les piles, les générateurs électriques (dynamos, alternateurs), les centrales hydroélectriques, les centrales nucléaires, les éoliennes.
Énergie lumineuse	Le soleil, les lampes, le feu, le gaz.
Énergie chimique potentielle	Matière organique (végétale et animale), les aliments, les produits chimiques réactifs, les énergies fossiles : houille, gaz, pétrole.

Figure I-1 : Les énergies renouvelables de la préhistoire à nos jours (source : Centre national d'histoire des sciences NCGW)

Ce premier éclairage sur l'énergie nous amène donc à comprendre qu'il existe des énergies naturelles et des énergies artificielles. Les premières sont issues de notre écosystème sans aucune transformation ; les secondes sont celles qui sont générées par l'homme pour son propre usage, tout en ayant à l'esprit qu'elles peuvent aussi exister à l'état naturel (par exemple l'électricité ou la vapeur d'eau surchauffée). Les sources d'énergie naturelles ne sont en effet que très rarement facilement utilisables pour les activités humaines.

Cette différenciation entre les sources d'énergie conduit à une première classification en énergie primaire et énergie secondaire. On parle d'énergie primaire lorsqu'il s'agit d'une source d'énergie forcément naturelle, utilisable pour les activités et les besoins humains. On peut citer par exemple le rayonnement solaire, le vent, le pétrole brut, la géothermie ou l'énergie hydraulique.

Ces énergies primaires sont ensuite en grande partie transformées. L'intérêt de leur transformation est d'en faciliter le stockage, le transport et leur utilisation. Cela explique la

production d'électricité, des carburants pétroliers raffinés (essence, gasoil) ou d'hydrogène, justifiant par la même leur classification en énergie secondaire.

Les énergies secondaires sont donc issues d'une transformation effectuée par l'homme et sont à ce titre artificielles.

Cependant, toutes les actions de transformation, de transport ou de stockage impliquent des pertes importantes. Ce constat nous amène à la classification suivante : les énergies finales. Celles-ci sont directement utilisables pour le consommateur : l'électricité en 230 volts à la prise de courant, l'essence à la pompe, etc. Mais là encore, on constatera des pertes principalement liées à l'acheminement de l'énergie secondaire vers les lieux de consommation.

Situé en bout de chaîne, le consommateur lui-même ne parvient pas à transformer de façon efficace toute l'énergie qu'il consomme. Ainsi une autre partie est elle aussi perdue par les installations localisées chez le particulier ou les industriels. La quantité qui résulte de toutes les transformations et pertes induites correspond donc à l'énergie réellement consommée : c'est la classification en énergie utile.

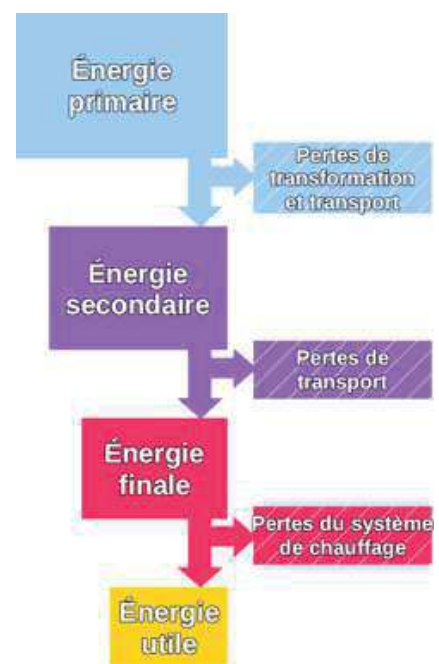


Figure I-2 : Les stades de l'énergie (source : réseaux chaleur CEREMA³)

³ Le Centre d'études et d'expertise sur les risques, l'environnement, la mobilité et l'aménagement (Cerema) est un établissement public tourné vers l'appui aux politiques publiques, placé sous la double tutelle du ministère de la Transition écologique et solidaire et du ministère de la Cohésion des territoires. Leur « vocation est d'apporter des connaissances, des savoirs scientifiques et techniques et des solutions innovantes au cœur des projets territoriaux pour améliorer le cadre de vie des citoyens ».

Nous venons de voir que le concept d'énergie se définit nécessairement selon les étapes de sa transformation. Nous verrons aussi que si en 2018, l'énergie est devenue un bien de consommation courant, facile d'accès, considéré comme un droit naturel, il n'en a pas toujours été ainsi. Le développement de l'énergie et sa maîtrise sont en effet directement liés à l'histoire de l'humanité.

2. Les grandes phases de l'évolution en matière d'énergie

a. Les périodes majeures de l'évolution

L'histoire humaine et son développement sont fortement marqués par les évolutions liées à l'énergie et à sa maîtrise. Depuis la préhistoire, l'homme a en effet su trouver les sources d'énergies nécessaires pour satisfaire ses besoins vitaux : se chauffer, se nourrir, se restaurer, se loger et se déplacer. Ainsi, on peut citer le feu alimenté d'abord par du bois ramassé, puis par du bois coupé de plus en plus finement à l'aide d'outils en amélioration permanente, les bœufs pour tracter les charrues, les chevaux, les bateaux à voiles, les roues à aubes, etc.

La population humaine étant à cette époque peu importante et stable, les besoins sont restés faibles. Les ressources semblaient alors illimitées, naturellement accessibles et renouvelables au rythme des « faibles » besoins (LEBEAU, 2008).

Plus récemment dans l'histoire de l'humanité, plus particulièrement depuis la révolution industrielle, les développements techniques et scientifiques ont permis une augmentation de la consommation d'énergie. Les objectifs ont été de simplifier le travail de l'homme et d'améliorer ses conditions de vie. Ces améliorations ont favorisé le développement de la population humaine, géographiquement et en nombre. La machine à vapeur, le remplacement du bois par le charbon, l'avènement du pétrole et de l'électricité sont des marqueurs majeurs de l'évolution.

Depuis la fin de la Seconde Guerre mondiale, nos modes de vie dans les pays industrialisés, couplés à l'explosion démographique (triplément de la population en cinquante ans) ont encore démultiplié les besoins en énergie liés essentiellement à l'essor de l'industrie, de l'agriculture, des transports et des moyens de communication (internet, notamment).

Plusieurs alertes, comme les chocs pétroliers de 1973 et 1979, ont fait prendre conscience de la raréfaction des ressources fossiles et de l'impact environnemental de leur exploitation. Une mutation technologique a donc eu lieu en termes d'énergie : le nucléaire s'est fortement imposé en France. Cette source d'énergie est efficace, mais présente des risques : la radioactivité qui y est associée. La prise de conscience collective des risques de santé et de stockage des déchets (cycle de vie du produit) est sujette à polémiques.

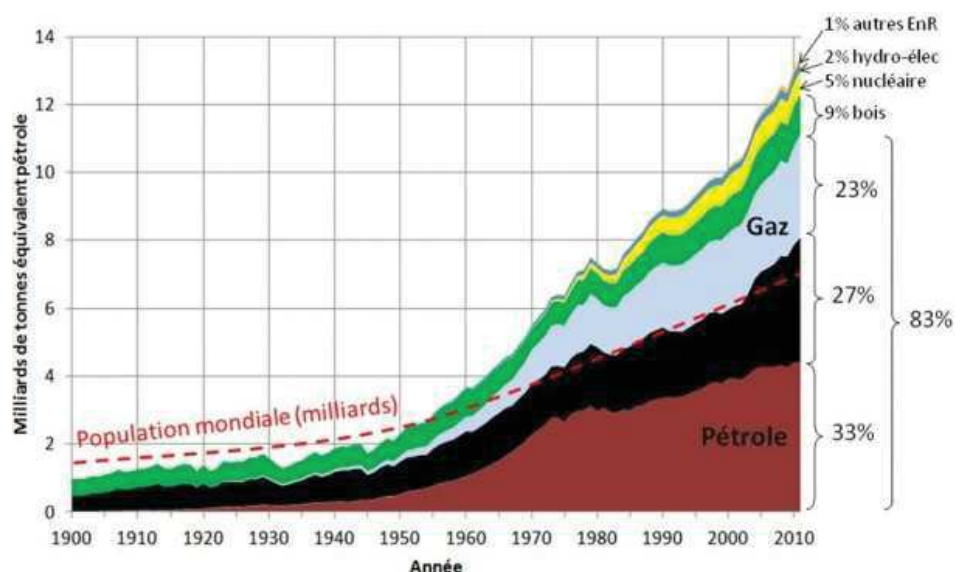
Toutes les évolutions se sont faites bien souvent sous la contrainte. D'après André LEBEAU, « c'est la pénurie ou l'épuisement de la ressource, qui était proche, voire inévitable, sans changement de comportement », qui rythment souvent la mutation.

A l'heure où les besoins énergétiques croissent, où les signaux négatifs s'accumulent, c'est vers une nouvelle transition énergétique que nous devons tous, États et citoyens, nous diriger. Cette dernière tendrait à être respectueuse de l'environnement et des différents écosystèmes : une énergie durable basée sur une source renouvelable à l'échelle de l'humanité.

b. Consommation d'énergie et population mondiale

Le graphique ci-dessous présente l'évolution de la consommation d'énergie et l'augmentation de la population mondiale. Cette illustration met clairement en évidence le lien entre population mondiale et exploitation de sources d'énergie. Un découpage par année situe l'émergence de l'industrialisation dans les années 1950-1960, celle du nucléaire civile à la fin des années 1970 et montre qu'il n'y a pas ou très peu d'énergies renouvelables.

Figure I-3 : Evolution de la consommation d'énergie et de la population mondiale (source : J.M. Jancovici)



Cette seconde illustration permet de constater la part de l'augmentation de consommation d'énergie par habitant et dans sa globalité.

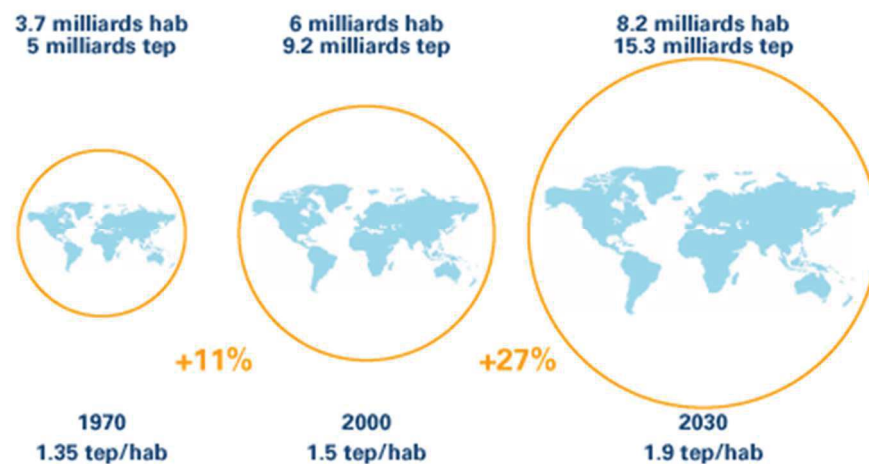


Figure I-4 : La croissance énergétique 1970-2030 (source : AIE/BP Statistical Review)

Inévitablement, ces données explicites nous poussent à nous interroger sur les impacts à venir.

c. La prise de conscience des effets

L'évolution croissante des consommations en énergie engendre une multiplication des effets et conséquences sur l'homme et l'environnement. Par exemple, une centrale électrique fonctionnant au charbon dégage des odeurs, émet des poussières, des gaz à effet de serre ou encore des particules fines. Elle peut aussi rejeter des eaux polluées. Les riverains d'un tel site sont gênés par les poussières ou l'odeur. Mais les effets vont bien au-delà, puisque par diffusion et dilution dans l'air et l'eau, ils ont un impact sur l'ensemble de la planète.

Dès la fin du XIX^e siècle, les économistes ont étudié dans le détail ces impacts et leurs conséquences sur l'économie. Ils ont appelé « externalité négative » la nuisance occasionnée sur une partie par la consommation d'un bien ou d'un service. L'Etat peut décider de prendre en charge ces nuisances, alors appelées « coûts sociaux⁴ » (KAPP, 1976). Il peut réguler et équilibrer ces coûts par la mise en place de réglementations, normes, taxes ou plus récemment de « droits à polluer ».

⁴ KAPP, K. W. (1976). *Les coûts sociaux dans l'économie de marché*

Pendant longtemps, les nuisances causées à l'environnement (coût écologique) n'étaient pas considérées tant qu'elles n'avaient pas d'incidence visible ou connue sur l'être humain. Nous verrons dans la partie B « DES ENERGIES RENOUVELABLES AU DEVELOPPEMENT DURABLE » que la prise en compte de la question environnementale dans sa globalité a été l'un des fondements du concept de développement durable.

Avec cette évolution politique et sociétale et le traitement des externalités, les enjeux de l'énergie se complexifient et se diversifient. Il n'est désormais plus possible de limiter la production d'énergie strictement à l'étude de son processus de création. L'intégration des effets, et ceci à toutes les étapes du cycle de vie de l'énergie, est une nouvelle composante influant sur la valeur de l'énergie. Cette approche systémique est repérée par la société, de plus en plus vigilante, informée, voire avertie.

3. Les différents enjeux de l'énergie : la politique omniprésente

a. L'enjeu lié à l'approche scientifique

« Science sans conscience n'est que ruine de l'âme » (Rabelais, *Pantagruel*)

Comprendre et apprendre pour garantir la poursuite du développement humain dans une vision humaniste et éclairée, c'est-à-dire améliorer le cadre de vie de l'homme pour son développement et celui de ses activités, reste le but fondamental de la science. C'est là l'héritage des philosophes des Lumières.

Mettre en place la transition énergétique, gérer la raréfaction des ressources et assurer un accès égalitaire à celles-ci, garantir la poursuite des activités humaines dans une optique de développement durable, ce sont donc des défis de taille à relever pour la science, certainement ceux du XXI^e siècle.

Un des points de vue des scientifiques et ingénieurs, pour répondre à cette révolution énergétique, est de trouver sans cesse des solutions alternatives à la demande croissante en énergie. On notera le développement des nouvelles technologies en matière de nucléaire avec plus ou moins de succès techniques et des composantes financières très importantes. Il s'agit de recherches fondamentales et appliquées, bien souvent prises en charge au niveau national ou international. Les entreprises privées s'y engagent rarement. Le plus souvent, elles font le

choix d'assurer leurs intérêts financiers en misant sur des technologies abouties et rentables. ITER⁵ en est un exemple plutôt complexe et long à mettre en œuvre, financé par sept partenaires internationaux, dont l'UE (trente-cinq pays engagés). Cependant, la dimension planétaire du projet, surtout au travers de la mise en commun des moyens, des outils et des connaissances, constitue probablement un modèle d'organisation eu égard à l'ambition du projet (fusion nucléaire).

Plus simplement, les technologies de panneaux solaires photovoltaïques, d'éoliennes, d'exploitation de la géothermie ou encore de développement de sources de biocarburants sont autant d'exemples plus aboutis pris en charge par des entrepreneurs privés.

L'autre aspect du travail des scientifiques est d'optimiser la performance des systèmes en place. Ces optimisations peuvent se faire au niveau :

- ⇒ des consommations d'énergies finales en limitant les pertes de consommation domestique ayant pour effet la maximisation de l'énergie utile : systèmes d'isolations plus performants, amélioration des processus industriels de productions de biens ;
- ⇒ des transports et de la distribution des énergies primaires et des énergies finales : amélioration des consommations des moteurs des super tankers ou des poids lourds ;
- ⇒ de l'efficacité de la transformation de l'énergie primaire à secondaire : nouvelles versions des systèmes de production d'énergie nucléaire, éolienne, solaire.

Le graphique ci-dessous met en évidence cette tendance. Il est à noter que depuis 2010, c'est la Chine qui est le moteur de cette amélioration (<https://www.iea.org/efficiency/>) : « *The improvement in intensity varies widely across countries and regions. In China, intensity fell significantly faster, reflecting the ongoing effects of efficiency policies. Without China, global energy intensity would have improved by only 1.1% in 2016.* »

⁵ La fusion est la réaction nucléaire qui alimente le Soleil et les étoiles. Potentiellement, c'est une source d'énergie quasiment inépuisable, sûre et qui a un faible impact sur l'environnement. ITER a pour objectif de maîtriser cette énergie : le programme est une étape essentielle entre les installations de recherche qui l'ont précédé et les centrales de fusion qui lui succéderont. (source : www.iter.org.fr)

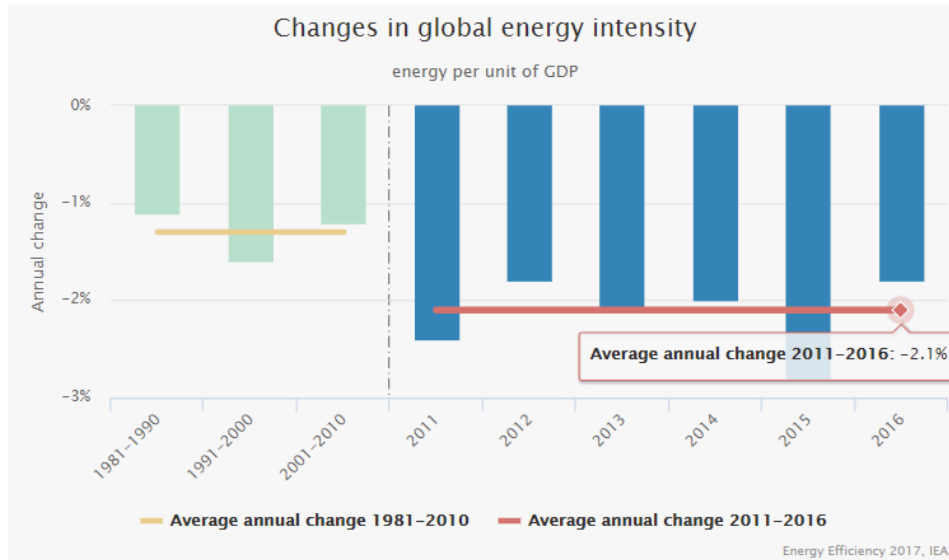


Figure I-5 : Energy Efficiency 2017, World Energy Outlook 2016, World Energy Statistics and Balances 2017, IEA

Enfin, le dernier aspect, et non des moindres, de l'approche scientifique est de modéliser les changements en termes de démographie, de climat et de consommation. Le modèle n'est pas une fin en soi, il va servir à comprendre, anticiper et réagir de la façon la plus appropriée avant d'être acculé. Prédicatif et statistique, il est un outil qui doit être sans cesse affiné comme l'explique, en parlant de l'homme, l'auteur et scientifique André LEBEAU : « [Il] veut se borner à apprécier notre capacité de prévision et ses limites, les chances qu'une vision du futur soit partagée par les individus et qu'elle constitue le fondement de conduites collectives aptes à modifier le cours des choses. »⁶ En complément, dans l'idéal, ce modèle doit permettre d'accompagner la prise de décision politique.

Quelques exemples de modèle :

Le scientifique russe Nikolai KARDASHEV a tenté de classer les civilisations en trois grands types :

- ⇒ **Type 1** : Une civilisation est capable de collecter et de consommer l'intégralité de l'énergie de sa planète.
- ⇒ **Type 2** : Une civilisation qui dépasserait d'une puissance de 10 le type 1 et consommerait toute l'énergie de son étoile.
- ⇒ **Type 3** : Une civilisation qui consommerait toute l'énergie de sa galaxie.

⁶LEBEAU André, (2008), *L'Enfermement planétaire*, Edition Gallimard, Paris., 377 pages.

Cette classification est reprise par divers chercheurs pour la compléter, la critiquer, en définir le stade d'évolution et la vision à long terme. Nous sommes, comme le montre le graphique ci-dessous, encore loin du type 1, mais l'évolution estimative d'après les données de l'International Energy Agency (IEA) nous en rapproche de plus en plus.

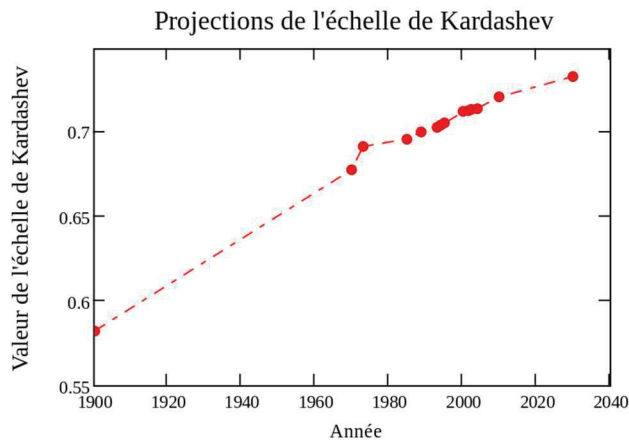
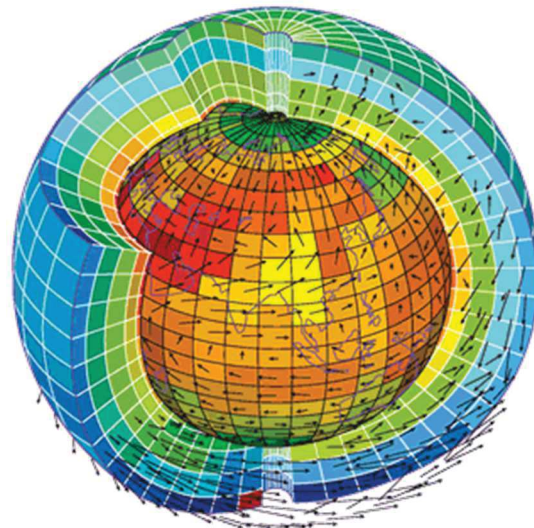


Figure I-6 : Projection de l'échelle de Kardashev (source : International Energy Agency World Energy Outlook)

Il faut aussi évoquer tous les modèles climatiques qui sont élaborés en collaboration avec les mathématiciens. Ils évoluent pour affiner les projections sur le court, moyen et long terme, celle sur le long terme étant la plus problématique. En effet, ces modèles sont basés sur des approximations et dépendent de la précision des mesures initiales (LEBEAU, 2008). Ils alertent et montrent ce qui peut se produire si nous agissons ou, à l'inverse, si nous n'agissons pas.

Figure I-7 : Maillage tridimensionnel d'un modèle climatique (© Vincent Landrin, d'après Laurent Fairhead/LMD /CNRS)

Nota bene : Les couleurs représentent la température, et les flèches le vent.



Enfin, comme on le perçoit, il existe de nombreux et vastes sujets d'exploration et de recherches. Il est donc nécessaire de trier, classer, prioriser les sujets et d'allouer les ressources là où il semble primordial d'aller. Reste à identifier qui décide et comment on décide de ces importances. Les politiques, les citoyens, les industriels, les chercheurs, les

groupes de lobby, etc. Quels sont les mécanismes ou les incitations de transfert de technologie de la recherche et développement (R&D) pure et fondamentale vers le milieu industriel ? Pourquoi les « *best practices* » sont-elles adoptées ou non ? On devine ici le poids de la force politique, par des mesures incitatives et/ou législatives.

b. L'enjeu industriel de l'énergie : la vision « supply chain »

La raréfaction des ressources énergétiques et les risques liés à l'utilisation de certaines énergies ont mené à des décisions politiques contraignantes :

- ⇒ Réduire la consommation des énergies nucléaires, voire l'arrêt complet dans certains pays.
- ⇒ Réduire et trouver des alternatives aux énergies fossiles.
- ⇒ Réduire de façon drastique les émissions de gaz à effet de serre.

Ces décisions impliquent donc une gestion économique plus précise de la production, de la distribution et de la consommation de l'énergie. D'autant que les énergies renouvelables présentent le handicap d'une intermittence naturelle, contrairement aux énergies nucléaires ou fossiles. En conséquence, il faut donc réussir à adapter l'offre et la demande énergétique en permanence en travaillant sur les ressources et leur diversité, la production d'énergie et, éventuellement, la capacité de stockage.

Au niveau français et international, le réseau électrique est en train de s'adapter à ces contraintes par des législations et l'implication des consommateurs, désormais « consomm'acteur », qu'ils soient des industriels ou des particuliers. Des lois comme la Nouvelle Organisation des marchés de l'électricité (NOME) et l'Accès régulé à l'énergie nucléaire historique (ARENH) visent à encadrer l'accès à l'énergie nucléaire en France. Ces lois transitoires accompagnent la transition énergétique en permettant aux nouveaux fournisseurs alternatifs de répondre intégralement à la demande de leurs clients, en ayant accès de façon équitable à une source complémentaire d'énergie nucléaire à un tarif régulé. Il s'agit donc de faciliter l'ouverture du marché de l'énergie. Dans la philosophie du « consomm'acteur », figure la possibilité d'effacement électrique offerte par les producteurs d'énergie. Il s'agit de permettre aux utilisateurs de renoncer à leur consommation énergétique

afin de lisser la consommation globale en cas de pic de consommation (grands froids, panne technique, etc.).

De nombreux acteurs (Equinov⁷, EDF Trading⁸, Vattenfall⁹, etc.) émergent sur le secteur de l'énergie. Leur but est de faciliter l'accès aux informations entre producteurs et consommateurs d'énergie afin d'optimiser la chaîne de production. Ils font appel à des technologies de l'information et de gestion économique (à l'image des traders). Cette nécessité est d'autant plus importante que l'énergie électrique, contrairement à du pétrole, du charbon ou du gaz, se stocke difficilement et nécessite des moyens chimiques (batteries avec métaux lourds) ou techniques (barrages, installations spécifiques, etc.) pour y parvenir.

En l'état actuel, ces technologies de stockage présentent des externalités négatives les rendant peu attractives (batteries à métaux lourds). L'IFP Energies nouvelles¹⁰ donne un aperçu des technologies et des temps de stockage ne dépassant pas quelques jours sur la figure graphique suivante.

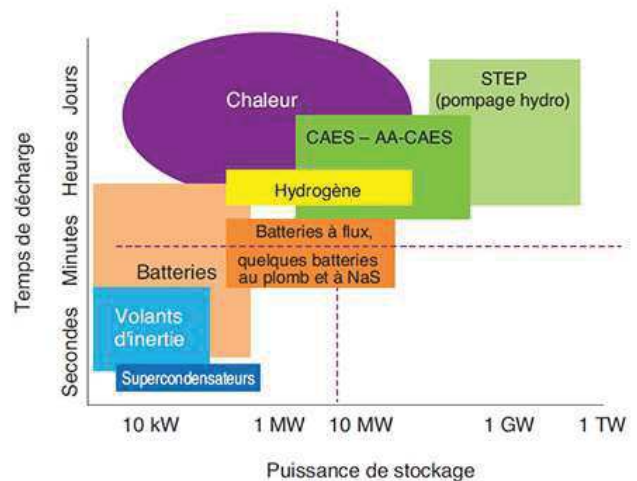


Figure 1-8 : Les différentes technologies de stockage en fonction de leur puissance et du temps de décharge (autonomie) (source : IFP Energies nouvelles)

La multitude des solutions, de producteurs alternatifs et la grande quantité de consommateurs ont amené au développement de la notion de « *smart grid* » : le réseau électrique intelligent. L'émergence des technologies « *smart* » associées à l'écosystème de la production et de la consommation d'énergie permet de croire aux perspectives régulatrices d'une *supply chain* informatisée, intégrée au réseau d'électricité.

⁷ « Premier intégrateur de services innovants en performance énergétique » (Source www.Eqinov.com).

⁸ Filiale d'EDF spécialisée dans le négoce sur les marchés de gros.

⁹ Sixième plus importante société européenne de production et de fourniture de l'énergie.

¹⁰ IFP Energies nouvelles (IFPEN) est un acteur majeur de la recherche et de la formation dans les domaines de l'énergie, du transport et de l'environnement. De la recherche à l'industrie, l'innovation technologique est au cœur de son action, articulée autour de trois priorités stratégiques : mobilité durable, énergies nouvelles et hydrocarbures responsables (<http://www.ifpenergiesnouvelles.fr>).

Ce réseau électrique intelligent, par sa bonne gestion, permettrait d'atteindre une meilleure efficacité énergétique et de faire des économies d'énergie. D'après l'Agence internationale de l'énergie, les *smart grids* devraient rapporter 100 milliards d'euros par an grâce à davantage de flexibilité, donc des coûts et des investissements en infrastructures évités.

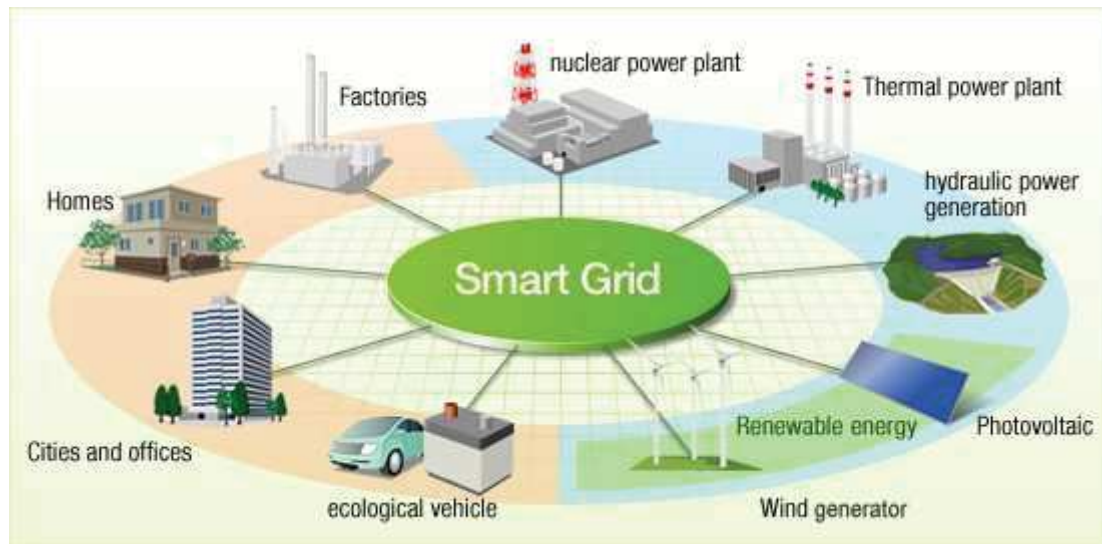


Figure I-9 : Smart Grid (d'après l'Agence internationale de l'énergie)

La logique « *smart grid* », pour fonctionner efficacement, doit être pilotée, encadrée, et donc organisée. Compte tenu de la diversité de ses composantes, il semble plausible de considérer le rôle de l'action politique comme déterminant.

c. Les enjeux politiques de l'énergie

L'action politique consiste à organiser et à gérer la société ; il est donc primordial d'organiser et de gérer les ressources en énergie dont elle a besoin pour garantir sa pérennité, son équilibre social et son développement. L'absence de vision du futur énergétique pour une société ou un Etat n'est par conséquent pas un bon signal pour son avenir.

L'énergie permet de garantir l'autonomie d'un pays : elle permet l'accès aux moyens de développement et de croissance économique tels que l'industrie, l'agriculture, le transport et le développement urbain et rural. L'énergie permet aussi de créer du lien dans la société, d'autant que les nouvelles technologies de communication en sont de plus en plus consommatrices (ordinateurs, cloud, internet, téléphones portables, etc.).

Un des rôles des décisionnaires politiques est d'organiser les accès aux sources d'énergie de manière à les rendre simples, fiables, économiques et équitables. Un peu comme pour un iceberg, la partie visible de la politique énergétique est l'organisation de la distribution et donc de l'accès à l'énergie finale. Néanmoins, la partie la plus importante consiste à bien définir et à orienter les choix stratégiques en matière de nature énergétique, par conséquent à fixer le cap pour les énergies primaires et secondaires.

En outre, la politique énergétique va au-delà de la notion de nation. Elle peut créer un clivage entre pays riches et pays pauvres, car l'accès à l'énergie n'y est pas équivalent tout comme le PIB qui en résulte. On prendra pour exemple ces trois chiffres de consommation d'énergie par habitant :

- 6,80 tep/habitant aux Etats-Unis en 2017
- 3,71 tep/habitant en France en 2017
- 0,47 tep/habitant au Togo en 2017

L'accès à l'énergie secondaire et finale n'est en effet pas équitablement réparti. Parfois, cette source de tension est accentuée par une répartition géographique inégale entre les énergies primaires. Ce cocktail explosif provoque des tensions économiques, voire des conflits armés entre pays. Les pays riches, gros consommateurs d'énergie, veulent assurer leurs approvisionnements énergétiques à bas coûts. Or, ceux-ci se trouvent souvent dans des pays moins riches. De plus, la raréfaction des énergies fossiles augmente la tension sur les approvisionnements, et les pays qui possèdent ces énergies primaires souhaitent profiter davantage de leurs ressources. Cette situation est à l'origine de conflits de plus en plus nombreux. On peut donc parler d'enjeu géopolitique de l'énergie.

Il est d'ailleurs intéressant de comparer les consommations énergétiques par habitant de pays producteurs et de pays consommateurs pour se rendre compte de l'inégalité qui en découle :

Consommation par habitant - Pays producteurs	Consommation par habitant - Pays consommateurs
0,15 tep/habitant au Niger en 2017	6.8 tep/habitant aux USA en 2017
0,76 tep/habitant en Namibie en 2017	3,71 tep/habitant en France en 2017

Il existe donc une double inégalité entre pays riches et pays pauvres, mais aussi entre pays exploitants et pays exploités.

Enfin, la responsabilité politique est également de favoriser les développements de nouvelles technologies et solutions énergétiques. Des lois, des taxes ou des bonus doivent permettre d'orienter la transition énergétique comme nous l'avons déjà évoqué précédemment. Ainsi, l'Union européenne subventionne l'énergie éolienne et solaire. Il existe encore des lois plus visibles, comme l'extinction des enseignes publicitaires¹¹ qui doit permettre de réduire la consommation en France de près de 1 000 GWh, soit près de la consommation électrique de 370 000 ménages. Cette logique visant à accompagner le plus grand nombre vers une consommation raisonnable a pour intention notamment de réduire les impacts environnementaux.

d. Les enjeux environnementaux

Les enjeux environnementaux consistent à apporter des solutions durables et viables aux populations aujourd'hui et demain. Les Conférences des Parties (COP) qui ont succédé à celle de Paris en 2015 ont tracé une feuille de route politique mondiale destinée à converger vers :

- ⇒ la maîtrise du réchauffement climatique ;
- ⇒ un marché du carbone permettant l'accélération vers des économies vers le bas carbone ;
- ⇒ la limitation de l'exploitation des ressources fossiles vers des ressources durables.

En France, la loi de 2015 sur la transition énergétique pour la croissance verte promeut l'engagement de l'ensemble des acteurs pour la prise en compte des enjeux environnementaux. L'intention générale de cette loi témoigne de la volonté de marquer une évolution « verte » de la production et de la consommation d'énergie :

« La transition énergétique vise à préparer l'après-pétrole et à instaurer un modèle énergétique robuste et durable face aux enjeux d'approvisionnement en énergie, à l'évolution des prix, à l'épuisement des ressources et aux impératifs de la protection de l'environnement. »¹²

¹¹Décret n°: 2012-118 du 30 janvier 2012 relatif à la publicité extérieure, aux enseignes et aux préenseignes.

¹²Loi n° 2015-992 du 17 août 2015 relative à la transition énergétique pour la croissance verte.

On retrouve dans les nombreux objectifs généraux du texte le traitement de la question du développement des énergies renouvelables, « notamment en simplifiant les procédures, en modernisant la gestion des concessions hydroélectriques (regroupement par vallées, création de sociétés d'économie mixte, nouveaux investissements) et le dispositif de soutien aux énergies électriques matures (mise en place du complément de rémunération) ».

A noter la mise en œuvre d'un plan pluriannuel de l'énergie (PPE) visant à mobiliser le plus grand nombre localement et qui a donné, à la suite d'un long processus de consultation, des résultats exploitables¹³ (données publiées en septembre 2018).

Les enjeux environnementaux relèvent de la capacité à substituer les énergies de production d'électricité classique, principalement fossiles et nucléaires, par des énergies ou des systèmes de production (incluant la distribution et le stockage) via des énergies renouvelables, efficaces et abordables. Finalement, on peut avancer que ces dernières devront répondre aux principes de développement durable, selon une approche économique nécessairement réinventée.

e. Enjeux et impacts économiques

On peut distinguer quatre types d'impact.

⇒ Un impact sur le développement économique d'un pays

L'énergie et la production d'énergie sont avant tout des facteurs de développement économique et un moteur de la croissance. Pour Renaud et May GICQUEL¹⁴, elles se placent à un rang d'importance équivalent au capital, au travail ou aux ressources naturelles. Le marché de l'énergie consiste notamment à répondre à la demande domestique et industrielle. Toujours selon ces auteurs, la politique de maîtrise de l'énergie doit permettre d'estimer au plus près les besoins pour établir la capacité de production d'énergie finale.

⇒ Un impact sur les investissements

Le secteur de l'énergie se caractérise par la lourdeur des investissements, qu'ils soient destinés à la production ou à la distribution. A titre d'illustration, l'électrification d'un pays

¹³ Rapport et bilan du débat public de la CNDP disponibles : www.ppe.debatpublic.fr

¹⁴GICQUEL May & GICQUEL Renaud, (2016). *Introduction aux problèmes énergétiques globaux*. Presses des Mines, Paris, page 124.

représenterait un coût pouvant aller jusqu'à 40 % des investissements du pays (GICQUEL, 2016, p. 137).

⇒ Un impact sur l'emploi

En France, en 2007, les emplois directs du secteur énergétique (industrie du transport, de la production et de la distribution de l'énergie) représentent 0,8 % de la population active, soit 194 000 personnes (134 000 personnes en équivalent temps plein en 2014).

⇒ Un impact sur le consommateur

Toutes les entreprises sont dépendantes de l'approvisionnement (de préférence en continu) de l'électricité. La maîtrise de la variation du coût et surtout de la disponibilité de l'électricité est un enjeu majeur, et toute variation doit être particulièrement contrôlée. C'est un poste de gestion stratégique dans l'entreprise.

f. L'impact sur la consommation des ménages

En France, en 2016, selon le rapport du ministère de l'Environnement, environ 8,5 % des revenus des ménages sont affectés aux dépenses d'énergie (réparties en transport et énergie domestique).

D'après le même ministère et son observatoire de la transition énergétique, il est compliqué d'ajuster à court terme des dépenses liées à la consommation d'énergie. Aussi, compte tenu du poids des dépenses d'énergie dans le budget des ménages, les variations de coût constituent un facteur de risque d'appauvrissement, d'inégalité ou de vulnérabilité.

Par conséquent, nous pouvons en déduire l'importance d'une politique énergétique nationale tournée vers la maîtrise de l'offre pour le consommateur.

La hausse des coûts sur le moyen terme a un impact sur les choix d'équipements et entraîne une modification des usages (changement de sources d'énergie). Les évolutions en matière d'habitude de consommation énergétique constituent donc un phénomène relativement long.

Questionnement :
L'action politique, constatée comme transversale à tous les enjeux, se place-t-elle en moteur du changement ?

Après avoir délimité le concept d'énergie, détaillé ses enjeux et les grandes phases de son évolution, jusqu'à la prise de conscience actuelle des limites atteintes, il nous apparaît nécessaire d'introduire dans le prochain chapitre les notions de développement durable et de transition énergétique, qui ont conduit au développement des énergies renouvelables. Ces concepts font partie intégrante de la majorité des politiques énergétiques locales ou nationales et sont souvent présentés comme des leviers pour répondre aux réels besoins de demain.

- ⇒ Comment sont nés ces concepts ?
- ⇒ Quels sont leurs enjeux ?
- ⇒ A partir de quelles sources est produite l'énergie que nous consommons ?

Afin de répondre à ces questions, il est important de présenter quelques données qui nous éclaireront sur les diverses situations actuelles, toutes marquées par la prédominance des énergies conventionnelles, et nous permettront aussi d'identifier les limites des énergies renouvelables.

B. DES ENERGIES RENOUVELABLES AU DEVELOPPEMENT DURABLE

1. Le développement durable

Energie et développement durable sont étroitement liés et souvent associés dans le langage courant. C'est pour cela qu'il convient de définir clairement le concept de « développement durable », afin d'éviter une utilisation galvaudée.

Pour proposer une recherche pertinente et précise, il est fondamental de rendre concret le caractère durable du développement énergétique, c'est-à-dire s'entendre sur ses caractéristiques, ses limites et les stratégies favorables à sa mise en œuvre.

a. Définition

« Le développement durable est l'idée que les sociétés humaines doivent vivre et répondre à leurs besoins sans compromettre la capacité des générations futures à répondre à leurs propres besoins. » (COMEEN, www.e-rse.net) Il en découle assez logiquement une approche du traitement des problématiques de gestion de l'instant dans le respect de l'avenir. Ces problématiques touchent autant l'environnement que la justice ou le social.

Dans cette logique, une présentation systémique est désormais acquise. Elle place le développement durable au cœur de trois sphères, ou domaines, que sont l'écologie, le social et l'économique. Il en émane des principes sociologiquement forts et éloquentes : viable, vivable et équitable.

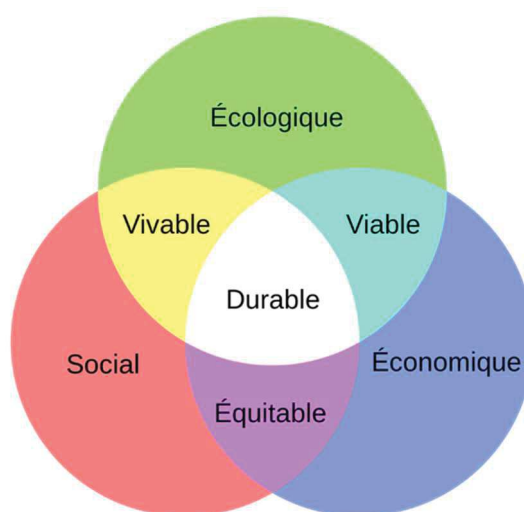


Figure I-10 : Les trois piliers du développement durable (source : www.e-rse.net)

Enfin, il est intéressant de noter que ces trois piliers ont une valeur équivalente. Cela implique d'estimer une organisation équilibrée de la société humaine, le tout dans un espace aux ressources « finies ». L'Agence de l'environnement et de la maîtrise de l'énergie française (ADEME) précise les objectifs et enjeux des trois piliers :

- ⇒ La dimension environnementale : « Le développement des activités humaines doit se faire de façon à ne pas nuire à la capacité de renouvellement des ressources naturelles ou au bon fonctionnement des services écosystémiques. »
- ⇒ La dimension sociale : « Le développement harmonieux de la société humaine passe par la cohésion sociale garantissant à tous l'accès à des ressources et services de base (la santé, l'éducation). »
- ⇒ La dimension économique : « Le développement économique doit permettre la diminution de l'extrême pauvreté et l'exercice par le plus grand nombre d'une activité économique dignement rémunérée. »

b. Histoire

Les éléments de littérature sur le sujet convergent vers un consensus, explicité sur la plateforme de l'engagement « Responsabilité sociale des entreprises » (RSE), qui consiste à penser que « l'émergence de l'idée de développement durable est concomitante avec celle de la société industrielle ».

Les informations recueillies permettent de résumer l'origine et l'évolution du concept de développement durable. En effet, à partir de la fin de la Première Guerre mondiale, l'accélération de l'activité industrielle et économique a entraîné de multiples mouvements sociaux et écologiques. Les crises mondiales importantes ont incité les gouvernements à prendre en considération les demandes de leurs concitoyens de plus d'écologie et de justice sociale dans leur quotidien. Une mobilisation politique a suivi, plus ou moins opérante et engagée. La COP 21 de PARIS, en 2015, a marqué, semble-t-il, l'apogée de cet engagement des décideurs politiques, sur le climat et l'énergie.

D'un point de vue des sources d'énergie, il est régulièrement fait référence aux chocs pétroliers de 1973 et de 1979. Ces derniers ont mis en exergue les besoins énergétiques croissants, notamment de l'industrie, et marquent l'évolution de la société vers une société

de consommation. Cette forte dépendance énergétique inquiète. En outre à l'époque, le second choc pétrolier interpelle et incite déjà à penser « que nous vivons dans un monde aux ressources finies, et que notre développement doit donc être limité » (LEBEAU, 2008). Démarrés en 1972, les travaux et réflexions ayant pour objectif la conciliation du développement économique et des marchés avec la préoccupation écologique et sociale deviennent un enjeu porté par les Nations unies (premier Sommet décennal de la Terre à Stockholm).

Dans les années 1970 à 1980, de nombreux scientifiques se penchent sur le sujet et nous livrent le fruit de leurs réflexions. Ainsi, *Les Limites de la croissance* (MEADOWS, 1972), publié par des scientifiques du MIT pour le Club de ROME, constitue encore aujourd'hui un des ouvrages de référence qui « tentait de questionner notre modèle de développement économique basé sur la croissance économique infinie dans un monde aux ressources finies. Il montrait alors les limites écologiques de notre modèle ».

Le Club de ROME prévoit également l'épuisement des ressources naturelles, donc énergétiques. Il met en perspective le risque supporté par l'homme s'il poursuit indéfiniment sa culture de la croissance comme modèle. L'horizon estimé prévoit à ce moment-là un risque majeur pour la planète entre 2000 et 2100. Certaines théories, portées entre autres par A. LEBEAU, évoquent jusqu'à l'effondrement de civilisation.

En 1987, le rapport BRUNDTLAND¹⁵, présenté à l'ONU dans le cadre de la Commission sur l'environnement, officialise le terme de développement durable. Titré *Notre avenir à tous* dans sa version française, il en propose la définition aujourd'hui encore valide :

« Le développement durable est un mode de développement qui répond aux besoins des générations présentes sans compromettre la capacité des générations futures de répondre aux leurs. Deux concepts sont inhérents à cette notion : le concept de "besoins", et plus particulièrement des besoins essentiels des plus démunis, à qui il convient d'accorder la plus grande priorité, est l'idée des limitations que l'état de nos techniques et de notre organisation sociale impose sur la capacité de l'environnement à répondre aux besoins actuels et à venir. »

¹⁵www.diplomatie.gouv.fr/sites/odysee-developpement-durable/files/5/rapport_brundtland.pdf

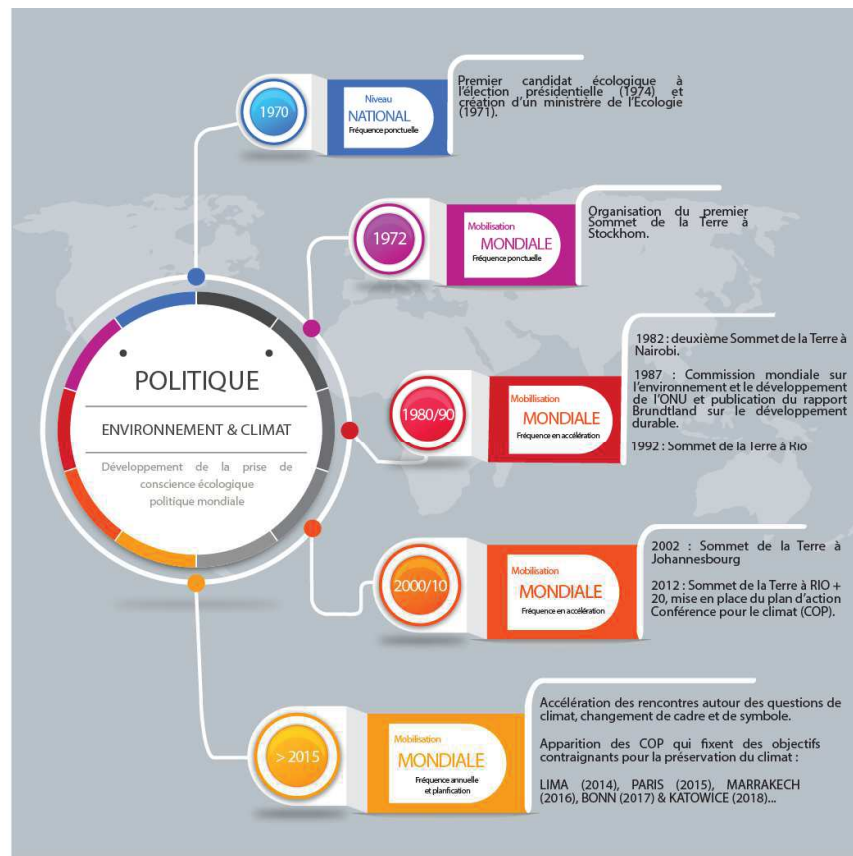


Figure I-11 : Synthèse de l'évolution de la mobilisation politique sur le climat (établie par les auteurs)

c. Enjeux

C'est à partir de la définition donnée dans ce rapport qu'il est possible de déduire les enjeux majeurs :

- ⇒ Elaborer un modèle économique qui concilie croissance des marchés et production ; maintenir un niveau de revenu par habitant suffisant ; développer et entretenir des infrastructures collectives.
- ⇒ Respecter les limites naturelles primaires et développer à long terme l'utilisation de ressources renouvelables ; maintenir la capacité de charge des écosystèmes ; limiter l'usage des ressources « critiques ».
- ⇒ Respecter les droits de l'homme et sociaux : prévenir l'exclusion, réduire les inégalités, développer la participation des citoyens.

Ces objectifs ont été régulièrement abordés et ont fait l'objet d'accord lors des différentes Conférences depuis 1972, et ce, jusqu'à la COP21 où de nombreuses mesures

« contraignantes » relatives à l'environnement, et impactant l'énergie, ont été adoptées par 195 pays.

Les années de mutation vers une organisation humaine plus cohérente et respectueuse de ses ressources font du développement durable l'outil, c'est-à-dire le moyen de parvenir à une forme d'équilibre économique et social. Le développement durable, parce qu'il s'appuie notamment sur des piliers économiques et écologiques, affecte l'écosystème de l'énergie mondiale. La nécessaire évolution vers une consommation plus raisonnable, les incidences en termes de respect des milieux habités ou encore l'ambition de s'engager pour les générations futures en préservant la biosphère sont des éléments moteurs qui aboutissent au mécanisme de transition énergétique.

En resserrant le prisme vers les questions énergétiques, aborder le développement durable revient à considérer les problématiques de réchauffement climatique et de gaz à effet de serre (GES). Ces sujets impliquent le traitement des effets sur les populations (migration, réduction des espaces de vie) et sur les ressources de production d'électricité qui se doit d'être durable et propre. La transition énergétique doit tendre vers un ensemble de changements progressifs et urgents pour pallier les situations de risques évoquées.

Sur l'illustration suivante (figure I-12), la transition énergétique devrait se matérialiser par une diminution des surfaces colorées du bois, du charbon, du pétrole et du gaz, donc une redéfinition du paysage et du marché des ressources énergétiques.

2. La transition énergétique vers le « renouvelable »

a. Une évolution de « forme »

Si l'expression « transition énergétique » est on ne peut plus d'actualité, elle n'en est pas moins ancienne. En effet, l'observation des grandes tendances de l'histoire de la production mondiale d'énergie permet de mettre en évidence trois grandes périodes à ressource énergétique dominante et quasi exclusive : celle du bois, puis celle du charbon et enfin celle du pétrole¹⁶.

¹⁶ NANSEN, Ralph. *Energycrisis: Solution fromspace*. Apogee Books, 2009.

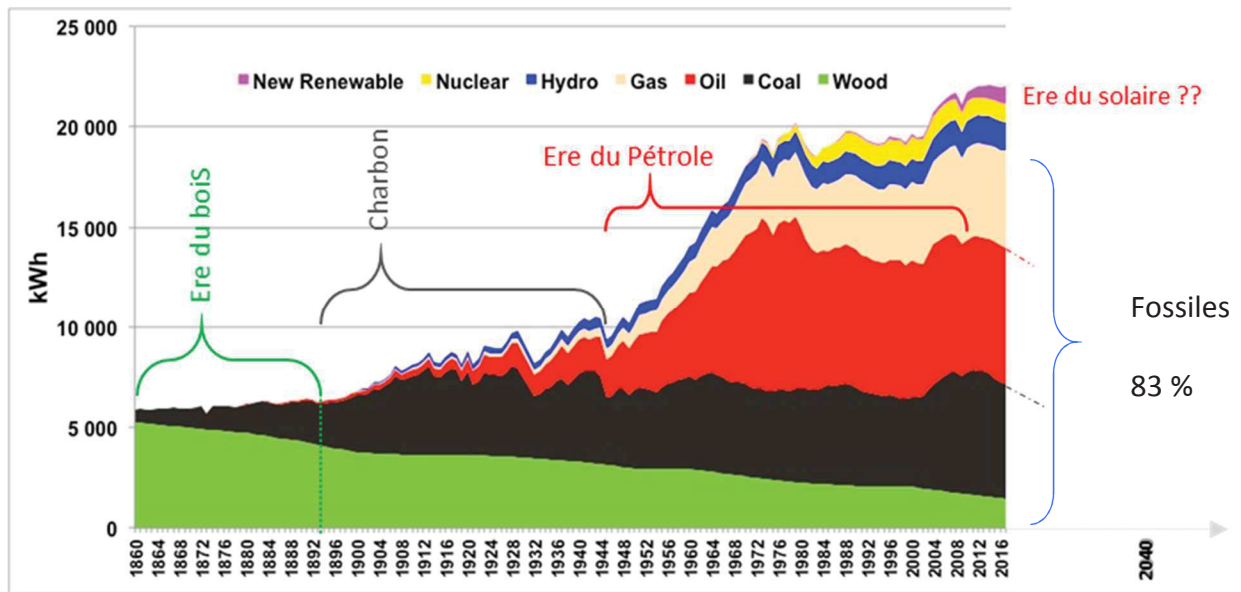


Figure I-12 : Les périodes énergétiques & Evolution de la consommation d'énergie par personne, en moyenne mondiale, depuis 1860, bois inclus (mais ce dernier n'alimente quasiment jamais une machine industrielle ou un véhicule)¹⁷ (modification établie par les auteurs)

D'une quasi monoproduction, notre civilisation a, au fil des dernières décennies, évolué vers ce qui est aujourd'hui communément appelé le « mix énergétique » (énergies fossiles + énergies renouvelables). Il est probable que cela soit la résultante de l'évolution politique et scientifique sur les questions du rapport entre exploitation des ressources et environnement.

b. Des situations nationales hétéroclites

Pour des raisons spécifiques (historique, d'accès aux ressources, géopolitiques, économiques ou sociétales), les nations ont opéré des choix bien différents en matière de production d'énergie. Rares sont celles disposant des mêmes modèles de production et de politique d'accès, et les écarts peuvent être marqués :

- ⇒ La France produit 89,1 % de son énergie à partir du nucléaire¹⁸. Elle ne produit presque pas de CO₂ et reste relativement solide sur le marché de l'énergie.
- ⇒ La Chine produit 72,8 % de son énergie à partir du charbon (données IEA 2016). La part carbonée de son mix énergétique a été si importante qu'en 2009, le pays construisait

¹⁷ <https://jancovici.com/transition-energetique/l-energie-et-nous/lenergie-de-quoi-sagit-il-exactement/>

¹⁸ <https://www.edf.fr/groupe-def/information-sur-l-origine-de-l-electricite-fournie-par-edf>

des centrales à charbon au rythme d'une par semaine¹⁹. Récemment, en 2017, la Chine a changé radicalement de cap en stoppant la construction de 103 centrales à charbon pour investir 360 milliards de dollars dans des centrales à énergies renouvelables²⁰.

- ⇒ Les Etats-Unis ont fait le choix de l'exploitation des gaz et pétrole de schiste dans le but d'augmenter leur indépendance énergétique face aux pays de l'OPEP. Par ce biais, les représentants politiques ont arbitré en faveur de l'indépendance énergétique, au détriment des externalités négatives sur le développement durable. Plus proche de nous, le président Trump, climatosceptique, a annoncé la sortie des accords de PARIS (COP 21).
- ⇒ L'Allemagne a fermé une partie de son parc nucléaire sous la pression citoyenne. En rouvrant des centrales à charbon, le pays fait partie des émetteurs de CO₂ les plus importants en Europe. En 2014, un parc éolien (projet BARD offshore 1) en mer du Nord a été construit avant de faire débat par ses nombreux échecs, au point de remettre totalement en question la stratégie politique écologique globale²¹.

A travers ces exemples, nous pouvons imaginer la difficulté et l'échelle de temps qui pourraient être nécessaires pour faire évoluer les politiques énergétiques spécifiques vers une tendance consensuelle profitable aux énergies renouvelables, donc au développement durable. Pourtant, depuis le début des années 2010, la transition est globalement engagée (Accord de Kyoto, 2011). Elle s'est amplifiée récemment et s'appuie désormais sur les Accords de Paris (COP 21, 2015).

c. Des énergies fossiles incontournables, l'émergence des énergies renouvelables

Il est désormais acquis que les énergies fossiles présentent des externalités négatives difficilement compatibles avec les enjeux du développement durable. De plus, les systèmes de compensation économique de ces externalités ne semblent plus recueillir l'assentiment du public. En outre, c'est un fait que ces ressources sont présentes sur la planète en quantité

¹⁹ Forsythe Michael (2017, 19 janvier). China Halts Plan to Build Power Plants Fired by Coal. *New York Times* (New York), p. 8.

²⁰ Forsythe Michael (2017, 6 janvier). China Plans a Big Increase in Spending on Renewable Energy. *New York Times* (New York), p. 6.

²¹ <https://www.contrepoints.org/2014/09/24/182200-allemande-le-reve-dun-parc-eolien-offshore-geant-tourne-au-cauchemar>

finie, non régénérables dans une échelle de temps cohérente et adaptée à la survie des espèces.

Mais force est de constater qu'elles sont encore indispensables pour répondre aux besoins des populations, de l'industrie, des transports et autres. La relève que constituent les énergies renouvelables (EnR) ne peut prétendre à couvrir l'ensemble des besoins malgré des taux de croissance extrêmement importants (figure ci-dessous).

Par exemple, au niveau mondial, l'augmentation de production d'énergie d'origine éolienne et photovoltaïque sur l'année 2014 a été 6,8 fois supérieure à l'augmentation de la production électrique à base de charbon.

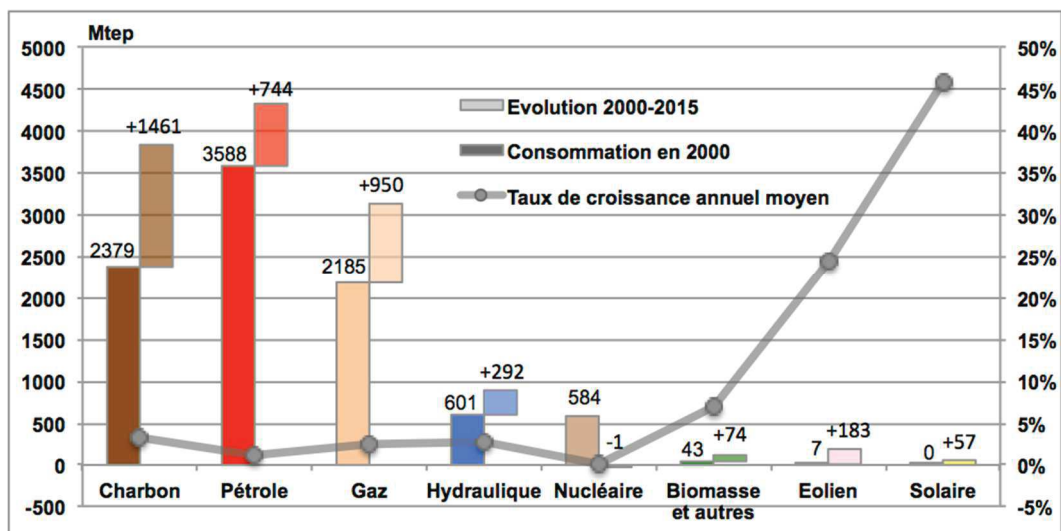


Figure I-13 : Consommation mondiale d'énergie primaire par source en 2000, solde entre 2000 et 2015, et taux moyen de croissance annuelle par source entre 2000 et 2015 (selon les conventions utilisées par BP)

Concernant spécifiquement la production d'électricité, depuis les années 2010, l'émergence des technologies vertueuses est réelle. Les taux de croissance de ces alternatives renouvelables sont également très élevés. Pourtant, la production totale ne permet pas encore de se substituer aux systèmes de production classiques. Dans ce secteur, entre 2010 et 2014, c'est la production électrique des EnR qui a augmenté 1,1 fois plus vite que celle d'origine fossile. L'énergie d'origine nucléaire présente une régression.

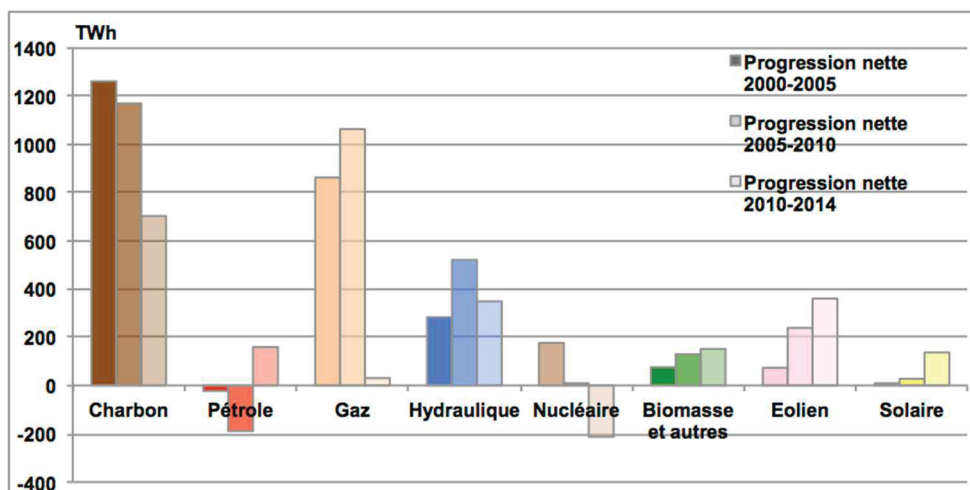


Figure I-14 : Evolution de la production mondiale d'électricité par source et par tranche de cinq ans sur la période 2000-2014 (source : AIE)²²

La dernière série graphique permet de mettre en évidence la propension des EnR à se développer.

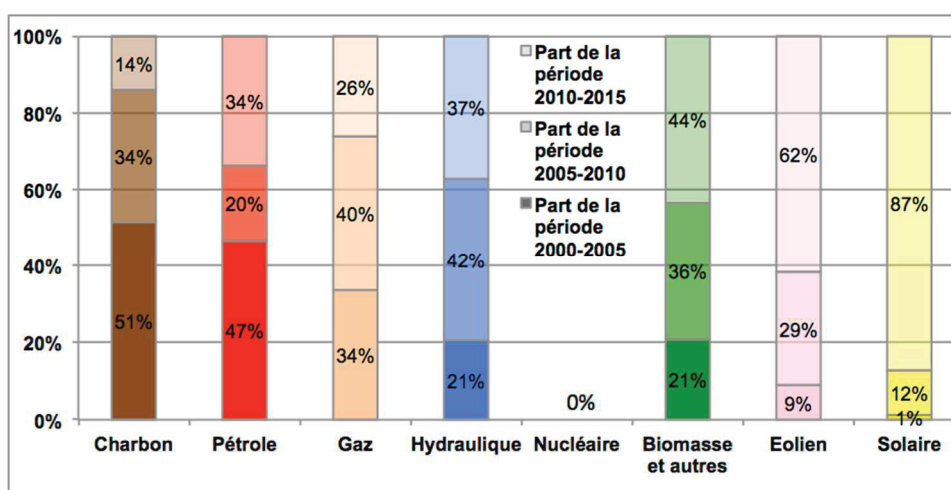


Figure I-15 : Répartition en pourcentage, par tranche de 5 ans, de l'évolution de la consommation mondiale d'énergie primaire par source entre 2000 et 2015 (selon les conventions utilisées par BP)

En France, le rapport *Chiffres clés des énergies renouvelables* du Commissariat général au développement durable (mai 2018)²³ met en évidence une tendance de développement assez similaire aux données mondiales. Néanmoins, la part des EnR n'atteint pas l'objectif fixé pour

²² Données agrégées par la Banque mondiale, sur la base de données de l'Agence internationale de l'énergie (base de données databank.worldbank.org/data/home.aspx).

²³http://www.statistiques.developpement-durable.gouv.fr/fileadmin/documents/Produits_editoriaux/Publications/Datalab/2018/datalab-35-cc-des-energies-renouvelables-edition-2018-mai2018-c.pdf

2018 (16 % = -2 % par rapport au seuil fixé). Cet état de fait rend perplexé sur la capacité à atteindre l'objectif de 23 % d'EnR dans la production totale d'énergie d'ici à 2020.

En conclusion, le caractère fini des ressources fossiles et leurs impacts sociétaux non négligeables, combinés à une prise de conscience en pleine croissance de ces aspects, conduit nécessairement à une logique de transition énergétique : une transition vers une nouvelle source ou plus probablement vers un mix qui se voudra être la réponse aux problématiques que posent nos sources actuelles d'énergie. Afin de dessiner les contours de cette source alternative d'énergie, cinq critères sont proposés par NANSEN, que nous récapitulons sous forme d'illustration.

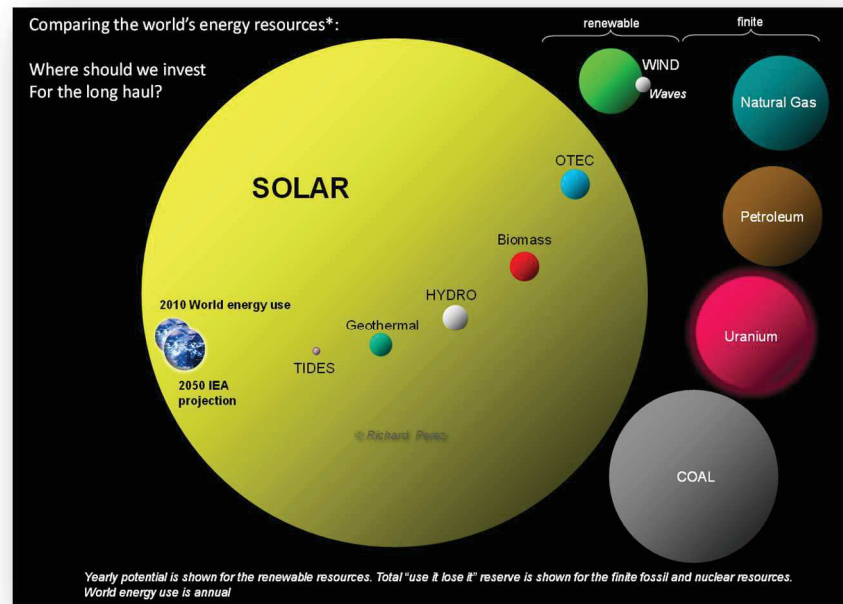


Figure I-16 : Illustration énergie de demain selon NANSEN (établie par les auteurs)

Parmi toutes les sources d'énergie électrique, le solaire est en mesure de répondre pleinement à tous ces critères. Le niveau d'engagement sur cette technologie pourrait

conforter l'idée d'une nouvelle période, d'une quatrième ère : celle du solaire (NANSEN, 2009).

Figure I-17 : Comparaison des ressources énergétiques et des besoins énergétiques mondiaux (source : R. PEREZ)²⁴



Néanmoins, certains facteurs rédhibitoires ou simplement limitatifs expliquent aussi la difficulté des EnR à renverser complètement l'équilibre des forces qui les opposent aux énergies fossiles et nucléaire. Ces limites constituent les obstacles à dépasser.

3. Les limites des énergies renouvelables (EnR)

D'ici à la fin du siècle, certains scénarios estiment que le monde aura besoin de quadrupler sa production actuelle d'énergie. Sur cette base, si les émissions de CO₂ restent constantes, alors en 2100, 90 % de l'énergie devra être issue de sources renouvelables ou nucléaire. Dans cette hypothèse et en l'état actuel des connaissances, il semble improbable que les nouvelles technologies de production d'énergie puissent subvenir aux besoins en énergie finale dans les prochaines décennies²⁵.

Les énergies renouvelables se heurtent à un nombre significatif de limites de production, ce qui ne permet pas de répondre aux besoins et oblige aujourd'hui à considérer la nécessité d'un mix qui allierait donc les EnR à un complément plus conventionnel et maîtrisé. Souvent,

²⁴ <http://asrc.albany.edu/people/faculty/perez/>

²⁵ Mankins, J. (2011). *Space Solar Power: The first international assessment of space solar power: Opportunities, issues and potential pathways forward*. International Academy of Astronautics, p. vii.

dans le cas d'apport complémentaire, sont référencés comme prédominants le gaz naturel et l'énergie issue du nucléaire, voire encore le pétrole (CHARLEZ, 2017, p. 55).

Le recensement des limites des sources d'énergie durable propose un panorama assez diversifié, à importance variable selon le type de technologie (illustration ci-dessous).

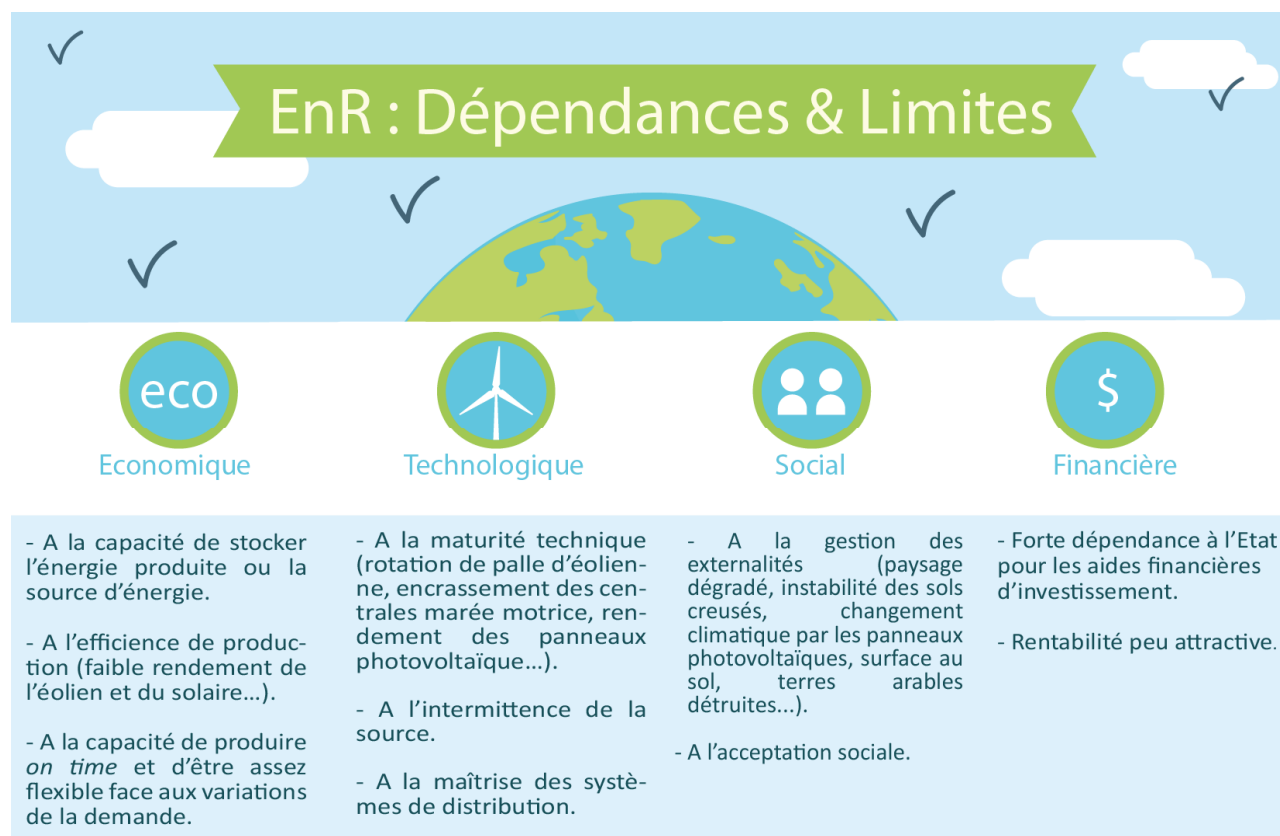


Figure I-18 : EnR : Dépendances et limites (établie par les auteurs)

Demain, il sera donc nécessaire de produire de l'électricité dont les effets ne mettront pas en danger les valeurs du développement durable : « vivable, viable et équitable ». Cependant pour être développé, l'écosystème économique doit aussi permettre une création de valeur à celui qui s'y engage. Ainsi la question financière est incontournable. Compte tenu de son importance, nous avons choisi de traiter l'approche financière de l'énergie électrique dans un chapitre dédié.

C. L'APPROCHE FINANCIERE DE L'ENERGIE ELECTRIQUE

Notre objectif est ici de détailler la méthode permettant d'aboutir à un prix pour une source d'énergie électrique. Nous prendrons soin de considérer l'ensemble de son cycle de vie. Il s'agira aussi d'introduire toutes les notions économiques et techniques clés, utilisées pour y parvenir.

1. Le principe de fabrication de l'électricité

A partir des éléments énoncés au chapitre « Définition du concept d'énergie », nous pouvons en déduire que produire de l'électricité et la rendre disponible à ses usagers impliquent au minimum les différents éléments suivants :

- ⇒ Une source d'énergie primaire (soleil, vent, pétrole, charbon, gaz, uranium...).
- ⇒ Un dispositif ou un ensemble de dispositifs qui permettent de transformer cette source d'énergie primaire en énergie secondaire électrique. On parlera donc dans le langage courant de « centrale électrique ».
- ⇒ Toute transformation impliquant des sous-produits : des déchets pour lesquels il faut des dispositifs de traitement ; également de la chaleur perdue, ce qui implique la notion de rendement énergétique.
- ⇒ Enfin, il faut aussi trouver le moyen d'évacuer cette électricité produite vers les consommateurs. Il s'agit de l'infrastructure « réseau électrique ». Cette évacuation est rendue nécessaire, car l'électricité est un mouvement d'électron. Un mouvement ne se stocke pas.



Figure I-19 : De l'énergie primaire au réseau électrique (établie par les auteurs)

C'est à partir de ce processus que nous allons élaborer notre réflexion concernant le coût de l'énergie électrique.

2. Le coût de l'énergie primaire

L'énergie primaire, comme nous l'avons expliqué précédemment, est naturelle : elle est disponible sur la terre ou à proximité, il ne faut pas la générer, elle n'a donc pas de coût à proprement parler. Néanmoins, ce qui va lui conférer une valeur, et nous permettre de lui affecter un coût, ce sont les différentes opérations qui permettent son exploitation dans la centrale électrique.

- ⇒ Premièrement, il faut extraire cette énergie primaire de l'endroit où elle se trouve. Cette extraction est une action humaine que l'on peut chiffrer. On pourra ainsi déjà faire des distinctions entre les sources primaires. Certaines sont complexes à extraire, car il faudra creuser à des profondeurs importantes ou encore avoir recours à des processus physico-chimiques élaborés ; on pensera aux méthodes récentes d'extraction de pétrole ou de gaz (gaz de schiste). D'autres seront beaucoup plus aisées à récupérer : les mines peu profondes ou à ciel ouvert comme pour certaines mines de charbon ou les anciens puits de pétrole du Moyen-Orient. Enfin, certaines sources ne nécessitent aucune intervention, car elles sont directement disponibles comme le vent ou le soleil.
- ⇒ Deuxièmement, il faut transformer cette énergie primaire. Différentes étapes de transformation sont nécessaires pour rendre l'énergie utilisable par la centrale. Les procédés comme la purification ou le raffinage vont avoir une incidence notable sur le coût. C'est le cas pour le pétrole qui est raffiné en fioul lourd, du gaz, de l'uranium...
- ⇒ Troisièmement, il faut imaginer que la source d'énergie n'est pas forcément à proximité de la centrale électrique : les coûts d'acheminement sont à prendre en compte.
- ⇒ Enfin, il faut y adjoindre les droits d'accès à la source, qui sont à verser au propriétaire de cette source s'il existe, comme c'est le cas pour les mines d'énergies fossiles. Le vent ou le soleil en revanche n'appartiennent à personne et sont exempts de droits. Economiquement, ce sont des biens purs, alors que l'électricité (son résultat) est régulièrement citée comme relevant de la tragédie des biens communs.

A partir de ces éléments, nous sommes déjà en mesure d'attribuer un coût en €/kWh brut (hors externalités) pour une énergie primaire. Nous pouvons en déduire que les énergies fossiles ont des coûts extrêmement variables du fait de leur nature et de leur origine géographique. *A contrario*, les énergies renouvelables n'ont généralement pas de coût

préalable à leur exploitation étant donné leur nature et la possibilité d'installer les centrales électriques à l'endroit où elles se trouvent, ce qui semble les avantager à première vue. Afin d'être précis, il reste à définir et à appliquer le rendement énergétique pour obtenir le coût d'électricité obtenu à partir de cette énergie primaire. C'est-à-dire multiplier par le ratio :
 Énergie générée/Énergie primaire

$$\begin{aligned} \text{COUT D'ÉLECTRICITÉ OBTENUE} &= \text{COUT D'ÉNERGIE PRIMAIRE} \times \text{RENDEMENT} \\ &= \text{COUT D'ÉNERGIE PRIMAIRE} \times \left(\frac{\text{ÉNERGIE GÉNÉRÉE}}{\text{ÉNERGIE PRIMAIRE}} \right) \end{aligned}$$

Ce ratio va varier suivant les technologies utilisées. En général, il évolue entre 30 et 45 % pour des systèmes se fondant sur la génération de vapeur qui fera tourner un alternateur comme c'est le cas pour toutes les énergies fossiles et le nucléaire.

Encore une fois, pour une énergie primaire à coût nul, ce rendement n'aura aucune influence sur le coût final de l'énergie qui restera à zéro. Il influencera cependant le coût de l'installation en le faisant diminuer si le rendement augmente à coût de mise en œuvre sensiblement équivalent.

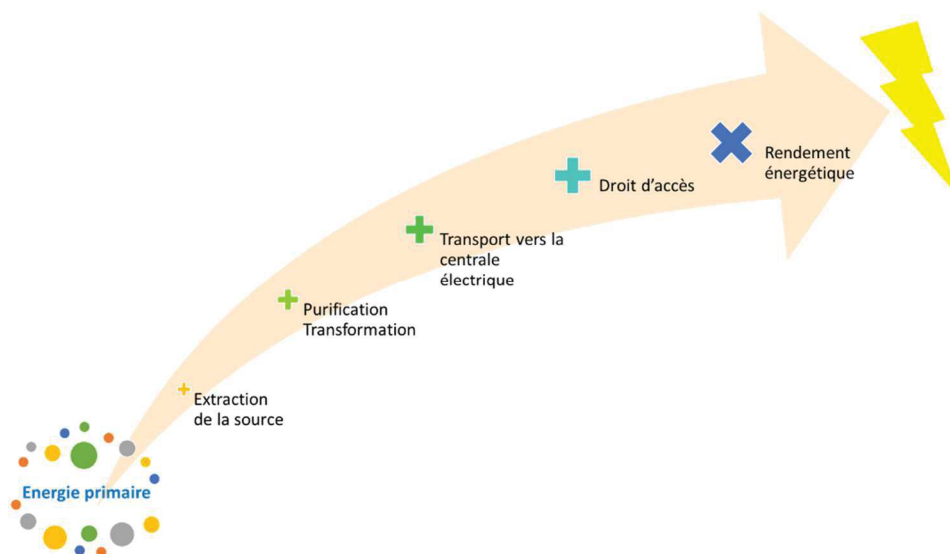


Figure I-20 : Calcul coût de l'énergie, de l'énergie primaire au réseau électrique (établi par les auteurs)

3. Le coût de l'investissement

Construire une centrale électrique représente un investissement colossal qui peut varier de quelques millions d'euros à plusieurs milliards d'euros. L'usage veut que pour une centrale, on utilise la notion de « €/kW installé » comme base de réflexion. Il s'agit donc de chiffrer le

coût d'une centrale par rapport à sa puissance installée, ce qui permet déjà un premier comparatif des technologies pour un investisseur. Pour rappel, passer de la puissance à l'énergie consiste simplement à multiplier la puissance par le temps d'utilisation (ceci consiste à intégrer la puissance pour passer à l'énergie).

$$\text{ENERGIE (kWh)} = \text{PUISSANCE (kW)} \times \text{TEMPS (h)}$$

Cependant, une centrale électrique ne fonctionne pas en permanence : des phases de maintenance peuvent être nécessaires ; la puissance peut être ajustée pour adapter la production à la demande ; la centrale peut être en incapacité de produire en raison de la disponibilité de la source d'énergie.

La notion qui intervient cette fois-ci est le facteur de charge, c'est le ratio entre le temps d'utilisation effectif et le temps disponible. La puissance effective sera donc obtenue en divisant la puissance théorique par ce facteur. Ceci va nous autoriser un regard encore différent sur les investissements : les énergies renouvelables sont pénalisées par leur nature intermittente.

Type de centrale	Hydraulique (lac)	Hydraulique (fil de l'eau)	Charbon	Gaz	Nucléaire	Eolien terrestre	Eolien en mer	Photovoltaïque
Coût (€/kW installé)	3 500	3 500	1 500	800	4 000	1 000	4 000	2 000
Facteur de charge (%)	40	80	80	50	80	20	40	15
Coût (€/kW effectif)	8 500	4 200	1 700	1 600	5 000	5 000	10 000	13 000

Figure I-21 : Coût de production (kWh) par rapport à au coût d'investissement initial (source : J.M. JANCOVICI²⁶)

En outre, ce qui nous intéresse, c'est de calculer un coût ramené à l'énergie produite sur toute la vie de l'installation. En effet, c'est elle qui sera facturée aux clients et qui permettra de payer l'investissement.

²⁶ <https://jancovici.com/transition-energetique/electricite/quel-est-le-vrai-cout-de-lelectricite/>

On procède donc comme suit :

- ⇒ Détermination du coût du kilowatt-heure effectif donné par le constructeur en tenant compte du facteur de charge (voir ci-dessus).
- ⇒ Puis on calcule l'énergie produite durant la vie de la centrale (ramené à une capacité de 1 kW) :

$$1 \text{ (kW)} \times 24 \text{ (H)} \times 365 \text{ (J)} \times \text{DUREE DE VIE (ANNEES)} \times \text{FACTEUR DE CHARGE (\%)}$$

En divisant ce coût par la quantité d'énergie produite, on obtient un coût en €/kWh. En multipliant ce coût par 1 000, on obtient des €/MWh.

Enfin, ce calcul mérite d'être complété par la notion d'actualisation. L'actualisation consiste à calculer la valeur d'un bien ou d'une somme d'argent au terme d'une durée. Il s'agit donc de tenir compte de l'inflation qui est dépendante des conditions économiques du moment. Cette notion est fréquemment utilisée pour estimer l'intérêt que présente un investissement important, et engageant sur le long terme, plutôt que de laisser fructifier cet argent sur un produit financier simple mais garanti. C'est donc avant tout un outil de prévision financière. Plus le taux est bas, moins il est avantageux pour un financier, et inversement.

Ce taux d'actualisation est dépendant :

- ⇒ du contexte économique, une croissance forte impliquera un taux d'actualisation élevé ;
- ⇒ de l'agent économique qui cherche à réaliser son investissement. Ainsi, un Etat pourra se permettre de travailler avec des taux de l'ordre de 0 à 5 % ; un industriel visera plutôt un taux entre 5 et 12 % ; une institution financière cherchera davantage un rendement supérieur à 15 %.

La formule ci-dessous va nous permettre de façon « normalisée » de calculer le coût actualisé de l'énergie. Il s'agit de faire la somme des coûts imputables à l'obtention de l'énergie électrique et d'en soustraire les subventions éventuelles, puis de diviser ce montant par la quantité totale d'énergie produite et réactualisée sur toute sa durée de vie. On obtient bien des « €/MWh ». En anglais, ce calcul s'appelle « *Levelized Cost of Energy* » (LCOE), et le taux d'actualisation s'appelle le « *discount rate* ».

$$LCOE_{residential} \approx \frac{PC - CBI - PVPBI + \sum_{n=1}^N \frac{LP_n}{(1+d)^n} - \sum_{n=1}^N \frac{INT_n}{(1+d)^n} * ETR + \sum_{n=1}^N \frac{OM_n}{(1+d)^n}}{\sum_{n=1}^N \frac{EO_n}{(1+d)^n}}$$

- where
- PC = Project cost
 - CBI = Cost based incentive
 - OM_n = Operations & maintenance (e.g. inverter replacement cost) in period n
 - EO_n = Energy output in period n
 - d = Discount rate
 - PVPBI = Present value of performance benefit incentive
 - LP_n = Loan payment in period n
 - INT_n = Interest payment in period n
 - ETR = Effective tax rate

Figure I-22 : Calcul du coût actualisé de l'énergie (source : J.M. JANCOVICI)

Plus nous aurons de précisions sur les différents éléments, plus le coût sera juste et comparable d'une source d'énergie à l'autre. Les coûts les plus significatifs sont les coûts du projet, les charges salariales, les charges liées aux opérations et à la maintenance.

Nous comprenons encore une fois que la comparaison du coût des différentes énergies est plus complexe qu'il n'y paraît puisque le taux d'actualisation n'est pas forcément identique pour chaque énergie.

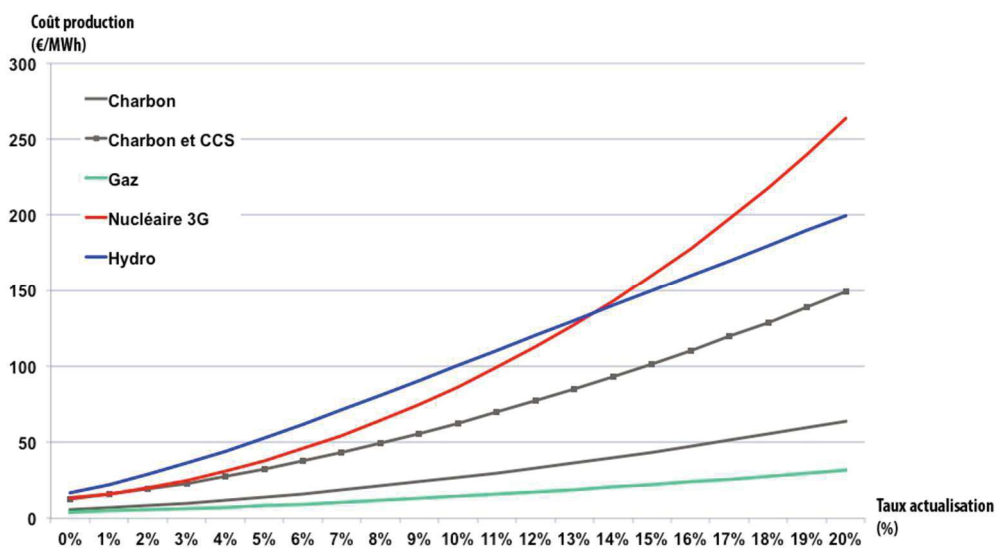


Figure I-23 : Coût de production & actualisation (source : J.M. JANCOVICI)

4. La prise en compte des déchets et des externalités

Comme nous l'avons déjà mentionné, toute transformation d'énergie va impliquer des pertes et rejets qu'il faut gérer. Les plus courants sont :

- Emissions de gaz polluants (CO₂, NO_x...)
- Emissions de particules fines
- Emissions de chaleur
- Déchets radioactifs
- Autres déchets à retraiter
- Accidents/incidents (pollution, décès)
- Maladies chroniques...

Si les conséquences de cette production ne sont pas prises en charge directement par le producteur, on parlera d'externalités négatives. Ce sera à la collectivité d'en supporter le coût et les inconvénients. Si elles sont connues et prises en charge par le producteur, on en trouvera une trace dans le coût de fabrication ou dans les charges de maintenance ou opérationnelles.

Une des externalités les plus connues, le CO₂ émis, fait l'objet d'une taxation. La prise en compte ou non de cette taxation va favoriser les énergies nucléaires, éoliennes et solaires par rapport à celles issues des sources fossiles.

L'Etat peut vouloir favoriser des sources d'énergie par rapport à d'autres afin de limiter les impacts sur l'environnement. Ces mesures ne sont pas directement reportées sur le consommateur final, mais c'est le distributeur qui est contraint à acheter cette énergie à des coûts réglementés. Ces coûts seront alors mécaniquement reportés par les distributeurs sur les autres sources d'énergie fournies, ce qui aura une répercussion sur les tarifs.

5. Le transport de l'énergie vers les consommateurs

Le coût transport de l'énergie pour la France est de l'ordre de 40 €/MWh. Il est identique où que l'on se trouve sur le territoire. C'est un tarif réglementé par les pouvoirs publics appelé « tarif d'utilisation des réseaux publics d'électricité » (TURPE).

Le réseau se décompose en deux entités : le réseau de transport (RTE) de 90 000 volts à 400 000 volts et le réseau de distribution (ENEDIS, ex-ERDF) de 20 000 volts à 220 volts.

Pour mémoire, le transport est lui aussi source de pertes par effet joule : 2 % sur le réseau de transport et 5 % sur le réseau de distribution (lié aux transformateurs).

6. Totalisation et comparaisons entre énergies

Afin de connaître le coût complet de l'énergie électrique, il convient de totaliser toutes les composantes énumérées précédemment. Des hypothèses différentes pourront donc mener à des classements différents des coûts d'énergie, en fonction des sources.

Citer un tarif électrique dans le but de comparer plusieurs énergies entre elles doit donc nécessairement être accompagné des conditions de calcul, sous peine de prendre de mauvaises orientations stratégiques.

Coûts complets de production en France pour la production d'électricité renouvelable

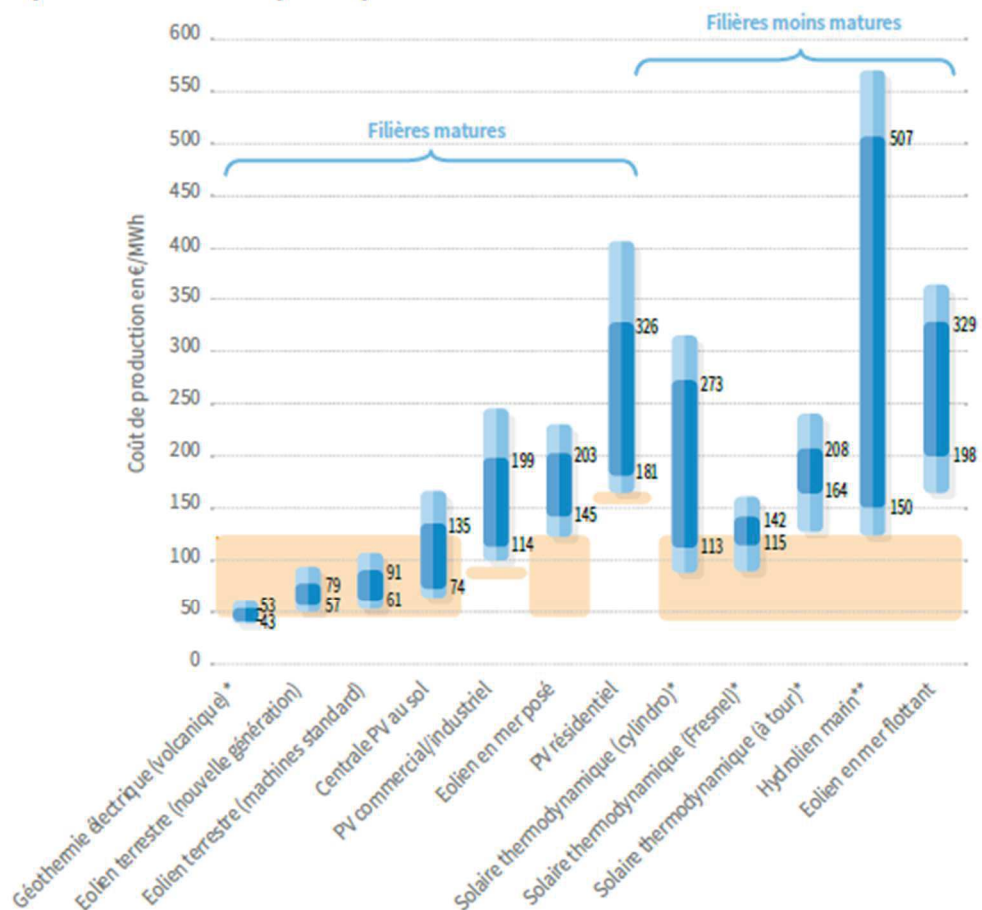


Figure I-24 : Coûts complets (estimation) comparés (source : ADEME, 2016)

Nous avons compris à travers le cheminement de nos recherches sur l'énergie qu'elle pouvait se présenter sous de multiples sources, ainsi qu'être générée par différents moyens de production, sans oublier la difficulté majeure qui consiste en son stockage. De plus, les impacts des diverses énergies sont plus ou moins prononcés sur l'écosystème terrestre et sur l'épuisement des ressources.

Il semble alors pertinent d'essayer de classer les sources d'énergie électrique entre elles suivant des critères objectifs. Nous ne tiendrons compte que des sources permettant de fournir une puissance nominale supérieure ou égale au mégawatt (MW). Il s'agira donc de pouvoir positionner ces diverses technologies entre elles.

Nous proposerons donc une grille de lecture et d'analyse permettant de comparer les sources de production susceptibles de répondre aux enjeux du développement durable.

D. COMPARATIF DES RESSOURCES ENERGETIQUES ELECTRIQUES

1. Les techniques de production d'électricité comparées

Il s'agit de déterminer quels sont les moyens de production d'électricité, déjà en service ou à venir, qui sont susceptibles de répondre à une demande mondiale croissante. Les techniques de production que nous avons souhaité retenir sont présentées dans le figuré ci-dessous.

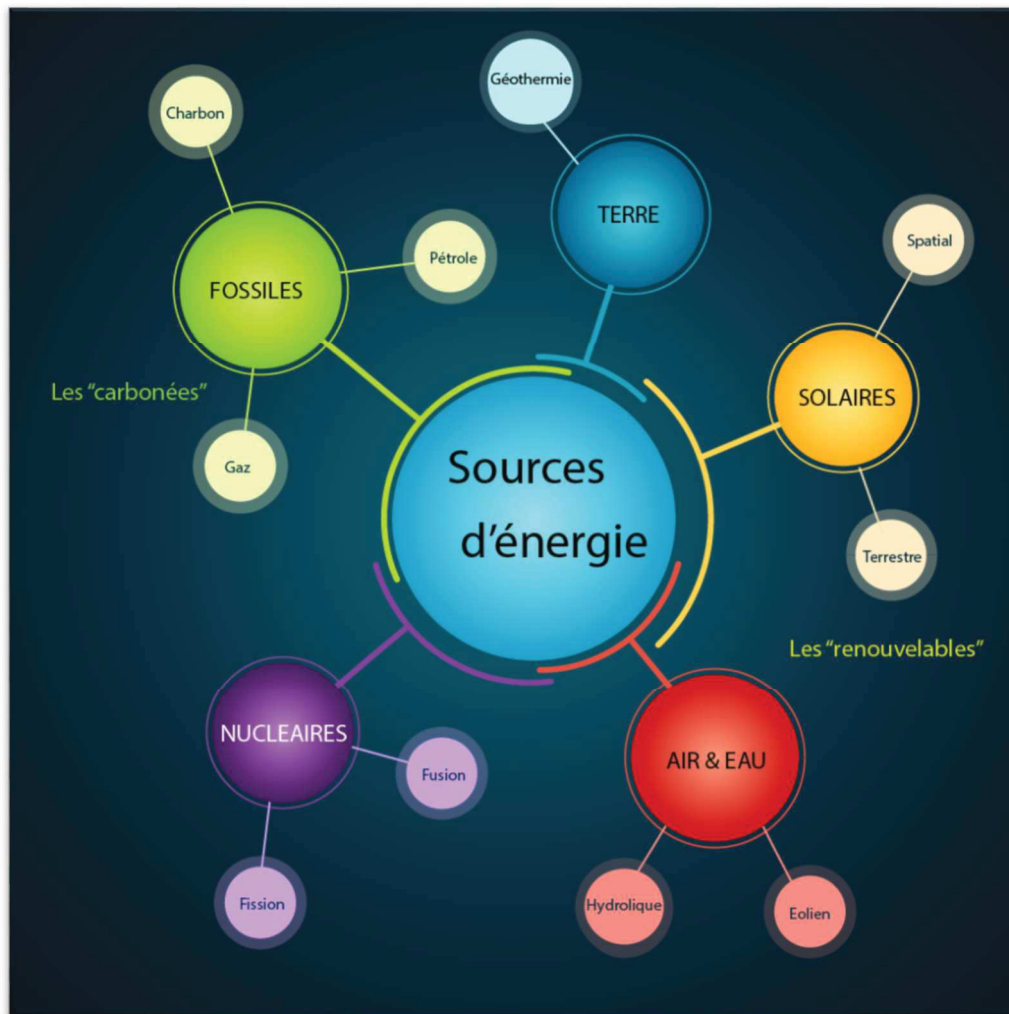


Figure I-25 : Les sources d'énergie - diagramme de synthèse (établi par les auteurs)

2. Une approche par facteurs clés de succès

L'identification des facteurs clés de succès doit donc nous permettre de déterminer ce qui est primordial pour les acteurs présents sur le marché d'une énergie donnée. On pense évidemment aux producteurs, aux consommateurs, mais aussi de façon plus générale à tout ce qui sera impacté directement ou indirectement par la production et la consommation de

cette énergie. On tiendra compte des notions d'externalités. C'est ainsi que trois grands filtres d'observation, dont les subdivisions serviront plus loin de critères discriminatoires, ont été identifiés. Il s'agit de filtres établis aux niveaux sociétal, économique et technique.

⇒ **Le choix des coefficients et leur justification**

En premier lieu, il faut expliquer que la répartition des coefficients s'est faite selon la sensibilité de notre groupe à l'égard des sujets.

Ainsi, les coefficients liés à la responsabilité sociétale des organisations (RSO) auront été valorisés ; les facteurs économiques et techniques auront la même importance relative, et leur somme sera équivalente à la part sociétale : soit une répartition 50/25/25.

A l'intérieur de ces trois filtres, les notions de santé et d'impact sur l'environnement seront davantage pondérées. De même, la notion de disponibilité sera également mise en avant. Enfin, l'accessibilité aura elle aussi été privilégiée.

Ces coefficients sont le reflet de notre compréhension des thématiques étudiées, en particulier celle de la transition énergétique.

Sociétal	Economique	Technique
<ul style="list-style-type: none"> • Objectif de l'approche sociétale : Estimer l'impact global réel d'une production électrique donnée. • Enjeux & justifications : Comprendre quels sont les impacts sur les êtres humains et sur l'environnement (externalités). Les considérations écologiques telles que le réchauffement climatique, l'épuisement des ressources, la confiscation de terres arables ou encore la santé sont devenues des thématiques de premier rang. La notion d'externalité est de plus en plus largement partagée. • Moyens : Sous-critères évalués par les sources documentaires, interviews d'élus et enquêtes. 	<ul style="list-style-type: none"> • Objectif de l'approche économique : Mesurer le niveau de rentabilité d'une production d'électricité. • Enjeux & justification : Le développement d'une production passe par des critères économiques favorables, donc la comparaison des éléments économiques semble cohérente. • Moyens : Sous-critères définis et évalués par les sources documentaires spécialisées. Apport du chapitre I.C. L'approche financière de l'énergie électrique. 	<ul style="list-style-type: none"> • Objectifs de l'approche technique : Evaluer la maturité d'une technologie par rapport à une autre. • Enjeux & justifications : Certaines technologies sont à des stades d'avancement différents. Hétérogènes, leurs composantes évoluent à des rythmes différents. Nous souhaitons évaluer leur capacité à répondre dans des délais raisonnables aux futurs besoins énergétiques. • Moyens : Sous-critères définis et évalués par les sources documentaires spécialisées et interviews de spécialistes.

Figure I-26 : Les facteurs clés de succès (document établi par les auteurs)

3. Les critères de comparaison

a. Les critères sociaux et leur justification (coefficient total 20)

⇒ **Degré de risque sanitaire (coefficient 6)**

Afin de répondre à ce critère, nous nous sommes inspirés du rapport de la Société française d'énergie²⁷. L'échelle de classement utilisée est la suivante :

Degré de risque sanitaire		
1	2	3
Niveau de décès directs prouvés et probables importants	Risque notable de décès avérés	Décès directs peu probables ou faibles

⇒ **Durée de vie d'une unité de production (coefficient 1)**

L'objectif est de déterminer si une unité de production d'électricité s'inscrit dans une démarche de conception durable en limitant l'obsolescence et le renouvellement.

Durée de vie d'une unité de production				
0 à 5 ans	5 à 10 ans	10 à 20 ans	20 à 30 ans	30 ans et +
1	2	3	4	5

⇒ **Impact environnemental du démantèlement d'une unité de production (coefficient 5)**

Il s'agit de prendre en compte la fin de vie d'une unité de production d'énergie et d'estimer son impact sur notre environnement.

Impact environnemental du démantèlement d'une unité de production		
Difficilement recyclable	Partiellement recyclable	Recyclable ou sans impact lors du démantèlement
1	2	3

⇒ **Émission de CO₂ par kWh produit (coefficient 6)**

Émission de CO ₂ par kWh produit				
>500 g/kWh	100 à 500 g/kWh	50 à 100 g/kWh	20 à 50 g/kWh	<20g/kWh
1	2	3	4	5

²⁷ C. Acket, M. Yvon, 2013. *Bilan Santé et Source d'énergie*. Société française d'énergie nucléaire GR21.

⇒ **Rendement au m² (coefficient 2)**

Il s'agit donc ici de construire un ratio kWh/m² afin d'établir un classement de la technologie la plus efficiente à la moins efficiente.

Rendement au m ²		
< 1 MW/km ²	Entre 1 et 10 MW/km ²	>10 MW/km ²
1	2	3

b. Les critères économiques et leur justification (coefficient total 10)

⇒ **Réserves estimées des ressources (coefficient 3)**

Il s'agit de classer les ressources en fonction de leurs quantités disponibles.

Réserves estimées des ressources				
Ressource finie faible	Ressource finie plus importante	Renouvelable insuffisant	Renouvelable suffisant	Renouvelable et excédentaire
1	2	3	4	5

Excédentaire : > par rapport aux besoins mondiaux (cf. figure I-17 PEREZ)

Suffisant : +/- égal aux besoins mondiaux

Insuffisant : < aux besoins mondiaux

⇒ **Coût de production du MWh (coefficient 2)**

La répartition choisie pour les coûts de production est une répartition propre à notre estimation, mais basée sur des fourchettes communément admises.

Coût de production du MWh			
>100 €/MWh	70 à 100 €/MWh	50 à 70 €/MWh	< ou = 50 €/MWh
1	2	3	4

Remarque : coût estimatif hors transport.

⇒ **Taux de retour énergétique (coefficient 2)**

Le taux de retour énergétique se calcule de la manière suivante :

ENERGIE UTILISABLE/ENERGIE DEPENSEE

Il permet de mettre en évidence l'efficacité d'une production d'énergie.

Taux de retour énergétique		
inférieur à 5	entre 5 et 20	élevé = supérieur à 20
1	2	3

⇒ **Facteur de charge (coefficient 3)**

Ce critère permet de discriminer plus finement les sources d'énergies intermittentes par rapport aux sources continues.

Facteur de charge			
0 à 20 %	20 à 50 %	50 à 90 %	>90%
1	2	3	4

c. Le critère technique et sa justification (coefficient 10)

⇒ **Le niveau « Technology Readiness Level » (coefficient 3)**

Le niveau de TRL²⁸ que l'on traduira par « niveau de maturité technologique » est défini selon la norme ISO 16290:2013. La technologie mature correspond au TRL le plus élevé. L'échelle des TRL peut être utile dans de nombreux domaines incluant, mais sans s'y limiter, les exemples suivants :

- ⇒ pour le contrôle en amont des développements technologiques génériques ou spécifiques de la technologie au service d'une mission future donnée ou d'une famille de missions futures ;
- ⇒ pour faire un état de la maturité technique d'un projet, en tant que contribution au processus décisionnel d'exécution du projet ;
- ⇒ dans certains cas, pour suivre la progression d'une technologie tout au long de son développement.

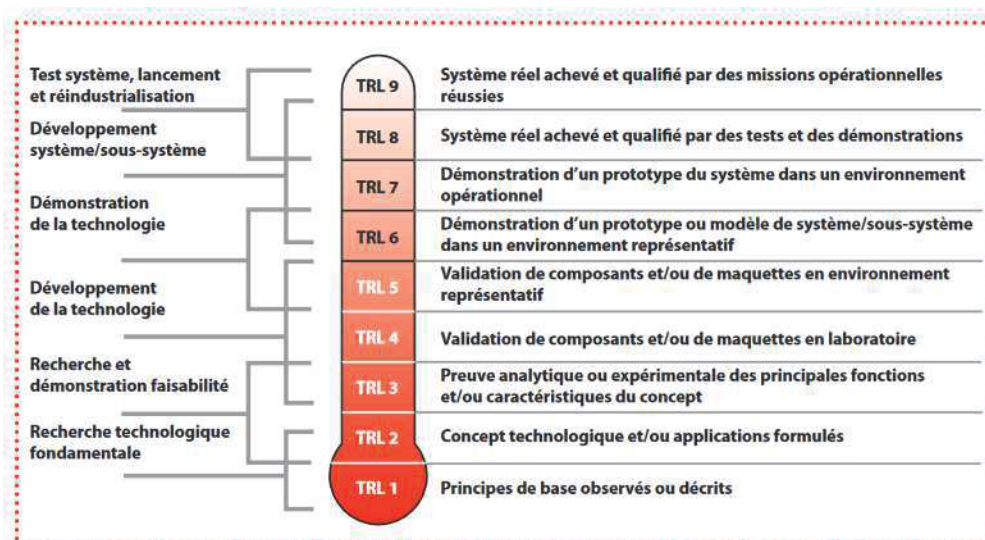


Figure I-27 : Echelle TRL (source : www.entreprise.gouv.fr)

²⁸ www.entreprises.gouv.fr/files/files/directions_services/politique-et-enjeux/innovation/tc2015/technologies-cles-2015-annexes.pdf

Sur la base de cette définition, l'échelle TRL peut donc jouer la carte de la transversalité et s'appliquer à tout type de projet ou technologie. Ainsi, l'utilisation de cette échelle nous permettra d'estimer le degré d'avancement de certaines technologies en cours de développement et du chemin restant à parcourir avant leur potentielle mise en œuvre.

Le niveau « Technology Readiness Level » (TRL)		
de 1 à 3	de 4 à 6	de 7 à 9
1	2	3

⇒ **Placement sur le modèle STBS (coefficient 3)**

Il s'agit ici de déterminer le niveau de maturité d'une technologie dans son cycle de développement et dont le modèle a été établi par le groupe mémoire dans le chapitre II. Il est le prolongement du modèle d'Edison. Par choix nous l'aurons nommé STBS.

Placement sur le modèle STBS		
Début	R&D avancée	En exploitation
1	2	3

⇒ **Accessibilité de la ressource (coefficient 4)**

Le but est ici de valoriser/discriminer les sources d'énergie selon leur facilité d'exploitation.

Accessibilité de la ressource				
Difficilement accessible	Peu accessible	Moyennement accessible	Facilement accessible	Très facilement accessible
1	2	3	4	5

4. Tableau de scoring

Critères		TECHNOLOGIES EVALUEES									
		Coef.	Solaire Terrestre	Nucléaire Fission Fusion		Air et eau Eolien Hydroélectrique		Fossiles Pétrole Charbon Gaz naturel			Terre Géothermie
SOCIAL	Degré de risque sanitaire	6	3	1	2	3	1	1	1	2	3
	Durée de vie d'une unité de production	1	4	5	5	3	5	5	5	4	5
	Impact environnemental du démantèlement d'une unité de production	5	3	1	2	3	3	2	2	2	3
	Emission de CO ₂ / kWh	6	4	5	5	5	5	1	1	2	4
	Rendement au m ²	2	1	3	3	2	1	3	3	3	3
ECONOMIQUE	Réserves estimées des ressources	3	5	2	1	4	3	1	2	1	3
	Coût de production du MWh	2	2	4	1	3	3	2	2	2	4
	Taux de retour énergétique	2	2	3	1	2	2	2	3	1	2
	Facteur de charge	3	1	3	3	2	2	3	3	3	3
TECHNIQUE	TRL	3	3	3	2	3	3	3	3	3	3
	Niveau de placement sur le modèle STBS	3	3	3	2	3	3	3	3	3	2
	Accessibilité de la ressource	4	5	4	2	5	5	4	5	5	1
Score total pondéré			127	115	99	136	121	87	96	100	117

Energie	Note
Eolien	136
Solaire Terrestre	127
Hydroélectrique	121
Géothermie	117
Nucléaire fission	115
Gaz naturel	100
Nucléaire fusion	99
Charbon	96
Pétrole	87

Le tableau de comparaison met en évidence la prépondérance des technologies utilisatrices d'énergie renouvelable face aux ressources fossiles, principalement. La ressource solaire apparaît comme une des deux évidences. Deux contraintes importantes, l'intermittence et le rendement au m², pourraient être surpassées par une technologie spécifique hors sol et soumis au rayonnement permanent du soleil : **le solaire spatial**.

II. HYPOTHESE : LE SOLAIRE SPATIAL, UN CONCEPT DEVENU TANGIBLE

A. LA TECHNOLOGIE SOLAIRE SPATIALE : PRESENTATION ET ANALYSE

1. Introduction

Nous avons vu dans la partie intitulée « Les limites des énergies renouvelables » qu'à l'horizon 2050, il sera nécessaire de quadrupler la production d'énergie et que celle-ci devra être issue à hauteur de 90 % de sources renouvelables. Compte tenu du fait que ces dernières ne sont pas présentes en quantité suffisante pour répondre à cette demande croissante²⁹, il est alors impératif d'envisager des solutions pouvant étoffer le mix énergétique actuel. Ces nouvelles orientations technologiques devront être en mesure de faire face aux défis environnementaux. De plus, compte tenu des échéances, ces solutions devront aussi être exploitables à moyen terme tout en restant raisonnablement accessibles du point de vue économique, ce qui représente un véritable défi.

En termes de ressource renouvelable, le soleil présente un potentiel incomparable. Les seuls rayons qui parviennent à la surface de la Terre suffiraient à fournir 10 000 fois la demande globale en énergie. Par conséquent, n'en capter que 0,01 % suffirait à répondre annuellement à cette même demande³⁰. Le potentiel que représente cette manne quasi inépuisable d'énergie nous a conduits à nous intéresser aux technologies liées à son exploitation.

Peu médiatisée jusqu'alors, la technologie *Space Based Solar Power* (SBSP), ou solaire spatial, est l'une d'entre elles. Étudié de façon intermittente au gré des chocs énergétiques apparus au cours des soixante dernières années, ce concept mérite selon nous d'être passé au crible afin de vérifier sa capacité à répondre aux enjeux sociétaux et économiques contemporains.

C'est pourquoi, dans cette seconde partie, notre travail s'attachera à déterminer les avantages et la valeur ajoutée de cette technologie. Nous insisterons aussi sur les freins qui devront être levés et les limites qui devront être repoussées afin de permettre à l'économie du solaire spatial d'émerger et de s'intégrer dans le mix énergétique.

²⁹ Mankins, J. (2011). *Space Solar Power: The first international assessment of space solar power: Opportunities, issues and potential pathways forward*. International Academy of Astronautics, p. vii.

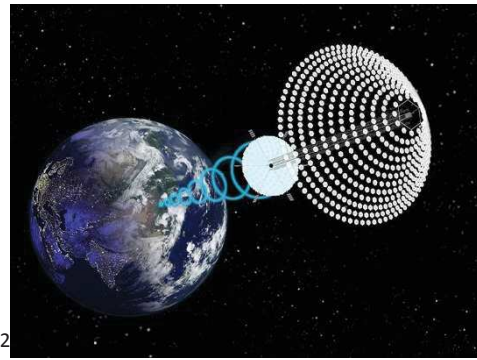
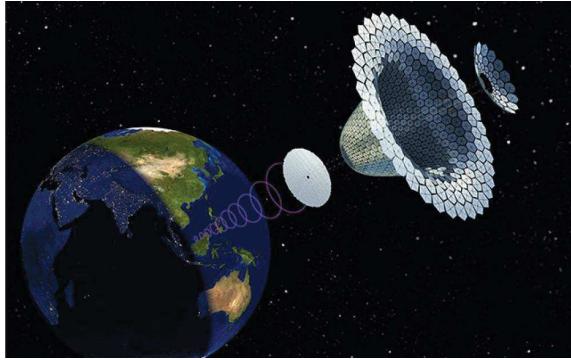
³⁰ https://www.actu-environnement.com/ae/dossiers/solaire/soleil_solaire.php4

2. Définition et genèse du concept

Dès 1925, Constantin Tsiolkovski, scientifique russe considéré comme étant le père de l'astronautique moderne, avait déjà émis l'idée d'utiliser le rayonnement solaire comme source d'énergie. Puis, en 1960, le Dr Freeman Dyson, astrophysicien américain, proposa un concept dérivé communément appelé « la sphère de Dyson ». Cette sphère est un ensemble d'éléments photorécepteurs placés autour du Soleil afin d'en maximiser la collecte d'énergie. La thèse de la sphère de Dyson a permis de donner lieu à certains travaux de digression sur la consommation énergétique mondiale. Mais c'est en 1968 que le Dr Peter Glaser, scientifique et ingénieur tchéco-américain, proposa pour la première fois, et ceci de façon très concrète, l'idée d'exploiter l'énergie solaire depuis l'espace. Son concept repose sur un constat très simple : les panneaux solaires dans l'espace ne subissent aucune contrainte liée aux aléas climatiques (par exemple, des nuages qui occultent les rayons) et à la dispersion des rayons lumineux dans l'atmosphère. De plus, si ces panneaux solaires sont placés en orbite géostationnaire (36 000 km d'altitude) et sous un certain angle, l'alternance jour/nuit peut être supprimée dans sa quasi-intégralité ; seuls les deux équinoxes annuels auraient un effet partiellement occultant.

La proposition du Dr Glaser est complétée par une idée tout aussi innovante : la transmission d'énergie à distance (WPT pour *Wireless Power Transmission*). Deux techniques sont alors envisageables : par rayon laser et par micro-ondes. Etant donné qu'une transmission micro-ondes à 2,45 GHz ne présente *a priori* aucun danger pour toute entité biologique et que, contrairement au rayon laser, elle ne subit aucune perte d'énergie lors de la traversée d'une couche nuageuse, c'est la technique par micro-ondes qui sera retenue.

L'approche globale du concept se résume alors par l'assemblage d'une centrale solaire orbitale (ou SPS pour *Space Power Satellite*) composée d'une multitude de panneaux solaires collectant l'énergie produite par le Soleil. Un élément technique intermédiaire convertirait ensuite cette énergie photovoltaïque en faisceau micro-onde transmis vers la Terre via un émetteur prévu à cet effet. Le faisceau, une fois arrivé à destination, serait capté par une antenne redresseuse, dite *rectenna* (contraction de l'anglais « *rectifying antenna* »), qui le convertirait en électricité pouvant être directement distribuée sur le réseau électrique terrestre déjà existant. Les vues ci-dessous montrent deux exemples d'architecture possibles pour une centrale de ce type :



La proposition du Dr Glaser suscita immédiatement l'intérêt de grandes puissances économiques qui y voyaient déjà la perspective d'une indépendance énergétique totale. Pionnier en matière de recherche spatiale, les États-Unis furent les premiers investisseurs en recherche et développement dans ce domaine d'activité stratégique. Dans les décennies qui suivirent, différentes études poussées sur le sujet ont été menées. En 2016, Yang et *al.* résument les différents concepts proposés comme suit³³ :

	Reference model	Sun tower	Solar Disc	ISC	Sun Sail	Tethered-SSPS	Alpha
Year	1979	1995	1997	1998	1999	2001	2012
Organization	NASA /DOE	NASA	NASA	NASA	ESA	METI/USEF	Artemis
Orbit	GEO	LEO	GEO	GEO	GEO	GEO	GEO
Power (GW)	5	0,1-0,4	1-10	1,2	0,275	0,75	2
Frequency (Mhz)	2,45	5,8	5,8	2,45	2,45	5,8	2,45
Mass (MT)	30 000-50 000	2 000-7 000	80 000-70 000	35 000	3 750	3 800	25 260
Focus	Non	Point	Non	Point	Non	Non	Distributed
Modulatrity	Monolithic	Modular	Monolithic	Modular	Modular	Modular	Modular

Figure II-1 : Tableau comparatif des différents SPS (adapté par les auteurs)

³¹<http://www.leparisien.fr/magazine/grand-angle/futur-centrales-solaires-sur-orbite-24-06-2013-2924769.php>

³²<https://www.smithsonianmag.com/innovation/whats-next-solar-energy-how-about-space-180961008/>

³³https://www.researchgate.net/publication/286148246_SSPS-OMEGA_A_new_concentrator_system_for_SSPS

3. Résurgence du concept

Depuis près de soixante ans, les recherches portant sur le concept de centrale solaire spatiale ont connu de nombreuses évolutions, principalement dues à des considérations liées aux budgets, à la faisabilité technique et aux enjeux géopolitiques. Chaque étude sur le sujet aura permis de se rapprocher de plus en plus de la mise en œuvre d'un tel projet. L'étude de l'IAA en 2011 aura été la plus enthousiaste et la plus porteuse d'espoir en la matière, car elle aura permis de lever de nombreux freins, notamment techniques. Depuis, certaines sociétés, dont l'objectif affiché est bien de transformer le concept en réalité, ont vu le jour, comme Solaren, SpaceEnergy Group ou encore PowerSat Corporation³⁴. Parallèlement, des agences gouvernementales, la JAXA au Japon ou la CNSA en Chine, se sont emparées du sujet. La CNSA est à ce jour l'agence la plus avancée avec son projet SPS-Omega³⁵.

La dernière étude, datée de décembre 2017 et produite par Artemis Innovation aux Etats-Unis, propose un coût de production à 0,05 \$/kWh (0,0435 €/kWh)³⁶ pour une centrale solaire orbitale dont le lancement de ses éléments constitutifs en orbite basse était ramené à 1 600 \$/kg (1392 €/kg), mais cela sans tenir compte du transfert en orbite géostationnaire. Aujourd'hui SpaceX permettrait de placer des charges utiles en orbite géostationnaire pour 3 300 \$/kg (2871 €/kg). Ce qui laisse envisager un coût de production à 0,08 \$/kWh (0,0696 €/kWh), tel que décrit dans le graphique ci-dessus³⁷ :

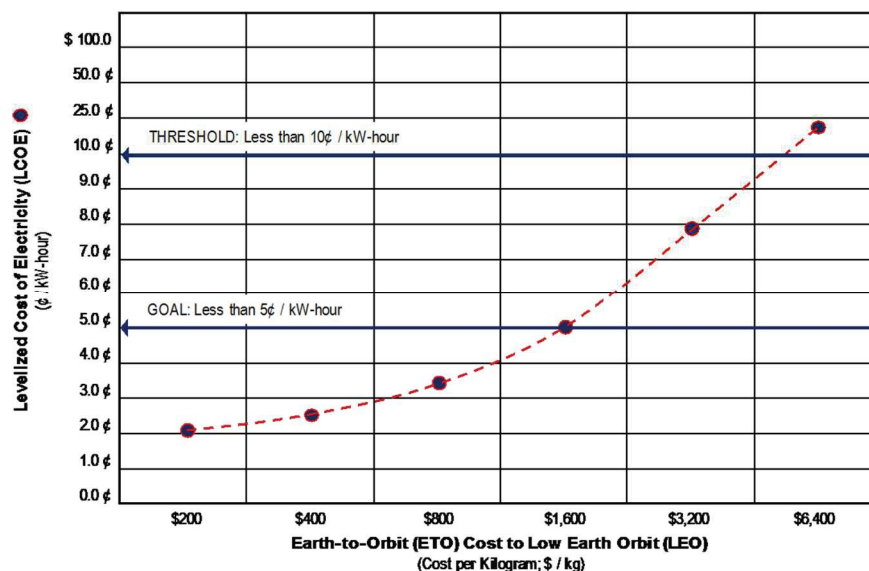


Figure II-2 : Coût de production en fonction du coût de lancement (source : J. Mankins)

³⁴Mankins, J. (2014). The case for Space Solar Power. Virginia Edition Publishing, p. 75.

³⁵Mankins, J. (2017). New developments in Space Solar Power. NSS Space Settlement Journal, p. 16.

³⁶Taux de conversion appliqué pour toutes les données exprimées en dollars : 1 \$ = 0,87 €.

³⁷Mankins, J. (2017). New developments in Space Solar Power. NSS Space Settlement Journal, p. 29.

Cette même étude intègre dans le calcul de ce coût de production les phases de recherche et développement, de lancement d'un satellite test, de mise en service d'une centrale à échelle réduite, mais aussi de la première véritable centrale. Le coût total de l'investissement s'élève alors à 11,3 milliards de dollars (soit 9,831 milliards €) pour une production de 2,1 GW. A titre de comparaison, le coût du barrage des Trois Gorges en Chine s'élève à 40 milliards de dollars (34,8 €) pour une production de 10 GW³⁸.

A noter que l'European Space Agency (ESA) envisage la construction de centrales solaires spatiales destinées à approvisionner en énergie de futures missions lunaires et martiennes³⁹. L'agence spatiale européenne considère ce concept dérivé comme une étape intermédiaire qui lui permettra d'évaluer le potentiel de cette technologie⁴⁰.

4. Freins et limites

Motivées par les différentes crises énergétiques qui ont émaillé l'histoire, toutes ces études ont inlassablement conduit aux mêmes conclusions, et ce, même si de nombreux progrès techniques sont apparus depuis 1968. Le développement de l'énergie solaire requiert :

- ⇒ de lourds besoins de financement ;
- ⇒ une coopération internationale ;
- ⇒ un abaissement des coûts de lancement des fusées.

Ainsi, toutes ces études convergent sur le fait que sans abaissement drastique des coûts de lancement⁴¹, aucune rentabilité ne sera accessible. En effet, les calculs les plus précis ont permis de déterminer qu'à 1 650 dollars (1436 €) par kilogramme lancé, une telle opération deviendrait rentable si l'on parvenait à ramener le coût de production du kilowatt-heure à 5 cents américains, soit 43,5 euros du MWh. Or, même si les progrès en la matière ont été fulgurants depuis les années 1960, le prix du kilogramme lancé avoisine encore plusieurs dizaines de milliers d'euros pour une orbite géostationnaire (GEO pour *Geostationary Earth Orbit*).

³⁸Mankins, J. (2017). *New developments in Space Solar Power*. NSS Space Settlement Journal, p. 13.

³⁹ ESA work on Solar Power from Space : concluded and ongoing activities, Advanced Concepts Team –ESA, January 2008, p. 4.

⁴⁰ Interview Rohan Ramasamy 10/09/2019 par Skype.

⁴¹ ESA work on Solar Power from Space : concluded and ongoing activities, Advanced Concepts Team –ESA, January 2008, p. 3.

Cependant, ces dix dernières années, la société SpaceX a définitivement bouleversé le marché de l'aérospatial. Grâce à son lanceur réutilisable Falcon 9 et à son lanceur à charges lourdes Falcon heavy, les prix d'accès au marché spatial ont été très fortement revus à la baisse. Par son positionnement *low cost*, SpaceX propose des prix de lancement aux alentours de 5 000 \$/kg (4350 €/kg) en orbite basse (LEO pour *Low Earth Orbit*). En l'espace de sept ans, cette société est devenue le leader de son marché.⁴²

Outre les freins financiers, l'aspect sanitaire a pu et peut encore inquiéter les décideurs et l'opinion. En effet, l'utilisation d'une transmission d'énergie par faisceau micro-onde est souvent associée à l'idée de danger pour toute entité biologique se trouvant à proximité. Toutefois, la présentation faite le 21 mars 2003 au groupe parlementaire « énergies » au Palais du Luxembourg à Paris vient en contradiction. Ainsi, le faisceau micro-onde dans le cadre d'une centrale solaire spatiale ne présente *a priori* aucun danger pour la santé. Il est trop large, sa concentration est par conséquent trop faible pour présenter un quelconque danger. Ainsi, au centre du faisceau, la puissance serait cent fois inférieure à celle au cœur d'un four micro-ondes et elle est sous le seuil de sécurité, fixé à 1 mW/cm², sur ses abords⁴³. De plus, selon cette même présentation, le faisceau micro-onde ne serait pas non plus générateur d'interférences avec les télécommunications.

5. Approche financière

L'objectif de ce paragraphe est d'arriver à estimer le coût du SBSP en nous fondant sur les éléments scientifiques que nous avons pu trouver dans nos lectures. Dans un souci pédagogique, nous proposons de reprendre la méthodologie énoncée au chapitre I, partie C : « L'approche financière de l'énergie électrique ».

Cela revient à effectuer la somme des quatre composantes suivantes :

⁴²https://www.lemonde.fr/les-decodeurs/article/2018/02/07/comment-spacex-s-est-fait-une-place-dans-l-aerospacial_5253404_4355770.html

⁴³<https://www.science-sainte-rose.net/livres/Centrales%20Solaires%20Spatiales%20-%20La%20presentation%20au%20Senat.pdf> p.33 à 36.

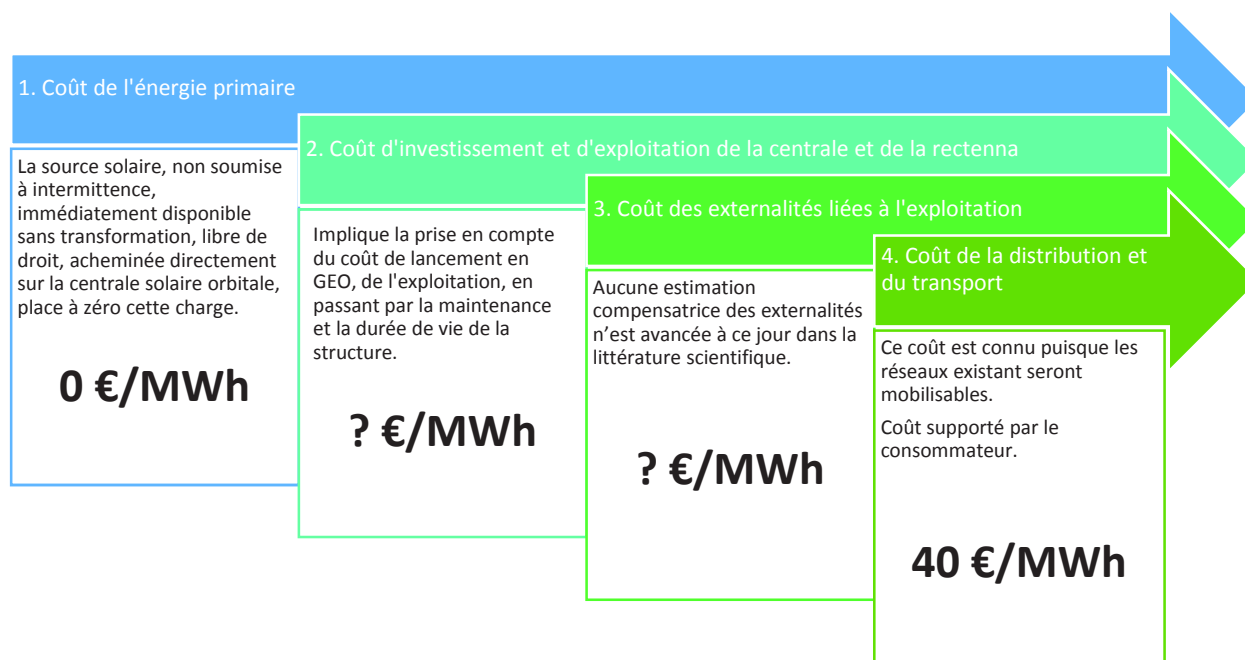


Figure II-3 : Approche du coût complet du solaire spatial (établie par les auteurs)

A la lecture de l'illustration ci-dessus, la part de l'investissement et de l'exploitation de la centrale reste une inconnue majeure dans la structure du coût global.

Plusieurs paramètres sont à considérer pour tenter de chiffrer cette composante :

- Le coût de l'antenne redresseuse (ou *rectenna*). Régulièrement omis dans les rapports scientifiques, ce coût représenterait pourtant 200 millions de dollars par kilomètre² (174 millions d'euros par km²) selon le Pr David R. CRISWELL (projet *Lunar Power System*⁴⁴)
- Le coût de lancement. Celui-ci a fait l'objet de nombreux calculs différents. Pour l'heure, la société privée SPACEX est la plus dynamique en la matière et permet d'envisager une fourchette large allant de 5 000 \$/kg à 11 250 \$/kg (soit entre 4 350 et 9 788 €/kg)^{45 46}. La charge (en tonne) à prendre en compte est variable et dépend également de l'orbite recherchée.

⁴⁴ Criswell, D. R., & Waldron, R. D. (1990, August). Lunar system to supply solar electric power to Earth. In *Proceedings of the 25th Intersociety Energy Conversion Engineering Conference* p. 4

⁴⁵ <https://www.aerospatium.info/vrais-chiffres-de-la-competitivite-ariane-6/>

⁴⁶ https://www.lemonde.fr/les-decodeurs/article/2018/02/07/comment-spacex-s-est-fait-une-place-dans-l-aerospatial_5253404_4355770.html

- Compte tenu de l'ampleur du projet, des taux d'actualisation, respectivement de 0 %, 2 % et 5 %, seront à prendre en considération.
- Les charges d'exploitation, importantes pour tout projet, sont dans notre cas particulièrement floues. De ce fait, elles constituent une difficulté majeure dans la l'estimation du coût.

Les tentatives d'estimation des coûts relatifs au SBSP sont nombreuses. Cependant, pour donner suite à nos investigations, nous sommes arrivés aux constats suivants :

- La complexité d'obtenir une approche synthétique complète recouvrant une projection financière systémique, donc allant de l'investissement initial à l'exploitation.
- Une forte diversité des estimations des coûts allant parfois jusqu'à des divergences majeures.
- Le manque d'information quant aux externalités liées d'une part, à la production d'une centrale solaire orbitale et d'autre part, à son lancement (pollution des lanceurs).

Ces faits rendent difficile la présentation d'une proposition économiquement crédible. Compte tenu de l'importance de la dimension économique pour le développement d'un projet, nous tâcherons de réunir des données permettant l'élaboration d'un tableau de synthèse de la structure de coût de la SBSP. Ces résultats et leurs limites seront présentés en troisième partie de mémoire.

6. Approche macroéconomique, le modèle PESTEL

Dans ce paragraphe, nous proposons une vision synthétique de la technologie présentée. Nous avons choisi de recourir à un outil faisant référence dans le domaine de la stratégie. Selon nous, le modèle d'analyse PESTEL permet de repérer les facteurs d'influence, positifs et négatifs, de l'environnement macroéconomique sur la technologie.

Les éléments de littérature spécialisée référencés dans la bibliographie ont permis cette approche.

	INFLUENCES POSITIVES	INFLUENCES NEGATIVES
POLITIQUE	<ul style="list-style-type: none"> - Réduction du nombre de conflits liés aux ressources naturelles. - Baisse de la dépendance énergétique pour le ou les pays exploitant l'énergie solaire/pays producteurs de gaz et pétrole. - Sécurité de l'installation en orbite face aux risques terroristes. 	<ul style="list-style-type: none"> - Compte tenu du coût, alliance entre pays nécessaire. - Nécessité d'une volonté politique pour sa mise en œuvre. - Déploiement de la technologie à des fins militaires. - Protectionnisme technologique. - Guerre liée aux enjeux énergétiques. - Manque de réglementation, origine de différends entre pays. - Cible potentielle sur les installations terrestres (antenne redresseuse). - Pénalisation des Etats ne pouvant acquérir la technologie.
ECONOMIQUE	<ul style="list-style-type: none"> - Création d'un nouveau domaine d'activité stratégique. - Demande et consommation énergétique en forte hausse. - Production continue (24 h/24, 365 j/an). - Pas de coût des intrants lors de l'exploitation. - Utilisation du réseau de distribution existant. - Stabilité du coût en tous lieux. - Production d'énergie faiblement impactée par les crises économiques. - Production non soumise aux aléas climatiques. - Innovation : mise sur le marché de nouvelles technologies/création d'entreprises spécialisées à forte plus-value. - Création de fortes richesses (PIB/PNB) sans risques/coûts sociaux associés aux énergies traditionnelles. - Raréfaction du pétrole et hausse de son prix : augmentation de l'attrait pour la technologie SBSP. 	<ul style="list-style-type: none"> - Coût de développement très élevé. - Forte dépendance aux coûts de lancement pour mise en orbite. - Forte exposition aux risques financiers pour les investisseurs. - Spéculation boursière sur les entreprises et projets. - Concentration des richesses. - Course à fiscalité attractive afin d'attirer les entreprises.

SOCIOLOGIQUE	<ul style="list-style-type: none"> - Sécurité : En exploitation et lors de catastrophes, absence de risque technologique pour les riverains des installations (ex : contamination radioactive, chimique, etc.). - Possibilité d'alimenter une zone non reliée à un réseau principal. Attractivité des zones rurales. - Gain de qualité environnementale. - Création de nombreux emplois à forte valeur ajoutée. 	<ul style="list-style-type: none"> - Médiatisation et acceptation de la nouvelle technologie à réaliser. - Risque de hausse du rejet de la technique lors de l'avancement des projets. - Main-d'œuvre qualifiée présente que dans les pays disposant de la technologie. - Emigration de main-d'œuvre spécialisée vers les pays développés - Emigration par nécessité environnementale (manque de ressources énergétiques). - Renforcement de la fracture sociale pour les sociétés ne pouvant profiter de la technologie.
TECHNOLOGIQUE	<ul style="list-style-type: none"> - Possibilité de déplacer ou de multiplier les localisations de l'antenne réceptrice. - Collaboration à l'échelle internationale - R&D : investissements importants, création de main-d'œuvre spécialisée, création du savoir et bonds technologiques. - Cercle vertueux technologique : influence positive d'autres technologies (robotique, électronique, production d'énergie) et catalyseur pour d'autres projets spatiaux (exploration, exploitation minière, etc.). 	<ul style="list-style-type: none"> - Validation de la technologie : nécessite des phases test avant lancement de la première centrale (transfert d'énergie longue distance, satellite test, centrale échelle réduite, etc.). - Risques d'endommagement par micrométéorites et déchets spatiaux. - Concentration/monopolisation du savoir à au sein des pays précurseurs. - Guerre technologique entre Etats. - Risque de cyberattaques.
ECOLOGIQUE	<ul style="list-style-type: none"> - Technologie sans intrants terrestres, préservation des ressources naturelles de la Terre (hydrocarbures, minerais, eau). - Pas d'émission de GES et de polluants en phase d'exploitation. - Absence de risque nucléaire. - Pas de déchets à enfuir. - Pas de réchauffement des eaux naturelles (rivières, lacs, océans) pour refroidissement. - Impact minime sur le réchauffement climatique. - Technologie non impactée par les risques naturels (séisme, tsunami, inondation, etc.). 	<ul style="list-style-type: none"> - Impact de l'exposition continue aux radiations par micro-ondes à maîtriser. - Impact local (réchauffement) du fait de la conversion d'énergie (ex : antenne redresseuse). - Impact environnemental lors de la construction, de la mise en orbite, et stratégie à adopter pour le démantèlement. - Augmentation de la consommation totale d'énergie. - Augmentation des déchets spatiaux. - Pollution visuelle pour astronomie.

LEGAL	<ul style="list-style-type: none"> - Occupation de l'espace libre de droits (l'espace n'appartient à aucun Etat)/l'espace appartient à tous). - Définition de normes de sécurité, législation sur la santé. - Respect de la norme <i>International Telecommunication Union</i> (ITU). Gestion des radiofréquences/directives internationales sur la gestion des déchets spatiaux⁴⁷ (2009). 	<ul style="list-style-type: none"> - Nécessité de modifier le droit international (ex : <i>Outer Space Treaty</i>, 1967) pour encadrer la technologie, accords internationaux. - Risque de monopole. - Pas de contrainte légale pour l'instant. - Besoin d'accords internationaux pour définir le cadre légal. - Abus technologique des pays négligeant les règlements internationaux. - Volonté de pays d'accaparer le « proche espace » pour contrôler l'accessibilité de la ressource. - Paiement de royalties pour utilisation des technologies brevetées par les entreprises ou Etats.
--------------	--	--

Figure II-4 : Tableau PESTEL (établi par les auteurs)

⁴⁷ <https://debris-spatiaux.cnes.fr/fr/node/139>

B. LE CONSTAT : UNE TECHNOLOGIE A DYNAMISER

L'énergie solaire spatiale semble présenter un nombre intéressant de facteurs contributifs à la réalisation d'une politique de développement durable. *A priori*, elle propose des garanties techniques intrinsèques (AKRICH, 1988) suffisantes comparées aux autres solutions. Elle mériterait donc d'être appréhendée pour compléter le probable mix énergétique de demain.

Pourtant le travail de recherche qui a été mené a mis en évidence :

- ⇒ la difficulté d'accéder à de la littérature vulgarisée ;
- ⇒ un manque de clarté quant aux estimations financières et économiques ;
- ⇒ la rareté des interlocuteurs capables d'aborder la question même si ces derniers évoluent dans le milieu de l'énergie ou du développement durable ;
- ⇒ la méconnaissance de notre entourage et l'absence de référencement dans la récente enquête de terrain menée par le CNDP.

Par conséquent, il paraît nécessaire de questionner les modalités de développement d'un produit spécifique : l'énergie solaire spatiale.

Le principe serait d'effectuer une comparaison des développements de la famille « ressources d'énergie ». Parallèlement, il convient de vérifier nos questionnements. L'enjeu de la recherche expérimentale de terrain est de :

- ⇒ modéliser les phases majeures du processus de développement d'une technologie, de la recherche expérimentale à la mise sur le marché ;
- ⇒ repérer l'écosystème des acteurs clés intervenant dans le processus ;
- ⇒ cibler les leviers essentiels permettant d'envisager la réussite du projet.

Ainsi, il semble réaliste de pouvoir proposer une lecture simple et pragmatique de l'évolution de la technologie solaire spatiale. Et avant tout, à travers une modélisation crédible et la vérification de la dynamique du processus, il est envisagé de situer l'état de développement de cette technologie.

C. LE SOLAIRE SPATIAL : MODELISATION DU PROCESSUS DE DEVELOPPEMENT

Force est de constater que de nombreuses inconnues entourent encore le degré de développement du SBSP. Néanmoins il entre dans la catégorie des technologies innovantes. C'est pourquoi il semble pertinent de le positionner dans un modèle permettant d'avoir une meilleure lecture de son état d'avancement.

1. Principe général choisi

Il s'agit dans cette partie de définir et de comprendre les étapes clés qui permettraient à une nouvelle source d'énergie d'aboutir à sa mise en œuvre concrète. Notre intérêt se portera donc sur le processus de l'innovation.

Pour SCHUMPETER, le caractère cyclique de l'économie trouve sa source dans l'innovation qui est le fruit exclusif de l'entrepreneur. Ce dernier porte à lui seul toute la tâche de l'innovation et de son adéquation avec le marché. Cette vision semble cependant fort réductrice pour pouvoir définir une innovation en termes d'énergie, et *a fortiori* d'énergie renouvelable qui bouleversera nécessairement les habitudes des consommateurs et impactera aussi l'ensemble des parties prenantes.

De ce fait, les mots clés en termes d'innovation sont : interactions, décloisonnement, circulation de l'information, concertations ou encore souplesse et adaptation (AKRICH, 1988). Il s'agit également de manier « l'art de l'intéressement »⁴⁸ tout en mettant en avant les qualités intrinsèques du produit. En effet, la maxime citée lors de l'Exposition universelle de Chicago en 1933 : « La science découvre, l'industrie applique, l'homme suit. » n'est pas systématiquement valable, car parfois l'homme ne suit pas. Cette dernière, très linéaire, ne tient pas compte de l'environnement socio-économique, puisque l'innovation va se répandre par contagion et uniquement par le mérite de ses propriétés.

Il est alors nécessaire de compléter ce processus par la notion d'intéressement, soit tenir compte de tout un ensemble d'acteurs. Le devenir d'une innovation va donc dépendre de la

⁴⁸ A quoi tient le succès de l'innovation AKRICHE 1988

participation plus ou moins active de tous les acteurs et prescripteurs qui sont décidés à la faire avancer.

L'exemple d'Edison, qui a voulu substituer l'électricité au gaz afin d'éclairer les Etats-Unis à la fin du XIX^e siècle, illustre bien notre propos :

	L'histoire d'EDISON...	Les grandes étapes
0	⇒ A l'origine : un projet clair, une volonté tenace, la certitude d'y arriver.	CONCEPTUALISATION
1	⇒ Un message martelé : le gaz est en fin de vie, l'électricité est l'avenir. Une méthode de communication permettant de tester l'opinion tout en la préparant au changement.	MARKETING
2	⇒ Des spécialistes de pointe associés permettant un pilotage optimal des questions techniques et stratégiques.	ORGANISATION TECHNIQUE ET HUMAINE
3	⇒ Des financiers et juristes associés permettant une levée de fonds.	ESTIMATION FINANCIERE
4	⇒ Une recherche centralisée en un lieu unique permettant la concentration des compétences et connaissances pour un meilleur partage.	CENTRALISATION & CONCENTRATION
5	⇒ Une communication régulière avec les journalistes (prescripteurs) tout au long du projet.	MEDIATISATION
6	⇒ Sollicitation régulière des politiques (prescripteurs) pour suivre l'état d'avancement de ses travaux.	INTERET POLITIQUE

Durant les deux dernières étapes (5 et 6), Edison a réussi à intéresser de plus en plus de personnes à son projet et a multiplié le nombre d’alliés pour aboutir à son objectif innovant. La dynamique engagée par ce précurseur a eu pour effet d’autres sollicitations en retour, décrivant ainsi les prémices de la communication virale.

La qualité de ce schéma et surtout de son résultat, nous incite à l’utiliser comme modèle.

Dans le cadre d’une technologie telle que le SBSP, l’impact économique comme la création ou la destruction d’emplois (7) ainsi que l’impact sociétal (8) devront la compléter.



Figure II-5 : Modèle d’Edison complété (établi par les auteurs)

2. Le SBSP rapporté au modèle d’Edison

a. Le concept

La littérature existante sur le sujet du SBSP depuis près d’un demi-siècle nous montre bien que de nombreux chercheurs se sont penchés sur la question. Il s’agit donc bien d’un concept d’actualité et qui a déjà bien mûri. Pourtant, jusqu’à aujourd’hui, les recherches ont conduit

seulement à des améliorations mineures de certains sous-ensembles techniques. L'enjeu de cette technologie est donc bien de migrer vers une phase opérationnelle.

b. Le marketing

Le mix marketing correspond au principe des 4 P, à savoir *Price, Place, Product, Promotion*. Les éléments *Product* et *Price* ont été étudiés dans le cadre de la recherche fondamentale, bien que le second souffre encore de certaines carences. Au même titre, l'élément *Place* a lui aussi été pensé au travers de nombreuses études, toutes statuant sur la nécessité d'une coopération internationale qui décidera de la meilleure allocation géographique terrestre de la *rectenna*. En revanche, il apparaît que la partie *Promotion* est à ce jour très peu exploitée et pourrait bien s'avérer être la pierre angulaire de la réussite de ce projet. En effet l'accès à des informations sur le SBSP hors contexte scientifique est extrêmement difficile. Ceci nous laisse à penser que ce concept est encore au stade de la recherche fondamentale.

c. L'organisation des ressources techniques, humaines et financières

Si le modèle d'Edison prévoit d'abord une exploitation des gisements de compétences (étape 2) et financiers (étape 3), le SBSP ne peut tenir la comparaison pour deux raisons : l'envergure du projet et le contexte socio-économique.

Il est indéniable que l'ampoule d'Edison fut une innovation majeure. D'ailleurs la concrétisation du SBSP, eu égard au résultat du PESTEL présenté précédemment, ne le serait pas moins. Toutefois, si l'électrification des Etats-Unis a pu être supportée par l'énergie et la volonté d'un seul homme, ce n'est pas le cas du SBSP du fait de son envergure encore supérieure. C'est à ce titre qu'une comparaison peut être faite avec le projet ITER, qui n'aura pu voir le jour que sur la base d'un socle international (*cf.* chapitre I.A.3.a : « L'enjeu lié à l'approche scientifique »).

Il convient aussi de replacer ces deux projets dans un contexte socio-économique qui leur est propre à chacun. Au XIX^e siècle, même si les stratégies d'alliances et d'acointances étaient des méthodes déjà bien établies, Edison a connu des oppositions lobbyistes moins développées que celle que nous connaissons de nos jours. Des cas d'entraves au SBSP ont pu

être identifiés ; le plus connu d'entre eux étant celui relaté par Ralph Nansen dans les années 1970 lorsqu'il fut en charge du projet de centrale solaire spatial pour le compte de Boeing⁴⁹. De plus, l'approche contemporaine impose de plus en plus largement l'idée qu'il faut tenir compte de l'impact sociétal d'un produit tout au long de son cycle de vie. Cette approche était bien moins considérée à l'époque d'Edison.

d. Une recherche centralisée

La délocalisation ou l'éclatement de la communauté de chercheurs, dès lors qu'elle ne permet pas de regrouper l'information en une source unique, constitue une difficulté dans la progression de l'invention. L'orientation préconisée par Edison est de centraliser toutes les parties opérationnelles, de la recherche à la conception, en structures autonomes, mais pas indépendantes. Aujourd'hui, l'ère du numérique permet vraisemblablement de partager rapidement et facilement de l'information fondamentale, ce qui permet de franchir les barrières géographiques en créant des pôles virtuels de compétences.

Le SBSP est aujourd'hui étudié de très près par de nombreuses organisations et agences nationales : METI, JAXA, USEF, ESA, NASA, DOE, CNSA, ISRO, ROSCOMOS⁵⁰. Mais ces centres de recherche sont isolés les uns des autres et ils n'existent que dans l'intérêt exclusif de l'Etat dont chacun dépend.

e. S'entourer des médias

Edison avait bien compris l'intérêt de la médiatisation dans le cadre de la réussite d'un projet. C'est une idée que l'on retrouve d'ailleurs dans l'approche des 4 P. Mais au-delà de cela, une veille médiatique, intégrant les nouveaux outils et plateformes de communication, est devenue nécessaire afin d'identifier les influences positives et négatives. En effet, bon nombre d'entreprises s'attachent aujourd'hui les services de *community manager* dont le rôle est d'assurer le suivi de l'opinion publique sur une marque ou un produit. Plus largement, leur rôle est de maximiser ou minimiser la portée des avis de toute nature.

⁴⁹ NANSEN, Ralph. *Energycrisis: Solution fromspace*. Apogee Books, 2009.

⁵⁰<https://www.americansecurityproject.org/climate-energy-and-security/energy/future-investment/space-based-solar-power/>

Le cas du SBSP ne pourra pas déroger à cette règle devenue une évidence. Cependant, les initiatives de relais d'informations hors du cadre journalistique restent encore très faibles et ne sont pas toujours maîtrisées. On trouve en effet de nombreux articles très flatteurs comme d'autres articles, plus rares, qui mettent en exergue des limites à cette technologie.

f. Savoir trouver les appuis politiques

Le secteur de l'énergie nécessite de forts appuis politiques pour réussir à se développer et s'imposer. En effet, la portée tant au niveau civil que militaire de l'énergie en fait un pôle de décision et d'orientation stratégique majeur pour un pays.

Si le SBSP est soutenu des entreprises privées comme Solaren et d'autres (cf. chapitre II. A.3.), il est bien plus largement soutenu aujourd'hui par des initiatives publiques (cf. chapitre II.C.2.d).

Une initiative politique allant dans le sens du SBSP aura été la présentation devant la commission « énergie » au palais du Luxembourg en 2003 (cf. chapitre II.A.4). Plus récemment, en 2016, une autre initiative est à citer : le concours *Diplomacy, Defense, Development* (D3) créé par l'US Agency for International Development (USAID). Ce concours avait pour but de sélectionner parmi plus de 500 idées innovantes un pour cent qui serait susceptible de faire progresser la diplomatie, la défense et le développement américains. Le SBSP proposé par la Naval Research Laboratory (NRL), fondée par T. EDISON en 1923, fut l'une des six idées retenues. Sur les sept prix décernés, le projet SBSP de la NRL en a récolté quatre dans les catégories de l'innovation, la présentation, la collaboration et le choix du public⁵¹.

g. Evaluation des impacts économiques

L'évaluation fine des impacts économiques sur l'ensemble des bénéficiaires favorise le soutien ou l'adhésion au projet. Dans le domaine énergétique, la question de l'estimation des externalités est essentielle.

En 2013, le guide méthodologique émis par le ministère de l'Ecologie, de l'Energie, du Développement durable et de l'Aménagement du territoire donne une idée très limpide de

⁵¹ <http://d3ssp.org/>

l'approche globale de l'anticipation des coûts d'un projet. Son but est de permettre d'intégrer la valeur environnementale au projet, et non plus de se limiter à l'unique dimension de « valeur du marché ». La méthode IESEG⁵² propose le traitement du projet au travers des composantes du développement durable et d'en lister, voire d'en chiffrer, ses probables coûts et externalités.

Cet outil permet de comprendre l'importance de l'estimation systémique des coûts, mais présente une limite : il n'intègre pas la dimension politique et stratégique conséquente à l'intégration d'une innovation par exemple. Il convient donc d'envisager la dynamique du marché (concurrence, lobby...) pour compléter l'approche financière pure.

Si le SBSP a fait l'objet de nombreuses études plus ou moins précises sur son impact économique, celle de l'IAA fait état de l'impact de cette nouvelle filière sur le marché de l'emploi. Ainsi, le SBSP serait créateur de 5 000 000 d'emplois directs sur les trente premières années d'exploitation⁵³.

h. Impacts sociétaux & acceptation sociale

L'acceptation sociale est une dimension incontournable du développement d'un projet, et encore plus aujourd'hui où ce produit englobe des enjeux d'habitudes de consommation, de confort de vie, d'environnement, d'égalité sociale ou de durabilité. La société civile est de plus en plus sensible aux choix et orientations en matière d'énergie, notamment aux engagements liés au développement durable.

Le changement de paradigme de cette société se fait sur le choix des technologies plus « vertes ». Celles-ci sont plébiscitées, relayées médiatiquement. Ces énergies renouvelables ont le vent en poupe, car elles semblent présenter des garanties face à la conscience écologique et sociale. Pour autant, ces technologies sont tributaires de la volonté politique et surtout de la prise de conscience collective (ZELEM, 2012).

La population, sensible aux éléments de communication, entend avoir son mot à dire face au système technocratique de gouvernance souvent complété d'une approche

⁵² Intégration libre des impacts économiques, sociaux et environnementaux globaux des projets (IESEG) - http://competitivite.gouv.fr/documents/commun/Financements/Appels_a_projet/developpement-durable.pdf

⁵³ Mankins, J. (2011). *Space Solar Power: The first international assessment of space solar power: Opportunities, issues and potential pathways forward*. International Academy of Astronautics, p. 90.

« technologique ». Désormais, les nombreux exemples d'opposition aux grands projets (de toutes natures) démontrent l'intérêt d'une méthode « sociologique ». Par conséquent, les éléments de littérature, les récits d'expériences et de recherches sur les questions de la prise en compte du facteur « externalités sociales » proposent⁵⁴ :

- de comprendre et d'intégrer les réalités sociales, environnementales et économiques propres au milieu et d'engager un dialogue le plus tôt possible avec tous les acteurs afin de les intégrer dans le processus ;
- de veiller au respect des différences d'intérêts et reconnaissance de la légitimité d'intervention des parties (le droit de s'opposer) ;
- de concevoir les relations basées sur la transparence et l'écoute ;
- de permettre le consentement libre et éclairé des communautés.

Nous allons analyser à travers un questionnaire la pertinence du modèle proposé. De plus, au moyen de différentes interviews scientifiques, politiques et académiques, nous justifierons le positionnement de la technologie du SBSP dans ce dernier. Un peu à la façon de T. EDISON, nous allons procéder à notre échelle à la promotion de cette technologie, puis nous en mesurerons son appréciation auprès des personnes sondées.

⁵⁴ Adapté de l'intervention de Philippe Bourke, directeur général du RNCREQ, à l'occasion de l'atelier « Études de cas sur l'acceptabilité sociale de projets — Quelles leçons peut-on en tirer », organisé par le CPEQ le 20 avril 2011 (source : www.cpeq.org).

III. VERIFICATION ET CONFRONTATION DE LA RECHERCHE TERRAIN

A. DES METHODES DE RECHERCHES DIVERSIFIEES

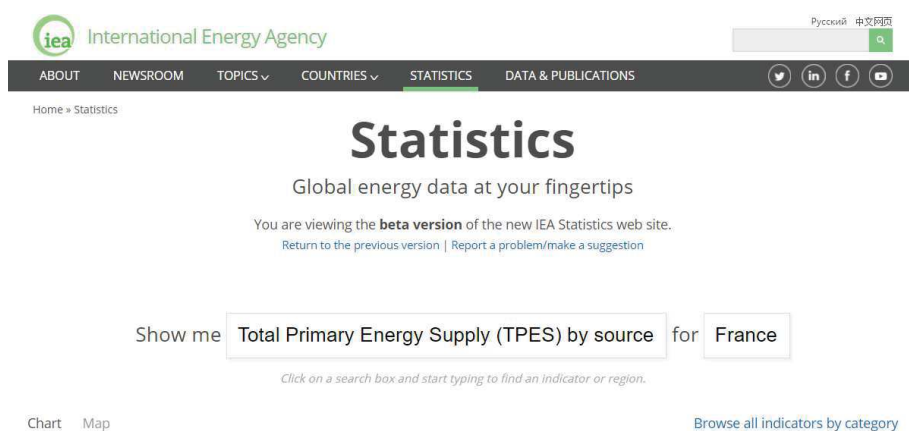
Afin de trouver des réponses aux diverses interrogations qui se sont posées lors de notre réflexion, nous avons choisi plusieurs méthodes d'enquête.

1. La recherche de données statistiques

Nos premières questions de terrain ont porté sur des chiffrages exacts et des données validées concernant l'énergie, c'est-à-dire les sources de production utilisées ou encore les quantités consommées à l'échelle planétaire ou nationale.

De plus, notre bibliographie, composée de sources hétérogènes et datant parfois un peu, ne nous a pas permis d'aboutir de façon fiable à ces données. C'est donc dans un but de cohérence et d'exactitude de nos données qu'il nous a fallu trouver des sources certifiées. Ce sont souvent des rapports techniques et statistiques provenant de ministères et de leurs entités techniques, mais aussi de l'Agence européenne spatiale et d'autres agences européennes ou internationales. Il s'agit d'une recherche plutôt quantitative.

La méthode qui nous a semblé être la plus accessible et la plus pertinente a été la recherche sur internet de sites spécialisés et reconnus dans le domaine de l'énergie. Des recherches par mots clés comme « *énergie* », « *chiffres clés* », « *monde* »... nous ont fait aboutir rapidement sur le site de l'Agence internationale de l'énergie (AIE) : « <https://www.iea.org/> ».



International Energy Agency

Русский 中文网页

ABOUT NEWSROOM TOPICS COUNTRIES STATISTICS DATA & PUBLICATIONS

Home » Statistics

Statistics

Global energy data at your fingertips

You are viewing the **beta version** of the new IEA Statistics web site.
[Return to the previous version](#) | [Report a problem/make a suggestion](#)

Show me for

Click on a search box and start typing to find an indicator or region.

[Chart](#) [Map](#) [Browse all indicators by category](#)

Fondée en 1974, l'AIE est une référence mondiale en matière d'expertise énergétique, elle a un rôle d'organe de conseil extrêmement influent. Elle compte vingt-neuf pays membres, dont

la France depuis 1992. Elle collabore aussi avec des institutions internationales comme le G8 ou la Commission européenne, ainsi qu'avec des pays non membres afin d'envisager des scénarios futurs et de prendre des décisions concordantes. Ses missions sont :

- ⇒ de collecter et d'analyser des données relatives à l'énergie ;
- ⇒ d'organiser des rencontres d'experts internationaux ;
- ⇒ d'évaluer les programmes énergétiques nationaux ;
- ⇒ d'établir des projections énergétiques globales fondées sur différents scénarios ;
- ⇒ de préparer les études et recommandations pour les gouvernements sur des sujets clés.

L'AIE publie tous les mois le *OilMarket Report* qui est une prévision de la demande mondiale de pétrole. Elle publie annuellement le *World Energy Outlook*, état des lieux de l'énergie dans le monde agrémenté de projections, et ses *Key World EnergyStatistics*.

Ces différents rapports et le site internet ont donc constitué le premier élément qui nous a permis d'avancer dans nos recherches et réflexions, en particulier de compléter notre outil de *scoring*.

1. La méthode d'entretien non directif ou libre

a. Les principes de base

Une fois que ces informations de base fiables et valables étaient obtenues, notre recherche visait à démontrer que la source d'énergie solaire spatiale était une source répondant aux critères de l'énergie durable (support : tableau comparatif ou *scoring*).

La méthode employée cette fois-ci a été celle des interviews directes de spécialistes du sujet concerné. En premier lieu, il nous a fallu identifier ces spécialistes grâce à notre recherche bibliographique et à la prise de contact de leurs auteurs.

Il s'agissait là d'obtenir les informations scientifiques, économiques et sociétales directement en lien avec cette technologie novatrice. La logique d'entretien non directif ou libre semblait bien adaptée à un entretien qualitatif.

En amont, nous avons préparé une trame d'entretien référençant les sujets et idées principales que nous souhaitons aborder. L'idée majeure, compte tenu du niveau d'excellence des interlocuteurs, a été d'être à la hauteur du rendez-vous et de collecter, via échange se voulant informel, les informations essentielles.

Nous avons donc privilégié les principes suivants :

- Aborder des thématiques générales ouvertes présentées préalablement à l'enquête.
- Lors de l'échange, rester à l'écoute et relancer la conversation.
- Prendre des notes pour permettre la synthèse.

b. Les interlocuteurs et leurs domaines

Dans le cadre de notre recherche, de nombreuses tentatives de prise de contact n'ont jamais abouti (*cf.* annexe 1 : Tableau des contacts sollicités). Mais nous avons tout de même réussi à atteindre notre objectif en rencontrant des interlocuteurs, de notoriété, relevant des trois piliers du développement durable. Leur présentation est proposée par classement par dominante. Cela permet de mieux les repérer notamment vis-à-vis de la grille de *scoring* (*cf.* chapitre I.D.4).

⇒ Domaine technologique et économique (deux entretiens)

- **Dr Léopold SUMMERER**, membre de la faculté de l'ESA et chef du département Advanced Concepts Team (ACT), à l'European Space Research and Technology Centre (ESTEC), Noordwijk, Pays-Bas.
- **M. Rohan RAMASAMY**, chercheur, ACT, ESTEC.

⇒ Domaine politique et social (cinq entretiens)

- **M. Alain JUND**, adjoint au maire de Strasbourg, en charge de l'urbanisme, vice-président de l'EMS en charge de l'écologie.

Fait remarquable et motivant notre démarche : la ville de Strasbourg a été désignée « Meilleure grande ville pour la biodiversité 2017 ». De plus, depuis plusieurs années, l'EMS développe une campagne de communication importante pour valoriser toutes les démarches visant à restreindre la consommation d'énergie.

- **M. Patrick BARBIER**, maire de Muttersholtz.

La ville de Muttersholtz a été désignée parmi 88 collectivités pour être la nouvelle « Capitale française de la biodiversité 2017 », sur le thème « Aménager, rénover et bâtir en favorisant la biodiversité ». Muttersholtz mène depuis de nombreuses années une politique publique forte en matière d'environnement et de biodiversité. La ville est pionnière en matière d'éducation à la nature, avec sa Maison de la Nature et avait déjà été reconnue « Territoire à énergie positive pour la croissance verte (TEPCV) » en 2015.

- **Mme Pia IMBS**, maire de Holtzheim.

Mme Imbs est également maître de conférences à l'EM Strasbourg, responsable de la chaire Développement durable. Elle met donc en application son expertise universitaire au service de la collectivité qu'elle gère.

Nous nous sommes également entretenus de manière plus informelle avec :

- **Mme Géraldine BROYE**, professeure agrégée des universités, EM Strasbourg, directrice déléguée.

Mme Broye nous a enseigné la finance d'entreprise et nous a conseillé sur l'analyse des coûts.

- **Mme Brigitte TRIBOUT**, enseignante à l'EM Strasbourg.

Mme Tribout nous a enseigné les statistiques et l'analyse de données. Elle nous a conseillé sur l'enquête quantitative.

2. Le questionnaire

L'hypothèse selon laquelle la technologie solaire spatiale est encore largement méconnue doit être vérifiée. Par son aspect pratique, rapide et diffusable facilement, il nous a semblé opportun de réaliser un questionnaire en ligne via les réseaux sociaux (Facebook, LinkedIn, etc.). Nous avons également envoyé ce questionnaire par mailing et l'avons proposé lors d'entretiens en face à face.

L'intérêt de recourir à cette méthode est né de la lecture du bilan de l'enquête réalisée par le Comité national du débat public⁵⁵. Celle-ci a eu pour but de recueillir l'avis du public sur les opportunités d'avenir en matière de projet de plan énergétique. Notre volonté a donc été de compléter les informations de cette prospection en y ajoutant le solaire spatial.

Les objectifs fixés à partir de l'évaluation du grand public sont :

- Vérifier la perception du potentiel énergétique de la ressource solaire.
- Estimer la connaissance des différentes technologies solaires.
- Recueillir l'avis sur les principaux freins liés à l'exploitation de la ressource solaire.
- Apprécier la cohérence du modèle de développement d'une technologie ; support de comparatif de nos technologies.
- Estimer, par comparaison, le niveau de développement perçu entre les technologies exploitant le rayonnement solaire et une technologie vulgarisée comme l'éolien.

D'un point de vue méthodologique, nous avons veillé à ce que certaines conditions soient respectées. Le questionnaire a donc été élaboré avec le souci :

- d'être accessible, simple et compréhensible ;
- d'avoir un temps de réponse court (moins de deux minutes) ;
- d'apporter un éclairage sur l'énergie solaire.

Brigitte TRIBOUT, professeure de statistiques à l'EM Strasbourg, a accompagné notre démarche.

3. Justifications des choix de la recherche

Nous considérons comme nécessaire et pertinent le caractère varié des cibles et comme cohérents les choix méthodologiques de recherche. En effet, nous souhaitons couvrir les 3 domaines « clés » de nos estimations : politique et social, économique, technologique.

⁵⁵ <https://ppe.debatpublic.fr/compte-rendu-bilan-du-debat>

L'enquête de masse semble adéquate pour définir le niveau de connaissance et sonder la considération de la source solaire comme possibilité d'avenir auprès du grand public. Il s'agit d'une exploration de la dimension sociale.



Les entretiens spécifiques auprès des élus semblent permettre de mesurer et de repérer les leviers sociologiques et politiques favorables à la mise en œuvre de la transition énergétique, vers le développement durable. Il s'agit de l'observation du domaine politique



Les entretiens scientifiques correspondent à l'aboutissement d'une difficile campagne de prise de contact. L'univers de la recherche, spatiale notamment, semble particulièrement complexe et difficilement atteignable. L'apport des deux principales sources mondialement reconnues est essentiel pour compléter les domaines technologique et économique.

Les résultats bruts collectés sont présentés dans le chapitre suivant.

B. LA PRESENTATION DES DONNEES ET DES RESULTATS

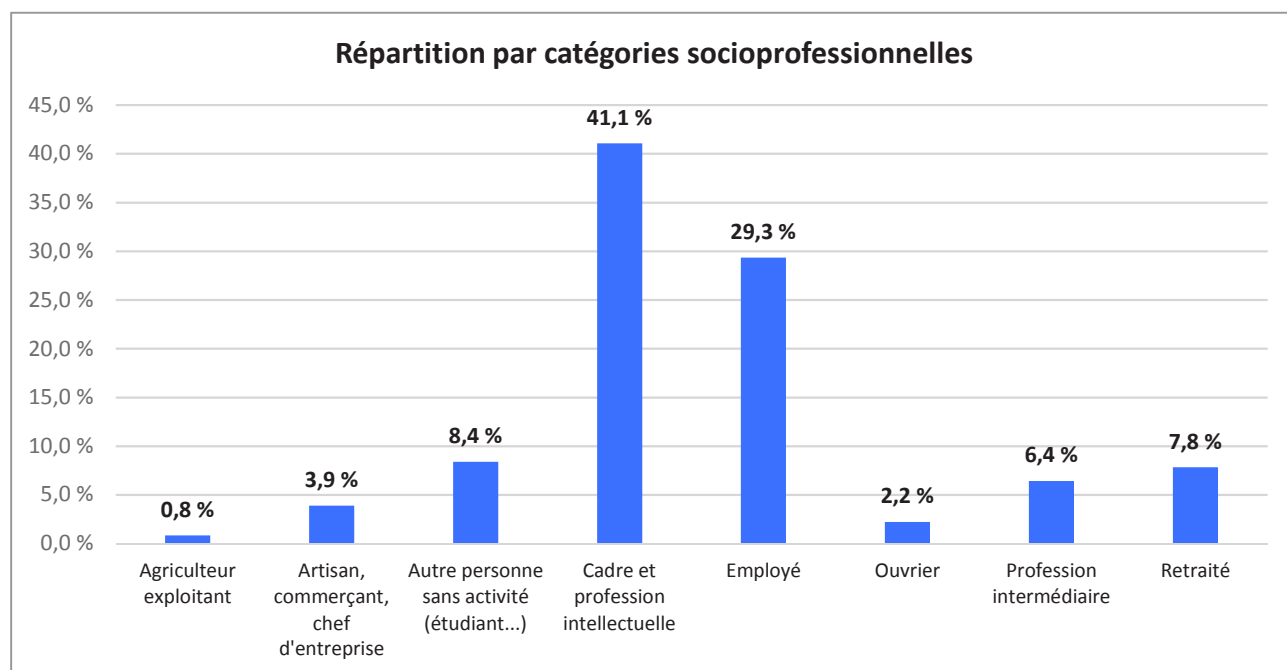
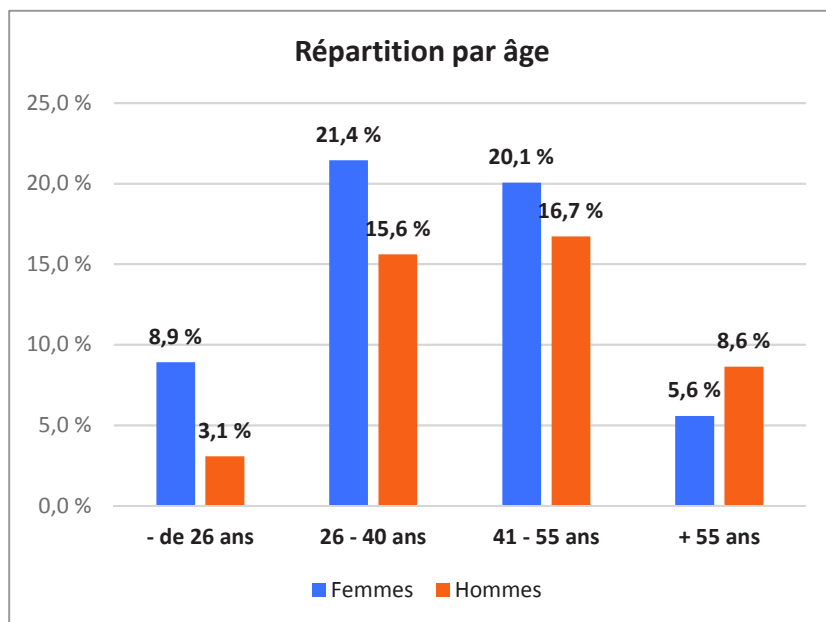
1. Les résultats chiffrés

⇒ Le panel

L'enquête menée a permis d'obtenir l'avis de 482 personnes du 29/09 au 30/10/2018.

Le panel des personnes sondées n'est pas exactement représentatif de la population française. En effet, les cadres et professions intellectuelles sont trop représentés, la valeur moyenne de ces catégories étant plutôt située vers 18 % et non de 41,1 % (source Insee, 2012).

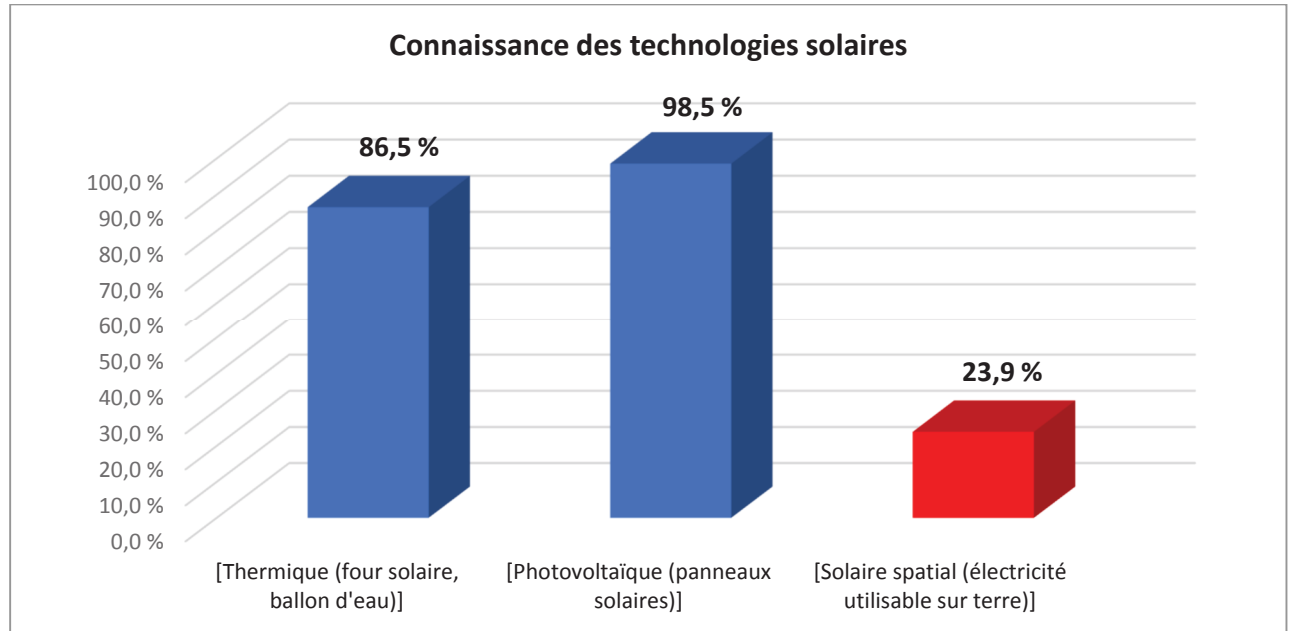
De la même façon, les ouvriers (2,2 %) et professions intermédiaires (6,4 %) sont sous-représentés, puisque ces catégories sont respectivement de 20,8 % et 24,7 %. Cet écart génère probablement une surestimation des réponses influencées par les connaissances techniques ou de méthodes des personnes sondées. On peut supposer que la population de



cadre est davantage formée à ces sujets par rapport à une population d'ouvriers. Il faudra donc en tenir compte lors de l'interprétation des résultats.

⇒ Le solaire et les technologies

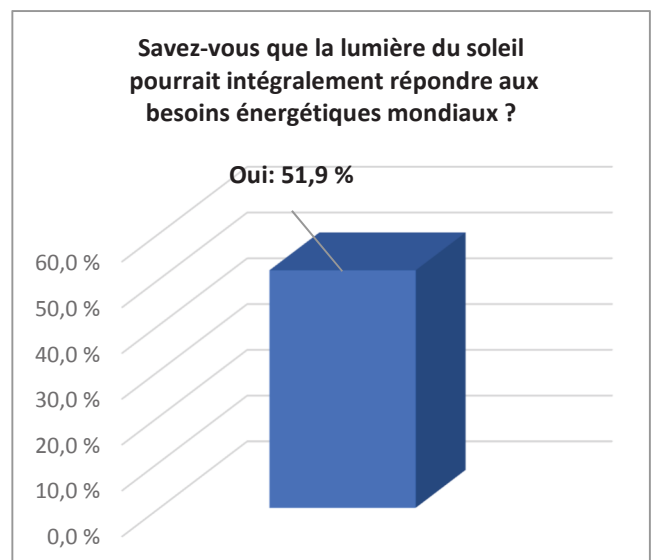
Les technologies classiques utilisant l'énergie solaire sont bien connues.



Notre échantillonnage étant davantage localisé dans le nord de la France, il ressort une moins bonne connaissance du solaire thermique (ex. : des fours solaires).

Il nous a cependant paru surprenant, et donc plutôt important, que près de 24 % des personnes sondées aient connaissance du SBSP. Une des raisons pourrait être la représentativité du panel sondé comme évoqué précédemment.

Le fait de savoir que le soleil pourrait largement subvenir aux besoins énergétiques est une évidence. Or, seulement 51,9 % des sondés affirment connaître cet argument en faveur du soleil. Il reste donc une bonne part d'information et de formation à réaliser pour mobiliser la population autour de la technologie solaire.



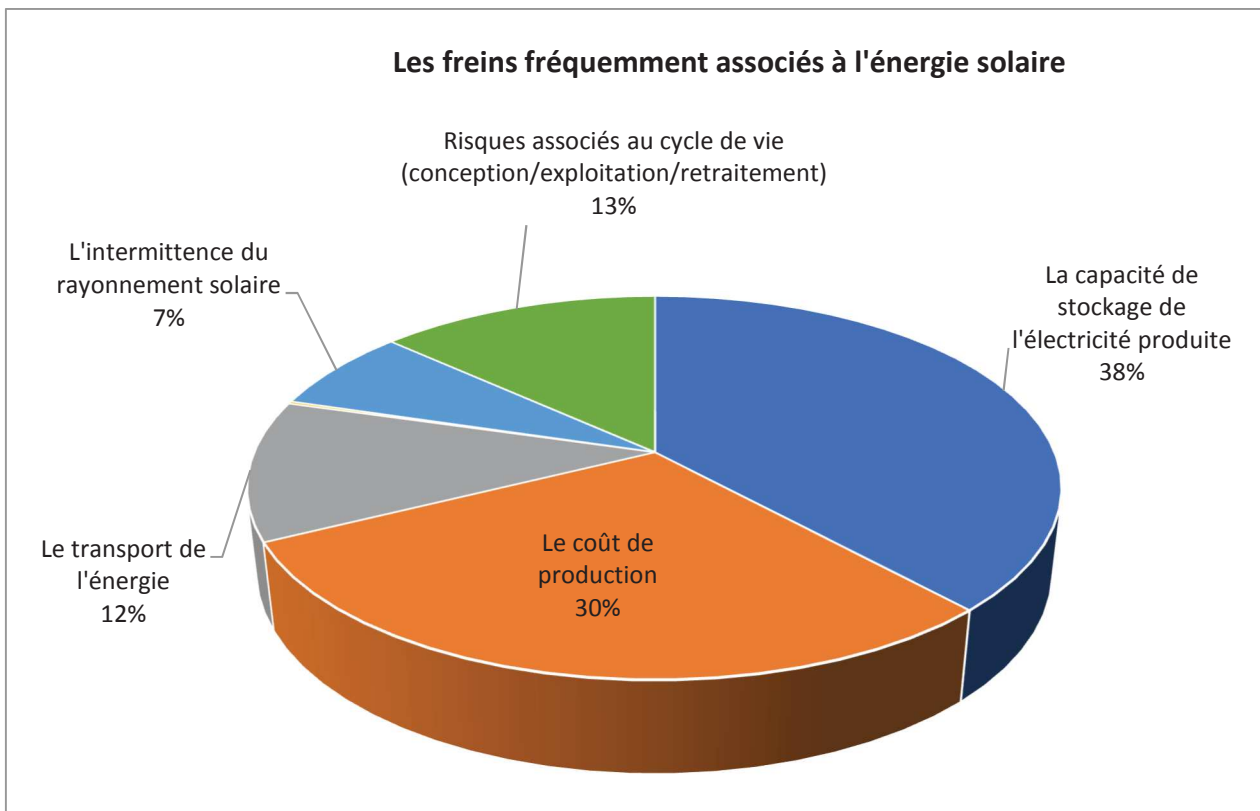
⇒ Résultats sur les freins liés à l'exploitation du rayonnement solaire

Les freins qui sont communément associés à l'énergie solaire ont pour sujet la logistique.

Au cumul, 57 % des critères y sont associés : capacité de stockage en tête avec 38 %, puis le transport de l'énergie (12 %) et enfin son intermittence (7 %). Il y a donc lieu de travailler sur l'accessibilité et la distribution de l'énergie solaire.

Vient ensuite le coût de l'énergie : 30 % des répondants estiment que l'énergie solaire reste chère. Comme nous l'avons compris et démontré, le coût reste élevé et devra encore évoluer pour se démocratiser.

Les risques et contraintes environnementaux (fabrication des panneaux, démantèlement des installations, etc.) viennent en dernière position : seulement 13 % des personnes sondées les mettent en avant.



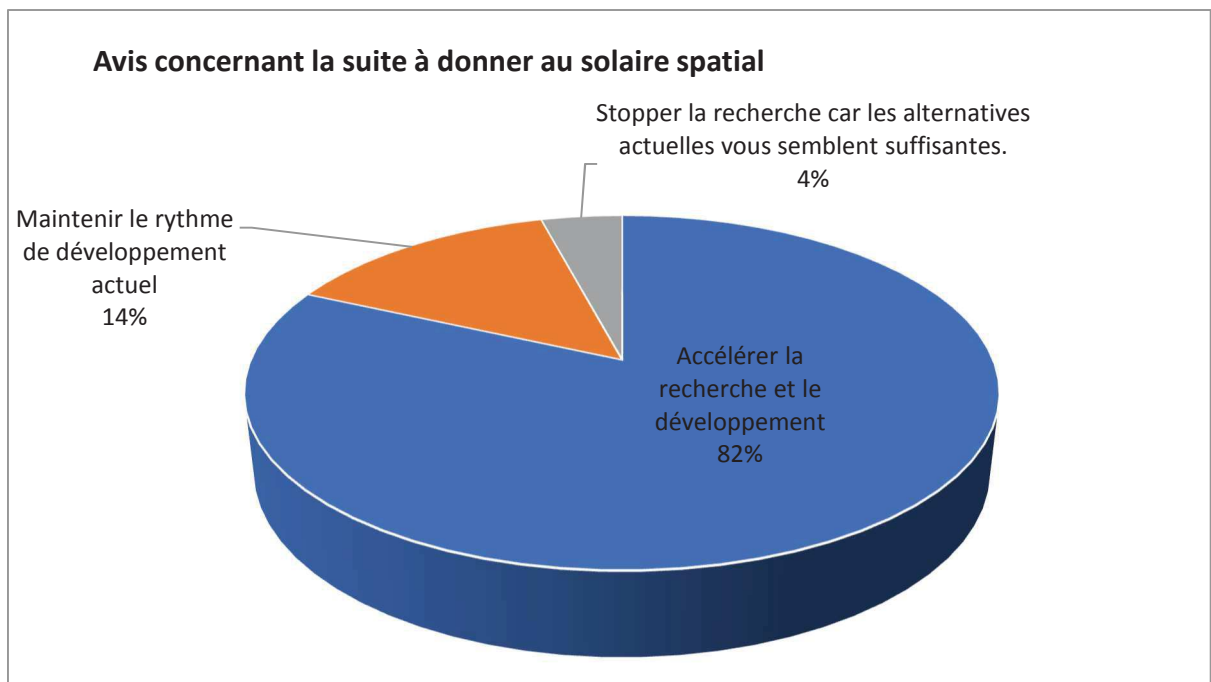
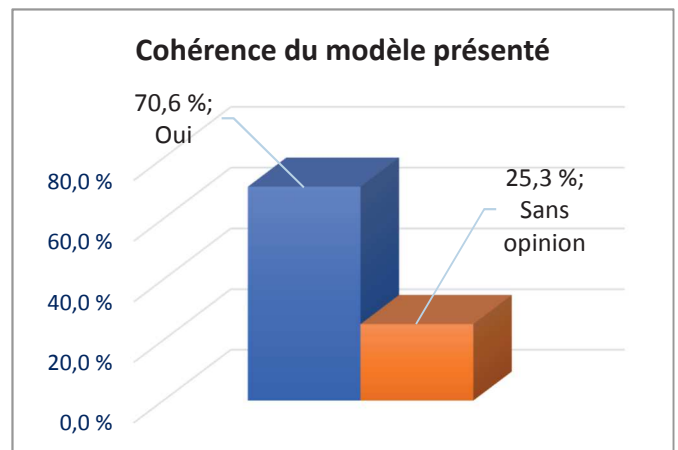
Une chose semble certaine, si la technologie parvenait à résoudre les problèmes principaux liés à l'exploitation de l'énergie solaire, il y aurait un plébiscite majeur. On peut imaginer une acceptation sociale forte.

⇒ Les avis sur le modèle

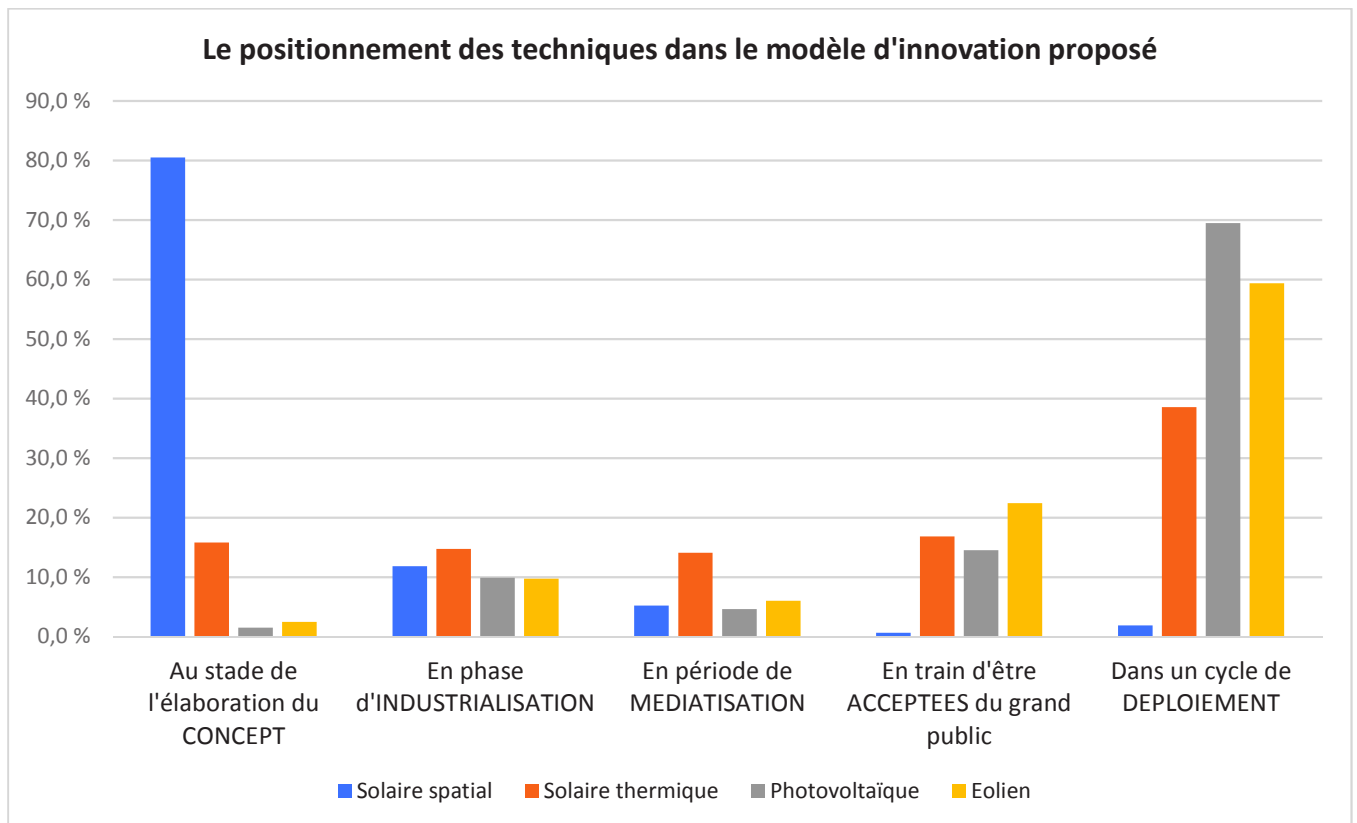
Enfin, le modèle de développement d'une innovation majeure en termes d'énergie proposé (de façon simplifiée dans le questionnaire) est jugé cohérent.

70 % des personnes sondées ayant répondu à la question sont favorables à ce modèle.

Il est à noter toutefois que près d'une personne sur quatre n'a pas souhaité se prononcer sur cette question. Ceci ne remet pas en cause le modèle, mais c'est certainement lié à la difficulté de la question pour un sondage de ce type.



⇒ Le positionnement des technologies sur le modèle



Il ressort clairement de cela que les technologies classiques sont positionnées sur la fin du modèle, c'est-à-dire acceptées et déployées.

Sans ambiguïté, le SBSP se situe en tout début du modèle. Il reste donc un long chemin à parcourir pour faire aboutir cette technologie innovante.

2. Les données politiques

Afin de présenter ici une synthèse au lecteur, le compte-rendu des entretiens est présenté en annexe 2. Les entretiens menés auprès des trois élus font ressortir les idées suivantes :

- × La vision commune exprimée de la politique est qu'il s'agit avant tout d'une action, d'un acte de construction. L'idée d'être des « bâtisseurs » revient systématiquement dans les entretiens que nous avons menés.
- × Les citoyens expriment des aspirations et une sensibilité de plus en plus orientée vers le cadre et la qualité de vie. Ils développent de réelles connaissances dans les domaines de la technique et de la santé. Ils se spécialisent même très facilement grâce à l'information

disponible via le numérique : accessible et largement démocratisée. Pour répondre à ces attentes précises, l'homme politique doit être au contact du terrain afin d'entendre et, mieux encore, de pouvoir anticiper la direction à prendre en vue d'assurer l'intérêt collectif. Les trois élus sont unanimes : tous affirment consacrer beaucoup de temps afin de remplir efficacement cette mission.

- × En tant que facilitateurs d'innovation et d'avancées sociales, les élus cherchent, dès que c'est possible, à valoriser les initiatives d'entreprises. Celles-ci sont aussi bien privées que citoyennes. La vision politique est donc orientée « *bottom-up* » : c'est du terrain et des engagements personnels que naissent les réalisations.
- × La gestion communale évolue de plus en plus vers une approche de stratégie d'entreprise. Elle est fondée sur l'anticipation, la maîtrise de l'environnement institutionnel et sur l'expertise :
 - Préparation en amont des projets techniques pour favoriser les chances de réussite aux appels à projets,
 - Prise de conscience de la transformation des modalités d'aides financières de l'Etat sur les questions d'appuis à la transition énergétique,
 - Recrutement de salariés à haut potentiel technique et de gestion de plus en plus souvent issus du secteur privé.
- × Pour tous les trois, la prise de risque associée à un nouveau projet est une composante pas encore assez assumée ni intégrée à la fonction d'élu.
- × L'approche sociétale, responsable et écologique de l'urbanisme est fortement mise en avant. Il s'agit de la préoccupation majeure des trois élus interviewés, afin de limiter l'étalement urbain, en densifiant les nouveaux projets et en protégeant les zones non bâties.
- × Une approche innovante du développement énergétique est l'intégration de collectifs citoyens lors de l'élaboration de solutions qui vont impacter les conditions de vie locales. Une approche très avancée est initiée à Muttersholtz où la première coopérative publique-privée devrait voir le jour en vue de gérer un parc éolien. L'exemple allemand des coopératives locales d'énergie éolienne leur a servi de modèle.

- × Les trois élus reconnaissent le marketing social et la communication comme étant les leviers majeurs du changement. Ceux-ci permettent de crédibiliser l'action, de renforcer la perception positive de l'engagement politique et d'influencer les comportements (soit une fonction éducative de la politique). En outre, l'attractivité des territoires passe par la promotion de leur dynamique. C'est par « capillarité », comme le dit M. JUND, que cette énergie et cette dynamique stimulent les initiatives et fédèrent les citoyens. Enfin, le maire de Muttersholtz cite l'importance de « l'innovation, qui a fait ce que Muttersholtz est » et de la force du collectif qu'il représente.
- × Il est à noter qu'aucun de nos trois interviewés ne connaît la technologie du solaire spatiale. Tous prônent très largement le développement de technologies réalisables localement selon les capacités offertes simplement par la nature, afin de produire de l'électricité propre, profitable aux habitants et qui soit aussi écoresponsable. Ainsi, c'est le photovoltaïque, les turbines hydroélectriques et les projets éoliens qui sont nommés.

Nous avons réussi à réunir un panel d'enquêtes qualitatives, certes restreint, mais qui nous a semblé suffisamment représentatif. Néanmoins, le traitement des résultats énoncés plus haut nécessite une certaine prudence. En effet, il serait abusif de vouloir tracer des tendances exhaustives au vu du faible nombre d'interviews de recherche collectées.

Pourtant, l'analyse des propos et de l'expérience vécue durant ces rencontres donnent des indications pertinentes sur le réel engagement des élus sur le sujet de la transition énergétique.

3. Les données scientifiques

Afin de présenter ici une synthèse au lecteur, le compte-rendu des entretiens est présenté en annexe 3. Les entretiens réalisés auprès du Dr Leopold Summerer et de Rohan Ramasamy font ressortir les idées suivantes :

⇒ Partie technique

L'ESA travaille sur le concept SBSP comme technologie de fourniture d'énergie à des missions lunaires et martiennes. Pour ces applications, l'utilisation du laser comme moyen de transmission est plus efficace que les micro-ondes.

La technologie SBSP devrait permettre ensuite à l'industrie de l'extraction minière, sur la Lune et sur astéroïdes, de se développer. A terme, il est envisagé d'utiliser ces ressources comme matière première à l'élaboration des SBSP. La technologie du SBSP dans ces applications est en concurrence avec des technologies issues de la recherche nucléaire.

Le niveau TRL du SBSP de l'ESA n'est pas défini. Il est nécessaire de prendre en compte les niveaux TRL de chaque sous-module. L'approche du besoin en investissement nécessaire au développement de la technique leur paraît plus approprié.

La durée de vie est d'une station SBSP est estimée à trente ans. Néanmoins, le développement de l'industrie spatiale (et de sa maintenance et de son recyclage) devrait augmenter cette durée de vie. En l'état, il est envisagé de mettre la station SBSP en fin de vie en orbite cimetière.

⇒ Partie stratégie et organisation

La partie stratégie ne relève pas de leurs compétences, les décisions stratégiques et administratives sont prises au siège de l'ESA à Paris. C'est à l'European Space Research and Technology Centre (ESTEC) situé à Noordwijk que les deux scientifiques se concentrent sur leurs travaux de recherche.

La mise en œuvre du SBSP de l'ESA devrait se faire d'ici à dix ans. Pour R. Ramasamy, c'est une étape intermédiaire pour l'acceptation de la technologie et le développement du SBSP terrestre.

Peter Glaser avait breveté le concept du SBSP, mais les sous-systèmes développés aujourd'hui sont différents. Ce n'est donc pas une contrainte pour son développement.

Le sujet, l'articulation et les rôles des différentes parties prenantes restent à définir, aucun schéma n'a été prédéfini.

Pour les deux chercheurs, seul le désir politique est aujourd'hui un frein au développement du SBSP.

⇒ Sur les coûts

L'antenne redresseuse *rectenna* n'est pas prise en compte dans le coût de construction d'un SBSP. Bien qu'important, celui-ci est faible, comparé au coût global d'un tel projet.

Pour les deux chercheurs, il ne semble pas important d'étudier le coût du démantèlement d'un SBSP, la solution de mise en orbite cimetière étant peu coûteuse.

L'approche des charges d'exploitation n'a pas encore été étudiée et il serait intéressant de le faire. A leur connaissance, il n'existe pas de comparatif des coûts carbone selon les différents types de lanceurs. Les incertitudes mises en évidence sur les coûts de lancement de SpaceX semblent intéressantes à être levées.

4. Les données économiques

a. La composition du coût

D'une part, les études concernant le SBSP auxquelles nous avons pu avoir accès ont permis de faire le constat que peu d'entre elles ont une approche réellement développée sur le plan économique.

D'autre part, elles ne proposent aussi que rarement une synthèse des chiffres en un unique tableau. Même si certaines d'entre elles cherchent à déterminer des coûts de production précis. En effet, elles omettent bien souvent d'y intégrer les charges d'exploitation et ne peuvent ainsi s'orienter vers une approche de coût complet.

C'est dans le but de pallier ce manque que nous avons ainsi compilé les données recueillies dans différents ouvrages et études afin de proposer une synthèse plus accessible (cf. annexe 5 : Contrôle de gestion du SBSP).

Nous avons constaté que le coût de l'antenne redresseuse était régulièrement omis. De ce fait, nous avons intégré ce coût dans notre approche en nous fondant sur l'estimation faite par le Pr David R. Criswell dans le cadre de son projet *Lunar Power System (LPS)*⁵⁶, soit 200 millions de dollars par kilomètres carrés (174 millions d'euros par kilomètres carrés).

⁵⁶ Criswell, D. R., & Waldron, R. D. (1990, August). Lunar system to supply solar electric power to Earth. In *Proceedings of the 25th Intersociety Energy Conversion Engineering Conference* p. 4

De plus, cette synthèse nous a aussi permis de mettre en lumière des contradictions dans les coûts proposés dans certaines études qui font encore référence en la matière.

Ainsi la mise à jour en 2017 de l'étude menée à l'origine par l'IAA en 2011 exprime la possibilité d'un coût de lancement dans l'espace proposé par SpaceX à 2 720 \$/kg (2 366 € / kg) en orbite GEO et affirme par la même la faisabilité et la rentabilité immédiate du projet SPS-Alpha Mark II. Or, il s'avère que ce prix est issu d'une erreur d'interprétation des tarifs de SpaceX, comme le montre le tableau ci-dessous⁵⁷.



Figure III-1 : Coût de lancement selon SpaceX (source : spacex.com)

De notre point de vue, le prix affiché pour l'instant par SpaceX est de 11 250 \$/kg (9 787,5 €/kg) via son lanceur Falcon Heavy. Cette différence de tarif induit un coût de lancement total en orbite GEO bien plus élevé, celui-ci passant ainsi pour une centrale de 10 000 tonnes (poids du projet SPS-Alpha Mark II) de 27,2 milliards de dollars à 112,5 milliards de dollars (de 23,6 à 97,9 milliards d'euros). L'impact sur le coût complet de production est de 0,16234 \$/kWh (0,14123 €/kWh), celui-ci passant ainsi de 0,09651 \$/kWh à 0,25885 \$/kWh (de 0,08396 €/kWh à 0,22519 €/kWh), soit une augmentation de 168 %. Ce constat aura le mérite de mettre en lumière le poids conséquent que représente le coût de lancement dans un projet SBSP.

⁵⁷ <https://www.spacex.com/about/capabilities>

Néanmoins, ces tarifs sont supérieurs aux tarifs *a priori* pratiqués dans la réalité, et le prix cible de 7 900 \$/kg (6 873 €/kg) en GEO est, selon notre propre expertise et connaissance, d'ores et déjà atteint.

b. Estimations d'un coût de production

En nous appuyant sur notre outil de calcul de coût et les différentes données recueillies, nous avons pu modéliser trois scénarios basés sur le temps d'arrêt annuel d'une SPS, à savoir 3 heures, 30 heures et 50 heures. Le scénario basé sur 3 heures provient des 180 minutes d'arrêt annuel impondérables liées aux deux équinoxes. Ceux basés sur 30 heures et 50 heures sont des alternatives permettant d'imaginer quel serait l'impact sur le coût complet de production induit par des arrêts plus longs issus de pannes ou autres aléas. Nous avons croisé ces scénarios avec deux autres variables : le coût de lancement et le montant annuel des charges d'exploitation.

Concernant le coût de lancement, nous sommes partis de l'idée probable que le prix cible de 7 900 \$/kg (6 873 €/kg) en GEO serait atteint. Puis nous avons appliqué une baisse de 25 % et 50 %, pour dans ce dernier cas de figure passer sous la barre des 4 000 \$/kg (3 480 €/kg).

Pour ce qui est des charges d'exploitation, aucune étude ni rapport n'ayant été faits sur ce point nous avons imaginé cinq variables en la matière allant de 100 millions de dollars par an à 500 millions de dollars par an (87 à 435 millions d'euros). Le résultat de la combinaison de tous ces facteurs est résumé dans le tableau suivant :

charges d'exploitations annuelles	3 heures d'arrêt annuelles			30 heures d'arrêt annuelles			50 heures d'arrêt annuelles		
	coût de lancement inchangé	coût de lancement -25 %	coût de lancement -50 %	coût de lancement inchangé	coût de lancement -25 %	coût de lancement -50 %	coût de lancement inchangé	coût de lancement -25 %	coût de lancement -50 %
100 m \$	0,20080 \$	0,16322 \$	0,12563 \$	0,20143 \$	0,16372 \$	0,12602 \$	0,20189 \$	0,16410 \$	0,12631 \$
87 m €	0,17470 €	0,14200 €	0,10930 €	0,17524 €	0,14244 €	0,10964 €	0,17564 €	0,14277 €	0,10989 €
200 m \$	0,20651 \$	0,16893 \$	0,13134 \$	0,20715 \$	0,16945 \$	0,13174 \$	0,20763 \$	0,16984 \$	0,13205 \$
174 m €	0,17966 €	0,14697 €	0,11427 €	0,18022 €	0,14742 €	0,11461 €	0,18064 €	0,14776 €	0,11488 €
300 m \$	0,21222 \$	0,17464 \$	0,13705 \$	0,21288 \$	0,17518 \$	0,13747 \$	0,21337 \$	0,17558 \$	0,13779 \$
261 m €	0,18463 €	0,15194 €	0,11923 €	0,18521 €	0,15241 €	0,11960 €	0,18563 €	0,15275 €	0,11988 €
400 m \$	0,21793 \$	0,18034 \$	0,14276 \$	0,21861 \$	0,18090 \$	0,14320 \$	0,21911 \$	0,18132 \$	0,14353 \$
348 m €	0,18960 €	0,15690 €	0,12420 €	0,19019 €	0,15738 €	0,12458 €	0,19063 €	0,15775 €	0,12487 €
500 m \$	0,22364 \$	0,18605 \$	0,14847 \$	0,22434 \$	0,18663 \$	0,14893 \$	0,22485 \$	0,18706 \$	0,14927 \$
435 m €	0,19457 €	0,16186 €	0,12917 €	0,19518 €	0,16237 €	0,12957 €	0,19562 €	0,16274 €	0,12986 €

Figure III-2: Tableau sur le potentiel coût complet de production selon trois variables : heures d'arrêt annuelles, charges d'exploitation, coût de lancement (établi par les auteurs)

Il est à noter qu'une technologie de transfert des éléments de la centrale, voire de la centrale en elle-même, de l'orbite basse vers l'orbite GEO par le biais d'un véhicule de transfert orbital (OTV) permettrait un gain notable en termes de coût de lancement. En effet, la charge utile en mesure d'être envoyée en orbite basse est bien plus importante qu'en GEO. Pour le cas d'un lancement via Falcon Heavy la charge utile est de 26,7 tonnes en GEO et 63,8 tonnes en orbite basse. Cette approche permettrait une chute conséquente du prix de lancement au kilogramme et *de facto* du coût de production. Néanmoins, les données chiffrées liées au coût de ce type de véhicule n'étant pas disponibles, nous avons fait le choix de considérer des lancements directs en GEO sans OTV.

A ces hypothèses, nous ajoutons un taux d'actualisation variant entre 0 et 5 % maximum. L'amplitude de coût moyen varierait entre 166,1 € (taux d'actualisation de 0 %) et 309,8 €/MWh (taux d'actualisation de 5 %). Le coût moyen avec un taux d'actualisation le plus réaliste de 2 % serait de 217,4 €/MWh.

166,1 €/MWh < COÛT DE PRODUCTION SBSP < 309,8 €/MWh

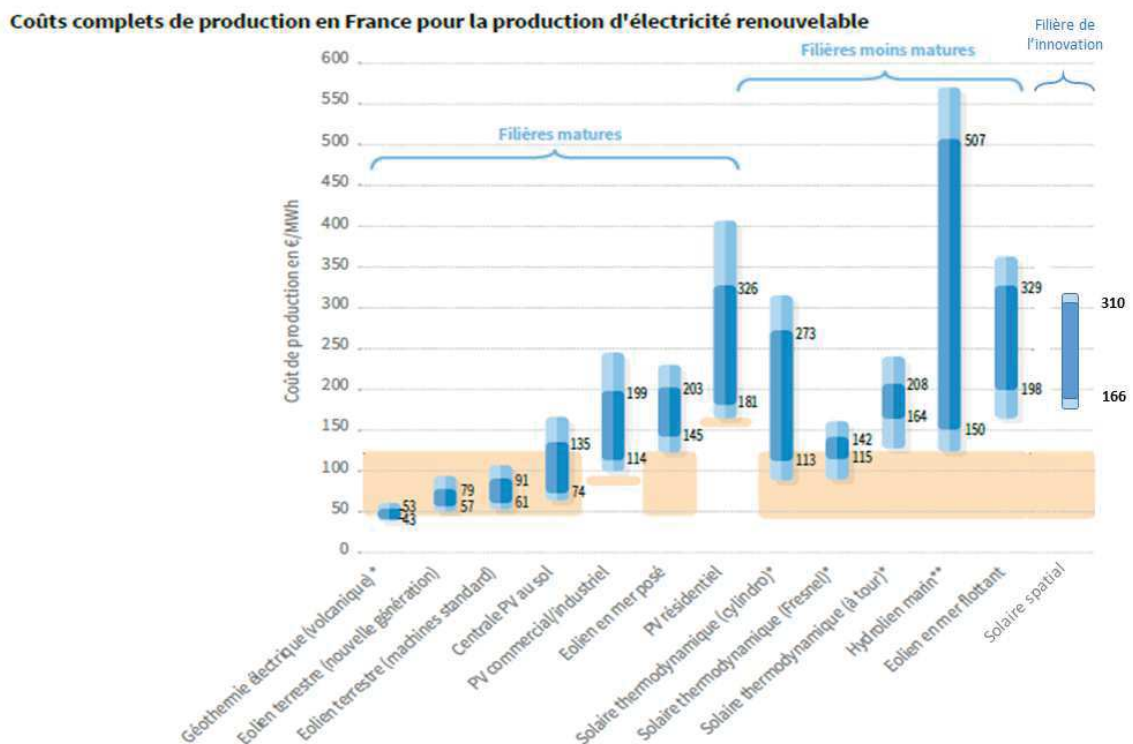


Figure III-3 : Graphique comparatif des coûts complets intégrant le SBSP (source ADEME modifié par les auteurs)

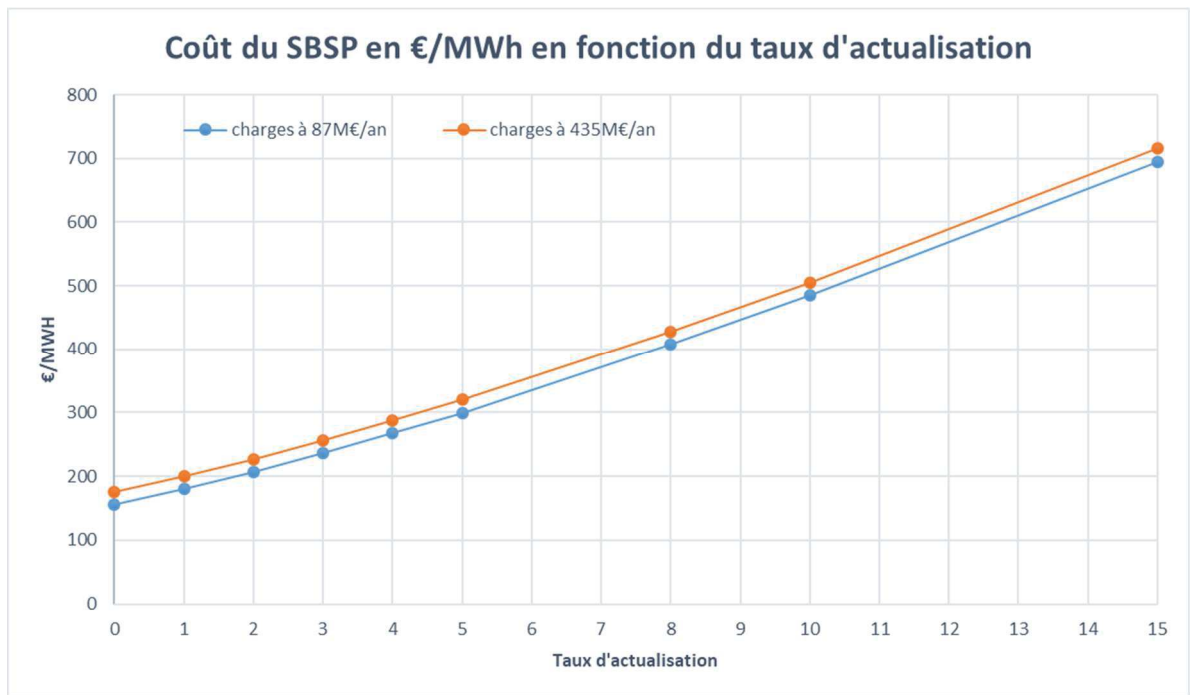


Figure III-4 : Graphique coût/taux d'actualisation pour le SBSP (établi par les auteurs)

C. ANALYSE ET PROSPECTIVE DU SOLAIRE SPATIAL

A l'issue de l'exposé littéraire et de l'énonciation des résultats de notre recherche, nous allons, dans ce dernier chapitre, expliciter notre positionnement sur les enjeux de la recherche formulés en constat dans notre mémoire. Pour rappel, cela consistait à :

- ⇒ Modéliser les phases majeures du processus de développement d'une technologie, de la recherche expérimentale à la mise sur le marché.
- ⇒ Repérer l'écosystème des acteurs clés intervenant dans le processus cité ci-dessus.
- ⇒ Cibler les leviers essentiels permettant d'envisager la réussite du projet.

Ensuite, sur la base des éléments constituant notre positionnement, nous concluons notre mémoire en nous exprimant sur la question centrale qui est : l'intégration de la technologie solaire spatiale dans le mix énergétique de demain.

1. La technologie SBSP : état et comparaison finale

La technologie SBSP est en phase de développement. Cette vision est modérée par le constat d'une certaine hétérogénéité dès lors que son observation est systémique. En effet, la dynamique de développement est essentiellement technique : bon nombre de procédés opérationnels mériteraient un passage en phase de test. Pourtant, si cette bascule ne s'opère pas, c'est qu'un ou des facteurs moteurs n'agissent pas.

Nous avons repéré deux déclencheurs majeurs : le citoyen et son représentant politique. Malgré un regard positif porté sur l'exploitation de l'énergie solaire, le citoyen connaît peu le SBSP et ses avantages. L'élu, quant à lui, fait preuve de pragmatisme : il agit avec ce qui est à sa disposition, ou bien à portée de main, à son échelle, et dans les conditions dictées par son environnement socioéconomique.

En conséquence, sur le modèle T. EDISON, nous positionnons la technologie SBSP au niveau de la conceptualisation.

Mais, afin d'être particulièrement complet au sujet du développement de la technologie SBSP, il nous semble pertinent de l'analyser et de l'intégrer à notre tableau comparatif (*scoring*). La

comparaison aux autres techniques de production d'électricité, puis leur hiérarchisation apportent un éclairage objectif quant aux potentiels du SBSP.

Critères		TECHNOLOGIE EVALUEE	
		Coef.	Solaire Spatial
SOCIÉTAL	Degré de risque sanitaire	6	3
	Durée de vie d'une unité de production	1	4
	Impact environnemental du démantèlement d'une unité de production	5	3
	Emission de CO ₂ / kWh	6	4
	Rendement au m ²	2	3
	ÉCONOMIQUE	Réserves estimées des ressources	3
Coût de production du MWh		2	1
Taux de retour énergétique		2	2
Facteur de charge		3	4
TECHNIQUE	TRL	3	1
	Niveau de placement sur le modèle STBS	3	1
	Accessibilité de la ressource	4	3
Score total pondéré			118

Energie	Note
Eolien	136
Solaire Terrestre	127
Hydroélectrique	121
Solaire Spatial	118
Géothermie	117
Nucléaire fission	115
Gaz naturel	100
Nucléaire fusion	99
Charbon	96
Pétrole	87

Le SBSP présente des qualités et des intérêts, notamment sociétaux, qui pourraient justifier d'un engagement plus important en matière de recherche et développement, mais aussi et surtout de vérification via les tests.

A noter qu'en situation de réussite opérationnelle, donc d'évolution favorable sur l'échelle TRL et sur le modèle STBS, la technologie solaire spatiale pointerait à la seconde place de la hiérarchie, derrière l'éolien. Cette dernière technologie serait dépassée si le coût de production du SBSP égalait celui de l'éolien.

2. Les conditions d'un développement futur du SBSP

Ce paragraphe doit mettre en exergue les leviers repérés comme fondamentaux pour le développement du SBSP. Dans un souci de continuité et de cohérence, nous proposons ci-

dessous une approche par domaine. Par praticité, notre démonstration inclut les acteurs clés comme ils sont directement en lien avec le domaine.

a. Les leviers politiques et sociaux

Il apparaît une évidence : le solaire spatial, de par l'ampleur de ses caractéristiques, dépasse les possibilités d'une action locale, et même nationale. La prise en compte de la pertinence de sa mise en œuvre est inévitablement à placer au niveau des Etats, soit au sein d'un consortium international, soit au sein d'une entreprise multinationale.

Pourtant, nous constatons une sensibilisation, voire sporadiquement une mobilisation, du terrain en faveur des énergies vertes notamment. Les élus et les citoyens cherchent, parfois ensemble, les moyens d'agir pour une action immédiatement opérante à leur échelle. Par conséquent, envisager l'émergence du SBSP passerait par la connaissance et la transmission des opportunités localement accessibles, mesurables. Or, aucune démarche n'existe en ce sens.

Aujourd'hui, force est de constater que la mue énergétique passe par les territoires et leurs ressources. En France, cette stratégie est confortée par la loi de transition énergétique de 2015. La transition énergétique se traduit localement par la mobilisation des sources énergétiques de proximité, le recours à des techniques connues et éprouvées. Les individus ont désormais besoin de percevoir concrètement le résultat de leur engagement : ils sont acteurs. Pour nous, cela constitue le principal frein à une technologie comme le SBSP.

En parallèle, il est probable que la crise de confiance vis-à-vis de la classe politique limite l'adhésion à un plan majeur de l'énergie. A l'avenir, sur ce point, il sera intéressant d'observer l'évolution du plan hydrogène ou les actions résultantes de la programmation pluriannuelle de l'énergie (PPE). Surtout dans un contexte où le sentiment de taxation n'a jamais été aussi élevé.

Pourtant, socialement, il apparaît que la population tend à une certaine maturité pour opérer et agir vers des recours énergétiques durables. La prépondérance de la ressource solaire est marquée, comme il en va des autres sources naturelles, l'eau et l'air. Présentée simplement et sans explications approfondies, la technologie solaire spatiale recueille l'assentiment du

public. Il serait très utile de prolonger cette impression pour mesurer l'acceptation sociale, probable donnée incontournable des décisions d'avenir.

Enfin, il reste à mesurer la capacité de modifier les comportements au niveau de la consommation et des usages quand tout porte à penser que le besoin électrique va croissant.

Selon nous, une certitude : le SBSP émergera de la volonté politique internationale. Sur ce point, les Etats doivent franchir les étapes menant, elles aussi, à la maturité. L'exemple du projet de maîtrise de l'énergie nucléaire par fusion (ITER) démontre la difficulté de la coopération internationale sur un sujet aussi sensible et stratégique que la maîtrise d'une énergie.

Les acteurs repérés et en lien avec cette dimension apparaissent clairement : les représentants des nations, les institutions internationales et les peuples.

b. Les leviers économiques :

Dans une certaine continuité, ou pour apporter un argument supplémentaire au principe d'internationalisation, nous évoquerons la prise de risque financier. En effet, elle justifie quasiment à elle seule la nécessité d'une coalition internationale. Il paraît peu vraisemblable que, compte tenu de l'envergure du projet, une initiative privée puisse porter la recherche et le développement. Un éventuel partenariat public-privé serait une autre possibilité intéressante, comme cela est déjà le cas par exemple au Japon entre l'agence spatiale JAXA et Mitsubishi.

Plus important, et en nous éloignant des constats de financement, nous affirmons avec force notre surprise quant au déficit d'estimation financière globale de cette technologie.

Il est certain que le SBSP, pour espérer recueillir l'attention et l'intérêt des interlocuteurs, doit être proposé à la manière d'une offre complète intégrant à la fois les conditions techniques, d'investissement, de coût d'exploitation, etc. Or, cela n'est pas le cas.

Pour appuyer notre propos, nous citerons le traitement des externalités. Elles sont des éléments bien largement omis dans les données économiques liées au SBSP. Les études en présence ne tiennent compte que de la productivité de l'outil de production même lorsqu'il s'agit de déterminer un coût de production. Pourtant il conviendrait d'y intégrer certains

éléments techniques (*rectenna*), comptables (charges d'exploitation) et sociaux (impact écologique lié aux lancements des fusées).

La recherche doit se poursuivre et s'enrichir de composantes complémentaires à la seule technicité de la technologie si les partisans et les promoteurs du SBSP veulent progresser vers des stades de développement supérieurs.

Les acteurs du développement de cette composante rassemblent les économistes de l'IAE, d'investisseurs à forte capacité (FMI ?), les scientifiques et les chefs d'État.

c. Les leviers technologiques et scientifiques :

Notre parcours nous a amenés à côtoyer les plus grands experts scientifiques du domaine. Ces derniers affichent assez naturellement un engagement exclusif dans leur mission de recherche fondamentale. Cela s'explique par l'idée que la communauté scientifique en charge de la recherche fondamentale doit, par la nature même de la tâche qui lui est confiée, se concentrer uniquement sur cette dernière. En effet, le travail en R&D étant le fondement même d'un projet, celui ou celle qui en a la charge se concentre uniquement sur le résultat théorique, et seulement secondairement sur son application. Néanmoins, ce fait, ayant pour conséquence une forme d'isolement et d'enfermement de l'information, porte logiquement préjudice à la diffusion de l'objet de la recherche, donc à d'éventuelles applications.

Dans le cas très particulier du SBSP, il semble utile de porter une attention à la stratégie de partage de l'information et de concentration des moyens. Cette étape apparaît directement à la suite du stade de conceptualisation dans notre modèle.

A cet égard, nous verrions d'un grand intérêt l'engagement de la recherche fondamentale portée par le domaine public dans la *Deep Tech*. Des pays comme la France ont choisi d'emprunter cette route⁵⁸, et cela leur a permis d'apporter à la recherche fondamentale les avantages d'un environnement entrepreneurial que sont une meilleure exposition, une meilleure accessibilité et une acceptation sociale plus favorable. C'est pourquoi il nous paraît d'autant plus important que ce concept soit extrapolé à l'échelle européenne. Cette idée

⁵⁸ <https://www.bpifrance.fr/A-la-une/Actualites/La-France-prend-le-virage-des-Deep-Tech-41659>

aurait pour mérite de porter l'Europe à la hauteur du challenge proposé par la Chine ou les Etats-Unis et de réduire le risque de dépassement technologique.

3. Nos recommandations et perspectives

Le groupe de mémoire s'est beaucoup investi pour explorer, lire, comprendre et analyser la situation de la technologie solaire spatiale. Arrivés au terme de cette expérience de recherche, nous pensons, en toute humilité, pouvoir émettre des avis plus éclairés. Notre volonté est concentrée sur une proposition de pistes essentiellement non scientifiques, car ceci reste l'apanage d'experts, pour nourrir la stratégie de gestion et le management du projet dont l'objet serait l'émergence du SBSP.

Pour cela, nous nous appuyons également sur nos récents acquis de formation, les outils d'analyse stratégique, pour produire une synthèse des potentialités internes/externes. Conjugée aux argumentaires précédents, une liste non exhaustive de recommandations sera proposée.

Au rang des forces que revêt le SBSP, nous pensons qu'il est possible de prendre appui sur les avantages intrinsèques et les effets du produit :

- La production continue, levant les limites liées au stockage par exemple.
- La haute valeur environnementale (ralentissement de l'exploitation des ressources terrestres épuisables, aucune externalité négative liée au GES), une matière première gratuite et abondante à l'échelle de l'humanité.
- L'évolution favorable dans le temps des coûts d'exploitation et probablement d'investissement, donc de la rentabilité.

Notre élaboration des avis et des recommandations s'appuie également sur les principales opportunités d'avenir :

- Les besoins en énergie électrique continueront d'augmenter. Ceci par le simple fait que l'électricité représente la seule alternative actuellement politiquement portée au système de transport par exemple. Et aussi parce que les nouvelles technologies et autres systèmes d'information sont dépendants de l'électricité.

- L'augmentation du recours aux technologies de production propres et accessibles (cf. figure I-16 : L'énergie de demain, selon Nansen) pour compenser la raréfaction du pétrole et donc la hausse de son prix pourrait créer un espace au SBSP.
- L'innovation et son impact sur le marché des nouvelles technologies, sa création de valeur et l'émulsion sociétale qu'elle représente.
- On peut espérer que l'accessibilité de la ressource libre des velléités de conflits et allège le poids des enjeux géopolitiques de l'énergie.

En conséquence, nous proposons les recommandations suivantes :

- ⇒ Dans le but d'obtenir un coût de production prévisionnel au kilowatt-heure plus exact pour le SBSP :
 - La réalisation d'études complémentaires qui intégreraient le coût des externalités ainsi qu'une analyse détaillée des charges d'exploitation.
 - La réalisation d'études sur l'opinion publique afin de vérifier d'une part, son degré d'implication, et d'autre part, de déterminer les axes de communication sur lesquels travailler.
- ⇒ Dans le but de passer aux phases tests et opérationnelles, la constitution d'une structure interministérielle et/ou intergouvernementale afin :
 - de déterminer les pays pour lesquels la technologie SBSP pourrait être un facteur d'indépendance énergétique ;
 - de déterminer parmi ces pays ceux susceptibles d'apporter une contribution financière au projet et à quelle hauteur.
- ⇒ Dans le but de sortir du giron de lobbies énergétiques pesant inégalement sur les choix et orientations politiques en matière d'énergie :
 - la création de « lobbys citoyens » exclusivement basés sur une ou des initiatives citoyennes qui auraient pour objectifs :
 - de faire le suivi des choix politiques en matière d'énergie ;
 - de faire la promotion de nouvelles technologies susceptibles d'être plus en harmonie avec les nécessités sociétales ;

- de faire le lien entre la démarche scientifique et la compréhension politique pour qu'élus et citoyens reprennent en main les questions liées aux méthodes de production d'énergie.

Enfin, il nous paraît fondamental de rappeler que notre démarche s'inscrit avant toute autre chose dans une réflexion devant permettre aux civilisations d'accélérer la marche vers un système économique et social répondant aux absolues nécessités d'un développement durable.

De la composition du mix énergétique des prochaines années dépendra une partie importante des conditions de vie sur Terre.

Conclusion

Ce mémoire avait pour ambition d'évaluer la capacité d'une technologie innovante et significative à s'intégrer durablement dans le mix énergétique électrique de demain. D'une part, le mix actuel est basé principalement sur des énergies fossiles ou nucléaire aux ressources finies. D'autre part, les alternatives renouvelables peinent à s'imposer ou n'ont pas encore le potentiel pour répondre aux besoins énergétiques mondiaux.

Dans un premier temps, il a fallu comprendre les notions fondamentales intervenant dans le sujet. Cette démarche a permis de repérer les interactions entre l'énergie et l'homme. En effet, nous avons pu constater que la société contemporaine a fait de sa consommation énergétique un rôle de pilier, et de levier, essentiel à sa croissance. Cette quasi-dépendance a pour incidence des impacts à la fois sociétaux, économiques et politiques, voire géopolitiques.

En cernant les mécanismes économiques, il en est ressorti l'importance d'une approche exhaustive dans l'analyse du coût complet. Cette condition garantit l'objectivité de l'analyse et de la comparaison économique. La limite de cette démarche se situe au niveau de l'estimation des externalités.

Afin d'y remédier, nous avons classé les technologies de production d'électricité en fonction de critères relevant du développement durable. Ce classement établi a mis en évidence la place prépondérante des énergies renouvelables, malgré certaines limites. Sur la base de notre démarche comparative, il est indéniable que la source solaire constitue la prochaine ère énergétique.

Par conséquent, notre choix s'est porté sur une technologie solaire de rupture. Notre démarche méthodologique a permis de dégager ses positionnements et ses limites, puis de formuler des recommandations :

- Etablir un coût complet et une analyse financière du solaire spatial.
- Rappeler la nécessité du portage de projet à l'échelle internationale.
- Redonner sa place à l'expertise scientifique pour les choix énergétiques futurs.
- Sensibiliser et communiquer auprès des citoyens et des représentants politiques.

Néanmoins, les limites de notre recherche tiennent à la justesse des informations. En effet, les données sont produites par un nombre restreint de spécialistes, qui émettent des avis similaires. Cela pose le problème d'une analyse critique, d'une impression de « consanguinité » de l'information.

En parallèle, nous avons rencontré des élus de territoires locaux, certes légitimes sur le sujet de la transition énergétique, mais qui ont une influence limitée sur la sphère d'évolution pour le SBSP (niveau international).

Au sujet du questionnaire, un panel plus représentatif et plus large aurait apporté un crédit plus important aux réponses collectées.

Nous sommes néanmoins convaincus que la technologie solaire spatiale présente des atouts importants pour intégrer le mix énergétique électrique de demain. Mais il serait utile et pertinent d'approfondir cette proposition afin d'en faire la promotion ou pourquoi pas d'influencer les raisonnements. Les enjeux du développement durable impliquent la modification de processus longs (consommation, éducation, industrialisation) alors que la nécessité de solutions, elle, se positionne sur un horizon court.

Dans un monde où l'intégralité des besoins énergétiques serait assouvie, le remède ne deviendrait-il finalement pas le poison ? En effet, encourager une consommation électrique à tout crin contribuera nécessairement à une déperdition thermique alimentant le réchauffement climatique.

Par conséquent, il semble nécessaire d'envisager un autre levier majeur du développement durable : l'approche de l'énergie par le prisme de la consommation en complément de celle traitée par la production. Ne faudrait-il pas aussi s'interroger sur nos usages pour réguler la consommation énergétique et équilibrer l'accès de tous à cette richesse ?

Bibliographie et Webographie

- ACKET, C., & YVON, M. (2013). *Bilan santé et sources d'énergie*. Consulté sur http://www.sfen.org/sites/default/files/public/atoms/files/bilan_sante_des_sources_d27energie.pdf
- ACTU-ENVIRONNEMENT. (2008, 11 juin). Le soleil, source d'énergie inépuisable. Récupéré 3 novembre, 2018, de https://www.actu-environnement.com/ae/dossiers/solaire/soleil_solaire.php4
- ADEME. (2017, janvier). Coûts des énergies renouvelables en France – ADEME. Récupéré 12 octobre, 2018, de <https://www.ademe.fr/couts-energies-renouvelables-france>
- AHMED, H. B, MULTON, B., & THIAUX, Y. (2011). *Consommation d'énergie, ressources énergétiques et place de l'électricité*. Consulté sur http://scholar.googleusercontent.com/scholar?q=cache:4tumXd4_qq4J:scholar.google.com/+Consommation+d%27%C3%A9nergie,+ressources+%C3%A9nerg%C3%A9tiques+et+place+d+e+%27%C3%A9lectricit%C3%A9&hl=fr&as_sdt=0,5
- AKRICH, M. (2006, 26 juin). Les utilisateurs, acteurs de l'innovation. Récupéré 12 octobre, 2018, de <https://halshs.archives-ouvertes.fr/halshs-00082051/document>
- AKRICH, M., CALLON, M., & LATOUR, B. (2009, 19 juin). A quoi tient le succès des innovations ? 1 : L'art de l'intéressement; 2 : Le choix des porte-parole. Récupéré 12 octobre, 2018, de <https://halshs.archives-ouvertes.fr/halshs-00081741/document>
- AMERICAN SECURITY PROJECT, (s.d), Space based Solar Power. Récupéré le 12 septembre, 2018, du <https://www.americansecurityproject.org/climate-energy-and-security/energy/future-investment/space-based-solar-power/>
- AMORCE. (2017). *L'élu et l'éolien*. Consulté sur www.ademe.fr/sites/default/files/assets/documents/elu-projet-eolien-010531.pdf.
- ASSOCIATION NEGAWATT. (2016, 22 juillet). Les énergies renouvelables font-elles reculer les énergies fossiles ? Récupéré 12 octobre, 2018, de <https://decrypterlenergie.org/les-energies-renouvelables-font-elles-reculer-les-energies-fossiles>
- BARENSKY, S. (2017, 30 novembre). Les vrais chiffres de la compétitivité d'Ariane 6 - Aerospatium. Récupéré 5 novembre, 2018, de <https://www.aerospatium.info/vrais-chiffres-de-la-competitivite-ariane-6/>

- BRUNDTLAND, G. H. (1987). *Notre avenir à tous*. Consulté sur https://www.diplomatie.gouv.fr/sites/odyssee-developpement-durable/files/5/rapport_brundtland.pdf
- CHARLEZ, P. (2017). *Croissance, énergie, climat : Dépasser la quadrature du cercle* (Ed. rev.). PARIS, BELGIQUE: De Boeck Supérieur.
- CHEVALIER, J. M, & GEOFFRON, P. (2017). *Les nouvelles guerres de l'énergie* (Ed. rev.). PARIS, FRANCE: Edition Eyrolles.
- CNES, (s.d) Règlements. Récupéré le 12 septembre 2018 de <https://debris-spatiaux.cnes.fr/fr/node/139>
- COMEEN. (s.d.). Développement Durable : définition, histoire et enjeux. Récupéré 12 septembre, 2018, de <https://e-rse.net/definitions/definition-developpement-durable/>
- COMMISSARIAT GENERAL AU DEVELOPPEMENT DURABLE. (2018). *Chiffres clés des énergies renouvelables*. Consulté sur http://www.statistiques.developpement-durable.gouv.fr/fileadmin/documents/Produits_editoriaux/Publications/Datalab/2018/datalab-35-cc-des-energies-renouvelables-edition-2018-mai2018-c.pdf
- CONSEIL PATRONAL DE L'ENVIRONNEMENT DU QUEBEC. (s.d.). *Guide de bonnes pratiques afin de favoriser l'acceptabilité sociale des projets*. Consulté sur www.cpeq.org/files/guides/guide_bonnespratiques_web.pdf.
- CRISWELL, D. R., & WALDRON, R. D. (1990, Août). Lunar system to supply solar electric power to Earth. In Proceedings of the 25th Intersociety Energy Conversion Engineering Conference p. 4
- DAGORN, G., & DESMAS, M. (2018, 12 février). Comment SpaceX s'est fait une place dans l'aérospatiale. Récupéré 5 novembre, 2018, de https://www.lemonde.fr/les-decodeurs/article/2018/02/07/comment-spacex-s-est-fait-une-place-dans-l-aerospatial_5253404_4355770.html
- EDF. (s.d.). Information sur l'origine de l'électricité fournie par Edf. Récupéré 23 août, 2018, de www.edf.fr
- FORSYTHE, M. (2017, 6 janvier). China Plans a Big Increase in Spending on Renewable Energy. *New York Times*, p. 6.
- FORSYTHE, M. (2017, 19 janvier). China Halts Plan to Build Power Plants Fired by Coal. *New York Times*, p. 8.
- GICQUEL, R., & GICQUEL, M. (2013). *Introduction aux problèmes énergétiques globaux* (Ed. rev.). PARIS, FRANCE: Presse des Mines.
- GOSSELIN, P. (2016, 22 février). Allemagne : le rêve d'un parc éolien offshore géant tourne au cauchemar. Récupéré 12 octobre, 2018, de

<https://www.contrepoints.org/2014/09/24/182200-alle-magne-le-reve-dun-parc-eolien-offshore-geant-tourne-au-cauchemar>

LANDAIS-BARRAU, P. (2014, 15 septembre). L'île de Nauru : du rêve au cauchemar. Récupéré 12 septembre, 2018, de <http://geopolis.francetvinfo.fr/lile-de-nauru-du-reve-au-cauchemar-42405>

LEBEAUX, A. (2018). *L'enfermement planétaire*. PARIS, FRANCE: Edition Gallimard.

LOILIER, T., & TELLIER, A. (2011). Que faire du modèle de l'innovation ouverte ? *Revue française de gestion*, 37(210), 69–85. <https://doi.org/10.3166/rfg.210.69-85>

JANCOVICI, J. M. (2011, 1 août). L'énergie, de quoi s'agit-il exactement ? – Jean-Marc Jancovici. Récupéré 23 septembre, 2018, de <https://jancovici.com/transition-energetique/l-energie-et-nous/lenergie-de-quoi-sagit-il-exactement/>

JANCOVICI, J. M. (2012, 1 août). Quel est le vrai coût de l'électricité ? – Jean-Marc Jancovici. Récupéré 12 octobre, 2018, de <https://jancovici.com/transition-energetique/electricite/quel-est-le-vrai-cout-de-lelectricite/>

KAPP, K. W. (1976). *Les coûts sociaux dans l'économie de marché*. <https://doi.org/10.7202/800687ar>

MANKINS, J. (2011). *Space Solar Power: The first international assessment of space solar power: Opportunities, issues and potential pathways forward*. *International Academy of Astronautics*. Consulté sur https://www.nasa.gov/pdf/716070main_Mankins_2011_PhI_SPS_Alpha.pdfw.cpeq.org/files/guides/guide_bonnespratiques_web.pdf.

MEADOWS, D. H., & RANDERS, J. (1972). *Limits to the Growth*. WHITE RIVER JUNCTION, USA: Chelsea Green Publishing Co..

MINISTERE FRANÇAIS DE L'ÉCOLOGIE DE L'ÉNERGIE ET DU DÉVELOPPEMENT DURABLE. (2013). Guide méthodologique Evaluation des impacts économiques, sociaux et environnementaux globaux des projets des pôles de compétitivité. Consulté sur http://competitivite.gouv.fr/documents/commun/Financements/Appels_a_projet/developpement-durable.pdf

MULTON, B., ROBIN, G., RUELLAN, M., & AHMED, H. B. (2012, 3 mars). Situation énergétique mondiale à l'aube du 3ème millénaire. Perspectives offertes par les ressources renouvelables. Récupéré 23 août, 2018, de <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-00676124/document>

NANSEN, R. (2009). *Energy crisis: Solution from space*. *Apogee Books*.. BURLINGTON, CANADA: Collector s Guide Publishing.

- PERAYA, D., & JACCAZ, B. (2004, 15 novembre). Analyser, soutenir, et piloter l'innovation : un modèle " ASPI ". Récupéré 23 septembre, 2018, de <https://edutice.archives-ouvertes.fr/edutice-00000705/document>
- QUEVREUX, G. (2018, 4 août). Le futur a déjà eu lieu à Nauru. Récupéré 12 septembre, 2018, de <https://philitt.fr/2018/04/23/le-futur-a-deja-eu-lieu-a-nauru/>
- SUMMERER, L., MANKINS, J., CELESTE, A., & KAYA, N. (2003, 21 mars). PRESENTATION DE L'ETAT DES RECHERCHES SUR LES CENTRALES SOLAIRES SPATIALES. Récupéré 23 août, 2018, de <https://www.science-sainte-rose.net/livres/Centrales%20Solaires%20Spatiales%20-%20La%20presentation%20au%20Senat.pdf>
- UNION DES COMITE D'INTERET LOCAUX DE LYON METROPOLE. (2016). *Le coût comparé de l'électricité selon la filière - Pour un choix futé de l'énergie*. Consulté sur http://cil-gerland-guillotiere.fr/wp-content/uploads/2016/05/ChoixFutéDEnergie_F4_Coût-par-source-1.pdf
- YANG YANG, YIQUN ZHANG, BAOYAN DUAN, DONGXU WANG, XUN LI (2016). A novel design project for space solar power station (SSPS-OMEGA). Key laboratory of Electronic Equipment Structure Design, Xidian University, Chine. Consulté sur https://www.researchgate.net/publication/286148246_SSPS-OMEGA_A_new_concentrator_system_for_SSPS
- ZELEM, M. C. (2012). *Les énergies renouvelables en transition : de leur acceptabilité sociale à leur faisabilité sociotechnique*. Consulté sur http://www.global-chance.org/IMG/pdf/Zelem_ENR_RevueNRJ-Dec2012.pdf

Nota bene : Construit selon les normes APA avec l'outil scribber.fr

WEBOGRAPHIE SPECIFIQUE AU SCORING

× **Solaire photovoltaïque**

In sun we trust. (2018, 26 septembre). Recyclage des panneaux solaires : plus facile qu'on ne le dit ! Récupéré 7 novembre, 2018, de

<https://www.insunwetrust.solar/blog/techno/recyclage-des-panneaux-solaires/>

Association Hespul. (2011, 21 mars). Les enjeux environnementaux. Récupéré 7 novembre, 2018, de <http://www.photovoltaïque.info/-Les-enjeux-environnementaux-.html>

× **Nucléaire**

Société Française d'Énergie Nucléaire. (s.d.). Le traitement des déchets | SFEN, Société Française d'Énergie Nucléaire. Récupéré 7 novembre, 2018, de

<http://www.sfen.org/energie-nucleaire/filiere-responsable/traitement-dechets>

Institut de la radioprotection et de la sûreté nucléaire. (s.d.). Quelle est la durée de vie d'une centrale ? Récupéré 7 novembre, 2018, de

https://www.irsn.fr/FR/connaissances/faq/Pages/duree_de_vie_d_une_centrale.aspx

Actu-environnement. (2018, 6 août). Le retraitement des déchets nucléaires reste illisible par le grand public. Récupéré 9 novembre, 2018, de <https://www.actu-environnement.com/ae/news/retraitement-dechets-nucleaires-illisible-grand-public-htctisn-31836.php4>

× **Eolien**

F4JR. (s.d.). Le démantèlement - Wiki Éolienne. Récupéré 7 novembre, 2018, de

https://eolienne.f4jr.org/projet_eolien/demantelement

France Energie Eolienne. (s.d.). Sondage exclusif CSA démontre la large acceptation des éoliennes par les Français habitant à proximité. Récupéré 7 novembre, 2018, de

<https://fee.asso.fr/pub/sondage-exclusif-csa-demontre-la-large-acceptation-des-eoliennes-par-les-francais-habitant-a-proximite/>

Energie +. (s.d.). Le rendement des éoliennes. Récupéré 7 novembre, 2018, de <https://www.energieplus-lesite.be/index.php?id=16657>

× **Hydroélectricité**

ROBERT, D. (2016, 1 avril). La réhabilitation des centrales hydroélectriques : Une vraie opportunité | Encyclopédie de l'Energie. Récupéré 7 novembre, 2018, de <http://encyclopedie-energie.org/articles/la-r%C3%A9habilitation-des-centrales-hydro%C3%A9lectriques-une-vraie-opportunit%C3%A9>

WWF (2005, 15 Novembre). To dam or not to dam ?

<https://d2ouvy59p0dg6k.cloudfront.net/downloads/2045.pdf>

× **Coûts**

Selectra SARL. (2018, 27 août). La production d'électricité en France en 2018 : répartition et coûts. Récupéré 7 novembre, 2018, de <https://prix-elec.com/energie/production>

JANCOVICI, J. M. (2012, 1 août). Quel est le vrai coût de l'électricité ? – Jean-Marc Jancovici. Récupéré 12 octobre, 2018, de <https://jancovici.com/transition-energetique/electricite/quel-est-le-vrai-cout-de-lelectricite/>

ADEME. (2017, janvier). Coûts des énergies renouvelables en France – ADEME. Récupéré 12 octobre, 2018, de <https://www.ademe.fr/couts-energies-renouvelables-france>

× **Payback time**

Techniques de l'ingénieur. (2016, 29 Décembre). Le taux de retour énergétique, une mesure de l'efficacité sociétale des sources d'énergies. Récupéré 7 novembre, 2018, de <https://www.techniques-ingenieur.fr/actualite/articles/chronique-retour-energetique-39038/>

× **Facteur de charge**

Connaissance des énergies. (2016, 11 Août). Qu'est ce que le facteur de charge d'une unité de production électrique. Récupéré 7 novembre, 2018, de <https://www.connaissancedesenergies.org/qu-est-ce-que-le-facteur-de-charge-d-une-unite-de-production-electrique-120305>

× **Bilan carbone**

ADEME. (s.d.). Documentation Base Carbone. Récupéré 9 novembre, 2018, de http://www.bilans-ges.ademe.fr/documentation/UPLOAD_DOC_FR/index.htm?renouvelable.htm

Hydrauxois. (s.d.). Le bilan carbone de l'énergie hydraulique. Récupéré 9 novembre, 2018, de <http://www.hydrauxois.org/2013/03/le-bilan-carbone-de-lenergie-hydraulique.html>

× **Rendement au m²**

Reyne, M. (2014, 2 février). Bilan quantitatif des modes de production d'énergie électrique. Récupéré 9 novembre, 2018, de <https://entrepreneurs-pour-la-france.org/Libres-propos/Bilan-quantitatif-des-modes-de-production-d-energie-electrique>

Combien d'éoliennes pour remplacer la centrale nucléaire de Fessenheim ? (s.d.). Récupéré 9 novembre, 2018, de http://ecolo.org/documents/documents_in_french/eole-Fessenheim-combien.html

Moatti, A. (3012, 30 août). Nucléaire vs Eolien : rendement à l'hectare. Récupéré 9 novembre, 2018, de <http://www.maths-et-physique.net/article-nucleaire-vs-eolien-rendement-a-l-hectare-109569951.html>

Table des illustrations

Figure I-1 : Les énergies renouvelables de la préhistoire à nos jours (source : Centre national d'histoire des sciences NCGW)	5
Figure I-2 : Les stades de l'énergie (source : réseaux chaleur CEREMA)	6
Figure I-3 : Evolution de la consommation d'énergie et de la population mondiale (source : J.M. Jancovici)	8
Figure I-4 : La croissance énergétique 1970-2030 (source : AIE/BP Statistical Review)	9
Figure I-5 : Energy Efficiency 2017, World Energy Outlook 2016, World Energy Statistics and Balances 2017, IEA	12
Figure I-6 : Projection de l'échelle de Kardashev (source : International Energy Agency World Energy Outlook)	13
Figure I-7 : Maillage tridimensionnel d'un modèle climatique (© Vincent Landrin, d'après Laurent Fairhaid/LMD /CNRS)	13
Figure I-8 : Les différentes technologies de stockage en fonction de leur puissance et du temps de décharge (autonomie) (source : IFP Energies nouvelles)	15
Figure I-9 : Smart Grid (d'après l'Agence internationale de l'énergie)	16
Figure I-10 : Les trois piliers du développement durable (source : www.e-rse.net)	22
Figure I-11 : Synthèse de l'évolution de la mobilisation politique sur le climat (établie par les auteurs)	25
Figure I-12 : Les périodes énergétiques & Evolution de la consommation d'énergie par personne, en moyenne mondiale, depuis 1860, bois inclus (mais ce dernier n'alimente quasiment jamais une machine industrielle ou un véhicule) (modification établie par les auteurs)	27
Figure I-13 : Consommation mondiale d'énergie primaire par source en 2000, solde entre 2000 et 2015, et taux moyen de croissance annuelle par source entre 2000 et 2015 (selon les conventions utilisées par BP)	29
Figure I-14 : Evolution de la production mondiale d'électricité par source et par tranche de cinq ans sur la période 2000-2014 (source : AIE)	30
Figure I-15 : Répartition en pourcentage, par tranche de 5 ans, de l'évolution de la consommation mondiale d'énergie primaire par source entre 2000 et 2015 (selon les conventions utilisées par BP)	30
Figure I-16 : Illustration énergie de demain selon NANSEN (établie par les auteurs)	31
Figure I-17 : Comparaison des ressources énergétiques et des besoins énergétiques mondiaux (source : R. PEREZ)	32
Figure I-18 : EnR : Dépendances et limites (établie par les auteurs)	33
Figure I-19 : De l'énergie primaire au réseau électrique (établie par les auteurs)	34
Figure I-20 : Calcul coût de l'énergie, de l'énergie primaire au réseau électrique (établi par les auteurs)	36
Figure I-21 : Coût de production (kWh) par rapport à au coût d'investissement initial (source : J.M. JANCOVICI)	37
Figure I-22 : Calcul du coût actualisé de l'énergie (source : J.M. JANCOVICI)	39
Figure I-23 : Coût de production & actualisation (source : J.M. JANCOVICI)	39

Figure I-24 : Coûts complets (estimation) comparés (source : ADEME, 2016)	41
Figure I-25 : Les sources d'énergie - diagramme de synthèse (établi par les auteurs)	43
Figure I-26 : Les facteurs clés de succès (document établi par les auteurs)	44
Figure I-27 : Echelle TRL (source : www.entreprise.gouv.fr)	47
Figure II-1 : Tableau comparatif des différents SPS (adapté par les auteurs)	52
Figure II-2 : Coût de production en fonction du coût de lancement (source : J. Mankins)	53
Figure II-3 : Approche du coût complet du solaire spatial (établie par les auteurs)	56
Figure II-4 : Tableau PESTEL (établi par les auteurs)	60
Figure II-5 : Modèle d'Edison complété (établi par les auteurs)	64
Figure III-1 : Coût de lancement selon SpaceX (source : spacex.com)	85
Figure III-2 : Tableau sur le potentiel coût complet de production selon trois variables : heures d'arrêt annuelles, charges d'exploitation, coût de lancement (établi par les auteurs)	86
Figure III-3 : Graphique comparatif des coûts complets intégrant le SBSP (source ADEME modifié par les auteurs)	87
Figure III-4 : Graphique coût/taux d'actualisation pour le SBSP (établi par les auteurs)	88