



وزارة البحث العلمي والتعليم العالي
MINISTÈRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPÉRIEUR ET DE
LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE
جامعة عبد الحميد بن باديس مستغانم
Université Abdelhamid Ibn Badis Mostaganem
كلية العلوم والتكنولوجيا
Faculté des Sciences et de la Technologie
DEPARTEMENT DE GENIE DES PROCÉDES



N° d'ordre : M2...../GC/2020

MEMOIRE DE FIN D'ETUDES DE MASTER ACADEMIQUE

Filière : Génie des procédés

Option : Génie Chimique

Thème

**Choix d'un meilleur stockage d'énergie solaire par
L'utilisation de la méthode TOPSIS floue**

Présenté par

1-BOUZIDI SARA

2-CHEBOUB HOURIA

Soutenu le 30/06/ 2020 devant le jury composé de :

Président : M^{elle} DELLALI Halima

Grade : MAA

Université de Mostaganem

Examineur : Mr MEKHATRIA Djilali

Grade : MCB

Université de Mostaganem

Rapporteur : M^{me} BOUBEGRA Naima

Grade : MCA

Université de Mostaganem

Année Universitaire 2019/2020

Remerciement

Ce mémoire correspond avec la fin d'une étape qui sera, probablement, l'une des plus belles étapes de ma vie. C'est donc, un moment important, qui n'aurait pas été possible sans certaines personnes qui m'ont accompagné et guidée, qui ont été à mes côtés pendant toutes ces années et qui ont fait de ces années une grande aventure.

Nous tenons à remercier tout d'abord, le bon Dieu de nous avoir donné la puissance, le courage ainsi que la volonté pour avoir réalisé Cette étude.

Il est surtout grand temps de dire merci à les enseignants qui ont planté la graine de la connaissance en nous, qui ont nourri notre esprit et insufflé des rêves. Merci à tous nos professeurs, merci de leur patience et leur écoute ; sans enseignants la vie n'aurait pas de classe

À madame HAMZAOUI NAIMA,

Vous m'avez fait l'honneur d'accepter de diriger et de présider ce travail, pour m'avoir donné la possibilité de travailler sur ce thème et, de m'avoir suivie dans sa réalisation avec beaucoup de compétence, d'enthousiasme et de disponibilité. Soyez assuré de ma profonde reconnaissance et de ma très haute considération.

Je voudrais exprimer à toute ma famille, et plus particulièrement à mes parents, qui n'ont cessé de me soutenir et de m'encourager à tout moment, mes sœurs aussi et mon frère, ma profonde reconnaissance pour leur patience et leur réconfort dans les moments de doutes et de découragements, Je ne saurai passer sous silence l'apport inestimable des autres membres de ma famille.

Je rends hommage et j'exprime ma reconnaissance à tous ceux qui ont contribué, de près ou de loin, à la réalisation de ce travail.

Nos profonds remerciements et notre gratitude vont aussi aux membres du jury ; Melle DELLALI Halima et Mr MEKHATRIA Djilali, pour avoir d'examiner notre travail.

Merci à tous

Résumé

L'énergie renouvelable en Algérie est l'un des sujets qui retient l'attention du gouvernement et la société, en raison des ressources naturelles disponibles dans le domaine ; est un alternatif aux énergies fossiles, cette dernière a gravement endommagé l'environnement ces dernières années, notamment en termes d'émissions de gaz polluants, l'atmosphère et la mer, et il s'agit d'une énergie limitée, soit en ressources, soit en capacité de l'atmosphère à traiter les problèmes engendrés par les (CO_x , NO_x) et (SO_x). L'énergie renouvelable est constituée d'une famille de 5 membres qui sont : l'énergie solaire, l'énergie éolienne, biocarburant, l'énergie géothermique et l'énergie hydrique.

Dans notre travail, on va aborder l'énergie solaire, qui est l'énergie électromagnétique transmise par le soleil. Elle est générée par la fusion nucléaire de l'hydrogène, elle se caractérise par deux types d'énergies et chaque type présente également des avantages et des inconvénients.

Après avoir étudié l'énergie solaire en détail, nous étudierons également le stockage avec ses différentes techniques, mais le problème reste de trouver la meilleure technique de stockage avec le respect des critères de sécurité économique, écologiques, et d'efficacité. On va travailler avec une méthode d'analyse multicritères à l'aide d'Excel pour connaître le meilleur choix, cette méthode est appelée TOPSIS floue proposée par Hwang et Yoon en 1981, et basée sur la recherche de l'alternative la plus proche de la solution idéale.

• **Les mots clés** : énergie renouvelable, énergie fossile, l'énergie solaire, stockage d'énergie, TOPSIS floue, Excel

Abstract

Renewable energy in Algeria is one of the topics that holds the attention of the government and society, because of the natural resources available in the field; is an alternative to fossil fuels, the latter has seriously damaged the environment in recent years, especially in terms of emissions of polluting gases, the atmosphere and the sea, and it is a limited energy, either in resources or in the capacity of the atmosphere to deal with the problems caused by (CO_x, NO_x) and (SO_x). Renewable energy is made up of a family of five members, which are solar energy, wind energy, biofuel, geothermal energy and water energy.

In our work, we will discuss solar energy, which is the electromagnetic energy transmitted by the sun. It is generated by the nuclear fusion of hydrogen, two types of energy characterize it and each type has advantages and disadvantages.

After studying solar energy in detail, we will also study storage with its different techniques, but the problem remains to find the best storage technique with respect to economic safety, ecological and efficiency criteria. We will work with a multi-criterion analysis method using Excel to know the best choice, this method is called fuzzy TOPSIS proposed by Hwang and Yoon in 1981, and based on the search for the closest alternative to the ideal solution.

• **Keywords:** renewable energy, fossil energy, solar energy, energy storage, fuzzy TOPSIS, Excel

ملخص

تعتبر الطاقة المتجددة في الجزائر من المواضيع التي تحظى باهتمام كبير من قبل الحكومة والمجتمع، بسبب الموارد الطبيعية المتوفرة في هذا المجال؛ إذ هو بديل للوقود الأحفوري، وقد تسبب هذا الأخير في إلحاق أضرار جسيمة بالبيئة في السنوات الأخيرة، خاصة من حيث انبعاثات الغازات الملوثة والغلاف الجوي والبحر، وهي طاقة محدودة، سواء في الموارد، أو في قدرة الغلاف الجوي على التعامل مع المشاكل التي تسببها الغازات التالية (NOx، COx) و (SOx).

تضم الطاقة المتجددة خمسة أنواع من الطاقة: الطاقة الشمسية وطاقة الرياح والوقود الحيوي والطاقة الحرارية الأرضية بالإضافة إلى طاقة المياه.

سنناقش في عملنا الطاقة الشمسية، وهي طاقة كهرومغناطيسية تنقلها الشمس. تتولد عن طريق الاندماج النووي للهيدروجين، وتتميز هي الأخيرة بنوعين من الطاقة، ولكل نوع أيضاً مزايا وعيوب.

بعد دراسة الطاقة الشمسية بالتفصيل الممل، سنقوم أيضاً بدراسة تقنيات التخزين المتعددة، ولكن تبقى المشكلة في العثور على أفضل تقنية تخزين مع احترام المعايير الأمنية والاقتصادية والبيئية.

سنعتمد في دراستنا على طريقة التحليل المتعدد المعايير بمساعدة برنامج Excel لمعرفة الخيار الأفضل، وتسمى هذه الطريقة Fuzzy TOPSIS التي اقترحها Yoon وHwange في عام 1981، وتستند إلى البحث عن أقرب بديل لـ الحل المثالي.

● **الكلمات المفتاحية:** الطاقة المتجددة، الطاقة الأحفورية، الطاقة الشمسية، تخزين الطاقة، Excel، TOPSIS

Sommaire

- Remerciement	
- Résumé	
- Abstract	
- ملخص	
- liste des figures	
- liste des tableaux	
- Introduction générale.....	1
Chapitre I	l'énergie renouvelable en Algérie
Généralité sur l'énergie renouvelable	5
Le développement d'énergie renouvelable en Algérie, politique et programme.....	11
Potentiel des énergies renouvelables en Algérie	15
Conclusion.....	22
Chapitre II	connaitre l'énergie solaire
Qu'est-ce qu'une énergie solaire ?	24
Solaire photovoltaïque.....	25
Solaire thermique	29
Conclusion.....	33
Chapitre III	stockage d'énergie renouvelable
Pourquoi stocker de l'énergie ?.....	35
Les techniques de stockage de l'énergie renouvelable	36
Conclusion.....	70
Chapitre IV	méthodologie de comparaison
Les méthodes de l'analyse multicritère d'aide à la décision	72
Descriptions de la méthode d'TOPSIS floue	73
Les étapes d'application de la méthode d'TOPSIS floue	74
Conclusion.....	77
Chapitre V	adaptation de la méthode TOPSIS floue pour le choix d'un meilleur stockage d'énergie solaire
Choix de la méthode TOPSIS floue	79
Application numérique	81
Conclusion.....	93
- Conclusion générale	94
- Bibliographie	96

Liste des figures

Chapitre I

Figure I.1 : Éolienne moderne	07
Figure I.2 : la consistance du programme en énergie renouvelable à réaliser pour le marché national sur la période 2015-2030	14
Figure I.3 : Carte de l'Irradiation Globale Directe Annuelle Moyenne (Période 2002-2011)..	16
Figure I.4 : Carte du Vent Annuel Moyen à 50m (Période 2001-2010)	17
Figure I.5 : Zone à fort potentiel géothermique en Algérie.....	18
Figure I.6 : Une centrale hybride Solaire-Gaz	21
Figure I.7 : Une ferme Éolienne	21
Figure I.7 : Une centrale pilote photovoltaïque.....	21

Chapitre II

Figure II.1 : les ressources thermiques au monde	24
Figure II.2 : Constitution d'une cellule photovoltaïque (Connaissance des Énergies, d'après CEA).....	26

Chapitre III

Figure III.1 : Schéma de fonctionnement de la technique CAES isochoire adiabatique souterrain	37
Figure III.2 : Schéma de fonctionnement de la technique CAES isotherme de surface	39
Figure III.3 : Schéma de fonctionnement de la technique CAES isobare adiabatique de surface	40
Figure III.4 : Schéma de fonctionnement de la technique hydropneumatique / oléopneumatique de surface	42
Figure III.5 : Schéma de fonctionnement de la technique du pompage thermique	43
Figure III.6 : Schéma de fonctionnement de la technique de stockage-PAC.....	44

Liste des figures

Figure III.7 : Schéma de fonctionnement de la technique de stockage par batterie plomb-acide (Pb-A).....	46
Figure III.8 : Schéma de fonctionnement de la technique de stockage par batterie lithium-ion (Li-Ion)	48
Figure III.9 : Schéma de fonctionnement de la technique de stockage par batterie zinc-air (Zn-air)	49
Figure III.10 : Schéma de fonctionnement de la technique de stockage par batterie sodium soufre (Na-S).....	51
Figure III.11 : Schéma d'une batterie ZEBRA lors de la décharge	52
Figure III.12 : Schéma fonctionnel de la technique de stockage par batterie à circulation zinc-bromine (Zn-Br)	54
Figure III.13 : Schéma fonctionnel de la technique de stockage À circulation Vanadium-Vanadium (VRB)	55
Figure III.14 : Schéma fonctionnel de la technique de stockage par les Supercondensateurs .	57
Figure III.15 : Volant d'inertie à basse vitesse.....	58
Figure III.16 : Volants d'inertie haute vitesse	59
Figure III.17 : Schéma de la production d'hydrogène par électrolyse	60
Figure III.18 : Schéma de la production du méthane par conversion catalytique du CO ₂	62
Figure III.19 : Schéma de stockage par la glace	63
Figure III.20 : Schéma de stockage par paraffine	64
Figure III.21 : Schéma de stockage d'eau chaude à pression atmosphérique	66
Figure III.22 : Principe de fonctionnement d'un stockage par sel fondue.....	67
Figure III.23 : Principe de fonctionnement d'un stockage thermochimique de chaleur par Alumino-phosphate	68

Chapitre IV

Figure IV.1 : la recherche de l'alternative la plus proche de la solution idéale	74
--	----

Liste des tableaux

Chapitre I

Tableau I.1 : rendement en éthanol des plantes sucrières et les plantes amylacées	08
Tableau I.2 : Potentiel solaire en Algérie	15
Tableau I.3 : Parc de production hydroélectrique en Algérie.....	19
Tableau I.4 : Occupation des terres forestières en Algérie.....	20

Chapitre V

Tableau V.1 : Variables linguistiques pour le poids d'importance de chaque critère	77
Tableau V.2 : Variables linguistiques pour les alternatives (techniques de stockage).....	77
Tableau V.3 : Variables linguistiques pour décideur 1	78
Tableau V.4 : Variables linguistiques pour décideur 2	78
Tableau V.5 : Variables linguistiques pour décideur 3	78
Tableau V.6 : Variables triangulaire pour chaque décideur	79
Tableau V.7 : matrice de décision floue pour un poids agrégée	80
Tableau V.8 : matrice de décision floue avec les valeurs triangulaire des poids agrégée.....	81
Tableau V.9 : types de critères	81
Tableau V.10 : normalisation de la matrice de décision floue	82
Tableau V.11 : la matrice de décision floue pondérée	83
Tableau V.12 : la solution idéale positive et négative.....	83
Tableau V.13 : Distance entre chaque alternative par rapport à FBIS	84
Tableau V.14 : Distance entre chaque alternative par rapport à FNIS	84
Tableau V.15 : coefficients de proximité et rangement des alternatives (type1)	84
Tableau V.16 : Variables linguistiques pour décideur 1 (type2).....	85
Tableau V.17 : Variables linguistiques pour décideur 2 (type2).....	85
Tableau V.18 : Variables linguistiques pour décideur 3 (type2).....	85
Tableau V.19 : Variables triangulaire pour chaque décideur (type2)	86
Tableau V.20 : matrice de décision floue pour un poids agrégée	86
Tableau V.21 : matrice de décision floue avec les valeurs triangulaire des poids agrégées (type2)	86
Tableau V.22 : normalisation de la matrice de décision floue (type2).....	87

Liste des tableaux

Tableau V.23 : la matrice de décision floue pondérée (type2).....	87
Tableau V.24 : la solution idéale positive et négative (type2)	87
Tableau V.25 : Distance entre chaque alternative par rapport à FBIS	88
Tableau V.26 : Distance entre chaque alternative par rapport à FNIS (type2)	88
Tableau V.26 : coefficients de proximité et rangement des alternatives (type2)	88

Introduction générale

Introduction générale

Les énergies renouvelables finiront par remplacer les énergies fossiles ; mais quand peut dire, énergies fossiles et, énergies renouvelables ?

Il y a environ 300 millions d'années les arbres et les végétaux ont été enfouis et ont subi une transformation appelée fossilisation cela a donné le pétrole, le charbon et le gaz.

Les énergies fossiles sont en quantités limitées, elles mettent un temps énorme à se former, alors ces énergies ne sont pas renouvelables, par exemple il faut plus de dix mille ans pour que le pétrole se forme.

Depuis leur utilisation par l'homme les réserves s'épuisent rapidement, car les énergies fossiles représentent plus de 75% de la consommation mondiale d'énergie, de plus leur combustion est responsable de la production de (CO₂), qui est un gaz à effet de serre responsable du réchauffement climatique.

C'est la raison pour laquelle le monde tente de se tourner vers des énergies dites renouvelables , C'est des énergies inépuisables et peu polluantes; qui pourraient éviter à la planète un réchauffement dangereux pour la vie sur terre, on compte donc, l'énergie solaire (dont la source est le soleil) , L'énergie éolienne (dont la source est l'air en mouvement), l'hydraulique (dont la source est l'eau en mouvement), ou bien la géothermique (par exemple le magma comme une source d'énergie), et on peut encore mentionner ce qu'on appelle la biomasse.

L'urgence de la situation écologique de notre planète nous oblige à multiplier partout dans le monde les énergies renouvelables pour remplacer progressivement les énergies fossiles ; c'est le moment de devenir vert.

Introduction générale

Ces dernières années ; produire de l'électricité avec du soleil ou du vent est devenu moins cher qu'avec des énergies conventionnelles polluantes, en effet les énergies renouvelables comme l'énergie solaire, sont non seulement plus écologique mais elles sont aussi deux fois moins chères que l'énergie classique fossile grâce à la baisse spectaculaire du prix des panneaux solaires, et leurs procédés faciles.

En plus d'être la moins chère ; l'énergie solaire est extrêmement abondante, deux régions pleines de panneaux solaires dans le Sahara d'Algérie permettront d'alimenter la planète entière en électricité, dans ce contexte une question se pose, pourquoi on ne les développe pas plus rapidement ces énergies écologiques ? Et si l'énergie solaire est si peu chère et si abondante, pourquoi n'est-elle pas notre source d'énergie principale ? Tout simplement on rencontre toujours un problème d'intermittence (le jour il y a du soleil mais la nuit il n'y a pas).

L'énergie solaire arrive d'une manière concentrée au milieu de la journée, mais notre consommation elle est plutôt constante, et les énergies renouvelables ne produisent pas l'énergie d'une manière constante. Et en plus on rencontre le problème concernant les conditions climatiques.

La seule solution pour ces problèmes est le stockage des énergies renouvelables. Stocker de l'énergie n'est pas un problème technologique, c'est un problème économique. Car les moyens de stockage coûtent extrêmement cher.

L'Algérie est probablement le pays Africain et Méditerranéen disposant du potentiel d'énergie renouvelable le plus important à l'échelle régionale, de même que les capacités les plus appropriées au développement et à l'exploitation de ce potentiel. Un potentiel énergétique lié à plusieurs types de sources, mais dont l'énergie solaire demeure la plus importante en disponibilité et puissance au monde et, la plus compétitive à développer à l'avenir sous diverses formes.

L'Algérie est en effet l'un des plus importants gisements d'énergie solaire au monde avec une durée d'insolation de 2.000 à 3.900 heures par an, et une irradiation journalière de 3.000 à 6.000 Wh/m², soit l'équivalent de 10 fois la consommation mondiale.

Introduction générale

Cette étude vise à répondre à une problématique qui est de trouver la meilleure technique de stockage d'une énergie renouvelable ; nous avons choisi comme cas d'étude le stockage de l'énergie solaire.

On va adapter une méthode numérique (TOPSIS floue) pour identifier la meilleure technique de stockage d'énergie solaire.

Pour répondre au grand problème du stockage on va aborder cinq chapitres dans notre étude :

- l'énergie renouvelable en Algérie.
- connaître l'énergie solaire.
- stockage d'énergies renouvelables
- méthodologie de comparaison
- adaptation de la méthode TOPSIS floue pour le choix d'un meilleur stockage d'énergie solaire.

Chapitre I

L'énergie renouvelable en Algérie

Généralités sur l'énergie renouvelable

Le monde d'aujourd'hui s'est accoutumé aux énergies fossiles en voie d'extinction à cause de la demande toujours croissante, les énergies fossiles sont limitées, soit en ressources, soit en capacité de l'atmosphère à absorber les émissions de CO_x, NO_x et SO_x.

La tendance est à rechercher d'autres alternatives en matière d'énergie qui doivent être propres, inépuisables et, renouvelables, sans incidence sur l'environnement et surtout moins chères [1].

Les énergies renouvelables constituent une famille de 5 membres :

- Énergie solaire.
- Énergie éolienne.
- Biocarburant.
- Énergie géothermique.
- Énergie hydrique [1].

Qu'est-ce que l'énergie renouvelable ?

Une énergie est dite renouvelable lorsqu'elle provient de sources qui se renouvellent en permanence, une énergie non renouvelable s'épuise.

Les sources énergies renouvelables sont des sources d'énergie dont le renouvellement naturel est rapide, donc inépuisables à l'échelle du temps humain.

Une énergie est renouvelable si sa quantité est infinie à l'échelle humaine sources d'énergie renouvelables sur terre, le rayonnement solaire et l'attraction de la lune.

Le vent est une énergie solaire. Il apparaît lors de différences de températures entre deux masses d'air ; il est créé par l'énergie solaire.

Et si elle provient d'une source qui se reconstitue plus rapidement qu'elle n'est utilisée.

"Une énergie renouvelable est une énergie exploitée par l'homme, de sorte que ses réserves ne s'épuisent pas. En d'autres termes, sa vitesse de formation doit être plus grande que sa vitesse d'utilisation".

Le caractère renouvelable d'une énergie est fonction de la vitesse de régénération de la source et celle à laquelle elle est consommée.

Par opposition, une énergie non renouvelable est une énergie dont la vitesse de consommation est bien supérieure à celle de sa création ou de sa régénération [1].

L'énergie Solaire

Qu'est-ce que l'énergie solaire ?

C'est une énergie électromagnétique transmise par le soleil. Elle est générée par la fusion nucléaire de l'hydrogène. Elle est à l'origine de toute forme de vie terrestre (420 trillions de kWh). C'est la plus importante de toutes les énergies dans ce monde. Cette énergie est utilisée pour sa lumière, sa chaleur depuis l'aube de l'humanité. On distingue des types d'énergie solaire [1] ; solaire photovoltaïque et solaire thermique, on va les voir en détail dans le chapitre 2.

L'énergie solaire est à l'origine :

- Du cycle de l'eau
- Du vent
- De la photosynthèse végétale.
- La production d'électricité
- La production de la chaleur (chaude et froide)
- La potabilisation de l'eau (distillation & désinfection)
- La cuisson
- La production de fours à haute température [1].

Énergie éolienne

Le vent est une source d'énergie propre renouvelable quasi infinie. Il naît de processus cycliques (rotation terrestre, convection chaud/froid, etc.) appliqués à l'atmosphère et à l'air.

D'où vient le vent ?

C'est de l'air en déplacement à cause des différences de température et de pression dans l'atmosphère. L'air chaud est plus léger que l'air froid. Quand le Soleil chauffe la mer ou le sol, l'air qui se trouve juste au-dessus se réchauffe, s'allège, et monte, en poussant l'air froid qui est au-dessus.

L'air froid étant plus lourd, descend et vient remplacer l'air chaud, puis il se réchauffe à son tour, et ainsi de suite.

Le phénomène du vent est accentué par la forme de la terre qui est ronde.

La terre n'est pas chauffée partout de la même manière par le soleil. Car la chaleur n'est pas absorbée de la même manière par la mer ou par le sol, ce qui provoque un déplacement vertical et horizontal de la masse d'air [1].

Qu'est-ce qu'une éolienne ?

C'est un Aérogénérateur.

Qu'est-ce qu'un Aérogénérateur ?

Dispositif qui transforme une partie de l'énergie cinétique du vent en énergie mécanique (arbre de transmission) et ou en énergie électrique (une génératrice).

Les premières éoliennes apparaissent au XIXe siècle aux États-Unis et sont utilisées pour le pompage de l'eau. Elles sont constituées d'un pylône surmonté d'un axe horizontal avec plusieurs pales. Le vent fait tourner les pales et grâce à un système mécanique transforme le mouvement de rotation en mouvement de va-et-vient ce qui permet d'actionner un piston qui aspire l'eau [1].

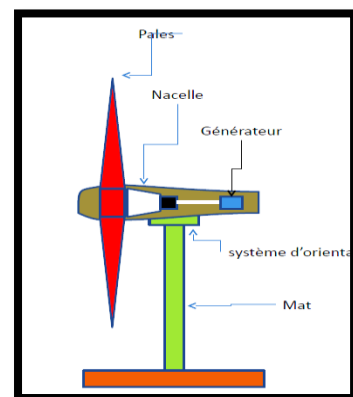
Fonctionnement d'une éolienne

1. Le vent fait tourner les pales de l'éolienne qui elles-mêmes font tourner le générateur.
2. L'énergie mécanique produite va être transformée par ce générateur en énergie Électrique. C'est le même principe que pour une dynamo ou un alternateur de voiture.
3. L'électricité est dirigée vers le réseau électrique ou des batteries de stockage. Grâce à un multiplicateur (système d'engrenage), la vitesse de rotation des pales (Entre 15 et 30 tours/minute) est multipliée afin de faire tourner le générateur entre 1000 et 2000 tours/minute.

Les composants d'une éolienne :

- Le mât dont la hauteur va de 20 à plus de 100m.
- La nacelle qui contient le moteur
- Le rotor comprenant le nez et les Pales d'un diamètre

De 3 à 90 m. On compte généralement 3 pales sur les Éoliennes modernes [1].



(Figure I.1 : Éolienne moderne)

Les biocarburants

Parmi les solutions envisagées : les biocarburants ; leur développement s'est le plus accéléré ces dernières années, actuellement la diffusion des biocarburants est à l'échelle de la planète.

Les différents types de biocarburants

On distingue deux principaux types de biocarburants : ceux qui sont mélangés avec des essences et ceux qui sont mélangés avec du diesel.

L'éthanol

Ce biocarburant est utilisé pour les moteurs de types essence, il est produit à partir des plantes sucrières (cannes à sucre, betterave) et les plantes amylacées (blé, maïs).

L'usage de l'éthanol est plus répandu au Brésil et aux États-Unis [1].

Principe

La fermentation transforme les sucres en éthanol, cette opération est suivie par une distillation pour séparer l'alcool de l'eau. L'éthanol est utilisé sous forme de mélange (teneurs de 5% à 10%).

D'autres produits sont apparus aujourd'hui ; Il s'agit :

- des esters méthyliques d'huile animale.
- des esters éthyliques d'huile végétale
- diesel de synthèse issu d'une opération d'hydrogénation d'huile végétale [1].

	Canne à sucre	Betterave sucrière	maïs (grain)	Blé (grain)
Rendement agricole (t/ha)	80 - 90	65 -75	7,2 - 8,5	7,2 - 8,5
Teneur en sucre ou en amidon (% masse)	14 - 15	15	72	62 - 65
Rendement en éthanol(t/ha)	5,6 - 6,4	5,2 - 5,6	2,3 - 2,7	2,1 - 2,5

(Tableau I.1 : rendement en éthanol des plantes sucrières et les plantes amylacées).

Le biodiesel

Le biodiesel est produit en Europe à partir d'huile végétale de colza ou de tournesol. Autrefois, l'huile, après purification, pouvait être utilisée directement comme carburant dans les premiers moteurs diesel.

Les procédés de production

Faire réagir l'huile végétale avec du méthanol pour la transformer en « ester », un ester méthylique d'huile végétale plus connu sous le nom de diester. C'est la transestérification le principal sous-produit est la glycérine [1].

Le biogaz

Le biogaz c'est le gaz naturel renouvelable, il est issu de la dégradation de la matière organique en un gaz combustible composé d'un seul hydrocarbure, le méthane.

Les différents types de biogaz :

- Les biogaz involontaires
- Le gaz des marais, des lacs,
- Le gaz entérique du règne animal,
- Le gaz des enfouissements de matière organique (décharges, etc.).
- Production organisée par l'homme [1].

Énergie géothermique

La géothermie, du grec Géo (terre) et Thermos (chaleur) ; est une énergie thermique contenue dans la Terre, c'est l'ensemble des procédés pour l'extraction et la valorisation industrielle de la chaleur interne de la terre.

La ressource géothermale est constituée d'une :

- source de chaleur qui peut être soit le flux thermique terrestre local ou une intrusion magmatique à très hautes températures relativement proche de la surface (5 à 10 km).
- formation rocheuse (aquifère) ; est plus ou moins compacte, poreuse fissurée ou fracturée.

Types de géothermie

- Géothermie très basse énergie (température 10 à 30°C) : peu profonde (moins de 1 500 m).
- Géothermie basse énergie (30°>température>90°C). Elle est profonde (plus de 150m).
- Géothermie à très haute énergie (température > à 150°C) : elle est très profonde.
- Géothermie haute énergie (température 90 à 150°C) : elle est très profonde [1].

Énergie hydrique

L'énergie hydroélectrique (hydrique), nécessite un cours d'eau ou une retenue d'eau.

Une centrale exploite l'énergie potentielle créée par le dénivelé de la chute d'eau.

Elle se compose d'un réservoir, d'une chute d'eau caractérisée par sa hauteur.

L'énergie hydraulique est convertie en électricité par le passage de l'eau dans une turbine reliée à un alternateur. La puissance de la centrale est fonction du débit d'eau.

L'eau, principale source d'énergie utilisée dans l'industrie pendant 4000 ans. La première machine construite a été la roue à aubes. Il s'agit d'une roue munie de palettes tout autour ; au contact du courant, la pression de l'eau sur les palettes fait tourner la roue.

L'axe passant par le centre de la roue est relié à une lourde meule en pierre qui sert à moudre le grain (la plupart de ces premiers moulins faisaient tourner des meules pour faire de la farine, mais ils ont aussi été utilisés pour d'autres tâches, comme actionner des marteaux ou des soufflets dans les forges).

Différents types de centrales hydriques

Classées par type d'aménagement :

- La centrale au fil de l'eau (la centrale est sur un fleuve, le débit est important, le réservoir est petit, la hauteur de chute est faible).
- La centrale de lac (la centrale comporte un réservoir important : le lac artificiel, le lac est maintenu par un barrage) [1].

Le développement d'énergie renouvelable en Algérie, politique et programme

L'Algérie dispose d'un important capital inépuisable en énergies renouvelables, qui est en mesure d'être exploité facilement et proprement. L'intégration en long terme des énergies renouvelables dans d'offre énergétique du pays joue un rôle important dans l'économie d'énergie et l'efficacité énergétique. Ce dernier permet, à travers une bonne maîtrise du rythme de croissance de la demande mondiale d'énergie, une meilleure planification des investissements nécessaires à la satisfaction des besoins énergétiques.

L'Algérie amorce une dynamique d'énergie verte en lançant un programme ambitieux de développement des énergies renouvelables (EnR) et d'efficacité énergétique. Cette vision du gouvernement algérien s'appuie sur une stratégie axée sur la mise en valeur des ressources inépuisables comme le solaire et leur utilisation pour diversifier les sources d'énergie et préparer l'Algérie de demain. Grâce à la combinaison des initiatives et des intelligences, l'Algérie s'engage dans une nouvelle ère énergétique durable.

Le programme des énergies renouvelables actualisé consiste à installer une puissance d'origine renouvelable de l'ordre de 22 000 MW à l'horizon de 2030 pour le marché national, avec le maintien de l'option de l'exportation comme objectif stratégique, si les conditions du marché le permettent [2].

Le programme d'efficacité énergétique actualisé vise à réaliser des économies d'énergies à l'horizon de 2030 de l'ordre de 63 millions de TEP, pour l'ensemble des secteurs (bâtiment et éclairage publique, transport, industrie) et ce, en introduisant l'éclairage performant, l'isolation thermique et les chauffe-eau solaires, les carburants propres (GPLc et GNc), et les équipements industriels performants.

Le programme de l'efficacité énergétique permettra de réduire les émissions de CO₂ de 193 millions de tonnes [2].

Politique de développement d'énergie renouvelable en Algérie

Les énergies renouvelables se placent au cœur des politiques énergétiques et économiques menées par l'Algérie : d'ici 2030, environ 40% de la production d'électricité destinée à la consommation algérienne sera d'origine renouvelable. L'Algérie compte se positionner comme un acteur majeur dans la production de l'électricité à partir du solaire photovoltaïque et du solaire thermique qui seront les moteurs d'un développement économique durable.

La politique algérienne de promotion et de développement des énergies renouvelables est encadrée par des lois et des textes réglementaires. Cette politique s'appuie sur un ensemble

d'organismes et d'entreprises économiques prenant, chacun en ce qui le concerne, le développement des énergies renouvelables. Selon le Ministère de l'Énergie et des Mines (MEM), trois organismes, relevant du secteur de l'enseignement supérieur et de la recherche scientifique, sont en activité depuis 1998 : le Centre de Développement des Énergies Renouvelables (CDER) ; l'Unité de Développement des Équipements Solaires (UDES) et l'Unité de Développement de la Technologie du Silicium (UDTS) [3].

Le programme algérien d'efficacité énergétique

L'objectif de l'efficacité énergétique est de produire les mêmes biens et services en utilisant un minimum d'énergie possible. Ce programme contient des actions qui privilégient le recours aux formes d'énergies qui sont les mieux adaptées aux différents usages et nécessitant la modification des comportements et l'amélioration des équipements. Ce plan d'action se présente comme suit : L'isolation thermique des bâtiments.

- Développement du chauffe-eau ;
- Généralisation d'usage des lampes à basses consommations ;
- Introduction de la performance énergétique dans l'éclairage public ;
- Promotion de l'efficacité énergétique dans le secteur industriel ;
- Promotion du Gaz Pétrole Liquéfié Carburant (GPL/C) ;
- Promotion du Gaz Naturel Carburant (GN/C) ;
- Introduction des principales techniques de climatisation solaire [3].

Le programme algérien de développement des énergies renouvelables

L'Algérie a intégré le développement des énergies renouvelables dans sa politique énergétique par l'adoption d'un cadre juridique favorable et la réalisation d'infrastructures y afférentes.

Le développement des énergies renouvelables est encadré par un ensemble de textes législatifs (La loi n° 99-09 du 28 Juillet 1999 relative à la maîtrise de l'énergie ; La loi n° 02-01 du 5 Février 2002, relative à l'électricité et la distribution publique du gaz par canalisation ; La loi n° 04-09 du 14 Aout 2004, relative à la promotion des énergies renouvelables dans le cadre du développement durable).

Un Fond National de Maîtrise de l'Énergie (FNME) a été également institué pour financer ces projets et octroyer des prêts non rémunérés et des garanties pour les emprunts effectués auprès des banques et établissements financiers, pour les investissements porteurs d'efficacité énergétique . Il permet de subventionner à hauteur de 70% les études de

faisabilité qui contribuent à l'amélioration de l'efficacité énergétique dans les entreprises industrielles ; l'objectif étant d'encourager les produits locaux et de fournir des conditions avantageuses, notamment fiscales, pour les investisseurs désireux de s'impliquer dans les différentes filières d'énergies renouvelables [3].

À travers ce programme d'énergies renouvelables, l'Algérie compte se positionner comme un acteur majeur dans la production de l'électricité à partir des filières photovoltaïque et éolienne en intégrant la biomasse, la cogénération, la géothermie et au-delà de 2021, le solaire thermique. Ces filières énergétiques seront les moteurs d'un développement économique durable à même d'impulser un nouveau modèle de croissance économique [2].

37 % de la capacité installée d'ici 2030 et 27 % de la production d'électricité destinée à la consommation nationale, seront d'origine renouvelable.

Le potentiel national en énergies renouvelables étant fortement dominé par le solaire, l'Algérie considère cette énergie comme une opportunité et un levier de développement économique et social, notamment à travers l'implantation d'industries créatrices de richesse et d'emplois. Cela n'exclut pas pour autant le lancement de nombreux projets de réalisation de fermes éoliennes et la mise en œuvre de projets expérimentaux en biomasse, en géothermie et en cogénération [2].

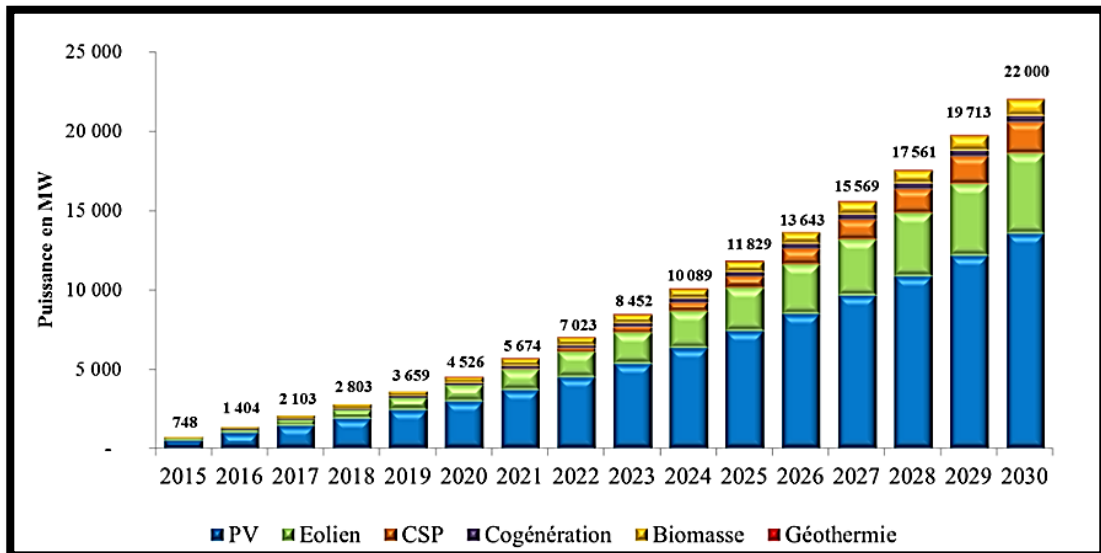
Les projets EnR de production de l'électricité dédiés au marché national seront menés en deux étapes :

- **Première phase 2015 - 2020** : Cette phase verra la réalisation d'une puissance de 4010 MW, entre photovoltaïque et éolien, ainsi que 515 MW, entre biomasse, cogénération et géothermie.
- **Deuxième phase 2021 - 2030** : Le développement de l'interconnexion électrique entre le nord et le Sahara (Adrar), permettra l'installation de grandes centrales d'énergies renouvelables dans les régions d'In Salah, Adrar, Timimoune et Bechar et leur intégration

Dans le système énergétique national ; à cette échéance, le solaire thermique pourrait être économiquement viable. Stratégie de l'Algérie en la matière vise à développer une véritable industrie des énergies renouvelables associée à un programme de formation et de capitalisation des connaissances, qui permettra à terme, d'employer le génie local algérien, notamment en matière d'engineering et de management de projets. Le programme EnR, pour

Chapitre I : L'énergie renouvelable en Algérie

les besoins d'électricité du marché national, permettra la création de plusieurs milliers d'emplois directs et indirects [2].



(Figure I.2 : la consistance du programme en énergie renouvelable à réaliser pour le marché national sur la période 2015-2030)

Potentiel des énergies renouvelable en Algérie

Les énergies renouvelables représentent une alternative nouvelle et un avenir sûr pour la sécurité énergétique en Algérie.

Potentiel Solaire

Le solaire est le potentiel le plus important en énergies renouvelables en Algérie. Il représente 169,44 Twh/an, soit 5000 fois la consommation algérienne en électricité. Ainsi, avec plus de 2 000 heures d'insolation par an et jusqu'à 3 900 heures sur les hauts plateaux et au Sahara, l'énergie solaire reçue quotidiennement sur le territoire algérien est de l'ordre de 1 700 kWh/m²/an au Nord et 2 263 kWh/m²/an au Sud. Soit une moyenne de plus de

2 200 kWh/m²/an [4].

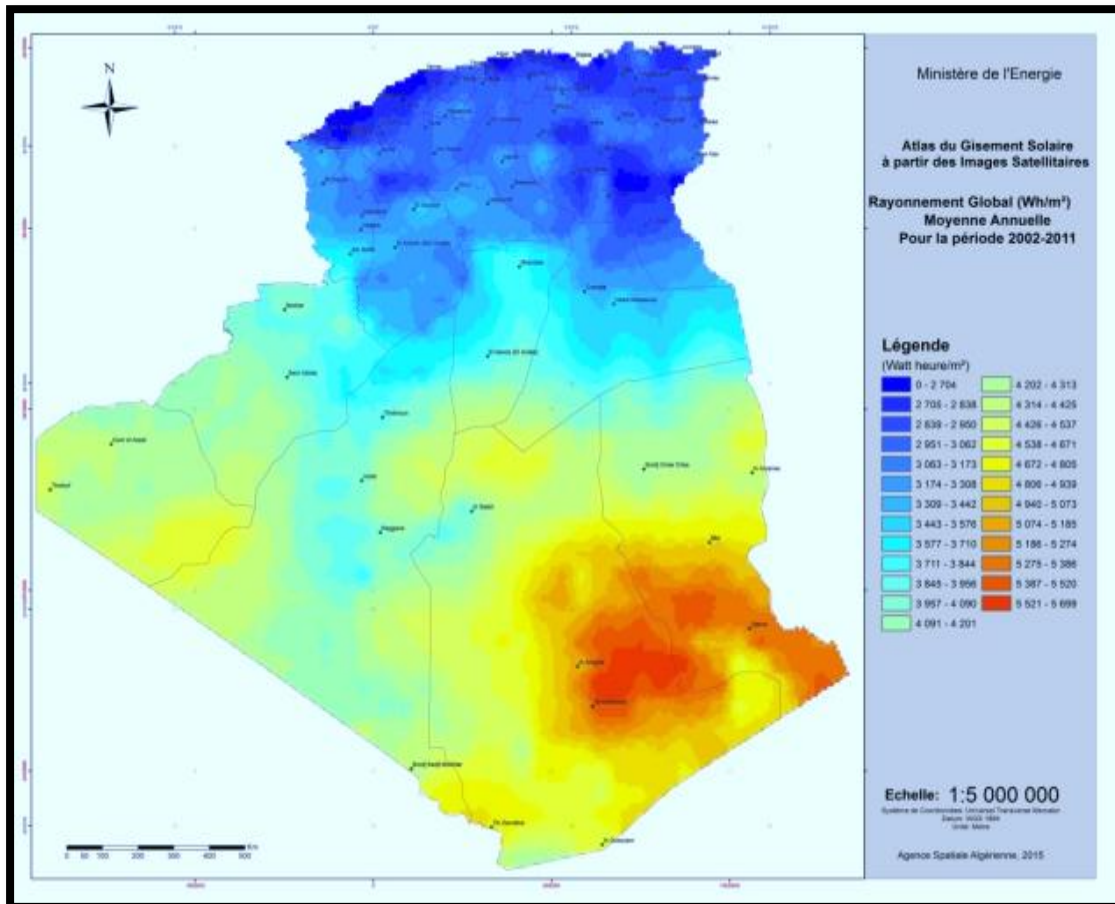
L'énergie reçue quotidiennement sur une surface horizontale d'un mètre cube est de l'ordre de 5 kWh/m³/an sur la majeure partie du territoire algérien, soit près de 1700 kWh/m³/an au Nord et 2650 kWh/m³/an au sud du pays.

Le gouvernement algérien prévoit le lancement de plusieurs projets solaires photovoltaïques d'une capacité totale d'environ 800 MWc d'ici 2020. D'autres projets d'une capacité de 200 MWc/an devraient être réalisés sur la période 2021-2030.

Sur la période 2016-2020, quatre centrales solaires thermiques avec stockage d'une puissance totale d'environ 1200 MW devraient être mises en service. Le programme de la phase 2021-2030 prévoit l'installation de 500 MW par an jusqu'en 2023, puis 600 MW par an jusqu'en 2030 [4].

Régions	Région côtière	Hauts plateaux	Sahara
Superficie(%)	4	10	86
Durée moyenne d'ensoleillement (heure/an)	2650	3000	3500
Énergie moyenne reçue (kWh/m ² /an)	1700	1900	2650

(Tableau I.2 : Potentiel solaire en Algérie).



(Figure I.3 : Carte de l'Irradiation Globale Directe Annuelle Moyenne (Période 2002-2011))

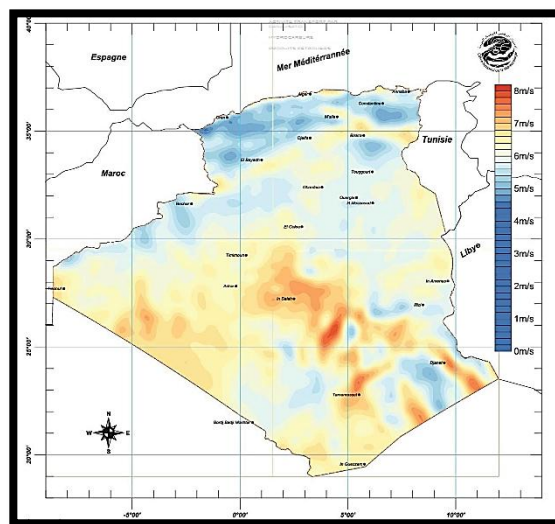
Potentiel Éolien

La ressource éolienne en Algérie varie beaucoup d'un endroit à un autre. Ceci est principalement dû à une topographie et un climat très diversifiés. En effet, notre vaste pays, se subdivise en deux grandes zones géographiques distinctes. Le Nord méditerranéen qui est caractérisé, par un littoral de 1200 km et un relief montagneux, représenté par les deux chaînes de l'Atlas tellien et l'Atlas saharien.

Entre elles, s'intercalent des plaines et les hauts plateaux de climat continental. Le Sud, quant à lui, se caractérise par un climat saharien.

La carte représentée ci-dessous montre que le Sud est caractérisé par des vitesses plus élevées que le Nord, plus particulièrement dans le Sud-Est, avec des vitesses supérieures à 7 m/s et qui dépassent la valeur de 8 m/s dans la région de Tamanrasset (In Amguel).

Concernant le Nord, on remarque globalement que la vitesse moyenne est peu élevée. On note cependant, l'existence de microclimats sur les sites côtiers d'Oran, Bejaïa et Annaba, sur les hauts plateaux de Tébessa, Biskra, M'sila et El bayadh (6 à 7 m/s), et le Grand Sud (>8m/s) [2].



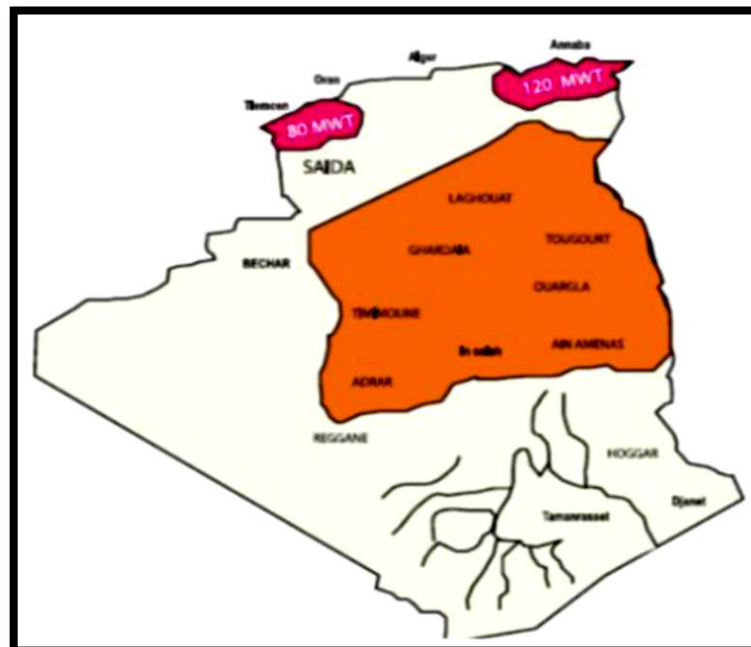
(Figure I.4 : Carte du Vent Annuel Moyen à 50m (Période 2001-2010))

Potentiel de l'énergie Géothermique

La compilation des données géologiques, géochimiques et géophysique a permis d'identifier plus de deux cents (200) sources chaudes qui ont été inventoriées dans la partie Nord du pays. Un tiers environ (33%) d'entre elles ont des températures supérieures à 45°C.

Il existe des sources à hautes températures pouvant atteindre 118°C à Biskra. Des études sur le gradient thermique ont permis d'identifier trois zones dont le gradient dépasse les 5°C/100m, zone de (Relizane et Mascara, Aïne Boucif et Sidi Aïssa, Guelma et Djebel El Onk) [2].

Plus au Sud, la formation du continental intercalaire, constitue un vaste réservoir géothermique qui s'étale sur 700 mille km². Ce réservoir, appelé communément « nappe albienne », est exploité à travers des forages à plus de 40 m³/s ; l'eau de cette nappe se trouve à une température moyenne de 57°C. Si on associe le débit d'exploitation de la nappe albienne au débit total des sources thermales, cela représenterait une puissance de plus de 700 MW [3].



(Figure I.5 : Zone à fort potentiel géothermique en Algérie)

Potentiel hydraulique

Les quantités globales tombant sur le territoire algérien sont importantes et estimées à 65 milliards de m³, mais finalement profitent peu au pays (nombre réduit de jours de précipitation, concentration sur des espaces limités, forte évaporation, évacuation rapide vers la mer).

Schématiquement, les ressources de surface décroissent du nord au sud. On évalue actuellement les ressources utiles et renouvelables de l'ordre de 25 milliards de m³, dont environ 2/3 pour les ressources en surface.

103 sites de barrages ont été recensés. Plus de 50 barrages sont actuellement en exploitation [2].

Centrale	Puissance installé(MW)
Draguina	71.5
Ighil emda	24
Mansoria	100
Erraguene	16
Souk el djemaa	8.086
Tizi meden	4.458
Ighzenchebel	2.712
Ghrib	7.000
Gouriet	6.425
Bouhanifia	5.700
Oued fodda	15.600
Beni behdel	3.500
Tessala	4.228
Total	286

(Tableau I.3 : Parc de production hydroélectrique en Algérie) [3].

Potentiel d'énergie en biomasse

La biomasse, l'un des plus vieux combustibles connus de l'homme est constituée de matières comme le bois, les plantes à croissances rapides, les algues, les déchets des récoltes, la sciure et les copeaux de bois et les excréments des animaux, même les déchets à usage humain et industriel, la biomasse contient de l'énergie chimique qui provient de l'énergie des rayons solaires, que les organismes photosynthétiques utilisent pour former des molécules organiques [5].

Le potentiel algérien en biomasse se compose de la biomasse issue des forêts (environ 37 Mtep. Le potentiel récupéré est de l'ordre de 10%), des déchets urbains et agricoles (estimés à 1,33 Mtep/an c'est-à-dire 5 millions de tonnes non recyclés) [3].

Formation forestières	Type	Superficie	% surface totale nord
Formations principale	- Forêts économique	1249000	6.06
	- Forêts de protection	219000	
	- Divers	47000	
	Total	1515000	
Maquis		1876000	7.50
Reboisement (1962 à 1998)		536000	2.14
Plantations réalisées	- Barrage vert	86909	0.77
	- Par le volontariat	105031	
	Total	191940	
Total formation forestières	Total	4118940	16.47

(Tableau I.4 : Occupation des terres forestières en Algérie) [6].

Projets et actions de la phase 2011-2014 du programme national des énergies renouvelables (2011-2014) en Algérie

La phase d'expérimentation du programme (2011-2014) a connu la réalisation de plusieurs projets et actions :

- Une centrale hybride Solaire-Gaz de 150 MW, située à Hassi R'mel (Laghouat) et mise en service en juillet 2011
- Une ferme Éolienne à Kabertène (ADRAR), d'une capacité de 10,2 MW, mise en service en juin 2014.
- Une centrale pilote photovoltaïque à Oued N'chou (Ghardaïa) est mise en service en juin [3].



(Figure I.6 : Une centrale hybride Solaire-Gaz)



(Figure I.7 : Une ferme Éolienne)



(Figure I.7 : Une centrale pilote photovoltaïque)

Conclusion

D'après les informations et les données étudiées ; le monde a beaucoup changé ces dernières années ; l'homme cherche toujours de nouvelles façons de vivre et d'exploiter notre énorme planète, les énergies renouvelables sont les futures énergies qui vont nous donner une autre pensée pour une vie durable, écologique et moins chère.

L'Algérie est parmi les pays qui ont suivi cette solution pour sortir de l'ère du pétrole et du gaz, le potentiel algérien en énergies renouvelables étant fortement dominé par le solaire ainsi que pour les autres pays du monde, au contraire ; les potentiels en éoliens, en biomasse, en géothermie et en hydroélectricité sont beaucoup moins importants mais restent intéressants pour une éventuelle exploitation et développement à grande échelle.

Chapitre II

Connaitre l'énergie solaire

Qu'est qu'une énergie solaire ?

Le soleil est la source d'énergie la plus importante et la plus abondante dont l'humanité dispose à l'heure actuelle, malgré sa très grande distance de la terre (150000.000 kilomètres), il transporte jours après jours d'énorme quantité d'énergie sous la forme d'énergie rayonnante. La quantité d'énergie fournie par le soleil, jour après jour, représente 15.000 fois les besoins quotidiens de l'ensemble de la population mondiale en énergie primaire.

- Puissance du rayonnement totale du soleil : 3×10^{23} Kilowatts.

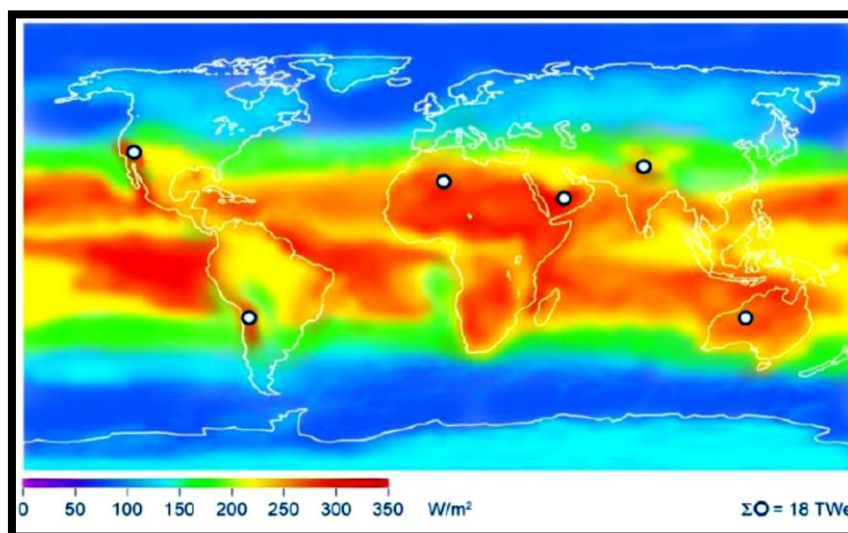
- Puissance du rayonnement totale sur terre : 1.75×10^{14} Kilowatts.

D'un point de vue théorique les centrales électriques solaires réparties sur 3% de la surface du Sahara pourraient couvrir les besoins en énergie de l'Europe et de l'Afrique.

L'énergie solaire est l'énergie du soleil qui est convertie en énergie thermique ou bien électrique (photovoltaïque) [7].

L'Algérie possède certaines des ressources solaires les plus riches du monde.

Les technologies solaires peuvent exploiter cette énergie pour une variété d'utilisation, notamment pour produire de l'électricité, fournir de la lumière ou un environnement intérieur confortable et chauffer de l'eau à usage domestique, commercial ou industriel.



(Figure II.1 : les ressources thermiques au monde)

Solaire photovoltaïque

C'est l'énergie solaire convertie en énergie électrique (électricité) ; en terme bien précis « Photovoltaïque » désigne le phénomène physique (l'effet photovoltaïque découvert par Alexandre Edmond Becquerel en 1839) ou la technologie associée. L'énergie solaire photovoltaïque est l'électricité produite par transformation d'une partie du rayonnement solaire au moyen d'une cellule photovoltaïque. Schématiquement, un photon de lumière incidente permet sous certaines circonstances de mettre en mouvement un électron, produisant ainsi un courant électrique [8].

Les cellules photovoltaïques sont fabriquées avec des matériaux semi-conducteurs principalement produits à partir de silicium. Ces matériaux émettent des électrons lorsqu'ils sont soumis à l'action de la lumière. Ceux-ci sont éjectés du matériau et ils circulent dans un circuit fermé, produisant ainsi de l'électricité. Ce processus ne nécessite aucun cycle thermodynamique intermédiaire, c'est-à-dire que le rayonnement est directement converti en électricité sans utilisation intermédiaire de la chaleur [8].

Principe de fonctionnement d'une cellule photovoltaïque

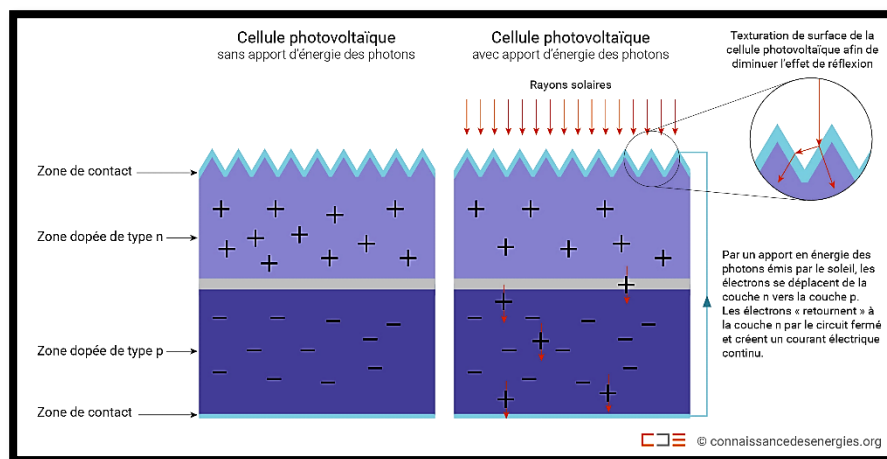
Les cellules photovoltaïques exploitent l'effet photoélectrique pour produire du courant continu par absorption du rayonnement solaire. Cet effet permet aux cellules de convertir directement l'énergie lumineuse des photons en électricité par le biais d'un matériau semi-conducteur transportant les charges électriques.

Une cellule photovoltaïque est composée de deux types de matériaux semi-conducteurs, l'une présentant un excès d'électrons et l'autre un déficit d'électrons. Ces deux parties sont respectivement dites « dopées » de type n et de type p. Le dopage des cristaux de silicium consiste à leur ajouter d'autres atomes pour améliorer la conductivité du matériau.

Un atome de silicium compte 4 électrons périphériques. L'une des couches de la cellule est dopée avec des atomes de phosphore qui, eux, comptent 5 électrons (soit 1 de plus que le silicium). On parle de dopage de type n comme négatif, car les électrons (de charge négative) sont excédentaires. L'autre couche est dopée avec des atomes de bore qui ont 3 électrons (1 de moins que le silicium). On parle de dopage de type p comme positif en raison du déficit

d'électrons ainsi créé. Lorsque la première est mise en contact avec la seconde, les électrons en excès dans le matériau n diffusent dans le matériau p.

En traversant la cellule photovoltaïque, les photons arrachent des électrons aux atomes de silicium des deux couches n et p. Les électrons libérés se déplacent alors dans toutes les directions. Après avoir quitté la couche p, les électrons empruntent ensuite un circuit pour retourner à la couche n. Ce déplacement d'électrons n'est autre que de l'électricité [8].



(Figure II.2 : Constitution d'une cellule photovoltaïque (Connaissance des Énergies, d'après CEA))

Le solaire photovoltaïque non concentré

Une technologie traditionnelle ; les technologies à base de silicium constituent plus de 90% du marché photovoltaïque mondial :

- Les cellules monocristallines :

C'est la filière historique du photovoltaïque. Les cellules monocristallines sont les photopiles de la première génération. Elles sont élaborées à partir d'un bloc de silicium cristallisé en une seule pièce. Elles ont un bon rendement mais la méthode de production est laborieuse et coûteuse. C'est la cellule des calculatrices et des montres dites « solaires ».

- Les cellules polycristallines :

Les cellules polycristallines sont élaborées à partir d'un bloc de silicium composé de cristaux multiples. Elles ont un rendement plus faible que les cellules monocristallines mais leur coût de production est moindre.

Des avancées technologiques permettent aujourd'hui de produire des cellules polycristallines à couches minces afin d'économiser le silicium. Ces cellules ont une épaisseur de l'ordre de quelques micromètres d'épaisseur.

Au cours des dix dernières années, le rendement moyen d'un panneau photovoltaïque à base de silicium est passé de 12% à 17% selon l'institut allemand Fraunhofer [8].

Le solaire photovoltaïque concentré

C'est une technique prometteuse ; les miroirs concentrent les rayons du soleil sur une petite cellule solaire photovoltaïque à haut rendement. Grâce à cette technique de concentration, les matériaux semi-conducteurs peuvent être remplacés par des systèmes optiques moins coûteux. À puissance égale, ceci permet d'utiliser 1 000 fois moins de matériel photovoltaïque que dans les panneaux photovoltaïques à insolation directe. Cette technique devrait pénétrer le marché dans un avenir proche.

Le rendement théorique maximum de la conversion photon-électron est de l'ordre de 85% (le rendement de Carnot est 95 %). Le rendement expérimental maximal obtenu avec cette technique est pour le moment de 46%.

● Les constituants organiques (polymères) :

L'utilisation de matériaux polymères vise à remplacer les matériaux minéraux par des semi-conducteurs organiques, autrement dit des plastiques, pour la fabrication de cellules photovoltaïques. Ceux-ci sont bon marché, ont des bonnes propriétés d'absorption et sont faciles à déposer. Leur coût de revient très faible se double de caractéristiques particulièrement attrayantes : plus légères et moins fragiles, leur nature flexible permet d'obtenir des matériaux souples en polymères organiques ou en silicone et même des encres photovoltaïques.

D'une durée de vie courte, elles n'offrent pour l'instant que des rendements dépassant légèrement 10% en laboratoire mais pourraient servir de base au développement d'une filière industrielle.

● Les cellules hybrides : thermique et photovoltaïque

Le rendement des cellules solaires photovoltaïques diminue lorsque les panneaux montent en température. Certains centres de recherche ont eu l'idée de récupérer la chaleur captée et libérée par le photovoltaïque pour simultanément optimiser le rendement électrique et

obtenir une source de chauffage. Ils développent ainsi des capteurs solaires hybrides mariant le photovoltaïque et le thermique [8].

Avantages du photovoltaïque

- L'énergie solaire est, à l'échelle humaine, inépuisable et disponible gratuitement en très grandes quantités. De plus, lors de la phase d'exploitation, la production d'électricité au moyen de panneaux photovoltaïques n'est pas polluante.
- Le silicium, matériau utilisé dans les panneaux solaires actuels les plus répandus, est très abondant et n'est pas toxique.
- Les panneaux solaires ont une durée de vie de 20 à plus de 30 ans et sont presque intégralement recyclables.
- La modularité des panneaux est très importante, c'est-à-dire qu'il est possible de concevoir des installations de tailles diverses dans des environnements très variés. Ceux-ci sont par conséquent adaptés à la production décentralisée d'électricité en sites isolés.
- Les panneaux photovoltaïques peuvent être utilisés à des fins domestiques de petite échelle ou à des fins de production énergétique industrielle à grande échelle [8].

Inconvénients du photovoltaïque

- La technologie photovoltaïque est encore coûteuse même si son coût de production (LCOE) a fortement baissé au cours des dernières années (avec un coût de production de 70 à 90 \$/MWh dans certaines zones aujourd'hui, des installations photovoltaïques atteignent parfois localement une « parité de prix » avec des moyens « conventionnels » de production électrique).
- Les panneaux photovoltaïques les plus répandus, faits de silicium cristallin, sont lourds, fragiles et difficiles à installer.
- Une centrale requiert de vastes espaces bien que la densité tende à être améliorée.
- L'impact environnemental et énergétique de la fabrication des panneaux de silicium n'est pas nul. Une cellule photovoltaïque doit fonctionner entre un an et demi et cinq ans pour compenser l'énergie utilisée pour la fabriquer.
- L'énergie électrique n'est pas « directement » stockable, c'est-à-dire sous sa forme primaire. Il est en revanche possible de la stocker « indirectement » dans des batteries sous forme chimique ou dans des accumulateurs cinétiques sous forme mécanique [8].

Solaire thermique

C'est l'énergie solaire convertie en énergie thermique ou bien en énergie calorifique (chaleur), elle désigne la transmission de chaleur générée par le rayonnement du soleil sur terre.

Dans les années 1970, le solaire thermique connaît une phase de développement importante suite aux deux chocs pétroliers de 1973 et 1979. Néanmoins, le contre-choc pétrolier qui suit pousse les dirigeants à délaisser ces énergies alternatives au profit d'un pétrole redevenu abordable.

Dans les années 1990-2000, le retour des préoccupations environnementales et l'augmentation du prix des énergies fossiles relancent les technologies du solaire thermique.

À ce jour, ce sont les petites unités de solaire thermique qui ont été les plus développées tandis que les technologies solaires thermodynamiques industrielles destinées à produire de l'électricité devraient se déployer à plus grande échelle dans les prochaines années [9].

Types de technologies qui permettent d'exploiter l'énergie solaire thermique

La technologie solaire thermique à basse température

La technologie solaire «active»

Traditionnellement, ce terme désigne les applications à basse et moyenne température. Des capteurs solaires thermiques sont installés sur les toits des bâtiments. Un capteur solaire thermique est un dispositif conçu pour recueillir l'énergie provenant du soleil et la transmettre à un fluide caloporteur. La chaleur est ensuite utilisée afin de produire de l'eau chaude sanitaire ou bien encore chauffer des locaux.

La technologie solaire «passive»

Toujours dans le domaine de la basse température, on peut également citer les installations solaires passives. Par opposition aux applications précédentes, celles-ci ne requièrent pas de composants dits actifs (les capteurs solaires). Ces applications reposent sur des concepts de génie civil et climatique impliquant une architecture adaptée et l'emploi de matériaux spéciaux. L'utilisation passive de l'énergie du soleil permet de chauffer, d'éclairer ou de climatiser des locaux.

La technologie solaire thermique à haute température

La technologie solaire concentrée ou « thermodynamique »

Ce procédé fournit de la chaleur haute température (de 250 à 1 000°C) par concentration du rayonnement solaire. Ce pouvoir calorifique est utilisé pour actionner des turbines à gaz ou à vapeur afin de produire de l'électricité [9].

Fonctionnement technique

Les types de panneaux solaires thermiques diffèrent selon la nature du fluide caloporteur qui transporte la chaleur : de l'eau ou de l'air. Les capteurs solaires à eau sont utilisés pour le chauffage et/ou pour produire de l'eau chaude sanitaire. Dans les capteurs thermiques à air, l'air circule et s'échauffe au contact des absorbeurs. Il est ensuite ventilé dans les habitats pour le chauffage.

Les capteurs solaires peuvent également se différencier par leur structure :

- **Les capteurs plans non vitrés**

Leur structure est assez simple, puisque composée d'un réseau de tubes plastiques noirs où circule le fluide caloporteur. Ils sont utilisés essentiellement pour le chauffage de l'eau des piscines en été.

- **Les capteurs plans vitrés**

Le fluide caloporteur, très souvent de l'eau mélangée à un antigel, passe dans un circuit en serpentin placé derrière une vitre.

- **Les capteurs à tubes sous vides**

Le fluide caloporteur circule à l'intérieur d'un double tube sous vide. Le principe est le même que pour les capteurs plans vitrés, l'isolation étant simplement assurée par l'absence de molécules d'air (sous vide) [9].

La technologie solaire thermique active

On peut compter quelques exemples d'applications des techniques d'exploitation active de l'énergie solaire, avec leur principe de fonctionnement :

- **Le chauffe-eau solaire**

Un chauffe-eau solaire fonctionne selon un principe simple : l'énergie du rayonnement solaire est absorbée par des capteurs plans fonctionnant selon le principe de l'effet de serre. La chaleur emmagasinée est ensuite transportée au sein d'un circuit « primaire » contenant un mélange caloporteur d'eau et d'antigel.

Grâce à un échangeur thermique, le liquide caloporteur contenu dans le circuit primaire transmet son énergie thermique à de l'eau sanitaire contenue dans le réservoir (un « ballon ») d'un second circuit isolé, dit « secondaire ». Le liquide caloporteur refroidi repart ensuite vers les capteurs afin d'être réchauffé. Lorsque l'eau chauffée dans le ballon est utilisée, elle est remplacée par de l'eau froide du réseau, réchauffée selon le même principe.

• Le plancher solaire

Le plancher solaire utilise le même principe d'extraction de l'énergie thermique que le chauffe-eau. Le fluide caloporteur chauffé à 25-30 °C est directement injecté dans un réseau de tubes installés dans le sol des bâtiments. Cette technique éprouvée permet d'économiser jusqu'à la moitié des besoins en énergie de chauffage d'un foyer. Pour fournir un chauffage relativement constant tout au long de la journée malgré l'intermittence du rayonnement solaire, le plancher solaire utilise l'inertie thermique (la capacité de stockage énergétique temporaire) de la dalle en béton.

• Le rafraîchissement solaire

Paradoxalement, la chaleur du rayonnement solaire peut aussi être utilisée pour rafraîchir un bâtiment. La technique la plus commune consiste à utiliser des capteurs solaires pour fournir de la chaleur qui est dirigée vers une machine à absorption. Cette machine dissocie, par ébullition, une solution d'eau et de bromure de lithium. Après refroidissement, la recombinaison des deux composants produit du froid, par absorption de chaleur. Le froid est ensuite distribué de manière identique à celle de la climatisation classique [9].

La technologie solaire thermique passive

• Architecture solaire

Également appelée « architecture bioclimatique », elle permet de diminuer sensiblement les besoins de chauffage et de climatisation et donc de réaliser des économies d'énergie substantielles. L'utilisation de matériaux à haute efficacité thermique en est une composante principale.

Un bâtiment doit être considéré comme un immense capteur solaire dont on peut améliorer le rendement. Il faut prendre en considération les spécificités de son environnement local (ensoleillement, vents dominants, etc.), afin de maximiser les apports énergétiques solaires, de les stocker et de les répartir.

•Le mur Trombe

Le mur Trombe est un exemple des techniques existantes permettant de mettre « passivement » à profit l'énergie solaire. Ce type de mur, parfois utilisé dans le bâtiment, a été conçu par le professeur Félix Trombe et l'architecte Jacques Michel dans les années 60, reprenant un concept breveté de la fin du XIXe siècle. C'est un mur capteur composé d'un bloc de matière à forte inertie (béton, pierre, etc.) qui accumule le rayonnement solaire du jour et le restitue pendant la nuit. Devant cette paroi, on place une vitre pour créer un effet de serre afin de chauffer l'air [9].

Avantages du solaire thermique

- L'énergie solaire est renouvelable, disponible gratuitement et disponible en quantités colossales à l'échelle humaine. De plus, et contrairement à sa variante thermodynamique, l'énergie thermique classique peut être utilisée dans les régions d'ensoleillement moyen.
- En phase d'exploitation, le processus de production de l'énergie thermique n'a pas d'impact sur l'environnement. Il n'y a pas de rejets de polluants ou de déchets.
- Les techniques de la technologie solaire thermique directe et indirecte sont simples et relativement peu coûteuses. Ce sont des techniques matures d'ores et déjà disponibles sur le marché.
- Il est possible de stocker temporairement la chaleur créée et de les restituer plus tard, pendant la nuit par exemple.
- Les installations thermiques sont adaptées à la majorité des contextes domestiques. C'est-à-dire qu'il est possible de valoriser la chaleur du rayonnement solaire dans tous les lieux, mêmes isolés, à partir du moment où celui-ci est suffisant [9].

Inconvénients du solaire thermique

- La production de chaleur est tributaire des saisons et des climats. De plus, des capacités de chauffage d'appoint restent nécessaires.
- Les technologies thermiques à faible température ne produisent pas d'électricité, et ne peuvent par conséquent pas répondre à ces besoins (mais peuvent satisfaire des besoins de chaleur) [9].

Conclusion

Ce chapitre nous a permis de comprendre l'énergie solaire et de définir ses types (le photovoltaïque et le thermique) ainsi que de comprendre leurs fonctionnements techniques.

Il nous a aussi permis d'identifier les avantages et les inconvénients de chaque type (photovoltaïque et le thermique).

Chapitre III

Stockage d'énergie renouvelable

Pourquoi stocker l'énergie renouvelable ?

Aujourd'hui, un peu partout dans le monde on peut produire de l'électricité grâce aux énergies renouvelables ; ce sont des sources d'énergie locales, renouvelables, sont disponibles. Mais elles ne fonctionnent que par intermittence et, sont plus ou moins prévisibles, il faut donc chercher des solutions de stockage de l'énergie pour garantir l'approvisionnement et, restituer cette énergie pendant les périodes où le vent et le soleil seront moins présents. Le stockage de l'énergie améliore l'efficacité énergétique et favorise l'insertion des énergies renouvelables variables. Elle apporte aussi sécurité et flexibilité aux réseaux.

Il concerne aussi bien la chaleur que l'électricité. Il consiste à « accumuler » l'énergie en vue d'une utilisation ultérieure en un lieu qui peut être identique ou différent du lieu de production. Les batteries sont l'un des moyens les plus communs. Lorsqu'elles sont en charge, elles piègent l'énergie électrique, puis la restituent tout au long de leur décharge, sans être connectées à une source de production électrique.

Le stockage permettant de décaler l'usage dans le temps sans le décaler dans l'espace est appelé stockage stationnaire ; celui visant des applications mobiles est appelé stockage embarqué ou portable.

Le stockage de l'énergie comprend deux types de systèmes, le premier concerne les systèmes qui privilégient la quantité au débit ; Ils donnent la priorité à la restitution d'énergie. Il s'agit de maximiser la durée pendant laquelle le stockage peut fournir de la puissance.

Ce type de stockage est intéressant pour, les applications mobiles de tous les jours (pour téléphones ou ordinateurs portables).

Le deuxième type de système correspond aux systèmes qui privilégient le débit, Ils donnent la priorité à la puissance. Il s'agit de systèmes très réactifs et fiables pouvant délivrer de fortes puissances sur un temps court.

Ce type de stockage est intéressant pour les applications de stabilisation du réseau électrique (stabilisation du réglage en fréquence et en tension) ; compenser les fluctuations rapides des énergies renouvelables variables [10].

Le choix du type de stockage

Le choix du type de stockage et de la technique adaptée dépendent de l'application visée. Par exemple, des compromis entre restitution de puissance et d'énergie sont recherchés dans le cas des énergies renouvelables, puisque le stockage peut à la fois participer à la stabilité du réseau électrique et lisser les variations de production. Bien sûr, d'autres caractéristiques sont prises en compte pour le choix de la technologie adaptée : taille, coût, durée de vie, sécurité, et d'autres critères.

Le stockage d'énergie répond à un besoin technique ; c'est un atout indispensable à long terme pour permettre la décarbonation du mix électrique décidée par les politiques publiques. Le stockage d'énergie représente également un levier économique : c'est un moyen de tirer parti de la volatilité du marché de l'électricité pour générer des bénéfices, ou réduire les coûts induits par la consommation d'électricité. L'ensemble des acteurs ayant la possibilité de stocker de l'énergie (industriels, collectivités ou particuliers) peuvent tirer parti de cette opportunité.

Cette dualité besoin technique / opportunité économique crée aujourd'hui un contexte particulièrement favorable au déploiement de solutions de stockage d'énergie. Il reste toujours le problème de chercher un stockage écologique, garanti, et sur économiquement [11].

Les techniques de stockage de l'énergie renouvelable

L'électricité est un vecteur très pratique pour le transport de l'énergie, mais difficile à stocker sous sa forme propre. Elle est donc généralement transformée pour être stockée sous une autre forme : énergie mécanique, thermique ou chimique par exemple. Au contraire, l'énergie thermique est généralement stockée sous sa forme originale (chaleur). Dans ce contexte le secteur d'énergie renouvelable vise à découvrir, chercher et innover des nouvelles technologies de stockage d'énergie verte [10]. Voici les caractérisations des technologies de stockage :

Pour le stockage d'électricité on rencontre :

- Le stockage gravitaire
- Le stockage thermodynamique
- Le stockage chimique H₂
- Le stockage électrochimique
- Le stockage électrochimique à circulation

- Le stockage électrostatique
- Le stockage inertiel

Stockage thermodynamique

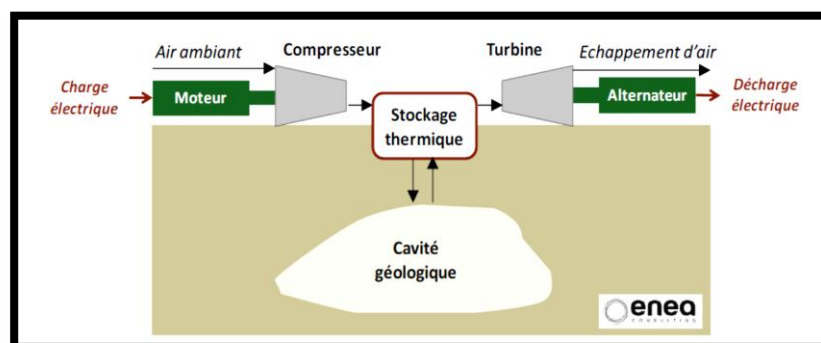
Parmi les techniques connues, il y'a :

- **CAES isochore adiabatique souterrain :**

La technique CAES isochore adiabatique souterraine, généralement désignée sous le sigle A-CAES ou AA-CAES (Advanced Adiabatic compressed Air Energy Storage) reprend le principe de base du CAES conventionnel en limitant les pertes thermiques, et donc en s'affranchissant du besoin d'alimentation en énergies fossiles.

Pour rendre le système adiabatique, la chaleur dégagée lors de la compression de l'air (charge électrique) est récupérée pour être conservée dans une unité de stockage d'énergie thermique. L'air comprimé est stocké dans une cavité géologique. Lors de la décharge électrique, la chaleur stockée est restituée à l'air comprimé avant détente et production de l'électricité via le groupe turbine / alternateur, ceci sans avoir à injecter du gaz (ou autre énergie fossile) dans le circuit. Le rendement global est donc substantiellement accru par rapport au CAES conventionnel.

L'AA-CAES est une technique complexe, tout particulièrement pour la conservation du caractère adiabatique du système. Le rendement dépend fortement de la qualité des équipements mis en jeu, notamment en termes de pertes en température et en pression le long du procédé.



(Figure III.1 : Schéma de fonctionnement de la technique CAES isochore adiabatique souterrain)

Avantages techniques

- Rendement accru par rapport au CAES conventionnel
- Ne nécessite pas d'énergie fossile, pas d'émissions par rapport au CAES conventionnel
- Grande quantité d'énergie stockable
- Temps de réponse rapide
- Longue durée de stockage d'électricité possible
- Longue durée de vie

Inconvénients techniques

- Nécessité de trouver des sites géologiques adaptés
- Complexité technique due aux hauts niveaux de pression et de température possibles pour les machines tournantes et le stockage de chaleur
- Complexité opératoire pour les configurations particulièrement sensibles au niveau de température
- Gamme de puissances contrôlables plus restreinte que pour le CAES conventionnel
- Rendement tributaire de la technique de stockage thermique
- Pertes thermiques fonction du temps de stockage
- Pas encore de retour d'expérience [10].

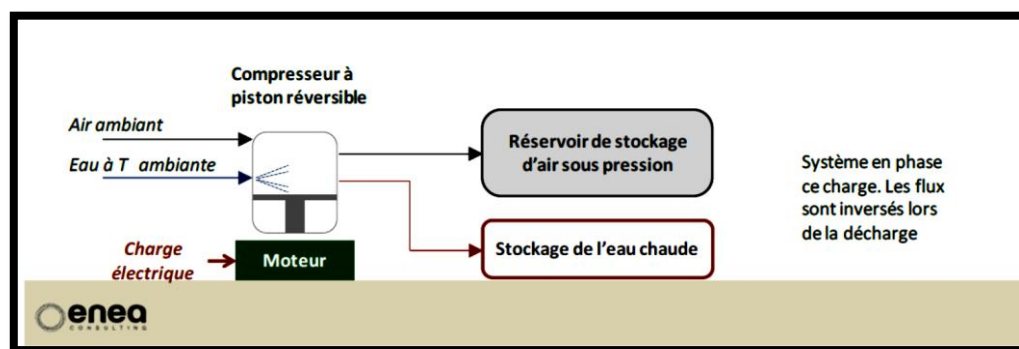
CAES isotherme de surface

Cette technique de CAES est basée sur une compression et une détente isotherme de l'air. Lors de la charge, un fluide caloporteur, généralement de l'eau, est injectée dans le compresseur, et permet de récupérer la chaleur de compression, de telle sorte que l'air est maintenu à température constante.

La compression du mélange air-eau est donc diphasique, ce qui implique l'utilisation de technologies alternatives au couple compresseur-turbine traditionnel (moteurs à piston par exemple). Plusieurs configurations existent pour le stockage de l'air comprimé et de l'eau. Ils peuvent être stockés séparément, le stockage d'eau faisant office de stockage thermique (technologie LightSail Energy), ou alors le mélange air-eau peut être stocké dans un même volume. L'eau circule généralement en boucle fermée, limitant ainsi les besoins en appoint

d'eau. Le stockage est généralement réalisé en surface à des pressions de l'ordre de 200 bars, par exemple dans des tronçons de canalisation.

Lors de la décharge, la détente est généralement réalisée avec le même équipement que pour la compression fonctionnant de manière réversible. L'eau est de nouveau injectée dans le système lors de la détente, afin de restituer la chaleur stockée à l'air.



(Figure III.2 : Schéma de fonctionnement de la technique CAES isotherme de surface)

Avantages techniques

- Puissance et capacité de stockage dissociées
- Large plage de régime
- Modulaire
- Bonne durée de vie
- Rendement accru par rapport au CAES conventionnel

Inconvénients

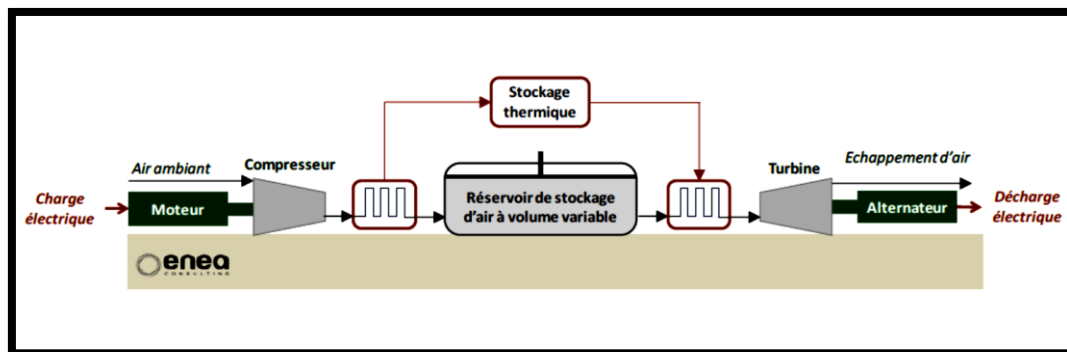
- Sécurité (réservoirs haute pression)
- Corrosion / risque de gel
- Le coût d'investissement paraît encore élevé
- Pas encore de retour d'expérience
- Autodécharge due aux pertes thermiques [10].

CAES isobare adiabatique de surface

La technique CAES isobare adiabatique de surface reprend le principe de base du CAES adiabatique en s'affranchissant de la cavité de stockage : l'air est stocké sous pression dans des réservoirs de surface à pression constante.

Pour rendre le système adiabatique, la chaleur dégagée lors de la compression de l'air (phase de stockage) est récupérée pour être conservée et restituée lors de la détente (phase de déstockage). Différents modes de stockage de cette chaleur peuvent être envisagés.

Le stockage isobare permet le fonctionnement des compresseurs et turbine à un taux de compression fixe.



(Figure III.3 : Schéma de fonctionnement de la technique CAES isobare adiabatique de surface)

Avantages techniques

- Facilité d'implantation (pas de contraintes de site, pas de contraintes géologiques)
- Temps de développement et d'installation court
- Rendement supérieur au CAES conventionnel
- Ne nécessite pas d'énergie fossile, pas d'émissions par rapport au CAES conventionnel
- Possibilité de récupérer de l'énergie thermique basse température disponible et non valorisée par ailleurs
- Quantité d'énergie stockable très modulaire
- Forte flexibilité et possibilité de variation de puissance instantanée
- Longue durée de vie

Inconvénients techniques

- Peu de retour d'expérience
- Démarrage relativement long à froid
- Rendement moyen
- Coût du stockage en énergie plus élevé que le CAES conventionnel, qui ne comporte pas de stockage de chaleur [10].

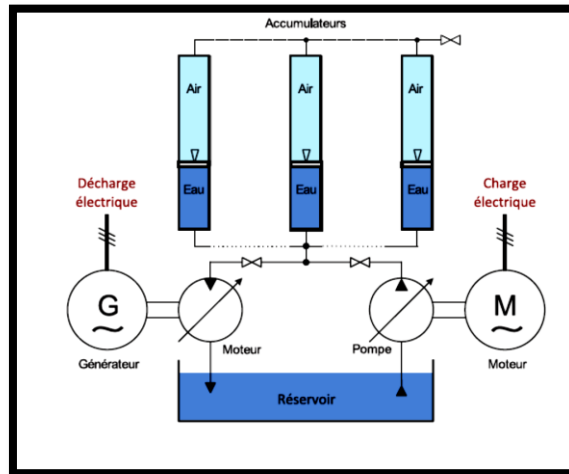
Stockage hydropneumatique / oléopneumatique

Le stockage hydropneumatique (respectivement oléopneumatique) est une technique de stockage d'énergie par air comprimé qui a la spécificité d'utiliser de l'eau (respectivement de l'huile) comme fluide de travail intermédiaire pour compresser et détendre l'air.

L'utilisation de ce fluide intermédiaire permet de limiter l'augmentation de la température de l'air lors de la compression et donc de fonctionner plus proche de l'isotherme. Dans certaines configurations, le liquide intermédiaire est directement en contact avec l'air, ce qui améliore les échanges thermiques et le caractère isotherme du procédé.

Des pompes hydrauliques reliées au moteur (pour la charge électrique) et au générateur (décharge électrique) permettent de compresser et de détendre l'air. Les fournisseurs de technique font généralement appel à des motopompes à pistons qui assurent à la fois la compression et la détente du liquide intermédiaire de manière réversible, et permettent d'atteindre des pressions de plus de 200 bars. La pression du liquide est ensuite répercutée à l'air via une conversion hydropneumatique. Un séparateur air/liquide peut être requis avant le stockage d'air comprimé dans les configurations où le fluide intermédiaire est en contact direct avec l'air.

Les systèmes étudiés réalisent le stockage de l'air dans des unités de stockage de surface (des cylindres haute pression ; il n'est pas encore question de stockage géologique).



(Figure III.4 : Schéma de fonctionnement de la technique hydropneumatique / oléopneumatique de surface)

Avantages techniques

- Modulaire
- Pas d'autodécharge
- Bonne durée de vie
- Connaissance aisée de l'état de charge (pression)
- Grande réactivité du système hydraulique

Inconvénients techniques

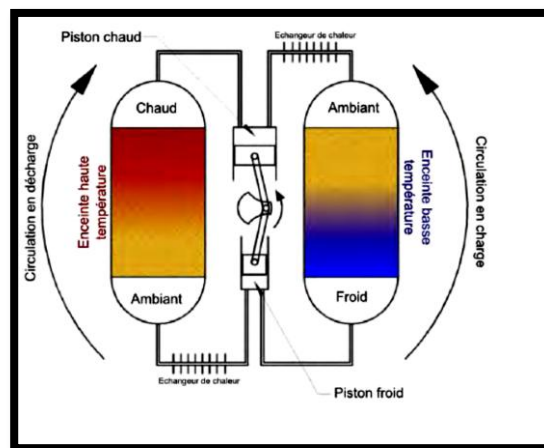
- Sécurité (réservoirs haute pression)
- Corrosion / Risque de Gel
- Rendement faible
- Pas encore de retour d'expérience [10].

Stockage d'électricité par pompage thermique

Le stockage de l'électricité est réalisé grâce à deux enceintes de matériaux réfractaires, respectivement à haute (entre 500 °C et 800 °C selon les techniques) et à basse température (entre -160 °C et -80 °C selon les techniques), qui servent de source chaude et de source froide à un cycle thermodynamique. Le stockage d'énergie est réalisé sous forme de chaleur sensible, en exploitant des variations de température dans le matériau.

Lors de la charge, le circuit fonctionne comme une pompe à chaleur : un fluide caloporteur (gaz neutre tel que de l'argon) est mis en mouvement par le biais d'un compresseur ou piston alimenté en électricité, et permet de pomper la chaleur de l'enceinte basse température pour la restituer à l'enceinte haute température via un cycle de compression/détente. Lors de la décharge, cette chaleur est libérée et le circuit fonctionne alors comme une machine thermique. Le fluide caloporteur actionne la turbine ou le piston, relié à un alternateur qui produit de l'électricité.

Les matériaux réfractaires envisagés pour le stockage thermique sont les graviers ou les céramiques (plus chers mais moins encombrants que le gravier).



(Figure III.5 : Schéma de fonctionnement de la technique du pompage thermique)

Avantages techniques

- Bonne densité énergétique : empreinte au sol maîtrisée
- Bon rendement
- Pas de contrainte de localisation
- Faible impact environnemental
- Stockage d'une grande quantité d'énergie

Inconvénients techniques

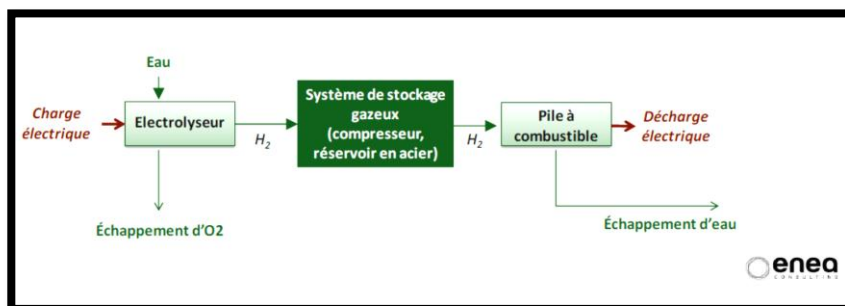
- Aucune turbomachine disponible sur étagère (du fait des hautes températures, et arrêts redémarrages/ fréquents : nécessité de développer des machines tournantes spécifiques
- Aucun retour d'expérience
- Résistance à un nombre important de cycles thermiques des matériaux réfractaires
- Très faible plage de fonctionnement pour les procédés impliquant des compresseurs (projet SETHER) dus à la nécessité de maintenir des ratios de compressions fixes (pour le maintien de la température de stockage).
- Peu efficace pour les petits systèmes du fait des déperditions thermiques plus importantes [10].

Chaîne électrolyseur-Stockage-PAC

Le stockage de l'électricité sous forme d'hydrogène repose sur la réversibilité de la réaction chimique liant eau, hydrogène et oxygène.

Durant la charge, l'énergie électrique permet de dissocier l'oxygène et l'hydrogène contenus dans l'eau, via un électrolyseur. L'hydrogène sert de vecteur de stockage d'énergie et il peut être stocké notamment sous forme gazeuse en surface.

Durant la décharge, l'hydrogène alimente une pile à combustible (PAC) qui génère de l'électricité. Différentes techniques de PAC sont commercialement disponibles ; Les piles à combustible à paroi échangeuse de protons (PEMFC) sont ici considérées.



(Figure III.6 : Schéma de fonctionnement de la technique de stockage-PAC)

Avantages techniques

- Haute densité énergétique (100 fois supérieure à l'air comprimé)
- Techniques (électrolyse, stockage et PAC) relativement matures
- Modularité : caractéristiques en puissance et en énergie indépendantes (dimensionnement de l'électrolyseur indifférent de la pile à combustible ou du stockage)
- Large profondeur de décharge possible

Inconvénients techniques

- Rendement faible par rapport aux autres techniques
- Coûts d'investissement initiaux élevés
- Sécurité et acceptation sociétale de l'hydrogène
- Déclarations ICPE et SEVESO [10].

Stockage électrochimique

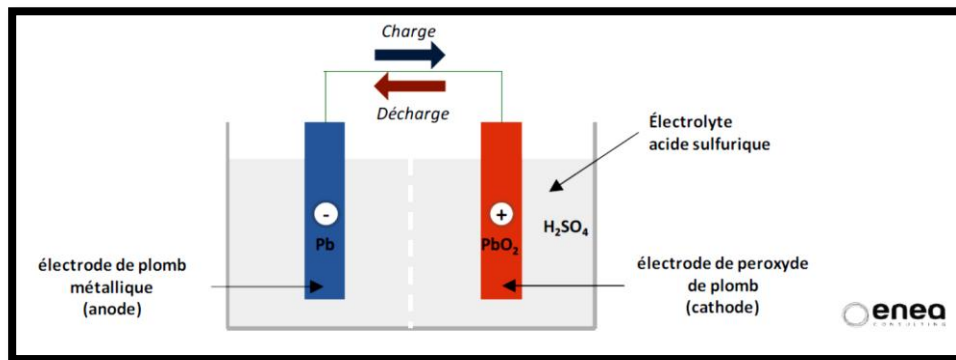
On distingue :

Le stockage par batterie plomb-acide (Pb-A)

C'est la technique de batteries la plus ancienne et la plus mature, les systèmes plomb-acide assurent un stockage électrochimique via un ensemble d'accumulateurs composés d'un électrolyte d'acide sulfurique et d'électrodes en plomb.

Bien que cette technique soit éprouvée et disponible commercialement depuis des décennies, ses performances restent limitées, notamment pour certains types de batteries plomb qui ont une faible durée de vie. Les batteries Pb-A sont aussi sensibles à la profondeur de décharge électrique (en comparaison aux autres systèmes électrochimiques).

Afin d'améliorer la durée de vie et d'envisager de nouvelles applications, de nouvelles technologies de batteries Pb-A dites avancées sont à l'étude, avec l'utilisation d'électrodes en amalgame de carbone et plomb par exemple.



(Figure III.7 : Schéma de fonctionnement de la technique de stockage par batterie plomb-acide (Pb-A))

Avantages techniques

- Technique éprouvée et mature (la technique reste la plus employée dans le monde pour les batteries)
- Technique sûre
- Grandes capacités disponibles
- Faible autodécharge
- Système électrochimique avec les plus bas coûts d'investissement
- Matériaux recyclables (près de 100% pour le plomb)

Inconvénients

- Durée de vie fortement dépendante des conditions d'utilisation (température notamment)
- Profondeurs de décharge acceptable mais très dépendante du type de batterie choisie
- Faible densité énergétique
- Connaissance de l'état de charge difficile
- Matériaux toxiques (plomb) [10].

Stockage par batterie nickel-zinc (Ni-Zn)

La batterie Nickel – Zinc est un accumulateur électrochimique composé d'une cathode en nickel, d'une anode en zinc et d'un électrolyte alcalin. La différence de potentiel aux bornes du circuit ouvert est de l'ordre de 1.65V à pleine charge. Il s'agit d'une technique relativement ancienne et utilisée pour des applications portables (type piles AA et AAA) mais avec un faible cyclage (typiquement < 200 cycles).

Lors de la décharge, le zinc est oxydé en oxyde de zinc $Zn(OH)_2$ non conducteur et en zincate de potassium K_2ZnO_2 soluble dans l'électrolyte. À l'inverse, lors de la charge, ces produits d'oxydation sont réduits en zinc métallique.

Lors de la charge, le zinc métallique se redistribue de manière irrégulière sur l'électrode et génère des croissances aléatoires (appelées « dendrites ») qui peuvent conduire à la mise en court-circuit de la batterie. Les derniers modèles utilisent un électrolyte à base de polymères afin de limiter le développement de ces « dendrites ». La recherche porte actuellement en priorité sur la cyclabilité des systèmes.

Avantages techniques

- Tension nominale plus élevée que dans d'autres techniques similaires
- Systèmes hautement recyclables (>90%)
- Faible coût du zinc
- Profondeur de décharge élevée possible
- Faible sensibilité à la température (faible impact de la température sur la durée de vie)
- Technique adaptée aux recharges rapides
- Sécurité
- Peu de besoins en gestion de la batterie et peu de maintenance
- Grande robustesse (y compris en surcharge ou sur-décharge)

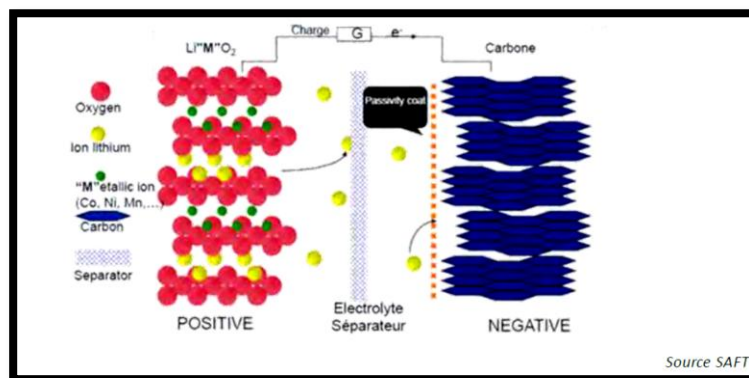
Inconvénients

- Faible cyclabilité pour certains types de batteries Ni-Zn
- Coût du nickel
- Systèmes stationnaires peu matures [10].

Stockage par batterie lithium-ion (Li-Ion)

Les batteries Lithium-Ion actuelles sont des accumulateurs électrochimiques composés d'une cathode en oxyde métallique de lithium, d'une anode en graphite et d'un électrolyte composé de sels de lithium dissous dans des carbonates organiques (solution ionique). Lors de la charge, les ions lithium migrent à travers l'électrolyte, de la cathode vers l'anode. En se combinant avec des électrons externes, les ions deviennent des atomes de lithium qui se déposent entre les couches de graphites. Le processus s'inverse lors de la décharge.

Les accumulateurs Lithium-Ion possèdent comme caractéristique de pouvoir supporter de grandes profondeurs de décharge avec un impact limité sur leur durée de vie.



(Figure III.8 : Schéma de fonctionnement de la technique de stockage par batterie lithium-ion (Li-Ion))

Avantages techniques

- Bonne profondeur de décharge possible sans beaucoup affecter la durée de vie
- Excellente efficacité
- Haute densité en énergie et en puissance
- Longue durée de vie
- Faible autodécharge
- Adaptables à de multiples applications

Inconvénients techniques

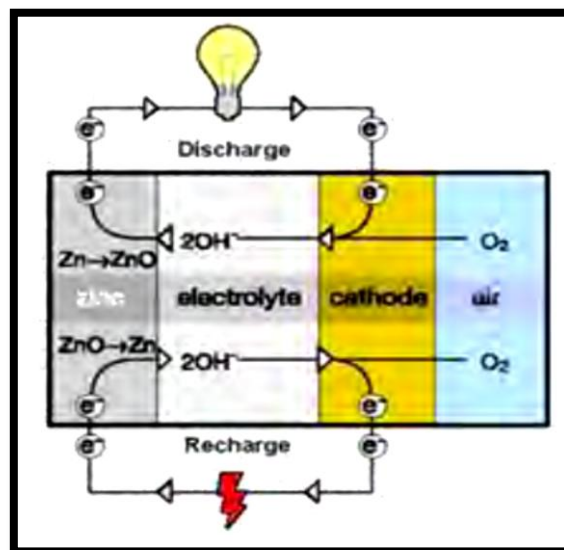
- Coûts élevés (mais en baisse)
- Problèmes de sécurité pour certaines compositions chimiques

- Besoin d'une régulation thermique
- Nécessité du monitoring individuel et de l'équilibrage de charge des cellules
- Problématiques sur les ressources en Lithium (cartel de producteurs, concentration géographique, contexte géopolitique, coût des méthodes alternatives de production) [10].

Stockage par batterie zinc-air (Zn-Air)

Dans les batteries de type zinc-air, l'anode est conçue à partir de zinc, métal à haute densité énergétique (d'autres métaux tels que l'aluminium, le lithium, le calcium, le magnésium ou le fer peuvent aussi être utilisés pour des batteries de type métal-air). La cathode, ou « électrode à air », est souvent constituée d'une structure en carbone poreuse ou d'une maille métallique recouverte par catalyse. L'oxygène de l'air constitue le seul réactif chimique de cette cathode.

L'électrolyte est un bon conducteur d'ion OH^- , tel que de l'hydroxyde de potassium. Il peut être sous forme liquide ou composé d'une membrane polymère solide saturée en KOH.



(Figure III.9 : Schéma de fonctionnement de la technique de stockage par batterie zinc-air (Zn-air))

Avantages techniques

- Haute densité énergétique
- Autodécharge quasi nul
- Investissement estimé faible comparé aux autres batteries
- Pas de composant toxique
- Pas de nécessité de remplacer régulièrement des composants (membrane, cellule...)

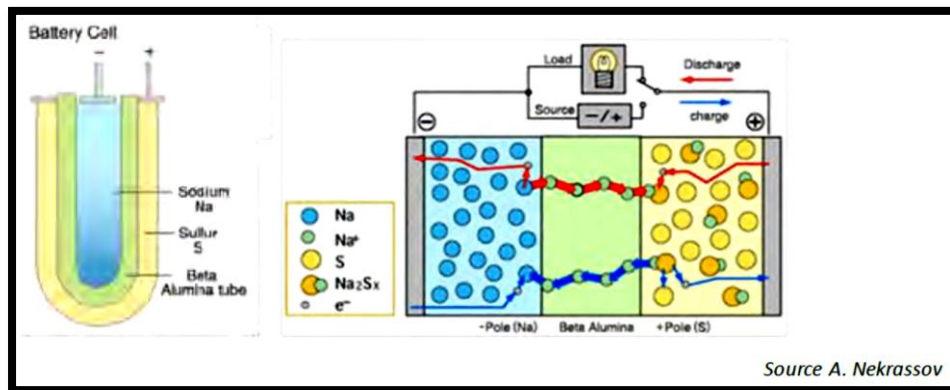
Inconvénients techniques

- Actuellement difficiles à recharger électriquement : faible rendement et mauvaise cyclabilité pour les systèmes actuels
- Problèmes de sensibilité à la carbonatation par l'air humide
- Technique peu mature [10].

Stockage par batterie sodium-soufre (Na-S)

Les batteries Na-S se composent d'une électrode positive en soufre et d'une électrode négative en sodium, toutes deux se trouvant au-dessus de leur température de fusion et donc sous forme liquide. L'électrolyte, servant à séparer les deux électrodes, est une céramique solide composée d'un dérivé d'aluminium (l'alumine- β). La structure globale de chaque cellule se présente généralement sous un ensemble de couches cylindriques.

Durant la décharge, les ions sodium produits à partir du sodium ($\text{Na} = \text{Na}^+ + \text{e}^-$) migrent à travers l'électrolyte vers le soufre pour former du polysulfure de sodium. Les électrons passent par le circuit extérieur à la batterie et engendrent un courant électrique. Lors de la charge, le processus est inversé.



(Figure III.10 : Schéma de fonctionnement de la technique de stockage par batterie sodium soufre (Na-S))

Avantages techniques

- Bonne efficacité
- Technique mature
- Peu de maintenance
- Profondeur de décharge importante
- Bonne capacité de cyclage
- Haute densité énergétique
- Coûts d'investissement relativement faibles
- Faible emprise au sol
- Connaissance aisée du taux de charge/décharge

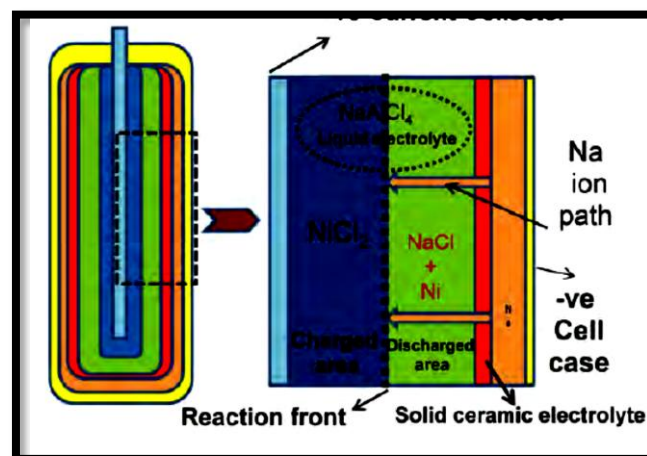
Inconvénients techniques

- Nécessité de maintenir à haute température (>300°C, consommation des équipements auxiliaires)
- Forte autoconsommation en inactivité (jusqu'à 20 % en plus de la capacité nominale par jour)
- Temps de réponse élevé à froid
- Pas de flexibilité du rapport énergie / puissance
- Risques d'explosion [10].

Stockage par batterie ZEBRA

Les batteries Na- NiCl₂ plus communément appelées batteries ZEBRA (Zeolite Battery Research Africa Project ou encore Zero Emission Battery Research Activity) se composent d'une cathode de chlorure de nickel NiCl₂ et d'une anode en sodium. Ces électrodes sont séparées par une membrane céramique à base d'alumine-β permettant l'échange d'ions Na⁺ (la même membrane que pour les batteries NaS).

Lors de la décharge, les ions sodium issus du sodium liquide ($\text{Na} = \text{Na}^+ + \text{e}^-$) migrent à travers la paroi vers la cathode pour former du nickel et du chlorure de sodium ($\text{NiCl}_2 + 2\text{Na}^+ + 2\text{e}^- = \text{Ni} + 2\text{NaCl}$). Lors de la charge, la réaction est inversée. Les batteries ZEBRA possède une résistance relativement importante aux larges profondeurs de décharge. Le matériau « cathodique », poreux, baigne dans un électrolyte liquide (NaAlCl₄) qui assure le transit des ions Na⁺. En cas de rupture de la membrane, cet électrolyte est à l'origine de l'apparition d'aluminium solide qui court-circuite la cellule. La batterie peut donc continuer à fonctionner, avec toutefois la perte de la tension nominale de la cellule concernée (sur un total pouvant atteindre plusieurs centaines de cellules par module).



(Figure III.11 : Schéma d'une batterie ZEBRA lors de la décharge)

Avantages techniques

- Bonne efficacité
- Profondeur de décharge importante
- Système interne d'autoprotection en cas de rupture de membrane
- Haute densité énergétique théorique (790 Wh/kg)
- Longue durée de vie calendaire
- Forte possibilité de recyclage
- Connaissance aisée du taux de charge/décharge
- Peu de maintenance

Inconvénients techniques

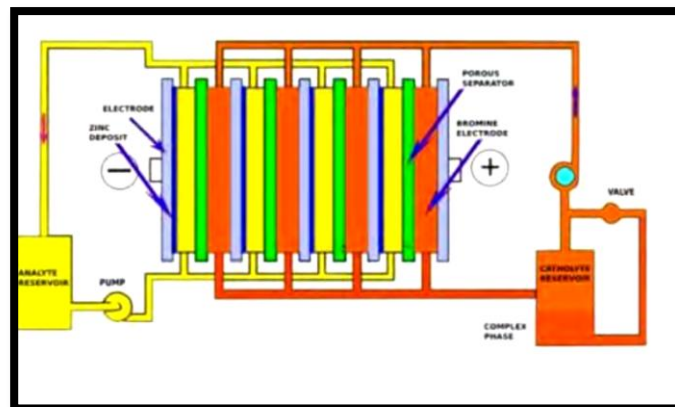
- Fonctionnement à haute température (250 – 350°C)
- Maintien en chauffe lors des périodes d'inactivité pour maintenir une bonne réactivité de la batterie, entraînant une consommation en plus de 10 à 20% de la capacité énergétique nominale par jour
- Longue durée de démarrage à froid
- Peu de flexibilité du rapport énergie / puissance [10].

Stockage électrochimique à circulation

On décrit les techniques de stockage suivantes :

Technologie de batterie à circulation zinc-bromine (Zn-Br) :

La technique Zn-Br fait partie de la famille des batteries Red-Ox (ou à circulation), qui possèdent la particularité de stocker l'énergie dans deux électrolytes (ici Zn^+ et Br^-), contenus dans des cuves distinctes. Les réactions électrochimiques de charge et de décharge se déroulent dans un ensemble de cellules similaires. Dans chaque cellule, les deux électrolytes circulent dans deux compartiments séparés par une membrane poreuse, et entourés par deux électrodes en matériau composite carbone-plastique. Durant la charge, un dépôt de zinc vient se former sur l'électrode négative. Durant cette même phase, le Brome se convertit en Bromure (Br_2) sur l'électrode positive, avant d'être stocké dans la cuve d'électrolyte. L'opération inverse se produit durant la décharge. Deux pompes hydrauliques assurent la circulation des électrolytes.



(Figure III.12 : Schéma fonctionnel de la technique de stockage par batterie à circulation zinc-bromine (Zn-Br))

Avantages techniques

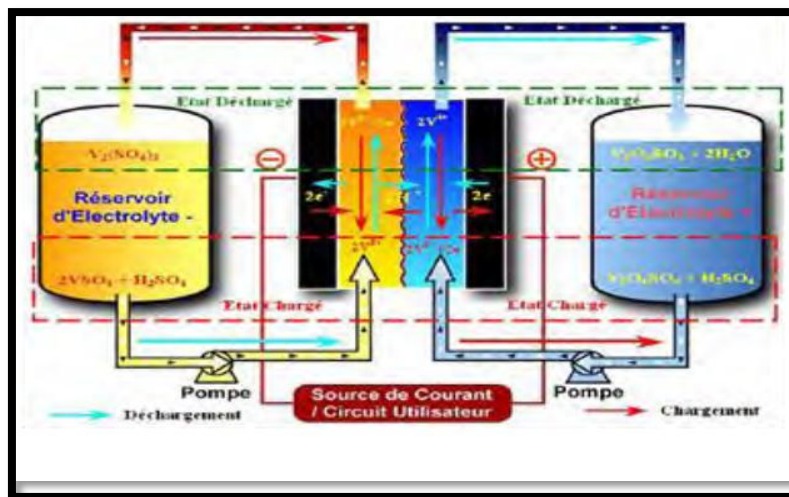
- Coûts d'investissement en énergie relativement faibles
- Technique relativement mature
- Faible autodécharge
- Supporte très bien les décharges profondes
- Technique modulaire (vaste gamme d'applications en puissance)
- Matériaux peu coûteux (zinc et plastiques)

Inconvénients techniques

- Faible densité énergétique
- Efficacité moyenne
- Architecture complexe (pompes, tuyauterie, systèmes de contrôle, etc.)
- Consommation d'énergie inhérente aux équipements auxiliaires (pompes notamment)
- Encombrement important
- Temps de décharge limité par le dépôt de zinc sur l'électrode négative
- Décharge complète requise tous les 5-10 cycles pour permettre un dépôt homogène du zinc sur l'électrode négative durant la charge, et ainsi maintenir l'efficacité du système
- Dangerosité liée au brome [10].

Technique de batterie à circulation vanadium-vanadium (VRB)

Dans les batteries Red-Ox VRB (batteries à circulation), l'énergie est stockée dans des solutions ioniques (électrolytes) associant du Vanadium sous différentes formes (4 états d'oxydation) et une solution diluée d'acide sulfurique. Chaque électrolyte (positif et négatif) est stocké dans un réservoir distinct, alimentant par le biais de pompes les cellules dans lesquelles se déroulent les réactions d'oxydo-réduction. Les cellules se divisent en deux compartiments séparés par une membrane polymère poreuse (perméable aux ions H^+), entourés par deux électrodes. Durant la charge et la décharge, les électrolytes sont successivement oxydés et réduits électrochimiquement, créant ainsi des différences de potentiel entre les deux électrodes et permettant d'accumuler et de restituer l'énergie électrique.



(Figure III.13 : Schéma fonctionnel de la technique de stockage à circulation Vanadium-Vanadium (VRB))

Avantages techniques

- Dissociation entre puissance et énergie, grande flexibilité du temps de décharge
- Un seul élément électro actif : pas de risque de contamination par diffusion
- Très bonne cyclabilité et longue durée de vie
- Bonne efficacité
- Très bonne réactivité
- Très faible autodécharge
- Supporte très bien les décharges profondes

- Technique modulaire (vaste gamme d'applications)
- Faible maintenance nécessaire

Inconvénients techniques

- Faible densité énergétique (la plus faible des techniques Red-Ox)
- Requier un grand nombre de cellules pour une puissance du système de stockage donnée
- Technologie non adaptée au stockage à très petite échelle (design complexe)
- Coût des électrolytes élevé (l'accroissement de la capacité de stockage se répercute fortement sur les coûts d'investissement) [10].

Stockage électrostatique

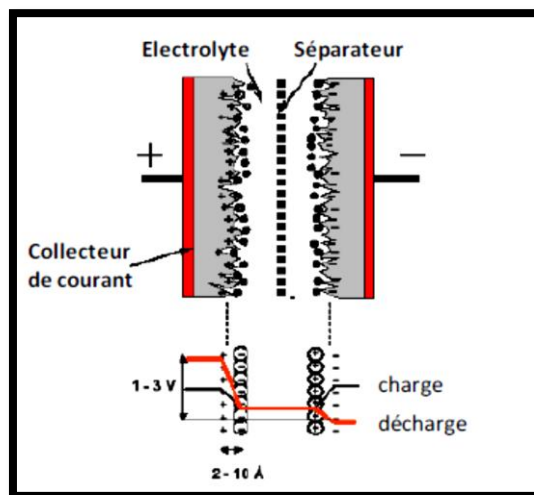
Stockage par les Supercondensateurs

Basés sur le principe de base des condensateurs, les supercondensateurs (ou supercapacités) stockent l'énergie sous forme de champ électrique créé entre deux électrodes, avec comme différence de pouvoir atteindre des densités d'énergie et de puissance bien plus importantes, proches de celles des batteries, tout en bénéficiant d'un temps de recharge très court (charge statique, absence de réaction chimique).

Une grande partie des supercapacités commercialisées est réalisée selon un modèle de double couche électrochimique : un électrolyte ionique est piégé entre deux électrodes présentant une large surface d'échange (cette caractéristique permettant d'atteindre de très hautes capacités). L'énergie électrique stockée permet de séparer les charges qui s'accumulent à l'interface entre l'électrode et l'électrolyte, créant ainsi une différence de potentiel entre les deux électrodes. L'utilisation de cette différence de potentiel dans un circuit externe permet de récupérer l'énergie sous forme de décharge électrique, sans contrainte sur la profondeur de décharge.

La quantité d'énergie stockée dépend de la taille, de la distance et des matériaux utilisés pour la conception des électrodes et constitue encore l'une des limites principales à l'utilisation à grande échelle des supercapacités.

À l'inverse des batteries dont la vitesse de charge et de décharge est limitée par l'utilisation d'électrolyte liquide, cette vitesse est limitée par la seule augmentation de la température des électrodes dans le cas des supercapacités.



(Figure III.14 : Schéma fonctionnel de la technique de stockage par les Supercondensateurs)

Avantages techniques

- Excellente réactivité
- Puissance spécifique élevée ($>10\text{kW/kg}$)
- Haut rendement
- Monitoring de charge facile (état de charge disponible via la tension)
- Peut se charger avec une puissance variable
- Pas d'influence de la profondeur de décharge sur la durée de vie
- Longue durée de vie (haute cyclabilité) comparée aux batteries électrochimiques
- Fonctionne sous une large gamme de températures
- Système modulaire (association en série)
- Très peu de maintenance
- Pas d'utilisation de produits polluants (carbone, aluminium)

Inconvénients techniques

- Faible énergie spécifique (Temps de décharge court)
- Coût important au kWh installé
- Forte autodécharge (décharge en 24 – 48h)
- Forte baisse de tension en phase de décharge
- Problèmes de sécurité (potentiellement inflammable selon les techniques)

- Variation de tension linéaire avec la capacité installée [10].

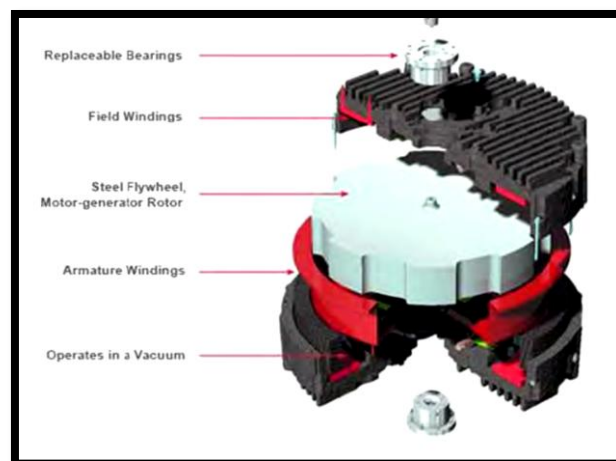
Stockage inertiel

Technique du volant d'inertie à basse vitesse

Le volant d'inertie basse vitesse est un système de stockage d'électricité sous forme d'énergie cinétique. L'énergie est stockée par le biais d'un disque ou d'un rotor, tournant sur son axe dans un environnement visant à minimiser les frottements : enceinte sous vide et utilisation de paliers généralement magnétiques pour la liaison rotor/stator. Le couplage de la masse tournante à un générateur/alternateur permet de stocker et produire l'électricité. L'interface de transmission de puissance comprend également un convertisseur électronique à vitesse variable et un contrôleur.

La forte modularité des volants d'inertie permet de concevoir des systèmes de stockage dans une large plage de puissance.

Les systèmes à basse vitesse sont les technologies de volants d'inertie les plus matures. Ils sont généralement conçus en acier massif et sont caractérisés par des vitesses de rotations généralement inférieures à 10 000 tpm du fait des limites du rotor en acier en termes de contraintes mécaniques.



(Figure III.15 : Volant d'inertie à basse vitesse)

Avantages

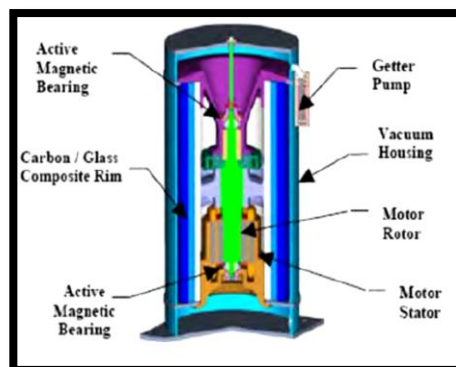
- Excellent temps de réponse
- Longue durée de vie
- Rendement élevé
- Connaissance de l'état de charge aisée
- Forte modularité en puissance
- Peu de maintenance
- Recyclage possible en fin de vie

Inconvénients

- Conception complexe
- Peu d'énergie disponible
- Très forte autodécharge due aux différentes pertes (mécaniques, magnétiques)
- Coût d'investissement élevé
- Potentiels problèmes de sécurité (masse tournante à haute vitesse)
- Bruit [10].

Volant d'inertie haute vitesse

Les systèmes à haute vitesse sont les techniques de volants d'inertie les plus récentes. Ils sont généralement conçus en matériaux composites (fibre de carbone et fibre de verre principalement) pour résister aux contraintes résultant des très hautes vitesses de rotation. Les systèmes à haute vitesse sont caractérisés par des vitesses de rotation supérieures à 10 000 tpm (généralement plusieurs dizaines de milliers de tours par minute).



(Figure III.16 : Volants d'inertie haute vitesse)

Avantages

- Excellent temps de réponse
- Longue durée de vie
- Rendement élevé
- Connaissance de l'état de charge aisée
- Large plage de régimes réalisables (+ modularité)
- Peu de maintenance

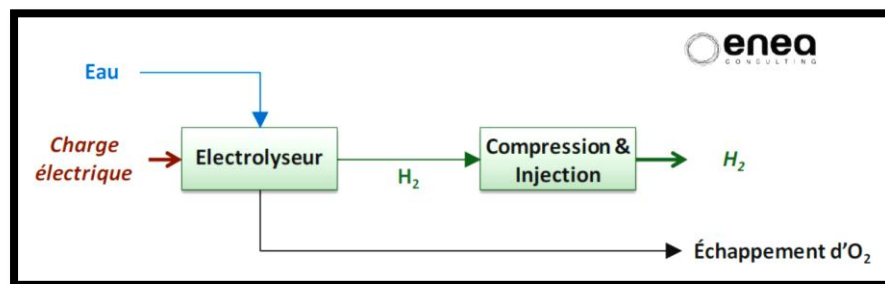
Inconvénients

- Conception complexe
- Peu d'énergie disponible
- Forte autodécharge due aux différentes pertes (mécaniques, magnétiques)
- Coût d'investissement élevé
- Potentiels problèmes de sécurité (masse tournante à haute vitesse)
- Bruit [10].

Power to gas

Production d'hydrogène par électrolyse

La production d'hydrogène par électrolyse de l'eau ou « Power to Hydrogen » est une technologie de stockage d'électricité par conversion : l'électricité à stocker est convertie en hydrogène, l'hydrogène produit est injecté directement dans le réseau gazier. Le réseau de gaz naturel ainsi que les sites de stockage associés constituent alors des moyens importants de stockage d'énergie. Du dioxygène est également produit lors de l'électrolyse et peut être valorisé.



(Figure III.17 : Schéma de la production d'hydrogène par électrolyse)

Avantages techniques

- Conversion directe d'électricité (pas de principe de charge / décharge) en un produit directement utilisable
- Couplage du réseau électrique avec le réseau de gaz possible
- Utilisation de la flexibilité du réseau gaz
- Techniques (électrolyse et injection de gaz sur le réseau) matures
- Conversion d'électricité en un gaz « vert »

Inconvénients techniques

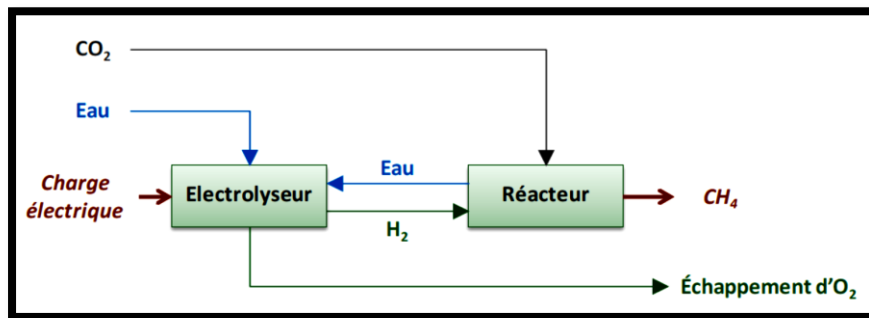
- Coûts d'investissement élevés
- Limitation du volume d'hydrogène acceptable dans le réseau
- Présence du réseau de gaz nécessaire
- Sécurité et acceptation sociétale de l'hydrogène
- Rendement limité [10].

Production de méthane par conversion catalytique du CO₂

La conversion catalytique directe du CO₂ vise à produire du méthane de synthèse à partir d'électricité. De l'eau et du dioxyde de carbone sont également des intrants nécessaires pour cette technique. Le procédé est constitué de deux étapes principales : une production d'hydrogène par électrolyse, suivie d'une production de méthane de synthèse par hydrogénation catalytique du dioxyde de carbone.

Pour le procédé nécessitant du dioxyde de carbone, il peut être intéressant de coupler cette technique avec des sites de captage de CO₂. Du dioxygène est également produit lors de cette chaîne de conversion et peut être valorisé.

Le méthane produit est injecté dans le réseau de gaz naturel. Le réseau gazier ainsi que les sites de stockage de gaz naturel associés constituent alors un moyen de stockage important. Contrairement à l'hydrogène, le méthane de synthèse est un vecteur beaucoup moins contraignant en termes de maintien des spécifications du gaz dans le réseau (pouvoir calorifique notamment).



(Figure III.18 : Schéma de la production du méthane par conversion catalytique du CO₂)

Avantages techniques

- Conversion directe d'électricité (pas de principe de charge / décharge) en un produit directement utilisable
- Réduction des pertes énergétiques comparativement à des solutions Power-to-Gas-to-Power (PAC H₂)
- Couplage du réseau électrique avec le réseau de gaz et désengorgement du réseau de transport d'électricité
- Grande flexibilité sur le volume de méthane de synthèse injectable dans le réseau contrairement à l'hydrogène
- Techniques individuellement matures
- Utilisation de la flexibilité du réseau gazier et importante capacité de stockage associée
- Valorisation du CO₂

Inconvénients

- Coûts d'investissement élevés
- Plus faible rendement que certaines solutions de stockage d'électricité
- Plus faible rendement que la solution Power-to-Gas avec vecteur gaz hydrogène
- Gestion de la température du réacteur en fonction des intermittences
- Gestion des catalyseurs et risques associés lors de la décharge
- Changement des catalyseurs requis tous les 5-10 ans
- Nécessite une source de CO₂ capté et purifié [10].

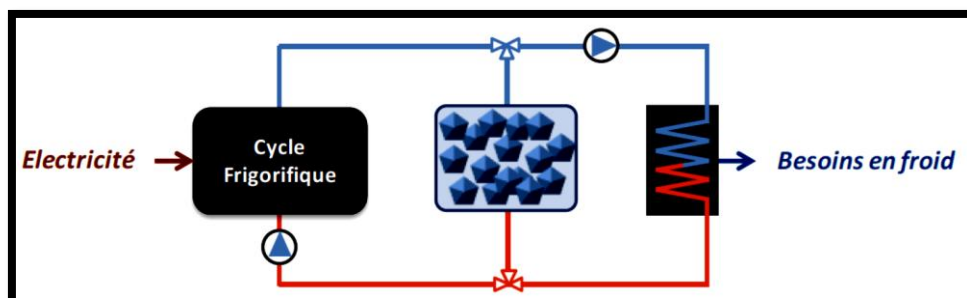
Stockage thermique latent

Stockage par la glace

Lors de la charge, le froid est produit par un cycle frigorifique alimenté en électricité, et est transporté vers l'unité de stockage par un fluide caloporteur. Le fluide réfrigérant échange de la chaleur avec l'eau contenue dans le dispositif de stockage, qui va geler et donc stocker le froid sous forme de chaleur latente de solidification. La charge est complète lorsque la totalité de l'eau de stockage se retrouve sous forme de glace.

La configuration des échanges thermiques entre le fluide réfrigérant et l'eau peut différer selon les techniques. Dans certains dispositifs, le stockage est constitué d'un bac d'eau traversé par des tubes dans lesquels circule le fluide réfrigérant. Au cours des échanges de chaleur, la glace va donc se former progressivement autour des tubes. Dans d'autres techniques, l'eau peut être contenue dans des nodules immergés dans un volume traversé par le fluide réfrigérant. Dans ce cas, la glace est formée à l'intérieur des nodules. La durée de stockage est directement liée au volume d'eau stocké, donc au volume du bac d'eau ou au nombre de nodules stockés selon la technologie.

Lors de la phase de décharge, le fluide caloporteur réchauffé va se refroidir, grâce au cycle frigorifique alimenté en électricité, mais en échangeant de la chaleur avec la glace. La glace va donc progressivement fondre au cours de la décharge, satisfaisant les besoins en refroidissement du réseau (usuellement une production d'eau glacée entre 1 °C et 5 °C). La décharge est complète quand la totalité de la glace a fondu.



(Figure III.19 : Schéma de stockage par la glace)

Avantages techniques

- Forte modularité en énergie
- Technologie mature et éprouvée
- Rénovation globalement aisée sur des installations de production de froid
- Permet de diminuer la puissance du groupe froid

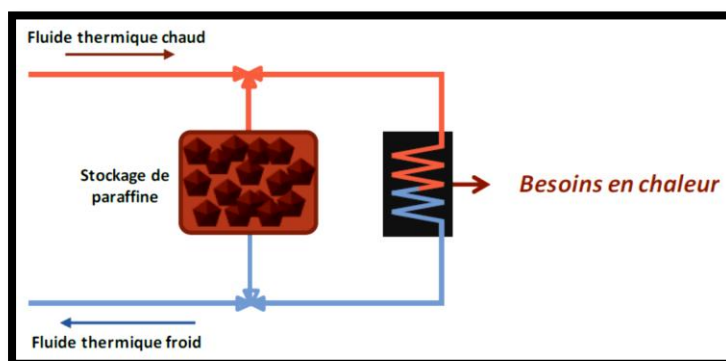
Inconvénients techniques

- Impossible de stocker à des températures inférieures à 0 °C [10].

Stockage par paraffine

Il s'agit d'une solution de stockage thermique sous forme de chaleur latente basée sur l'utilisation de paraffine comme matériau à changement de phase (MCP). Lors de la charge, l'énergie thermique est stockée durant la fusion de la paraffine. L'énergie thermique est ensuite récupérée durant la solidification de la paraffine lors de la décharge.

Selon la composition de la paraffine, la température de fusion peut prendre une valeur comprise entre -20 °C et 90 °C. Une partie de l'énergie peut également être stockée sous forme de chaleur sensible si la température s'écarte du point de fusion lors de la charge ou la décharge.



(Figure III.20 : Schéma de stockage par paraffine)

Avantages techniques

- Large plage de températures de fusion possibles, et davantage de points de fusion possibles sur cette plage comparée aux MCP inorganiques
- Non toxique
- Densité énergétique relativement élevée
- Chimiquement stable

Inconvénients techniques

- Faible conductivité thermique
- Température de fusion limitée à 90 °C
- Inflammable
- Température de fusion non variable une fois le MCP sélectionné
- Coûts relativement importants comparés au stockage d'eau chaude par exemple [10].

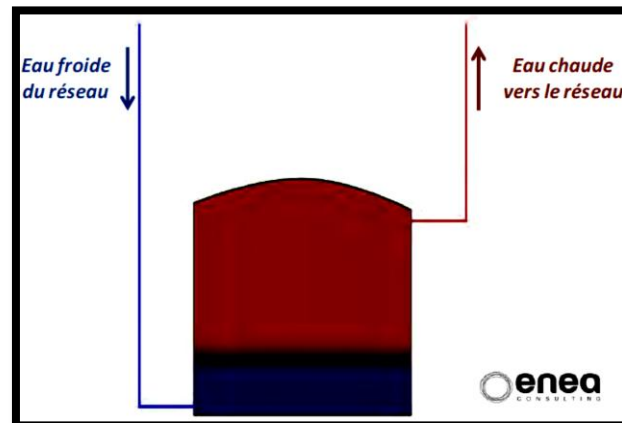
Stockage thermique sensible

Stockage d'eau chaude à pression atmosphérique

Il s'agit d'une solution de stockage thermique sous forme de chaleur sensible, où l'eau chaude du réseau de chaleur est directement stockée dans un réservoir isolé thermiquement. Ce réservoir est généralement localisé près d'un centre de production d'eau chaude. Il peut être soit de surface, soit enterré pour les plus grosses capacités. Les matériaux de construction peuvent également varier en fonction des capacités et des localisations (béton, acier, fibre de glace...)

À l'intérieur du réservoir, l'eau est généralement stockée de manière stratifiée grâce à des éléments internes qui permettent d'uniformiser la vitesse de l'eau et pas mélanger l'eau chaude et l'eau froide. Lors de la décharge, l'eau chaude soutirée du réservoir est remplacée par l'eau froide de retour du réseau, injectée en bas du réservoir. La stratification a l'avantage de permettre de livrer de l'eau à une température relativement constante.

En plus du réservoir proprement dit, des auxiliaires (pompes de charge et de décharge, échangeurs...) peuvent être également nécessaires.



(Figure III.21 : Schéma de stockage d'eau chaude à pression atmosphérique)

Avantages techniques

- Simplicité de conception (équivalent à un ballon d'eau chaude)
- Faible maintenance
- Technique mature
- Faibles coûts

Inconvénients techniques

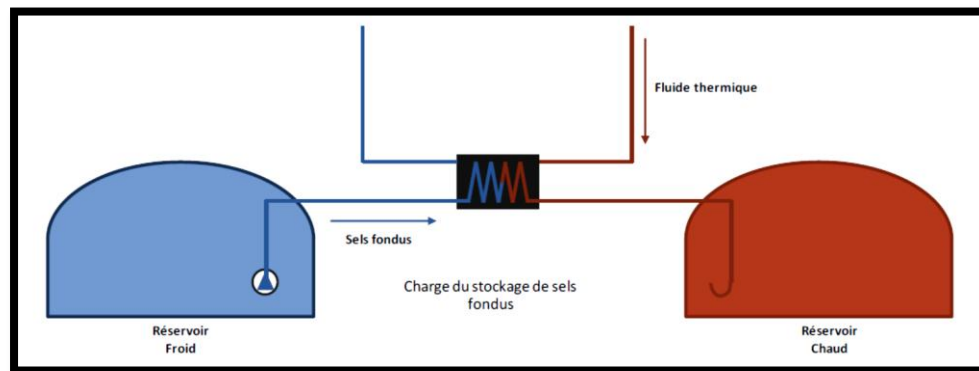
- Faible densité énergétique
- Température de stockage limitée à 100 °C
- Besoin davantage d'équipements auxiliaires (pompes notamment) pour s'adapter à la pression du réseau par rapport à une solution pressurisée
- Température livrée potentiellement non constante en cas de mauvaise stratification, ou d'échange de chaleur trop importants entre les strates [10].

Stockage par Sels fondus

Il s'agit d'une solution de stockage thermique sous forme de chaleur sensible, où l'énergie thermique est stockée dans des sels fondus à haute température (au-dessus de 290 °C) contenus dans un réservoir isolé thermiquement. La composition des sels fondus peut varier selon les systèmes, et consiste généralement en un mélange de nitrate de sodium et de nitrate de potassium.

La configuration la plus répandue met en jeu deux réservoirs : un réservoir « froid » à environ 290 °C et un réservoir « chaud » à plus de 380 °C. Lors de la charge, les sels fondus sont soutirés du réservoir froid et chauffés par un fluide thermique (généralement de l'huile thermique ou de la vapeur d'eau) par le biais d'un échangeur de chaleur, pour être ensuite stockés dans le réservoir chaud. Le processus est inversé lors de la décharge : les sels fondus restituent alors au fluide thermique la chaleur stockée via un échangeur de chaleur.

Compte tenu des températures mises en jeu, ce type de stockage de chaleur est aujourd'hui principalement utilisé dans les centrales solaires à concentration. Il existe également un potentiel pour les applications industrielles.



(Figure III.22 : Principe de fonctionnement d'un stockage par sel fondu)

Avantages

- Non toxique
- Densité énergétique
- Faibles coûts
- Chimiquement stable
- Fluide idéal pour l'échange de chaleur avec un échangeur de chaleur relativement simple
- Faible corrosion pour de l'acier en dessous de 350 °C et pour de l'acier inoxydable en dessous de 600 °C
- Bonne capacité d'adaptation aux
- hautes températures

Inconvénients

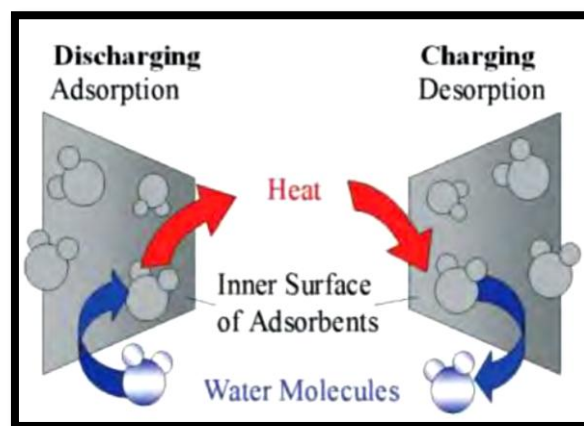
- Température de solidification d'environ de 230°C
- Niveau de température non adapté aux réseaux de chaleur
- Besoin d'auxiliaires de préchauffage pour le démarrage (généralement par le biais d'une résistance électrique)
- Besoin de traçage électrique des équipements au contact avec les sels
- Possible formation de nitrite (fortement corrosive) au-dessus de 600 °C [10].

Stockage thermique thermochimique

Stockage thermochimique de chaleur par Alumino-phosphate

Cette technique de stockage thermochimique est basée sur le phénomène d'adsorption/désorption de vapeur d'eau par des molécules poreuses d'aluminophosphates (APO) agencées spatialement de manière bien définie. La charge repose sur la désorption de l'eau (sous forme de vapeur) initiée par de la chaleur (séchage des APO). À l'inverse, lors de la décharge de l'eau est adsorbée par les APO tout en produisant de la chaleur.

Le stockage d'énergie thermique est dit thermochimique dans le sens où les réactions d'adsorption/désorption sont à l'origine de l'émission/captage de chaleur. L'intérêt principal de la technique réside dans ses caractéristiques hybrides, entre zéolithes et matériaux poreux.



(Figure III.23 : Principe de fonctionnement d'un stockage thermochimique de chaleur par Alumino-phosphate)

Avantages techniques

- Stockage à température ambiante : autodécharge nul sur de très longues périodes
- Forte densité de stockage en eau et en chaleur
- Couplage possible avec des applications de déshydratation de gaz
- Transport de la chaleur stockée envisageable
- Temps de désorption relativement court : 2 heures à 140°C (10 heures à 250 – 300°C pour les zéolithes)

Inconvénients techniques

- Coûts élevés comparés aux zéolithes
- Difficulté de production
- Technique non mature
- Température de restitution décalée de plusieurs degrés par rapport à la température de charge [10].

Conclusion

D'après les informations et les données inclus dans le chapitre III et, compte tenu des études de cas analysées précédemment, il est nécessaire de stocker l'énergie renouvelable, surtout l'énergie solaire. qui est une source de richesse dans notre splendide pays, ce stockage nécessite des techniques qui respectent les critères de cout de sécurité et de capacité ainsi que d'environnement.

Cette étude nous a permis de montrer qu'il existe différentes méthodes de stockage et de bien connaitre leurs avantages et leurs contraintes.

Chapitre IV

Méthodologie de comparaison

Les méthodes d'analyse multicritère d'aide à la décision

Les méthodes d'analyse multicritères d'aide à la décision sont employées pour traiter des problèmes qui possèdent plusieurs solutions. Ainsi, le problème se réduit à déterminer la meilleure solution parmi un ensemble fini de solutions connues a priori, en se basant sur les préférences du décideur.

Les méthodes d'analyse multicritères d'aide à la décision ont été définies par Ben MENA comme des techniques assez récentes et en plein développement. Par leur manière d'intégrer tout type de critères, ces procédures semblent mieux permettre de se diriger vers un judicieux compromis plutôt qu'un optimum souvent désuet.

Roy a proposé une classification de ces méthodes en fonction du type d'agrégation des préférences du décideur. Ainsi, trois grandes catégories ont été distinguées : les méthodes par approche du critère unique de synthèse, les méthodes de surclassement et les méthodes interactives.

Dans l'approche du critère unique de synthèse, les préférences au niveau de chaque attribut (préférences locales) sont agrégées en une fonction unique dite d'utilité ou de valeur, qu'il s'agit ensuite d'optimiser. Ces approches ne sont pas compatibles avec des situations d'incomparabilité, mais permettent d'aborder les situations où le décideur est apte à juger toute paire d'actions $\{a,b\}$ (c.-à-d. soit a est préférée à b , soit b est préférée à a , soit le décideur est indifférent entre les deux actions).

Parmi les méthodes qui s'inscrivent dans le cadre de cette approche, nous pouvons citer Multiple Attribute Utility Theory (MAUT), Utilité Additive (UTA), Simple Multi Attribute Rating Technique (SMART), Technique for Order Preference by Similarity to Ideal Solution (TOPSIS), Analytic Hierarchy Process (AHP).

À la différence de l'approche du critère unique de synthèse, l'approche par surclassement de synthèse peut prendre en compte l'incomparabilité entre deux actions (par exemple quand le décideur est incapable de juger toute paire d'actions). Cette approche vise essentiellement à établir des relations binaires dites « relations de classement ». Cette catégorie inclut un certain nombre de méthodes telles que la méthode Preference Ranking Organization Méthode for

Enrichment Evaluation (PROMETHEE), la méthode Élimination Et Choix Traduisant la Réalité, etc.

Les méthodes interactives se distinguent quant à elles des deux autres approches par le fait que le décideur n'intervient pas uniquement lors de la définition du problème, mais tout au long du processus décisionnel. Un certain nombre de méthodes interactives ont été développées dans la littérature scientifique. Citons à titre d'exemples la méthode STEM ou la méthode de Vanderpooten [12].

Nous avons décidé d'utiliser dans notre étude la méthode TOPSIS (Technique for Order by Similarity to Ideal Solution) car elle a une caractéristique principale qui consiste à introduire les notions de solution idéale et anti-idéale et aussi pour la simplicité de sa procédure de calcul qui peut être facilement programmée et surtout pour sa sensibilité aux préférences du décideur.

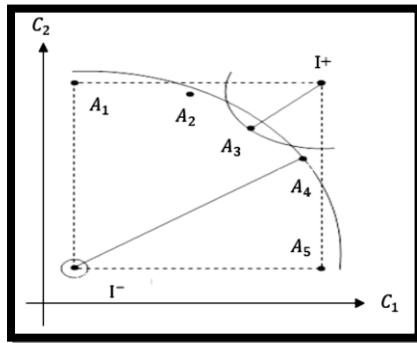
Descriptions de la méthode TOPSIS floue

Proposée par Hwang et Yoon en 1981, la méthode TOPSIS (Technique for Order by Similarity to Ideal Solution) est l'une des méthodes d'analyse multicritères d'aide à la décision les plus utilisées pour faire face à des problèmes de décision multicritères.

Cette méthode est basée sur la recherche de l'alternative la plus proche de la solution idéale (c.-à-d. l'alternative qui maximise les critères de nature « gain » et qui minimise les critères de nature « coût ») et la plus lointaine de la solution anti-idéale (c.-à-d. l'alternative qui minimise les critères de nature « gain » et qui maximise les critères de nature « coût »). Ce principe est illustré sur la (figure IV.1) qui représente deux critères C1 et C2, cinq alternatives A1, A2, A3, A4, A5 et les solutions idéale I+ et anti-idéale I-. En considérant des poids égaux, et en se basant sur la distance euclidienne habituelle, nous pouvons constater que le point A3 est le plus proche de la solution idéale, tandis que le point A4 est le plus écarté de la solution anti-idéale. Ce dilemme de choix entre idéal et anti-idéal est résolu par la méthode TOPSIS en introduisant pour chaque alternative une distance pondérée à l'idéal et à l'anti-idéal.

Dans le cadre de la méthode TOPSIS classique, toutes les évaluations et les poids des critères sont supposés connus avec précision et sont modélisés avec des nombres réels. Cependant, dans la pratique, il peut être difficile de définir certaines données avec précision. La version floue de

la méthode TOPSIS (TOPSIS Floue) est conçue pour faire face à ces situations en permettant la modélisation des évaluations et des poids des critères par des valeurs floues [12].



(Figure IV.1 : la recherche de l'alternative la plus proche de la solution idéale)

Les étapes d'application de la méthode TOPSIS floue

La méthode TOPSIS floue consiste en 6 étapes principales :

- **Étape 1** : Construction de la matrice de décision floue et du vecteur du poids :

Soit m alternatives ($i=1, \dots, m$) évaluées en utilisant n critères C_j ($j=1, \dots, n$). L'évaluation de ces alternatives par rapport aux différents critères peut être représentée par la matrice floue \tilde{D} . Rappelons qu'une matrice est qualifiée de "floue" si elle comprend au moins une entrée floue

$$\tilde{D} = \begin{matrix} & C_1 & C_2 & \dots & C_n \\ \begin{matrix} A_1 \\ A_2 \\ \dots \\ A_m \end{matrix} & \left| \begin{array}{cccc} \tilde{x}_{11} & \tilde{x}_{12} & \dots & \tilde{x}_{1n} \\ \tilde{x}_{21} & \tilde{x}_{22} & & \tilde{x}_{2n} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ \tilde{x}_{m1} & \tilde{x}_{m2} & \dots & \tilde{x}_{mn} \end{array} \right. & \end{matrix} \quad (IV.1)$$

Avec \tilde{x}_{ij} un nombre flou représentant l'évaluation de l'alternative A_i par rapport au critère C_j . Les poids des différents critères peuvent être modélisés sous la forme d'un vecteur comme suit

$\tilde{W} = [\tilde{w}_1, \tilde{w}_2, \dots, \tilde{w}_n]$; \tilde{w}_j est une valeur linguistique qui représente le poids du critère C_j .

- **Étape 2** : Construction de la matrice de décision floue normalisée :

La matrice de décision est normalisée afin de ramener les différentes unités de mesures à une échelle commune. Ainsi, les valeurs normalisées seront incluses dans l'intervalle [0, 1]. L'ensemble des critères peut être divisé selon leurs natures en « critères de type coût » (Co) (à minimiser) et « critères de type gain / bénéfice » (B) (à maximiser).

La matrice de décision floue normalisée est définie comme suit :

$$\tilde{R} = [\tilde{r}_{ij}] \quad * \quad ni=1,.., m \quad (IV.2) \quad \text{et} \quad j=1,.., n$$

Dans le cas où les évaluations des alternatives dans la matrice \tilde{D} sont données sous la forme des nombres flous triangulaires $\tilde{x}_{ij} = (a_{ij}, b_{ij}, c_{ij})$, les valeurs normalisées seront calculées de la manière suivante :

$$\tilde{r}_{ij} = \left(\frac{a_{ij}}{c_j^+}, \frac{b_{ij}}{c_j^+}, \frac{c_{ij}}{c_j^+} \right) \quad (IV.3) \quad ; \quad \text{Si le critère } C_j \text{ est de type bénéfice } (C_j \in B).$$

$$\tilde{r}_{ij} = \left(\frac{a_j^-}{c_{ij}}, \frac{a_j^-}{b_{ij}}, \frac{a_j^-}{a_{ij}} \right) \quad (IV.4) \quad ; \quad \text{Si le critère } C_j \text{ est de type coût } (C_j \in Co).$$

Avec $c_{j+} = \max_i c_{ij} \quad (IV.5) \quad \text{et} \quad a_{j-} = \min_i a_{ij} \quad (IV.6).$

Pour des nombres flous trapézoïdaux $\tilde{x}_{ij} = (a_{ij}, b_{ij}, c_{ij}, d_{ij})$, les valeurs normalisées sont déterminées comme suit :

$$\tilde{r}_{ij} = \left(\frac{a_{ij}}{d_j^+}, \frac{b_{ij}}{d_j^+}, \frac{c_{ij}}{d_j^+}, \frac{d_{ij}}{d_j^+} \right) \quad (IV.7) \quad ; \quad \text{Si le critère } C_j \text{ est de type bénéfice } (C_j \in B).$$

$$\tilde{r}_{ij} = \left(\frac{a_j^-}{d_{ij}}, \frac{a_j^-}{c_{ij}}, \frac{a_j^-}{b_{ij}}, \frac{a_j^-}{a_{ij}} \right) \quad (IV.8) \quad ; \quad \text{Si le critère } C_j \text{ est de type coût } (C_j \in Co).$$

Avec : $d_{j+} = \max_i d_{ij} \quad (IV.9) \quad \text{et} \quad a_{j-} = \min_i a_{ij} \quad (IV.10).$

- **Étape 3** : Construction de la matrice de décision floue pondérée :

La matrice floue pondérée est calculée en multipliant les valeurs de la matrice de décision floue normalisée par les poids des critères d'évaluation comme suit :

$$\tilde{V} = [\tilde{v}_{ij}]_{m \times n} \quad i=1, \dots, m \quad (IV.11) \quad \text{et} \quad j=1, \dots, n ; \quad \tilde{v}_{ij} = \tilde{r}_{ij} \otimes \tilde{w}_j \quad (IV.12)$$

- **Étape 4** : Détermination de la solution idéale FPIS et la solution anti-idéale FNIS :

La solution idéale positive floue FPIS (Fuzzy Positive Ideal Solution) notée A^+ et la solution idéale négative floue FNIS (Fuzzy Negative Ideal Solution) notée A^- sont données par :

$$A^+ = (\tilde{v}_{1+}, \tilde{v}_{2+}, \dots, \tilde{v}_{n+}) \quad (IV.13)$$

$$A^- = (\tilde{v}_{1-}, \tilde{v}_{2-}, \dots, \tilde{v}_{n-}) \quad (IV.14)$$

Pour des nombres flous triangulaires : $\tilde{v}_{j+} = \max_i \tilde{v}_{ij}$ et $\tilde{v}_{j-} = \min_i \tilde{v}_{ij}$; $i=1, \dots, m$ et $j=1, \dots, n$

Pour des nombres flous trapézoïdaux : $\tilde{v}_{j+} = \max_i \tilde{v}_{ij}$ et $\tilde{v}_{j-} = \min_i \tilde{v}_{ij}$; $i=1, \dots, m$ et $j=1, \dots, n$.

- **Étape 5** : Détermination des distances de chaque alternative par rapport FPIS et FNIS

La distance de chaque alternative A_i par rapport à FPIS et à FNIS est donnée par :

$$d_{i+} = \sum_{j=1}^n \tilde{v}_{ij}, \tilde{v}_{j+}, i=1, \dots, m \quad (IV.15)$$

$$d_{i-} = \sum_{j=1}^n \tilde{v}_{ij}, \tilde{v}_{j-}, i=1, \dots, m \quad (IV.16)$$

- **Étape 6** : Calcul des coefficients de proximité et rangement des alternatives

Cette étape consiste à associer à chaque alternative A_i un coefficient de proximité, ou coefficient de rapprochement au profil idéal (« Closeness Coefficient » : CC_i), calculé en se basant sur les distances d_{i+} et d_{i-} comme suit :

$$CC_i = \frac{d_{i-}}{d_{i-} + d_{i+}}, i = 1, \dots, m. \quad (IV.17)$$

Conclusion

Nous avons décrit dans ce chapitre IV la méthode d'analyse multicritère d'aide à la décision. Nous avons exposé le principe de base des méthodes utilisées pour aborder les problématiques multicritères, à savoir les méthodes d'analyse multicritères d'aide à la décision.

La méthode d'aide à la décision multicritères multi-attributs TOPSIS Floue a été détaillée avec ces étapes d'applications et ces formules.

Chapitre V

**Adaptation de la méthode TOPSIS floue pour le choix d'un meilleur
stockage d'énergie solaire**

Choix de la méthode TOPSIS floue

Notre objectif dans cette partie est de classer, selon leur ordre de convenance, un ensemble des techniques de stockage de l'énergie solaire. Le but est de donner aux décideurs un récapitulatif global sur lequel ils s'appuient pour choisir le meilleur stockage. Comme nous avons déjà mentionné dans le chapitre IV, la méthode TOPSIS est une des méthodes d'analyse multicritères d'aide à la décision les plus utilisées pour faire face à des problèmes de décision multicritères. Cette méthode est basée sur la sélection d'une alternative qui se rapproche le plus possible de la solution idéale et s'éloigne le plus possible de la pire solution pour tous les critères. Pour l'application de la méthode TOPSIS classique, l'évaluation et les poids des critères sont connus avec précision, et sont modélisés avec des nombres réels. Cependant, dans notre problématique, il y a des difficultés à juger parce qu'une majorité des données n'est pas connue avec précision. La version floue de la méthode TOPSIS (TOPSIS floue), proposé par Chen en 2000, permet de traiter, évaluer et donner des poids des critères par des valeurs floues avec des variables linguistiques.

Les étapes de la méthode TOPSIS floue seront présentées d'une façon détaillée dans ce chapitre.

La première phase dans une approche d'analyse multicritère consiste à définir et à structurer le problème de décision dans une structure hiérarchique en identifiant les éléments (actions, décideurs et critères) appropriés à notre objectif. La présente étude tente de sélectionner la technique de stockage la plus appropriée pour stocker l'énergie solaire.

En effet, d'après l'analyse des besoins et des objectifs, nous sommes face à une problématique, suivant laquelle nous cherchons à classer les techniques de stockage choisies selon leurs convenances du meilleur stockage au moins bon stockage.

Les techniques de stockage sont nombreuses, et la comparaison entre elles, est très délicate.

Dans ce contexte, on a choisi deux type de stockage d'énergie solaire dans cette étude de comparaison, les techniques de stockages qu'on va choisir sont les plus connues et, les plus satisfaisantes et, efficaces d'après les dernières études et les données techniques.

La détermination de l'ensemble des actions est une étape très sensible de toute démarche d'aide à la décision. En se basant sur l'expérience des décideurs, deux techniques de stockage dans

chaque type (électrique et thermique) les plus appropriés ont été choisis comme techniques de stockage potentiel, notée : T1 et T2 pour le premier type (forme électrique), T'1 et T'2 pour le deuxième type (forme thermique).

Pour le premier type de stockage sous forme électrique, on va prendre le stockage par batterie de lithium ion(T1) et le stockage par hydrogène (power to gas) (T2).

Pour le deuxième type de stockage sous forme thermique, on va prendre comme cas d'étude le stockage par sel fondu (T'1) et, le stockage par eau chaude à pression atmosphérique (T'2).

Les techniques de stockage mentionnées sont expliquées en détail dans le Chapitre III.

Pour résoudre notre problématique nous allons prendre en compte sept critères qui sont : le coût (C1), le rendement (C2), la sécurité (C3), la maintenance (C4), capacité d'un équipement (C5), la durée de stockage (C6) et, la maturité technique (C7).

Ces critères seront utilisés pour les deux formes de stockage (électrique et thermique).

On va résoudre notre problématique en utilisant la méthode TOPSIS floue à l'aide d'Excel

Application numérique (Tous les calculs sont faits à l'aide d'Excel.)

Après avoir présenté les différentes alternatives T_i ($i = 1, \dots, 2$), $T'_{i'}$ ($i' = 1, \dots, 2$) et les différents critères C_j ($j = 1, \dots, 7$). L'adaptation de la méthode TOPSIS floue sur notre problématique consiste en 6 étapes principales (les étapes de cette méthode sont détaillées dans le chapitre précédent).

Pour le stockage sous forme électrique (le premier type de stockage) :

Étape 1 : Construction de la matrice de décision floue et du vecteur du poids :

Au départ, un ensemble de trois décideurs D_k ($k = 1, \dots, 3$), identifient l'ensemble des variables linguistiques des critères. Ces valeurs sont ensuite converties en des nombres triangulaires. Les variables linguistiques ainsi que ses nombres flous sont utilisés pour l'évaluation des alternatives par rapport à chaque critère.

Variables linguistiques	Très faible (TF)	Faible (F)	Moyen (M)	Haute (H)	Très haute (TH)
Nombre triangulaire floue	(1, 1,3)	(1, 3,5)	(3, 5,7)	(5, 7,9)	(7, 9,9)

(Tableau V.1 : Variables linguistiques pour le poids d'importance de chaque critère).

Variables linguistiques	Très mauvais (TM)	Mauvais (M)	Juste (J)	Bien (B)	Très bien (TB)
Nombre triangulaire floue	(1, 1,3)	(1, 3,5)	(3, 5,7)	(5, 7,9)	(7, 9,9)

(Tableau V.2 : Variables linguistiques pour les alternatives (techniques de stockage)).

Ensuite, chaque décideur est invité à sélectionner et à communiquer ses préférences w_{ki} (poids d'importance) de chaque critère i ainsi que d'évaluer le x_{kij} de chaque technique de stockage j par rapport à chaque critère i .

	C ₁	C ₂	C ₃	C ₄	C ₅	C ₆	C ₇
DECIDEUR -1							
T1	BIEN	TRES BIEN	MAUVAIS	BIEN	TRES BIEN	TRES BIEN	JUSTE
T2	TRES MAUVAIS	JUSTE	JUSTE	MAUVAIS	BIEN	TRES BIEN	JUSTE

(Tableau V.3 : Variables linguistiques pour décideur 1).

	C ₁	C ₂	C ₃	C ₄	C ₅	C ₆	C ₇
DECIDEUR -2							
T1	MAUVAIS	TRES BIEN	TRES MAUVAIS	BIEN	TRS BIEN	BIEN	JUSTE
T2	MAUVAIS	BIEN	MAUVAIS	BIEN	JUSTE	TRES BIEN	JUSTE

(Tableau V.4 : Variables linguistiques pour décideur 2).

	C ₁	C ₂	C ₃	C ₄	C ₅	C ₆	C ₇
DECIDEUR -3							
T1	JUSTE	BIEN	JUSTE	JUSTE	BIEN	BIEN	JUSTE
T2	TRES MAUVAIS	TRS BIEN	TRS BIEN	BIEN	TRS BIEN	TRES BIEN	JUSTE

(Tableau V.5 : Variables linguistiques pour décideur 3).

x_{kij}		C ₁	C ₂	C ₃	C ₄	C ₅	C ₆	C ₇
T ₁	D ₁	579	799	135	579	799	799	357
	D ₂	135	799	113	579	799	579	357
	D ₃	357	579	357	357	579	579	357
T ₂	D ₁	113	357	357	135	579	799	357
	D ₂	135	579	135	579	357	799	357
	D ₃	113	799	799	579	799	799	357

(Tableau V.6 : Variables triangulaire pour chaque décideur).

Après, les poids des critères w_{kj} et les évaluations des techniques de stockage x_{kij} sont agrégés pour obtenir respectivement le vecteur du poids w_j et la matrice de décision floue x_{ij} , suivant les formules ci-dessous :

Pour le vecteur du poids :

Étant donné les poids d'importance (nombres flous) :

$$w_{kj} = \{w_{kj1}, 2, w_{kj3}\}$$

Le vecteur du poids agrégé est défini comme suit :

$$w_j = \{w_{j1}, 2, 3\}$$

Telle que :

$$w_{j1} = \min^k \{w_{kj1}\} \quad (V.1)$$

$$w_{j2} = \frac{1}{ND} \sum_{k=1}^{ND} w_{kj2} \quad (V.2) \quad ; \text{ND : Le nombre des décideurs.}$$

$$w_{j3} = \max^k \{w_{kj3}\} \quad (V.3)$$

poids	TRES HAUT	TRES HAUT	TRES HAUT	MOYE N	TRES HAUT	HAUT	faible
	Matrice de décision floue						
T1	1 5,00000 9	5 8,3333 9	1 3 7	3 6,3333 9	5 8,3333 9	5 7,6667 9	3 5 7
T2	1 1,66667 5	3 7 9	1 5,66667 9	1 5,6667 9	7 3 9	7 9 9	3 5 7

(Tableau V.7 : matrice de décision floue pour un poids agrégée).

Pour la matrice de décision floue :

Étant donné les évaluations des techniques (nombres flous) :

$$\tilde{x}_{kij} = \{a_{kij}, b_{kij}, c_{kij}\} \quad (V.4)$$

La matrice de décision floue est calculée comme suit :

$$\tilde{x}_{ij} = \{a_{ij}, b_{ij}, c_{ij}\} \quad (V.5)$$

$$a_{ij} = \min^k \{a_{kij}\} \quad (V.6)$$

$$b_{ij} = \frac{1}{ND} \sum_{k=1}^{ND} b_{kij} \quad (V.7)$$

$$c_{ij} = \max^k \{c_{kij}\} \quad (V.8)$$

Matrice de décision floue							
poids	7 9 9	7 9 9	7 9 9	3 5 7	7 9 9	5 7 9	1 3 5
	C ₁	C ₂	C ₃	C ₄	C ₅	C ₆	C ₇
T1	1 5,0000 9	5 8,3333 9	1 3 7	3 6,333 3 9	5 8,333 3 9	5 7,6667 9	3 5 7
T2	1 1,666667 5	3 7 9	1 5,6666 7 9	1 5,666 7 9	3 7 9	7 9 9	3 5 7

(Tableau V.8 : matrice de décision floue avec les valeurs triangulaire des poids agrégée).

Étape 2 : Normalisation de la matrice de décision floue

L'ensemble des critères présentés ci-dessus peut être divisé selon leurs natures en « Critères de type coût » (Co) (à minimiser) et « critères de type gain / bénéfice » (B) (à maximiser). Une solution idéale positive (FBIS) est la solution qui maximise les critères de type gain et minimise les critères de type coût ; cependant, une solution idéale négative (FNIS) est une solution qui maximise les critères de type cout et minimise les critères de type gain.

Critères de type coût	Critères de type gain
- le cout (C1) - la maintenance (C4)	- le rendement (C2) - la sécurité (C3) - capacité d'un équipement (C5) - la durée de stockage (C6) - la maturité de la technique (C7)

(Tableau V.9 : types de critères).

La matrice de décision est normalisée pour éliminer les anomalies avec les différentes unités de mesure. Les valeurs normalisées des nombres flous triangulaires sont incluses dans l'intervalle [0, 1]. $r = [r_{ij}]_{2 \times 7}, i=1, \dots, 2 \text{ et } j=1, 2, \dots, 7$

Les valeurs normalisées sont calculées comme suit :

- Pour les critères de nature gain :

$$\tilde{r}_{ij} = \left(\frac{a_{ij}}{c_j^+}, \frac{b_{ij}}{c_j^+}, \frac{c_{ij}}{c_j^+} \right) \quad (V.9)$$

- Pour les critères de type coût :

$$\tilde{r}_{ij} = \left(\frac{a_j^-}{a_{ij}}, \frac{a_j^-}{b_{ij}}, \frac{a_j^-}{c_{ij}} \right) \quad (V.10)$$

Avec :

$c_j^+ = \max^i c_{ij}$ si le critère est de type gain

$a_j^- = \min^i a_{ij}$ si le critère est de type coût

Normalisation de la matrice de décision floue							
POIDS	5 7 9	3 5 7	5 7 9	3 5 7	7 9 9	5 7 9	3 5 7
r_{ij}	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7
T1	0,111	0,556	0,111	0,111	0,556	0,556	0,429
	0,200	0,926	0,333	0,158	0,926	0,852	0,714
	1	1	0,778	0,3333	1	1,000	1
T2	0,200	0,333	0,111	0,111	0,333	0,778	0,429
	0,600	0,778	0,630	0,176	0,778	1,000	0,714
	1	1	0,778	1	1	1,000	1

(Tableau V.10 : normalisation de la matrice de décision floue).

Étape 3 : Construction de la matrice de décision floue pondérée :

La matrice floue pondérée est calculée en multipliant les valeurs de la matrice de décision floue normalisée par les poids des critères d'évaluation comme suit :

$$v = [v_{ij}]_{2 \times 7}, i=1, \dots, 2 \text{ et } j=1, 2, \dots, 7 \quad v_{ij} = r_{ij} * w_j \quad (V.11)$$

la matrice de décision floue pondérée							
POIDS	5 7 9	3 5 7	5 7 9	3 5 7	7 9 9	5 7 9	3 5 7
v_{ij}	C ₁	C ₂	C ₃	C ₄	C ₅	C ₆	C ₇
T1	0,556	1,667	0,556	0,333	3,889	2,778	1,286
	1,400	4,630	2,333	0,789	8,333	5,963	3,571
	9	7	7,000	2,3333	9	9,000	7
T2	1,000	1,000	0,556	0,333	2,333	3,889	1,286
	4,200	4	4	0,882	7	7	43,571
	9	7	7,000	7	9	9,000	7

(Tableau V.11 : la matrice de décision floue pondérée).

Étape 4 : Calcul de la solution idéale positive A^+ et la solution idéale négative A^- :

La solution idéale positive floue FPIS (Fuzzy Positive Ideal Solution) notée A^+ et la solution idéale négative notée A^- sont calculées comme suit :

$$A^+ = (v_{+1}, v_{+2}, \dots, v_{+7}) = \{ \max_i v_{i,1}, \max_i v_{i,2}, \dots, \max_i v_{i,7} \}, i = (1, \dots, 2) \quad (V.12)$$

$$A^- = (v_{-1}, v_{-2}, \dots, v_{-7}) = \{ \min_i v_{i,1}, \min_i v_{i,2}, \dots, \min_i v_{i,7} \}, i = (1, \dots, 2) \quad (V.13)$$

A^+	1,000	1,667	1	0,333	3,889	4	1,286
	4,200	4,630	4	0,882	8,333	7	3,571
	9	7	7	7	9	9	7
A^-	0,556	1,000	0,556	0,333	2,333	2,778	1,286
	1,400	3,889	2,333	0,789	7,000	5,963	3,571
	9,000	7	7,000	2,333	9	9,000	7,000

(Tableau V.12 : la solution idéale positive et négative).

Étape 5 : Calcul des distances entre chaque alternative par rapport à FPIS et FNIS :

Cette distance est calculée comme suit :

$$d_i^+ = \sum_{j=1}^n |d(\tilde{v}_{ij}, \tilde{v}_j^+)|, i = 1, \dots, m \quad (V.14)$$

$$; n = 7 \text{ et } m = 2$$

$$d_i^- = \sum_{j=1}^n |d(\tilde{v}_{ij}, \tilde{v}_j^-)|, i = 1, \dots, m \quad (V.15)$$

La distance entre chaque alternative par rapport à FBIS et FNIS pour chaque critère est calculée par les deux équations suivantes respectivement :

$$d(\tilde{v}_{ij}, A_j^+) = \sqrt{\frac{1}{3}[(v_{ij1} - v_j^+)^2 + (v_{ij2} - v_j^+)^2 + (v_{ij3} - v_j^+)^2]} \quad (V.15)$$

$$d(\tilde{v}_{ij}, A_j^-) = \sqrt{\frac{1}{3}[(v_{ij1} - v_j^-)^2 + (v_{ij2} - v_j^-)^2 + (v_{ij3} - v_j^-)^2]} \quad (V.16)$$

	Distance entre chaque alternative par rapport à FBIS							di+
T1	0,000	0,000	2,331	1,299	3,438	1,299	0,214	10,725
T2	0,000	3,270	0,000	0,000	0,000	1,617	0,000	5,187

(Tableau V.13 : Distance entre chaque alternative par rapport à FBIS).

	Distance entre chaque alternative par rapport à FNIS							di-
T1	1,637	0,000	1,197	2,695	0,000	0,877	0,000	6,407
T2	0,000	0,575	0,000	0,000	1,183	0,000	0,000	1,758

(Tableau V.14 : Distance entre chaque alternative par rapport à FNIS).

Étape 6 : Calcul des coefficients de proximité et rangement des alternatives

Cette étape consiste à associer à chaque alternative T_i un coefficient de proximité, ou coefficient de rapprochement au profil idéal CC_i , calculé en se basant sur les distances d_{+i} et d_{-i} comme suit :

$$CC_i = \frac{d_{-i}}{d_{+i} + d_{-i}} ; \quad i=1, \dots, 2 \quad (V.16)$$

Les alternatives (les techniques de stockage) sont ensuite rangées en fonction des valeurs décroissantes des CC_i . L'alternative ayant le plus grand coefficient de proximité sera le meilleur choix.

CC_i	Rangement		
0,2153	2	T1	Batterie lithium ion
0,7847	1	T2	Power to gas(stockage par hydrogène)

(Tableau V.15 : coefficients de proximité et rangement des alternatives (type1)).

D'après les résultats obtenus, ($CC_{T1} < CC_{T2}$) la technique de stockage de power to gas (stockage par hydrogène) (T2) est la meilleure technique pour stocker l'énergie solaire sous forme électrique.

Pour le stockage sous forme thermique (le deuxième type de stockage), la même procédure est utilisée :

Étape 1 : Construction de la matrice de décision floue et du vecteur du poids :

	C ₁	C ₂	C ₃	C ₄	C ₅	C ₆	C ₇
DECIDEUR -1							
T'1	BIEN	TRES BIEN	BIEN	JUSTE	TRES BIEN	BIEN	BIEN
T'2	TRES BIEN	MAUVAIS	TRES BIEN	BIEN	JUSTE	JUSTE	JUSTE

(Tableau V.16 : Variables linguistiques pour décideur 1 (type2)).

	C ₁	C ₂	C ₃	C ₄	C ₅	C ₆	C ₇
DECIDEUR -2							
T'1	TRES BIEN	BIEN	BIEN	TRES BIEN	BIEN	JUSTE	JUSTE
T'2	TRES BIEN	JUSTE	TRES BIEN	TRES BIEN	MAUVAIS	BIEN	JUSTE

(Tableau V.17 : Variables linguistiques pour décideur 2 (type2)).

	C ₁	C ₂	C ₃	C ₄	C ₅	C ₆	C ₇
DECIDEUR -3							
T'1	BIEN	TRES BIEN	JUSTE	BIEN	TRES BIEN	TRES BIEN	JUSTE
T'2	TRES BIEN	MAUVAIS	BIEN	TRES BIEN	BIEN	BIEN	MAUVAIS

(Tableau V.18 : Variables linguistiques pour décideur 3 (type2)).

x_{kij}		C ₁	C ₂	C ₃	C ₄	C ₅	C ₆	C ₇
T' ₁	D ₁	5 7 9	7 9 9	5 7 9	3 5 7	7 9 9	5 7 9	5 7 9
	D ₂	7 9 9	5 7 9	5 7 9	7 9 9	5 7 9	3 5 7	3 5 7
	D ₃	5 9 7	7 9 9	3 5 7	5 7 9	7 9 9	7 9 9	3 5 7
T' ₂	D ₁	7 9 9	1 3 5	7 9 9	5 7 9	3 5 7	3 5 7	3 5 7
	D ₂	7 9 9	3 5 7	7 9 9	7 9 9	1 3 5	5 7 9	3 5 7
	D ₃	7 9 9	1 3 5	5 7 9	7 9 9	5 7 9	5 7 9	1 3 7

(Tableau V.19 : Variables triangulaire pour chaque décideur (type2)).

poids	TRES HAUT	TRES HAUT	TRES HAUT	MOYE N	TRES HAUT	HAUT	faible
	Matrice de décision floue						
T'1	5 7,66667 9	5 8,3333 9	3 6,33333 9	3 7 9	5 8,3333 9	3 7 9	3 5,6667 9
T'2	7 9 9	1 3,6667 7	5 8,33333 9	5 8,3333 9	1 5 9	3 6,3333 9	1 4,3333 7

(Tableau V.20 : matrice de décision floue pour un poids agrégée)

Matrice de décision floue							
poids	7 9 9	7 9 9	7 9 9	3 5 7	7 9 9	5 7 9	1 3 5
	C ₁	C ₂	C ₃	C ₄	C ₅	C ₆	C ₇
T'1	5 7,666667 9	5 8,3333 9	3 6,3333 3 9	3 7 9	5 8,333 3 9	3 7 9	3 5,6667 9
T'2	7 9 9	1 3,6667 7	5 8,3333 3 9	5 8,333 3 9	1 5 9	3 6,3333 9	1 4,3333 7

(Tableau V.21 : matrice de décision floue avec les valeurs triangulaire des poids agrégées (type2)).

Étape 2 : Normalisation de la matrice de décision floue :

Normalisation de la matrice de décision floue							
POIDS	5 7 9	3 5 7	5 7 9	3 5 7	7 9 9	5 7 9	3 5 7
<i>r ij</i>	C ₁	C ₂	C ₃	C ₄	C ₅	C ₆	C ₇
T'1	0,556	0,556	0,333	0,333	0,556	0,333	0,333
	0,652	0,926	0,704	0,429	0,926	0,778	0,630
	1	1	1,000	1	1	1,000	1
T'2	0,556	0,111	0,556	0,333	0,111	0,333	0,111
	0,556	0,407	0,926	0,360	0,556	0,704	0,481
	0,71429	1	1,000	0,6	1	1,000	0,7778

(Tableau V.22 : normalisation de la matrice de décision floue (type2)).

Étape 3 : Construction de la matrice de décision floue pondérée :

la matrice de décision floue pondérée							
POIDS	5 7 9	3 5 7	5 7 9	3 5 7	7 9 9	5 7 9	3 5 7
<i>v ij</i>	C ₁	C ₂	C ₃	C ₄	C ₅	C ₆	C ₇
T'1	2,778	1,667	1,667	1,000	3,889	1,667	1,000
	4,565	4,630	4,926	2,143	8,333	5,444	3,148
	9	7	9,000	7	9	9,000	7
T'2	2,778	0,333	2,778	1,000	0,788	1,667	0,333
	3,889	2	6	1,800	5	5	2,407
	6,42857	7	9,000	4,2	9	9,000	5,4444

(Tableau V.23 : la matrice de décision floue pondérée (type2)).

Étape 4 : Calcul de la solution idéale positive A⁺ et la solution idéale négative A⁻ :

A ⁺	2,778	1,667	3	1,000	3,889	2	1,000
	4,565	4,630	6	2,143	8,333	5	3,148
	9	7	9	7	9	9	7
A ⁻	2,778	0,333	1,667	1,000	0,778	1,667	0,333
	3,889	2,037	4,926	1,800	5,000	4,926	2,407
	6,429	7	9,000	4,200	9	9,000	5,444

(Tableau V.24 : la solution idéale positive et négative (type2)).

Étape 5 : Calcul des distances entre chaque alternative par rapport à FPIS et FNIS :

Distance entre chaque alternative par rapport à FBIS								di+
T' 1	0,000	0,000	1,104	0,000	0,000	0,000	0,000	1,104
T' 2	1,535	1,683	0,000	1,629	2,632	0,299	1,067	8,845

(Tableau V.25 : Distance entre chaque alternative par rapport à FBIS)

Distance entre chaque alternative par rapport à FNIS								di-
T' 1	1,535	1,683	0,000	1,629	2,632	0,299	1,067	8,845
T' 2	0,000	0,000	1,104	0,000	0,000	0,000	0,000	1,104

(Tableau V.26 : Distance entre chaque alternative par rapport à FNIS (type2)).

Étape 6 : Calcul des coefficients de proximité et rangement des alternatives :

CC _i	Rangement		
0,889067315	1	T'1	Stockage par sel fondu
0,110932685	2	T'2	Stockage par l'eau chaude à pression atmosphérique

(Tableau V.26 : coefficients de proximité et rangement des alternatives (type2)).

D'après les résultats obtenus, ($CC_{T'2} < CC_{T'1}$) la technique de stockage au sel fondu (T'1) est la meilleure technique pour stocker l'énergie solaire sous forme thermique.

Conclusion

On a voulu déterminer la meilleure technique pour stocker l'énergie solaire qu'elle soit forme électrique ou sous forme thermique.

Alors on a estimé un ensemble des techniques candidats, cette étape est très importante pour choisir la meilleure technique de stockage parmi plusieurs techniques de stockage possibles.

Une méthode de décision multicritères telles que la méthode TOPSIS floue constitue un meilleur choix pour la sélection de la meilleure alternative. L'objectif principal de ce chapitre était d'appliquer cette méthode pour sélectionner la technique appropriée pour stocker l'énergie solaire. Quatre techniques potentielles selon la source intermédiaire et, sept critères ont été définis par trois décideurs pour cet objectif. Les résultats ont révélé que le stockage par power to gas (par hydrogène) pour type 1 (électrique) et le stockage par sel fondu pour type 2 (thermique) sont les meilleurs choix.

Conclusion générale

L'électricité que nous consommons peut provenir de trois grandes sources d'énergie différentes : de la combustion de matières premières (charbon, pétrole ou gaz naturel), de la fission d'atomes d'uranium ou de phénomènes naturels (vent, rayonnement solaire ou force du courant).

Quand on dit énergie verte, on parle d'énergie issue de sources naturelles. Une énergie produite par : les usines marémotrices, les éoliennes, les hydroliennes, la géothermie, par l'exploitation de la biomasse, par les installations hydroélectriques et photovoltaïques et, les centrales solaires.

L'électricité verte semble inépuisable, on ne peut pas l'exploiter toute la journée ni toute l'année. En effet, les sources d'énergies renouvelables produisent en majorité de manière intermittente. Avouez qu'il est difficile de répondre aux demandes du réseau électrique dans ces conditions. D'où la nécessité de stocker l'énergie renouvelable surproduite pour l'utiliser au moment voulu.

Mais comment conserver le surplus d'électricité verte pour le restituer lorsque la source n'est pas effective ? De nombreux ingénieurs et chercheurs scientifiques se sont penchés sur la question. Le problème, c'est qu'on ne sait pas encore comment conserver les électrons en mouvement qui constituent l'électricité. Néanmoins des techniques existent pour faire stocker l'énergie renouvelable. Mais on cherche toujours la meilleure technique de stockage prenant compte avec considération des facteurs économique, écologique et, d'efficacité.

D'après cette étude, nous avons remarqué que l'Algérie dispose d'une variété de sources d'énergies renouvelables et, surtout d'un potentiel énergétique énorme sous forme d'énergie solaire, c'est pourquoi nous avons choisi précisément ce type de source d'énergie renouvelable. L'énergie solaire est une énergie intermittente lorsqu'il fait nuit, les panneaux

Solaires ne produisent aucune énergie. Pour résoudre ce problème, il devient donc important de stocker l'électricité ou la chaleur produite en journée par les installations solaires.

Dans ce contexte nous avons préféré choisir deux techniques de stockage, selon la source intermédiaire et, faire une comparaison entre chaque technique de stockage, avec une méthode numérique multicritères.

TOPSIS floue nous permet de choisir le stockage approprié à chaque type, d'après les résultats obtenus, on a trouvé que le stockage sous forme électrique par hydrogène est mieux que le stockage par batterie Lithium ion et, d'autre part, le stockage sous forme thermique par sel fondu est mieux que le stockage par l'eau chaude à pression atmosphérique.

C'est le temps de changer notre attitude, c'est le temps de vivre une vie durable et propre, même si on ne peut pas abandonner les énergies classiques (fossiles) on peut compter sur les énergies renouvelables telles que l'énergie solaire pour réaliser l'autosuffisance dans le domaine énergétique.

On conclut que le stockage d'énergie sous forme de chaleur est beaucoup moins coûteux que sous forme électrique. Donc, vu l'importance de l'énergie solaire, la place qu'elle peut occuper dans l'énergétique future, son stockage thermique économe et efficace, il est amplement justifié de concentrer les efforts de recherche pour améliorer le rendement du stockage des systèmes actuels et de chercher de nouvelles techniques de stockage dans notre pays.

Références bibliographiques

- [1] Mr Mekhatria Djilali ; Cours des énergies renouvelable ; master1 génie chimique.
- [2] Ministère algérienne de l'énergie ; énergies nouvelle, renouvelable et maitrise de l'énergie.
- [3] Dr Bouziani Naima ; Potentiel et développements des énergies renouvelable en Algérie ; article scientifique ; École Nationale Polytechnique d'Oran(2017).
- [4] Portail Algérie ; Efficacités énergétiques.
- [5] Raven, Berg et Hassenzahl ; Environnement 6ème édition de Boeck (2008).
- [6] Haddoum, Rahmani, Ben brahim, Zanndouche et Ahmed Zaïd ; Étude du potentiel de biomasse forestière en vue du développement des filières bois énergie en Algérie ; Revue des Énergies Renouvelables Vol. 16 N°3 (2013).
- [7] Sven Geitman ; Énergie renouvelable et carburants alternatifs ; Hydrogeit ; Verlag (2007).
- [8] Connaissances des énergies ; fiche pédagogique ; Solaire photovoltaïque (2017).
- [9] Connaissances des énergies ; fiche pédagogique ; Solaire thermique (2015).
- [10] Agence française de l'environnement et de la maitrise d'énergies, Association française technique énergie Environnement ; Étude sur le potentiel du stockage d'énergies ; Rapport d'étude (2013).
- [11] Enea Consulting ; Le stockage d'énergie enjeux, solution techniques et opportunités de valorisation (2012).
- [12] Mme Rihab Khemiri ; Développement d'une approche floue multicritères pour une planification intégrée couplant la gestion de la performance et du risque ; Thèse de doctorat ; Institut National Polytechnique de Toulouse, Informatique et Génie Industriel(2017).