



الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
République Algérienne Démocratique et Populaire
وزارة التعليم العالي والبحث العلمي
Ministère de l'Enseignement Supérieure et de la Recherche Scientifique



جامعة وهران 2 محمد

Université d'Oran 2 Mohamed Ben Ahmed

معهد الصيانة والأمن الصناعي

Institut de Maintenance et de Sécurité Industrielle

Department de Maintenance en Instrumentation

MÉMOIRE

Pour l'obtention du diplôme de Master

Filière : Maintenance en Instrumentation

Spécialité: Mesure-Analyse-Qualité

Thème

Etude avancée de procédé de stockage de l'énergie solaire

Présenté et soutenu publiquement par :

BENYAGOUB LALIA

KHIRI KARIMA

Devant le jury composé de :

Nom et Prénom	Grade	Etablissement	Qualité
BENARBIA TAHA	MAA	IMSI	Président
ZEBIRATE SORAYA	Pr	IMSI	Encadreur
BELKHODJA LEILA	MAA	IMSI	Examinatrice

Juin 2016

Dédicaces

Nous avons le grand plaisir de dédier ce modeste travail à:

Nos chers parents, qui nous ont toujours soutenus dans nos études. A tous nos frères et
sœurs chacun par son nom.

A toutes nos familles chacune par son nom. A tous nos enseignants,

A tous nos collègues chacun par son nom.

A toutes les personnes qui nous ont aidés.

A la promo MAQ 2015/2016

REMERCIEMENTS

Avant tout nous tenons à remercier Dieu tout puissant de nous avoir donné la force et le courage.

A la suite, Nous tenons à remercier vivement M^{me}. ZEBIRATE SORAYA notre promoteur qui a fourni des efforts énormes, par ses informations ses conseils et ses encouragements.

Nous tenons également à remercier messieurs les membres de jury pour l'honneur qu'ils nous ont fait en acceptant de siéger à notre soutenance,

Nous remercions tous les professeurs de département d'Instrumentation
Et à tous ceux qui furent à un moment ou à un autre, partie prenante de ce travail.

Nos plus chaleureux remerciements pour tous ceux qui de près ou de loin ont contribué à la réalisation de ce mémoire.

Sommaire

Introduction générale	1
Chapitre I : Généralités sur les Énergies Renouvelables	
I-1-Introduction	3
I-2- Classification des énergies renouvelables	3
I-2-1 Energie solaire	3
I-2-1-1 Energie solaire thermique	4
I-2-1-2 Energie solaire photovoltaïque	5
I-2-2 Energie éolienne	6
I-2-3 Energie biomasse	7
I-2-3-1 Valorisation de la biomasse	7
A. Sous forme de chaleur (les bioénergies)	7
B. Par conversion biologique (Biogaz)	8
C. Sous forme de carburant (les biocarburants)	8
I-2-4 L'énergie géothermique	8
I-2-5 Energie hydraulique	9
I-2-5-1 Energie des vagues	10
A. Energie marémotrice	10
B. Energie hydrolienne	10
C. Energie thermique des mers	11
D. Energie osmotique	11
I-3 Energie solaire	12
I-3-1 Historique	13
A. Dès l'Antiquité	13
B. Au XVIII ^{ème} siècle	14
C. Au XIX ^{ème} siècle	16
D. A partir du XX ^{ème} siècle	17
I-3-2 L'énergie solaire pour produire de la chaleur	20
I-3-2-1 Le solaire passif pour se chauffer	20
I-3-2-2 Un chauffe-eau solaire : comment ça marche	20
A. Capter l'énergie solaire	20
B. Transporter la chaleur	20
C. Restituer la chaleur	20
D. Stocker l'eau chaude	21
E. Faire circuler le liquide caloporteur	21
F. Pallier l'insuffisance d'ensoleillement	22
I-3-3 L'énergie solaire pour produire de l'électricité	22
I-3-3-1 Fonctionnement d'une cellule photovoltaïque	22
I-3-3-2 Les centrales solaires qui permettent de produire de l'électricité	24
A. Les collecteurs paraboliques	24
B. Les centrales à tour	25
C. Les collecteurs cylindro-paraboliques	26

D. Les centrales photovoltaïques	26
I-3-4 Les différents types de rayonnement solaire	26
I-3-5 Comment stocker des énergies intermittentes	27
I-3-5-1 L'hydrogène au stockage de chaleur	27
I-3-5-2 Stockage de l'air comprimé	27
I-3-5-3 Volant d'inertie et gestion "intelligent " de réseau	28
I-3-5-4 Transfert d'énergie par pompage	29
I-4 Conclusion	29

Chapitre II : Les types de stockage

II-1- Introduction	31
II-2- Types de stockage de l'énergie	31
II-2-1- Stockage chimique	31
II-2-1-1- Stockage de l'hydrogène	31
A- Le stockage en réservoir de la moléculaire H ₂	32
A-1-Sous forme gazeuse	32
A-1-1- Basse et moyenne pressions	32
A-1-2- Haute et très haute pressions	33
A-2- Sous forme liquide	33
A-3- Sous forme solide / moléculaire	35
A-3-1- Stockage sous forme d'hydrates ou clathrate	35
A-3-2- Les stockages «sur» des composés solides adsorption	35
A-3-3- Le stockage « dans » des composés solides (hydrures, fullerènes...)	35
II-2-1-2- Les biocarburants et la biomasse	36
II-2-1-3- L'azote liquide	36
A- Application	36
A-1- Dans le domaine industriel	36
A-2- Dans le domaine des transports	37
A-3- Dans le domaine informatique	37
A-4- Dans le domaine médicale	37
II-2-1-4- L'oxy-hydrogène	37
II-2-2- Stockage électrochimique de l'énergie	37
II-2-2-1- Les batteries	38
A- Les batteries et le stockage stationnaire	38
A-1- Les objectifs du stockage stationnaire	40
A-2- Les batteries pour la mobilité	41
A-2- Les objectifs du stockage en matière de mobilité	42
II-2-2-2- Pile à combustible	43
A. Pile à combustible à hydrogène	43
B. Principe de fonctionnement	43
C. La pile à membrane échangeuse de protons	44
D. La pile à oxydesolide	45
E. La pile à combustible au méthanol	45
II-2-2-3- Applications et perspectives	46
A. Applications	46

A-1- les transports	46
A-2- la cogénération	46
A-3- Cogénération domestique ou micro-cogénération	46
B. Perspectives	46
C. Les nombreux avantages des piles à combustibles	47
II-2-3- Stockage électrique	47
II-2-3-1- Le condensateur et le supercondensateur	48
A. Le supercondensateur	48
B. Principe de fonctionnement	48
C. Application	49
D. Le condensateur	50
E. Loi de comportement du condensateur	51
F. Expression algébrique de la loi de comportement du condensateur	51
G. Energie stockée- puissance échangée	53
H. Démonstration	53
II-2-3-2- Le supraconducteur au stockage de l'énergie magnétique	54
A. Principes	54
B. Utilisation	55
II-2-4- Stockage thermique	55
II-2-4-1- Le réservoir d'eau chaude	56
II-2-4-2- L'accumulateur de vapeur	56
A. Charge	56
B. Décharge	57
II-2-5- Stockage mécanique	57
II-2-5-1- Accumulateur hydraulique	57
II-2-5-2- Volant d'inertie	58
A. Perturbations liées au moteur	59
B. Perturbations liées au récepteur	59
C. Stockage d'énergie par le volant d'inertie	59
II-3- Conclusion	60
Chapitre III : stockage de l'air comprimé	
III-1- Introduction	62
III-2- la définition d'air comprimé	62
III-3- Système d'air comprimé	62
A. Le coté production	63
B. Le coté consommation	63
III-4- Types de compresseurs	63
III-4-A- Compresseur à piston	64
III-4-B- Compresseur rotatif	65
III-4-B-1- Compresseur à palettes	65
III-4-B-2- Compresseur à piston roulant	65
III-4-C- Compresseur spiro-orbital/scroll	66
III-4-D- Compresseur à vis	66
III-4-E- Compresseur centrifuge	67

III-5- Description des stockages d'air comprimé	67
III-5-1- Principe du stockage souterrain conventionnel d'air comprimé	68
III.5.2-Principe du stockage souterrain adiabatique d'air comprimé	70
III.5.3- Autres types de stockage d'air comprimé	70
a-CAES isotherme de surface	71
b-Stockage hydropneumatique / oléopneumatique	72
III.5-les avantages et inconvénients des différentes Solutions de stockage d'air en souterrain	72
A-Stockage en cavité saline	73
B-Stockage en cavité minée	73
C-Stockage en aquifère	74
D-Stockage en gisement d'hydrocarbures déplétif	75
III.6-Des risques potentiels liés au stockage souterrain d'air comprimé	75
a-Risques liés à la partie souterraine du stockage	79
b- Risques liés aux infrastructures de surface	79
III-7-Description du projet ANR SEARCH	82
III.8-Considérations énergétiques	82
III-8-1- Calcul de la densité énergétique de l'air comprimé	82
III.9-Conclusion	85
Conclusion générale et perspectives	86

Liste des figures

Figures	Titres	pages
I.1	Energie solaire thermique	4
I.2	Energie solaire photovoltaïque	5
I.3	Energie éolienne	6
I.4	Chaleur	8
I.5	Energie hydraulique	10
I.6	Hydroliennes	11
I.7	La fusion d'hydrogène en hélium	12
I.8	Incendie de la flotte romaine	14
I.9	Un miroir ardent	15
I.10	Four solaire	16
I.11	Coupe transversale d'une "boite chaude" avec thermomètre	16
I.12	Plans et photos de la centrale thermique de Meadi en Egypte en 1913	17
I.13	Le four de Mont-louis	18
I.14	La première voiture solaire	19
I.15	Chauffe –eau solaire	21
I.16	Cellule photovoltaïque	23
I.17	Collecteur parabolique	24
I.18	Centrale solaire	25
I.19	Schéma de principe d'une installation de stockage à air comprimé	28
II.1	Recharge d'une batterie lithium-ion	39
II.2	Une pile à combustible à membrane échangeuse de protons	44
II.3	Condensateur électrolytique double couche	48
II.4	Stockage d'énergie supraconducteur	55
II.5	Le volant d'inertie	58
III.1	conversion de l'air atmosphérique en air comprimé	62
III.2	Coupe d'un compresseur rotatif à vis type	65

III.3	Schéma de principe d'un stockage souterrain conventionnel de l'air comprimé	68
III.4	Schéma de principe du « CAES isochores adiabatique souterrain » ou AA-CAES	69
III.5	Schéma de principe du « CAES isobare adiabatique de surface »	69
III.6	Schéma de principe du « CAES isotherme de surface »	71
III.7	Schéma de principe du « CAES isobare adiabatique de surface »	72
III.8	Schématisation d'un projet de CAES en aquifère d'après	74
III.9	Architecture du stockage pour la configuration de référence constitué de 2 TES (Thermal Energy Storage) et de 2 LRC (Lined Rock Cavern) – ANR SEARCH	80
III.10	Schéma de principe du revêtement du régénérateur utilisé pour le stockage thermique	81
III.11	Prototype de régénérateur de chaleur réalisé par le CEA	81
III.12	Modélisation de la corrosion dans un régénérateur avec le logiciel HYTEC	82
III.13	Stockage souterrain d'air comprimé adiabatique	84

LISTE DES ABREVIATIONS

ETM:	Energie Thermique des Mers
OTEC:	Ocean Thermal Energy Conversion
MIT:	Massachusetts Institut of Technology
ATES:	Aquifer Thermal Energy Storage
CAES:	Compress Air Energy Storage
ADEME:	Agence de l'environnement et de la maitrise de l'énergie
STEP :	Station de Transfert d'énergie par pompage
RMFC:	Reformed Methanol Fuel Cell
DMFC:	Direct Methanol Fuel Cell
PAC:	Pile à combustible
EDLC:	Electrochemical Double Lyer Capacitator

Résumé

Notre avenir énergétique doit être basé sur des énergies non polluantes ayant des ressources importantes. Les énergies renouvelables sont les meilleurs candidats mais avec une production intermittente.

Le concept de "stockage d'énergie" est d'apporter de la flexibilité et de renforcer la fiabilité des systèmes énergétiques. Il s'agit d'équilibrer dans le temps l'offre et la demande en énergie, aussi bien pour la fourniture d'électricité, de chaleur et de froid.

D'un autre côté notre étude traite des systèmes d'air comprimé types couramment utilisés dans la plupart des petites et moyennes installations de production. Cette étude a été consacrée aux problèmes courants de conception et de fonctionnement des systèmes d'air comprimé.

Mots-clés:

L'énergie solaire; le stockage; les énergies renouvelables; la production d'énergie

Abstract

Our future energy must be based on nonpolluting energies having significant resources. Renewable energies are the best candidates but with an intermittent production.

The concept of "storage of energy" is to bring flexibility and to reinforce the reliability of the energy systems. It is a question of balancing in time supply and demand in energy, as well for the supply of electricity, heat and cold.

In the other side, our study treats systems of compressed air standard usually used in the majority of small and average generating stations. This study is devoted to the current problems of design and operation of the systems of compressed air.

Keywords:

Solar energy; storage; renewable energies; production of energy

المستقبلية تعتمد على الطاقات الغير ملوثة و المتوفرة بكثرة. الطاقات المتجددة هي الأمثل و لكن تعتمد

"تخزين الطاقة" تسمح بتعزيز مردود الأنظمة الطاقوية , كما أن تخزين الطاقة يعمل على الموازنة بين طلب و
و هو جيد من أجل الطاقة الكهربائية و الحرارة و البرودة.

من جهة معالجة أنظمة ضغط هواء سريعة الاستخدام في أغلب أنظمة
المكرسة لمعالجة و اكتشاف مختلف عراقيل ضغط الهواء.

INTRODUCTION GENERALE

La consommation d'énergie, dans le courant du siècle dernier, a considérablement augmenté à cause de l'industrialisation massive. Les prévisions des besoins en énergie pour les années à venir ne font que confirmer, voire amplifier, cette tendance, notamment compte-tenu de l'évolution démographique et du développement de certaines zones géographiques, en Asie en particulier. D'une part, les gisements des ressources énergétiques traditionnelles, d'origines principalement fossiles, ne peuvent être exploités que pour quelques décennies, ce qui laisse présager d'une situation de pénurie énergétique au niveau mondial de façon imminente.

D'autre part, les déchets des centrales nucléaires posent d'autres problèmes en termes de pollution des déchets radioactifs, du démantèlement prochain des vieilles centrales et du risque industriel. Pour subvenir aux besoins en énergie de la société actuelle, il est nécessaire de trouver des solutions adaptées et de les diversifier. Actuellement, il y a principalement deux façons possibles d'agir.

La première est de diminuer la consommation des récepteurs d'énergie et augmenter la productivité des centrales énergétiques en améliorant respectivement leur efficacité. Une deuxième méthode consiste à trouver et développer de nouvelles sources d'énergie. Dans l'immédiat, nous disposons de ressources en énergie renouvelable inépuisables, que nous sommes en mesure d'exploiter de plus en plus facilement et proprement. Néanmoins, longtemps négligées, les techniques d'extraction de la puissance de ces ressources demandent des recherches et développements plus approfondis visant à fiabiliser, baisser les coûts (de fabrication, d'usage et de recyclage) et d'augmenter l'efficacité énergétique.

Dans ce contexte général, notre étude s'intéresse principalement à l'opération consistant à créer un stock à partir d'énergie disponible, et non directement à la gestion des

stocks (notamment des stocks d'énergie fossile), ni au déstockage. Pour la « production d'énergie », le stockage est essentiel : en réalité, ce qu'on appelle couramment et économiquement « production d'énergie » est :

- Soit la transformation d'un stock d'énergie potentielle (combustible fossile, eau stockée en hauteur, matière fossile...) en une énergie directement utilisable pour un travail (électricité, travail mécanique) ou un usage thermique.
- Soit la transformation directe de flux d'énergie naturels, flux sur lesquels l'humain n'a aucun contrôle. Ce sont les énergies renouvelables, souvent issues du rayonnement solaire.
- Un état de l'art des énergies renouvelables est présenté dans le premier chapitre de ce document.

Quelques chiffres montrent l'importance et l'évolution dans le temps de la production renouvelable mondiale. Dans ce cadre, le soleil est la principale source des différentes formes d'énergies renouvelables : son rayonnement est le vecteur de transport de l'énergie utilisable (directement ou indirectement) lors de la photosynthèse, ou lors du cycle de l'eau (qui permet l'hydroélectricité) et l'énergie des vagues (énergie houlomotrice) la différence de température entre les eaux superficielles et les eaux profondes des océans (énergie thermique des mers) ou encore la diffusion ionique provoquée par l'arrivée d'eau douce dans l'eau de mer (énergie osmotique).

Cette énergie solaire alliée à la rotation de la Terre est à l'origine des vents (énergie éolienne) et des courants marins (énergie hydrolienne) ainsi que la chaleur interne de la Terre (géothermie) .

Le second chapitre est dédié à l'étude des différents types de stockage et leurs mécanismes. Le stockage est directement lié à l'usage qu'on fait de l'énergie.

On a le **Stockage électrochimique** à plus faible échelle, le stockage d'énergie en vue de la production d'électricité (électrochimique dans les piles et les batteries, électrique dans les condensateurs ou « super-condensateurs ») ; **Stockage mécanique** : C'est un élément pratiquement obligatoire dans tous les moteurs, sous forme de volant d'inertie, pour réguler le mouvement à des échelles de temps très courtes ; **Stockage de l'énergie thermique** qui peut être réalisé à travers deux phénomènes différents associés aux matériaux qui assurent le stockage.

On parle alors de stockage par chaleur sensible et de stockage par chaleur latente ; ***Stockage magnétique supraconducteur*** : ce stockage magnétique à supraconducteur est appelé aussi SMES pour " Superconducting magnetic energy *storage*" (Stockage d'énergie magnétique par bobine supraconductrice) ; ***Stockage chimique*** : tout combustible peut être considéré comme un stock d'énergie sous forme chimique. En brûlant, le composé dégage de l'énergie sous forme de chaleur qui peut être récupérée et valorisée ; et le ***Stockage électrique*** : Il s'agit des condensateurs et des supercondensateurs.

Le troisième chapitre est consacré à une étude dynamique orientée système de stockage d'air comprimé. Son principal objet est de vous aider à comprendre et à mettre en œuvre un programme d'amélioration du rendement énergétique des systèmes d'air comprimé tout en combinant des données théoriques et pratiques, et pour optimiser très rapidement un système d'air comprimé à l'aide des conseils en ce sens.

Chapitre I

Généralités sur les

Énergies Renouvelables

1-1- Introduction

L'utilisation de sources d'énergie renouvelables permet de réduire la pression sur les ressources naturelles et de limiter les rejets polluants dans l'atmosphère.

Différentes filières d'énergies renouvelables existent à l'heure actuelle. Elles permettent la production d'énergie mécanique, d'énergie électricité et de l'énergie thermique.

1-2-Classification des énergies renouvelables

Une énergie renouvelable est une énergie dont le gisement se reconstitue en permanence à un rythme au moins égal à celui de la consommation. Leurs diverses formes ont chacune leurs spécificités selon leur nature.

Il faut toutefois préciser que leurs potentialités, en termes d'énergie exploitable, sont très différentes. Les énergies renouvelables peuvent être utilisées de sous différentes formes [1-2].

1-2-1-Energie solaire

Elle est issue du fonctionnement de la machine atmosphérique solaire qui se manifeste par son rayonnement dans l'univers.

Elle se trouve sous différentes composantes comme : énergie de la biomasse, l'énergie des vagues marines, énergie hydraulique, énergie thermique, énergie photovoltaïque et l'énergie éolienne.

Cette énergie possède une potentialité pratiquement supérieure à celles des deux autres formes d'énergies renouvelables.

C'est elle qui pose le plus grand nombre de problèmes techniques et économiques mais c'est aussi la plus intéressante par ses potentialités importantes.

Deux grandes familles d'utilisation de l'énergie solaire à cycle court se distinguent :

- L'énergie solaire thermique, utilisation de la chaleur transmise par rayonnement,
- L'énergie photovoltaïque, utilisation du rayonnement lui-même pour produire de l'électricité.

1-2-1-1-Énergie solaire thermique

Dans les conditions terrestres, le rayonnement thermique se situe entre 0,1 et 100 micromètres. Il se caractérise par l'émission d'un rayonnement au détriment de l'énergie calorifique du corps émetteur. Ainsi, un corps émettant un rayonnement thermique diminue son énergie calorifique et un corps recevant un rayonnement thermique augmente son énergie calorifique. Le soleil émet principalement dans le rayonnement visible, entre 0,4 et 0,8 micromètre. Ainsi, en entrant en contact avec un corps, le rayonnement solaire augmente la température de ce corps. On parle ici d'énergie solaire thermique.

Cette source d'énergie est connue depuis très longtemps et utilisée par exemple pour réchauffer ou sécher des objets (y compris le corps humain) en les exposant au soleil.

L'énergie thermique peut être utilisée directement ou indirectement :

- Directement pour chauffer des locaux ou de l'eau sanitaire (serres, architecture bioclimatique, panneaux solaires chauffants et chauffe-eau solaire) ou des aliments (fours solaire),
- Indirectement pour la production de vapeur d'un fluide caloporteur pour entraîner des turbines et ainsi obtenir une énergie électrique (énergie solaire thermodynamique (ou hélio thermodynamique)).

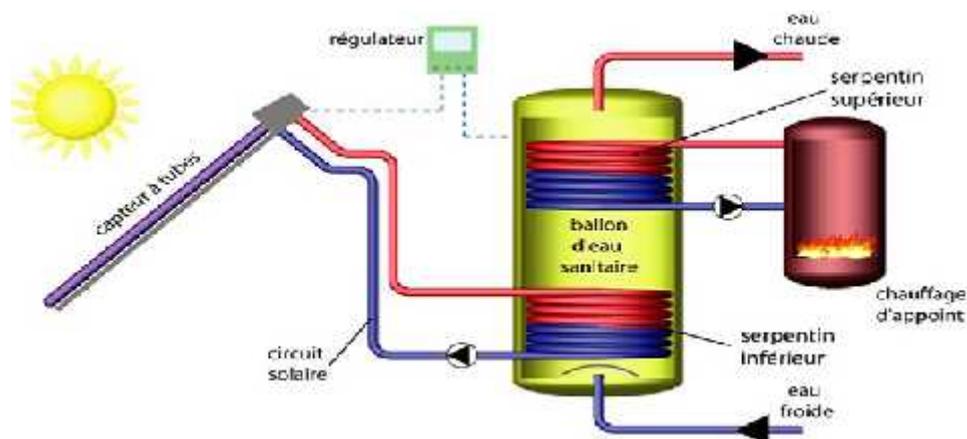


Figure I.1. Energie solaire thermique

L'énergie solaire thermique peut également être utilisée pour la cuisine. Apparue dans les années 1970, la cuisine solaire consiste à préparer des plats à l'aide d'un cuiseur ou d'un four solaire. Les petits fours solaires permettent des températures de cuisson de l'ordre des

150 °C, les paraboles solaires permettent de faire les mêmes plats qu'une cuisinière classique à gaz ou électrique.

1-2-1-2- Énergie solaire photovoltaïque

L'énergie photovoltaïque se base sur l'effet photoélectrique pour créer un courant électrique continu à partir d'un rayonnement électromagnétique. Cette source de lumière peut être naturelle (soleil) ou artificielle (une ampoule). L'énergie photovoltaïque est captée par des cellules photovoltaïques, un composant électronique qui produit de l'électricité lorsqu'il est exposé à la lumière. Plusieurs cellules peuvent être reliées pour former un module solaire photovoltaïque ou un panneau photovoltaïque. Une installation photovoltaïque connectée à un réseau d'électricité se compose généralement de plusieurs panneaux photovoltaïques, leur nombre pouvant varier d'une dizaine à plusieurs milliers.

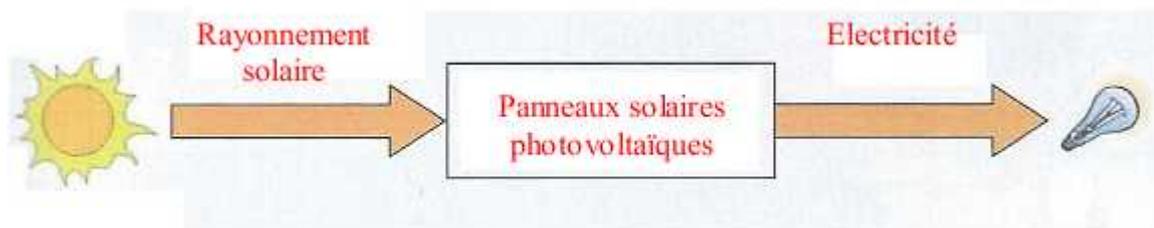


Figure I.2. Énergie solaire photovoltaïque

Il existe plusieurs technologies de modules solaires photovoltaïques :

- Les modules solaires monocristallins possèdent le meilleur rendement au m² et sont essentiellement utilisés lorsque les espaces sont restreints et pour optimiser la production d'une centrale photovoltaïque.
- Les modules solaires poly-cristallins représentent une technologie proposant des rendements plus faibles que la technologie monocristalline.
- Les modules solaires amorphes sont des panneaux solaires proposant un rendement largement inférieur aux modules solaires cristallins. Cette solution nécessite donc une plus grande surface pour la même puissance installée [3-4-5].

1-2-2-Énergie éolienne

L'énergie éolienne est l'énergie du vent dont la force motrice est utilisée dans le déplacement de voiliers et autres véhicules ou transformée au moyen d'un dispositif aérogénérateur comme une éolienne ou dans un moulin à vent en une énergie diversement utilisable. C'est une des formes d'énergie renouvelable. L'énergie éolienne est utilisée de trois manières :

- Conservation de l'énergie mécanique : le vent est utilisé pour faire avancer un véhicule (navire à voile ou char à voile), pour pomper de l'eau (moulins de Majorque, éoliennes de pompage pour irriguer ou abreuver le bétail) ou pour faire tourner la meule d'un moulin ;
- Transformation en force motrice (pompage de liquides, compression de fluides...);
- Production d'énergie électrique ; l'éolienne est alors couplée à un générateur électrique pour fabriquer du courant continu ou alternatif. Le générateur est relié à un réseau électrique ou bien fonctionne au sein d'un système « autonome » avec un générateur d'appoint (par exemple un groupe électrogène) et/ou un parc de batteries ou un autre dispositif de stockage d'énergie.

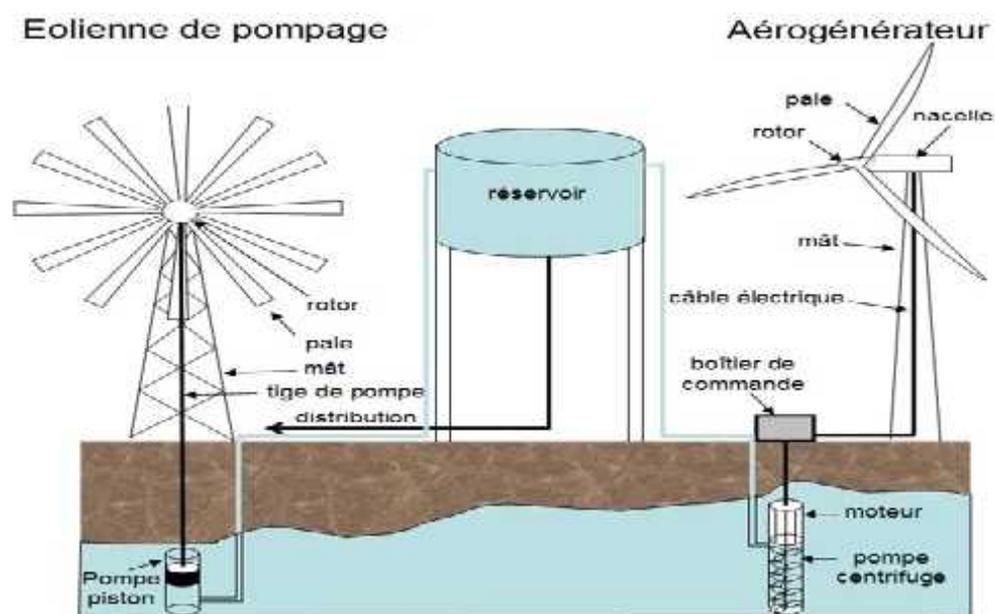


Figure I.3. Énergie éolienne

1-2-3- Energie Biomasse

Dans le domaine de l'énergie, et plus particulièrement des bioénergies la biomasse énergie est la partie de la biomasse utilisée ou utilisable comme source d'énergie ; soit directement par combustion (ex : bois énergie), soit indirectement après méthanisation (biogaz) ou de nouvelles transformations chimiques (agro carburant). La biomasse peut être toute matière organique d'origine végétale (micro algues incluses), animale, bactérienne ou fongique (champignons).

La source de biomasse peut être la nature sauvage et/ou cultivée (agro carburants, agrocombustibles¹).

Une définition juridique française plus restrictive est : « fraction biodégradable des produits, déchets et résidus provenant de l'agriculture, y compris les substances végétales et animales issues de la terre et de la mer, de la sylviculture et des industries connexes, ainsi que la fraction biodégradable des déchets industriels et ménagers »². Trois modes de valorisations coexistent : thermique, chimique et biochimique [6-7-8].

1-2-3-1-Valorisation de la biomasse

A. Sous forme de chaleur (les bioénergies)

L'énergie chimique du bois est libérée par combustion sous forme de chaleur et utilisée directement pour le chauffage ou pour produire de l'électricité. Le bois comme source de chauffage est utilisé à toute échelle. Plus rarement on utilise la pyrolyse ou la gazéification.

Il existe également d'autres bioénergies qui découlent directement des déchets que nous produisons. C'est le cas pour le traitement de déchets destinés aux cimenteries sous forme de Combustibles Solides de Substitution (CSS) pour consommer beaucoup moins de pétrole.



Figure I.4. Chaleur

B. Par conversion biologique (Biogaz)

On appelle biogaz les effluents gazeux, méthane essentiellement, issus de la fermentation de matières organiques contenues dans les décharges, les stations d'épuration, etc. Le méthane est un puissant gaz à effet de serre et sa captation est de toute façon hautement souhaitable. Il peut être considéré comme une ressource énergétique, souvent via sa combustion pour produire de la vapeur et de l'électricité ; son utilisation directe dans des moteurs à gaz pauvres peut aussi être envisagée. Le biogaz est un gaz combustible, composé en moyenne de méthane (CH_4) à 65 % et de CO_2 à 35 %.

C. Sous forme de carburant: les biocarburants

Il y a deux familles de biocarburants :

- L'huile végétale brute, et les esters d'huiles végétales (colza, ...) ;
- L'éthanol, produit à partir de blé et de betterave, incorporable dans le super sans plomb sous forme d'ethyl tertio butylether .

1-2-4- L'énergie géothermique

La géothermie, du grec géo (la terre) et thermos (la chaleur) est un mot qui désigne à la fois la science qui étudie les phénomènes thermiques internes du globe terrestre, et la technologie qui vise à l'exploiter. Par extension, la géothermie désigne aussi parfois l'énergie géothermique issue de l'énergie de la Terre qui est convertie en chaleur.

Pour capter l'énergie géothermique, on fait circuler un fluide dans les profondeurs de la Terre. Ce fluide peut être celui d'une nappe d'eau chaude captive naturelle, ou de l'eau injectée sous pression pour fracturer une roche chaude et imperméable. Dans les deux cas, le fluide se réchauffe et remonte chargé de calories (énergie thermique). Ces calories sont utilisées directement ou converties partiellement en électricité. On distingue classiquement trois types de géothermie selon le niveau de température disponible à l'exploitation:

- La géothermie à haute énergie qui exploite des sources hydrothermales très chaudes, ou des forages très profonds où de l'eau est injectée sous pression dans la roche. Elle est surtout utilisée pour produire de l'électricité. Elle est parfois subdivisée en deux sous-catégories :
- La géothermie haute énergie (aux températures supérieures à 150 °C⁵) qui permet la production d'électricité grâce à la vapeur qui jaillit avec assez de pression pour alimenter une turbine.
- La géothermie moyenne-énergie (aux températures comprises entre 100 °C et 150 °C) par laquelle la production d'électricité nécessite une technologie utilisant un fluide intermédiaire.
- La géothermie de basse énergie : géothermie des nappes profondes (entre quelques centaines et plusieurs milliers de mètres) aux températures situées entre 30 °C et 100 °C. Principale utilisation : les réseaux de chauffage urbain.
- La géothermie de très basse énergie : géothermie des faibles profondeurs aux niveaux de température compris entre 10 °C et 30 °C. Principales utilisations : le chauffage et la climatisation individuelle par dispositifs thermodynamiques généralement fonctionnant à l'électricité, d'où le terme électro-thermodynamique, appelés plus communément « pompes à chaleurs aérothermiques » (puisant dans l'air extérieur) et « pompe à chaleur géothermique ».

1-2-5- Énergie hydraulique

Les énergies hydrauliques (à l'exception de l'énergie marémotrice) ont leur origine principale dans les phénomènes météorologiques et donc l'énergie solaire. Le soleil provoque l'évaporation de l'eau, principalement dans les océans et en libère une partie sur les continents à des altitudes variables.

On parle du cycle de l'eau pour décrire ces mouvements. L'eau (en fait, la vapeur

d'eau) possède, en altitude, une énergie potentielle de pesanteur ; cette énergie peut être captée et transformée dans des barrages hydroélectriques, lors du retour de l'eau vers les océans.

Avant l'avènement de l'électricité, les moulins à eau permettaient de capter cette énergie mécanique pour entraîner des machines ou des outils (machines à tisser, moulins à mouliner le blé...).



Figure I.5. Énergie hydraulique

Depuis l'invention de l'électricité cette énergie mécanique est transformée en énergie électrique. D'autres énergies hydrauliques existent et proviennent généralement de sources marines :

1-2-5-1- Énergie des vagues

Elle est produite par le mouvement des vagues et peut être captée par des dispositifs tels le Pélamis, sorte de ver en métal articulé ou le Searev. Leur puissance correspond à celle d'une petite éolienne.

A. Énergie marémotrice

L'énergie marémotrice est issue des mouvements de l'eau créés par les marées et causés par l'effet conjugué des forces de gravitation de la Lune et du Soleil. Elle est utilisée soit sous forme d'énergie potentielle - l'élévation du niveau de la mer, soit sous forme d'énergie cinétique - les courants de marée.

B. Énergie hydrolienne

Une hydrolienne est une turbine hydraulique (sous-marine ou à flots) qui utilise

l'énergie cinétique des courants marins ou fluviaux, comme une éolienne utilise l'énergie cinétique du vent [9].

La turbine de l'hydrolienne permet la transformation de l'énergie cinétique de l'eau en mouvement en énergie mécanique, qui peut alors être convertie en énergie électrique par un alternateur.

C. Énergie thermique des mers

L'énergie thermique des mers (ETM) ou énergie marée-thermique est produite en exploitant la différence de température entre les eaux superficielles et les eaux profondes des océans. Un acronyme souvent rencontré est OTEC, pour « Ocean thermal énergie conversion ». L'Union européenne utilise le terme énergie hydro-thermique pour « l'énergie emmagasinée sous forme de chaleur dans les eaux de surface ».

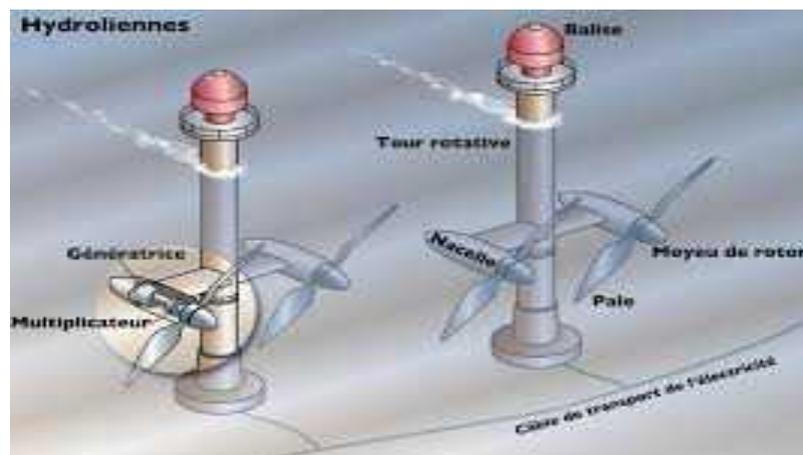


Figure I.6. Hydroliennes

D. Énergie osmotique

L'énergie osmotique est l'énergie qu'il serait possible d'obtenir au voisinage des estuaires (où l'eau douce fluviale se mélange à l'eau salée de la mer), en exploitant le phénomène d'**osmose** qui se produirait continuellement au niveau d'une membrane appropriée qui séparerait ses masses de salinité différente.

Les énergies renouvelables sont une source de sécurité dans les domaines économiques, sociaux et environnementaux.

Dans le cas où les énergies renouvelables sont substituées aux énergies fossiles, elles favorisent l'indépendance énergétique. Il est donc possible qu'elles participent à la réduction des conflits liés aux intérêts énergétiques.

1-3- Énergie solaire

Le soleil produit de l'énergie grâce aux réactions de fusion nucléaire qui se produisent en son noyau, à cause de la chaleur et de la pression très élevées les atomes d'hydrogène et leurs isotopes se heurtent violemment pour former de l'hélium, libérant en même temps une énorme quantité d'énergie sous forme d'un rayonnement électromagnétique de basse longueur d'onde et de très haute fréquence: les rayons gamma.

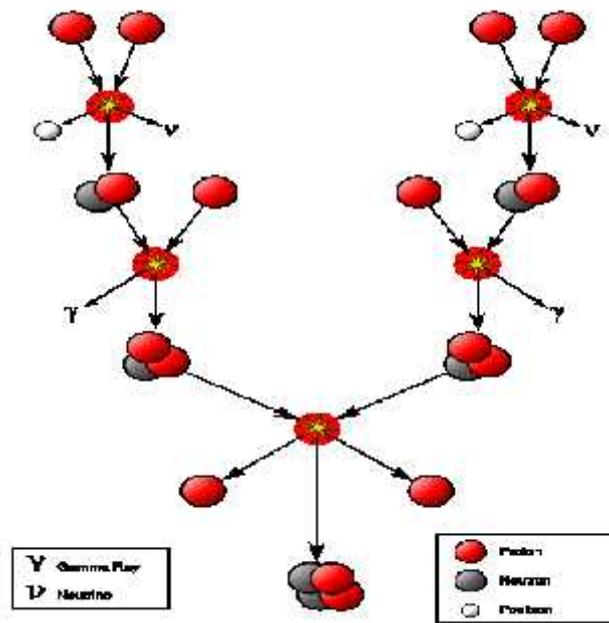


Figure I.7. La fusion d'hydrogène en hélium

Ainsi, chaque seconde, le Soleil transforme 600 millions de tonnes d'hydrogène en hélium et perd 4 millions de tonnes, expulsées dans l'espace sous forme de particule ou de rayonnement. Tous les atomes présents au cœur du Soleil peuvent fusionner. C'est ainsi que tous les éléments présents dans l'Univers ont été formés.

Après avoir été émis à la suite des réactions nucléaires à l'intérieur du noyau, les rayons gamma doivent, pour atteindre la surface, traverser la zone radiative du Soleil.

Cependant, la zone radiative est opaque et très dense, et les rayons gamma sont absorbés par les atomes de cette zone et sont réémis sous forme de photons de moindre énergie, à leur tour absorbés et réémis, jusqu'à atteindre la surface du Soleil, en passant par la zone de convection et la chromosphère.

Du coup, les photons produits à l'intérieur du noyau mettent parfois un temps estimé entre 20 000 et 50 millions d'années à atteindre la surface du Soleil mais toutes les longueurs d'onde du spectre de la lumière y sont représentées, ou presque. Puis, en 8 minutes en moyenne, à la vitesse de 3.10⁸ m/s, les photons atteignent la Terre [10-11-12].

Deux atomes d'hydrogène fusionnent et libèrent un neutrino et un positron, formant un atome de deutérium, un isotope de l'hydrogène: $2^1\text{H} \Rightarrow 2^2\text{H} + e^+ + \nu$.

L'atome formé fusionne avec un atome d'hydrogène et libère un photon gamma, formant un atome d'hélium3, un isotope de l'hélium: $2^1\text{H} + 1^1\text{H} \Rightarrow 3^2\text{He} + \gamma$.

L'atome d'hélium3 fusionne avec un autre atome d'hélium3, formant deux atomes d'hydrogène et un atome d'hélium4: $2^3\text{He} \Rightarrow 2^1\text{H} + 2^1\text{H} + 4^2\text{He}$.

On estime aujourd'hui que le Soleil va encore «vivre» pendant 6 milliards d'années. Tout ce temps, il continuera à produire de l'énergie. L'énergie solaire est donc une source infinie d'énergie.

1-3-1- Historique

L'utilisation de l'énergie solaire est un fait très ancien. L'énergie solaire est à l'origine de la vie sur Terre: les premiers organismes photosynthétiques l'utilisaient déjà il y a 3,6 milliards d'années pour produire leur matière organique. Le but de cette sous-partie est de montrer que l'évolution des techniques d'exploitation de l'énergie solaire s'est faite en plusieurs phases.

A. Dès l'Antiquité

Dans l'antiquité les Grecs et les Romains savaient utiliser l'énergie solaire. Pour allumer la flamme des jeux olympiques, ils utilisaient une sorte de miroir parabolique primitif, le skaphia, car pour eux seuls les rayons du Soleil étaient assez purs pour allumer cette flamme.

Le philosophe grec Socrate a enseigné l'architecture bioclimatique en expliquant que les maisons orientées au sud bénéficiaient de la chaleur du Soleil en hiver, tandis qu'en été, le

soleil se retrouvait quasiment au dessus des toits laissant les maisons dans une extrême fraîcheur.

On raconte qu'Archimède réussit à enflammer des bateaux de la flotte romaine qui assiégeait Syracuse en, grâce à de nombreux miroirs géants en bronze polis tous orientés sur le même point du navire figure 1.7.

Mais ce fait a fait débat au cours des siècles, certains savants jugeant en effet cette histoire improbable.



Figure I.8. Incendie de la flotte romaine

Aujourd'hui on est pourtant presque sûr que cette histoire est un mythe, si l'on en croit l'expérience réalisée par des étudiants du MIT (Massachusetts Institute of Technology) qui ont réitéré l'expérience d'Archimède en 2005 et on réussit à enflammer en 10 minutes et à 30 mètres une reconstitution de bateau romain, qui cependant était sèche et immobile, ce qui a facilité l'enflamment.

B. Au XVIIIème siècle

Le Siècle des Lumières voit renaître l'intérêt pour le Soleil et les premières études et expériences sur son énergie.



Figure I.9. Un miroir ardent

En 1747, le botaniste Buffon met au point une machine capable d'enflammer des planches en bois à 48 mètres. Cet engin est composé de 168 petits miroirs plans de 16 centimètres de largeur sur 22 de hauteur qui réfléchissent les rayons du soleil en un point unique permettant une élévation de la température.



Figure I.10. Four solaire

Ainsi, il parvient à enflammer du bois à une distance de 65 mètres, et de faire fondre de l'étain à 49 mètres, du plomb à 42 mètres, et de l'argent à 20 mètres. Le célèbre chimiste français Antoine Laurent de Lavoisier (1743-1794) invente en 1774 un très puissant four solaire dans le but de faire fondre des métaux sans que ceux-ci soient pollués par les produits des combustibles.

Pour cela il utilise deux lentilles convergentes montées comme un télescope et dont les foyers sont alignés sur une droite parallèle aux rayons du Soleil, et qui lui permettent d'obtenir une température d'environ 1755°C.

Le suisse Horace Bénédict de Saussure (1740; 1799) invente en 1767 le tout premier four solaire qu'il appelle "boîte chaude" qui lui permet de démontrer l'effet de serre. Il obtient une température de 160°C.

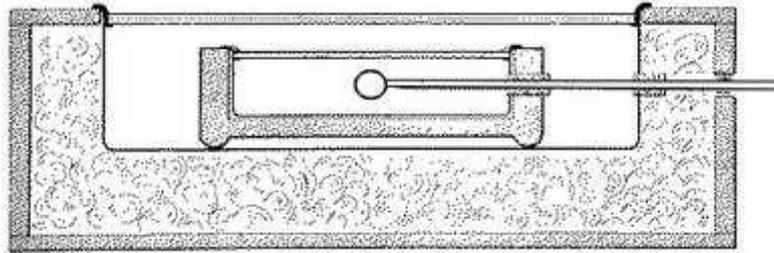


Figure I.11. Coupe transversale d'une " boîte chaude" avec thermomètre

C. Au XIX^{ème} siècle

Le XIX^{ème} est marqué par la découverte de l'effet photovoltaïque et le perfectionnement des techniques d'exploitation du solaire thermique. En 1839, le physicien Alexandre Edmond Becquerel découvre par hasard l'effet photovoltaïque. Une nouvelle voie de l'exploitation de l'énergie solaire s'ouvre alors. Il faudra attendre 1900 pour qu'Einstein explique cet effet et 1910 pour qu'il soit mis en évidence par Robert Andrew Millikan.

En 1872, l'ingénieur suédois Charles Wilson construit un distillateur solaire au Chili dans le but d'alimenter en eau douce une mine. Sur une surface de 4700 m², ce distillateur produisit pendant 40 ans 23000 litres d'eau par jour à un prix minime.

En 1875, l'industriel allemand Werner von Siemens décrit le principe d'une cellule photovoltaïque au silicium ainsi que le principe photovoltaïque devant l'Académie des Sciences de Berlin. Le professeur français Augustin Mouchot inventa le principe de poursuite du Soleil avec un capteur à concentration. En 1873, grâce à une subvention du conseil général de Tours il construit une machine de 4m²qu'il présente en 1875 à l'Académie des Sciences.

En 1877, c'est une subvention du conseil général d'Alger qui lui permet de construire un nouveau capteur de 20m² couplé à une machine à vapeur qu'il expose lors de l'Exposition Universelle de Paris de 1878. L'engin, d'une puissance d'un demi-cheval (368 W), permet d'imprimer le journal de l'Exposition Le Soleil à raison de 500 exemplaires/heures. La machine eut un grand succès et fut primée. Augustin Mouchot avait déjà deviné que les

énergies fossiles que les occidentales commençaient à utiliser n'étaient pas inépuisables. C'est pour cela qu'il préconisait et étudiait l'énergie solaire qui selon lui était déjà l'énergie du futur. C'est ce qu'il écrivait dans le livre qu'il publiait en 1869, *La Chaleur Solaire et ses Applications Industrielles*.

D. A partir du XXème siècle

Après 1900, toutes les technologies découvertes au siècle précédant sont améliorées. De nouvelles découvertes sont faites et dès 1970 le solaire connaît un vif regain d'intérêt. Les premières centrales solaires sont construites, et les premières applications individuelles apparaissent.

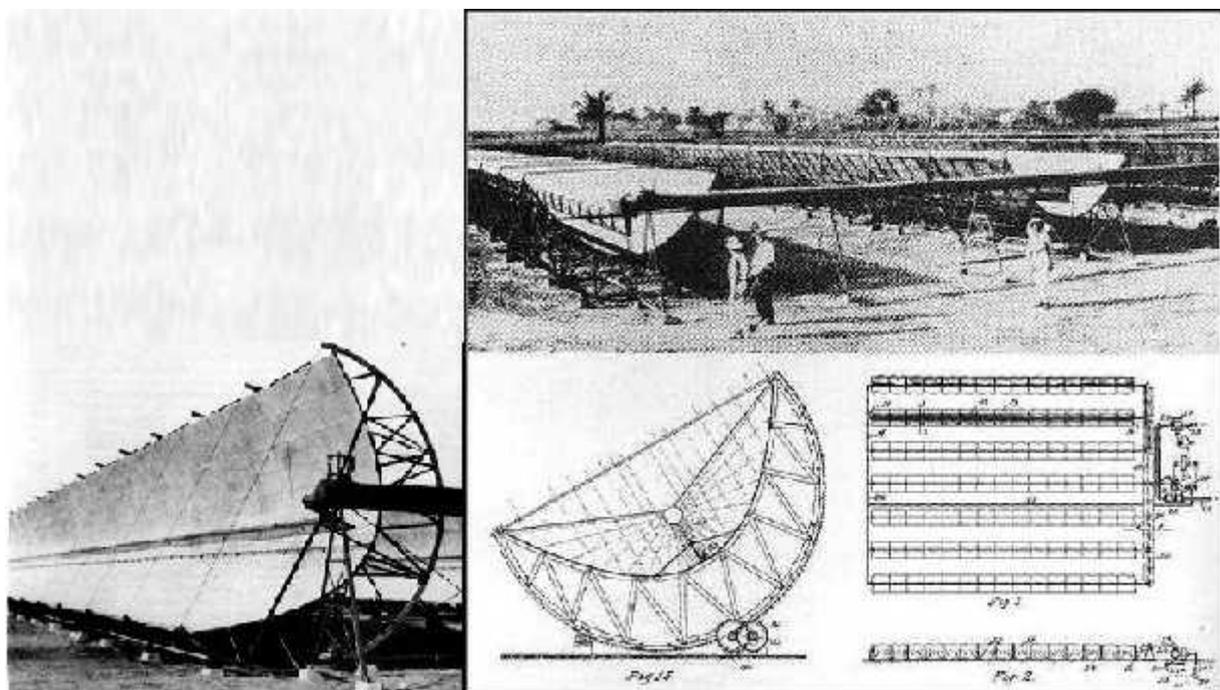


Figure I.12. Plans et photos de la centrale thermique de Méadi en Egypte en 1913.

Le physicien anglais Charles Vernon Boys (1855; 1944) est l'inventeur du capteur cylindro-parabolique. Son invention servit pour la première fois en Egypte, à Mead, où on construisit en 1912 une centrale thermique qui fonctionnait sur le principe de Boys, permettant d'irriguer une grande surface de cultures. Cette centrale était composée de 5 réflecteurs de 60 mètres de long pour une ouverture de 4 mètres qui couplés à une pompe permirent de pomper plus de 2000 litres d'eau par minute à partir de 1913, irriguant 200 hectares de champs de coton. Des installations similaires à celle-ci furent prévues dans le

Soudan anglais et dans les colonies africaines de l'empire Allemand, mais ces centrales restèrent à l'état de projet à cause du début de la seconde guerre mondiale.

A partir de 1920, aux Etats-Unis, des particuliers installent chez eux des chauffe-eau solaires, et des « Crystal House », maisons chauffées uniquement grâce à l'apport énergétique du Soleil, sont construites.

Le français Félix Trombe (1906; 1985) invente le premier four solaire à concentration: en 1944, lors de leur fuite, les allemands abandonnent un projecteur de DCA.

Ces projecteurs très puissants qui permettaient de repérer les avions ennemis dans le ciel nocturne sont des miroirs paraboliques orientables au foyer duquel on plaçait une puissante ampoule ce qui donnait un faisceau de lumière parallèle.

Trombe décide d'utiliser de réutiliser le projecteur abandonné à l'envers et de jour. Le projecteur est placé de telle manière que les rayons du soleil sont concentrés au foyer du miroir. Quand on place une bûche de bois au niveau du foyer celle-ci s'enflamme instantanément.



Figure I.13. Le four de Mont-Louis

Il est le directeur de la construction d'un prototype de four solaire d'une puissance de 50 kW à Mont-Louis dans les Pyrénées-Orientales. Puis il dirige celle du four solaire d'Odeillo d'une puissance de 1000 kW. C'est le plus puissant four solaire du monde. Il est utilisé par l'industrie.

Il faut attendre 1954 pour voir la création de la toute première cellule photovoltaïque au silicium. Elle est mise au point par les américains Gerald Pearson, Daryl Chapin et Calvin Fuller, des laboratoires de la Bell Téléphone.

Mais la technologie mise au point est hors de prix: non seulement elle à un faible rendement mais en plus elle nécessite l'utilisation du silicium très cher à l'époque. Il faut attendre 1958 et l'invention d'une cellule d'un rendement de 8% pour son premier emploi par l'industrie aérospatiale. Le premier satellite équipé de cellules photovoltaïques, Vanguard 1, est donc lancé en 1958.

La première maison alimentée en électricité par des cellules photovoltaïque est construite en 1973. Puis le choc pétrolier de 1980 donne un grand élan aux technologies solaires devenant d'un coup moins chères. De nombreux projets de centrales thermiques solaires apparaissent dans le monde, comme la centrale Thémis en France dont la construction s'étale 1980 à 1982.



Figure I.14. La première voiture solaire

En Australie, la 1ère voiture solaire parcourt 4000km. Indépendamment du pétrole, de nombreux petits appareils portatifs sont équipés de cellule photovoltaïque comme des calculatrices ou des montres.

Mais avec le contre-choc pétrolier de 1986, de nombreux projets sont arrêtés et en France la centrale Thémis est fermée.

Mais aujourd'hui, dans un contexte avéré de réchauffement climatique et de flambée des prix des énergies fossiles, l'énergie solaire est de nouveau propulsée sur le devant de la scène. L'exploitation du solaire par l'homme s'est donc déroulée en 3 phases:

- La découverte (Antiquité), et redécouverte (XVIIIème siècle);
- L'expérimentation (XVIIIème et XIXème siècles);
- Le développement à grande échelle des moyens d'exploitation (XIXème et XXème siècles).

Et elle n'est pas un fait récent, contrairement à ce que nous avons souvent tendance à le penser.

1-3-2-L'énergie solaire pour produire de la chaleur

1-3-2-1-Le solaire passif pour se chauffer

Il s'agit d'utiliser le soleil pour réchauffer les habitations. Pour cela, les pièces orientées au sud sont conçues avec de grandes baies vitrées qui laissent entrer le rayonnement solaire. Ce chauffage appelé passif est utilisé dans les bâtiments bioclimatiques aux parois bien isolées. Nous pouvons faire l'essai, si on se place derrière une vitre qui reçoit bien les rayons du soleil. Tu sentiras une chaleur très agréable.

1-3-2-2-Un chauffe-eau solaire : comment ça marche ?

A. Capter l'énergie solaire

Le capteur solaire (1) comprend :

- Une plaque et des tubes métalliques noirs. Ils constituent l'absorbeur. Ils reçoivent le rayonnement solaire et s'échauffent ;
- Un coffre rigide et thermiquement isolé entourant l'absorbeur. Sa partie supérieure, vitrée, laisse pénétrer le soleil et retient la chaleur comme une petite serre.

B. Transporter la chaleur

C'est le rôle du **circuit primaire (2)**. Étanche et calorifugé, il contient de l'eau additionnée d'antigel. Ce liquide s'échauffe en passant dans les tubes du capteur, et se dirige vers un ballon de stockage.

C. Restituer la chaleur

Là, grâce à un échangeur thermique (serpentin), le liquide cède ses calories solaires à l'**eau sanitaire (3)**. Le liquide caloporteur, refroidi, repart vers le capteur (4) où il est chauffé à nouveau.

D. Stocker l'eau chaude

Le ballon solaire (5) : c'est la réserve d'eau sanitaire. L'eau chaude soutirée est remplacée immédiatement par la même quantité d'**eau froide du réseau (6)**, réchauffée à son tour par le liquide caloporteur du circuit primaire.

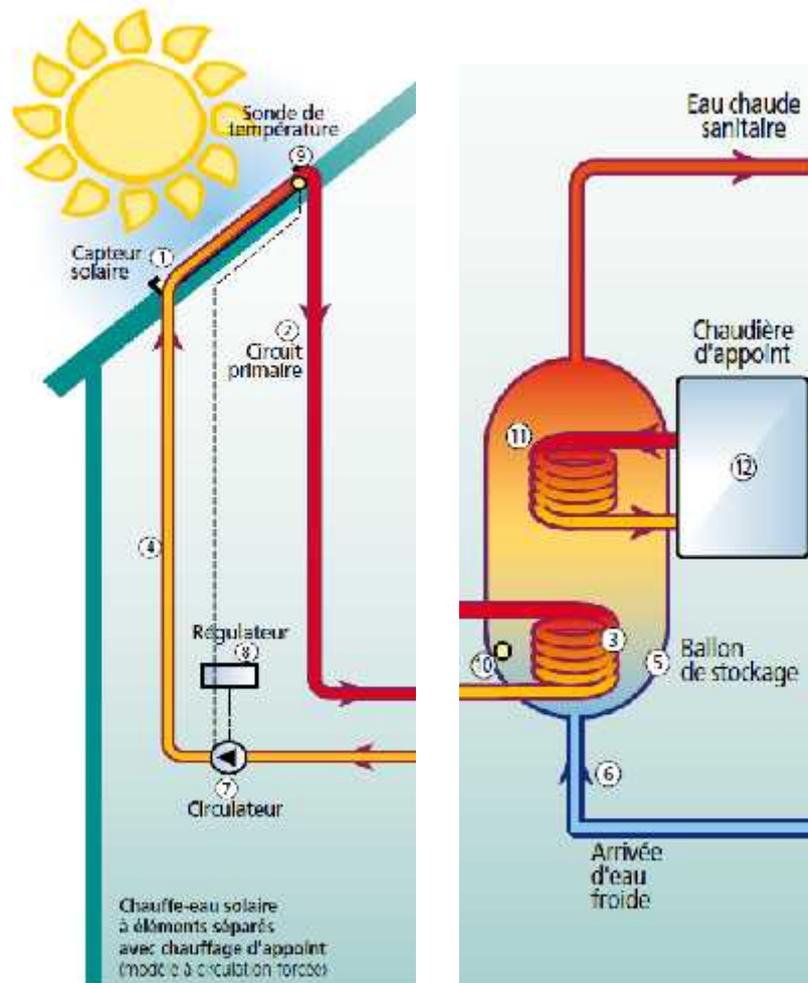


Figure I.15. Chauffe-eau solaire

E. Faire circuler le liquide caloporteur

La circulation du liquide peut être naturelle ou forcée :

- Dans le premier cas, le liquide caloporteur circule grâce à sa différence de densité avec l'eau du ballon. Tant qu'il est plus chaud, donc moins dense qu'elle, il s'élève naturellement par thermo-circulation. Le ballon doit être placé plus haut que les capteurs. Sur ce principe sont conçus les chauffe-eau solaires « en thermosiphon » ;

- Dans le second cas, une petite pompe électrique, le **circulateur (7)**, met en mouvement le liquide caloporteur quand il est plus chaud que l'eau sanitaire du ballon. Son fonctionnement est commandé par un **dispositif de régulation (8)** jouant sur les écarts de températures : si la **sonde du ballon (10)** est plus chaude que celle du **capteur (9)**, la régulation coupe le circulateur. Sinon, le circulateur est remis en route et le liquide primaire réchauffe l'eau sanitaire du ballon.

F. Pallier l'insuffisance d'ensoleillement

Le ballon est équipé d'un dispositif d'appoint qui prend le relais en cas de besoin (ensoleillement faible) et reconstitue le stock d'eau chaude. Il peut s'agir d'un **échangeur (11)** (appoint hydraulique) raccordé à une **chaudière (12)** (gaz, fioul, bois).

1-3-3-L'énergie solaire pour produire de l'électricité

Pour capter l'énergie lumineuse du soleil et la transformer en électricité, on utilise des modules photovoltaïques. Ces modules solaires, aux reflets bleutés, sont constitués, dans la plupart des cas, d'un assemblage de cellules photovoltaïques en silicium. Le silicium est fabriqué à partir de la silice (notamment présente dans le sable), une matière abondante sur toute la Terre. Mais, il faut rendre ce silicium très pur ce qui nécessite un apport important d'énergie.

1-3-3-1-Fonctionnement d'une cellule photovoltaïque

L'électricité correspond à un déplacement d'électrons. Aussi, pour rendre les électrons plus mobiles, le silicium découpé en fine tranche est « dopé ».

La cellule photovoltaïque est en fait composée de deux zones : une zone dans laquelle une partie des atomes de silicium sont remplacés par des atomes de phosphore et une autre zone dans laquelle une partie des atomes de silicium sont remplacés par des atomes de bore. Il en résulte la création d'un champ électrique à l'interface de ces deux zones.

L'atome de phosphore possède un électron de plus que l'atome de silicium sur sa couche périphérique, et l'atome de bore en a un en moins.

Ainsi quand la lumière pénètre le silicium, elle apporte de l'énergie sous forme de photons. Les photons vont communiquer leur énergie aux atomes de silicium, conduisant à la création de charges électriques.

Les électrons de la zone dopée au phosphore vont rejoindre les trous de la zone dopée au bore via la connexion extérieure. Ils sont alors collectés par les grilles en métal. Au passage, leur déplacement crée un courant électrique.

Pratiquement, une cellule photovoltaïque en technologie cristalline est donc composée de plusieurs couches actives :

- Une couche « anti-reflet » sur la face avant dont le but est de faciliter au maximum la pénétration d'un maximum de photons
- Une grille conductrice avant « collectrice des électrons »
- Une couche dopée n (généralement grâce aux atomes de bore) avec porteurs de charges libres négatifs (électrons)
- Une couche dopée p (généralement grâce aux atomes de phosphore) avec porteurs de charges positifs (trous).
- Un contact métallique arrière pour collecter les charges positives.

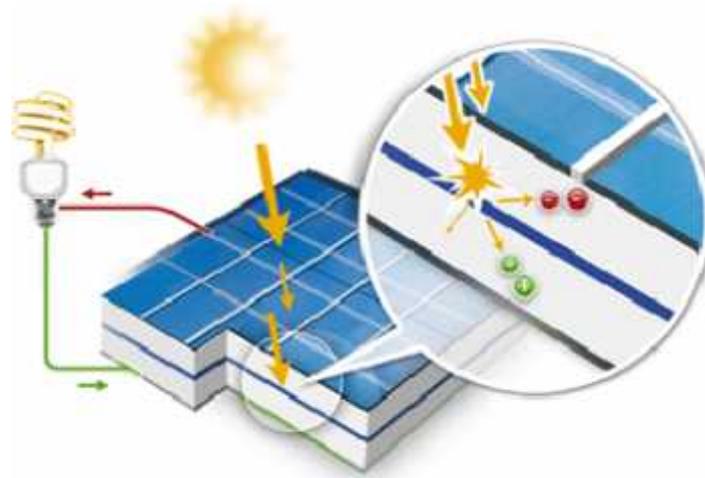


Figure I.16. Cellule photovoltaïque

L'électricité photovoltaïque ainsi produite peut ensuite être injectée dans le réseau électrique général pour être utilisée ailleurs, ou stockée dans des batteries pour servir à des moments où il n'y a plus de soleil.

1-3-3-2-Les centrales solaires qui permettent de produire de l'électricité

Les trois principaux types de centrales solaires thermiques se distinguent surtout par la manière dont on focalise les rayons solaires.

A. Les collecteurs paraboliques

Les capteurs paraboliques fonctionnent d'une manière autonome. Ils sont constitués d'une grande parabole de révolution réfléchissante et d'un moteur « Stirling » au foyer de la parabole.

Le tout pivote sur 2 axes pour suivre le déplacement du soleil afin de concentrer son rayonnement sur le foyer de la parabole réfléchissante.

Le rapport de concentration est généralement d'environ 4000 et la température obtenue entre 500 et 1000°C.

Ainsi, la chaleur du soleil fait travailler un fluide comprimé afin de générer de l'électricité.

Chaque capteur est en fait une mini-centrale, qui produit de l'électricité de manière autonome l'association de plusieurs collecteurs paraboliques permet d'augmenter la puissance finale qui est de 15kW dans la plupart des cas [13].

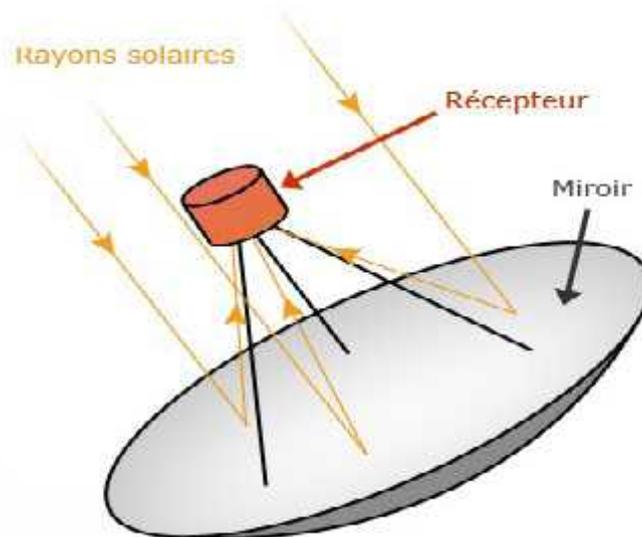


Figure I.17. Collecteur parabolique

De nombreuses centrales de ce genre existent un peu partout dans le monde, mais l'on ne retrouve presque jamais le même type de parabole d'une centrale à l'autre ; nous sommes donc encore en phase d'expérimentation mais nous avons déjà constaté que cette technologie n'est probablement pas la plus rentable.

B. Les centrales à tour

Le principe des centrales à tour est le suivant : des héliostats au sol réfléchissent les rayons du soleil vers une chaudière en haut d'une tour où un liquide (généralement du sel fondu) est chauffé jusqu'à 2000°C.

Ce liquide porte ensuite à ébullition de l'eau dont la vapeur actionne des turbines et produit de l'électricité.

On dénombre aujourd'hui dans le monde plusieurs dizaines de centrales à tour, et c'est pour le moment la manière la plus répandue de produire de l'électricité grâce au solaire thermique.

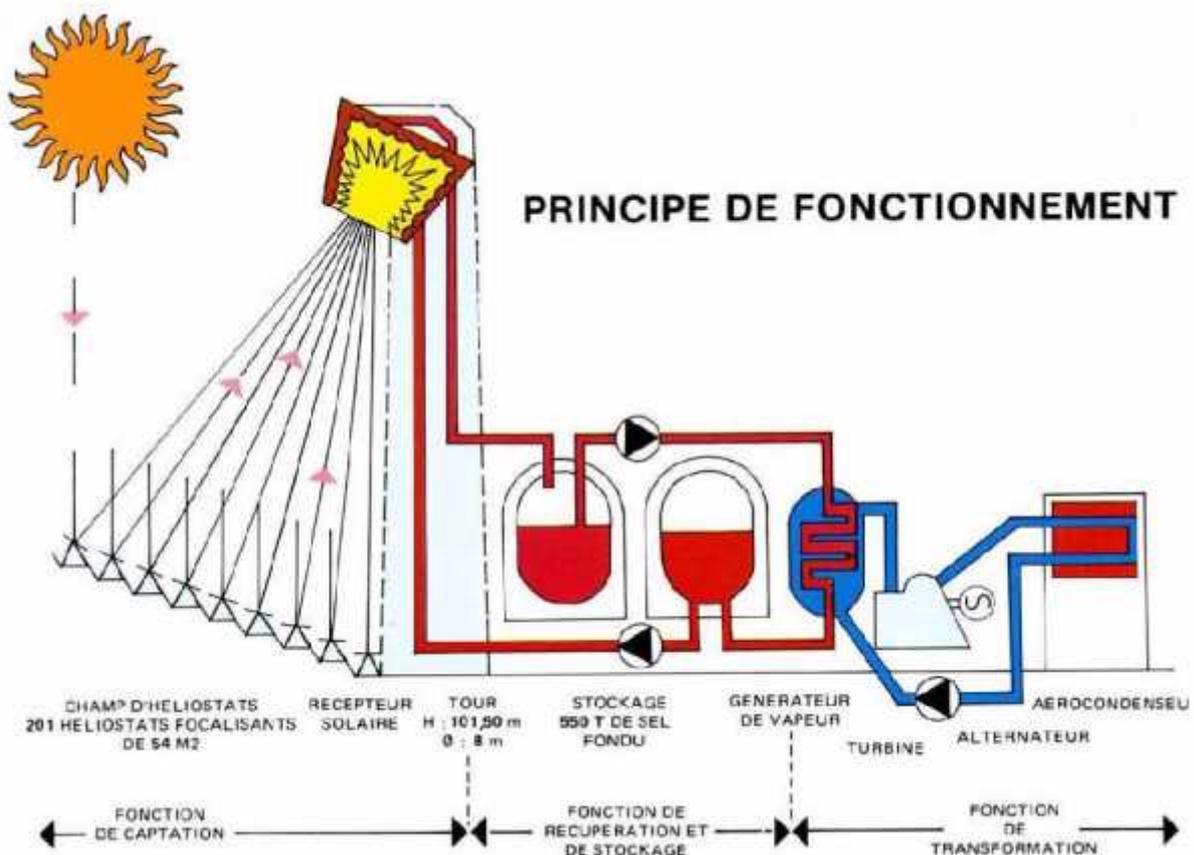


Figure I.18. Centrale solaire

C. Les collecteurs cylindro-paraboliques

Ce type de centrale se compose d'alignements parallèles de longs miroirs hémicylindriques, qui tournent autour d'un axe horizontal pour suivre la course du soleil.

Les rayons solaires sont concentrés sur un tube horizontal dans lequel circule un fluide caloporteur (généralement une huile synthétique).

Les tuyaux étant noirs, ils absorbent toute la chaleur du soleil et permettent à la température du fluide de monter jusqu'à 500° C.

La chaleur ainsi récupérée produit de la vapeur via un échangeur vapeur qui actionne des turbines et qui produisent de l'électricité.

Certaines centrales sont désormais capables de produire de l'électricité en continu, nuit et jour, grâce à un système de stockage de la chaleur.

Si ce n'est pas le cas, une partie annexe de la centrale prend le relais et produit de l'électricité en brûlant des carburants traditionnels (gaz, charbon...) une fois le soleil couché.

Il existe également plusieurs centrales photovoltaïques, composées d'un champ de panneaux solaires photovoltaïques dont le but est également de produire de l'électricité.

D. Les centrales photovoltaïques

Le principe des centrales solaires photovoltaïques est extrêmement simple. Elles sont constituées d'un champ de modules solaires photovoltaïques reliés entre eux en série ou en parallèle, et branchés sur un ou plusieurs onduleurs.

L'énergie est directement transformée en électricité dans les panneaux, et passe ensuite dans le réseau électrique vers la ville la plus proche.

1-3-4-Les différents types de rayonnement solaire

- **Le rayonnement direct** : Ce sont les rayons UV du Soleil. C'est ce type de rayonnement qui est utilisé dans les systèmes à concentration (four solaire, centrales solaires thermodynamique et photovoltaïque).
- **Le rayonnement diffus** : Ce sont des rayons qui proviennent de l'atmosphère, qu'il fasse beau ou pas. Des rayons lumineux issus du Soleil traversent les nuages et se

diffusent sur toute la surface de la Terre. Il contribue à l'éclairage mais ne peut pas être concentré (à l'inverse du rayonnement direct).

- **Le rayonnement global** : C'est la somme du rayonnement direct et diffus. C'est celui-ci qui est utilisé pour faire fonctionner les panneaux solaires thermiques et photovoltaïques (systèmes sans concentration).

1-3-5- comment stocker des énergies intermittentes:

Le stockage de l'énergie est l'action qui consiste à placer une quantité d'énergie en un lieu donné pour permettre son utilisation ultérieure. Par extension, le terme « stockage d'énergie » est souvent employé pour désigner le stockage de matière qui contient cette énergie. La maîtrise du stockage de l'énergie est particulièrement importante pour valoriser les énergies alternatives, telles que l'éolien ou le solaire, sûres et renouvelables, mais par nature intermittentes.

1-3-5-1 L'hydrogène au stockage de chaleur

Il n'y a pas que les batteries pour stocker l'énergie. Il y a bien sûr en plus l'hydrogène qui s'obtient par électrolyse de l'eau et qui peut ensuite être plus ou moins facilement stockée sous forme gazeuse, liquide, et même solide. La conversion en électricité se fait ensuite grâce à une pile dite à combustible. On notera ici que l'électrolyse de l'eau et donc l'hydrogène peuvent être obtenus par une ferme éolienne comme par une centrale thermique à charbon. Comme l'électricité, l'hydrogène n'est donc pas forcément propre en termes de CO₂.

Des chercheurs peuvent également travailler sur le stockage thermo-chimique et, avec plus de résultats pour l'instant, sur le stockage thermodynamique: liquéfaction de l'air, stockage combiné de froid et de chaleur, stockage de chaleur dans des matériaux à haute température, stockage de chaleur en réservoir souterrain dans des aquifères naturels (ATES, Aquifer thermal energy storage). Quelques installations existent déjà comme en Allemagne, à Neubrandenburger Stadtwerke, où un ATES est en relation avec une centrale à gaz et à vapeur.

1-3-5-2 Stockage d'air comprimé

Une autre possibilité est de convertir le surplus d'électricité en air comprimé. C'est la technologie des CAES (Compress Air Energy Storage) dont des installations sont déjà opérationnelles en Allemagne et aux Etats-Unis.

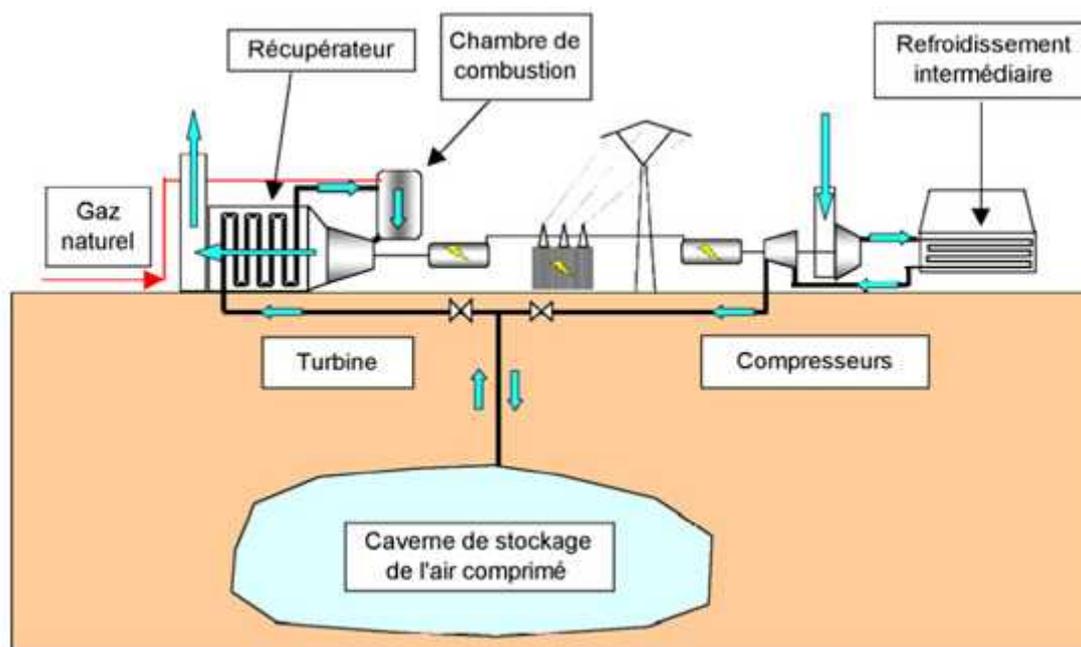


Figure I.19. Schéma de principe d'une installation de stockage à air comprimé

Une fois comprimé, l'air est stocké le temps voulu dans des cavités souterraines ou dans des réservoirs en surface. Quand on en a besoin, on le réchauffe dans une chambre de combustion et il part dans une turbine. Ce système fait néanmoins appel à l'utilisation de gaz et perd de l'énergie sous forme de chaleur lors de la compression. Des systèmes complémentaires de stockage de la chaleur sont donc à l'étude.

1-3-5-3- Volant d'inertie et gestion "intelligente" du réseau

Il est également possible de stocker très temporairement de l'énergie électrique sous forme d'énergie cinétique en faisant tourner une masse autour d'un axe par le biais de ce que l'on appelle le "volant d'inertie" qu'illustre entre autre le projet Flyprod soutenu par l'Agence de l'environnement et de la maîtrise de l'énergie (ADEME). Développé au sein de la technopole de l'Aube, près de Troyes, ce projet a pour objectif de mettre en place une ligne de production de volants d'inertie de 40 KW. Dans cette technologie, l'énergie cinétique est immédiatement retransformée en énergie électrique quand le moteur est utilisé comme générateur. La rapidité d'action de ce système pourrait lui permettre d'optimiser la gestion de réseaux électriques, en parallèle du potentiel des réseaux intelligents (smart grids) sur lesquels travaille par exemple EDF avec ses opérations Millener (Corse, Réunion, Guadeloupe). Objectif là encore: optimiser l'utilisation des énergies renouvelables.

1-3-5-4- Transfert d'énergie par pompage :

Enfin, il y a la technique qui consiste à utiliser l'énergie électrique pour pomper de l'eau et l'emporter en amont pour la stocker. Quand on veut récupérer l'énergie, il suffit de faire redescendre l'eau vers l'aval, ce qui va actionner une turbine et produire de l'électricité. Baptisé station de transfert d'énergie par pompage (STEP), cette méthode déjà ancienne et bien éprouvée est déjà utilisée en montagne, la plus grande STEP est l'ensemble constitué par les retenues de Grand Maison et du Verney, dans l'Isère.

EDF étudie la possibilité de développer ces procédés au niveau de falaises en bord de mer tandis que GDF-Suez pense à des STEP souterraines. Bien sûr, l'une des difficultés est de trouver les sites où une telle installation est possible. Cependant, son côté assez simple, "lowtech", assure d'emblée à cette technique une certaine durabilité. Cette durabilité reste en revanche à étudier dans le cas de méthodes de stockage plus "hightech" et dans le cas des batteries utilisant des composants qui peuvent, comme le pétrole, se raréfier...

1-4-Conclusion

Le stockage de l'énergie est au cœur des enjeux actuels, qu'il s'agisse d'optimiser les ressources énergétiques ou d'en favoriser l'accès. Il permet d'ajuster la « production » et la « consommation » d'énergie en limitant les pertes.

Chapitre II.

Les types de stockages

II-1- introduction

Le stockage de l'énergie consiste à préserver une quantité d'énergie pour une utilisation ultérieure. Par extension, l'expression désigne également le stockage de matière contenant l'énergie.

II-2-Types de stockage de l'énergie

Le stockage de l'énergie est au cœur des enjeux actuels, qu'il s'agisse d'optimiser les ressources énergétiques ou d'en favoriser l'accès. Il permet d'ajuster la « production » et la « consommation » d'énergie en limitant les pertes. L'énergie, stockée lorsque sa disponibilité est supérieure aux besoins, peut être restituée à un moment où la demande s'avère plus importante. Face à l'intermittence ou la fluctuation de production de certaines énergies, par exemple renouvelables, cette opération permet également de répondre à une demande constante.

Les méthodes de stockage dépendent du type d'énergie. Les sources d'énergies fossiles (charbon, gaz, pétrole), sous forme de réservoirs à l'état naturel, remplissent naturellement la fonction de stocks. Une fois extraites, elles peuvent facilement être isolées, hébergées et transportées d'un point de vue technique. Le stockage s'avère plus complexe pour les énergies intermittentes : leur production est relayée par des vecteurs énergétiques tels que l'électricité, la chaleur ou l'hydrogène, nécessitant des systèmes spécifiques de stockage.

II-2-1- Stockage chimique

Tout combustible peut être considéré comme un stock d'énergie sous forme chimique. En brûlant, le composé dégage de l'énergie sous forme de chaleur qui peut être récupérée et valorisée [14].

II-2-1-1-Stockage de l'hydrogène

L'hydrogène présente plusieurs caractéristiques intéressantes, susceptibles d'en faire un des vecteurs énergétiques du futur. En particulier, il peut facilement être utilisé pour alimenter des moteurs de véhicule ;

1. Soit dans un moteur à combustion interne, comme dans le cas des véhicules actuels. L'efficacité étant alors limitée par le cycle de Carnot et le rendement à environ 25 % ;
2. Soit avec un moteur électrochimique utilisant une pile à combustible. L'efficacité n'étant alors pas limitée par le cycle de Carnot, le rendement peut atteindre 50 à 60 %.

Mais il faut pour cela faciliter, sécuriser et rendre moins coûteuse sa production, son transport et son stockage. Dans la perspective d'une troisième révolution industrielle telle que la propose Jeremy Rifkin, les réservoirs doivent être fixes pour les uns, et mobiles pour les autres (réservoirs de véhicules), et raccordés à un réseau capable de recevoir une production décentralisée et de distribuer ce gaz de manière également décentralisée. Dans ce même esprit, ce réseau doit devenir « intelligent » et se connecter aux smart grids pour s'insérer dans ce que Rifkin appelle le futur « internet de l'énergie ».

Le stockage, rapidement réversible et sécurisé de quantités importantes d'hydrogène est encore un défi technologique et scientifique. L'atome d'hydrogène, très petit est parmi les plus difficiles à contenir, y compris sous forme de molécule de dihydrogène. Sa liquéfaction nécessite de le refroidir à environ - 253°C (De tous les gaz, seul l'hélium est plus difficile à liquéfier). Cette liquéfaction est à ce jour très consommatrice d'énergie [15-16].

A. Le stockage en réservoir de la molécule H₂

A-1- Sous forme gazeuse

A -1-1- Basse et moyenne pressions

Sous cette forme, il est utilisé principalement pour des applications nomades ou ultra-mobiles se caractérisant par un faible encombrement, un faible poids, une réserve énergétique limitée mais une mise en œuvre très simple. Les applications les plus courantes sont :

1. La réserve d'hydrogène utilisé comme « gaz de calibration » pour l'étalonnage de certains instruments ; l'injection d'une faible quantité de gaz permet de procéder à une opération de calibration de l'appareil ou de l'instrument. Le réservoir d'hydrogène peut être installé à poste dans l'équipement ou porté par le personnel chargé de la calibration ;

2. La réserve d'énergie, pour du personnel intervenant en milieu isolé ou extrême (froid, obscurité...) et offrant assez d'énergie pour activer ou recharger un téléphone, un dispositif d'appel, une balise, alimenter les leds d'une lampe frontale, etc.⁶... ou encore pour recharger son téléphone, loin de tout.

A -1-2- Haute et très haute pressions

Le moyen de diminuer le volume d'un gaz à température constante est d'en augmenter la pression (Cf. la loi de Boyle-Mariotte) dans le réservoir. Les technologies actuelles permettent d'atteindre une pression de 700 bars. Ces réservoirs sont en composites renforcés grâce à un enroulement de filaments (fibre de carbone spécifique, principalement mais d'autres matériaux sont à l'essai comme les fibres de basalte). Ces réservoirs font l'objet de qualifications très complexes où on vérifie la résistance à la pression (jusqu'à l'éclatement pour un échantillon du lot), la résistance au feu et la résistance aux chocs (tirs à balles réelles). À cette pression l'hydrogène possède une masse volumique de 42 kg/m^3 , soit un gain d'un facteur 500 environ par rapport à sa densité à pression et température ambiantes. Deux voire trois standards existent :

1. 350 bars pour tous véhicules: voitures particulières, bus, engins et camions pour tous les territoires
2. 500 ou 550 bars pour des engins et camions pour l'Amérique du Nord.
3. 700 bars pour les voitures particulières

La « tête de réservoir » doit permettre le remplissage de gaz, l'alimentation de la pile ou du moteur à la pression désirée (grâce à un détendeur intégré), dans de bonnes conditions de sécurité (sans surpression, ni risque d'explosion). Des capteurs doivent aussi informer sur la quantité de gaz restante.

A-2- Sous forme liquide

Cette solution, encore réservée aux lanceurs spatiaux pourrait à l'avenir concerner des véhicules terrestres ; en effet, l'hydrogène liquide possède une masse volumique de $70,973 \text{ kg/m}^3$, dans ces conditions le volume du réservoir nécessaire pour stocker « nos » 4 kg d'hydrogène serait de 56 litres soit le volume du réservoir d'une voiture à essence actuelle.

Limitation : pour rester liquide, l'hydrogène doit être porté et maintenu à une température de $-252,8\text{ °C}^{12}$. Le réservoir doit résister à de hautes pressions et disposer de systèmes secondaires maintenant l'hydrogène à basse température, et à une pression au moins légèrement supérieure à la pression atmosphérique. En outre, la liquéfaction de l'hydrogène et son maintien en température ont un coût énergétique élevé (et, par-là, en polluants).

La cryo-compression (récemment développée) pourrait améliorer l'efficacité du stockage volumétrique et massique et ainsi faciliter l'usage d'hydrogène liquide refroidi à très basse température (20,3 K environ).

Quand l'hydrogène se réchauffe et monte en pression sous l'effet de l'apport de chaleur du milieu environnant (comme dans une cocotte-minute), la pression finale avoisine 350 bars (voir par exemple le réservoir liquide développé sur la voiture BMW Hydrogène).

Pour comparaison, un réservoir d'essence traditionnel ne supporte que quelques bars, et un réservoir GPL 30 bars.

Avec les scénarios classiques de conduite, la pression « limite » de 350 bars serait très rarement atteinte (car la pression et la température diminuent dans le réservoir au fur et à mesure que l'hydrogène est consommé).

Les dernières valeurs publiées sont des « valeurs cibles » en termes de capacité de stockage embarqué pour l'hydrogène et la technologie cryo-compressée a d'ores et déjà atteint les valeurs recommandées pour 2015 (de petits réservoirs de 5-13 kg suffisant pour une autonomie de 300 milles avec une pile à hydrogène).

La cryo-compression serait la solution la moins onéreuse parmi les différentes formes de stockage en cours d'étude : le coût pour l'utilisateur final (incluant les coûts de production, liquéfaction, transport et de distribution de l'hydrogène) a été estimé à \$0,12 par mile (soit un peu moins de 0,06 euros par km) alors qu'ils sont de \$0,05 à \$0,07 par mile (de 0,024 à 0,034 euros par km) pour un véhicule essence traditionnel .

Pour ces raisons, le constructeur allemand BMW avait intégré le "cryo-compressé" comme principal élément du développement de sa filière hydrogène, mais cette solution a été (provisoirement ?) abandonnée car ne garantissant pas la conservation du gaz pendant un arrêt prolongé du véhicule, outre les autres risques associés à cette technologie.

A-3- Sous forme solide / moléculaire

A-3-1- Stockage sous forme d'hydrates ou clathrate

Il est possible d'introduire une ou plusieurs molécules d'hydrogène dans des "cages d'eau" (clathrates), mais à fortes pressions et/ou basse températures.

On cherche à pouvoir le faire à des conditions de températures et de pression moins extrêmes.

A-3-2- Le stockage « sur » des composés solides (adsorption)

L'adsorption consiste en l'« immobilisation » d'un composé sur la surface d'un autre. L'hydrogène peut se fixer sur la plupart des surfaces solides mais quasiment seule l'adsorption sur des surfaces de carbone est envisagée pour le stockage, qui n'en est encore qu'aux premières phases de recherche.

Il nécessite des matériaux avec de grandes surfaces spécifiques, du ressort des nanotechnologies.

L'utilisation de nanotubes de carbone est envisagée mais ils n'adsorbent l'hydrogène qu'à très basse température (-196 °C).

Les résultats actuels sont encore trop parcellaires pour pouvoir présager de l'avenir de cette solution.

A-3-3- Le stockage « dans » des composés solides (hydrures, fullerènes...)

Différents composés interagissent avec l'hydrogène par des interactions polaires, offrant des possibilités de rétention intéressantes.

Ce sont de petits composés (notamment divers hydrures ; l'acide formique) ou des complexes macromoléculaires et cristallins (notamment carbonés, tel les fullerènes).

Mais d'importantes recherches restent à faire pour améliorer leur capacité d'adsorption ou d'absorption, et le contrôle du rélargie de l'hydrogène.

II-2-1-2- Les biocarburants et la biomasse

Ils ne se réfèrent pas au stockage de l'énergie en tant que telle, mais plutôt à des exemples de stockage d'énergie chimique. Lorsque des bûches de bois ou des biocarburants sont brûlés, ils libèrent de l'énergie qui est stockée dans les liaisons entre les molécules et entre les atomes [17].

II-2-1-3- L'azote liquide

L'azote liquide avec compression isotherme : un démonstrateur a été réalisé pour stocker l'énergie sous forme d'azote liquide par Nergitec France. L'azote liquide présente une densité énergétique plus importante que l'air comprimé pour un coût de stockage moins élevé. En effet, l'air comprimé demande de grandes quantités de fibres de carbone pour que les réservoirs puissent résister à la pression alors que l'azote liquide peut être stocké à une pression proche de la pression atmosphérique.

L'azote est produit à partir de l'air grâce à du charbon dont la taille des pores est égale à la taille de la molécule d'oxygène ; l'air traverse le charbon qui capte l'oxygène, il en ressort de l'azote ; lorsque le charbon est saturé d'oxygène, un coup d'air comprimé nettoie le charbon pour recommencer le cycle indéfiniment. Il est vrai que la production de l'azote à partir de l'air consomme un peu d'énergie, mais elle permet le stockage d'énergie renouvelable. En effet, au printemps et en été, la production d'énergie solaire dépasse la demande. L'azote liquide permet de stocker de grandes quantités d'énergie à un coût énergétique et économique moins élevé que ceux des autres modes de stockage [18].

A. applications

A-1- Dans le domaine industriel

L'azote liquide est utilisé pour :

- Le recyclage des métaux (distinction métaux ferreux et non ferreux) ;
- La réfrigération en électronique lors d'essais climatiques ou pour refroidir certains détecteurs (voir analyse dispersive en énergie), ainsi que des instruments sensibles au bruit de fond dû à l'agitation thermique tels les caméras ccd des télescopes en astronomie ;
- La congélation des sols, pour la construction d'ouvrages de travaux publics.
- Le fretage de composants industriels

A-2- Dans le domaine des transports

L'azote liquide est un rejet de la fabrication de l'oxygène liquide et est assez bon marché. Quelques chercheurs ont développé l'idée de l'utiliser comme source d'énergie pour mouvoir un véhicule par simple détente dans un cylindre.

A-3- Dans le domaine informatique

L'azote liquide est également utilisé pour refroidir des processeurs de manière extrême (extremcooling) afin de réaliser des records d'overclocking.

A-4- Dans le domaine médical

On utilise l'azote liquide dans le domaine médical pour le traitement de verrues, de tumeurs (bénignes ou malignes : cancer de la peau), la conservation de tissus, d'ovules, d'embryons, de sperme ou de moelle osseuse.

Chaque type de cellules doit être congelée avec une vitesse de refroidissement particulière. C'est pourquoi les chercheurs ne sont pas encore parvenus à congeler des organes entiers, constitués de multiples tissus cellulaires, sans les détruire.

II-2-1-4- L'Oxy-hydrogène

Il s'agit d'un mélange d'oxygène et d'hydrogène qui, lorsqu'il est allumé, produit de la vapeur à haute pression et à haute température qui peut être utilisée pour produire de l'électricité.

II-2-2-Stockage électrochimique de l'énergie

Ce mode de stockage nous conduit à évoquer essentiellement les batteries. Les batteries (ou accumulateurs) sont des systèmes électrochimiques, qui stockent de l'énergie sous forme chimique et la restituent sous forme électrique. Les batteries peuvent être électriquement rechargées contrairement aux piles. Le courant est produit par la circulation d'électrons entre 2 électrodes :

- Une électrode positive composée d'un corps oxydant, capable d'attirer des électrons.

- Une électrode négative composée d'un corps réducteur, capable de céder des électrons.

Ainsi, une batterie se caractérise par un couple « oxydant-réducteur » (par exemple : plomb-oxyde de plomb, nickel-cadmium...) échangeant des électrons. Les deux électrodes (ou plaques) baignent dans une solution électrolytique (ou électrolyte). C'est la réaction entre la solution et les électrodes qui est à l'origine du déplacement des électrons et des ions dans la solution produisant ainsi du courant électrique. Utilisées comme réserves massives d'énergie, les batteries peuvent délivrer une puissance pendant quelques heures ou quelques jours. Elles peuvent résister à un certain nombre de cycles charge/décharge.

II-2-2-1 - les batteries

Les progrès enregistrés depuis 20 ans dans le domaine des batteries ont largement contribué à l'essor de la révolution numérique que nous connaissons aujourd'hui.

Combinés au développement rapide des nanotechnologies, ils ont permis la propagation à grande échelle des smartphones, des tablettes et maintenant des objets communicants.

L'apparition de la batterie Lithium-ion a joué un rôle primordial dans ce processus. Ces dernières années, accélérées en grande partie par le défi du véhicule électrique, des augmentations considérables de performances ont été réalisées.

Des efforts de recherche importants sont déployés dans le monde y compris en ce qui concerne leur bilan environnemental global tout au long de leur cycle de vie, de l'approvisionnement en matière première jusqu'au recyclage.

Les marchés anticipent une baisse importante des coûts dans les cinq ans qui viennent ainsi que l'apparition d'innovations technologiques prometteuses.

A. *Les batteries et le stockage stationnaire*

Comparées aux STEP ou aux CAES, l'un des avantages majeurs des batteries est leur versatilité. Elles peuvent être dimensionnées pour s'adapter à des besoins diversifiés en termes de puissance, d'énergie ou de taille. Elles peuvent ainsi être intégrées partout à une échelle centralisée comme à une échelle décentralisée.

Elles peuvent fonctionner à différents niveaux : stockage résidentiel (pour une maison ou un groupe de maisons), stockage pour une résidence, un quartier, ou pour le soutien à un réseau (dans des zones non interconnectées par exemple) jusqu'au stockage massif sur de gros réseaux (plusieurs mégawatt/heures).

Aujourd'hui, l'objectif est de réduire les coûts d'achat, de fonctionnement et de maintenance est un des axes prioritaires de tous les opérateurs.

L'utilisation des batteries pour le stockage de puissance correspond à plusieurs fonctions.

La première est bien évidemment d'assurer la permanence d'alimentation du réseau. Mais elles peuvent également être utilisées pour absorber des pics de consommations de très faible durée ou pour contrer très rapidement un risque de déséquilibre du réseau induit par un incident.

Pour le stockage stationnaire, les batteries au sodium sont encore utilisées. Deux variantes technologiquement avancées sont testées sur de grands projets. Il s'agit de batteries sodium/soufre ou sodium/chlorure de nickel.

Des batteries lithium-ion fonctionnant sur les mêmes principes que celles présentes sur nos téléphones mobiles servent également pour le stockage stationnaire.

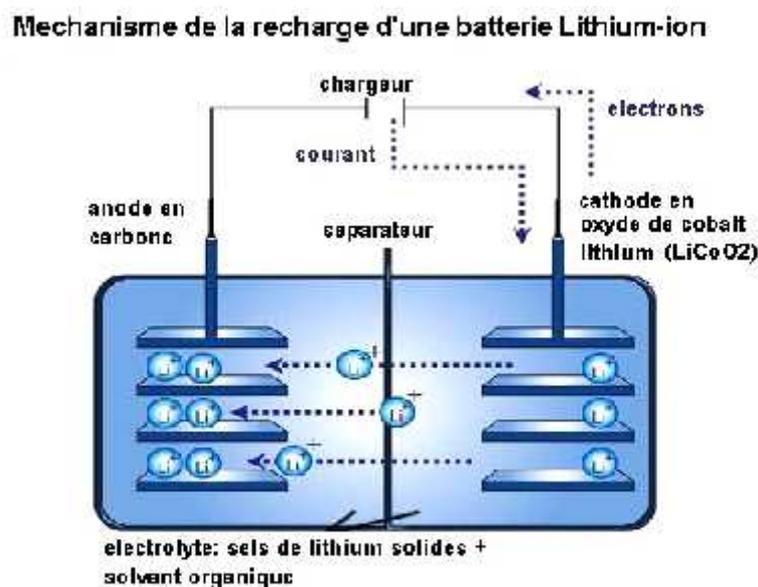


Figure II.1. Recharge d'une batterie lithium-ion

Des recherches de rupture ont pour objet la mise au point de batteries métal/air. Il s'agit de batteries constituées d'anodes métalliques (pôle négatif) et de cathodes à oxygène (pôle positif).

La source d'oxygène est généralement l'air ambiant. Elles peuvent s'apparenter à une classe particulière de piles à combustible puisque l'élément oxydant - l'oxygène de l'air - est approvisionné en continu.

De même, la pile métal/air nécessite la présence d'éléments périphériques pour la circulation des fluides (air ou électrolyte).

Les travaux se déploient notamment sur les batteries zinc/air. Des programmes de développement et de pré industrialisation sont à l'étude, L'objectif est d'obtenir à l'horizon 2020 une division par 3 du coût des batteries.

La mise au point de batteries lithium-air n'est pas envisagée avant 2025/2030. Elle pourrait constituer une avancée majeure en termes de performance et de coût du kWh.

A-1- Les objectifs du stockage stationnaire

L'un des objectifs du stockage stationnaire est de permettre aux énergies renouvelables de déployer tout leur potentiel d'efficacité au service de la satisfaction des besoins électriques et énergétiques des particuliers, des entreprises, des territoires, des administrations et services publics. Dans cette optique, il s'agit d'éviter de perdre de l'électricité produite quand la production est supérieure à la demande. À l'inverse, il s'agit d'assurer la permanence de l'alimentation quand la demande est forte alors qu'une partie des équipements solaires ou éoliens ne produit pas. Le stockage a ainsi pour objectifs :

- De rationaliser l'utilisation des productions intermittentes.
- De lisser l'équilibre demande/production et ainsi de contribuer à la stabilité du réseau électrique.
- D'assurer une fiabilité forte aux moyens renouvelables qui fonctionnent hors réseau ;
- De conférer aux énergies renouvelables une place plus importante dans le mix électrique.

Comme nous l'avons pointé en introduction, le stockage n'est pas la solution exclusive à ces différents problèmes.

La lutte contre les gâchis passe également par un effort ambitieux et cohérent visant à améliorer l'efficacité énergétique des logements, des transports de l'appareil industriel comme des produits de grande diffusion.

Elle passe aussi par des évolutions de comportements dans l'optique de mieux maîtriser les consommations.

Elle peut également être assurée par le développement des outils numériques de pilotage intelligent (smart grids) qui pourraient contribuer à rationaliser les consommations, à faire baisser la demande tout en assurant le même niveau de satisfaction des besoins, ou encore à déplacer automatiquement des consommations vers les périodes de forte production des EnR.

Dans ce contexte, le renforcement des réseaux et le déploiement des compteurs communicants sont une voie pour une intégration accrue de ces dernières dans le mix électrique.

Nous estimons que ces différentes approches sont complémentaires dans la perspective de la réponse au défi climatique.

Des calculs précis portant sur le montant des investissements à réaliser, sur les coûts d'exploitation, sur les durées d'utilisation, sur les bénéfices en termes d'emploi et d'environnement, sur le prix des émissions de CO₂ évitées, ainsi que sur l'économie globale de l'équilibre production/consommation sont indispensables pour comparer et choisir la solution optimale parmi les différentes options possibles.

Ces calculs sont complexifiés par le fait qu'ils s'appliquent à des domaines en profondes et rapides mutations avec des technologies en pleine évolution, y compris du point de vue de leur maturité économique.

A-2- Les batteries pour la mobilité

L'électrification du parc automobile est considérée comme un enjeu tellement important par les constructeurs automobiles qu'ils ont investi des sommes considérables pour ne pas se laisser distancer dans la mutation en cours.

À titre d'exemples, Audi a investi onze milliards d'euros dans son programme de recherches/développement.

Celui de General Motors s'élève à vingt milliards de dollars. Quant à Renault, il a fait de sa présence dans le véhicule électrique un axe stratégique de premier plan.

Plus globalement, les données du problème sont connues. Pour une part essentielle, les obstacles à surmonter concernent l'autonomie des véhicules (se situant actuellement autour de 160 km) et le temps de chargement des batteries (allant de 6 heures à 20 minutes pour les - encore trop rares - bornes de rechargement rapide). Les batteries sont donc aujourd'hui au coeur de la question. L'une de leurs principales limites actuelles est celle de la densité énergétique massique 200 Wh/kg

pour une batterie au lithium contre 10 kWh/ kg pour les hydrocarbures. Ces performances devraient néanmoins s'améliorer dans les dix ans à venir.

Les batteries au plomb restent encore très présentes dans les véhicules thermiques, pour le démarrage notamment. Les véhicules hybrides utilisent encore beaucoup les batteries nickel métal hydrures mais la technologie lithium-ion est en train de prendre progressivement l'ascendant. En effet, elles présentent actuellement les performances électriques les plus élevées concernant les densités d'énergie, le nombre de cycles charge/ décharge, l'autodécharge la plus faible.

Sur les véhicules « tout électrique », le lithium-ion domine mais d'autres technologies coexistent avec lui. À titre d'exemple, les véhicules Autolib du groupe Bolloré sont équipés de batteries métal/polymère qui présentent de bonnes performances mais doivent fonctionner à une température de 80.

La technologie lithium-ion est à peu près au milieu de sa maturité technologique. Elle devrait pouvoir obtenir un doublement de l'autonomie. Puis elle atteindra probablement ses limites. Ses pistes de développement se situent notamment vers les matériaux à base de phosphate de fer pour l'électrode positive qui confèrent une sécurité intrinsèque très élevée aux batteries ou vers le lithium-souffre [19].

L'amélioration des techniques d'impression 3D des électrodes semble également une voie prometteuse.

À plus long terme, les technologies lithium-air évoquées précédemment pourraient changer la donne. D'ici 2020-2030, elles pourraient lever le verrou de l'autonomie des véhicules électriques en autorisant 500 km avec une seule charge. Rappelons que cette technologie combine en quelque sorte batterie et pile à combustible.

A-2- Les objectifs du stockage en matière de mobilité

La rapidité de la croissance du parc automobile dans les pays émergents, avec le risque d'une explosion des rejets de CO₂ qui rendrait la situation intenable, montre clairement l'urgence de mettre au point rapidement des modes de propulsion permettant de faire décroître substantiellement l'utilisation des produits pétroliers.

Sous ses différentes formes, la propulsion électrique semble une des voies appropriées pour y parvenir à la condition, bien sûr, que l'électricité utilisée pour recharger les véhicules soit largement décarbonnée.

Le stockage de l'énergie électrique est impératif dans toutes les technologies aujourd'hui sur le marché, des batteries à l'utilisation de l'hydrogène en passant par les moteurs hybrides ou les prolongateurs d'autonomie.

II-2-2-2 - Pile à combustible

Les piles à combustible sont des générateurs d'électricité qui transforment l'énergie d'une réaction chimique en courant électrique de façon continue.

A- Pile à combustible à hydrogène

Le fonctionnement d'une pile dihydrogène-dioxygène est particulièrement propre puisqu'il ne produit que de l'eau et consomme uniquement des gaz.

Mais la fabrication de ces piles était très coûteuse, notamment à cause de la quantité non négligeable de platine nécessaire et au coût des membranes échangeuses d'ions .

B-Principe de fonctionnement

Le principe de la pile à combustible est l'inverse d'une électrolyse. La réaction chimique produite par l'oxydation et la rencontre de gaz produit de l'électricité, de l'eau et de la chaleur.

Le fonctionnement de la pile à combustible nécessite un approvisionnement en combustible, le plus utilisé étant l'hydrogène.

Une pile à combustible produit une tension électrique d'environ 0,7 à 0,8 volt¹¹, selon la charge (densité de courant) et produit de la chaleur. Leur température de fonctionnement varie de 60 à 200 °C selon les modèles. L'eau est généralement évacuée sous forme de vapeur avec l'excédent de dioxygène. Il existe plusieurs types de piles à combustibles dont les plus connues sont :

- La pile à membrane échangeuse de protons,
- La pile à oxyde solide.

C- La pile à membrane échangeuse de protons

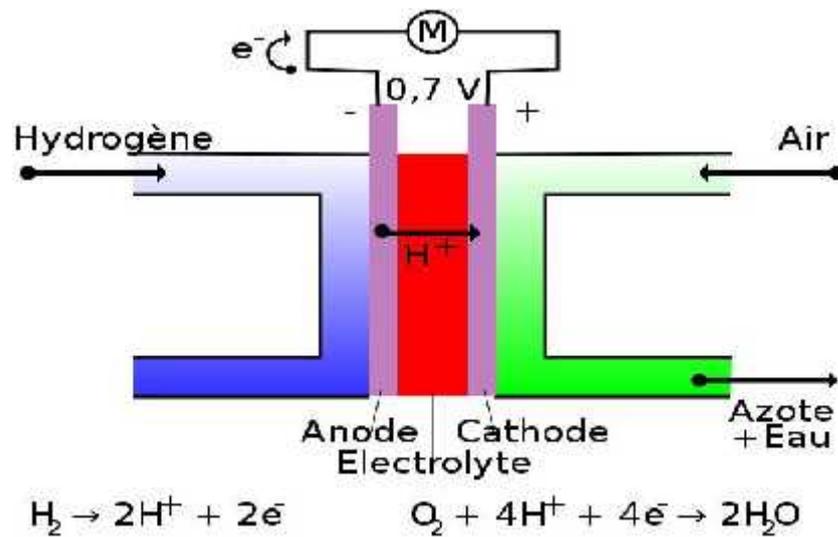


Figure II.2. Une pile à combustible à membrane échangeuse de protons

Une pile à combustible à membrane échangeuse de protons comporte :

1. Deux plaques bipolaires :
 - Une pour distribuer l'hydrogène,
 - Une autre pour distribuer l'oxygène et évacuer l'eau,
2. Deux électrodes : une anode et une cathode pour faire circuler le courant électrique (électrons),
3. Une membrane échangeuse de protons faisant fonction d'électrolyte : elle bloque le passage des électrons et laisse passer les ions H^+
4. Des catalyseurs (platine) : accélèrent les réactions entre les gaz.

L'hydrogène (provenant d'une électrolyse ou d'un reformage d'hydrocarbures) entre par la plaque bipolaire gauche.

Arrivé à l'anode, le dihydrogène (H_2) se dissocie (oxydation) en protons et en électrons selon : $2H_2 = 4H^+ + 4e^-$. Les protons traversent alors la membrane, mais les électrons, bloqués, sont contraints d'emprunter un circuit extérieur, ce qui va générer un courant électrique.

À la cathode, les protons, les électrons, et du dioxygène (pur ou provenant de l'air) se rencontrent pour former de l'eau selon : $4H^+ + 4e^- + O_2 = 2H_2O$. L'eau et le dioxygène passent par la plaque bipolaire droite. Cette réaction va produire également de la chaleur pouvant être récupérée.

D- La pile à oxyde solide

Le principe est similaire. La seule différence est que la membrane échangeuse de protons est remplacée par une autre membrane appelée "membrane à oxyde solide" [20]. Les molécules dans la pile à combustible ne vont alors pas réagir de la même façon :

- Dans un premier temps, l'hydrogène entre par la plaque bipolaire gauche et arrive sur l'anode.
- Là, l'hydrogène se dissocie : $2H_2 = 4H^+ + 4e^-$ (jusque-là, aucun changement).
- Les électrons (e^-) empruntent un circuit extérieur, mais les ions H^+ (protons), au lieu de traverser la membrane, restent sur l'électrode.
- Après avoir traversé les dipôles, les électrons rejoignent la cathode chargée en dioxygène. Les deux molécules vont former un assemblage d'anions appelés ions oxyde (O^{2-}) : $O_2 + 4e^- \rightarrow 2 O^{2-}$.
- Les ions O^{2-} traversent la membrane et se combinent avec les ions H^+ pour former de l'eau selon : $4H^+ + 2O^{2-} = 2H_2O$
- Mais ce type de pile n'est pas plus performant que la pile à membrane échangeuse de protons, elle ne fonctionne qu'à "très haute" température (autour de 600 à 800 °C) et sa fabrication coûte plus cher pour des piles de faible puissance.

Elles sont donc réservées à des applications spécifiques nécessitant une forte puissance.

E- Pile à combustible au méthanol

Il existe deux types de piles à combustible au méthanol :

- Les piles RMFC (Reformed Methanol Fuel Cell) : dans ces piles, le méthanol est reformé pour produire l'hydrogène qui alimentera la pile.

- Les piles DMFC (Direct Methanol Fuel Cell) : dans ces piles, le méthanol est directement oxydé dans le cœur de la pile et ne nécessite pas d'être reformé.
- Contrairement aux piles utilisant l'hydrogène, celles-ci ne sont pas "propres" car elles rejettent du CO₂ et même du CO.

II-2-2-3- Applications et perspectives

A- Applications

Les principaux champs d'applications pour les piles à combustible sont :

A-1- Les transports

Les piles à combustible alimentées à l'hydrogène sont utilisées pour alimenter plusieurs prototypes de voitures électriques et de bus électriques

A-2- La cogénération

Des systèmes de cogénérations de petite puissance (mini-cogénération) sont développés, notamment en Europe, et sont à un stade de démonstration.

A-3- Cogénération domestique ou micro-cogénération

Des appareils de chauffage domestiques intégrant une pile à combustible de 750 W, appelés ENE-FARM.

B- Perspectives

Les piles à combustible sont envisagées pour alimenter divers appareils nomades, tels que des téléphones ou des ordinateurs portables.

La viabilité industrielle se heurte encore à un rendement énergétique global assez faible compte tenu du fait que chaque étape (synthèse de l'hydrogène, séchage du gaz, stockage,

vaporisation, rendement des réactions électrochimiques de la pile, circulation des fluides, régulation thermique, maintenance, récupération du platine, etc.) contribue à un rendement global encore décevant.

Des chercheurs ont atteint un rendement de 56 % pendant plusieurs centaines d'heures avec une pile de 3 kW.

C- Les nombreux avantages des piles à combustible

- Par rapport aux accumulateurs rechargeables, la pile à combustible (PAC) s'est renforcée ces dernières années comme une alternative séduisante. Le principe, connu depuis des lustres, est presque trop beau pour être vrai. De l'hydrogène, combiné à l'oxygène de l'air ambiant, produit du courant capable d'alimenter le moteur d'un véhicule. En lieu et place des gaz d'échappement des moteurs à combustion interne, les résidus sont de l'eau et un peu de chaleur.
- Taux d'émission théorique en CO₂ et autres polluants nuisibles à l'environnement et à la santé : zéro. Ces piles cumulent deux autres avantages appréciables : un haut rendement énergétique et l'absence de nuisances sonores.

II-2-3- Stockage électrique

Il s'agit des condensateurs et des supercondensateurs. Les condensateurs sont des composants électroniques dont la capacité se mesure à l'échelle du microfarad. Ils sont présents dans tous nos appareils électroniques.

Leurs champs d'application se situent pour l'essentiel en dehors des limites de notre saisine.

Il n'en est pas de même des supercondensateurs. Leur capacité s'évalue en dizaines voire en milliers de Farad, ce qui les rend comparables aux batteries.

Mais, dans les conditions actuelles, les supercondensateurs interviennent plutôt en puissance (pour délivrer du courant de manière instantanée) qu'en énergie.

Ils peuvent donc représenter un complément intéressant des batteries. La combinaison batterie/super-condensateur peut s'avérer particulièrement efficace dans le cas des véhicules hybrides.

II-2-3-1 - Le condensateur et le supercondensateur

A- Le super-condensateur

Un **super-condensateur** est un condensateur de technique particulière permettant d'obtenir une densité de puissance et une densité d'énergie intermédiaire entre les batteries et les condensateurs électrolytiques classiques.

Montés en série-parallèle de plusieurs cellules, ils permettent une tension et un courant de sortie élevés (densité de puissance de l'ordre de plusieurs kW/kg) et stockent une quantité d'énergie intermédiaire entre les deux modes de stockage cités ci-dessus, et peuvent la restituer plus rapidement qu'une batterie [21].

Ils sont donc souvent utilisés comme élément de stockage d'appoint d'énergie, en complément à des batteries ou à une pile à combustible. Ils présentent notamment l'intérêt d'être efficace par très faible température. Un supercondensateur est principalement constituée de collecteurs de courant (généralement en aluminium), d'électrodes (une anode et une cathode généralement en charbon actif imprégné dans un électrolyte organique ou aqueux et d'un séparateur qui isole les deux électrodes l'une de l'autre

B- Principe de fonctionnement

Majoritairement les super-condensateurs commercialisés sont réalisés selon le procédé double couche électrochimique d'où le sigle anglo-axon EDLC (electrochemical double layer capacitor).

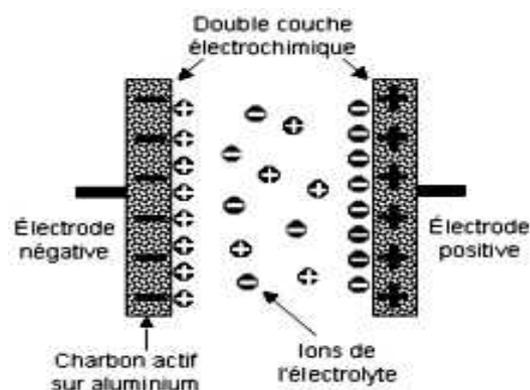


Figure II.3. Condensateur électrolytique double couche.

Le super-condensateur est constitué de deux électrodes poreuses, généralement en charbon actif et imprégnées d'électrolyte, qui sont séparées par une membrane isolante et poreuse (pour assurer la conduction ionique).

La couche double électrique se développe sur chaque interface électrode-électrolyte, de sorte que l'on peut voir schématiquement un super-condensateur comme l'association de deux condensateurs en série, l'un à l'électrode positive et l'autre à l'électrode négative.

La mobilité des anions, beaucoup moins hydratés, est plus grande que celles des cations.

Ils se déplacent plus facilement dans la structure du charbon actif et forment une couche d'épaisseur plus faible, de sorte que l'on observe une valeur de capacité d'anode supérieure à celle de cathode. En raison des lois d'association des condensateurs, la capacité de l'ensemble en série est toujours inférieure à la plus faible de ces deux capacités.

C'est aussi pour cette raison que le super-condensateur est polarisé, chaque électrode étant optimisée soit pour des anions, soit pour des cations.

On sait que la capacité d'un condensateur est essentiellement déterminée par la géométrie des armatures (surface spécifique S et distance e) et de la nature du ou des isolants (le diélectrique). La formule suivante est souvent utilisée pour en estimer la valeur :

$$C = \varepsilon \frac{S}{e} \quad (\text{I.1})$$

Ici, les molécules de solvant organique jouent le rôle de diélectrique (de permittivité ε). Cela correspond à une faible épaisseur e d'isolant (inférieure au nanomètre) ce qui entraîne que la capacité par unité de surface de ces composants est élevée : de 0,1 à 0,3 F/m².

D'autre part, grâce à l'usage d'un dépôt de charbon actif sur un film en aluminium qui présente des surfaces spécifiques S typiques de 2 000 à 3 000 m² par gramme, la surface de contact entre électrode et électrolyte est immense, ce qui permet d'obtenir des valeurs de capacité considérables.

La tenue en tension est limitée par la décomposition du solvant organique. Elle est actuellement de l'ordre de 2,7 V.

C- Applications

Les applications incluent la voiture électrique (comme tampon d'énergie entre le variateur de vitesse et les batteries, ce qui peut aussi allonger la durée de vie de la batterie⁴), mais aussi tous les

cas de stockage d'énergie électrique avec des conditions climatiques extrêmes (par exemple : démarreur de locomotives, contrôle d'orientation des pales des éoliennes).

Les super-condensateurs sont de plus en plus utilisés pour récupérer l'énergie du freinage (système KERS).

Certaines voitures les utilisent pour alimenter leur système Stop & Start permettant un redémarrage automatique du moteur afin d'économiser du carburant.

Dans les courses automobiles d'endurance, Toyota utilise des super-condensateurs pour récupérer de l'énergie lors des freinages. Une fois le super-condensateur chargé, le pilote peut booster sa voiture grâce à la puissance du super-condensateur qui va alimenter le moteur électrique de la voiture hybride.

Les super-condensateurs sont particulièrement intéressants pour les autobus qui font des arrêts fréquents et qui peuvent être équipés de gros super-condensateurs pour récupérer l'énergie du freinage.

Autobus hybrides diesel/super-condensateur permettant d'économiser jusqu'à 30 % de carburant. Des autobus 100% électriques à super-condensateur. Ils se rechargent à chaque arrêt de bus à l'aide d'un pantographe (comme pour un tramway). 30 secondes suffisent pour recharger le bus à 50 % et il faut 80 secondes pour le recharger à 100 %. le département des transports publics de Shanghai a décidé de s'équiper de 200 bus électriques dotés à la fois d'une batterie et de super-condensateurs.

D- Le condensateur

Le **condensateur** est un composant électronique élémentaire, constitué de deux armatures conductrices (appelées « électrodes ») en influence totale et séparées par un isolant polarisable (ou « diélectrique »). Sa propriété principale est de pouvoir stocker des charges électriques opposées sur ses armatures.

La valeur absolue de ces charges est proportionnelle à la valeur absolue de la tension qui lui est appliquée. Le condensateur est caractérisé par le coefficient de proportionnalité entre charge et tension appelé capacité électrique et exprimée en farads (F). La relation caractéristique d'un condensateur idéal est :

$$i = C \frac{du}{dt} \quad (I.2)$$

Où :

- I est l'intensité du courant qui traverse le composant, exprimée en ampères (symbole : A) ;
- U est la tension aux bornes du composant, exprimée en volts (symbole : V) ;
- C est la capacité électrique du condensateur, exprimée en farads (symbole : F) ;
- $\frac{du}{dt}$ est la dérivée de la tension par rapport au temps.
- Les signes sont tels que l'électrode par laquelle entre le courant (dans le sens conventionnel du courant : + vers -) voit son potentiel augmenter.
- Le condensateur est utilisé principalement pour :
 - Stabiliser une alimentation électrique (il se décharge lors des chutes de tension et se charge lors des pics de tension) ;
 - Traiter des signaux périodiques (filtrage...) ;
 - Séparer le courant alternatif du courant continu, ce dernier étant bloqué par le condensateur ;

E- Loi de comportement du condensateur



Figure II.3. Symbole d'un condensateur non polarisé dans un circuit.

On définit la capacité par la relation :

$$Q = C \times U \quad (\text{I.3})$$

où :

- Q est la charge stockée sur sa borne positive et s'exprime en coulombs ;
- U est la tension aux bornes du composant.
- C est la capacité électrique du condensateur.

F- Expression algébrique de la loi de comportement du condensateur

$$Q_1 = C \times (V_1 - V_2) \quad (\text{I.4})$$

Les indices 1 et 2 repérant chacune des bornes. Q_k étant la charge de la borne k et V_k son potentiel électrique ($k = 1$ ou 2). La borne au potentiel le plus élevé (borne positive) est donc chargée positivement.

La charge « totale » d'un condensateur $Q_t = Q_1 + Q_2$ est donc nulle. Procédant par influence électrostatique, le courant « pénétrant » par une borne ressort à l'identique par l'autre borne, bien que les armatures soient séparées par un isolant.

Si l'on oriente la branche de circuit contenant le condensateur dans le sens : borne 1 borne 2, fixant ainsi le sens positif du courant i , on définit alors algébriquement la tension u dans le sens opposé (**convention récepteur**)

$$u = V_1 - V_2 \quad (\text{I.5})$$

Il devient alors possible de définir algébriquement une relation entre le courant circulant dans la branche et la dérivée temporelle de la tension :

$$= C \cdot \frac{du}{dt} i = \frac{dQ_1}{dt} \quad (\text{I.6})$$

La valeur de la tension aux bornes du condensateur en régime transitoire en fonction du temps pour un système du premier ordre est définie par la relation suivante:

$v(t) = V_\infty + (V_0 - V_\infty)e^{-t/\tau}$, V_0 est la tension initiale et V_∞ est la tension en régime permanent et τ est la constante de temps qui équivaut à :

$$\tau = R \cdot C \quad (\text{I.7})$$

Dans un circuit ayant un condensateur en série avec une résistance. En connaissant les valeurs de tension initiales et finales, on peut en déduire le temps t .

G- Énergie stockée - puissance échangée

Un condensateur stocke de l'énergie sous forme électrique. Cette énergie E (joules) s'exprime en fonction de sa capacité C (farads) et de sa charge q (coulombs) (ou de sa tension u) selon :

$$E = \frac{1}{2}Cu^2 = \frac{q^2}{2C} \quad (\text{I.8})$$

On remarque que cette énergie est toujours positive (ou nulle) et qu'elle croît comme le carré de la charge ou de la tension.

Ces propriétés sont analogues à celles de l'énergie cinétique d'une masse m animée d'une vitesse v .

H- Démonstration

La puissance électrique P reçue par le condensateur est :

$$P = \frac{d\left(C \times \frac{u^2}{2}\right)}{dt} = u \cdot C \frac{du}{dt} = u \times i, \quad (\text{I.9})$$

Qui est bien la dérivée de l'énergie annoncée précédemment (en convention récepteur).

Si la puissance est positive (puissance reçue) cette énergie augmente, le condensateur se charge. Inversement lorsque le condensateur se décharge, l'énergie diminue, la puissance est négative : elle est cédée par le condensateur au monde extérieur.

Il en résulte qu'il est difficile de faire varier rapidement la tension aux bornes d'un condensateur et ceci d'autant plus que, la valeur de sa **capacité** sera élevée. Cette propriété est souvent utilisée pour supprimer des variations de tension non désirées (filtrage).

Inversement, une décharge très rapide d'un condensateur dans une utilisation de faible résistance électrique est possible. Une énergie importante est délivrée dans un temps très court (donc avec une très forte puissance). Cette propriété est entre autres exploitée dans les flashes électroniques et dans les alimentations de lasers pulsés.

Il est préférable de parler de **puissance reçue** (ou cédée) plutôt que de **puissance consommée**.

Ce dernier qualificatif laisse à penser que la puissance reçue est « perdue » ou du moins dissipée. Ce qui est le cas d'une résistance qui « consomme » de la puissance électrique, toujours positive par effet Joule, la puissance Joule « consommée » s'écrivant :

$$P_J = R \times i^2, \quad (\text{I.10})$$

II-2-3-2 - Le supraconducteur au stockage de l'énergie magnétique

Le stockage magnétique à supraconducteur est appelé aussi SMES pour "en: Superconducting magnetic energy storage" (Stockage d'énergie magnétique par bobine supraconductrice).

Le SMES permet de disposer quasiment instantanément d'une grande quantité d'électricité, mais il ne pourra se généraliser tant que l'on n'arrivera pas à produire des aimants supraconducteurs performants, durables et moins coûteux. Il permet aujourd'hui, encore

expérimentalement, de stocker de l'énergie sous la forme d'un champ magnétique créé par la circulation d'un courant continu de très haute intensité dans un anneau supraconducteur refroidi sous sa température critique de transition vers l'état supraconducteur [22].

Le champ magnétique est généré par la circulation d'un courant électrique dans une bobine constituée d'un matériau supraconducteur et court-circuitée qui devait être refroidie à 4K, soit -269 °C dans les premiers modèles, mais aujourd'hui ont réussi à faire fonctionner des SMES à une température de $-253,15$ °C, rendant le refroidissement moins difficile, et le système plus léger et performant. Il suffit de connecter la bobine au réseau pour la décharger. Pour l'instant, le coût des équipements (et l'énergie requise pour la réfrigération) réservent ce type de stockage à des applications de hautes technologies, civiles ou militaires (lanceur électromagnétique...).

A- Principes

Un système SMES typique comprend trois parties :

1. Une bobine supraconductrice ;
2. Un système de conversion de l'énergie ;
3. Une réfrigération cryogénique.

Une fois la bobine supraconductrice chargée, le courant ne va pas diminuer et l'énergie magnétique peut être stockée indéfiniment.

L'énergie stockée peut être délivrée au réseau en déchargeant l'anneau. Le système de conversion de l'énergie utilise un onduleur/redresseur pour transformer le courant alternatif en courant continu ou convertir le continu en alternatif.

L'onduleur/redresseur génère 2 à 3 % des pertes d'énergie.

Les pertes du SMES sont les plus faibles comparés à d'autres techniques de stockage. Avec un rendement excédant 95 %¹, les systèmes SMES sont très efficaces, mais encore très coûteux.

B- Utilisations

En raison de l'énergie requise pour la réfrigération et à cause du coût des matériaux supraconducteurs, le SMES n'est utilisé que pour un stockage court et des applications de hautes-technologies.

La principale application visée est l'alimentation d'un canon électromagnétique à des fins militaires ou civiles.

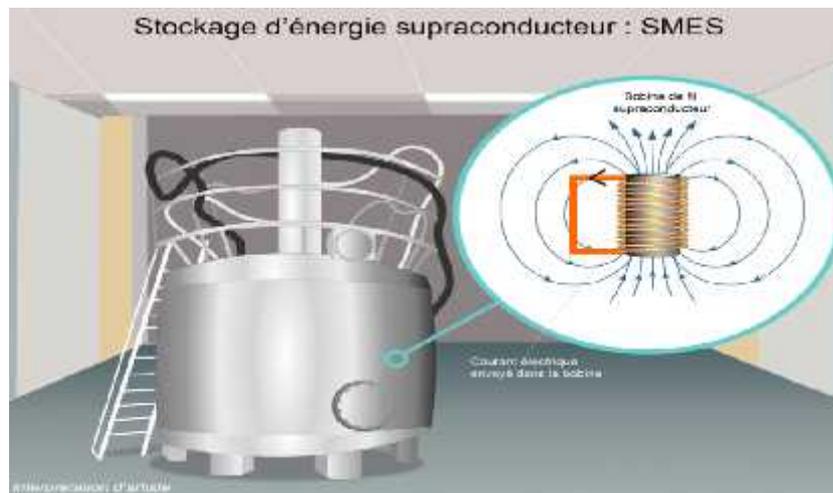


Figure II.4. Stockage d'énergie supraconducteur

II-2-4-Stockage thermique

L'énergie est stockée par élévation de la température du matériau de stockage choisi (briques, huile, sables, bétons, céramiques, etc.).

L'efficacité du système est fonction du temps de refroidissement du matériau de stockage ainsi que de l'isolation du dispositif.

Quelques installations existent déjà en Allemagne, en Norvège ou au Canada. Un projet de démonstrateur existe en région Rhône Alpes. Il s'agit du projet Sether (Stockage d'électricité sous

forme thermique) labellisé par le pôle Tenerrdis, coordonné par l'opérateur Powéo associé notamment à la Saipem (filiale de l'opérateur italien Eni) et auquel participe le CEA.

Notons également qu'il existe un vecteur de stockage thermique de masse dans notre pays constitué par les ballons d'eau chaude sanitaire électriques.

L'eau est chauffée pendant la nuit avec une électricité moins chère puisqu'elle est produite par des installations qui fonctionnent en base. La quantité d'électricité stockée sous forme de chaleur est considérable. Elle est estimée à 23 TWh/an par RTE.

II-2-4-1- Le réservoir d'eau chaude

Un réservoir d'eau qui stocke l'eau chaude pour le chauffage, le lavage, le bain, etc. Les réservoirs de stockage d'eau chaude sont utilisés dans les fours à bois et les capteurs solaires thermiques.

II-2-4-2- L'accumulateur de vapeur :

Un **accumulateur de vapeur** est un réservoir isolé thermiquement contenant de l'eau liquide et de la vapeur sous pression. C'est un moyen de stockage d'énergie.

Il peut être utilisé pour lisser les pics et les creux de la demande de vapeur. Les accumulateurs de vapeur peuvent être utilisés pour le stockage de l'énergie, sous forme thermique, dans les projets solaires.

A -Charge

L'accumulateur est à moitié rempli d'eau froide, puis la vapeur est insufflée à partir d'une chaudière par un tuyau dans le bas du réservoir. Une partie de la vapeur se condense, tout en chauffant l'eau liquide.

Le reste remplit l'espace au-dessus du niveau de l'eau. Lorsque l'accumulateur est complètement chargé, la vapeur condensée aura relevé le niveau d'eau dans le réservoir aux environs des trois quarts. La température et la pression auront également augmentés.

B- Décharge

La vapeur peut être soutirée au besoin, soit pour actionner une turbine à vapeur ou pour un processus (par exemple en génie chimique), en ouvrant une vanne de vapeur sur le dessus de l'accumulateur.

La pression dans le réservoir va avoir tendance à décroître, mais cette baisse de pression entraîne l'ébullition de l'eau liquide, si bien que l'accumulateur peut continuer à fournir de la vapeur (la pression et de température décroissant progressivement) pendant un certain temps avant de devoir être rechargé.

II-2-5- Stockage mécanique

C'est un élément pratiquement obligatoire dans tous les moteurs, sous forme de volant d'inertie, pour réguler le mouvement à des échelles de temps très courtes, inférieures à la seconde.

Il n'est pratiquement pas utilisé pour le stockage à long terme, car les quantités d'énergie stockées sont très faibles (ainsi une automobile d'une tonne lancée à 150 km/h ne représente que 860kJ, soit moins de 1/4 kWh !), mais a été utilisé en Formule 1 pour un gain ponctuel mais instantané de puissance.

II-2-5-1-Accumulateur hydraulique

Un **accumulateur hydraulique**, ou **accumulateur de pression hydraulique**, est un réservoir sous pression de gaz pouvant contenir un volume variable d'un liquide sous pression, utilisé pour fournir un débit important pendant un temps assez court, mais aussi un petit débit, tant qu'il reste de la pression.

- Applications

Un tel appareil est dit **accumulateur oléohydraulique** lorsqu'il est inclus dans des circuits « hydrauliques » fonctionnant avec de l'huile (spéciale pour l'hydraulique). Le gaz sous pression est alors de l'azote. L'énergie stockée dans un tel appareil est donnée par la formule :

Avec :

- E : Énergie en joules,
- P : Pression en pascals. La pression est en valeur absolue.

- V : Volume en mètres cubes).

En fonction de l'utilisation, stockage d'énergie ou amortisseur de pulsation, on utilisera les lois de comportement suivantes :

- Isotherme : Les échanges de chaleur sont possibles. Dans ce cas l'accumulateur est utilisé en réserve d'énergie.
- Adiabatique : La décharge et la recharge de l'accumulateur sont rapides et les échanges de chaleur sont difficiles. Dans ce cas la formule de calcul utilisée est : $E = P.V$ avec $\gamma = 1,4$ pour l'azote.

II-2-5-2-Volant d'inertie

Un **volant d'inertie** est, dans une machine tournante, une masse (disque, anneau, cylindre, éventuellement couplés en un système contrarotatif...) liée à la partie animée d'un mouvement de rotation, répartie autour de l'axe de telle sorte qu'elle confère à l'ensemble une plus grande inertie en rotation, dans le but de rendre plus régulier le régime de fonctionnement, en s'opposant aux à-coups dus au moteur entraînant le dispositif ou au récepteur consommant l'énergie transmise.

Le volant d'inertie, simple ou double, peut jouer le rôle de stockeur cinétique car son principe repose sur le stockage et la restitution d'énergie cinétique.

Sa caractéristique physique est le moment d'inertie qui exprime la répartition des masses autour de l'axe.

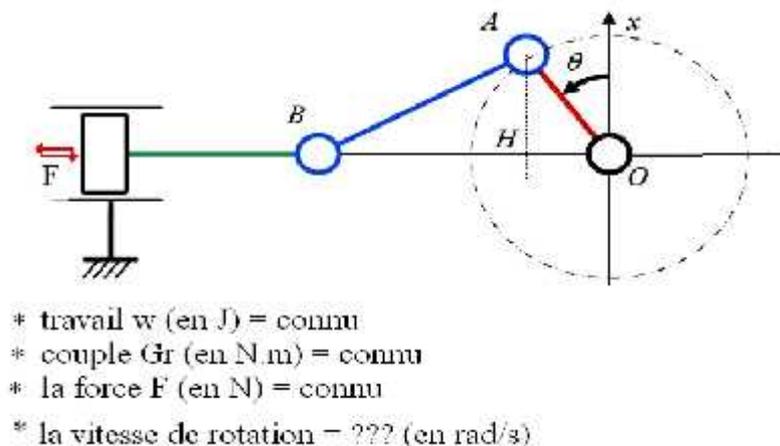


Figure II.5. Le volant d'inertie

A- Perturbations liées au moteur

Par exemple, dans les moteurs thermiques, le volant d'inertie — souvent associé à la couronne de démarreur et à l'embrayage — absorbe l'irrégularité du couple moteur entraîné par à-coups par les pistons. L'ajout du volant d'inertie permet alors de diminuer les vibrations.

De plus, le volant d'inertie peut emmagasiner un excédent d'énergie sur la phase motrice (explosion), pour l'utiliser dans le franchissement du point mort (compression).

Le phénomène est d'autant plus perceptible que le nombre de pistons est faible et que le régime de fonctionnement est bas.

La centrale électrique d'une usine, au début du XX^e siècle : au fond, la machine à vapeur entraîne, par l'intermédiaire du volant d'inertie (à l'angle), une dynamo (à droite du cliché). Le volant permet d'amortir le fonctionnement par nature irrégulier de la machine à vapeur.

B- Perturbations liées au récepteur

Les concasseurs, pour fabriquer du gravier, sont entraînés par des moteurs électriques dont le fonctionnement est très régulier. Cependant, les rochers broyés imposent en fonction de leur taille ou de leur forme des contraintes soudaines et violentes qui pourraient faire caler le moteur.

L'énergie cinétique stockée dans le volant permet le passage des points durs rencontrés par le concasseur.

C- Stockage d'énergie par le volant d'inertie

Le volant d'inertie tournant autour d'un axe fixe a l'avantage de rester globalement à la même place et donc occupe peu d'espace. En lui donnant de la vitesse, on lui fournit de l'énergie qu'il est possible de récupérer lors du ralentissement du volant.

Les volants d'inertie (et les batteries) seront nécessaires pour « un stockage d'électricité très réactif en métropole, dédié à la fourniture de réserve primaire (grâce à des modifications réglementaires), qui permettrait une économie pour la collectivité de 250 à 450 k€MW/an installé (...) La projection du coût d'investissement à horizon 2030, pour 1/2 heure de stockage, est estimée à 180 k€MW/an pour des volants d'inertie (avec une hypothèse d'amortissement de 20 ans) et à 80 k€MW/an pour une batterie Li-Ion (avec une hypothèse d'amortissement de 10 ans) ».

Le procédé peut poser, pour les installations mobiles, un problème du fait du comportement gyroscopique du volant qui lorsqu'il tourne à grande vitesse, impose des efforts énormes sur les paliers.

Pour cette raison, lors de la fabrication d'un volant d'inertie, il faut faire en sorte que le volant tourne au maximum à 70/80 % de sa vitesse maximale. De plus, le choix du matériau est déterminé par sa résistance et sa vitesse périphérique maximale.

Des volants d'inertie en béton - matériau qui ne se prête a priori pas à cet usage étant donné sa faible résistance en traction, le béton employé ici est un béton fibré.

II-3- Conclusion

Le stockage d'énergie répond à trois motivations principales :

- Sécurisation de l'approvisionnement en énergie d'un pays ou d'un groupe de pays.
- Ajustement de la production d'énergie en fonction de la demande.
- Compensation de l'irrégularité de la production des énergies dites intermittentes.

Chapitre III. Le stockage d'air Comprimé

III-1- Introduction

Le stockage souterrain d'air comprimé (CAES) fait partie des principales solutions de stockage stationnaire de l'énergie électrique à très grande échelle, avec les Stations de Transfert d'Énergie par Pompage (STEP) et les stockages souterrains d'hydrogène. Appelés également stockages d'électricité de masse, ces types de stockages ont des capacités de production de plusieurs dizaines à plusieurs centaines de MWh.

III-2- Définition de l'air comprimé

L'air comprimé est une forme d'énergie emmagasinée qui sert à faire fonctionner des machines, des équipements ou des procédés industriels. L'air comprimé est utilisé dans la plupart des industries de fabrication et dans certaines industries de services, notamment dans les cas où l'utilisation directe de l'électricité pour alimenter des outils ou des appareils se révèle peu pratique, voire dangereuse.

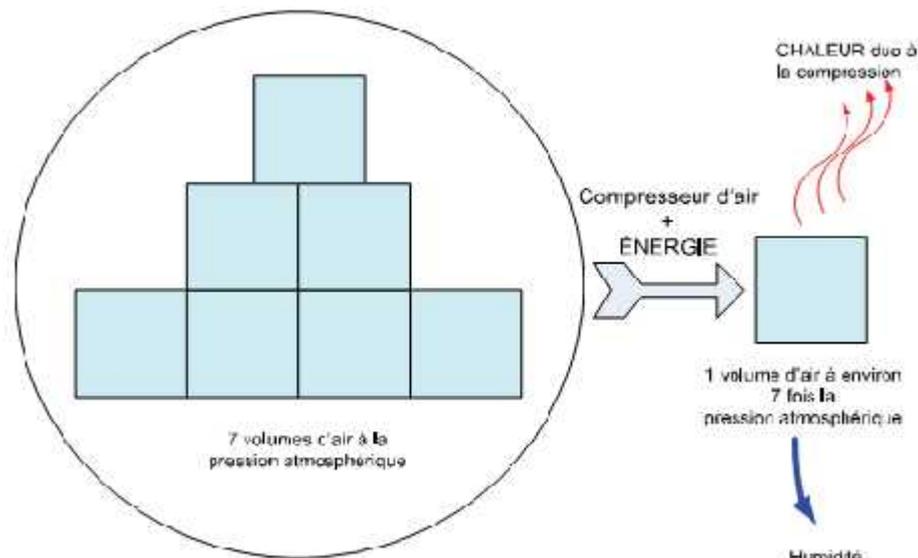


Figure III.1. Conversion de l'air atmosphérique en air comprimé

III-3- Systèmes d'air comprimé

Les systèmes d'air comprimé se composent de plusieurs sous-systèmes et composants principaux. Les systèmes d'air comprimé peuvent également être subdivisés en deux parties : le côté production et le côté consommation.

A. Le côté production

Il comprend les compresseurs, le traitement de l'air et les installations de stockage primaire. Un système bien géré va produire de l'air propre, sec et stable, délivré à la pression voulue de façon fiable et économique. Les principaux sous-systèmes de production d'air comprimé incluent normalement la prise d'air, le compresseur d'air (à vitesse fixe et/ou à vitesse variable), le refroidisseur de sortie, le moteur, les dispositifs de régulation, les équipements de traitement de l'air et les accessoires. Les dispositifs de régulation servent à régler la quantité d'air comprimé à produire pour maintenir une pression constante dans le système et gérer les interactions entre les divers composants du système. Les filtres à air et les sécheurs d'air éliminent l'humidité, l'huile et les impuretés de l'air comprimé. Le stockage de l'air comprimé (réservoirs humides et réservoirs secs) sert également à améliorer le rendement et la stabilité du système. L'eau accumulée est évacuée par des purgeurs de type manuel ou automatique. Les régulateurs de pression permettent de maintenir une pression constante dans un dispositif final d'utilisation [23-24].

B. Le côté consommation

Il inclut les tuyauteries de distribution, les stockages secondaires et les appareils d'utilisation. Un système de consommation bien géré minimise les différences de pression, diminue les pertes d'air dues aux fuites et aux dispositifs de purge, et procure l'air comprimé aux appareils et applications appropriés. Les tuyauteries de distribution acheminent l'air comprimé du compresseur aux points d'utilisation finale. On utilise également à des réservoirs d'air comprimé côté consommation afin d'améliorer la stabilité de la pression du système.

Comme règle empirique, pour chaque cheval-vapeur (HP) de puissance nominale, un compresseur d'air va produire environ 4 pieds cubes normaux par minute (pcnm).

Un schéma simplifié montrant comment sont raccordées les principales composantes d'un système d'air comprimé.

III-4-Types de compresseurs

III-4-1-Compresseur à piston

Ce type de compresseur est très répandu. Il est relativement bon marché et fonctionne à l'électricité. Il faut néanmoins être prudent car ce type de compresseur ne supporte pas les infiltrations de fluide à l'état liquide et ne supporte que du fluide à l'état gazeux.

Du fait de sa sensibilité aux coups de liquide, ce type de compresseur est impossible à utiliser dans des cas d'inversion de cycle. Le compresseur à piston fonctionne par aspiration/refoulement.

Un inconvénient majeur de ce mode de fonctionnement est son niveau sonore. En effet, le mouvement des pistons est assez bruyant et risque parfois de faire bouger le compresseur s'il n'est pas solidement fixé. C'est pourquoi on monte souvent ce type de compresseur sur des ressorts. Un autre inconvénient est la présence de pertes par frottements au niveau des pistons [25].

Un compresseur à piston peut être raccordé de manière ouverte, semi hermétique ou hermétique. Sa gamme de puissance s'étend de quelque KW à plus de 1000KW. Les compresseurs à pistons ne sont modulants que pour des moyennes et grandes puissances (à partir de 50 KW). Pour des petites puissances, ils ne fonctionnent que sous des régimes tout ou rien.

III-4-2- Compresseur rotatif

Le principe de ce type de compresseur est de disposer un rotor cylindrique excentré dans un stator cylindrique. On a ensuite affaire à 2 sous-types.

Ces types de compresseur sont utilisés pour des petites puissances (pas plus de 10KW). Leurs principaux avantages sont leur prix et leur simplicité de fonctionnement qui leur permettent de limiter les pertes par frottement ce qui leur confèrent un bon rendement.

La vitesse de rotation peut-être variable pour moduler le débit du fluide et donc la puissance thermique de la machine.

Ils ne sont cependant pas adaptées à travailler à de hautes températures de condensation. On peut donc généraliser en disant qu'ils sont plus performants que les compresseurs à piston mais qu'ils sont aussi moins performants et moins flexibles, bien que meilleurs marchés par rapport aux compresseurs à piston [26].

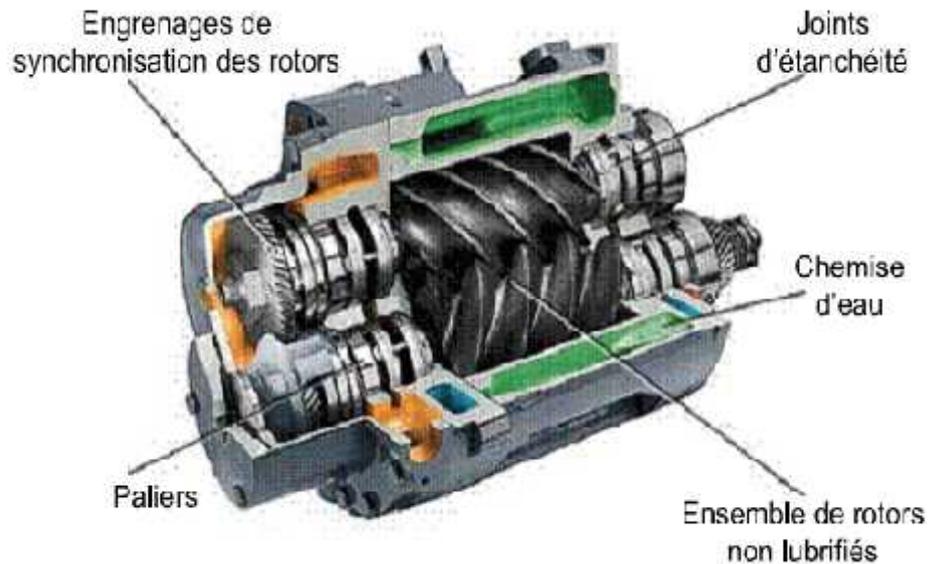


Figure III.2. Coupe d'un compresseur rotatif à vis type (avec la permission d'Atlas Copco)

III-4-3-Compresseur à palettes

Dans ce type de compresseur, le fluide est amené par des palettes fixées sur un rotor. Les palettes, au fur et à mesure de la rotation, bougent axialement afin de garder un contact constant contre la paroi de la chambre. Ce rotor est fixé de manière excentrée sur le stator ce qui permet de créer un zone d'aspiration, de compression et de refoulement (voir schéma).

Le compresseur tourne dans le sens horloger. De l'aspiration jusqu'au refoulement le fluide est constamment comprimé.

III-4-4-Compresseur à piston roulant

Ce compresseur utilise également la rotation d'un rotor sur un stator mais sans l'intervention de palettes. Il s'agit ici de faire tourner le rotor de manière excentrée afin de piéger le fluide frigorigène dans un espace de plus en plus réduit.

III-4-5- Compresseur spiro-orbital/scroll

Ce type de compresseur est constitué de deux spirales intercalées. L'une est fixe, l'autre est amenée à se déplacer excentriquement par le moteur. Le mouvement permet d'aspirer et de comprimer progressivement le fluide frigorigène jusqu'à le refouler par le centre de la spirale.

Ce type de compresseur offre l'avantage de pouvoir se passer de clapets d'aspiration et de

refoulement ce qui réduit ses pertes par frottement. Du fait de ce mode de fonctionnement, il est également très peu sensible aux coups de liquide ce qui le rend plus solide. Il possède pour les mêmes raisons un excellent rendement et fait peu de bruit.

Ses principaux inconvénients sont un coût élevé et sa puissance limitée (pas plus de 50KW). Ce deuxième défaut peut être résolu par une mise en parallèle de 2 compresseurs mais cela impactera fortement le coût d'achat. Ce type de compresseur ne peut être raccordé que de manière hermétique.

III-4-6- Compresseur à vis

Le fluide est aspiré dans les cavités formées par les pas de vis. C'est l'action de rotation entre 2 vis, l'une mâle, l'autre femelle qui comprime le fluide.

Ce type de compresseur bénéficie d'un rendement volumétrique élevé (c'est-à-dire que le fluide occupe l'entièreté du volume utile) car il est composé de peu de pièces. Cela lui permet également d'avoir des pertes par frottement quasiment inexistantes. Les seules pertes volumétriques sont provoquées par la présence d'huile dans le fluide. Du fait du peu de vibrations résultant de son mécanisme, il est très silencieux.

Il consomme néanmoins beaucoup d'énergie et son coût est élevé. Son fonctionnement réside dans des applications de grosses puissances.

Ce type de compresseur peut être raccordé au moteur soit de manière semi-hermétique soit de manière ouverte. Sa puissance s'étend d'environ 100 à 1200 KW.

III-4-7- Compresseur centrifuge

Ce type de compresseur, aussi appelé turbocompresseur, transforme la force dynamique centrifuge en force statique de compression. Le fluide réalise un déplacement circulaire et axial constamment accéléré via des grandes roues munies d'aubages ou d'ailettes inclinées. La force centrifuge provoque la compression du fluide qui est ensuite refoulé aux extrémités de la chambre de compression. Ce type de compresseur se raccorde de manière ouverte ou semi-hermétique.

Les compresseurs centrifuges possèdent généralement un coût relativement avantageux quand il s'agit d'installations d'importante puissance mais leur taux de compression n'est pas aussi bon que celui d'un compresseur volumétrique.

Ce type de compresseur fonctionnant grâce à l'amenée du fluide à grande vitesse, il n'est adapté qu'aux grandes puissances (1000 à 4000KW). A une puissance inférieure, un compresseur centrifuge ne serait pas rentable.

III-5- Description des stockages d'air comprimé

Ce type de stockage consiste à utiliser l'électricité excédentaire produite en heures creuses pour comprimer de l'air à très haute pression et le stocker dans un réservoir. Pendant les heures de pointe, l'énergie potentielle stockée sera libérée en détendant cet air comprimé dans une turbine qui entraîne un alternateur pour produire de l'électricité pendant les heures de pointe ou selon les besoins du réseau électrique.

Ce réservoir pressurisé peut aller d'un simple tuyau de quelques mètres cubes à une caverne de plusieurs centaines de milliers de mètres cubes. Les puissances installées vont de quelques mégawatts (micro-CAES de l'ordre de 1 MW installées sur les réseaux de distribution) à plusieurs centaines de mégawatts (installations de forte puissance installées sur les réseaux de transport), fonctionnant pendant quelques heures). Le stockage peut être fait dans des cavités salines ou des cavités dites « minées » [27].

III-5-1- Principe du stockage souterrain conventionnel d'air comprimé

La solution mise en œuvre jusqu'à présent (CAES dit conventionnel) est faiblement rentable (rendement global du système de 40 à 50 %) et émettrice d'une certaine quantité de CO₂ car elle nécessite de faire passer, avant de le détendre, l'air stocké dans une chambre de combustion où il est réchauffé grâce à l'apport de gaz naturel. Sans cette étape de réchauffement, la température atteinte lors de la détente de l'air serait beaucoup trop basse et pourrait induire un endommagement de la turbine

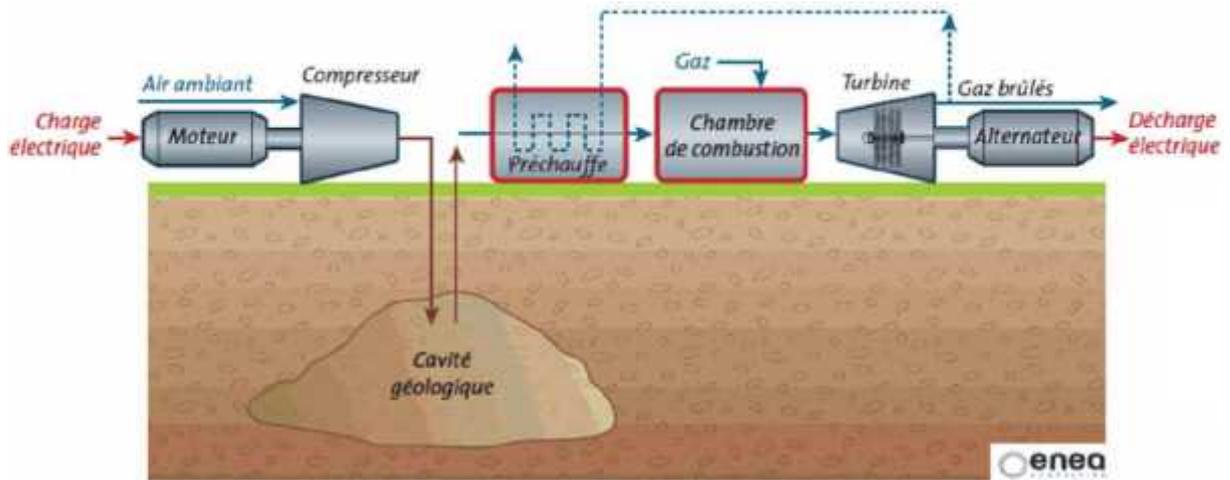


Figure III.3. Schéma de principe d'un stockage souterrain conventionnel de l'air comprimé (d'après ENEA Consulting, 2012)

Les expérimentations réalisées sur les stockages souterrains conventionnels d'air comprimé ont révélé notamment :

- Des problèmes de corrosion liés à l'humidité de l'air affectant le tube de production en acier, le cuvelage cimenté du puits ainsi que le filtre situé en amont des turbines à gaz. Des solutions ont été mises en œuvre dans tous les cas :
- Les limites du matériel de surveillance classique utilisé pour inspecter les parois des cavités. Une mesure du profil de la cavité a été possible avec un laser « chauffé » qui a montré un écaillage des parois de la cavité sans grande conséquence toutefois sur le fonctionnement du stockage (Berest une faible contamination de l'air par le sel (les turbines à gaz sont sensibles au sel contenu dans l'air). Les mesures faites ont montré une contamination par le sel inférieure à 1 mg de sel par kg d'air. Ce résultat a été confirmé par l'examen des pales des turbines.

III-5-2- Principe du stockage souterrain adiabatique d'air comprimé

La technologie de stockage souterrain d'air comprimé CAES isochore adiabatique, généralement désigné sous le sigle 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. Le concept actuel considère un stockage séparé de l'air et de la chaleur. On récupère donc la chaleur de compression dans un

"régénérateur de chaleur" ou TES (Thermal Energy Storage) puis on la réutilise pour réchauffer l'air comprimé pendant sa détente dans la turbine, en s'affranchissant ainsi des apports en gaz comme dans le CAES classique. Théoriquement, cette récupération permet à la fois de porter le rendement électrique à plus de 70 % et d'éviter le recours à une énergie fossile pour préchauffer l'air, ce qui réduit les émissions de CO₂. La pression dans le réservoir d'air comprimé est de l'ordre de 80-150 bars et la température dans le TES voisine de 600-700 °C.

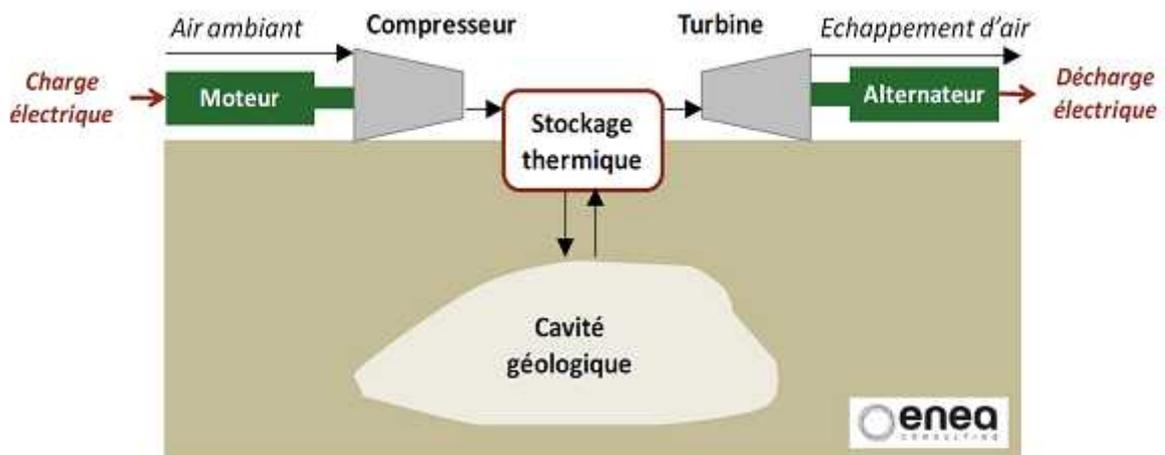


Figure III.4. Schéma de principe du « CAES isochore adiabatique souterrain » ou AA-CAES
(d'après ENEA Consulting, 2012)

Un concept alternatif (dit « CAES isobare adiabatique de surface ») a également été proposé. Celui-ci 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. Le stockage isobare permet le fonctionnement des compresseurs et turbines à un taux de compression fixe. L'intérêt réside notamment dans sa facilité d'implantation (pas de contraintes de site, pas de contraintes géologiques, temps de développement et d'installation court) [28].

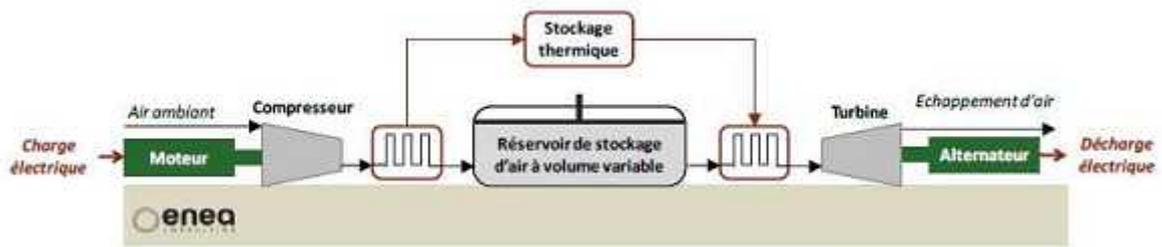


Figure III.5. Schéma de principe du « CAES isobare adiabatique de surface » (d'après ENEA Consulting, 2012)

L'installation comprendra un stockage thermique pour conserver la chaleur produite lors de la compression (la température maximale est supposée atteindre 600 °C). Cette chaleur servira à réchauffer l'air pendant la détente.

Le dispositif de stockage de chaleur (régénérateur) est constitué de conteneurs de 40 m de hauteur avec des lits de pierres ou de briques de céramique à travers lesquels les flux de l'air chaud passe. Le revêtement prévu dans le régénérateur sera composé d'une première couche d'isolant thermique de 30 cm d'épaisseur, suivie d'une deuxième couche de béton réfractaire puis d'une épaisseur conséquente de béton haute résistante armé, fibré et précontraint.

III-5-3- Autres types de stockage d'air comprimé

D'autres concepts ont été proposés basés sur l'utilisation d'un fluide, soit pour transporter de la chaleur (« CAES isotherme de surface »), soit pour compresser et détendre l'air (« stockage hydropneumatique ou oléopneumatique »). Dans les deux cas, on considère pour l'instant un stockage d'air en surface (dans des cylindres haute pression), mais un stockage d'air en souterrain pourrait également être envisagé.

a- CAES isotherme de surface

Cette technologie de stockage d'air comprimé est basée sur une compression et une détente isotherme de l'air. Lors de la phase de compression, un fluide caloporteur, généralement de l'eau, est injectée dans le compresseur, et permet de récupérer la chaleur générée, de sorte que l'air est maintenu à température constante. Lors de la détente, l'eau est de nouveau injectée dans le système, afin de restituer la chaleur stockée à l'air.

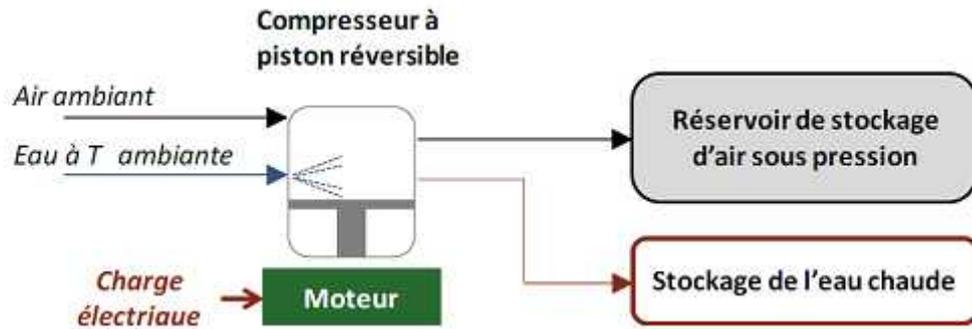


Figure III.6. Schéma de principe du « CAES isotherme de surface » (ENEA Consulting, 2012)

Un CAES isotherme consiste donc à extraire la chaleur de l'air au fur et à mesure de sa compression (et non pas après sa compression comme dans le cas des systèmes adiabatiques). Ce système aurait un rendement théorique de l'ordre de 95 %.

b- Stockage hydropneumatique / oléopneumatique

Le stockage hydropneumatique (respectivement oléopneumatique) est une technologie 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 technologie 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.

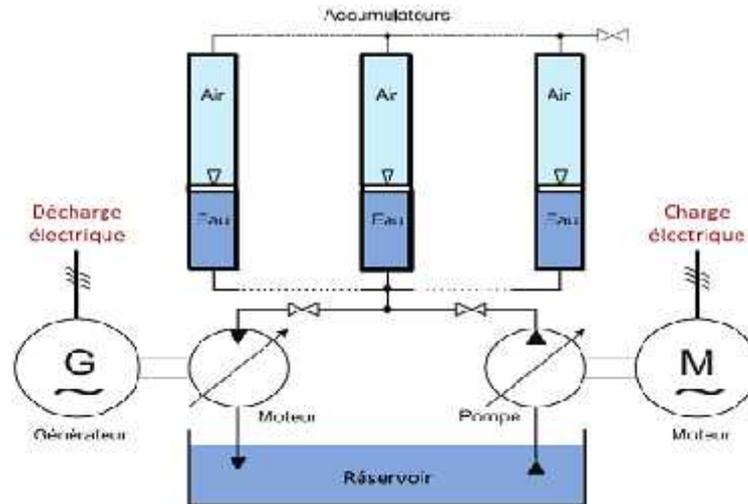


Figure III.7. Schéma de principe du « CAES isobare adiabatique de surface » (d'après Enairys Powertech)

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.

III-5- Les avantages et inconvénients des différentes Solutions de stockage d'air en souterrain

Différentes options ont été étudiées pour le stockage d'air en souterrain : cavité saline, cavité minée, aquifère, gisements de gaz déplétifs.

A- Stockage en cavité saline

En raison de la très faible perméabilité du sel, les cavités salines ont montré avec succès qu'elles permettaient de stocker tout aussi bien du gaz naturel que de l'air comprimé. D'ailleurs, les deux stockages d'air comprimé actuellement opérationnels utilisent des cavités salines. Toutefois, sous fortes sollicitations de pression et de température notamment cycliques et rapides, le sel pourrait être endommagé d'avantage que certaines roches. Ce matériau dispose cependant d'une capacité à se recristalliser, en présence d'air humide, après avoir été endommagé. Ce phénomène tient à la dissolution-précipitation du sel qui peut conduire, dans certaines conditions, à un colmatage progressif des fissures. Les facteurs défavorables sont liés à la présence éventuelle de couches d'insoluble et aux risques de fermeture ou d'effondrements de la cavité du fait du fluage du sel. Ce type d'instabilité, qui peut se produire en particulier sous forts cycles de pression et de

température, peut être évité en respectant le niveau de sollicitations de la cavité de stockage. Le retour d'expérience positif des milliers de cavités de stockage dans le sel, à travers le monde, atteste que ce type de stockage est dans l'ensemble bien maîtrisé aussi bien sur le plan technico-économique que d'un point de vue des risques et impacts.

B- Stockage en cavité minée

Une cavité minée est un ouvrage souterrain composé d'une ou de plusieurs galeries creusées dans un massif rocheux, spécialement pour le besoin du stockage, auxquelles on accède pendant la construction à l'aide d'un puits ou d'un tunnel incliné (descenderie).

La sélection des sites repose essentiellement sur le fait que le rocher doit être suffisamment résistant pour qu'une cavité de grande taille reste stable (en principe sans revêtement). Les formations adaptées (cristallines, calcaires...) sont généralement affectées par une fracturation naturelle susceptibles de compromettre l'étanchéité du stockage souterrain. En effet, la présence d'un niveau perméable au toit de la roche hôte susceptible d'assurer l'étanchéité du stockage n'est pas toujours assurée. De ce fait, l'étanchéité d'un stockage de gaz en cavité minée peut être plus difficilement garantie qu'en cavité saline.

C- Stockage en aquifère

Ce type de stockage consiste à utiliser les vides présents dans certaines couches géologiques poreuses et perméables (aquifères, en principe d'eau salée) dès lorsque cette aquifère est surmonté d'une couche imperméable qui empêche toute émigration du produit stocké (gaz, air comprimé) vers la surface. Il convient de rappeler que de nombreux exemples de stockage de gaz naturel, dans les aquifères salés. Ce type de stockage est retenu en général dans une formation antiforme permettant de contenir la bulle de gaz au sein d'un périmètre limité et bien défini. La solubilité de l'air dans l'eau étant très faible (comme l'est celle du gaz naturel), la quantité dissoute susceptible de migrer au-delà de la zone de stockage devrait être négligeable. L'utilisation d'un aquifère comme réservoir d'air comprimé semble problématique compte tenu de plusieurs facteurs : le coût de la prospection géologique, le risque de fuite de l'air si la couverture n'a pas les propriétés requises, des contraintes sur la pression d'air qui ne doit pas dépasser la pression hydrostatique (pour ne pas risquer de fracturer les terrains). Cela conduit au choix d'un aquifère très perméable, localisé à une profondeur suffisante. De plus, des réactions d'oxydation pourraient avoir lieu en présence de l'oxygène de l'air

en fonction de la minéralogie de la formation. En outre, la circulation de l'air pourrait favoriser la propagation de bactéries aérobies qui pourraient induire un risque de corrosion importante. ont montré qu'un stockage d'air dans un réservoir gréseux est susceptible de modifier d'une façon importante le pH, la salinité et la minéralogie du réservoir, en affectant notamment la composition microbienne. Ces évolutions pourraient induire une modification de la porosité et de la perméabilité du réservoir.

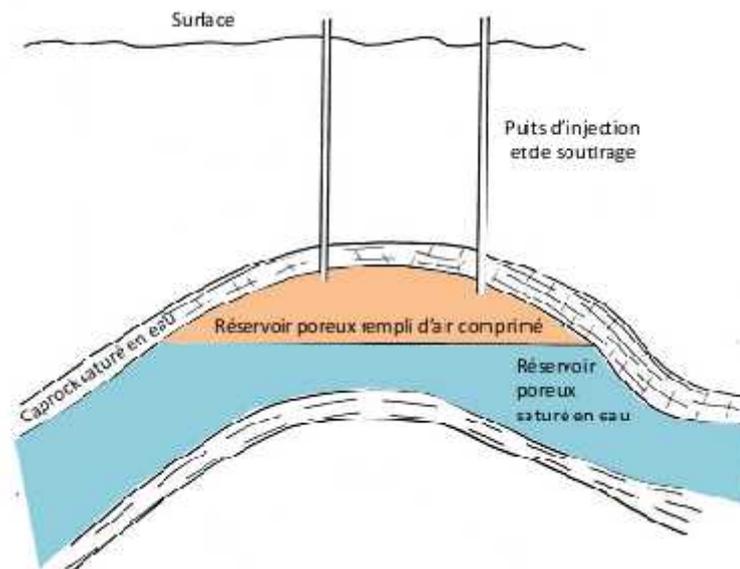


Figure III.8. Schématisation d'un projet de CAES en aquifère d'après (Succar et al., 2008)

D- Stockage en gisement d'hydrocarbures déplétif

Bien que cette option n'ait pas encore été mise en œuvre pour le stockage de l'air comprimé, des exemples de stockage souterrain de gaz naturel en gisements déplétifs existent bien dans le monde. Cette option est d'ailleurs la première retenue aux Etats-Unis, pour le stockage souterrain de gaz naturel. Son intérêt tient à plusieurs faits : la disponibilité du volume de vides laissé après l'exploitation des hydrocarbures, le confinement naturel du milieu géologique propre aux gisements d'hydrocarbures et les connaissances acquises au cours de leur exploitation. Il faut toutefois souligner que le mélange de l'air stocké avec les hydrocarbures résiduels peut induire un risque de combustion spontanée dans le réservoir ou dans la turbine, ou des réactions chimiques induisant l'appauvrissement de l'air en oxygène.

III-6- Des risques potentiels liés au stockage souterrain d'air comprimé

Nous nous limiterons aux cas des stockages d'air comprimé en souterrain. Dans le cas où le stockage d'air est réalisé en surface, un risque spécifique lié aux conditions de stockage de l'air à haute pression dans une enceinte non confinée « géologiquement » serait notamment à considérer. Dans le cas envisagé ici, il convient donc de distinguer :

- La partie souterraine comprenant la cavité de stockage d'air, la cavité de stockage de chaleur dans le cas des AA-CAES (si elle est réalisée en souterrain), les puits d'injection / soutirage et leurs équipements (cuvelage, cimentation, vannes de sécurité ...), galeries et recoupes d'accès (dans le cas des stockages d'air en cavité minées), connexions diverses entre cavités;
- Les installations de surface, comprenant les pipelines, les compresseurs, les turbines (détendeurs), l'enceinte de stockage de chaleur dans le cas des AACAES (Si elle est réalisée en surface) l'échangeur de chaleur, et les équipements de séchage et de filtrage [29-30].

a- Risques liés à la partie souterraine du stockage

Les principaux risques sont les suivants:

- Risque d'endommagement de la paroi de la cavité de stockage d'air (ou de son revêtement) conduisant à des fuites d'air (et donc en particulier à une perte d'efficacité du stockage). Les cavités de stockage d'air comprimé sont soumises à variations cycliques de température et de pression. Pour les CAES, les valeurs peuvent varier de 10 à 40 °C) et de 15 à 70 bars avec des chutes de pression rapides jusqu'à 15 bars/heure. Les projets de stockage adiabatique prévoient par ailleurs que la cavité de stockage d'air soit soumise à des températures voisines de 50°C et des pressions maximales de 65 à 80 bars (pour les cavités salines) et de 100 à 150 bars (pour des cavités minées).

Si la paroi de la cavité (ou de son revêtement éventuel, dans le cas des cavités minées) est soumise à des sollicitations trop importantes ou trop rapides, elle est susceptible de s'endommager. Cela peut conduire à une réduction des caractéristiques de perméabilité de la paroi et induire des fuites d'air préjudiciables en particulier à l'efficacité du procédé. Le

choix des cavités salines pour stocker l'air comprimé peut apparaître comme la solution la mieux adaptée compte tenu de la très faible perméabilité du sel. Toutefois, ses caractéristiques mécaniques peuvent être inférieures à celles des roches dures généralement retenues pour les cavités minées. Par ailleurs, le sel est plus sensible à la température que la plupart des roches. Son point de fusion (800 °C) est très faible comparé aux autres roches. De ce fait, le sel est inadapté au stockage de chaleur. De plus, son coefficient de dilatation thermique (3 fois plus élevé que la moyenne des roches), son fluage accéléré d'une manière exponentielle avec la température et sa conductivité thermique élevée (3 fois la moyenne des roches) soulèvent le caractère sensible du stockage souterrain en cavité saline, sous l'effet de la température notamment de variations rapides induites par des cycles d'injection-soutirage du produit stocké. Par ailleurs, en cas d'endommagement du sel, sa perméabilité pourrait augmenter de façon importante (plusieurs ordres de grandeur). La présence d'air humide pourrait toutefois contribuer, dans certaines conditions, à une cicatrisation des parois de sel après leur endommagement. Dans le cas des cavités minées, le risque de fuite d'air est accru du fait de la plus forte perméabilité de la roche. Toutefois, lorsque la roche n'est pas trop perméable, l'impact peut être limité du fait de la fréquence des cycles d'injection/soutirage de l'air (la cavité n'a pas vocation à stocker l'air pendant plus de quelques jours). Dans le cas de roches plus perméables ou fracturées, il faudrait mettre en place (à moindre coût) un revêtement capable de rester suffisamment longtemps imperméable à l'air [31]. L'alternative serait d'adapter le concept de confinement hydraulique (« rideau d'eau »), parfois utilisé pour le stockage de gaz en cavité minée. Pour limiter l'amplitude et l'extension de l'endommagement de la roche encaissant le stockage, deux dispositions sont à prendre :

- Borner la pression entre une valeur minimale et une valeur maximale. Dans le cas (stockage en cavité saline), ces valeurs étaient de 43 et 70 bars pour une cavité située à une profondeur moyenne de 700 m. L'intervalle pourrait être a priori plus large dans le cas de stockages en cavité minées,
- Ralentir autant que possible la vitesse d'injection-soutirage du fluide afin de ne pas exposer la cavité à des sollicitations thermo-mécaniques excessives et brutales. Cette valeur a été limitée à 15 bars/heure (correspondant à un cycle par jour). Elle est bien plus élevée que la pratique concernant les stockages de gaz naturel (10 bars/jour) soumis à un cycle saisonnier (et non quotidien). Les

variations entre pressions minimales et maximales dans le cas du stockage souterrain d'air comprimé devraient toutefois restées plus modérées.

- **Risque d'instabilité locale ou de perte de volume de la cavité de stockage d'air comprimé.** Ce risque ne concerne que les cavités salines. Deux phénomènes sont à l'origine de ce risque: L'écaillage et le fluage. L'écaillage est associé à la chute de blocs qui se détachent des parois de la cavité. Les inconvénients de l'écaillage dépendent des circonstances [32]. La régularisation de la forme de la cavité par chute des hors-profils laissés par le lessivage ne pose en soi guère de problèmes, sauf si les blocs cassent dans leur chute les tubes suspendus dans la cavité. En revanche, la chute de blocs du toit peut remettre en cause l'étanchéité de la cavité si l'épaisseur du banc de sel laissé au toit de la cavité est insuffisante. Le fluage induit des mouvements continus qui conduisent à une perte progressive du volume de la cavité. L'importance du fluage augmente de façon significative avec la température (donc avec la profondeur de la cavité). Ce phénomène a pu être constaté au cours de l'exploitation de cavités de stockage de gaz, notamment pour des cavités à grande profondeur. Elle peut induire un léger affaissement de la surface du sol.
- **Risque de soulèvement de la surface du sol :** ce risque concerne les cavités minées situées à faible profondeur. Il a été étudié par Perazzelli. (2015) qui a montré que les fortes pressions d'air dans la cavité de stockage peuvent induire, dans certaines conditions, une fracturation du recouvrement et un soulèvement de la surface du sol. Ce phénomène pourrait être évité en veillant à ce que la pression du fluide au sein du stockage reste toujours bien inférieure à la pression litho statique résultant du poids des terrains de recouvrement de la cavité de stockage (sous réserve qu'un stockage sous faible pression soit économiquement viable).
- Risques plus spécifiques aux stockages d'air comprimé en gisement déplété (Certains gisements épuisés de gaz naturel ou de pétrole).

Les risques suivants ont été soulignés :

- Risque de fuite de l'air stocké si le recouvrement n'a pas les propriétés requises ou si la pression de stockage de l'air est trop importante.

- Risque de modification du pH, de la salinité, de la minéralogie, de la composition microbienne du réservoir du fait de la présence d'oxygène qui pourrait induire une modification de la porosité et de la perméabilité du réservoir.
- Risque de combustion spontanée dans les réservoirs déplétés du fait de la présence simultanée d'oxygène et de gaz résiduel pouvant conduire à un endommagement du réservoir et à une modification de l'air stocké.
- Risque d'endommagement et de perte d'efficacité du stockage de chaleur (utilisé dans le cas des stockages adiabatiques AA-CAES).

Le stockage de chaleur va être soumis à des pressions et des températures très importantes (jusqu'à 600 à 700 °C et 150 bars). Ces conditions risquent à terme d'endommager le revêtement et d'altérer ses différentes fonctions : isolation hydraulique (fuite d'air) et isolation thermique (perte de chaleur). Les solutions testées à ce jour n'ont pas donné entière satisfaction.

- Risque de perte d'étanchéité des ouvrages d'accès (puits ou plus généralement toutes les connexions entre les cavités et les infrastructures de surface).
- Des matériels spécifiques doivent être utilisés et des protocoles doivent être mis en œuvre pour éviter ce type de problèmes ou réduire le risque. Cette perte d'étanchéité pourrait induire, selon les cas, une fuite diffuse pouvant mener à une perte d'efficacité du dispositif, un risque environnemental ou un risque d'éruption accidentelle de l'air sous pression.
- Risque environnemental et sanitaire ; Le développement des stockages souterrains d'air comprimé (et plus spécifiquement des stockages adiabatiques) aurait pour avantage de permettre le développement des ressources énergétiques intermittentes renouvelables (éolien, solaire) et la réduction des centrales thermiques d'appoint. Il réduirait ainsi les émissions de gaz à effet de serre et aurait un effet positif sur l'environnement. Il convient toutefois d'étudier les conséquences d'une interaction de fuites d'air (particulièrement de l'oxygène qu'il contient) avec le recouvrement traversé. L'impact des impuretés que l'air pourrait contenir sur la qualité des eaux devrait également être évalué.

b- Risques liés aux infrastructures de surface

- Risque concernant l'efficacité des compresseurs et des turbines ont souligné que les conditions ($P=650^{\circ}\text{C}$, $P=100$ bars, humidité et salinité de l'air) pourraient être trop sévères pour les compresseurs et les turbines actuelles. Ces conditions pourraient conduire à des dysfonctionnements ou un vieillissement prématuré des matériaux.
- Risques liés à la présence d'air comprimé, le risque d'éclatement pneumatique des organes sous pression est reconnu depuis le XIXe siècle et est à l'origine de la réglementation des installations sous pression dont l'objectif premier est la protection des usagers. L'éclatement d'un organe sous pression d'air se traduit par l'émission d'une onde de choc et la propulsion de fragments. Pour des organes de grandes dimensions, comme ceux employés dans la technologie CAES, les énergies de pression qui seraient induites par l'éclatement sous 100 bars d'un volume de 10 m³ correspondent à la détonation d'une charge de 50 kg tandis que des fragments de l'enveloppe pourraient être projetés à plusieurs centaines de mètres de distance. Il faut également considérer les risques de dislocation des turbines et compresseurs s'accompagnant éventuellement de la projection à grande distances de morceaux. Ces dangers ne sont pas directement reconnus par la réglementation des installations classées pour la protection de l'environnement.

III-7- Description du projet ANR SEARCH

Le projet SEARCH (Stockage d'Electricité par Air comprimé avec Récupération de la Chaleur de compression), cofinancé par l'ANR (Agence Nationale pour la Recherche).

Le projet repose sur le concept de CAES adiabatique combinant un stockage d'air comprimé en cavité minée avec un stockage de chaleur ou régénérateur (TES : Thermal Energy Storage). Il a permis la construction d'un pilote de stockage thermique (par le CEA) capable de résister à des températures de 600°C et des pressions relativement faibles, de 30 bars [33].

Un des objectifs du projet visait à concevoir les différentes composantes du stockage souterrain adiabatique (compression, détente, stockage d'air comprimé, stockage de chaleur) de sorte qu'il puisse réaliser des cycles quotidiens stables compte tenu de l'importance des volumes stockés (>100000 m³) et des fluctuations importantes de pression, de température et de débit.

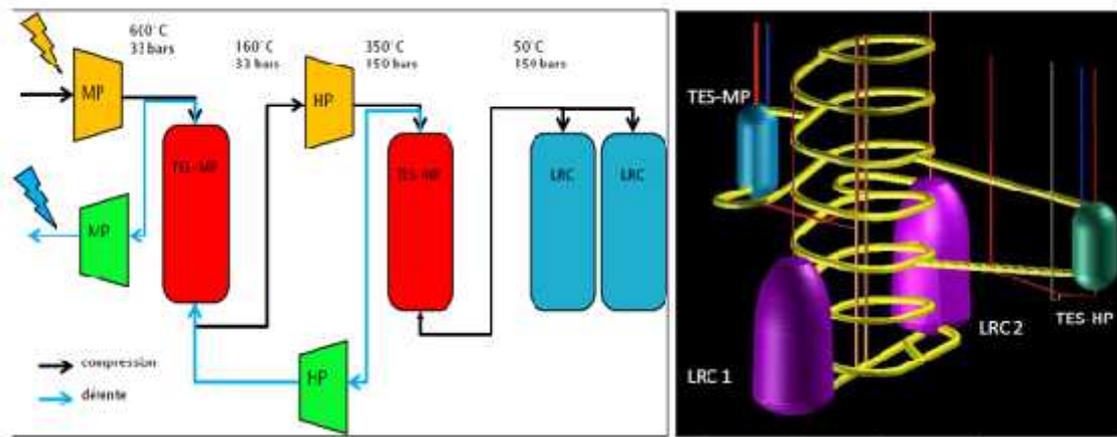


Figure III.9. Architecture du stockage pour la configuration de référence constitué de 2 TES (Thermal Energy Storage) et de 2 LRC (Lined Rock Cavern) – ANR SEARCH (d'après Hadj-Hassan et al, 2014)

Le défi principal portait sur le dimensionnement du stockage de chaleur. En effet, pendant la compression, le régénérateur (TES-HP) doit pouvoir délivrer un air dans une plage étroite de température (autour de 50 °C), afin d'éviter que la cavité de stockage d'air ne subisse un échauffement excessif en fin de compression, ou un refroidissement trop important en fin de détente.

Parallèlement, ce régénérateur doit aussi être capable de réchauffer l'air alimentant la turbine haute pression durant la détente, à une température aussi proche que possible de celle atteinte en fin de compression.

Le défi est alors d'éviter toute dérive thermique au cours des cycles successifs et de limiter les besoins de refroidissement du régénérateur, sources de pertes de rendement, entre deux chargements consécutifs. Un revêtement spécifique doit être mis en place pour minimiser les pertes thermiques et les fuites d'air et pour assurer la tenue de la structure pour une durée de vie supérieure à 30 ans.

Les performances d'un revêtement du type celui proposé ont été évaluées. Il est constitué de matériaux isolants visant à limiter les pertes thermiques, puis d'un liner métallique pour garantir l'étanchéité et enfin d'un système de refroidissement actif en vue de protéger la roche hôte des sollicitations thermiques.

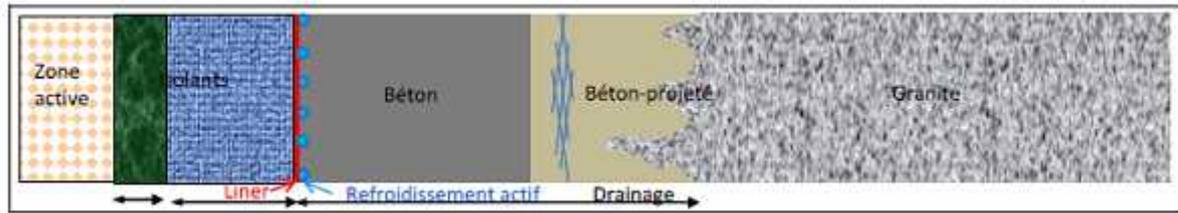


Figure III.10. Schéma de principe du revêtement du régénérateur utilisé pour le stockage thermique (d'après Hadj-Hassen & El-Murr, 2014)

Différentes options de revêtement du régénérateur ont été évaluées à partir de modélisations thermo-hydro-mécanique couplées.

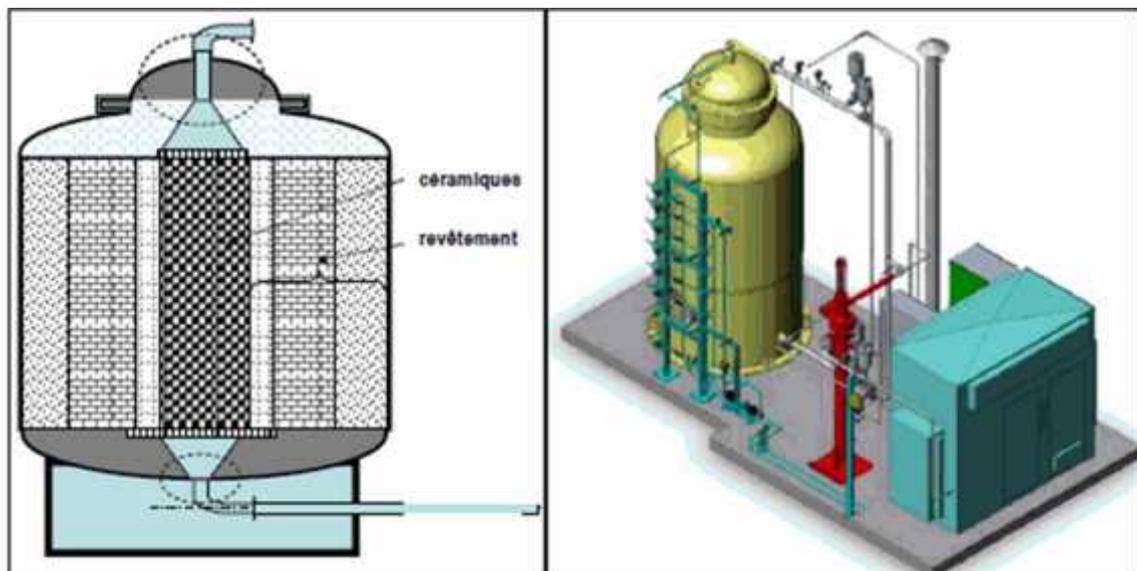


Figure III.11. Prototype de régénérateur de chaleur réalisé par le CEA (d'après Hadj-Hassen & El-Murr, 2014)

La durabilité des matériaux face au risque de corrosion en présence de solutions aqueuses formées par condensation de l'air humide a également été étudiée. Il s'agissait, pour chaque ouvrage du stockage : cavité de stockage, TES « Thermal Energy Storage » : régénérateur de chaleur), de préciser ses conditions de condensation en fonction des sollicitations (température et pression) appliquées. La résistance à la corrosion a été estimée en deux étapes complémentaires. La première étape a consisté à réaliser une série de tests dans le but d'établir les diagrammes de solubilité et les paramètres cinétiques intrinsèques de chacune des phases solides. Dans une seconde étape, le comportement à long terme des céramiques et du revêtement dans le régénérateur a été modélisé

avec le logiciel HYTEC (code de calcul développé par MinesParisTech) couplant réactivité chimique-,ruissellement des condensats et gradient thermique.

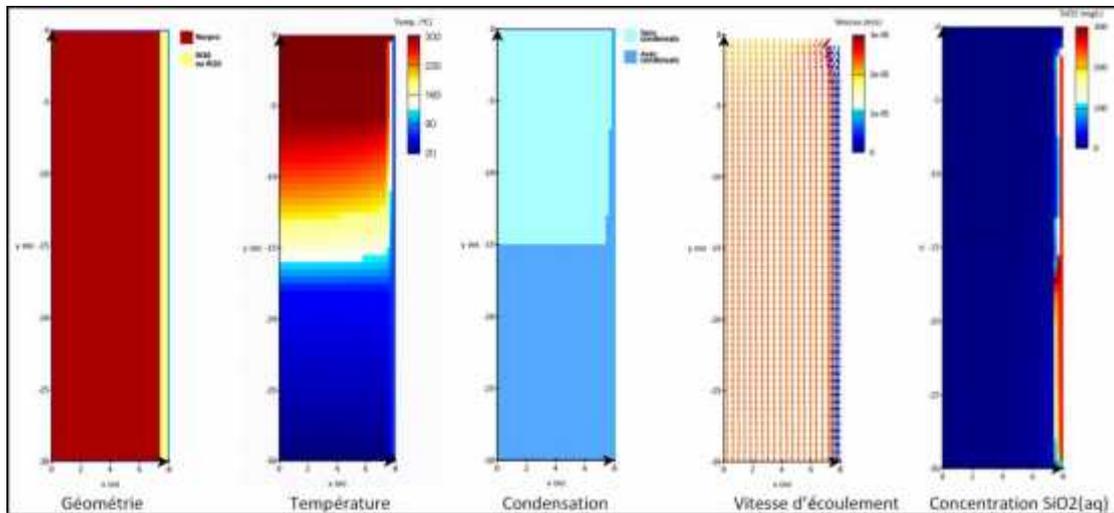


Figure III.12. Modélisation de la corrosion dans un régénérateur avec le logiciel HYTEC (d'après Hadj-Hassen & El-Murr, 2014)

III-8- Considérations énergétiques

III-8-1- Calcul de la densité énergétique de l'air comprimé

D'après F. De Samaniego Steta, si l'on assimile l'air à un gaz parfait dont la chaleur spécifique reste constante et si on considère en plus un processus de compression isotherme (cette hypothèse permet de simplifier les calculs en considérant que la température reste constante pendant la compression), le travail W lié à la compression de l'air de l'état initial (V_0) à l'état final (V_1) peut s'exprimer selon l'expression :

$$W = nRT \ln\left(\frac{V_0}{V_1}\right) \quad (\text{III.1})$$

Ce travail W rapporté au volume initial (V_0), permet de définir la densité énergétique comme suit :

$$\frac{W}{V_0} = P_0 \ln\left(\frac{V_0}{V_1}\right) = P_0 \ln\left(\frac{P_1}{P_0}\right) \quad (\text{III.2})$$

En considérant, par exemple, un volume initial $V_0 = 1 \text{ m}^3$ et une variation de pression de $P_0=1\text{bars}$ ($= 10^5 \text{ Pa}$) à $P_1= 100 \text{ bars}$, on obtient : **0.46 MJ/m³**. Cette valeur peut être comparée à celle obtenue pour un **STEP** (Stations de Transfert d'Énergie par Pompage).

1- Bilan énergétique simplifié d'un stockage souterrain adiabatique d'air comprimé

En se basant sur l'approche proposée par Kim Y.-M, nous proposons un bilan énergétique basé sur le concept d'énergie. En supposant que les effets liés aux énergies potentiels et cinématiques sont négligeables et qu'aucune réaction chimique ne se produit, l'énergie d'un courant d'air peut être exprimée comme suit :

$$\dot{E}_a = \dot{M}_a [h - h_0 - T_0 (s - s_0)] \quad (\text{III.3})$$

Où : E_a est l'énergie (kJ) de l'air (\dot{E}_a sa dérivée temporelle); M_a (kg) est la masse de l'air (\dot{M} sa dérivée temporelle); h est l'enthalpie spécifique (kJ/kg) ; s est l'entropie spécifique (kJ.kg⁻¹.K⁻¹) ; l'indice « 0 » renvoie à une condition de référence ($T_0 = 20^\circ\text{C}$; $P_0 = 1 \text{ bar}$).

Si on assimile l'air à un gaz parfait, on a :

$$h - h_0 = C_p (T - T_0) \quad (\text{III.4})$$

$$s - s_0 = C_p \ln \left(\frac{T}{T_0} \right) - R \ln \left(\frac{P}{P_0} \right) \quad (\text{III.5})$$

Où, C_p (kJ/K) est la chaleur spécifique à pression constante (à la température moyenne) et R (8,314 J·K⁻¹·mol⁻¹) est la constante des gaz parfaits. En divisant l'énergie E_a en une part mécanique $E_{a(M)}$ et une part thermique $E_{a(T)}$, on obtient:

$$\dot{E}_a = \dot{E}_{a(M)} + \dot{E}_{a(T)} \quad (\text{III.6})$$

$$\dot{E}_{a(M)} = \dot{M}_a R T_0 \ln \left(\frac{P}{P_0} \right) \quad (\text{III.7})$$

$$\dot{E}_{a(T)} = \dot{M}_a C_p [T - T_0 - T_0 \ln \left(\frac{T}{T_0} \right)] \quad (\text{III.8})$$

La figure III.13 montre les flux d'énergie, de chaleur et de masse dans le cas d'un stockage souterrain d'air comprimé adiabatique (AA-CAES) et pour une production de sortie de 1 kWh. Les

différents processus sont : la compression (1-2), le refroidissement de l'air (2-3), le stockage ou le déstockage (3-4), le réchauffement de l'air (4-5), la détente (5-6), et la récupération de chaleur (6-7).

Les indices + et - renvoient respectivement aux flux entrant ou sortant. Les indices « c » et « e » renvoient respectivement aux processus de compression et de détente (« expansion »).

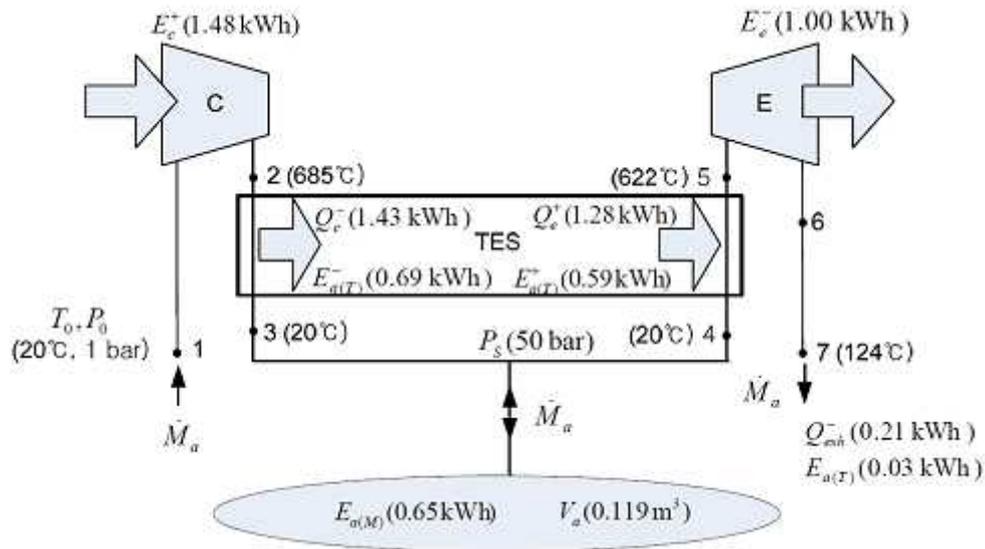


Figure III.13. Stockage souterrain d'air comprimé adiabatique

Si l'air est comprimé de façon adiabatique jusqu'à 50 bars, la température de l'air en sortie du compresseur est d'environ 685°C. L'énergie thermique de l'air comprimé est à peu près équivalente à l'énergie mécanique de l'air comprimé (cela revient à dire que l'énergie mécanique de compression est entièrement convertie en chaleur [46]. Pendant la phase de stockage, la chaleur est extraite de l'air comprimé et stocké dans le régénérateur (ou TES : Thermal Energy Storage).

Dans la cavité de stockage d'air comprimé, l'air est à une température de 20°C et à une pression de 50 bars. Pendant la phase de déstockage, l'air comprimé est réchauffé jusqu'à 622°C en utilisant l'énergie thermique stockée, puis détendue à travers une turbine à air. Le calcul suppose une efficacité du TES de 90% [47]. Dans ce cas, l'efficacité de stockage électrique du système CAES adiabatique (sans apport thermique extérieur) est de 68 % [48].

III-8- Conclusion

Pour que vous puissiez améliorer le système d'air comprimé il faut:

1. Identifier et réparer les fuites d'air en commençant par la plus importante.
2. Mesurer les paramètres de votre système d'air comprimé et établissez une base de référence afin de déterminer ses coûts d'exploitation et son efficacité.
3. Faites fonctionner le système d'air comprimé à la pression pratique la plus basse possible.
4. Installez, réglez et entretenez des dispositifs de régulation du système automatiques afin de coordonner le fonctionnement des compresseurs.
5. Fermer l'alimentation en air comprimé des zones, équipements et applications qui ne sont pas en activité.
6. Utilisez une soufflante plutôt qu'un compresseur quand il y a lieu.
7. Employez des réservoirs d'air comprimé afin de réduire la fréquence des cycles des compresseurs et d'être en mesure de répondre aux demandes de pointe.
8. Installez, lorsque c'est réalisable, des tuyauteries de plus grand diamètre et des configurations de distribution en boucle.
9. Gardez les équipements d'air comprimé, filtres et purgeurs à un niveau d'entretien adéquat.
10. Demandez-vous constamment si l'air comprimé est bien le meilleur type d'énergie pour l'application envisagée.

CONCLUSION GENERALE

ET PERSPECTIVES

Les sources d'énergie renouvelable apportent aujourd'hui une dimension nouvelle à notre société avec des enjeux technologiques, économiques et sociologiques ; cette étude vise entre autres à sensibiliser :

- aux diverses formes d'énergies renouvelables telles les énergies solaire, éolienne, hydraulique, de biomasse, géothermique, des marées et vagues, par voie de piles à hydrogène
- aux techniques de production, de stockage et d'exploitation de l'énergie

D'une manière globale, la valorisation de la fonction stockages' évaluée à travers une approche coût/bénéfice sur l'ensemble du cycle de vie du système.

La structure de ce chiffre d'affaires conduit à considérer les caractéristiques techniques suivantes :

-Coût de fabrication, de démantèlement et de recyclage : les procédés de fabrication peuvent être très coûteux. En outre, l'énergie emmagasinée dans les systèmes de stockage est quasi proportionnelle aux quantités de matières actives mises en jeu. De ce fait, pour l'électricité comme pour la chaleur, il y a lieu de rechercher des solutions mettant en œuvre des matériaux disponibles, peu coûteux et respectueux de l'environnement ;

- Rendement global : parce qu'il impacte directement le bilan énergétique, ce paramètre joue un rôle primordial pour la valorisation du stockage d'énergie. Bien que certains dispositifs affichent des rendements intrinsèques d'un très bon niveau (batteries, supercondensateurs, volants d'inertie) l'intégration systémique de ces composants en vue d'une application donnée se traduit par une dégradation des performances. C'est pourquoi l'analyse du rendement d'un système de stockage doit intégrer toute la chaîne de conversion et les auxiliaires nécessaires à son fonctionnement.

- Autodécharge : ce paramètre, assimilable à une fuite, correspond à la perte d'énergie du milieu de stockage lorsque celui-ci n'est pas sollicité. Ici, par commodité, on assimilera également à de l'autodécharge la puissance nécessaire au maintien du système opérationnel dans un état de charge donné. L'impact de ce paramètre sur le rendement global du système dépend donc du cycle d'usage. Les applications faisant appel au transfert temporel d'énergie (lissage de charge, arbitrage sur les marchés, report des investissements dans les réseaux) y sont plus sensibles que celles dites « destockage de

puissance » (mobilisation en quelques fractions de seconde de puissances importantes, mais pour des durées très courtes) ;

-Durée de vie : s'agissant généralement d'un ensemble coûteux, l'investissement lié à un système de stockage doit pouvoir s'amortir sur la plus longue période possible. Parce qu'ils sont re-conditionnables (contrairement aux systèmes électrochimiques), les systèmes de stockage physiques (volants d'inertie ou systèmes hydropneumatiques) sont peu impactés par ce critère. Il n'en est pas de même pour les dispositifs électrochimiques et thermiques pour lesquels le vieillissement des matières actives, sous l'effet des sollicitations (vieillessement lors des cycles successifs de fonctionnement) et du temps (vieillessement calendaire), doit être amélioré.

Parmi les systèmes de stockage on a le stockage d'air comprimé. Nous aurons parfois besoin d'aide pour entreprendre une évaluation en matière d'air comprimé ou pour planifier l'expansion d'un nouveau système. Voici une liste de questions méritant notre réflexion et qui pourraient nous aider à prendre notre décision :

- Quelles sont les références antérieures et quel est le niveau de connaissance de l'entreprise et de la personne qui vont procéder au travail ?
- Dans quelle mesure le fournisseur de services comprend-il bien les notions d'efficacité énergétique et de compromis en matière d'économie ?
- À quel point le fournisseur de services est-il familier avec la totalité des aspects et des types de compresseurs d'air, y compris l'alimentation en air et la demande d'air ?
- Dans quelle mesure connaît-il bien les autres équipements et dispositifs connexes ? (sècheurs, filtres, réservoirs, tuyauteries ; application ; etc)
- Dans quelle mesure le fournisseur de services comprend-il bien mon industrie et les produits que nous fabriquons ou que nous transformons ?
- Jusqu'à quel point son rapport ou ses conseils seront ils objectifs ? (Tente-t-il juste de nous vendre des équipements ou des services supplémentaires, ou bien son travail a-t-il été effectué de manière impartiale et indépendante?)
- À quel point le fournisseur de services est-il réceptif ? (se montre-t-il disponible pour faire des essais en minimisant les impacts sur l'installation et/ou pour procéder à ces essais pendant les nuits/fins de semaine)
- Les essais pourront-ils être effectués avec un minimum de supervision ?

- Que comprendra l'évaluation du système d'air comprimé et quel sera le type de rapport final fourni ?
- Le rapport final pourra-t-il être présenté à la directionaux fins d'élaboration d'un programme de rendement énergétique et d'une analyse de rentabilisation ?

Perspectives

Le Volant de Stockage Solaire, VOSS :(En période de test)

Le frein à l'utilisation massive des énergies renouvelables est leur intermittence. Le stockage est une solution à ce problème, mais avec les solutions actuelles, les batteries, le coût de stockage de l'énergie est élevé : plus de 0,10 €/kWh. C'est plus que le coût de production de l'énergie ! La principale raison en est la faible durée de vie des batteries, limitée à quelques milliers de cycles seulement [34].



Figure : Le volant Énergiestro

Le stockage par volant d'inertie peut, lui, atteindre un très grand nombre de cycles. Ces volants sont constitués d'un cylindre d'une masse imposante, enfermé dans une cuve sous vide d'air, capable de résister à une grande vitesse de rotation pour stocker l'énergie sous forme cinétique. Pour limiter les frottements, et donc les pertes, le volant est monté sur des paliers magnétiques. Lorsque les panneaux solaires ou les éoliennes produisent, un moteur fait tourner le volant, à très haute vitesse. Lorsque la production d'électricité cesse, l'énergie cinétique est alors restituée sous la forme d'électricité par l'intermédiaire d'un simple alternateur.

Le volant Énergiestro est constitué d'un cylindre (1) capable de résister à une grande vitesse de rotation pour stocker l'énergie sous forme cinétique. Un moteur/alternateur (2) permet de transférer de l'énergie électrique au volant (accélération) puis de la récupérer (freinage). Les paliers, inférieur (3) et supérieur (4) sont des roulements à billes. Une butée magnétique passive (5) supporte le poids du volant. Une enceinte étanche (6) maintient le volant dans le vide pour supprimer le frottement de l'air. Un convertisseur électronique (non représenté) transforme la tension continue aux bornes du volant en une tension alternative haute fréquence pour le moteur/alternateur.

La difficulté c'est que ces cylindres sont en acier à haute limite élastique ou en fibre de carbone et que leur coût de fabrication est élevé.

L'entreprise française Energiestro, basée à Châteaudun, développe un stockage d'énergie par volant en béton, solution ultra économique qui permettra d'utiliser l'énergie solaire de façon massive. Les défis techniques pour utiliser du béton qui résiste à de telles contraintes étaient énormes et l'entreprise a développé avec les ingénieurs du Centre français d'étude et de recherche de l'industrie du béton (le CERIB) un béton fibré et compressé à haute densité, capable de résister à ces contraintes extrêmes. Autre défi : celui du refroidissement dans le vide : 6 brevets au total ont été déposés.

Résultat des courses : ce nouveau volant de stockage solaire, VOSS, permet une durée de stockage d'une dizaine d'heures, restituant ainsi la nuit l'énergie solaire stockée dans la journée. Et à un prix nettement inférieur que les volants classiques. Le coût de stockage rivalise avec celui des batteries les moins chères, inférieur à 0,02 €/kWh, mais avec une durée de vie illimitée, sans matériaux polluants. Il deviendra alors possible d'augmenter

massivement la production des énergies renouvelables intermittentes. Energiestro vise en particulier les centrales solaires géantes installées dans les déserts. L'association de panneaux photovoltaïques et de volants VOSS produira une énergie renouvelable disponible nuit et jour à un prix inférieur à celui des énergies fossiles[35].

Les volants produits par Energiestro sont actuellement en période de test (durée de vie, entretien). Le projet VOSS a été lauréat du concours mondial d'innovation en 2014.

1

BIBLIOGRAPHIE

- [1-2-9] Renewable In Global Energy Supply. *An IEA Fact Sheet. International Energy Agency.*
- [3-4-5] Centre National d'Information et de Ressources sur le Photovoltaïque (*France*).
- [6-7-8] Premiers résultats des expérimentations sur les agrocombustibles [*archive*].
- [10-11] World Energy Council. <http://www.worldenergy.org>.
- [12] Renewables in Global Energy Supply. An IEA Fact Sheet. International Energy Agency
- [13] <http://ww.planete-energies.com>
- [14] **A. labouret** et **M. villoz** préface de jean louis bal 'Energie solaire photovoltaïque', *livre 4 édition, 2008.*
- [15-16] <http://fr.wikipedia.org> (sur le stockage d'énergie) .
- [17] <http://fr.wikipedia.org> (sur le stockage d'hydrogène).
- [18] Règles de stockage et de manipulation de l'azote liquide, fiche technique, 2015.
- [19] Le stockage de l'énergie électrique, M. Alain Obadia , juin 2015.
- [20] <http://fr.wikipedia.org> (sur la pile à combustible).
- [21] Le super-condensateur ; *université Paul Sabatier CIRIMAT UMR CNRS 5085 Toulouse-France,2015*
- [22] Le stockage d'énergie ; Noble, Grégoire (2015) *Le stockage d'énergie stimule l'ingéniosité française*, Bati-actu, 2015-06-12
- [23-24] Guide de référence sur l'efficacité énergétique de l'air comprimé, 2007, CEA technologie.
- [25] Compressed Air Challenge; www.compressedairchallenge.org.2016.
- [26] Manitoba Hydro Compressed Air Program;www.hydro.mb.ca/pop/compressed_air.shtml.
- [27] Rapport d'étude; Stockage souterrain de l'air comprimé dans le contexte de la transition énergétique.2016.

- [28-33] Optimisation de systèmes de production intermittents non conventionnels couplés au réseau électrique, Université Grenoble.2011.
- [29-30] http://www.presse.ademe.fr/wp-content/uploads/2014/06/LA-RECHERCHE_STOCKAGE-%C3%89NERGIE-8-PAGES.pdf.
- [31] http://www.developpement-durable.gouv.fr/IMG/pdf/Ref_Filieres.pdf.
- [32] http://www.clca.columbia.edu/CAES2workshop_proceedings.pdf.
- [34] Bluboux, Article publié dans Le Lot en Action de mars 2016 (n°98).
- [35] <http://www.lelotenaction.org/pages/content/archives/stockage-de-l-energie-electrique- voss-le-volant-de-stockage-solaire.html#m1o4XgDtCZC5KgMB.99>.