



## THESIS / THÈSE

### MASTER EN INGÉNIEUR DE GESTION À FINALITÉ SPÉCIALISÉE EN ANALYTICS & DIGITAL BUSINESS

#### Perspectives de stockage d'énergie en Belgique à l'horizon 2030

Gournis, Maxime

*Award date:*  
2019

*Awarding institution:*  
Universite de Namur

[Link to publication](#)

#### **General rights**

Copyright and moral rights for the publications made accessible in the public portal are retained by the authors and/or other copyright owners and it is a condition of accessing publications that users recognise and abide by the legal requirements associated with these rights.

- Users may download and print one copy of any publication from the public portal for the purpose of private study or research.
- You may not further distribute the material or use it for any profit-making activity or commercial gain
- You may freely distribute the URL identifying the publication in the public portal ?

#### **Take down policy**

If you believe that this document breaches copyright please contact us providing details, and we will remove access to the work immediately and investigate your claim.

# UNIVERSITÉ DE NAMUR

## MÉMOIRE DANS LE CADRE DU MASTER EN INGÉNIEUR DE GESTION À FINALITÉ SPÉCIALISÉE

FACULTÉ DES SCIENCES ÉCONOMIQUES, SOCIALES ET DE GESTION

---

### **Perspectives de stockage d'énergie en Belgique à l'horizon 2030**

---

#### RÉSUMÉ

L'augmentation de la demande en électricité va devenir une problématique de plus en plus importante au cours des années et une des réponses possibles à cette augmentation peut se trouver dans le stockage d'énergie. Dans ce mémoire nous allons analyser comment stocker différents types d'énergies provenant d'énergies renouvelables ou non renouvelables afin de pouvoir répondre à cette augmentation de la demande. Dans un premier temps nous allons définir l'ensemble des technologies de stockage d'énergie, nous allons ensuite évaluer les perspectives futures et économiques de chacune. Dans la partie analyse on va définir ce dont dispose la Belgique, ce dont elle a besoin et ce qui serait applicable. Sur base de cette analyse on va définir dans la partie résultat quel serait le mix de technologies pouvant répondre de la manière la plus optimale à cette augmentation de demande d'électricité en 2030 en Belgique.

*Auteur : Maxime GOURNIS*

*Promoteur : Aadhaar CHATURVEDI*

11 juin 2019

# Avant-propos

Je tenais à remercier mon promoteur de mémoire, le professeur Aadhaar CHATURVEDI qui m'a permis de choisir ce sujet très intéressant et d'actualité car la problématique de l'énergie est une question qui va se poser de plus en plus. Je tenais à le remercier d'avoir été là pour répondre à mes questions.

# Table des matières

<b>Liste des figures</b>	<b>7</b>
<b>Liste des tables</b>	<b>8</b>
<b>Lexique</b>	<b>9</b>
<b>Introduction</b>	<b>10</b>
<b>I Technologies existantes</b>	<b>12</b>
<b>1 Les types de stockage d'énergie</b>	<b>12</b>
1.1 Energie mécanique . . . . .	12
1.1.1 Volant d'inertie . . . . .	12
1.1.2 Stockage par pompage hydroélectrique (PHS) . . . . .	14
1.1.3 Air comprimé en caverne (CAES) . . . . .	16
1.2 Energie électrochimique . . . . .	16
1.2.1 Batterie au Plomb . . . . .	17
1.2.2 Batterie au Nickel . . . . .	18
1.2.3 Batterie au Lithium . . . . .	19
1.3 Energie électrique . . . . .	21
1.3.1 Condensateur et super-condensateur . . . . .	21
1.3.2 Stockage d'énergie magnétique supraconductrice (SMES) . . . . .	22

1.4	Energie thermochimique . . . . .	25
1.4.1	Combustible solaire . . . . .	25
1.5	Energie chimique . . . . .	27
1.5.1	Pile à combustible à hydrogène . . . . .	27
1.6	Energie thermique . . . . .	28
1.6.1	Stockage d'énergie thermique (TES) . . . . .	28
<b>II</b>	<b>Perspectives</b>	<b>31</b>
<b>2</b>	<b>Perspectives futures</b>	<b>31</b>
2.1	Energie mécanique . . . . .	31
2.2	Energie électrochimique . . . . .	34
2.3	Energie électrique . . . . .	36
2.3.1	Super-condensateur . . . . .	36
2.3.2	Stockage d'énergie magnétique supraconductrice (SMES) . . . . .	37
2.4	Energie thermochimique . . . . .	38
2.5	Energie chimique . . . . .	39
2.6	Energie thermique . . . . .	41
<b>3</b>	<b>Perspectives économiques</b>	<b>43</b>
3.1	Energie mécanique . . . . .	43
3.1.1	Volant d'inertie . . . . .	43
3.1.2	Stockage par pompage hydroélectrique (PHS) . . . . .	43
3.1.3	Air comprimé en caverne (CAES) . . . . .	44

3.2	Energie électrochimique . . . . .	44
3.3	Energie électrique . . . . .	46
3.3.1	Super-condensateur . . . . .	46
3.3.2	Stockage d'énergie magnétique supraconductrice (SMES) . . . . .	46
3.4	Energie thermochimique . . . . .	47
3.5	Energie chimique . . . . .	49
3.6	Energie thermique . . . . .	50
<b>III Analyse</b>		<b>51</b>
<b>4</b>	<b>Analyse de la demande d'électricité actuelle et projection de la demande de stockage d'énergie en 2030 en Belgique</b>	<b>51</b>
4.1	Introduction . . . . .	51
4.2	Evolution de la demande d'électricité en Belgique . . . . .	51
4.3	Evolution de l'offre d'électricité en Belgique . . . . .	52
4.4	Projection de la demande d'électricité à l'horizon 2030 . . . . .	53
4.5	Projection de la demande en énergie de stockage à l'horizon 2030 . . . . .	54
<b>5</b>	<b>Technologies pouvant apporter une réponse à l'augmentation de la consommation d'électricité à l'horizon 2030</b>	<b>57</b>
5.1	Répartition des différents types de stockage d'énergie selon la capacité . . . . .	58
5.2	Disponibilité . . . . .	58
5.3	Coût actuel . . . . .	60
5.4	Evolution coût . . . . .	61
5.5	Performances énergétiques . . . . .	62

5.6	Evolution des performances énergétiques . . . . .	64
5.7	Impact environnemental . . . . .	64
<b>6</b>	<b>Stockage d'énergie en Belgique</b>	<b>66</b>
6.1	Introduction . . . . .	66
6.2	Technologies de stockage d'énergie actuellement utilisées en Belgique . .	66
6.2.1	PHS . . . . .	66
6.2.2	CAES . . . . .	67
6.2.3	Parc de batteries . . . . .	67
6.2.4	Pile à combustible à hydrogène . . . . .	68
<b>IV</b>	<b>Méthodologie</b>	<b>69</b>
<b>7</b>	<b>Méthodologie de comparaison des différentes technologies</b>	<b>69</b>
7.1	Introduction . . . . .	69
7.2	Technologies applicables au cas de la Belgique . . . . .	70
7.3	Capacité de stockage d'énergie en Belgique . . . . .	71
7.4	Cout actuel des technologies de stockage d'énergie . . . . .	73
<b>V</b>	<b>Résultats</b>	<b>74</b>
<b>8</b>	<b>Résultats de l'analyse de la situation actuelle et optimisation pour 2030 du stockage d'énergie en Belgique</b>	<b>74</b>
8.1	Introduction . . . . .	74
8.2	Période 2020-2022 . . . . .	74

8.3	Période 2023-2025 . . . . .	76
8.4	Période 2026-2030 . . . . .	78
<b>Conclusion</b>		<b>81</b>
<b>Références</b>		<b>83</b>
<b>Annexes</b>		<b>90</b>
	Annexe 1 - CAES adiabatique . . . . .	90
	Annexe 2 - Batterie Lithium-ion . . . . .	91
	Annexe 3 - Caractéristiques d'un super-condensateur . . . . .	91
	Annexe 4 - Fonctionnement du stockage d'énergie magnétique supraconduc- trice (SMES) . . . . .	92
	Annexe 5 - Comparaison entre la photosynthèse naturelle et artificielle . . . . .	92
	Annexe 6 - Conversion de l'énergie solaire en carburant . . . . .	93
	Annexe 7 - Combustible solaire . . . . .	93
	Annexe 8 - Evolution de la consommation annuelle d'électricité en Belgique et répartition par secteur d'activité . . . . .	94
	Annexe 9 - Evolution de la production d'électricité en fonction de la source (exprimée en GWh) . . . . .	94
	Annexe 10 - Prévission de la demande en électricité à l'horizon 2030 et répartition par secteur (exprimé en TWh, dernière colonne exprimé en %) . . . . .	95
	Annexe 11 - Réseau de tuyaux pouvant transporter de l'hydrogène en Belgique	95

## Table des figures

1	<i>Evolution de la consommation d'électricité en Belgique . . . . .</i>	54
2	<i>Evolution de la part de l'offre d'énergie renouvelable en Belgique . . . . .</i>	55
3	<i>Evolution de la demande en énergie de stockage en Belgique . . . . .</i>	56
4	<i>Répartition de la capacité de stockage d'énergie en Belgique en 2022 - Prév basse . . . . .</i>	75
5	<i>Stockage d'énergie en Belgique en 2022 . . . . .</i>	75
6	<i>Répartition de la capacité de stockage d'énergie en Belgique en 2025 - Prév basse . . . . .</i>	77
7	<i>Stockage d'énergie en Belgique en 2025 . . . . .</i>	78
8	<i>Répartition de la capacité de stockage d'énergie en Belgique en 2030 - Prév basse . . . . .</i>	79
9	<i>Stockage d'énergie en Belgique en 2030 . . . . .</i>	80

## Liste des tableaux

1	<i>Prévision basse et haute de la demande en énergie de stockage en Belgique à l'horizon 2030</i>	57
2	<i>Coût des différentes technologies de stockage d'énergie</i>	60
3	<i>Performances énergétiques des différentes technologies de stockage d'énergie</i>	62
4	<i>Performances énergétiques des différentes technologies de stockage d'énergie</i>	62
5	<i>Impact environnemental des différentes technologies de stockage d'énergie</i>	65
6	<i>Evolution du coût en \$/kWh des différentes technologies de stockage d'énergie</i>	73

# Lexique

CAES : Stockage d'énergie par air comprimé en caverne

HTS : Supraconducteurs à haute température

Li-Ion : Lithium-ion

LTS : Supraconducteurs à basse température

PHS : Stockage par pompage hydroélectrique

SMES : Stockage d'énergie magnétique supraconductrice

STES : Stockage d'énergie thermique sensible

TES : Stockage d'énergie thermique

UPS : Système d'alimentation sans interruptions

# Introduction

Ce mémoire va se présenter en différents chapitres abordant des thématiques différentes autour du stockage d'énergie et tentant d'apporter une réponse à la problématique du stockage d'énergie en Belgique à l'horizon 2030.

Tout d'abord ce mémoire va commencer par énumérer les différents types de stockage d'énergies qu'il existe sur le marché depuis longtemps, qui sont en phase de test ou bien encore qui sont au stade de développement. Ces types de stockage peuvent être regroupés en différentes catégories selon le type d'énergie qu'ils utilisent. On va ainsi retrouver le stockage d'énergie sous forme mécanique, électrochimique, électrique, thermochimique, chimique et enfin thermique. Dans ce chapitre va être donnée une description générale du principe de stockage d'énergie, son principe de fonctionnement, des caractéristiques techniques liées à sa production d'énergie ainsi que ses avantages et inconvénients.

Le second chapitre de ce mémoire va quant à lui se concentrer sur les perspectives futures et économiques que peuvent avoir les différents moyens de stocker l'énergie présentés dans le chapitre 1 de ce mémoire.

Dans la partie sur les perspectives futures on va parler des projets déjà existants ou non mais aussi des possibilités d'implantation de nouveaux projets et les barrières possibles à ces derniers ainsi que les possibles impacts qu'auraient ces derniers. On va également analyser les possibilités d'amélioration et d'optimisation technologique possible afin que ces derniers soient commercialisables.

La partie sur les perspectives économiques sera consacrée aux perspectives économiques que peuvent apporter les différents moyens de stocker l'énergie. Dans ce chapitre on va analyser plus en détail comment vont se découper les coûts liés à un projet en particulier on va également analyser des données comme le coût par Kilowattheure ou bien encore le rendement de ces différents projets. Ces mesures vont être importantes pour la suite

de notre analyse car elles vont nous permettre de comparer les technologies sur le plan économique.

Le 3ème chapitre va nous permettre de connaître la situation actuelle de la demande et de l'offre d'électricité en Belgique mais également la projection de l'offre et de la demande à l'horizon 2030. Grâce à ces données on va pouvoir déterminer la demande en électricité de stockage à l'horizon 2030 qui va être le point central de notre analyse.

On va également analyser les différentes technologies pouvant répondre à notre question de départ et nous allons les comparer sur différents critères comme la capacité, la disponibilité, le coût, les performances énergétiques et l'impact environnemental. On va également analyser la situation actuelle au niveau du stockage d'énergie en Belgique et quels sont les technologies actuellement utilisées.

Le chapitre 4 va être consacré à la méthodologie utilisée pour sélectionner les technologies pouvant répondre à notre question du départ. On va également définir 3 périodes de temps : 2020-2022, 2023-2025, 2026-2030.

Le dernier chapitre va tenter d'apporter une réponse à notre problématique de départ à savoir « Quel(s) type de stockage d'énergie peut répondre à l'augmentation de demande en stockage d'énergie à l'horizon 2030 en Belgique ». Dans cette partie on va analyser les actions à faire durant ces 3 périodes afin de pouvoir réaliser notre objectif en termes de stockage d'énergie en 2030.

## Première partie

# Technologies existantes

## 1 Les types de stockage d'énergie

Les techniques de stockage d'énergie peuvent être classées en 6 types : mécanique, électrochimique, électrique, thermochimique, chimique ainsi que thermique. Les différentes catégories vont être abordées dans les points suivants et sont regroupées par catégorie pour une présentation plus claire.

### 1.1 Energie mécanique

#### 1.1.1 Volant d'inertie

Description générale :

Le volant d'inertie est un système composé d'un volant, d'un moteur ainsi que de paliers magnétiques. Une enceinte basse pression recouvre le tout afin de minimiser les pertes [1]. Lorsque le rotor tourne, l'énergie de ce dernier peut être extraite du système sous forme d'énergie cinétique en ralentissant la vitesse de rotation du rotor. Cela peut être réalisé grâce au principe de conservation de l'énergie. A l'inverse ajouter de l'énergie au système va augmenter la vitesse de rotation de ce dernier [2]. Le volant d'inertie trouve son origine dans les années 60 lorsque la NASA considéra que c'était une application prometteuse dans le domaine de l'aérospatial. Par la suite, avec les évolutions technologiques, le volant d'inertie a été amélioré en utilisant des matériaux plus résistants et plus légers comme de la fibre de carbone pour le rotor par exemple ce qui rendit le volant d'inertie encore plus attrayant [2].

Principe de fonctionnement :

Comme présenté précédemment le volant d'inertie est composé de plusieurs éléments.

Tout d'abord le moteur/ générateur : ce dernier va être alimenté par un moteur électrique dans le cadre d'un système électrique qui subit un surplus. Ce surplus d'électricité du moteur électrique va donc permettre au moteur d'effectuer des rotations et ces rotations vont engendrer la création d'énergie cinétique lorsque l'on va ralentir la vitesse de rotation, grâce au principe de conservation de l'énergie. Plus la vitesse de rotation est élevée plus la quantité d'énergie stockée va être élevée. Ensuite on va retrouver le rotor qui lui va convertir l'énergie reçue par le moteur électrique en un moment de force qui va le faire tourner. On va enfin retrouver le volant d'inertie qui va nous permettre de stocker cette énergie créée [2] [3].

Le processus inverse peut également s'opérer en transformant l'énergie cinétique sous forme d'énergie électrique par le biais du générateur.

Production d'énergie :

La production d'énergie dépend essentiellement du type de matériaux qui vont être employés dans la fabrication du volant d'inertie. Ainsi on peut aussi bien retrouver des volants d'inertie composés de matériaux conventionnels tel le métal dont la vitesse de rotation est de 6000 rotations par minute ou des volant d'inertie dont la vitesse de rotation peut atteindre 50 000 rotations par minute grâce à l'utilisation de matériaux composites tel que la fibre de carbone ou encore le graphite, engendrant une grosse réduction des frottements. La production d'énergie pour les volants d'inertie conventionnels représente 5 Wh/kg, tandis que pour ceux fait avec des matériaux composites cette dernière peut représenter jusqu'à 100 Wh/kg [2].

Selon le type de matériaux employés, les performances du volant d'inertie peuvent atteindre 90% d'efficacité [2].

Avantages et inconvénients :

Le premier inconvénient de ce type de système est la sécurité liée à son utilisation. En effet comme expliqué précédemment ce dernier est composé d'un rotor qui tourne à

très grande vitesse et un des risques est que ce dernier se brise ou se fissure lors de la rotation. Pour contrer cela des « stress test » sont effectués afin de déterminer la vitesse maximale en comptant une marge de sécurité. Le second problème des volants d'inertie est que ces derniers ne sont pas des systèmes efficaces si le cycle de charge/ décharge ne se fait pas en continu, en effet afin d'éviter des pertes il faut que ces cycles se fassent en continu. Le dernier inconvénient est le prix relativement élevé. Ces trois inconvénients ont eu pour effet que ce type de système n'est pas très répandu [3].

### **1.1.2 Stockage par pompage hydroélectrique (PHS)**

Description générale :

Le PHS est un système qui va permettre de stocker l'énergie électrique lors de période de faible demande électrique dans le réseau et va pouvoir relâcher cette énergie sous forme électrique lors de pics de demande formulée par le réseau. Le PHS est composé de divers éléments. Tout d'abord on va retrouver un réservoir à basse altitude, un réservoir situé à plus haute altitude que le précédent, des pompes, des hydro-turbines. Ce type de système peut également être couplé avec des éoliennes pour éviter toute perte énergétique [8]. Ce système trouve son origine dans les années 1890 et il a sans cesse fait l'objet d'amélioration pour devenir aujourd'hui le moyen de stockage d'énergie sous forme électrique à grande échelle le plus important [8]. En effet ce type de système représente à lui seul plus de 99% de la capacité mondiale de stockage en vrac et il fournit 3% de l'énergie mondiale [9]. L'utilisation des PHS va varier selon la taille de la structure. En effet comme présenté par la suite la capacité de la PHS va varier entre quelques kW à plusieurs milliers de MW dès lors les applications ne seront pas les mêmes. Les PHS de plus petite taille vont être utilisées pour stocker de l'énergie provenant de source d'énergie renouvelable telle que les éoliennes ou les panneaux photovoltaïques. Les systèmes PHS de taille « micro » vont être utilisés pour fournir de l'électricité à des communautés isolées. Ils peuvent également être connectés au réseau où ils vont pouvoir relâcher l'énergie stockée des sources d'énergie renouvelable. Pour les PHS pouvant stocker plus

d'énergie que le pico et micro, ces derniers vont être raccordés au réseau et vont servir à stocker l'énergie lors de faible demande du réseau et de relâcher cette dernière lors de pics de demande du réseau électrique [8].

Principe de fonctionnement :

Ce système comme énoncé précédemment va être utilisé pour stocker l'énergie lorsque la demande sera faible et relâcher cette énergie lorsque la demande sera plus forte pour maintenir le réseau électrique à un niveau stable. Lorsque la demande en électricité sera faible, le système va capter de l'énergie électrique du réseau afin de pomper de l'eau du réservoir situé en basse altitude pour faire monter l'eau dans le réservoir en haute altitude. Ensuite lorsque la demande électrique du réseau sera plus forte, le système va relâcher l'eau accumulée dans le réservoir situé à plus haute altitude vers celui situé à plus basse altitude à travers des turbines qui vont permettre de produire de l'énergie électrique qui va alimenter le réseau [8] [2]. Il est également à noter que l'électricité nécessaire afin de faire passer l'eau du réservoir de faible altitude vers celui de haute altitude peut provenir d'autre source tel que les panneaux solaires ou encore photovoltaïques [8].

Production d'énergie : La production d'énergie dépend de plusieurs critères : tout d'abord la différence d'altitude entre les différents réservoirs mais également la quantité d'eau qui va composer les différents bassins [7]. D'autre part la puissance nominale du pompage turbinage dépend de la pression de l'eau et de du débit suivant lequel l'eau passe dans les turbines. La puissance nominale de ce système va également dépendre de la puissance nominale de la pompe/ turbine et du générateur/moteur [9].

En fonction des caractéristiques de la pompe on va retrouver différentes valeurs de production et de stockage d'énergie. Ainsi on peut retrouver des pompes dont la puissance nominale peut varier entre quelques kW jusqu'à des milliers de MW [9]. Ainsi on va pouvoir retrouver une classification selon la taille de la pompe. Lorsque la capacité est inférieure à 5kW on va parler de pico PHS. Lorsque la capacité est comprise entre 5 kW et 100 kW on va parler de micro PHS. Lorsque la capacité est comprise entre 100 kW et 10MW on va parler de petite PHS et finalement lorsque cette capacité va dépasser 10

MW on va parler de grosse PHS [8]. L'efficacité énergétique de ce type de système est comprise entre 70 et 85% elle est due aux pertes d'évaporation mais également aux pertes de conversion [2] [9]. La durée de vie est de plus de 40 ans [9].

Avantages et inconvénients :

Le pompage turbinage est le système qui est actuellement le plus efficace afin de stocker et de délivrer de large quantité d'énergie cependant le coût du capital ainsi que la géographie sont des facteurs qui peuvent remettre en cause la création de ce type de projet [2]. Le grand avantage de ce type de système est qu'il va permettre de stocker l'énergie produite lors de faible demande en électricité et va permettre de diffuser cette dernière dans le cas où la demande en électricité est plus forte. Ce système est le seul qui peut réaliser cela à une aussi grande échelle. Ça va donc permettre de fluidifier le réseau en évitant les pannes d'électricité en cas de forte demande mais également d'éviter les gaspillages d'énergie quand la demande est faible. On peut également ajouter comme avantage que ce système peut être couplé avec un système éolien ou photovoltaïque dont il va prélever l'énergie excédentaire afin de réaliser ses opérations de pompage.

### **1.1.3 Air comprimé en caverne (CAES)**

## **1.2 Energie électrochimique**

Description générale :

Les batteries sont des systèmes électrochimiques qui vont permettre de stocker l'énergie. Ces systèmes vont créer de l'énergie à partir de réaction électrochimique et vont délivrer cette dernière sous forme électrique. Ce système est composé d'une anode qui va fournir l'électron, d'une cathode qui va accepter l'électron ainsi que d'un électrolyte qui va permettre ce transfert d'électron entre l'anode et la cathode. Et pour finir on va retrouver des séparateurs permettant l'isolation électrique entre les électrodes positives et négatives. La réaction se fait à partir de deux électrodes qui vont être plongées dans un électrolyte,

et cela va créer une réaction qui va engendrer un transfert d'électron d'une électrode à l'autre engendrant la création d'énergie [2]. Il existe cependant 3 grands types de batterie qui seront brièvement présentées dans les paragraphes suivants à savoir : les batteries au plomb, les batteries au nickel, les batteries au lithium. Pour ces 3 types de batterie seront détaillés le mode de fonctionnement ainsi que la production d'énergie et les éventuels problèmes.

### **1.2.1 Batterie au Plomb**

Description générale :

La batterie au plomb est la plus ancienne batterie rechargeable, elle trouve son origine en 1859 et a été créée par le français Gaston Planté [62]. Comme son nom l'indique cette batterie est composée de sulfate de plomb qui va former l'anode, de dioxyde de plomb qui va former la cathode ainsi que de l'acide sulfurique qui va être l'électrolyte. Le principe de fonctionnement va être similaire à celui énoncé dans la description générale [2].

Production d'énergie :

En fonction des matériaux utilisés et au fil des évolutions technologiques le rendement énergétique de ces batteries a pu être amélioré. Il est également à noter que l'efficacité de ce type de batterie est hautement liée aux caractéristiques du sulfate de plomb présent au niveau de l'anode et donc cela pourra affecter le chargement et donc résulter par une efficacité moindre. C'est pour cela que des matériaux tel que le carbone sont utilisés afin d'optimiser ce processus [5]. Pour de plus amples détails sur le fonctionnement détaillé de ce dernier veuillez consulter [5]. Concernant la production d'énergie la batterie au plomb a un voltage de 2V. Sa densité énergétique est de 30Wh/kg et sa densité de puissance est de 180 W/kg. Son efficacité énergétique est comprise entre 85 et 90%. Ce type de batterie a également un faible taux d'autodécharge ce qui la rend utile pour une utilisation à long terme. La batterie au plomb a une durée de vie de 1200 à 1800 cycles de charges/ décharges et en termes d'année sa durée d'utilisation est de 5 à 15 ans.

Avantages et inconvénients :

Il y a plusieurs avantages et inconvénients à ce type de batterie. Tout d'abord au niveau des avantages on peut noter que ce type de batterie est facile à installer et à entretenir car il requiert très peu de maintenance. L'investissement pour obtenir ce type de batterie est également faible comparé à d'autres types de batteries. Au niveau des inconvénients on va en retrouver plusieurs. A commencer par la durée de vie de la batterie qui est relativement faible. La température et le taux de décharge sont également des éléments pouvant nuire à sa durée de vie. En effet ces derniers vont avoir un impact négatif sur les électrodes et donc sur la batterie.

### **1.2.2 Batterie au Nickel**

Description générale :

Il existe plusieurs types de batterie associant le nickel avec un autre élément ainsi on peut retrouver des batteries nickel-fer (Ni-Fe), nickel-cadmium (Ni-Cd), nickel-hydrogène (Ni-H<sub>2</sub>), nickel-métal hybride (Ni-MH) ou encore Nickel-zinc (Ni-Zn) [6]. Ces types de batteries utilisent toutes de l'hydroxyde de nickel et une solution aqueuse d'hydroxyde de potassium avec de l'hydroxyde de lithium pour l'électrode positive ainsi que pour l'électrolyte. Et pour l'électrode négative les différents types de batteries utilisent soit le fer, cadmium, hydrogène, le métal hybride ou encore le zinc [2]. Encore une fois le principe de fonctionnement est le même que celui explicité plus haut.

Production d'énergie :

La densité énergétique des batteries au nickel est plus élevée que celle des batteries au plomb. En effet la densité énergétique d'une batterie au plomb est 30Wh/kg tandis que cette dernière est par exemple de 50 Wh/kg pour la batterie Ni-Cd, 60 Wh/kg pour la batterie Ni-Zn et 80 Wh/kg pour la batterie Ni-MH [2]. Selon un autre article la densité de la batterie Ni-MH peut même atteindre la valeur de 100 Wh/kg. Cette dernière caractéristique rend ce type spécifique de batterie particulièrement attractif en vue d'une

commercialisation. Ce dernier type de batterie pourrait trouver des applications dans le domaine des véhicules hybrides, électriques [6]. La durée de vie des batteries au nickel peut varier entre 1500 et 3000 cycles de charges/ décharges [2]. L'efficacité énergétique de ce type de batterie varie selon avec quoi le Nickel est associé. Ainsi les batteries Ni-MH ont une efficacité énergétique entre 60 et 70%, 80% pour celle de Ni-Zn, celle de Ni-Cd entre 60 et 83%. Ce type de batterie a également un haut taux d'autodécharge correspondant à 10% de capacité nominale par mois [2].

Avantages et inconvénients :

Au niveau des avantages comme précisé précédemment la durée de vie des batteries au nickel est supérieure à celle des batteries au plomb. Un autre avantage des batteries au Nickel par rapport aux batteries au Plomb est que le maximum de densité énergétique des batteries au Nickel est plus élevé. Au niveau des désavantages des batteries au Nickel par rapport à celle au Plomb, on peut noter que le coût de la batterie Ni-Cd, qui est généralement la seule utilisée pour des applications UPS , est 10 fois plus élevé que le coût des batteries au plomb. L'efficacité énergétique est également plus faible pour les batteries au Nickel par rapport à celles au Plomb. On peut également noter que la capacité nominale de la batterie au Nickel est 5 fois plus élevée que celle de la batterie au Plomb.

### **1.2.3 Batterie au Lithium**

Description générale :

Les batteries au Lithium ion sont composées d'une anode en graphite, d'une cathode formée d'un oxyde de métal avec du lithium et d'un électrolyte composé d'un solvant organique mélangé intégré dans un séparateur [7]. Les batteries au lithium sont les batteries dont l'avenir est le plus prometteur. En effet ces dernières sont propices aux changements et améliorations les plus importants car en dépit de ses performances élevées les composantes de cette dernière n'ont pas été changées ou presque depuis son introduction dans les années 90. Sachant que les performances sont principalement dues aux

matériaux employés une modification des matériaux utilisés pour l'anode et la cathode peut donc sensiblement améliorer la performance de ce type de batterie. Ces batteries vont également jouer un rôle important dans les énergies renouvelables car elles vont permettre aux véhicules hybrides et électriques de se soustraire aux énergies fossiles grâce à l'efficacité énergétique élevée de ce type de batterie. De plus l'utilisation de ce type de batterie devient de plus importante au fil des années dans des secteurs tel que ceux des téléphone portable, notebook, véhicule hybride etc... comme on peut le voir dans l'annexe 2 [7].

Production d'énergie :

La densité énergétique des batteries au lithium ion est comprise entre 80 et 150 Wh/kg et celle des batteries au lithium polymère est comprise entre 100 et 150 Wh/kg. En ce qui concerne la densité de puissance, cette dernière est comprise entre 500 et 2000 W/kg pour les batteries au lithium ion et 50 à 250 W/kg pour les batteries au lithium polymère [2]. La durée de vie des batteries lithium ion est 1500 cycles de charges/ décharges tandis que celle des batteries lithium polymère est de 600 cycles de charges/ décharges. On peut également ajouter que l'efficacité énergétique des 2 types de batteries est comprise entre 90 et 100%. En ce qui concerne le taux d'autodécharge, ce dernier est de maximum 5% de capacité nominale par mois [2].

Avantages et inconvénients :

Tout d'abord il est à noter que ce type de batterie possède une densité énergétique ainsi qu'une efficacité énergétique supérieure aux batteries au plomb ou au nickel. Elle possède également un taux d'autodécharge de 5% ce qui est inférieur aux batteries au nickel mais légèrement supérieur aux batteries au Plomb. Toutefois ce taux reste très faible. Un des désavantages de ce type de batterie est que la durée de vie est relativement faible. De plus cette dernière est liée à la température, particulièrement aux hautes températures, mais également au taux de décharge. Le fait que le taux de décharge est lié à la durée de vie de la batterie va rendre la batterie au Lithium inadaptée dans les cas où la batterie va être entièrement déchargée [2].

## 1.3 Energie électrique

### 1.3.1 Condensateur et super-condensateur

Description générale :

Un condensateur est composé de deux plaques de métal qui font office de conducteur, séparées par une plaque isolante appelée diélectrique [14]. En raison de ses caractéristiques les condensateurs et super condensateurs sont des outils non pas destinés au stockage d'énergie en premier lieu mais plutôt pour des applications de correction et harmonisation de la tension à la sortie de système fournissant de l'électricité [9]. Les super-condensateurs sont toujours en stade de recherche et développement et des nouveaux matériaux tel que le carbone ou le graphène pour les électrodes sont proposés afin d'améliorer leur capacité de stockage, leur densité énergétique ainsi que leurs coûts [14].

Principe de fonctionnement :

Le fonctionnement de ce type de système est le suivant : lorsque l'on va amener de l'électricité sur une des 2 plaques, cette dernière va se charger négativement et va induire des charges positives sur l'autre plaque ce qui va avoir pour effet de stocker du courant dans ce système au niveau du diélectrique dans un champ électrostatique [9] [14]. Le super condensateur va quant à lui se composer de 2 électrodes qui vont être séparées par une membrane poreuse qui va faire office de séparateur. Il va également être composé d'un électrolyte. Dans ce cas-ci l'énergie va être stockée entre l'électrolyte et les deux électrodes. L'énergie sera stockée sous forme d'énergie statique [9]. Un schéma est présenté à l'annexe 3.

Production d'énergie :

Au niveau de la production d'énergie, nous allons nous focaliser sur les performances énergétiques du super-condensateur car ce sont les plus performantes. Le super-condensateur peut subir plus de  $1 \times 10^5$  cycles de charges/ décharges avec une efficacité comprise entre 84 et 97%. La durée de vie du super-condensateur est de 12 ans maximum [2]. L'efficacité

énergétique est comprise entre 85 et 98% [2]. La densité énergétique est de 5 Wh/kg [2]. La densité de puissance est très élevée et peut atteindre la valeur de 10 000 W/kg. Cependant son taux de déchargement est également élevé, en effet ce dernier est compris entre 5-40% [9].

Avantages et inconvénients :

La vitesse de chargement des condensateurs et super-condensateurs est beaucoup plus rapide que pour les batteries traditionnelles, cela est dû au fait qu'il n'y a pas de réaction chimique, dès lors ces derniers peuvent être chargés/ déchargés en l'espace de quelques secondes [2]. Ils peuvent également subir des dizaines de milliers de cycles de charges et décharges en gardant une grande efficacité [14]. La puissance énergétique des super-condensateurs est très élevée, cependant celle-ci n'est disponible que durant une période assez courte car la densité énergétique est faible. Cependant le désavantage de ce type de système est sa faible capacité, sa faible densité énergétique et sa dissipation énergétique élevée. C'est d'ailleurs pour ces raisons que les condensateurs et super-condensateurs ne sont pas utilisés en premier lieu pour des applications de stockage d'énergie [9]. Un autre désavantage des super-condensateurs est le coût économique qui est de plus de 6000 \$/kWh selon [9] et est de l'ordre de 20 000\$/ kWh selon [2]. Cependant ce coût peut être réduit par les avancées technologiques et l'utilisation d'autres matériaux.

### **1.3.2 Stockage d'énergie magnétique supraconductrice (SMES)**

Description générale :

Le SMES est un système dont le concept a été inventé en 1969 en France par Ferrier. Cependant le premier SMES a été créé aux États-Unis dans les années 70. Par la suite il a connu de nombreux développements et applications industrielles [14]. Il est composé de 3 éléments principaux : En premier on va retrouver une bobine supraconductrice (SC) qui va être refroidie par un cryostat à une température inférieure à sa température critique

de supraconductivité (La température de supraconductivité est en fait la température pour laquelle le matériau ne montre aucune résistance) [64]. De l'Hélium liquide à 4,2K (-268.95 °C) ou de l'Hélium super fluide à 1.8K (-271.35 °C) vont en général être utilisés afin de refroidir le système [14]. Le deuxième élément est un système de conditionnement d'énergie (PCS). Ce système va convertir le courant continu (DC) en courant alternatif (AC) et inversement [16]. Le 3ème élément est système de contrôle (CS) qui va gérer les échanges d'énergie entre le réseau électrique et le SMES. Il va gérer les échanges afin d'assurer la stabilité et la fluidité des échanges. [16]. Un schéma est présenté à l'annexe 4. Il existe 2 types de supraconducteur : les supraconducteurs à basse température (LTS) et les supraconducteurs à haute température (HTS). La température des LTS est en général de 4.2K et celle des HTS de 40K. Une analyse plus détaillée des raisons pour lesquelles les LTS sont actuellement plus utilisés que les HTS sera proposée dans la section « avantages et inconvénients » Ce type de système est particulièrement utilisé pour des applications à court terme de stockage d'énergie car il a un taux de décharge relativement élevé [9].

Principe de fonctionnement :

Le SMES va stocker l'énergie électrique directement sous forme de courant électrique [14]. Le flux de courant continu (DC) généré par la bobine supraconductrice va créer un champ magnétique ou va venir se stocker l'énergie électrique. La bobine supraconductrice est préalablement refroidie à une température inférieure à sa température critique de supraconductivité [16]. On fait cela car, comme expliqué dans la description générale, la température critique de supraconductivité va permettre au matériau de ne présenter aucune résistance et de ce fait lorsque l'énergie électrique va passer dans le câble entourant la bobine, ce dernier ne va subir aucune résistance et donc ne va pas chauffer ce qui va permettre de ne pas perdre d'énergie. En effet si l'énergie électrique passe dans le câble et chauffe le câble à cause de la résistance de ce dernier on aura une perte énergétique sous forme de chaleur [9]. On va donc utiliser des matériaux supraconducteurs, comme par exemple le Niobium-Titanium, pour les câbles entourant la bobine afin d'éviter des pertes énergétiques [9]. L'énergie stockée en courant continu (DC) pourra

être par la suite transformée en courant alternatif (AC) et délivrée au réseau électrique en déchargeant la bobine. La transformation du courant continu en courant alternatif se fera via l'utilisation d'un module de convertisseur de puissance [9]. Production d'énergie : La quantité d'énergie stockée va nous être donnée par la formule suivante :  $E = 1/2 LI^2$ , où L va représenter l'inductance et I le courant qui circule dans la bobine [16]. La densité de puissance de ce type de système est de 4000 W/L. Le SMES peut se décharger en moins d'1 minute. L'efficacité du cycle de ses charges/ décharges est comprise entre 95-98%. La durée de vie de ce type de système est de plus de 30ans [9]. Son efficacité de stockage énergétique est de plus de 97% [14]. Son taux de décharge est cependant élevé avoisinant les 10-15% [9].

Avantages et inconvénients :

Un avantage majeur du SMES est son temps de mise en œuvre qui est extrêmement faible, en effet celui-ci n'est que de 1 à 5 millisecondes [16]. Ce temps de réponse est extrêmement faible. Lorsque l'on compare ce temps de mise en œuvre à celui d'un système de stockage d'énergie équivalant en termes de quantité de stockage comme le CAES ou le PHS cela constitue un réel avantage en cas de panne soudaine du réseau électrique. Grâce à ses caractéristiques techniques ce type de système peut être utilisé afin d'améliorer la stabilité du réseau électrique. Cela peut être réalisé car le SMES a un temps de réaction très court et donc en cas de problème avec le réseau ce dernier pourra réagir rapidement [16]. Concernant l'utilisation plus fréquente de LTS par rapport au HTS, celle-ci peut s'expliquer par le facteur économique. En effet, lors de la création du SMES le prix des HTS étaient plus élevés que ceux des LTS car les avancées techniques dans le domaine n'étaient pas encore suffisantes. Il est à noter que le coût d'un système cryogénique représente 15% du coût total du SMES. Dès lors avec les avancées techniques le prix de HTS a diminué devenant moins cher que les LTS et donc vont permettre de réduire le coût de ce type de système qui reste un obstacle à sa mise en œuvre [16]. Au niveau des désavantages du SMES on peut donc retrouver son coût qui est de 10 000/kWh et de 7200/kWh. Cependant comme expliqué précédemment le coût peut être

réduit par l'utilisation HTS au lieu de LTS [9]. Ce type de système a également un impact environnemental négatif et cela est dû à son champ magnétique puissant [14].

## **1.4 Energie thermochimique**

### **1.4.1 Combustible solaire**

Description générale :

Ce système va permettre de fabriquer du carburant à partir du soleil via différents procédés : la photosynthèse naturelle, artificielle et l'approche thermochimique. Les 2 premières méthodes vont générer de l'énergie par la transformation de carbone et d'oxygène via l'énergie lumineuse. La dernière méthode va quant à elle directement accumuler de l'énergie solaire qui va passer par un transformateur qui va en faire de l'énergie utilisable sous une autre forme. L'importance de ces différents procédés est que l'énergie qui va être transformée va maintenant pouvoir être stockée et réutilisée quand la demande sera présente. On va donc pouvoir stocker l'énergie solaire produite en quantité excessive durant la journée afin de réutiliser celle-ci dans des périodes de demande plus importantes.

Principe de fonctionnement :

Photosynthèse naturelle et artificielle Dans ce type de processus l'énergie solaire va être récoltée via le processus de photosynthèse. Pour rappel la photosynthèse va permettre de transformer l'énergie lumineuse en énergie chimique via l'utilisation de carbone et d'oxygène. La photosynthèse artificielle est presque semblable à la photosynthèse naturelle sauf que dans le cas de l'artificielle on va utiliser des matières tel le ruthénium ou le palladium au lieu de la chlorophylle [9]. Un schéma détaillant ces 2 différentes méthodes est présenté dans l'annexe 5. Approche thermochimique La récolte de l'énergie solaire va se faire comme présenté sur le schéma dans l'annexe 6. Tout d'abord l'énergie solaire va être concentrée sur un miroir parabolique afin d'accumuler

un maximum de chaleur et cette chaleur va ensuite être utilisée par un réacteur chimique qui va la transformer afin de générer un carburant solaire [14]. Ce carburant solaire va pouvoir ensuite être transporté et utilisé pour générer de l'énergie qui pourra être transformée en électricité.

Production d'énergie :

Au niveau de la production d'énergie cette dernière peut potentiellement produire jusqu'à 20MW. Et l'énergie spécifique peut varier entre 800Wh/kg à 100 000 Wh/Kg. La durée de stockage va également varier entre plusieurs heures à plusieurs mois [9]. Avantages et inconvénients : Il y a plusieurs désavantages à ce type d'application. Tout d'abord ce type de système nécessite de la place. En effet il faut une grande surface afin de capter l'énergie solaire suffisante pour rendre ce type de système performant. Un second inconvénient est que ce type de système est bien évidemment dépendant de la lumière. En effet si l'énergie solaire arrivant à ce dispositif n'est pas suffisante ce dernier ne saura pas fonctionner. Dans une journée le soleil n'est pas toujours présent et pas toujours à l'intensité nécessaire au fonctionnement du système, seulement 6h de soleil par jour sont utilisables par le système [17]. C'est pour cela que ce dernier est associé à un système de stockage d'énergie. On peut également noter un désavantage pour le système de photosynthèse artificielle. Ce dernier nécessite l'utilisation de matériaux dont l'abondance est faible et qui coutent cher [9]. Cependant avec les avancées technologiques ce problème pourra être évité à l'avenir. Le gros avantage de ce type de système utilisant l'énergie solaire est qu'il peut permettre de stocker et de fournir de l'énergie de manière écologique car la matière première est essentiellement le soleil. Selon [18] on pourrait répondre aux besoins énergétiques de l'ensemble des habitants sur terre si seulement 0.1% de la surface de la terre était allouée à l'énergie solaire.

## 1.5 Energie chimique

### 1.5.1 Pile à combustible à hydrogène

Description générale :

Ce type de système est composé d'une pile à combustible qui va être associée à un système de stockage d'énergie. Il va ainsi nous permettre de fabriquer de l'électricité à partir d'hydrogène et d'oxygène ou bien encore d'utiliser de l'électricité et de l'eau afin de produire de l'hydrogène et de l'oxygène [9]. Dans cette partie nous allons nous concentrer sur la réaction nécessitant de l'électricité et de l'eau afin d'obtenir de l'hydrogène.

Principe de fonctionnement :

Afin de produire et de pouvoir stocker de l'énergie sous forme d'hydrogène et par la suite transformer cet hydrogène en électricité qui va ensuite être réinjectée dans le réseau électrique, ce système va être composé de 2 procédés. Le premier est un système de stockage d'hydrogène. Comme énoncé précédemment via l'électrolyse, une injection d'eau ainsi que de courant électrique vont permettre de fabriquer de l'hydrogène. Ce dernier va ensuite être stocké dans des récipients adaptés. Par la suite un système de pile à combustible sera nécessaire afin d'extraire l'énergie provenant des liaisons chimiques de l'hydrogène. Cette énergie sera extraite et transformée en électricité afin d'être réinjectée dans le réseau électrique en cas de demande [14].

Production d'énergie :

L'efficacité énergétique pour la production d'hydrogène via l'électrolyse est élevée et représente 70-75% [20]. La densité énergétique est comprise entre 0.6 et 1.2 kWh/kg [14].

Avantages et inconvénients :

Comme dans une grande partie des nouveaux processus de stockage d'énergie on retrouve des inconvénients liés au coût actuel de ces types de système. Dans le cas

présent le coût des piles à combustible ainsi que le coût du stockage d'énergie doivent être réduits. De plus ce type d'application trouvant des applications dans le secteur du transport doit encore être amélioré afin d'être rentable et utilisable à plus grande échelle car actuellement le coût de ce type de système reste plus élevé que celui des énergies fossiles [19] [20]. Un autre désavantage du stockage sous forme d'hydrogène est que ce dernier dans la culture populaire est perçu comme n'étant pas sûr ce qui pourrait mettre un frein à son utilisation. Cependant les accidents liés à l'hydrogène sont peu fréquents. Un avantage de ce type de procédé est qu'il peut être couplé à un processus de production d'énergie renouvelable afin d'obtenir l'électricité nécessaire à son fonctionnement. Par exemple l'énergie produite par des panneaux solaires ou encore l'énergie éolienne pourra servir à produire et stocker de l'hydrogène qui pourra servir plus tard. On a donc là aussi un système qui sera capable d'émettre très peu d'émissions de CO<sub>2</sub> [20].

## **1.6 Energie thermique**

### **1.6.1 Stockage d'énergie thermique (TES)**

Description générale :

Le stockage d'énergie thermique est un processus qui peut être utilisé à différentes échelles, que ce soit au niveau domestique ou industriel. La chaleur comme la fraîcheur peuvent être stockées dans des contenants isolés afin de ne pas perdre leur différence de température et peuvent être utilisées par la suite afin de générer de l'électricité via un moteur thermique [14]. Il existe 2 grands types de TES. : le stockage d'énergie thermique à basse et haute température. Dans le système de stockage à basse température on va retrouver l'aquifère ainsi que le cryogénique. Concernant le système de stockage à haute température ce dernier va être subdivisé en 3 catégories : sensible, latent et thermochimique [9]. Dans la suite de l'exposé, je vais brièvement décrire les différents procédés.

Principe de fonctionnement :

Stockage d'énergie à basse température :

Stockage d'énergie thermique aquifère à basse température : Dans ce type de stockage d'énergie, l'eau va être refroidie par un réfrigérateur et va ensuite être stockée dans une citerne. Lorsque la demande en énergie afin de refroidir un élément sera présente, le système va utiliser l'énergie de refroidissement précédemment stockée dans la citerne [14].

Stockage d'énergie cryogénique (CES) : Ce type de stockage d'énergie va faire intervenir du cryogène qui est en fait de l'air liquide et du nitrogène. Le processus va utiliser l'électricité produite en surplus lorsque la demande en électricité sera faible afin de produire de l'air liquide ou du nitrogène liquide qui va être stocké dans des citernes cryogéniques. Par la suite via l'utilisation d'un moteur thermique cryogénique, le cryogène stocké dans les citernes va pouvoir générer de l'électricité lors des périodes de plus forte demande [22].

Stockage d'énergie à haute température :

Stockage d'énergie thermique sensible (STES) : Dans ce type de stockage d'énergie le changement de température d'un moyen de stockage va permettre de stocker de l'énergie sous forme de chaleur. Les moyens de stockage peuvent être de la pierre, de l'eau, du sable, etc... [21]. Cependant l'eau est le plus rentable d'un point de vue énergétique car elle dispose d'une chaleur spécifique élevée [23]. Stockage d'énergie thermique latent : Dans ce type de stockage, l'énergie va être stockée et relâchée lorsqu'il va y avoir un changement de phase du matériel utilisé. Les changements de phase sont gaz, liquide et solide. Il faudra donc passer d'une phase à une autre pour qu'il y ait stockage et émission d'énergie [23].

Stockage d'énergie thermochimique : Dans ce type de stockage on va faire appel aux liaisons chimiques des matériaux utilisés afin de stocker de l'énergie. Le principe va être de casser et de reformer des liaisons chimiques afin de pouvoir stocker et relâcher de l'énergie. La capacité de stockage dépend en grande partie des propriétés endothermique et exothermique des matériaux utilisés. Pour rappel une réaction endothermique est une réaction dans laquelle de l'énergie va être absorbée et exothermique relâchée [23].

Production d'énergie :

Comme présenté précédemment, il existe plusieurs méthodes de stockage d'énergie thermique cependant l'efficacité énergétique de ces différentes méthodes n'est pas très élevée et est comprise entre 30 et 60%. L'efficacité du cycle thermique est quant à elle comprise entre 70 et 90% [14]. Il peut également être noté que les pertes d'autodécharge de ce type de technologie est comprise entre 0.05 et 1% ce qui est faible. La densité énergétique est comprise entre 80-500 Wh/l et l'énergie spécifique est comprise entre 80-250 Wh/kg ce qui est bon [9].

Avantages et inconvénients :

Un des avantages de ce type de technologie est son coût relativement faible, en effet ce dernier, pour l'ensemble des technologies présentées précédemment, est compris entre 3-60 \$/kW h [9]. Un autre avantage de ce type de système est qu'il peut être aussi bien adapté pour un usage domestique qu'industriel mais également dans un grand nombre de secteurs différents vu la diversité de variante qui existe. Il permet également de réduire l'empreinte écologique de l'homme car il peut être combiné avec des systèmes ne produisant pas de pollution tels que des panneaux solaires [21].

## Deuxième partie

# Perspectives

## 2 Perspectives futures

La faisabilité ainsi que la mise en pratique des différentes technologies de stockage d'énergie dépendent de leur type. Dans cette partie nous allons donc évaluer la faisabilité technique, ainsi que les éventuels risques liés à l'utilisation de chaque technologie, en fonction du type de stockage d'énergie étudié qu'il soit : mécanique, électrochimique, électrique, thermochimique, chimique ou bien thermique.

### 2.1 Energie mécanique

Les technologies stockage d'énergie mécanique sont des technologies qu'on peut considérer comme matures car les applications commerciales sont nombreuses. Par exemple une des premières applications commerciales du CAES était en 1978 en Allemagne [9], pour le PHS on retrouve des applications à partir de 1920 également en Allemagne et pour le volant d'inertie on peut retrouver des applications à partir des années 60-70. Ces différentes applications n'étaient pas à la base aussi développées que maintenant et ont connu de nombreux changements afin de pouvoir augmenter leur efficacité que ce soit en termes d'efficacité de cycle, de durée de vie ou bien encore de réduction du coût des composants.

Ce type de stockage d'énergie requiert, pour le PHS ainsi que le CAES, un espace important afin d'être mis en pratique. Concernant le PHS (pompage turbinage) pour être mis en pratique ce type de stockage va demander l'installation de 2 immenses réservoirs d'eau connectés l'un à l'autre afin de réaliser l'opération de stockage d'énergie via le procédé qui est présenté en détail dans la partie concernant le PHS. Il est à noter que le PHS représente à lui seul 99% du stockage de masse d'énergie ce qui en fait donc une

des technologies les plus importantes dans le domaine. Cependant bien que le stockage soit particulièrement efficace il existe des problèmes relatifs à son implantation qui pourraient freiner la mise en place de nouveaux projets. Comme présenté dans l'article écrit par Bjarne Steffen concernant les projets de PHS en Allemagne [24] on peut identifier à la fois des problèmes environnementaux, sociaux ou économique (la partie économique sera abordée dans le chapitre perspective économique). Les principales barrières à la multiplication des projets de PHS sont principalement liées à la grande taille de ce type d'installation. En effet, comme mentionné précédemment, afin d'obtenir un rendement conséquent du point de vue énergétique il faut trouver 2 bassins de grande taille, le premier est bien souvent un bassin présent dans la nature afin de limiter l'impact écologique. Cependant le 2ème bassin doit quant à lui être créé. La création de ce second bassin va dès lors poser des problèmes écologiques car cela impactera la conservation des espaces naturels. Une autre barrière sera celle de l'approbation publique. Comme le démontre le cas cité dans [24] les locaux pourraient avoir peur de subir une détérioration de leur qualité de vie suite à la réalisation de ce type de projet. Les exemples d'inquiétude des locaux présentés dans [24] peuvent concerner la prolifération de moustiques, la génération de mauvaises odeurs ou encore l'augmentation du risque de tremblement de terre.

Cependant des bonnes pratiques existent afin d'améliorer l'acceptation de ce type de projet. Les bonnes pratiques présentées dans [24] concernent aussi bien le temps de construction de l'infrastructure, de l'implication des citoyens dans la présentation et la réalisation de ce projet ainsi que dans les compensations non-financières. Ces bonnes pratiques peuvent permettre une meilleure acceptation de ce type de projet.

Pour le cas du CAES, ici encore cette technologie requiert un espace important pour être mise en place. Actuellement il n'existe que 2 CAES exploités dans le monde. Le premier se trouve en Allemagne dans la ville d'Huntorf et le second aux USA en Alabama dans la ville de McIntosh. Ces 2 dispositifs permettraient de stocker à eux deux 400MW (290 MW pour celui situé en Allemagne et 110 MW pour celui situé aux USA) [11].

Bien que les installations de CAES ne soient pas nombreuses, il existe plusieurs projets

de grande envergure qui sont en cours de développement. Le projet le plus important est celui d'un CAES situé à Norton en Ohio aux USA. Ce dernier pourra stocker 2700 MW pour une cavité d'un volume total de  $120\,000\,000\text{ m}^3$ . A terme ce projet représentera donc le CAES avec la capacité de stockage la plus importante au monde. D'autres projets sont également en cours de développement ou à l'étude dans divers pays comme le Japon ou l'Afrique du sud [10].

La faible présence de ce type d'installation sur le plan mondial alors que la technologie est mature peut s'expliquer par la complexité de trouver un endroit adapté pour sa mise en place mais aussi car ce dernier est dépendant des énergies fossiles. Cependant des recherches sont en cours afin de développer des nouveaux systèmes tel que le système CAES avancé adiabatique qui n'est plus dépendant des énergies fossiles. On peut également réaliser des systèmes CAES à plus petite échelle qui ne vont pas avoir besoin de la présence d'une cavité afin de stocker l'énergie et donc être plus facile à mettre en place [10]. L'espace nécessaire au bon fonctionnement du volant d'inertie n'étant pas aussi important que pour le PHS et le CAES, les barrières à son évolution future ne sont pas les mêmes que pour les 2 autres systèmes de stockage d'énergie mécanique. Dans ce cas les deux problèmes majeurs à l'implantation plus générale de ce type de système dans le futur sont la sécurité ainsi que les pertes énergétiques.

En ce qui concerne les volants d'inertie ces derniers sont également matures mais ont été peu utilisés depuis leur création ce qui fait qu'il reste beaucoup à faire pour rendre ces derniers concurrentiels face aux autres technologies qu'il existe. Cependant des améliorations importantes sur plusieurs des composantes de ce type de stockage sont en cours et les résultats sont prometteurs. Ainsi ce type de technologie à un avenir assuré dans les moyens de stocker l'énergie [50].

Sur base des analyses réalisées dans cette partie on peut donc conclure qu'il existe une perspective future pour chacun des 3 types de technologie. Cependant des améliorations technologiques sont nécessaires afin de permettre au CAES ainsi qu'au volant d'inertie de connaître un plus grand succès. A l'heure actuelle le PHS et le CAES sont les deux

seules technologies à pouvoir fournir un stockage d'énergie d'une grande ampleur, typiquement plus de 100MW par unité, ce qui en font des technologies très importantes dont l'avenir est assuré. Des études afin d'améliorer ces systèmes sont en cours et que des futurs projets sont également à l'étude ou sont planifiés.

## 2.2 Energie électrochimique

Les perspectives futures de ce type de stockage d'énergie via des batteries sont importantes. En effet, l'écologie étant de plus en plus importante aux yeux d'un nombre croissant de consommateurs le recours à des énergies fossiles pour alimenter en énergie leur voiture ou autre appareil devient de plus en plus problématique et donc les consommateurs deviennent de plus en plus réticents à faire usage de ces énergie fossiles. Dans cette situation les batteries peuvent apporter des solutions.

Cependant dans les paragraphes suivants nous allons uniquement faire référence aux batteries au Lithium étant donné que ces dernières sont les plus récentes et les plus abouties et dont l'avenir est le plus prometteur.

Cependant malgré leur avenir prometteur, il reste à ce type de batterie à régler des problèmes liés à sa sécurité mais aussi à son empreinte écologique. Au niveau de la sécurité le principal problème avec les batteries au Lithium est le risque de surchauffe qui peut mener à l'explosion de la batterie. C'est d'ailleurs pour cette raison que le transport de ce type de batterie est soumis à des restrictions importantes [28]. Pour pallier à cet inconvénient, différentes mesures ont été prises. Tout d'abord l'utilisation d'évent de sécurité qui va permettre au système de laisser échapper la pression lorsque cette dernière deviendra trop forte à l'intérieur du système. Ensuite des fusibles thermiques qui vont se déclencher lorsque la température augmentera au-delà d'un certain seuil et enfin des disjoncteurs qui vont permettre de réguler la température à l'intérieur de la batterie [29].

D'autre part son empreinte écologique n'est pas neutre. En effet, cette batterie va

nécessiter, comme son nom l'indique, l'utilisation de lithium qui est extrait en dépit du bon sens écologique et la plupart temps dans des pays en voie développement. Pour obtenir 1 tonne de Lithium il faut consommer 1 900 000 litres d'eau, ce qui représente une quantité énorme pour les pays qui produisent du Lithium car cette extraction va assécher des régions entières et ne va plus permettre aux agriculteurs d'exercer leur travail [30]. De plus le lithium n'est pas infini et donc à terme on pourrait se retrouver dans la même problématique que le pétrole.

Ce type de stockage d'énergie nécessitant peu de place, on pourra retrouver beaucoup d'applications utilisant ce type de technologie. Dans les paragraphes suivants je vais parler de l'application de ces batteries pour les voitures électriques.

Ce type d'application connaît un succès grandissant du fait, comme évoqué précédemment, de la conscience écologique mais également du fait que le prix des carburants devient de plus en plus élevé. Il devenait donc urgent de trouver une alternative. Les constructeurs automobiles se sont donc de plus en plus intéressés à ce sujet. Les premières voitures électriques furent développées par Général Motors en 1996. Les batteries au Plomb comportent des avantages comme leur longue durée de vie et leur fiabilité. Néanmoins ces dernières ne permettaient pas aux voitures de parcourir plus de 150km, elles étaient également très lourdes et prenaient beaucoup de place.

Ensuite la technologie a évolué vers les batteries au Nickel qui permettaient de parcourir plus de kilomètres et donc répondre à une attente majeure des utilisateurs. Cette technologie fût utilisée par le constructeur Toyota. Le problème de ce type de batterie quant à lui est qu'elles ne doivent pas être déchargées totalement car si c'est le cas ces dernières sont endommagées. En réponse à ce défaut, Toyota a créé des véhicules semi-hybrides, c'est-à-dire, des moteurs électriques couplés à des moteurs fonctionnant grâce aux combustibles. Ainsi lorsque le niveau de décharge pouvait endommager la batterie, le moteur fonctionnant au combustible prenait le relais.

Enfin afin d'aboutir à une voiture totalement électrique, les constructeurs se sont penchés sur les batteries au lithium qui étaient largement utilisées dans d'autres do-

maines tels que les panneaux solaires, la téléphonie, etc. . . Comme expliqué précédemment dans ce mémoire, les batteries au lithium sont plus performantes que les deux autres types de batterie. Elles ont une plus grande capacité ce qui va permettre aux voitures de parcourir plus de kilomètres, elles se rechargent également plus vite que les autres types de batterie. Il était donc naturel pour les constructeurs automobiles d'utiliser ces dernières dans la fabrication de leurs véhicules. Cependant ces batteries comportent néanmoins certains désavantages comme le fait que les matériaux pour les fabriquer sont plus chers que le nickel ou bien le plomb mais aussi que les batteries au lithium sont plus dangereuses. Différents articles mentionnent le fait qu'elles sont très sensibles à la chaleur et peuvent donc exploser en cas de trop forte augmentation de la température. Le point crucial pour que ce type de batterie soit plus largement utilisé dans le secteur de l'automobile est donc l'amélioration de la sécurité. Toyota a par ailleurs développé en 2009 un modèle hybride de véhicule fonctionnant via une batterie au lithium couplée à un moteur traditionnel fonctionnant via des énergies fossiles [25]. L'exemple de ce type de moteur est présent dans l'annexe 2. Alors qu'il reste encore des développements à réaliser et des problèmes à régler, les batteries au lithium représentent vraiment une solution afin de remplacer les moteurs traditionnels fonctionnant aux énergies fossiles. [25].

## **2.3 Energie électrique**

### **2.3.1 Super-condensateur**

Les super-condensateurs ont de nombreux avantages comme la haute efficacité pour le stockage d'énergie, le cycle de vie très élevé ainsi que la haute résistance aux charges/ décharges à 100%. Néanmoins ils ont également comme désavantages la faible densité énergétique ainsi qu'un taux de décharge élevé. C'est pour cela qu'actuellement le super-condensateur est utilisé dans des applications de bridging ainsi que dans des applications visant à stocker de l'énergie sur une courte période.

Le fait que la densité de puissance de ce système soit très élevée couplé au fait qu'il a une faible densité énergétique va le rendre utile pour des applications qui auront besoin d'une soudaine augmentation d'énergie, lorsque par exemple la demande en électricité va soudainement grimper. Néanmoins, et cela sera abordé lors de la partie économique, cette technologie est tributaire de son coût élevé. Il faudra donc que ce dernier diminue afin que cette application puisse se développer.

Les recherches et développements actuels ont pour but de pouvoir augmenter sa capacité, sa densité énergétique ainsi que sa dissipation énergétique qui est actuellement trop élevée [14]. Pour ce faire des études ont montré qu'afin d'augmenter sa capacité et sa densité de puissance il faudra recourir à l'utilisation de nanotubes de carbone à paroi unique. L'avantage de ce nouveau type de parois est qu'elle va être beaucoup plus fine que les membranes poreuses qui étaient précédemment utilisées. En effet la paroi en nanotube de carbone ne sera que de quelques diamètres atomiques ce qui va augmenter la surface pour les électrodes mais également diminuer drastiquement la distance entre les plaques et donc permettre une plus grande capacité ainsi qu'une plus grande densité de puissance pour le super-condensateur [14].

Des recherches également en cours afin de développer des pseudos et des condensateurs hybrides. Ces deux nouveaux types sont encore au stade de développement mais leurs perspectives énergétiques sont élevées.

### **2.3.2 Stockage d'énergie magnétique supraconductrice (SMES)**

Avec la multiplication des applications nécessitant de l'électricité et avec le besoin conjoint croissant de stabilité du réseau électrique, le SMES a un rôle à jouer. En effet ce dernier est particulièrement utilisé dans des applications permettant de donner une stabilité au réseau électrique. Etant donné que nous sommes de plus en plus dépendants du système électrique et qu'une coupure électrique peut causer de nombreux dommages, le SMES peut apporter une réponse concrète à ces problématiques. Ce dernier est en effet

capable d'apporter une grande quantité d'électricité en quelques millisecondes lorsque le système électrique lâche. Il est également capable d'améliorer la qualité du réseau électrique en éliminant les perturbations du réseau électrique [16].

Ce type d'application ne pourra jamais être utilisé afin de stocker l'énergie à grande échelle car d'un point de vue économique ce n'est pas rentable et d'un point de vue technique ce n'est pas réalisable dû à ses caractéristiques de puissance et d'énergie spécifique [16]. Cette application va donc s'orienter vers une utilisation d'amélioration de la qualité du réseau électrique mais également une utilisation de stockage d'énergie à petite échelle.

## **2.4 Energie thermochimique**

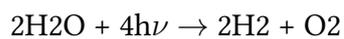
Les combustibles solaires peuvent être utilisés dans des applications que nous connaissons via des panneaux solaires qui vont fournir de l'électricité directement à des appareils ou via des liaisons chimiques qui vont stocker l'énergie solaire qui pourra être stockée et transportée plus facilement.

Comme énoncé précédemment les perspectives futures de cette application sont énormes. En effet, ce type d'application peut permettre de combler les besoins énergétiques de l'ensemble des humains sur terre en utilisant seulement une surface représentant 0.1% de la surface globale terrestre avec un rendement de 20% [18]. Ce système pourrait donc permettre de réduire à la fois notre empreinte écologique car il est très peu pollueur mais également de pouvoir faire une transition énergétique des énergies fossiles vers les énergies vertes. Par exemple les USA sont dépendants pour 85% des énergies fossiles en ce qui concerne leurs besoins énergétiques [17]. L'utilisation de l'énergie solaire pourrait donc d'une part réduire fortement leur dépendance à une source d'énergie finie et aussi permettre une diminution drastique de la pollution environnementale dans ce pays qui est un des plus gros pollueurs sur le plan international.

Par ailleurs, ce type d'énergie ne connaît pas de frontière contrairement aux énergies

fossiles actuelles qui sont concentrées dans certains pays et donc peut poser des problèmes géopolitiques en cas de guerre ou de tension menant certains états vers une pénurie de ressources. L'énergie solaire pour pouvoir être utilisée doit également être couplée à un système de stockage d'énergie qui est en fait des liaisons chimiques qui vont permettre à la fois le stockage mais également la diffusion de cette énergie. En effet l'énergie lumineuse n'étant pas présente tout au long de la journée il faudra la stocker lorsque qu'elle sera présente pour pouvoir l'utiliser en cas de pic de consommation.

Les 2 types de réaction qui vont permettre de produire des combustibles solaires vont être pour la première une décomposition de l'eau en oxygène et hydrogène via l'énergie lumineuse et la seconde quant à elle va utiliser de l'eau ainsi que du CO<sub>2</sub> afin de produire de l'hydrogène et de l'oxygène [17] :



Les perspectives pour ce type de stockage est particulièrement serein vu que le transport du méthane et de l'hydrogène pourront se faire via l'utilisation des infrastructures actuelles.

## 2.5 Energie chimique

Comme énoncé dans la partie détaillant les piles à combustible à hydrogène, l'hydrogène dans ce type d'application va être utilisé comme moyen de stockage. Afin de produire cet hydrogène on va recourir à l'utilisation d'énergie verte (énergie solaire, énergie éolienne, biomasse). Cependant actuellement les énergies vertes ne sont pas assez développées et répandues afin de combler la demande en hydrogène dans le cas où notre société utiliserait à grande échelle ce moyen de stocker l'énergie, c'est pour cela que la piste de l'énergie nucléaire afin de produire de l'hydrogène est envisagée. Cependant afin d'éviter l'utilisation d'énergie nucléaire qui à terme ne sera pas en accord avec les principes d'une société verte, le département énergie aux USA a montré qu'une al-

ternative à l'énergie nucléaire serait l'énergie solaire [20]. En effet comme expliqué dans la partie sur les perspectives économiques concernant les énergies thermochimiques, l'énergie solaire peut permettre de combler les besoins énergétiques de l'ensemble des humains sur terre en utilisant seulement une surface représentant 0.1% de la surface globale terrestre avec un rendement de 20%.

Une des perspectives les plus importantes des piles à combustible à hydrogène est l'application de ce dernier dans le domaine de la mobilité via l'utilisation de voiture pouvant se déplacer en utilisant de l'hydrogène. Actuellement peu de véhicules sont équipés de batteries à hydrogène car les constructeurs préfèrent actuellement développer des moteurs électriques. Cependant les moteurs électriques sont faits à partir de matières premières rares dont l'exploitation d'un point de vue écologique n'est pas respectueuse de l'environnement. Les batteries à l'hydrogène peuvent quant à elle répondre à la contrainte environnementale en ne nécessitant pas de matières premières rares lors de la fabrication et n'émettant pas de pollution. Ce type de batterie a particulièrement son importance dans le contexte actuel car le nombre de personnes vivant sur terre va croître de manière importante dans les années à venir et avec le développement de la classe moyenne dans les pays émergents le nombre de voitures va augmenter de manière exponentielle. Dès lors une alternative écologique aux voitures roulant grâce à des carburants fossiles et aux voitures électriques dont l'empreinte n'est pas neutre doit être trouvée pour permettre de restreindre la pollution mondiale mais également d'obtenir l'indépendance vis-à-vis des énergies fossiles qui vont devenir de plus en plus chères avec l'augmentation de la demande pour une production constante voire inférieure.

Le secteur actuel du transport est alimenté à 95% via des énergies fossiles et représente 17% des émissions globales de CO<sub>2</sub>. Par ailleurs des projections à 2030 montrent que le secteur du transport va augmenter de 20% les émissions de gaz à effet de serre. Il est dès lors important de trouver une alternative à cette problématique et les batteries à hydrogène peuvent permettre d'obtenir l'indépendance vis-à-vis des fluctuations des prix des énergies fossiles d'une part, mais d'autre part peuvent également permettre de

diminuer de manière drastique les émissions de CO<sub>2</sub> sur le plan international [19].

Cependant un obstacle à la mise en place des piles à combustibles pour les voitures est la durabilité de ce type de système. Le système actuel de moteur dans les voitures est conçu pour durer 5000 heures ce qui équivaut à plus ou moins 150 000Km or actuellement les performances des piles à combustibles diminuent fortement une fois les 1000 heures d'utilisation dépassées ce qui équivaut donc à seulement 30 000 Km ce qui n'est clairement pas assez pour le consommateur. A cela s'ajoute le fait que ces piles à combustibles doivent être capable de fonctionner de la même manière à des température pouvant osciller entre -40 et 40 °C ce qui n'est pas encore le cas car en deçà de -20°C les piles à combustibles ne fonctionnent pas [34].

## 2.6 Energie thermique

Stockage d'énergie à basse température :

Pour les 2 types de stockage d'énergie à basse température le fonctionnement est similaire et consiste à stocker de l'énergie lorsque la demande en énergie sera faible et relâcher cette énergie lorsque que la demande sera plus forte afin de pouvoir alimenter le réseau de manière continue. Ce type de système va être utile que ce soit dans le secteur de l'industrie autant que pour un usage domestique. Ce type de système peut même être utilisé dans les véhicules afin de fournir de l'air conditionné [14].

En ce qui concerne le stockage d'énergie thermique aquifère à basse température (ALTES), ce type de technologie est considéré comme une technologie développée ce qui veut dire que cette dernière a été commercialisée et qu'il en existe des applications. Cependant cette application, lorsqu'on la compare avec le stockage d'énergie cryogénique qui lui est encore considéré comme une technologie en développement, on peut d'ores et déjà dire que la densité énergétique, la durée de vie ainsi que le coût est plus élevé [14]. On peut également notifier que l'impact environnemental est également plus élevé pour le stockage d'énergie thermique aquifère à basse température. Dès lors aux vues

de ces conclusions les perspectives futures du stockage d'énergie cryogénique sont plus importantes.

Le stockage d'énergie cryogénique (CES) va utiliser soit de l'hydrogène liquide ou de l'air liquide et dans les applications c'est particulièrement l'air liquide qui va être le plus utilisé car son expansion lorsqu'il passe de la phase liquide à la phase gazeuse est plus élevée que pour l'hydrogène liquide ce qui va permettre d'avoir une densité d'énergie plus élevée. Un exemple d'application se trouve en Chine et permet de réduire le pic de consommation électrique de 6100kWh par mois ce qui permet de mieux réguler les pics de consommation énergétique et ainsi éviter la rupture du système [9].

Stockage d'énergie à haute température (H-TES) :

Concernant ces 3 types de technologies, à savoir le stockage d'énergie thermique sensible, stockage d'énergie thermique latent et le stockage d'énergie thermochimique, elles sont toutes considérées comme des technologies développées [14]. Et comme pour les technologies de stockage à basse température elles vont être utilisées afin de pouvoir fournir de l'énergie en cas de pics de la demande. Les applications vont donc être des applications de contrôle et de dispatching de l'énergie.

Ces technologies pouvant stocker une grande quantité d'énergie avec un taux d'auto décharge faible et avec peu de problèmes de fonctionnement vont donc trouver de nombreuses applications de grande envergure autour du globe.

Par exemple pour ce qui est du stockage d'énergie thermique sensible, on va retrouver une application de 15MW en Espagne qui va utiliser du sel dissous comme moyen de stockage d'énergie. On va également retrouver, par exemple, un projet de stockage d'énergie thermique latent en Angleterre qui pourra stocker l'équivalent de 5MW-15MWh [9].

Pour ce qui est du stockage d'énergie thermique latent, ce dernier va consister en un changement de phase, solide vers liquide par exemple, et ce genre d'application va particulièrement être utilisé dans les buildings car il peut fournir une densité de stockage énergétique élevée avec un petit réservoir et donc on peut aisément comprendre que ce

genre d'application est utile dans le contexte d'un building où la place disponible est réduite [14].

## **3 Perspectives économiques**

### **3.1 Energie mécanique**

#### **3.1.1 Volant d'inertie**

Les volants d'inertie devront faire face aux batteries comme principaux concurrents et plus précisément aux batteries au Lithium. Cependant le coût de ces dernières reste bien plus faible que le coût des volants d'inertie. Il faudra donc des innovations importantes au niveau des matériaux utilisés pour que le coût des volants d'inertie diminue et ainsi qu'ils puissent concurrencer les batteries au Lithium.

Cependant l'avantage principal des volants d'inertie est les perspectives de diminution des coûts combiné avec les perspectives d'augmentation de la performance sont très élevées. Les économies au niveau des matériaux peuvent se faire à travers différentes parties que ce soit du moteur, des paliers magnétiques que des composants électroniques [50].

#### **3.1.2 Stockage par pompage hydroélectrique (PHS)**

L'investissement de base pour mettre en place une solution de stockage PHS est élevé. En effet il faut acheter le terrain où l'on va mettre en place la pompe et réaliser les travaux nécessaires à sa construction et à l'élaboration de la structure en acier. Ces coûts représentent 70-80% des coûts totaux. Ensuite il faudra construire les machines mécaniques et électriques qui permettront au système de fonctionner et cela représente la dernière partie des coûts, soit 30% [24]. Le coût par kW sera donc de 1048 \$/kW.

Une étude a par ailleurs montré que s'il n'existe pas de taxe liée au réseau électrique ni de taxe sur l'eau et si les coûts d'investissement représentent 1000\$/kW, le rendement interne du PHS pouvait être de 4.9% ce qui est actuellement en dessous du rendement requis pour un investissement dans l'industrie [24]. Cependant avec le développement et la transformation du réseau électrique et l'utilisation de plus en plus grande des énergies renouvelables, le prix de ce type d'application avec les économies d'échelle va diminuer et donc devenir de plus en plus rentable.

### **3.1.3 Air comprimé en caverne (CAES)**

Comme expliqué précédemment pour que ce type de système soit le plus rentable possible, il faudra qu'une cavité géologique soit déjà adaptée pour permettre son installation à moindre frais.

Le coût en capital de ce type de stockage d'énergie est faible cependant ce dernier a également efficacité plus faible que d'autres moyen de stockage. La perspective économique de ce type de stockage va donc être liée à la présence ou non d'une cavité géologique déjà adaptée et va demander un investissement de base élevé.

## **3.2 Energie électrochimique**

En ce qui concerne les batteries, si on prend comme exemple l'application de la voiture électrique, qui sera la plus en vue dans les années à venir d'un point de vue économique, il faut que les états fassent la promotion des véhicules électriques roulant avec ce type de batterie. En effet acheter une voiture électrique actuellement coûte sensiblement plus cher qu'une voiture roulant à l'essence ou au diesel (ajouter article comparant les prix) et dès lors le marché des voitures électriques est plus petit que le marché des voitures roulant grâce aux énergies fossiles. Dès lors les constructeurs auront moins d'incitants à vouloir développer ce type de véhicule. L'Etat doit donc mettre en place une politique de subsides pour les personnes désireuses d'acheter des voitures électriques afin de booster

les ventes et d'inciter les constructeurs automobiles à investir plus d'argent dans les recherches et développements de ce type de batterie [26].

Nous reviendrons dans le point « Stockage d'énergie et environnement » sur les raisons d'opter pour une voiture électrique. Mais d'un point de vue purement économique un autre problème se pose. Les gouvernements tendent à vouloir obtenir une indépendance au niveau de l'approvisionnement de leurs ressources pour pouvoir faire face en cas de crise économique majeure. Pour le moment les états occidentaux sont majoritairement dépendant des pays du Moyen-Orient en ce qui concerne l'approvisionnement de pétrole. En effet dans [27] on voit que les Etats-Unis, l'Asie ainsi que l'Europe sont les plus gros consommateurs de pétrole avec 78.6% de la demande mondiale alors que ces derniers ne disposent que de réserve en pétrole à hauteur de 10% des réserves mondiales. On peut observer le raisonnement inverse avec les pays détenteurs de la part importante des réserves mondiales qui eux ne sont consommateurs que pour 15.5% de la demande mondiale. Dès lors cette répartition inégalitaire des ressources peut provoquer en cas de choc pétrolier de fortes perturbations dans le fonctionnement des économies occidentales. Par ailleurs l'article [27] mentionne également que les pays exportateurs de pétrole sont les plus instables politiquement ce qui ne fait que renforcer le fait qu'il faut que les pays occidentaux développent une indépendance vis-à-vis de ce besoin.

Dès lors avec l'utilisation des batteries pour nos voitures nous passerions d'une dépendance vis-à-vis du Moyen-Orient vers une dépendance de l'Asie pour les batteries [25].

D'autres critères ont également un impact dans le choix de véhicules électriques par les consommateurs. Ainsi une explosion du prix du pétrole va avoir pour conséquence que les ménages chercheront une alternative afin de garder leur pouvoir d'achat et décideront d'opter pour une voiture électrique. Toutefois il faut que cette augmentation du prix du pétrole ne soit pas suivie d'une augmentation du prix de l'électricité sinon le problème reste le même [26].

## **3.3 Energie électrique**

### **3.3.1 Super-condensateur**

Comme énoncé précédemment sur le plan économique, le super-condensateur n'est pas très bien positionné du fait de son coût élevé. Ce dernier est de 20 000\$/kWh ce qui est plus élevé que d'autres technologies de stockage d'énergie qui ont des applications similaires. Il faut donc que le prix de ce type d'application puisse être réduit afin que le développement de cette technologie se fasse. Le prix peut être réduit comme dans de nombreuses autres applications par la recherche et développement qui vont conduire vers l'utilisation de matériaux moins chers et dont les propriétés chimiques et physiques seront les mêmes ou plus efficaces. Selon [2] les modifications permettant de réduire le coût doivent se faire au niveau du carbone, électrolyte et des champs de séparation.

Actuellement le super-condensateur n'est utilisé que dans des applications dont les kW sont inférieurs à 100 étant donné que sa capacité est faible, ce qui représente assez peu d'applications. Néanmoins d'autres applications sont en cours de conceptions et de tests [31].

### **3.3.2 Stockage d'énergie magnétique supraconductrice (SMES)**

Le gros avantage de ce type de système est que le délai de mise en œuvre est très court comparé aux autres technologies de stockage d'énergie. Ainsi ce type de stockage d'énergie pourra répondre à la demande des clients immédiatement ce qui n'est pas le cas de tous les autres types de stockage d'énergie. De plus le round-trip efficiency est très élevé, de l'ordre de 90% ce qui rend cette technologie très efficace.

Le fait que ce type de technologie peut répondre à une demande soudaine est particulièrement intéressant pour certaines entreprises qui ne peuvent pas se permettre d'avoir une coupure de courant dès lors ces dernières seront prêtes pour améliorer leur courant à payer un prix supplémentaire pour s'assurer qu'il n'y ait pas de coupure. Ty-

piquement ce prix va être calculé en fonction du nombre de pics de consommation dont l'entreprise fait face. Ce qui va permettre au SMES de vendre son énergie plus chère et donc d'être rentable.

### 3.4 Energie thermochimique

D'un point de vue économique il est important de considérer que le meilleur moyen de stocker l'énergie provenant de l'énergie solaire est via les combustibles solaires. Donc via la décomposition du  $H_2O$  en  $H_2$  et en  $O_2$ . Ce point est essentiel car ce dernier permet d'utiliser les infrastructures qui sont actuellement utilisées pour transporter d'autres types d'énergie et de fait réduit d'un coût considérable l'utilisation et le fonctionnement de ce type de stockage d'énergie. Bien que la densité énergétique du  $H_2$  est de loin plus faible que celles des énergies fossiles du type pétrole, le fait est que le combustible solaire est un type d'énergie qui ne connaît pas de limite de production et permet également une utilisation respectueuse de l'environnement en fait une énergie qui a un avenir bien plus prometteur que les énergies fossiles. Les perspectives énergétiques de ce type d'application étaient jusqu'il y a peu pas très élevée, de l'ordre de 2-6% d'efficacité énergétique, mais maintenant cette efficacité a augmenté jusqu'à 12% et continue d'augmenter via les recherches et développement réalisées dans ce secteur. Cependant actuellement la production d'hydrogène à partir d'énergie solaire est 10 fois plus chère que la production directe d'électricité à partir d'énergie solaire [33]. Cependant les perspectives de ce type de stockage d'énergie via production d' $H_2$  sont bien plus élevées car comme énoncé précédemment le prix des carburants traditionnels vont qu'augmenter et donc une alternative devra être trouvée et les combustibles solaires représentent cette alternative. Des progrès en recherche et développement devront donc être réalisés et à moyen-terme ce type de technologie sera plus rentable que la production d'électricité via l'utilisation de panneaux solaires [33].

Les perspectives énergétiques futures en termes de consommation énergétique vont

fortement s'accroître et le besoin d'énergie provenant des énergies renouvelables va devoir s'accroître pour répondre à cette demande plus importante mais également pour permettre une diminution de la pollution liée à cette hausse de la demande. On estime que les énergies renouvelables devront être de l'ordre de 5-10 TW dans les 20 années à venir [33]. Ce chiffre de 5-10 TW implique une proportion de 30-40% de l'énergie produite provenant des énergies renouvelables dont 10-25% proviendraient des énergies solaires. C'est dans ce contexte que les combustibles solaires peuvent apporter une réponse à ce problème.

On pourrait dès lors se demander pourquoi ne produit-on pas uniquement de l'électricité avec l'énergie solaire car cette dernière a un rendement supérieur à celui de la production de combustibles solaires ? La réponse est dans le fait que la consommation électrique ne représente que 1/3 de la consommation totale d'énergie [33] et donc les combustibles solaires peuvent permettre de répondre à la demande restante.

Actuellement le coût de production d'H<sub>2</sub> à partir d'H<sub>2</sub>O via l'énergie solaire est de l'ordre de 0.2 euros/kWh en comparaison à 0.02 euros/kWh pour la production de gaz naturel [33]. La production d'H<sub>2</sub> via l'énergie solaire n'est pas rentable en comparaison à d'autres technologies. Cependant les combustibles solaires sont d'une technologie récente qui n'est encore qu'à ses débuts et dont les processus ne sont pas encore optimisés, il est ainsi normal qu'elle soit moins rentable qu'une technologie qui existe depuis des décennies et qui est déjà optimisée. Il faut investir en recherche et développement afin de pouvoir optimiser la production d'H<sub>2</sub> via énergie solaire. Par ailleurs une étude présentée dans [33] nous dit que ce type de technologie sera compétitif dans les 10-20 ans à venir.

Concernant la production de combustibles solaires à partir de CO<sub>2</sub> les données qu'on a pour l'instant ne nous permettent pas de définir le coût de ce type de production. Cependant les perspectives économiques de ce système sont très élevées. En effet, ce dernier va permettre de ne plus produire de pollution mais va également pouvoir utiliser la pollution produite, sous forme de CO<sub>2</sub>, par les autres entreprises afin de pouvoir produire à

son tour des hydrocarbures qui vont être réinjectés dans le réseau [32]. Il va donc en fin de compte réduire la pollution générale. Sachant que l'écologie est une thématique de plus en plus importante dans notre société et sachant que la pression sur les entreprises via des politiques de taxe plus élevée en fonction du niveau de la pollution, ce système va permettre de réduire cette pression fiscale.

### **3.5 Energie chimique**

Actuellement le coût de ce type de moteur est de l'ordre de 25-35 euros/kW. Il est relativement élevé ce qui ne le rend pas accessible par rapport aux autres types de technologie. Les composants majeurs qui font que ce coût est élevé sont : électro-catalyseur, la membrane et les plaques bipolaires. A cause de ces différents éléments onéreux les piles à combustibles sont 4-5 fois plus chères que pour d'autres technologies. Ces calculs ont été faits en tenant compte des économies d'échelle qu'on pourrait appliquer à ce type de technologie [34].

Comme expliqué brièvement dans la partie perspective future concernant les piles à combustibles à hydrogène, ces dernières vont permettre aux pays ne possédant pas de pétrole d'obtenir une indépendance financière vis-à-vis des pays possédant les gisements de pétrole. Cette indépendance financière n'est pas à négliger car, pour reprendre l'exemple énoncé dans la partie perspective future, rien que le secteur du transport par exemple est dépendant à 95% du pétrole. Une augmentation drastique des prix du pays exportateur pourrait mettre à mal la mobilité dans un pays trop dépendant de ce dernier. En effet cette augmentation de prix impacterait directement les populations. Dans le pire des cas si une instabilité politique s'installait dans les pays exportateurs de pétrole, les pays dépendants pourraient alors se retrouver sans pétrole et donc sans source d'alimentation pour le secteur de la mobilité qui en est extrêmement dépendant. Ici uniquement le secteur de la mobilité est mentionné car il est un des plus dépendants mais d'autres secteurs seraient bien évidemment également touchés par cette pénurie.

### 3.6 Energie thermique

Stockage d'énergie à basse température :

Pour ce qui est du stockage d'énergie à basse température, le stockage d'énergie thermique aquifère à basse température qui est au stade de technologie développée, a un coût au kWh plus élevé que le stockage d'énergie cryogénique qui est encore au stade de développement. Dès lors ce dernier est plus intéressant sur le plan économique. Le coût au kWh du stockage d'énergie thermique aquifère est de 20-50\$/kWh tandis que celui du stockage d'énergie cryogénique est de 3-30\$/kWh [14].

Stockage d'énergie à haute température :

Le coût pour les différentes technologies du stockage d'énergie à haute température est compris entre 30 et 60\$/kWh [14]. D'une manière générale l'ensemble des technologies de stockage d'énergie thermique vont avoir pour but de diminuer le prix de l'énergie car ce type de système va stocker l'énergie lorsque le prix de cette dernière sera faible pour éviter un coût élevé lors des pics de demande. Ils vont également permettre de diminuer la demande car ils pourront être couplés à un système de panneaux solaire ou bien d'éolienne. On retrouve d'ailleurs cette combinaison entre stockage d'énergie thermique sensible et énergie éolienne en Espagne [14]. Par le biais de cette diminution de consommation mais également d'utilisation des moyens traditionnels pour chauffer on va pouvoir remettre à plus tard l'achat d'une nouvelle centrale pour chauffer un bâtiment par exemple. Et il va également combler la demande de tout le monde en cas de pics de consommation grâce à sa capacité de stockage.

## Troisième partie

# Analyse

## 4 Analyse de la demande d'électricité actuelle et projection de la demande de stockage d'énergie en 2030 en Belgique

### 4.1 Introduction

Dans le but d'estimer la demande en énergie de stockage à l'horizon 2030 il nous faudra d'abord réaliser différentes analyses nécessaires afin de la déterminer. On va tout d'abord analyser la demande en électricité actuelle ainsi que l'évolution de cette demande en Belgique.

Dans un deuxième temps on va analyser si l'offre actuelle permet de combler cette demande et quel est son évolution attendue à l'horizon 2030. Dans un troisième temps, on va déterminer la demande en énergie renouvelable car cette dernière est un indicateur de la demande en énergie de stockage par le biais du VRE «variable energy storage ».

Après avoir déterminé le VRE nous allons enfin pouvoir estimer la demande en énergie de stockage dont la Belgique va avoir besoin à l'horizon 2030. Cette demande est essentielle afin d'estimer au mieux les solutions qui devront être mises en place afin de la satisfaire.

### 4.2 Evolution de la demande d'électricité en Belgique

La consommation d'électricité en Belgique en 2016 était de 83.2 TWh. La part de consommation ainsi que l'évolution entre 2007 et 2016 de chaque secteur est représenté

dans l'annexe 8. Dans ce schéma on peut constater que le secteur consommant le plus d'électricité est celui de l'industrie avec environ 40 000 GWh suivi du secteur des services publics et commerciaux avec environ 25 000 GWh. Le secteur résidentiel quant à lui représente 20 000 GWh, il est suivi du secteur des transports et de l'énergie avec 2000 GWh chacun.

La consommation d'électricité entre ces différents secteurs est donc la suivante : secteur de l'industrie 46.5%, services commerciaux et publics 28.5%, secteur résidentiel 22.7%, secteur des transports 2% et secteur de l'énergie 2%. La proportion de demande entre ces différents secteurs reste à peu de chose près constante comme le montre le graphique sur part de consommation ainsi que l'évolution de chaque secteur présenté dans l'annexe 8. Le pic de consommation électrique est compris entre 13GWh et 14GWh.

### **4.3 Evolution de l'offre d'électricité en Belgique**

La production d'électricité en Belgique en 2016 était de 84.4 TWh. Alors que les années précédentes cette offre dépassait les 90TWh car différentes installations nucléaires étaient en fonctionnement. Le nucléaire permet de produire le plus d'électricité en Belgique car il représente 51.6% de la production globale, 26,2% pour le gaz naturel, 16.8 pour les sources d'énergies renouvelables et moins de 10% pour les autres sources d'énergies. La production d'électricité en fonction de la source et le cours de l'évolution entre 2007 et 2016 sont présentés dans l'annexe 9.

On peut également voir dans le rapport que la part des énergies renouvelables dans la production d'électricité en Belgique n'est que de 16.8%. Ce chiffre doit donc être augmenté car les objectifs de l'Union Européenne en matière d'énergie renouvelable et d'émission de CO2 veut que la part d'énergie renouvelable dans la production d'électricité représente 27%.

#### 4.4 Projection de la demande d'électricité à l'horizon 2030

Avant d'effectuer une projection de la demande en électricité il est important d'effectuer des projections macroéconomiques et démographiques afin de pouvoir estimer cette variation de la demande à l'horizon 2030.

Selon le Bureau fédéral du Plan le taux de la croissance annuel moyen entre 2015 et 2030 de la population va être de 0.4%, 0.6% pour le nombre de ménages, 1.4% pour le PIB. Ce dernier a également fait des estimations des coûts énergétiques de certains secteurs. Ainsi il estime que le prix du gaz naturel va passer de 21.8 à 31.3 €/MWh, le prix du charbon de 7 à 14.1 €/MWh, le prix du carbone sur le marché ETS va passer de 7.5 à 33.5 euros/t CO<sub>2</sub>. La TVA sur l'électricité va quant à elle rester constante 21%. ETS signifie « European Emissions Trading System » qui est en fait un système d'échange de quotas d'émissions.

Par ailleurs il est important de préciser qu'à terme les centrales nucléaires belges vont fermer à l'horizon 2030. La fermeture de Doel 1 et 2 est prévue pour 2025 quant à Tihange son fonctionnement a été prolongé en 2013 pour 10 ans. Aucun investissement n'est prévu à l'horizon 2050 pour les centrales au charbon car jugées trop polluantes. Il faudra penser à développer des alternatives à ces ressources d'énergie car pour rappel l'énergie nucléaire représente actuellement 51.6% de la production électrique en Belgique. Le charbon quant à lui représentait 3.1% de la production électrique. Selon le Bureau fédéral du Plan il est prévu que la consommation d'électricité entre 2015 et 2030 passe de 81.7 TWh à 90 TWh, soit une augmentation de 0.6%. La répartition de cette évolution entre les différents secteurs (industrie, résidentiel, tertiaire, transport) est présentée dans l'annexe 10.

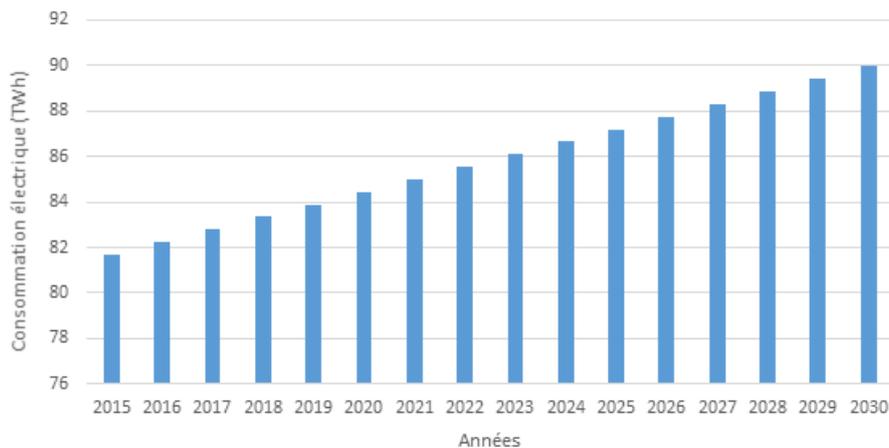


FIGURE 1: *Evolution de la consommation d'électricité en Belgique*

#### 4.5 Projection de la demande en énergie de stockage à l'horizon 2030

La demande d'électricité de stockage étant liée à la demande d'énergie renouvelable, nous devons d'abord estimer la proportion d'énergie renouvelable actuelle et à l'horizon 2030 [37]. En effet cette dernière nous montre que la taille du système de stockage d'énergie augmente de manière linéaire avec la pénétration des VRE qui est le « variable energy storage » qui représente en fait les sources d'énergies renouvelables. Cependant le stockage d'énergie décroît au-delà d'un certain seuil.

En Belgique la part de l'offre d'électricité sur le marché est presque équivalente à la part de la demande en électricité. Nous allons donc faire l'hypothèse qu'il en est de même pour l'offre et la demande d'énergie renouvelable.

Actuellement la production d'énergie renouvelable représente 16.8% de la production d'électricité en Belgique. La Bureau Fédéral du plan nous indique qu'en 2030 cette production d'énergie renouvelable sera comprise entre 30% et 40% selon les scénarios, nous allons donc évaluer ce dernier à 35% [38].

A partir de ces productions d'énergies renouvelables on sait grâce à [37] estimer la

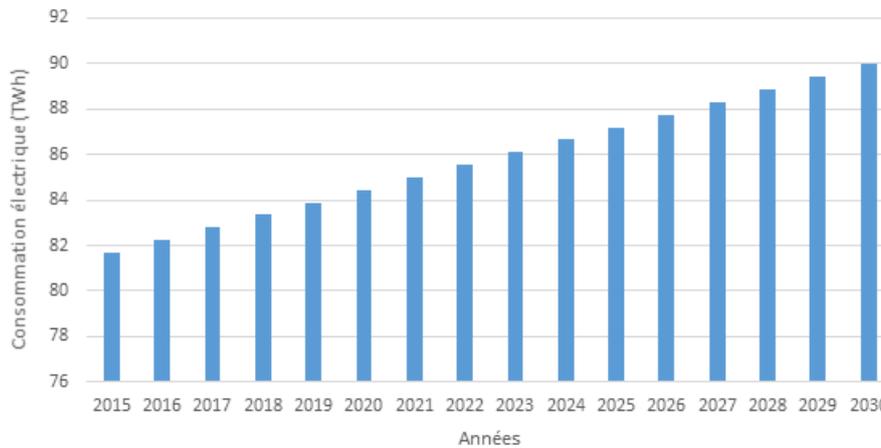


FIGURE 2: *Evolution de la part de l'offre d'énergie renouvelable en Belgique*

demande d'énergie de stockage. En effet via le schéma mettant en relation l'intégration des énergies renouvelables avec la capacité énergétique du réseau on voit que lorsque la pénétration des énergies renouvelables dans la part totale de la production d'énergie est de 45%, la demande en énergie de stockage est estimée être en 30 et 35% [37].

Sachant que lorsque ce taux de pénétration est inférieur à 50%, la relation entre demande en énergie de stockage et demande en énergie renouvelable suit une relation linéaire, dès lors on sait estimer notre demande en énergie de stockage actuelle.

Le taux de pénétration actuelle des VRE étant de 16.8% on peut donc estimer par une règle de trois la demande en énergie de stockage actuelle comme étant comprise entre 11.2 et 13.1%. On sait également estimer la demande en énergie de stockage à l'horizon 2030 car la VRE à l'horizon 2030 sera d'approximativement 35%, dès lors la demande en énergie de stockage sera comprise entre 23.3 et 27.2%. On a estimé une évolution linéaire de la demande en énergie renouvelable et donc également une évolution linéaire de la demande en énergie de stockage à l'horizon 2030.

On peut donc voir que la part de la demande en énergie de stockage en 2016 était comprise entre 11.2 et 13.1% ce qui représente pour une demande totale d'électricité de 84 TWh, 9.15 à 10.75 TWh. Et cette dernière en 2030 va être comprise entre 23.3 et 27.2%

pour une demande totale de 90 TWh soit 20.97 TWh à 24.48 TWh.

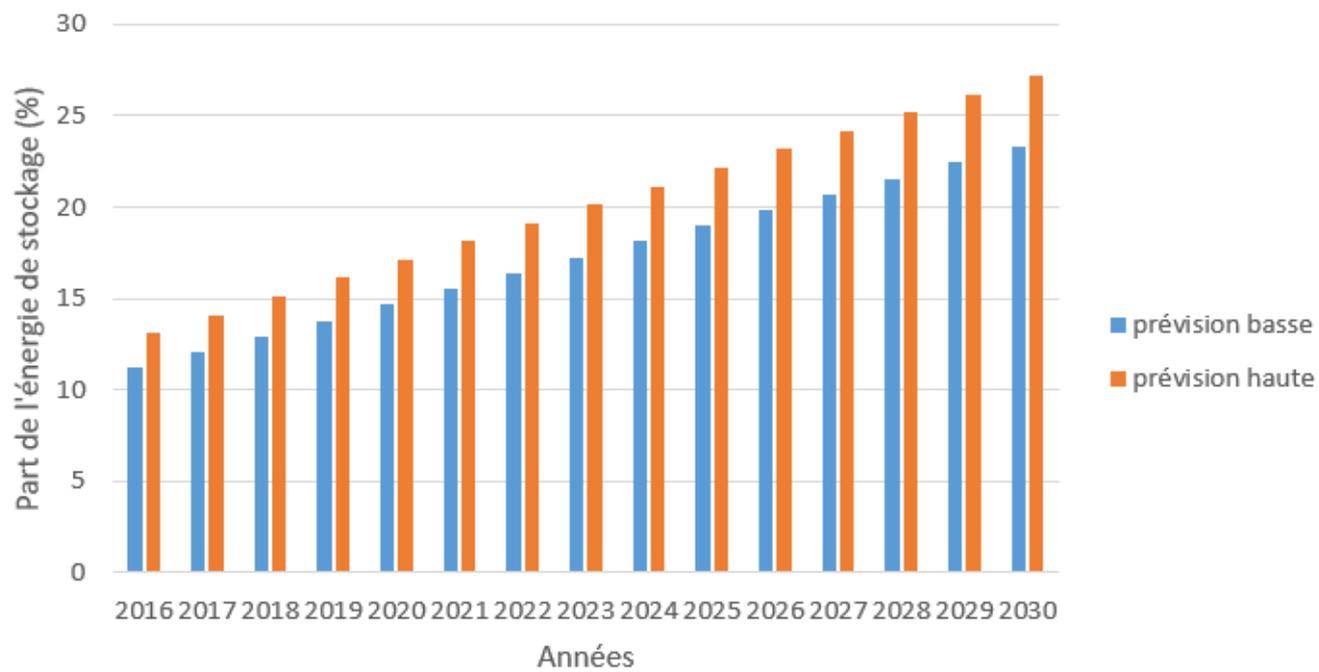


FIGURE 3: Evolution de la demande en énergie de stockage en Belgique

TABLE 1: *Prévision basse et haute de la demande en énergie de stockage en Belgique à l'horizon 2030*

Année	Prévision basse (TWh/an)	Prévision haute (TWh/an)
2016	9.15	10.75
2017	9.99	11.77
2018	10.83	12.78
2019	11.68	13.8
2020	12.52	14.81
2021	13.37	15.83
2022	14.21	16.84
2023	15.05	17.86
2024	15.90	18.88
2025	16.74	19.89
2026	17.59	20.91
2027	18.43	21.93
2028	19.28	22.94
2029	20.12	23.96
2030	20.97	24.98

## **5 Technologies pouvant apporter une réponse à l'augmentation de la consommation d'électricité à l'horizon 2030**

Il existe différents types de solution en matière de stockage d'énergie qu'on a pu analyser dans les parties précédentes, il faut maintenant pouvoir sélectionner les plus pertinentes dans notre analyse en fonction de plusieurs critères tel que la maturité de la technologie, le coût, les performances énergétiques ou bien encore l'impact environnemental.

Afin de pouvoir répondre à cette partie on va se référer aux 2 tableaux présents dans les articles [9] et [14] ainsi qu'aux parties sur les perspectives économiques et perspectives futures. On peut établir la liste des technologies pouvant permettre de répondre de la manière la plus efficace à l'augmentation d'électricité de stockage à l'horizon 2030.

## **5.1 Répartition des différents types de stockage d'énergie selon la capacité**

Avant de pouvoir commencer à analyser quel type de technologie de stockage nous permettra d'apporter la réponse la plus adéquate, il faut classer ces différents moyens de stockage selon leur capacité. En effet un seul type de stockage ne sera pas idéal dans tous les types de situation, il faut donc une combinaison de moyen de stockage afin de répondre à l'augmentation de la demande en matière de stockage d'énergie à l'horizon 2030.

On peut classer ces derniers en 2 catégories : moyenne et grande capacité de stockage d'énergie. Et selon le tableau de comparaison des différentes technologies abordées dans ce mémoire on peut faire la répartition suivante :

Les technologies disposant d'une grande capacité sont le PHS et CAES.

Les technologies disposant d'une capacité moyenne sont le volant d'inertie, stockage batterie, condensateur et super-condensateur, SMES, piles à combustibles à hydrogène, AL/HT-TES et CES.

N'ayant pas assez de données sur les combustibles solaires nous n'allons pas considérer ces derniers dans la suite de notre analyse.

## **5.2 Disponibilité**

Comme présenté dans le tableau de comparaison des différentes technologies, les technologies étudiées peuvent être de différentes maturités. Certaines ne seront peut-être pas disponibles à la commercialisation ou pour d'autres les coûts seront trop élevés au kWh du fait de leur commercialisation trop précoce et de leur optimisation non encore aboutie et de ce fait ne seront pas rentables financièrement.

Tout d'abord on peut distinguer après analyse de ce tableau qu'il existe 4 types de maturité :

Les technologies matures, commercialisées, au stade de démonstration ou récemment commercialisées et en développement. Il est évident que pour une analyse à l'horizon 2030 les technologies en développement ne seront pas retenues dans notre analyse.

Dès lors les combustibles solaires sont une technologie trop jeune pour pouvoir être inclus dans notre analyse des besoins en énergie de stockage à l'horizon 2030. Par contre les piles à combustible à hydrogène étant une technologie actuellement appliquée en Belgique ces derniers seront retenus

Au niveau des technologies au stade de démonstration ou récemment commercialisées il y a plus de nuances.

On peut voir suite à notre analyse qu'une technologie comme le volant d'inertie qui a été développée dans les années 60 et n'a pas eu un grand succès car ses performances n'étaient pas assez élevées car à l'époque les matériaux utilisés n'étaient pas les mêmes que de nos jours, a connu un regain de popularité récemment mais il reste beaucoup de progrès technologique à faire pour qu'il soit applicable à cette analyse.

Concernant le SMES c'est une technologie développée très tôt, dans les années 70, mais qui à ce jour n'a pas assez connu de développement technologique ni d'application ou de projet pour être appréciée dans notre analyse [16].

Dans le cas des batteries aux Lithium, bien que ces dernières soient encore au stade de démonstration, il existe déjà une gamme de ce type de batteries largement utilisées et commercialisées comme par exemple dans des voitures électriques. Il est donc adéquat de les inclure à notre analyse.

Pour ce qui est des technologies de stockage d'énergie thermique on va considérer uniquement les technologies HT-TES et plus particulièrement le STES qui est le plus avancé et le plus développé dans ce type de technologie de stockage d'énergie. De plus ce dernier est à la fois utilisée dans un cadre domestique comme industriel. Les autres types de stockage d'énergie thermique ont encore besoin d'être développés et leur coût diminué afin de pouvoir rentrer dans cette analyse [43].

Sur base de la disponibilité probable des technologies on peut maintenant évaluer l'aspect économique, performances énergétiques mais également celui du respect de l'environnement.

### 5.3 Coût actuel

Afin de comparer sur le plan économique les différentes technologies, on va regrouper toutes les informations économiques les concernant dans un tableau sur base des tableaux présents dans les articles [9] et [14].

TABLE 2: *Coût des différentes technologies de stockage d'énergie*

Nom	Maintenance et fonctionnement (\$/kWh/an)	\$/kWh	\$/kW
PHS	3 [9]	5-100 [14]	600-2000 [14]
CAES	19-25 [9]	2-50 [14]	400-800 [14]
Batterie Pb	50 [9]	200-400 [14]	300-600 [14]
Batterie Ni	20 [9]	800-1500 [14]	500-1500 [14]
Batterie Li	/ [9]	600-2500 [14]	1200-4000 [14]
Condensateur	13 [9]	500-1000 [14]	200-400 [14]
Super-condensateur	6 [9]	300-2000 [14]	100-450 [14]
STES	/ [9]	30-60 [14]	/ [14]
Pile à combustible à hydrogène	/ [9]	2-15 [9]	500, 1500-3000 [9]

Lorsque l'on regarde ce tableau on constate que les technologies pour lesquelles le coût par kWh est le plus faible est celle concernant les technologies dont la capacité de stockage est la plus élevée. En effet le PHS, CAES sont les technologies développant les capacités de stockage les plus élevées. On retrouve également le STES et la pile à combustible à hydrogène.

Ensuite on va retrouver les différents types de batteries et de condensateurs. Le tableau va également nous présenter le coût de maintenance de ces différents types de stockage, cependant ce dernier n'est pas encore disponible pour tous les types de technologie car certaines n'ont pas encore assez d'applications commerciales.

Cependant ne sélectionner que des technologies de grande échelle pour la suite de notre étude serait une aberration car tous les types de secteurs auquel s'applique le stockage d'énergie n'ont pas les mêmes besoins. On va donc devoir faire un mix entre ces différentes technologies afin de répondre au mieux à l'évolution de la demande.

## 5.4 Evolution coût

Les estimations de coût à l'horizon 2030 sont faites via des études sur les stockages d'énergie à l'horizon 2030 [39] [40].

Cette étude va nous donner les estimations de coûts des différentes technologies qu'on va prendre en considération dans notre analyse à l'horizon 2030.

Tout d'abord pour ce qui est du PHS on peut voir que le coût n'évoluera pas à l'horizon 2030 et c'est logique car c'est actuellement une technologie mature. Pour ce qui est du CAES on peut observer que le coût en \$/kWh va diminuer de l'ordre de 10\$/kWh à l'horizon 2030.

Au niveau des batteries on peut observer que la tendance générale va être à la diminution de prix. Ici on va se concentrer uniquement sur le type de batterie le plus prometteur à savoir les batteries au Lithium. Cependant afin d'affiner notre analyse nous allons considérer les batteries du type nickel cobalt aluminium (NCA) vu que ce sont les batteries dont l'avenir est le plus prometteur dans divers secteurs comme par exemple le secteur du transport. Actuellement le coût de ce type de batterie est compris entre 200 et 800 \$/kWh et ce dernier sera compris entre 50-400 \$/kWh en 2030.

Le rapport IRENA table en ce qui concerne le coût des batteries au Lithium sur une diminution par 3 de leur prix passant de 600\$/kWh à un coût de 200\$/kWh [39]. Comme la technologie du STES est mature il n'est pas prévu que son coût varie à l'horizon 2030 et en ce qui concerne la pile à combustible à hydrogène, il n'est pas prévu que son coût diminue à l'horizon 2030 non plus [19].

## 5.5 Performances énergétiques

Pour comparer les performances énergétiques on va regrouper les informations nécessaires que contiennent les tableaux présents dans [9] et [14]. La vaste majorité des informations présentées dans ce tableau proviennent du paper [9]. Uniquement ceux indiqués dans le tableau proviennent du paper [14] et [49].

TABLE 3: *Performances énergétiques des différentes technologies de stockage d'énergie*

Nom	Capacité énergétique (MWh)	Puissance (MW)	Densité énergétique (W/L)
PHS	500-8000	100-5000	0.5-1.5
CAES	580-2860	1000	0.5-2
Batterie Pb	0.001-40	0-40	100-400
Batterie Ni	6.75	0-40	80-600
Batterie Li	0.004-10	0-100	1500-10000
Condensateur	/	0-0.05	100000+
Super-condensateur	0.0005	0-0.3	100000+
STES	2800-3000 [49]	0-60 [14]	/
Pile à combustible à hydrogène	39	<50	500+

TABLE 4: *Performances énergétiques des différentes technologies de stockage d'énergie*

Nom	Durée de vie (années)	Décharge journalière (%)	Efficienc e décharge (%)	Temps de réponse
PHS	40-60	Très faible	87	Minutes
CAES	20-40	Faible	70-79	Minutes
Batterie Pb	5-15	0.1-0.3	85	Millisecondes
Batterie Ni	10-20	0.2-0.6	85	Millisecondes
Batterie Li	5-15	0.1-0.3	85	Millisecondes
Condensateur	1-10	40	60-70	Millisecondes
Super-condensateur	5-15	0.05-1	/	/
STES	5-15 [14]	0.05-1 [14]	/	/
Pile à combustible à hydrogène	5-15	Très faible	59	Secondes

Tout d'abord comme lors de l'analyse de coût, il faut distinguer les technologies de stockage de grande capacité de celle de capacité moyenne.

Lorsque l'on compare le PHS et le CAES on peut voir que le PHS est la technologie dont la capacité énergétique est la plus élevée pouvant atteindre selon le projet 8000MWh

tandis que le CAES ne peut atteindre au maximum 2860MWh. La durée de vie du PHS est également plus élevée que celle du CAES. Il possède, par ailleurs une efficacité de 87% alors que cette dernière est comprise en 70 et 79%. Au niveau de la densité énergétique il est normal que cette dernière soit plus faible car ce sont tous les deux des systèmes de grande taille.

Lorsque l'on compare les technologies de stockage d'énergie de taille moyenne, on peut observer que la capacité énergétique d'une partie de nos types de stockage n'est pas disponible du fait de la faible présence d'applications concrètes.

Pour les technologies dont on a les données on peut voir que la capacité du supercondensateur est très faible et cela est dû au fait que cette application, tout comme le condensateur, n'est pas utilisé en premier lieu comme un moyen de stockage d'énergie mais plutôt comme une application de correction et harmonisation de la tension à la sortie de système fournissant de l'électricité.

Pour les batteries on peut voir que la capacité énergétique de ces dernières n'est pas très élevée cependant les batteries sont des applications de plus petite taille que les autres systèmes présentés dans ce mémoire et c'est donc normal. Cependant ces dernières sont mises en combinaison les unes avec les autres afin de pouvoir fournir de l'électricité pour des applications de grande envergure. On peut d'ailleurs observer que, bien que la capacité énergétique des batteries au plomb soit la plus élevée, ce type de batteries étant mature la marge de progression de ses capacités sera très faible comparé aux batteries au Lithium qui quant à elles sont encore au stade de développement malgré des applications déjà existantes. On peut d'ailleurs constater que la densité énergétique des batteries au Li est la plus élevée par rapport à celle des batteries au Plomb ou au Nickel qui fait de ce type de batterie un moyen de stockage d'énergie d'avenir.

Par ailleurs on peut noter que le temps de réponse afin de fournir de l'électricité en cas de demande est de l'ordre de la minute pour les applications de grande taille tandis que pour les applications de taille moyenne celui-ci est de l'ordre de la milliseconde, sauf pour le STES pour lequel le temps de réponse n'est pas rapide.

Au niveau de la décharge journalière cette dernière est faible pour toutes les applications présentées dans ce tableau à l'exception du condensateur et super-condensateur car ces deux dernières sont utilisées dans un but de correction de la tension et donc ne nécessitent pas un fonctionnement de longue durée.

## 5.6 Evolution des performances énergétiques

Au niveau de l'évolution des performances énergétiques on peut dire que les technologies matures ne connaîtront pas d'amélioration technologique leur permettant une amélioration de leur performance. On ne retrouve donc logiquement pas d'amélioration pour le PHS, CAES ainsi que le STES à l'horizon 2030.

Les piles à combustible à hydrogène devraient quant à elle connaître une amélioration de leurs performances énergétiques de l'ordre de 10% d'ici à 2030 [19].

Pour ce qui concerne les batteries comme pour l'analyse des estimations de coût, la tendance va être à l'amélioration des performances énergétiques mais encore une fois on va ici uniquement se concentrer sur les batteries au Lithium qui sont les plus prometteuses. On voit donc que les 2 améliorations majeures que vont subir ce type de batterie vont concerner son cycle de vie qui va être doublé ainsi que la durée de vie de la batterie qui va passer de 5-15 ans à 7-30 ans. On peut également remarquer que l'efficacité va légèrement augmenter passant à 95%.

## 5.7 Impact environnemental

Les informations sur l'impact environnemental nous sont fournies via l'article [14].

Tout d'abord le PHS est un système qui va nécessiter la présence de 2 réservoirs d'eau, le premier en haute et le second en basse altitude. De ce fait pour que ce système soit le moins impactant d'un point de vue écologique il faudra que les 2 réservoirs soient

déjà existants dans la nature car si ce n'est pas le cas il faudra alors créer 2 réservoirs artificiels ce qui aura évidemment un impact écologique.

TABLE 5: *Impact environnemental des différentes technologies de stockage d'énergie*

Nom	Impact environnemental
PHS	Négatif
CAES	Négatif
Batterie Pb	Négatif
Batterie Ni	Négatif
Batterie Li	Négatif
Condensateur	Très faible
Super-condensateur	Faible
STES	Faible
Pile à combustible à hydrogène	/

Ensuite concernant le CAES ce dernier va nécessiter la présence de cavité pour stocker l'énergie et si la cavité n'est pas adaptée de manière optimale à ce système il faudra alors la modifier ce qui aura des conséquences sur la géographie de la région. De plus ce dernier est aussi basé sur la combustion d'énergie fossile ce qui est négatif pour l'environnement.

Pour ce qui concerne les différents types de batteries au Plomb, Nickel, Lithium le problème est le même. Ces batteries nécessitent des métaux qu'il faut aller chercher sur d'autres continents pour les acheminer jusqu'en Belgique. De plus ces métaux ne sont pas biodégradables et donc constituent un déchet difficilement recyclable.

Pour le STES ce système possède un impact environnemental faible.

## **6 Stockage d'énergie en Belgique**

### **6.1 Introduction**

Dans cette partie nous allons analyser les technologies de stockage d'énergie qui sont actuellement utilisées en Belgique. Nous allons également définir la quantité d'énergie qui provient des technologies de stockage d'énergie.

### **6.2 Technologies de stockage d'énergie actuellement utilisées en Belgique**

#### **6.2.1 PHS**

En ce qui concerne le PHS, il existe 2 sites localisés à Coo et Platte Taille.

Le site de Coo a une capacité maximale de 1100 MW et permet de stocker jusqu'à 5GWh [54]. Selon Engie : « A pleine capacité, la centrale de Coo peut fournir une puissance de 1 164 MW pendant 6 heures : autant qu'une unité nucléaire mais avec un temps de démarrage inférieur à 2 minutes » [55]. Par ailleurs, la production annuelle moyenne de Coo est de 1 600 GWh [55].

Le site de Plate-Taille quant à lui a une capacité de 136MW [54] et permet de stocker jusqu'à 796 MWh [56].

D'autres projets sont également à l'étude comme le PHS de Strépy-Thieu dont les prévisions de stockage avoisinent les 17,81 MWh [56].

Cependant le développement de projet de PHS en Belgique de la taille des centrales de Coo ou de Plate-Taille semble compromis car les zones permettant l'élaboration de ce type de stockage d'énergie sont exploitées et/ou ne permettent pas le développement de ce type de stockage [54].

### 6.2.2 CAES

En ce qui concerne le CAES, il n'existe actuellement pas d'installation de ce type en Belgique et il en existe très peu dans le monde. Actuellement il en existe uniquement 2, une Allemagne et une aux Etats-Unis [10]. Cependant la Belgique est un terrain propice à l'installation de CAES car elle possède de nombreux anciens sites miniers et ces sites sont justement propices à l'installation de CAES [57].

Dans la prévision d'une augmentation de la demande en énergie de stockage ce type de technologie pourrait donc être réalisable en Belgique car cette dernière a une multitude de mines de charbon dû à son passé de grande nation productrice de charbon. De plus la construction d'un CAES a pris 2 ans en Allemagne [61]. Dès lors la Belgique ayant une géographie propice à ce genre d'installation nous allons prendre en compte cette technologie dans la suite de nos analyses.

### 6.2.3 Parc de batteries

Actuellement la Belgique dispose 2 parcs de batteries. Le parc de Dilsen-Stokkem qui est situé dans le Limburg est un des plus grands parcs de batteries d'Europe. Ce dernier a une capacité de stockage de 18 MWh et est composé de 140 batteries Tesla au Lithium. Ce parc a nécessité un investissement de 11 millions d'euros [58].

Le second parc de batterie en Belgique est celui d'Electrabel localisé à Drogenbos. Ce dernier est composé de batteries, de transformateurs, convertisseurs et permet de stocker 20MWh. Electrabel a également pour but de tester sur ce site de nouvelles technologies de stockage d'énergie comme le CAES ou le volant d'inertie [59].

Des parcs plus petits existent en Belgique comme par exemple la station de stockage d'énergie MiRIS à Seraing. Cette station est composée de 6500 panneaux solaires couplés à des batteries Lithium-ion qui permettent de stocker jusqu'à 4MW [52], [53].

#### **6.2.4 Pile à combustible à hydrogène**

Le stockage d'énergie sous forme de pile à combustible à hydrogène est une technologie récente. Cependant la Belgique est un des précurseurs de l'hydrogène car elle possède un réseau très important de pipelines permettant de faire transiter de l'hydrogène. Cependant cette technologie étant récente, il existe peu d'installation en Belgique et qui plus est les installations existantes sont de petite taille. On peut citer par exemple le projet réalisé à Solvay d'1 MW [62]. Cependant les prévisions de développement et d'augmentation de la capacité de stockage de cette technologie sont très importantes car la Belgique a déjà un réseau de pipelines très important pour faire transiter l'hydrogène, comme le montre l'annexe 11.

## Quatrième partie

# Méthodologie

## 7 Méthodologie de comparaison des différentes technologies

### 7.1 Introduction

Dans cette partie nous allons développer les critères qui vont nous permettre de comparer les différentes technologies de stockage d'énergie afin de pouvoir répondre à notre problématique de départ du stockage d'énergie en Belgique en 2030.

Le premier critère de comparaison est le temps, en effet notre analyse porte sur le stockage d'énergie en Belgique à l'horizon 2030. Il faudra donc analyser les possibilités de stockage actuelles et les estimer pour 2030 en fonction des disponibilités actuelles mais également des perspectives d'évolution.

Le second critère de comparaison est le type de technologies. En effet toutes les technologies ne seront pas applicables au cas de la Belgique et qui plus est ne seront pas disponibles à l'horizon 2030 car certaines d'entre-elles ne sont pas assez matures d'un point de vue technologique. Il faut donc prendre ça en compte dans notre analyse.

Le troisième critère est celui de l'efficacité énergétique. Il faudra que les technologies que nous analysons soient les plus performantes et permettent de répondre à l'augmentation de la demande en énergie de stockage. Nous allons pour cela créer un modèle qui nous permet d'estimer l'amélioration des performances envisagées pour 2030.

Le quatrième critère est celui de l'optimisation des coûts. On va déterminer la technologie ou la combinaison de technologies qui nous permettra d'atteindre nos objectifs au coût le moins élevé.

## 7.2 Technologies applicables au cas de la Belgique

Comme nous avons pu le constater lors des analyses précédentes, toutes les technologies ne peuvent pas répondre à l'augmentation de la demande en énergie de stockage soit pour des raisons financières car trop chères, de maturité, écologiques ou encore pour des raisons de performances énergétiques. Une sélection des technologies les plus appropriées pour répondre à notre problématique semble donc logique.

Il est ressorti de nos analyses précédentes que le PHS ainsi que le CAES doivent être prises en compte dans notre analyse car ce sont 2 technologies de stockage d'énergie de grande envergure et donc ces dernières seront nécessaires pour répondre à l'augmentation de la demande. De plus des PHS sont déjà présents en Belgique et d'autre part la Belgique est un terrain propice à l'installation du CAES de par sa géographie.

Au niveau des technologies de plus petite taille on peut directement écarter le condensateur et le super-condensateur car ces derniers sont utilisés comme des applications de correction et harmonisation de la tension et donc ne servent pas au stockage d'énergie et ne seront donc pas pris en compte dans nos conclusions.

En ce qui concerne les batteries, comme décrit précédemment, nous allons uniquement prendre en compte les batteries au Lithium car ce sont les batteries dont les performances et dont les prévisions de performance sont les plus élevées. Par ailleurs leur coût va se réduire fortement à l'horizon 2030 ce qui en fait une technologie d'avenir à prendre en compte dans notre analyse.

Nous allons également sélectionner les piles à combustible à hydrogène car ces dernières sont déjà appliquées en Belgique et ont des bonnes performances énergétiques ainsi qu'économiques. De plus ces dernières devraient connaître des améliorations de performances à l'horizon 2030.

On va écarter de notre analyse le stockage d'énergie thermique sensible (STES) car ce dernier n'est pas présent en Belgique et dès lors il sera difficile de le mettre en place et avoir des résultats à l'horizon 2030.

### 7.3 Capacité de stockage d'énergie en Belgique

Maintenant que nous avons mentionné les technologies qui sont applicables en Belgique nous allons pouvoir déterminer la quantité maximale que chaque type de technologie peut nous fournir.

PHS :

- site de Coo, capacité maximale de stockage : 5000MWh
- site de Platte-Taille, capacité maximale de stockage : 796MWh

CAES :

- Pas d'installation en Belgique actuellement

Parc de batteries :

- site de Dilsen-Stokkem, capacité maximale de stockage : 18MWh
- site de Drogenboos, capacité maximale de stockage : 20MWh

Pile à combustible à hydrogène :

- site de Solvay, capacité maximale de stockage : 1MWh

On peut donc voir que la grande majorité de la capacité de stockage d'énergie nous vient du PHS. Cependant avec l'augmentation de la demande en énergie de stockage il nous faudra évaluer l'installation d'autres types de technologie. De plus il nous faudra évaluer la création d'autre site de stockage d'énergie pour que la capacité de stockage soit répartie de manière plus uniforme en Belgique.

Actuellement comme le mentionne le rapport IRENA, plus de 97% du stockage d'énergie provient du PHS, ce qui est bien représenté dans nos chiffres sur la capacité maximale de stockage d'énergie. Ainsi les autres pourcents proviennent des parcs de batteries.

Comme on a pu le constater dans les parties précédentes, la demande en énergie de stockage ne va faire qu'augmenter. Il faudra développer des nouveaux sites de stockage d'énergie. Grâce aux analyses précédentes nous savons que les plus rentables d'un point de vue énergétique et financier mais aussi qui pourront nous permettre d'atteindre au

mieux notre objectif vont être le CAES, PHS, le parc de batteries ainsi que les piles à combustibles à hydrogènes. Nous avons néanmoins des contraintes de capacité en ce qui concerne certains types de stockage d'énergie. En effet pour le PHS de nouvelles installations en Belgique semblent compromises car il n'existe pas d'autre endroit pour réaliser cette installation. Pour ce qui est des autres technologies de stockage d'énergie il n'existe principalement que le temps comme contrainte car il faudrait que les sites soient en fonctionnement pour 2030 au maximum pour être pris en compte dans notre raisonnement.

Afin d'évaluer le développement de nouvelles technologies on va découper notre échéance en 3 périodes : 2020-2022, 2023-2025 et 2026-2030.

**Période 2020-2022 :**

Des investissements vont être faits afin de pouvoir mettre en place le CAES. Etant donné qu'il n'existe uniquement que 2 CAES dans le monde, on va se baser sur les performances énergétiques du CAES en Allemagne.

On va également développer des piles à combustible à hydrogène car le coût de ces dernières au kWh est le plus faible de toutes les technologies.

**Période 2023-2025 :**

On va continuer de développer les piles à combustibles à hydrogènes en fonction de l'augmentation de l'énergie de stockage.

**Période 2026-2030 :**

On va commencer à développer des parcs de batteries car pour ces derniers le coût au kWh va drastiquement diminuer en 2030. Dans la partie sur l'évolution du coût, certaines études tablent sur un coût de 50-400 \$/kWh en 2030, ce qui va rendre cette technologie plus intéressante que le CAES ou PHS qui sont actuellement les moins chers et qui permettra de diversifier les sources de stockage d'énergie.

## 7.4 Cout actuel des technologies de stockage d'énergie

Dans cette partie nous allons détailler le coût des différentes technologies de stockage d'énergie. Pour cette partie nous allons reprendre les données que nous avons déjà présentées dans la partie sur le coût actuel du stockage d'énergie.

Nous allons également détailler l'évolution de ce cout à l'horizon 2030.

TABLE 6: *Evolution du coût en \$/kWh des différentes technologies de stockage d'énergie*

Nom	2018 (\$/kWh)	2030 (\$/kWh)
PHS	5-100 [14]	5-100
CAES	2-50 [14]	2-40
Batterie Li	600-2500 [14]	200-833
Pile à combustible à hydrogène	2-15 [9]	2-15

Les données présentées dans ce schéma proviennent des articles [9] et [14]. Les diminutions de coût à l'horizon 2030 nous sont données dans la partie sur l'évolution du coût des technologies. Le PHS étant une technologie mature il n'est pas prévu de diminution de coût à l'horizon 2030. En ce qui concerne le CAES la diminution de coût va être de 10\$/kWh à l'horizon 2030.

Les batteries au Lithium vont être le type de stockage d'énergie qui vont connaître la plus forte diminution du prix par kWh, en effet selon le rapport IRENA [39], le prix par kWh va passer de 600\$ à 200\$ soit une diminution de 300%.

Les piles à combustible à hydrogène ne devraient pas connaître de diminution de prix.

## Cinquième partie

# Résultats

## 8 Résultats de l'analyse de la situation actuelle et optimisation pour 2030 du stockage d'énergie en Belgique

### 8.1 Introduction

Dans cette partie nous allons prendre en compte les caractéristiques de coûts liées à ces technologies mais également de possibilité de stockage pour émettre un scénario plausible afin que la Belgique puisse respecter son objectif en termes de stockage d'énergie pour 2030. Pour cela nous allons diviser la période en 3 parties et analyser pour chacune d'entre elles les recommandations qui devront être prises pour atteindre l'objectif.

### 8.2 Période 2020-2022

Comment on peut le voir dans la partie sur la possibilité de stockage d'énergie en Belgique, actuellement la grande majorité du stockage d'énergie disponible en Belgique vient de la technologie PHS. En effet cette dernière fournit plus de 95% de la capacité de stockage. En second lieu on retrouve les parcs de batteries.

Cependant on peut voir que le PHS n'est pas la technologie la moins chère. En effet le CAES ainsi que la pile à combustible à hydrogène sont moins chers. On va donc développer en priorité le CAES, technologie dont la capacité de stockage est très élevée, qui nous permettra de satisfaire au mieux nos objectifs. Afin d'évaluer l'impact sur la

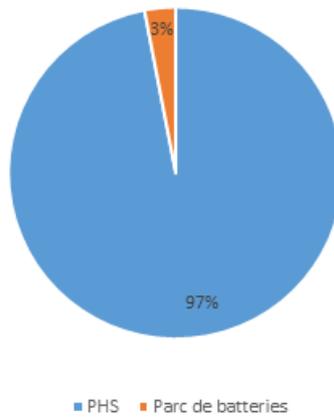


FIGURE 4: Répartition de la capacité de stockage d'énergie en Belgique en 2022 - Prévion basse

quantité de stockage que va avoir le CAES on va se baser sur l'installation présente à Huntorf en Allemagne dont la capacité est de 2800MWh.

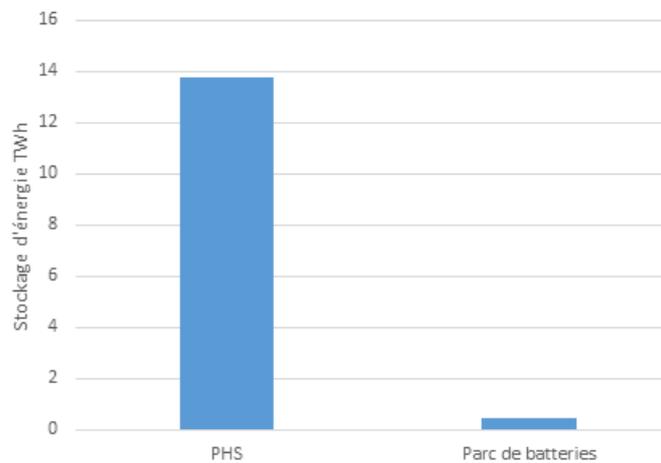


FIGURE 5: Stockage d'énergie en Belgique en 2022

On va également commencer l'installation de piles à combustible à hydrogène car cette technologie reste la moins chère. Cependant son volume de stockage n'est pas comparable aux larges volumes du PHS et CAES mais il me semble important de pouvoir diversifier les sources de stockage d'énergie afin de pouvoir assurer un stockage minimum

en cas de problème avec le PHS ou CAES.

### 8.3 Période 2023-2025

À la suite des investissements réalisés pour le CAES ainsi que les piles à combustibles à hydrogène lors de la période précédente, on va augmenter notre capacité de stockage d'énergie.

On va également continuer les investissements dans les piles à combustibles à hydrogènes car c'est toujours la technologie la moins chère du marché. Par ailleurs on va noter en 2025 une augmentation de la demande en énergie de stockage. On va donc élaborer le scénario le plus plausible afin de répondre à cette augmentation.

En 2025, suite à nos analyses réalisées dans la partie 5.4 Projection de la demande d'électricité de stockage à l'horizon 2030, on sait que la demande en énergie de stockage va être approximativement de 16,74 TWh pour la prévision faible et de 19,89 TWh pour la prévision haute. On va donc combler cette augmentation de demande grâce au CAES et aux piles à combustibles à hydrogène qui ont été développés lors de la période précédente. Une proposition de répartition du stockage d'énergie est la suivante. On peut voir qu'une grande partie de l'augmentation de la demande en stockage d'énergie est prise en compte par le CAES car ce dernier a une capacité de stockage très élevée, proche du PHS.

Afin de diminuer au maximum notre coût par kWh il faudra maximiser l'utilisation du CAES et des piles à combustible à hydrogène. Dès lors si l'on propose que nos mécanismes de stockage d'électricité soient chargés durant 7h pendant la nuit (de 23h à 6H), on choisit ces heures car elles correspondent à des périodes de faible demande en électricité. Pour maximiser l'utilisation du CAES on va donc procéder au calcul suivant : Sachant que ce dernier a une capacité de  $2800\text{MWh} = 2,8\text{GWh}$  et qu'on va le faire fonctionner 7h par jour durant 365, il nous permettra de stocker  $2,8*7*365 = 7154\text{GWh} = 7,154\text{TWh}$ .

Les piles à combustible à hydrogène ne connaîtront qu'un réel essor après 2030, nous allons donc nous baser sur une capacité de 1% du stockage d'énergie pour 2025.

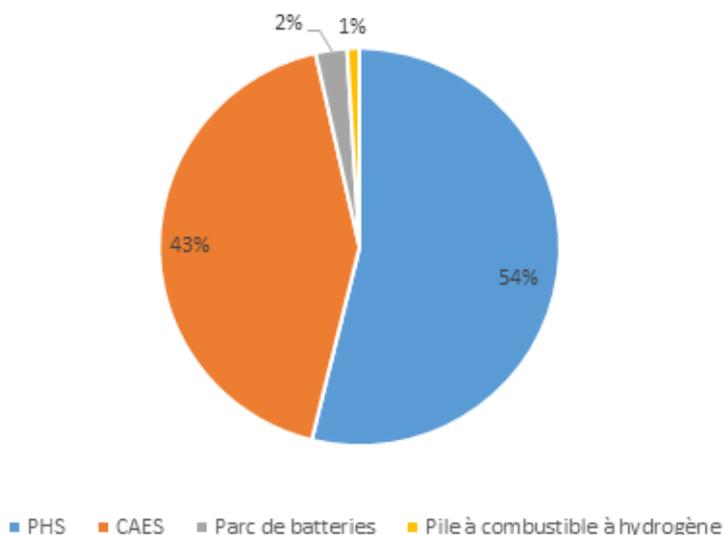


FIGURE 6: Répartition de la capacité de stockage d'énergie en Belgique en 2025 - Prévission basse

Le schéma va être le même pour le parc de batteries ainsi que la pile à combustible à hydrogène pour ce qui est de l'estimation haute à l'horizon 2025. Cependant le pourcentage de stockage pris en charge par le PHS va être de 61% et pour le CAES ce dernier va diminuer à 36%.

On peut voir très clairement grâce à nos graphiques que l'on va maximiser le stockage d'énergie du CAES car le coût par kWh de ce dernier est plus faible. Lorsque la demande sera plus élevée comme lors de la prévision haute, cette demande supplémentaire va être prise en charge par le PHS dont on avait initialement diminué la capacité de stockage d'énergie pour optimiser nos coûts.

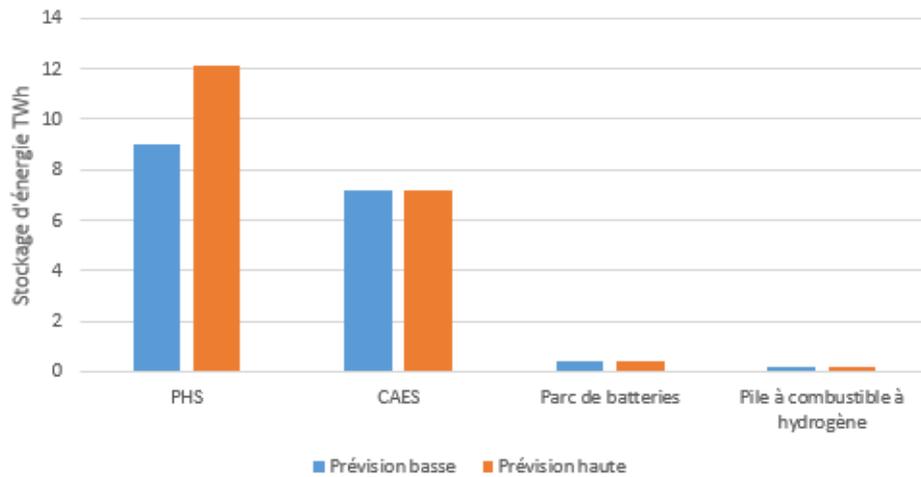


FIGURE 7: *Stockage d'énergie en Belgique en 2025*

## 8.4 Période 2026-2030

Durant cette période on va investir massivement dans les parcs de batteries car cette technologie va commencer à devenir abordable à partir de 2030, son coût ne va pas cesser de diminuer et ses performances ne vont faire qu'augmenter. En effet comme indiqué précédemment le coût de ce type de batterie va être divisé par 3 à l'horizon 2030. Il est donc clair que durant cette période les parcs de batteries ne vont pas dépasser les capacités de stockage des PHS ou CAES mais ici le but va être de développer cette technologie qui reste plus chère pour le moment, afin d'être prêt à amorcer une transition vers le développement des parcs de batteries. Dans cette partie un scénario plausible serait de parier sur une capacité de stockage d'énergie des parcs de batteries à hauteur de 20% de la capacité totale. Ce chiffre de 20% fait également partie des prévisions pour les batteries que prévoit le rapport IRENA [39]. En effet cette augmentation est également due à la forte augmentation des véhicules électriques. Le stockage d'électricité va également commencer à se faire à la maison, en effet on peut citer l'entreprise TESLA qui a développé une batterie afin de stocker l'énergie chez soi [60]. Ce type de stockage d'énergie via des batteries va donc être de plus en plus répandu et va donc augmenter logiquement la proportion de stockage d'énergie via les batteries au lithium. Les piles

à combustibles devraient quant à elles représenter moins de 5% de la capacité totale de stockage d'énergie en 2030.

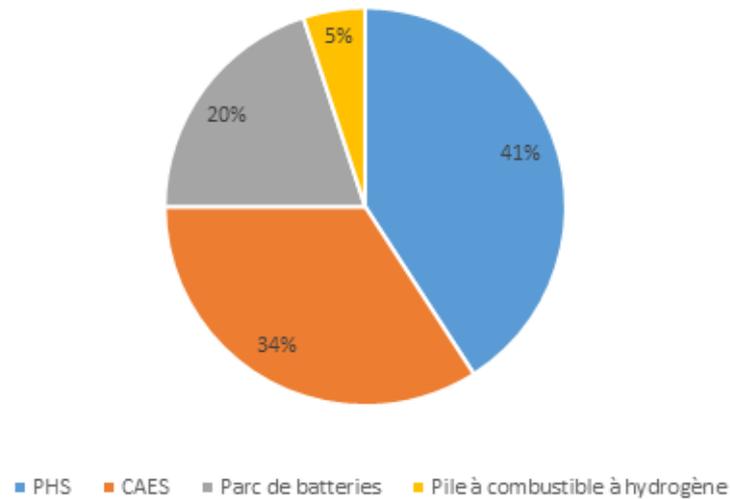


FIGURE 8: Répartition de la capacité de stockage d'énergie en Belgique en 2030 - Prévission basse

En 2030 on va continuer de maximiser la capacité de stockage d'énergie via le CAES car ce dernier reste moins cher au kWh par rapport au PHS. Dans le même temps on va développer au maximum les piles à combustible à hydrogène qui représentent la technologie la moins chère et on va en parallèle développer nos parcs de batteries car le prix de ces derniers ne va cesser de chuter pour atteindre selon les prévisions de l'IRENA un seuil inférieur à celui des autres technologies de stockage par rapport à sa taille.

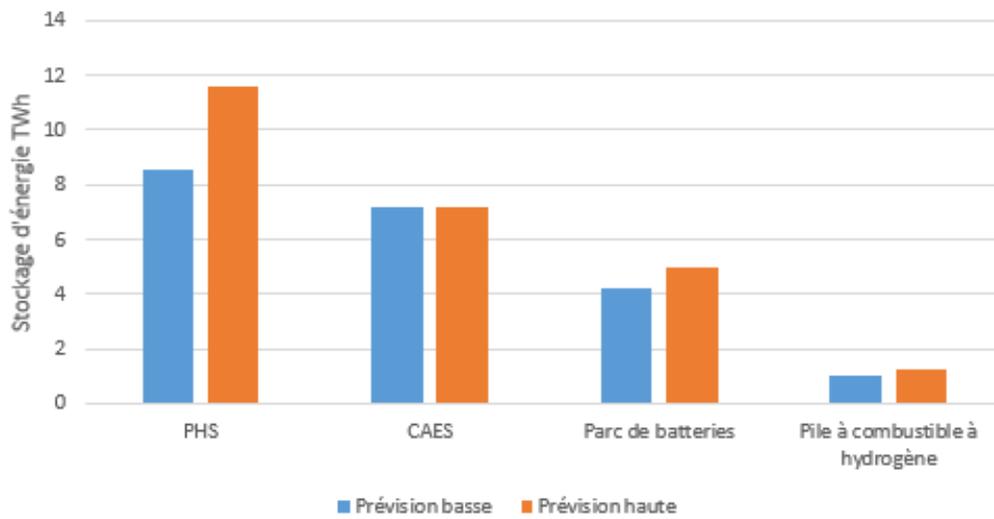


FIGURE 9: *Stockage d'énergie en Belgique en 2030*

# Conclusion

Le but de ce mémoire était de pouvoir étudier l'ensemble des technologies de stockage d'énergie qui existent et d'en faire une analyse détaillée afin de pouvoir répondre à la problématique de la demande en stockage d'énergie en Belgique à l'horizon 2030. Il est clair qu'apporter une réponse unique est difficile tant le panel de technologies et les perspectives futures de ces dernières sont variées. Cependant j'ai essayé d'apporter une réponse aussi précise que possible à cette question de départ.

Comme précisé précédemment, après la définition et l'explication des différentes technologies de stockage existantes, il a fallu restreindre ces dernières à notre horizon 2030. En effet investir et développer une technologie prend du temps et de ce fait, j'ai fait une première sélection en fonction de la disponibilité de ces dernières. De cette sélection il est ressorti un panel de 9 technologies différentes. Après cela j'ai restreint le nombre de technologies car certaines n'étaient pas adaptées pour répondre à ma problématique de départ. Mon panel étant finalement composé de 4 technologies à savoir : PHS, CAES, batterie Lithium et la pile à combustible à hydrogène.

J'ai ensuite analysé différents critères comme la disponibilité, le coût, les performances énergétiques et l'impact environnemental. Pour le coût ainsi que les performances énergétiques, j'ai analysé la situation actuelle ainsi que l'estimation à l'horizon 2030.

Dans la partie suivante j'ai fait le bilan du stockage d'énergie à l'heure actuelle en détaillant les technologies de stockage d'énergie dont dispose actuellement la Belgique. Par la suite j'ai défini les technologies applicables à notre problématique grâce aux analyses sur la capacité actuelle ainsi que le coût des technologies de stockage d'énergie en Belgique.

Grâce à ces analyses j'ai pu faire un scénario d'investissement en 3 périodes de temps : 2020-2022, 2023-2025, 2026-2030, en détaillant pour chacune de ces périodes les développements dans tel ou tel type de technologie nécessaire afin d'atteindre nos objectifs en 2030.

Il ressort donc qu'il n'existe pas une technologie unique pour répondre à la demande mais que la réponse réside en la combinaison de différentes technologies qui ont des capacités différentes, des tailles différentes et donc permettent de répondre à des besoins différents.

Selon mes analyses, il ressort qu'en 2030 la réponse à la demande tiendra dans un mix entre le CAES, PHS, Parc de batteries ainsi que la pile à combustible à hydrogène. Bien que le CAES et PHS fourniront plus de 70% de la capacité de stockage, des technologies comme les batteries au lithium qu'on va retrouver dans les parcs de batteries ainsi que les piles à combustibles à hydrogène vont être de plus en plus présentes et vont fournir une alternative au CAES et PHS à l'avenir.

## Références

- [1] MULTON, B., BEN AHMED, H. (2007), *Le stockage stationnaire d'énergie électrique : pourquoi et comment ?*, revue 3EI, pp. 6-16
- [2] HADJIPASCHALIS, I., POULLIKKAS, A., EFTHIMIOU, V. (2009), *Overview of current and future energy storage technologies for electric power applications*, Renewable and Sustainable Energy Reviews, 13, pp. 1513–1522
- [3] LIU, H., JIANG, J. (2007), *Flywheel energy storage—An upswing technology for energy sustainability*, Energy and Buildings, 39, pp. 599–604
- [4] FARID, M., KHUDHAIR, A., RAZACK, S., AL-HALLAJ, S. (2004), *A review on phase change energy storage : materials and applications*, Energy Conversion and Management, 45, pp. 1597-1615
- [5] HONBO, K., HOSHI, E., MURANAKA, M., TAKEUCHI, S. (2006), *Lead-acid battery*, United States Patent Honbo et al.
- [6] SHUKLAA, A.K., VENUGOPALANB, S., HARIPRAKASHA, B. (2001), *Nickel-based rechargeable batteries*, Journal of Power Sources, 100, pp. 125–148
- [7] SCROSATI, B., GARCHE, J. (2010), *Lithium batteries : Status, prospects and future*, Journal of Power Sources, 195, pp. 2419–2430
- [8] REHMAN, S., LUAI M., AL-HADHRAMI, L., MAHBUB ALAM, M. (2015), *Pumped hydro energy storage system : A technological review*, Renewable and Sustainable Energy Reviews, 44, pp. 586–598
- [9] LUO, X., WANG, J., DOONER, M., CLARKE, J. (2015), *Overview of current development in electrical energy storage technologies and the application potential in power system operation*, Applied Energy, 137, pp. 511–536
- [10] CHEN, H., ZHANG, X., LIU, J., TAN, C. (2013) *Compressed Air Energy Storage*, Energy Storage - Technologies and Applications , 4, pp. 101-112
- [11] KIM, YM., LEE, JH., KIM, SJ., FAVRAT, D. (2012), *Potential and Evolution of Compressed Air Energy Storage*, Energy and Exergy Analyses - Entropy, 14, pp. 1501-1521

- [12] BUDT, M., WOLF, D., SPAN, R., YAN, J. (2016), *A review on compressed air energy storage : Basic principles, past milestones and recent developments*, Applied Energy, 170, pp. 250–268
- [13] FOLEY, A., DÍAZ LOBERA, I. (2013), *Impacts of compressed air energy storage plant on an electricity market with a large renewable energy portfolio*, Energy, 57, pp. 85-94
- [14] CHEN, H., NGOC CONG, T., YANG, W., TAN, C., LI, Y., DING, Y. (2009), *Progress in electrical energy storage system : A critical review*, Progress in Natural Science, 19, pp. 291–312
- [15] SCHOENUNG, S.M., SHEAHEN, T.P. (2002), *Superconducting Magnetic Energy Storage*, Introduction to High-Temperature Superconductivity. Selected Topics in Superconductivity. Springer, Boston, pp. 433-447
- [16] AMARO, N., MURTA PINA, J., MARTINS, J., MARIA CEBALLOS, J. (2012), *Superconducting magnetic energy storage : A technological contribute to smart grid concept implementation*, In Proceedings of the 1st International Conference on Smart Grids and Green IT Systems, pp. 113-120
- [17] SONG, W., CHEN, Z., KYLE BRENNAMAN, M., JAVIER CONCEPCION, J., PATROCINIO, A., MURAKAMI, N., MEYER, T. (2011), *Making solar fuels by artificial photosynthesis*, Pure Appl. Chem., 83(4), pp. 749–768
- [18] STEINFELD, A., MEIER, A. (2004), *Solar Fuels and Materials*, Encyclopedia of Energy, 5, pp. 623-637
- [19] BALL, M., WIETSCHEL, M. (2009), *The future of hydrogen – opportunities and challenges*, International journal of hydrogen energy, 34, pp. 615-627
- [20] EDWARDS, P.P., KUZNETSOV, V.L., DAVID, N.P., BRANDON, N.P., (2008), *Hydrogen and fuel cells : Towards a sustainable energy future*, Energy Policy, 36, pp. 4356–4362
- [21] DINCER, I. (2002), *On thermal energy storage systems and applications in buildings*, Energy and Buildings, 34, pp. 377–388

- [22] DING, Y., LI, Y., LI, D., RADCLIFFE, J., HUANG, Y. (2015), *Cryogenic Energy Storage*. In Handbook of Clean Energy Systems, pp. 1-15
- [23] SHARMA, A., TYAGI, V.V., CHEN, C.R., BUDDHI, D., (2009), *Review on thermal energy storage with phase change materials and applications*, Renewable and Sustainable Energy Reviews, 13, pp. 318–345
- [24] STEFFEN, B. (2012), *Prospects for pumped-hydro storage in Germany*, Energy Policy, 45, pp. 420–429
- [25] TOLLEFSON, J. (2008), *Charging up the future*, NATURE, 456, pp. 436-440
- [26] PROPFE, B., KREYENBERG, D., WIND, J., SCHMID, S.(2013), *Market penetration analysis of electric vehicles in the German passenger car market towards 2030*, International Journal of Hydrogen Energy, 38(13), pp. 5201-5208
- [27] GUPTA, E. (2008), *Oil vulnerability index of oil-importing countries*, Energy Policy, 36, pp. 1195–1211
- [28] SCROSATI, B., GARCHE, J. (2010), *Lithium batteries : Status, prospects and future*, Journal of Power Sources, 195, pp. 2419–2430
- [29] BALAKRISHNAN, P.G., RAMESH, R., PREM KUMAR, T. (2006), *Safety mechanisms in lithium-ion batteries*, Journal of Power Sources, 155, pp. 401–414
- [30] KATWALA, A. (2018), *The spiralling environmental cost of our lithium battery addiction*, WIRED on Energy
- [31] SCHAINKER, R.B. (2004), *Executive Overview : Energy Storage Options For A Sustainable Energy Future*, IEEE Power Engineering Society General Meeting.
- [32] ROY, S.C., VARGHESE, O.K., PAULOSE, M., GRIMES, C.A. (2010), *Toward Solar Fuels : Photocatalytic Conversion of Carbon Dioxide to Hydrocarbons*, ACS Nano, 4(3), pp. 1259–1278
- [33] CENTI, G., PERATHONER, S. (2010), *Towards Solar Fuels from Water and CO<sub>2</sub>*, ChemSusChem, 3, pp. 195–208

- [34] CHALK G.S., MILLER, J.F. (2006), *Key challenges and recent progress in batteries, fuel cells, and hydrogen storage for clean energy systems*, Journal of Power Sources, 159, pp. 73–80
- [35] IBRAHIM, H., ILINCA, A., PERRON, J. (2008), *Energy storage systems—Characteristics and comparisons*, Renewable and Sustainable Energy Reviews, 12, pp. 1221–1250
- [36] HALL, P.J., BAIN, E.J. (2008), *Energy-storage technologies and electricity generation*, Energy Policy, 36, pp. 4352–4355
- [37] SOLOMON, A., CHILD, M., CALDERA, U., BREYER, C. (2017), *How much energy storage is needed to incorporate very large intermittent renewables ?*, Energy Procedia, 135, pp. 283-293
- [38] BUREAU FEDERAL DU PLAN (2017), *rapport complémentaire électricité*, Rapport de monitoring de la sécurité d’approvisionnement
- [39] IRENA (2017), *Electricity Storage and Renewables : Costs and Markets to 2030*, International Renewable Energy Agency
- [40] EERA (2017), *European Energy Storage Technology Development Roadmap towards 2030*, European Energy Research Alliance
- [41] GU, Y., MCCALLEY, J., NI, M., BO, R. (2013), *Economic Modeling of Compressed Air Energy Storage*, Energies, 6, pp. 2221-2241
- [42] KETJOY, N. (2014), *Comparison the economic analysis of the battery between lithium-ion and lead-acid in PV stand-alone application*, Energy Procedia, 56, pp. 352 – 358
- [43] ZHANG, H., BAEYENS, J., CACERES, G., DEGREVE, J., YONGQIN L. (2016), *Thermal energy storage : Recent developments and practical aspects*, Progress in Energy and Combustion Science, 53, pp. 1–40
- [44] IRENA (2013), *Thermal energy storage*, International Renewable Energy Agency  
 bitemIEEEhowto :kopka EERA (2018), *Low-Temperature Sensible Heat Storage*, SP3 Thermal Energy Storage, European Energy Research Alliance

- [45] SARBU, J., SEBARCHIEVICI, C. (2018), *A Comprehensive Review of Thermal Energy Storage*, Sustainability, 10, p. 191
- [46] HUART, M., HERNONCOURT, J., DELHAYE, S., WILKIN, B. (2017), *18% de renouvelables dans l'électricité consommée en Belgique en 2017*, Observatoire belge des énergies renouvelables
- [47] CEBULLA, F., HAAS, J., EICHMAN, J., NOWAK, W., MANCARELLA, P. (2018), *How much Electrical Energy Storage do we need? A synthesis for the U.S., Europe, and Germany*, Article in Journal of Cleaner Production
- [48] IEA (2018), *Application of thermal energy storage in the energy transition benchmarks and developments*, Public Report of IEA ECES Annex 30, IEA technology Collaboration Programme
- [49] CRAWLEY, G. (2017), *Energy Storage*, World Scientific Series in Current Energy Issues, World Scientific, Singapore
- [50] FEW, S., SCHMIDT, O., OFFER, G.J., BRANDON, N., NELSON, J., GAMBHIR, A. (2018), *Prospective improvements in cost and cycle life of off-grid lithium-ion battery packs : An analysis informed by expert elicitations*, Energy Policy, 114, pp. 578-590
- [51] TER-GAZARIAN, A. (1994), *Energy Storage for Power Systems*, Institution of Engineering and Technology, pp. 114-115
- [52] COCKERILL MAINTENANCE AND INGENIERIE (2018), *CMI inaugure MiRIS, la plus grande station industrielle de stockage d'énergie verte en Europe*, Dossier de Presse
- [53] WATERSTOFNET (2015), *National Implementation Plan Hydrogen Refuelling Infrastructure Belgium*, Mobility Belgium
- [54] ELECTRABEL SA. (2014), *La centrale d'accumulation par pompage de Coe L'eau pour produire l'électricité*, Engie Electrabel, Belgique
- [55] HENDRICK.P, BERGERON.K, CONTREPAS.G. (2012), *P(H)ES solutions (in Belgium)*, Université libre de Bruxelles : Cluster TWEED

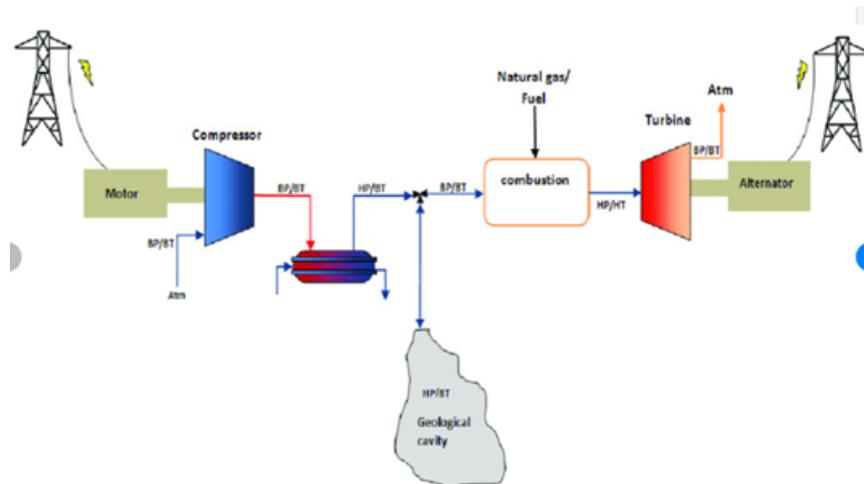
- [56] MORADZADEH, M., ZWANENEPOEL, B., BOEL, P., VANDEVELDE, L. (2013), *Use of energy storage for Belgian power network*, IEEE Electrical Power & Energy Conference (EPEC 2013)
- [57] TERHILLS (2019), *large-scale European battery project offers sustainable alternative to stabilize power grid*, [www.terhills.com](http://www.terhills.com)  
 URL : <https://www.terhills.com/news/large-scale-european-battery-project-offers-sustainable-alternative-to-stabilize-power-grid/>
- [58] ENGIE (2017), *Drogenboss va stocker l'énergie renouvelable à grande échelle*, [www.engie.be](http://www.engie.be)  
 URL : <http://www.engie.be/fr/drogenbos-va-stocker-l-energie-renouvelable-a-grande-echelle/>
- [59] WALLONIA (2017), *6500 panneaux photovoltaïque sur le site de CMI à Seraing*, [www.wallonia.be](http://www.wallonia.be)  
 URL : <http://www.wallonia.be/fr/actualites/6500-panneaux-photovoltaïques-sur-le-site-de-cmi-seraing>
- [60] TESLA (2019), *Meet Powerwall, your home battery*, [www.tesla.com](http://www.tesla.com)  
 URL : <https://www.tesla.com/powerwall>
- [61] ENERGY OUTLOOK (2013), *Energy storage in Belgium*, [www.energy.sia-partners.com](http://www.energy.sia-partners.com)  
 URL : <http://energy.sia-partners.com/energy-storage-belgium>
- [62] COGNET, M., CARBONI, M. (2017), *Stockage de l'énergie : évolution des batteries*, CultureSciences-Chimie. [www.culturesciences.chimie.ens.fr](http://www.culturesciences.chimie.ens.fr)  
 URL : <http://culturesciences.chimie.ens.fr/stockage-de-l%C3%A9nergie-%C3%A9volution-des-batteries-12>
- [63] ACTTR. (2016), *What's The Difference of Adiabatic & Isothermal Process?*, [www.acttr.com](http://www.acttr.com)  
 URL : <http://www.acttr.com/en/en-faq/en-faq-thermal-analysis/292-en-faq-difference-isothermal-adiabatic.html>

[64] HYPERPHYSICS, *definition de superconducting critical temperature*,  
www.hyperphysics.be

URL : <http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbase/Solids/scond.html>

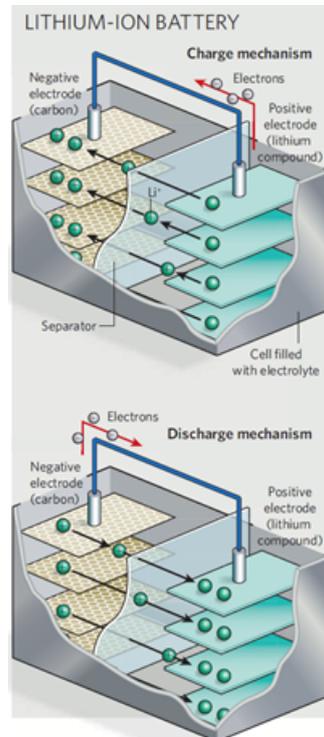
# Annexes

## Annexe 1 - CAES adiabatique



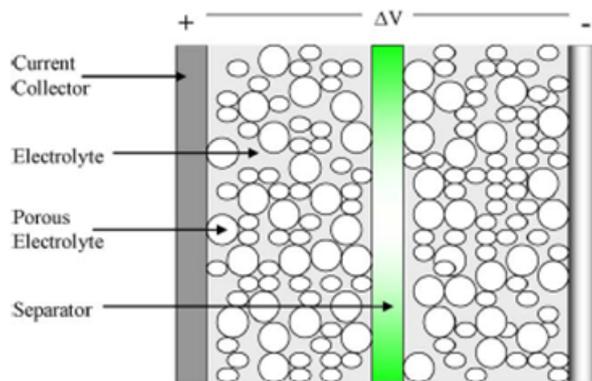
Source : KERE, A., GOETZ, V., PY, X., OLIVES, R., SADIKI, N., MERCIER, E. (2014), *Dynamic Behavior of a Sensible-heat based Thermal Energy Storage*, Energy Procedia, 49, pp. 830-839

## Annexe 2 - Batteries Lithium-ion



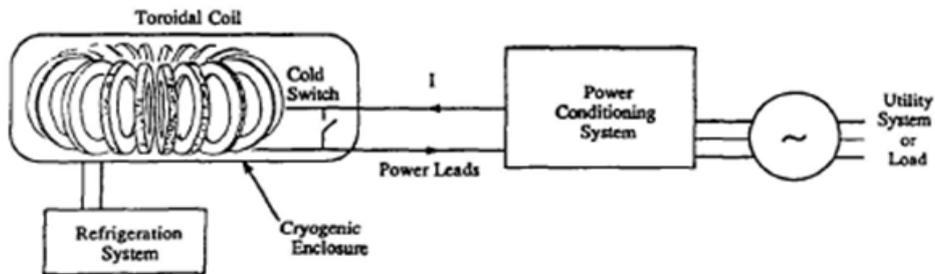
Source : TOLLEFSON, J. (2008), *Charging up the future*, NATURE, 456, pp. 436-440

## Annexe 3 - Caractéristiques d'un super-condensateur



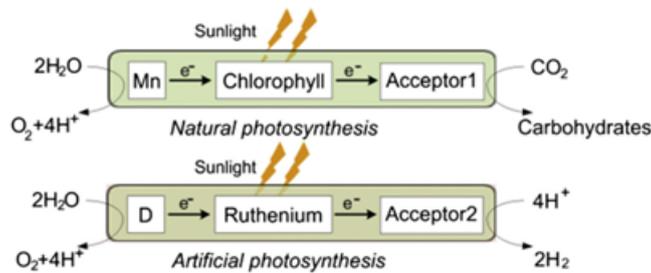
Source : HADJIPASCHALIS, I., POULLIKKAS, A., EFTHIMIOU, V. (2009), *Overview of current and future energy storage technologies for electric power applications*, Renewable and Sustainable Energy Reviews, 13, pp. 1513–1522

## Annexe 4 - Fonctionnement du stockage d'énergie magnétique supraconductrice (SMES)



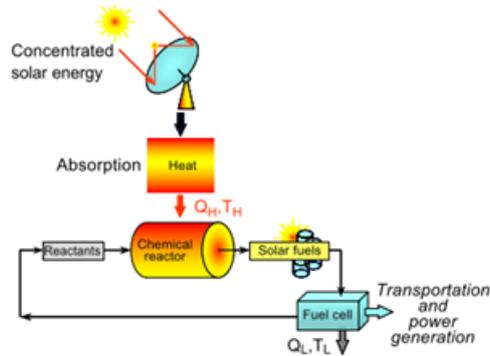
Source : SCHOENUNG, S.M., SHEAHEN, T.P. (2002), *Superconducting Magnetic Energy Storage*, Introduction to High-Temperature Superconductivity. Selected Topics in Superconductivity. Springer, Boston, pp. 433-447

## Annexe 5 - Comparaison entre la photosynthèse naturelle et artificielle



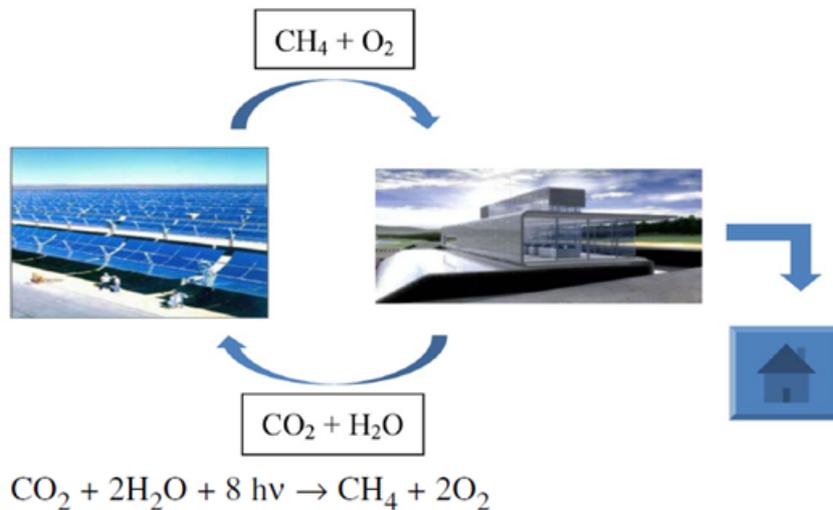
Source : LUO, X., WANG, J., DOONER, M., CLARKE, J. (2015), *Overview of current development in electrical energy storage technologies and the application potential in power system operation*, Applied Energy, 137, pp. 511-536

## Annexe 6 - Conversion de l'énergie solaire en carburant



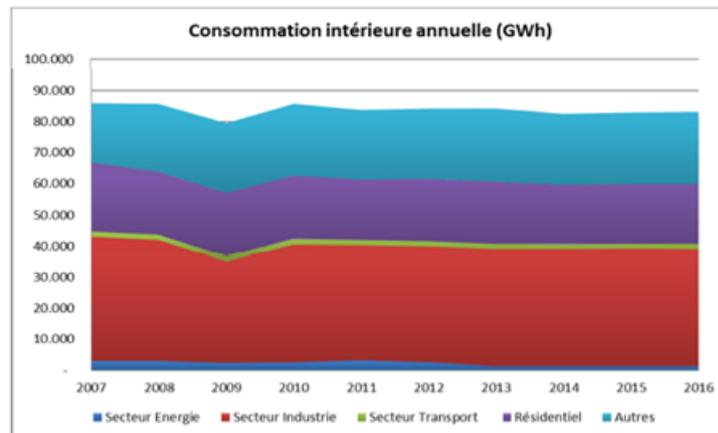
Source : CHEN, H., NGOC CONG, T., YANG, W., TAN, C., LI, Y., DING, Y. (2009), *Progress in electrical energy storage system : A critical review*, Progress in Natural Science, 19, pp. 291–312

## Annexe 7 - Combustible solaire



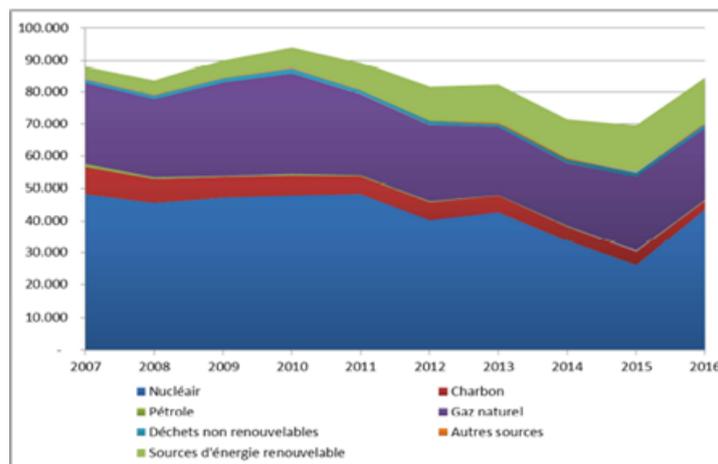
Source : SONG, W., CHEN, Z., KYLE BRENNAMAN, M., JAVIER CONCEPCION, J., PATROCINIO, A., MURAKAMI, N., MEYER, T. (2011), *Making solar fuels by artificial photosynthesis*, Pure Appl. Chem., 83(4), pp. 749–768

## Annexe 8 - Evolution de la consommation annuelle d'électricité en Belgique et répartition par secteur d'activité



Source : BUREAU FEDERAL DU PLAN. (2017), *Rapport complémentaire électricité*, Rapport de monitoring de la sécurité d'approvisionnement.

## Annexe 9 - Evolution de la production d'électricité en fonction de la source (exprimée en GWh)



Source : BUREAU FEDERAL DU PLAN. (2017), *Rapport complémentaire électricité*, Rapport de monitoring de la sécurité d'approvisionnement.

## Annexe 10 - Prévision de la demande en électricité à l'horizon 2030 et répartition par secteur (exprimé en TWh, dernière colonne exprimé en %)

	2015	2030	2030/2015
Industrie	37,9	37,5	-0,1
Résidentiel	18,8	21,7	1,0
Tertiaire	23,3	27,9	1,2
Transport	1,6	2,8	3,8
Consommation finale totale	81,7	90,0	0,6
Énergie appelée	87,3	96,6	0,7

Source : BUREAU FEDERAL DU PLAN. (2017), *Rapport complémentaire électricité*, Rapport de monitoring de la sécurité d'approvisionnement.

## Annexe 11 - Réseau de tuyaux pouvant transporter de l'hydrogène en Belgique



Source : MORADZADEH, M., BOEL, R., ZWAENEPOEL, B., VANDEVELDE, L. (2013), *Use of energy storage for Belgian power network*, IEEE Electrical Power & Energy Conference