

République Algérienne démocratique et populaire
Ministre de l'enseignement supérieur et la recherche
Scientifique



Université Kasdi Merbah -Ouargla

Faculté des science Appliquées

Département de Génie Mécanique



Mémoire

Pour l'obtention du diplôme
Du Master en Génie mécanique
Option : énergétique

Présenter par:

Rahmani Nabil & Hamidi Mokhtar

Thème :

**Conception et simulation d'un système d'air comprimé pour
l'assistance d'une station photovoltaïque**

Soutenu publiquement le 30/05/2017

Mr. DerghoutZoheir	MAA	U.K.M. Ouargla	Président
Mr. Hacini Adel	MAA	U.K.M. Ouargla	Examineur
Dr. DokkarBoubekour	MCA	U.K.M. Ouargla	Rapporteur
Mr. Messaoudi Youcef	Doctorant en G. mécanique		Co-rapporteur

Année Universitaire: 2016/2017

Remerciements



*Merci Allah de nous avoir guidés vers le droit chemin, de nous avoir aidés
tout au long de nos années d'études.*

De nous avoir donnés la capacité et la force d'accomplir ce modeste travail

Nous levons nous mains vers le ciel et nous disons

" الحمد لله "

*Merci à nos parents, et à toute nous familles pour leurs contributions, leurs soutiens et leurs
patiences qui nous ont permis d'arriver jusqu'à cette soutenance*

*Nos sincères remerciements s'adressent à nous encadreur Monsieur Dokkar Boubekour,
enseignant au département mécanique du pole universitaire d'Ouargla d'avoir accepté de
diriger ce travail et pour avoir toujours répondu présent pour tout problème rencontré, pour
ses précieux conseils et ses en couragements et sans qui ce mémoire n'aurait jamais vu le
jour*

*Je remercie tous les enseignants d'université d'Ouargla, particulièrement tous les enseignants
du département mécanique*

*Je remercie tout nous enseignants pour leurs aides et leurs encouragements, tout le long de
nous études*

Je remercie les membres de jury, pour avoir accepté d'examiner ce travail

*Enfin, Je remercie tous ceux qui nous ont aidés à réaliser ce travail, particulièrement
' Brahim ' ' Nouredine ' et ' Mohamed '*

2016/2017





 *Dédicace* 

A celle qui m'a donné la vie, le symbole de tendresse, qui s'est sacrifiée pour mon bonheur

et ma réussite, à ma mère yama

A mon cher père Massoud,

école de mon enfance,

qui a été mon ombre durant toutes mes années des études,

et qui a veillé tout au long de ma vie à m'encourager, à me donner l'aide et à me protéger.

Que dieu les gardes et les protège

A ma grand-mère Djeda

A mon cher frère hamza

qui m'a donné beaucoup de l'aide durant toutes mes années des études universitaires

A ma chère ami Mokhtar

A moi

A tous mes amis



A tous ceux qui me sont chères

A tous ceux qui m'aiment



A qui je souhaite tous le bonheur du monde

A tous ceux que j'aime



Je dédie ce modeste travail.



R .Nabil

 *Dédicace* 

A celle qui m'a donné la vie, le symbole de tendresse, qui s'est sacrifiée pour mon bonheur

et ma réussite, à ma mère yama

A mon cher père Mouhamad, (ربي يرحموا)

école de mon enfance,

qui a été mon ombre durant toutes mes années des études,

et qui a veillé tout au long de ma vie à m'encourager, à me donner l'aide et à me protéger.

Que dieu les gardes et les protège

A mon cher frère hamza

qui m'a donné beaucoup de l'aide durant toutes mes années des études universitaires

A ma chère ami Nabil

A moi

A tous mes amis



A tous ceux qui me sont chères

A tous ceux qui m'aiment



A qui je souhaite tous le bonheur du monde

A tous ceux que j'aime



Je dédie ce modeste travail.



H. Mokhtar

Figure	Page
Figure 1.1 : Schéma synoptique d'un système photovoltaïque	4
Figure 1.2 : Structure d'une cellule photovoltaïque.....	4
Figure 1.3: Les images de différents types de la cellule photovoltaïque	5
Figure 1.4 : Schéma synoptique d'un système photovoltaïque avec stockage	5
Figure 1.5 : Schéma synoptique d'un système photovoltaïque à couplage direct.....	6
Figure 2.1 : Stockage avec batterie.....	8
Figure 2.2 : schéma hydrogène pile à compressible	9
Figure 2.3 : schéma condensateur.....	10
Figure 2.4 : schéma Stockage d'eau	11
Figure 2.5 : schéma air comprime.....	12
Figure 2.4 : schéma systèmes CAES conventionnels.....	13
Figure 2.7 : Schéma systèmes CAES adiabatiques.....	14
Figure 2.8 : le Choi de system de stockage	15
Figure 3.1: schéma de l'installation étudiée (Stockage mécanique par air comprimé.	17
Figure 3.2 : Coupe d'un compresseur rotatif à vis	18
Figure 3.3: Compresseur centrifuge.....	21
Figure 3.4: de turbine à gaz.....	23
Figure 3.5: Une vue de la sortie de chambre de combustion.....	24
Figure 3.6: un stator de turbine à gaz.....	25
figure 4.1 : Simulink Windows.....	27
figure 4.2 : Variation d'enthalpies compresseur.....	28
Figure 4.3 : Modèle compresseur série.....	29
Figure 4.4 : Modèle échangeur(refroidissement par air) série.....	30
Figure 4.5: débit et pression sorte compresseur (1).....	31

Liste De Figures

Figure 4.6: débit et pression sorte compresseur (2).....	31
Figure 4.7: débit et pression sorte compresseur (3).....	32
Figure 4.8 : Modèle Réservoir D'air Comprimé série.....	33
Figure 4.9 : chargé et déchargé de réservoir d'air.....	33
Figure 4.10 : Modèle échangeur(Chauffage à air) série.....	34
figure 4.11 : Variation d'enthalpies turbine.....	36
Figure 4.12 : Modèle des turbines en série	37
Figure 4.13 Courbe de puissance	38
Figure 4.13 : Modèle de système complet.....	39
Figure 4.15 : Courbe de système complet.....	39

Sommaire

Remerciements

Dédicace

List de figures

Résumé

Introduction générale.....1

Chapitre I : Description générale

I .1 Introduction.....3

I .2 Description De Système Photovoltaïque3

I .3 Principe De Fonctionnement De La Cellule Photovoltaïque4

I .4 Types Des Cellule Photovoltaïques4

I.4.1 Les cellules monocristallines.....5

I.4.2 Les cellules poly cristallines.....5

I.4.3 Les cellules amorphes.....5

I .5 Composant Et Accessoires De Système Photovoltaïques.....5

I.5.1 Les systèmes photovoltaïques avec stockage électrique5

I.5.2 Les systèmes à couplage direct sans batterie5

I .6 Avantages Et Inconvenant D Energie Photovoltaïques.....6

I .7 Avantages Et Inconvénient D Energie Photovoltaïques6

Chapitre II : Différentes mode de stockage d'énergie

II.1 Introduction8

II .2 Stockage avec batterie8

II .3 Hydrogène pile à compressible9

II .4 Super condensateur10

II .5 Stockage d'eau10

II .6 Air comprime.....11

II .7 Le choix de système de stockage15

Chapitre III : conception et dimensionnement de système

III.1. Conception de systèmes17

III.2. Compresseur17

III.2.1 Compresseurs volumétriques.....17

III.2.2 Compresseurs dynamiques.....17

Sommaire

III.2.3 Compresseur centrifuge.....	20
III.2.3.1 Eléments constituant la Compresseur centrifuge.....	20
III.3 Réservoir de stockage.....	21
III.3.1 Types de réservoirs.....	21
III.4 Turbine à gaz.....	22
III.4.1 Définition.....	22
III.4.2 Principe.....	23
III.4.3. Eléments constituant la turbine à gaz	24
III.4.3.1 Compresseur.....	24
III.4.3.2 Chambre de combustion.....	24
III.4.3.3 Turbine.....	25
 Chapitre V : Modélisation et simulation	
V.1 Introduction.....	26
V.2 Programme de Matlab.....	26
IV.2.1 Outil Simulink.....	26
V.3 Compresseur	27
V.4 Echangeur de chaleur.....	29
V.4.1 refroidissement de l'air.....	30
V.5 Réservoir D'air Comprimé.....	32
V.6 Réchauffement d'air.....	34
V.7 Turbine à gaz.....	35
V.8 Installation complète	38
V.9 Résultats et discussions	39
 Conclusion générale.....	 41

Résumé :

Ce travail a pour but le stockage de l'énergie électrique produite par des panneaux photovoltaïques. Le système de stockage est constitué de trois compresseurs montés en série qui alimentent un réservoir souterrain pendant les heures d'ensoleillement. Mais, durant les heures d'absence d'ensoleillement, l'air comprimé est utilisé pour faire fonctionner deux turbines entraînant des alternateurs. L'ensemble du système est modélisé et simulé en utilisant le Toolbox Simulink du logiciel Matlab. Les résultats obtenus montrent que le rendement énergétique qui représente le rapport de gains et dépenses turbine-compresseur atteint 42 %

Mots clés : compresseur d'air, échangeur de chaleur, réservoir d'air, turbine, Simulation numérique

Abstract:

This work aims at the storage of the electrical energy produced by photovoltaic panels. The storage system consists of three compressors mounted in series that supply an underground tank during the hours of sunshine. However, during periods of no sunshine, the compressed air is used to operate two turbines driving alternators. The entire system is modeled and simulated using Matlab Simulink Toolbox. The results obtained show that the energy efficiency which represents the ratio of turbine-compressor gains and expenses reaches 42% .

Keywords: air compressor, heat exchanger, air tank, turbine, numerical simulation.

:

يهدف هذا العمل إلى تخزين الطاقة الكهربائية التي تنتجها الألواح الشمسية. ويتكون نظام تخزين حيث هذه الضواغط جوفية خلال ساعات النهار. ولكن أثناء غياب أشعة الشمس يستخدم الهواء المضغوط لتشغيل اثنين من توربينات المولدات الكهربائية. تم تجميع كل محاكاتها عدديا السملينك التابعة لبرنامج ال. وأظهرت النتائج المتحصل عليها مرد ودي الطاقة التي هي استهلاك التوربينات للكهرباء تتعدى 42 .

مفتاحية: ضاغط الهواء، مبادل حراري، خزان الهواء، التوربينات، والمحاكاة العددية .

Introduction générale

La demande mondiale d'énergie connaît une croissance rapide, menaçant la stabilité des prix et causer des préoccupations au sujet de la sécurité d'approvisionnement. De plus, il y a de sérieuses préoccupations sur le réchauffement climatique et les changements climatiques provoqués par l'augmentation de l'impact du réchauffement climatique causé par la combustion des combustibles fossiles.

L'atténuation du climat remarquable, qui a pour but de stabiliser les concentrations des changements de dioxyde de carbone dans l'atmosphère, un changement radical de la fourniture d'énergie de carbone en friche. Ainsi, il semble clair qu'il ya un besoin d'un fort déploiement des énergies renouvelables, mais devrait être prise de plusieurs facteurs (coûts, réglementations et incitations) en compte dans le calcul de l'évolution rapide de l'environnement de l'énergie.

Certaines des principales limites des sources d'énergie renouvelables sont représentées par une faible énergie intensive et la nature du intermittente, dépendant en grande partie des conditions météorologiques du site local qui ne peut pas être le vent .a chamms prédits et les vagues ne peuvent pas être contrôlées pour fournir la charge d'alimentation directe soit continue ou la base de puissance de charge maximale lorsque nécessaire. Ces caractéristiques ont tendance à augmenter le coût unitaire de l'énergie obtenue par des sources renouvelables, ce qui limite la diffusion de Et les avantages.

Le recours à des moyens de surmonter ces limitations aux systèmes de stockage d'énergie et / ou l'utilisation simultanée peut être. Deux ou plusieurs ressources énergétiques au sein de l'usine de production d'électricité hybride dans ce cas, le recours à de multiples sources d'énergie, que ce soit Renouvelable ou traditionnel, il peut atténuer efficacement les effets intermittents des sources renouvelables. L'énergie solaire est intense et très prometteur, car le soleil est actuellement l'un des moyens moins coûteux de produire de l'électricité sans émissions de dioxyde de carbone, et qui peut avoir un rôle important à jouer dans un monde de carbone restreint.

De plus, ces dernières années, un développement important à la lumière a Comme il est arrivé, avec une baisse constante des coûts et l'amélioration de l'efficacité de conversion. Les centrales électriques utilisent l'air sous pression hors pointe est stocké dans un réservoir,

Introduction générale

généralement un stockage de la grotte sous air sol serré. Sur demande, l'air stocké est libéré de la caverne, chauffée et détendue à travers la combustion pour créer des turbines électriques.

Le stockage d'énergie est pas un concept nouveau: le système de stockage d'air comprimé avec la grotte souterraine a été breveté en 1948 l'enregistrement, et a été en cours d'exécution de la première station Cessé d'une capacité de 290MW à Hunter, en Allemagne, depuis 1978. Il 110MW autre usine Cayce a également engagé dans McIntosh, Alabama, depuis 1991. La station de stockage d'énergie est l'un des rares des technologies de stockage d'énergie appropriées pour Pendant longtemps (des dizaines d'heures) et des applications de grande puissance (utilité, coût relativement faible).

Dans ce contexte, on aborde le stockage de l'énergie électrique produite par des panneaux photovoltaïques ou on utilise cette énergie pour alimenter l'antenne et les compresseurs. Ainsi, de stocker l'air comprimé qu'on l'utilise comme source pour entrainer les turbines d'air pour la production d'énergie électrique. Le mémoire contient quatre chapitres, le premier chapitre présente une description générale de système photovoltaïque. Deuxième chapitre traite les différents modes de stockage d'énergie et le choix du système le plus convenable à notre région. Dans le troisième chapitre, on a entamé la conception et dimensionnement de système (compresseur, réservoir de stockage, turbine) , Le quatrième chapitre est consacré à la modélisation et la simulation numérique du système.

Chapitre 01

Description générale

I.1. Introduction

Le soleil est une source énergétique quasiment illimitée, il pourrait couvrir plusieurs milliers de fois notre consommation globale d'énergie [5]. C'est pourquoi, l'homme cherche depuis longtemps à mettre à profit cette énergie importante et diffusée sur l'ensemble de la planète, il est arrivé à réaliser ce but par le moyen dit cellule photovoltaïque.

I.2. Description De Système Photovoltaïque

Le rayonnement solaire est constitué de photons dont la longueur d'onde s'étend de l'ultraviolet (0.2 μm) à l'infrarouge lointain (2.5 μm) ; d où l'énergie totale transportée par le rayonnement solaire sur une distance soleil-terre est de l'ordre de $1350\text{W}/\text{m}^2$ dans l'espace hors atmosphère terrestre ce qui consiste à une source importante d'énergie.

Le scientifique français, Edmond Becquerel, fut le premier à découvrir en 1839 l'effet Photoélectrique. Il a trouvé que certains matériaux pouvaient produire une petite quantité de courant sous l'effet de la lumière. Par la suite, Albert Einstein a découvert, en travaillant sur l'effet photoélectrique, que la lumière n'avait pas qu'un caractère ondulatoire, mais que son énergie était portée par des particules (photons) avec une énergie.

La conversion photovoltaïque aujourd'hui largement utilisée peut être simplement définie comme la transformation de l'énergie des photons en énergie électrique grâce au processus d'absorption de la lumière par la matière.

Lorsqu'un photon est absorbé par le matériau, il passe une partie de son énergie par collision à un électron l'arrachant littéralement de la matière ; Ce dernier étant précédemment à un niveau d'énergie inférieur où il était dans un état stable passe alors vers un niveau d'énergie supérieur, créant un déséquilibre électrique au sein de la matière se traduisant par une paire électron-trou, de même énergie électrique.

Généralement, la paire électron-trou revient rapidement à l'équilibre en transformant son énergie électrique en énergie thermique. De même, toute l'énergie des photons n'arrivant pas à se transformer en électricité est absorbée par le matériau sous forme thermique.

Même si le phénomène électrique est secondaire devant le phénomène thermique, récupérer tout ou partie de l'énergie électrique est le premier objectif des capteurs photovoltaïques sous forme de cellules ou de générateurs.

La plupart des cellules photovoltaïques utilisent des semi-conducteurs pour récolter les paires électron-trou créées par la collision des photons dans le matériau. Cependant, selon le matériau utilisé, le nombre de photons utiles (qui peuvent être absorbés) diffère.

Un système photovoltaïque est donc constitué du générateur, et des charges à alimenter. Ces charges sont de type courant continu ou courant alternatif. Les diverses composantes d'un système photovoltaïque sont représentées symboliquement sur le schéma généralisé dans la (Figure 1.1) [1].

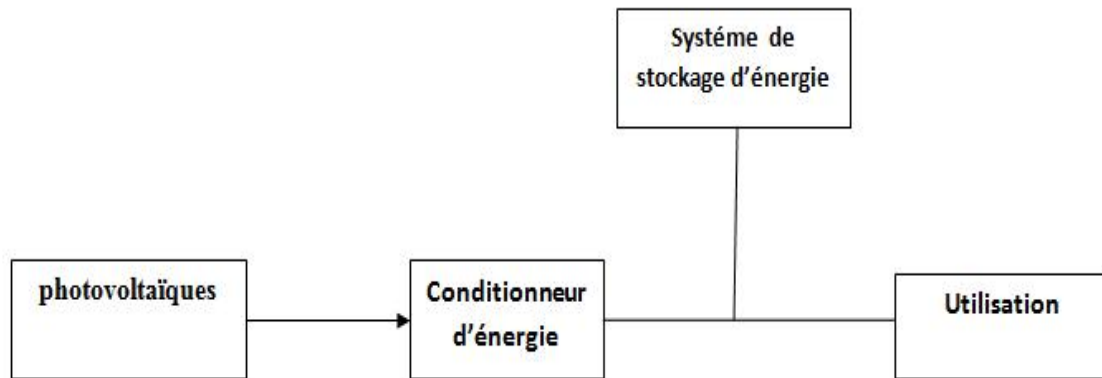


Figure 1.1 :Schéma synoptique d'un système photovoltaïque.[1]

I.3. Principe De Fonctionnement De La Cellule Photovoltaïque

Une cellule photovoltaïque est un dispositif semi-conducteur généralement à base de silicium. Elle est réalisée à partir de deux couches, une dopée P et l'autre dopée N créant ainsi une jonction PN avec une barrière de potentiel. Lorsque les photons sont absorbés par le semi-conducteur, ils transmettent leur énergie aux atomes de la jonction PN de telle sorte que les électrons de ces atomes se libèrent et créent des électrons (charges N) et des trous (charges P). Ceci crée alors une différence de potentiel entre les deux couches. Cette différence de potentiel est mesurable entre les connexions des bornes positives et négatives de la cellule. La structure d'une cellule photovoltaïque est illustrée dans la figure (Figure 1.2) [1].

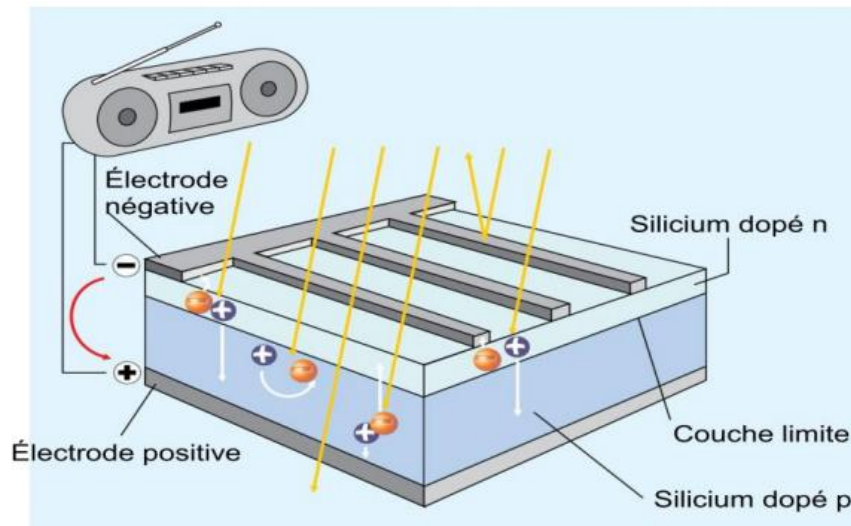


Figure 1.2 Structure d'une cellule photovoltaïque.

I.4.Types Des Cellule Photovoltaïques

Il existe différents types de cellules solaires (ou cellules photovoltaïques), et chaque type de cellules a un rendement et un coût qui lui est propre. Cependant, quel que soit leur type, leur rendement reste assez faible: de 8 à 23% de l'énergie qu'elles reçoivent. Il existe trois principaux types de cellules à l'heure actuelle (Figure 1.3) [1].

I.4.1 Les cellules monocristallines: Ce sont celles qui ont le meilleur rendement mais aussi celle qui ont le coût le plus élevé, du fait d'une fabrication compliquée [1].

I.4.2 Les cellules poly cristallines: Leur conception étant plus facile, leur coût de fabrication est moins important, cependant leur rendement est plus faible [1].

I.4.3 Les cellules amorphes: Elles ont un faible rendement, mais ne nécessitent que de très faibles épaisseurs de silicium et ont un coût peu élevé. Elles sont utilisées couramment dans de petits produits de consommation telle que des calculatrices solaires ou encore des montres [1].

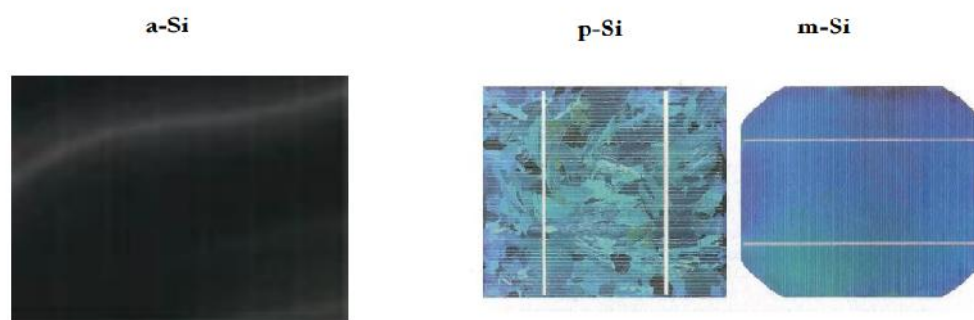


Figure 1.3 Les images de différents types de la cellule photovoltaïque. [1]

I.5.Composant Et Accessoires De Système Photovoltaïques

On ne peut pas considérer les modules photovoltaïques comme simples générateurs d'énergie électrique en remplacement d'un réseau, mais associer étroitement ces modules à un système complet pour une application bien spécifique correspondant à un besoin défini [2].

Les systèmes photovoltaïques les plus couramment utilisés sont de deux types :

I.5.1 Les systèmes photovoltaïques avec stockage électrique

Batterie d'accumulateurs électrochimiques, ceux-ci alimentent des appareils d'utilisation : (Figure 1.4) - soit directement en courant continu. -soit en courant alternatif par l'intermédiaire d'un convertisseur continu- alternatif (onduleur).

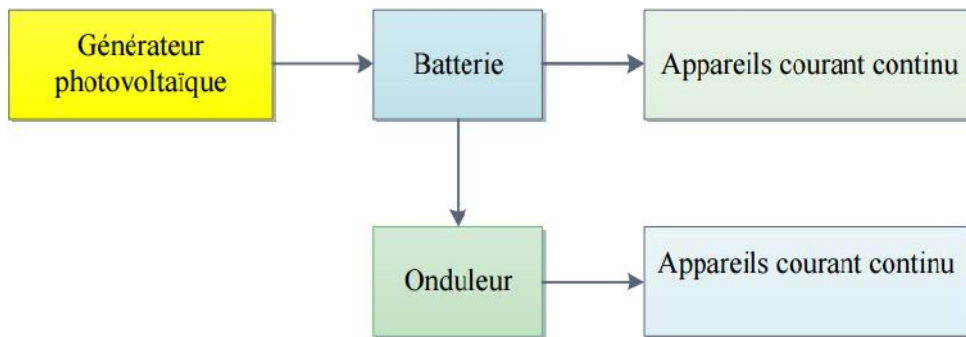


Figure 1.4 Schéma synoptique d'un système photovoltaïque avec stockage. [2]

I.5.2 Les systèmes à couplage direct sans batterie

Les appareils d'utilisation sont branchés soit directement sur le générateur solaire, soit, éventuellement, par l'intermédiaire d'un convertisseur continu-continu, adaptateur d'impédance (Figure 1.5) [2].

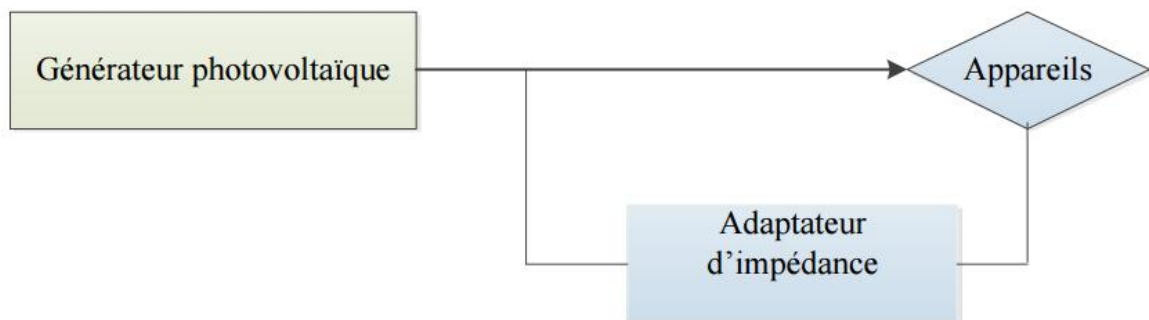


Figure 1.5 Schéma synoptique d'un système photovoltaïque à couplage direct. [2]

I.6. Domaine D'utilisation De Système Photovoltaïques

❖ **Domaine spatial :**

C'est de loin le secteur le plus ancien puisque les premières utilisations de cellules solaires pour des engins spatiaux (satellites, navettes,...) remontent aux années soixante. Télécommunications : Téléphonie rurale, radiotéléphonie,...

❖ **Sites isolés :**

Parcs nationaux, service des eaux et forêts, régions isolées, pays en voie de développement. Pompage de l'eau, irrigation, domiciles, villages ...

❖ **Acquisition de données**

L'énergie photovoltaïque joue un rôle très important pour les stations isolées d'acquisition de données, vu la haute fiabilité de fonctionnement, l'autonomie, la moindre sensibilité à la foudre, la résistance extrême aux conditions naturelles, la maintenance légère et la longévité des équipements (25 ans) [2].

❖ **Domaine du transport**

Lampadaires, panneaux à messages variables, éclairage de panneaux, signalisation lumineuse routière et ferroviaire [2].

I.7. Avantages Et Inconvénient D'Energie Photovoltaïques

➤ **Inconvénients**

La fabrication du module photovoltaïque relève de la haute technologie et requiert des investissements d'un coût élevé.

Le rendement réel de conversion d'un module est faible, de l'ordre de 10-15 % avec une limite théorique pour une cellule de 28% [3].

Les générateurs photovoltaïques ne sont compétitifs par rapport aux générateurs diesel que pour des faibles demandes d'énergie en régions isolées.

Lorsque le stockage de l'énergie électrique sous forme chimique (batterie) est nécessaire, le coût du générateur est accru[3].

Le stockage de l'énergie électrique pose encore de nombreux problèmes.

➤ **Avantage**

D'abord une haute fiabilité. L'installation ne comporte pas de pièces mobiles qui la rendent particulièrement appropriée aux régions isolées. C'est la raison de son utilisation sur les engins spatiaux.

Ensuite le caractère modulaire des panneaux photovoltaïques permet un montage simple et adaptable à des besoins énergétiques divers.

Les systèmes peuvent être dimensionnés pour des applications de puissances allant du milliwatt au Mégawatt. Le coût de fonctionnement est très faible vu les entretiens réduits et il ne nécessite ni combustible, ni son transport, ni personnel hautement spécialisé.

La technologie photovoltaïque présente des qualités sur le plan écologique car le produit fini est non polluant, silencieux et n'entraîne aucune perturbation du milieu, si ce n'est par l'occupation de l'espace pour les installations de grandes dimensions [3].

Chapitre 02

Différentes mode de stockage d'énergie

II.1. Introduction

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

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

Le stockage de l'énergie électrique se fait à partir de plusieurs méthodes tel que le stockage de pile ou avec l'hydrogène pile à compressible ; le super condensateur ; et partir de stockage d'eau ou stockage de l'air comprimé.

II .2 Stockage avec batterie

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

- une électrode positive composée d'un corps oxydant, capable d'attirer des électrons ;
- une électrode négative composée d'un corps réducteur, capable de céder des électrons.

Ainsi, une batterie se caractérise par un couple « oxydant-réducteur »

(Par exemple : plomb-oxyde de plomb, nickel-cadmium...) échangeant des électrons [5].

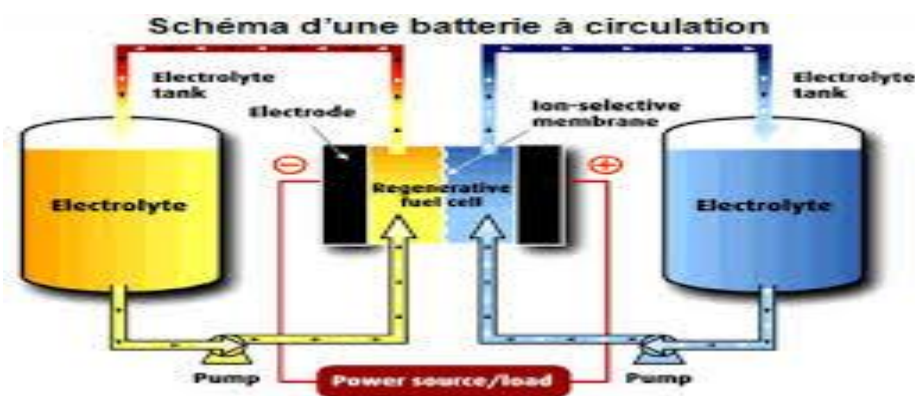


Figure 2.1 Stockage avec batterie. [5]

Les deux électrodes (ou plaques) baignent dans une solution électrolytique (ou électrolyte). C'est la réaction entre la solution et les électrodes qui sont à l'origine du déplacement des électrons et des ions dans la solution produisant ainsi du courant électrique. Utilisées comme réserves massives d'énergie, les batteries peuvent délivrer une puissance pendant quelques heures ou quelques jours. Elles peuvent résister à un certain nombre de cycles charge/décharge [5].

II.3 Hydrogène pile à compressible

L'hydrogène peut devenir un vecteur de stockage selon le principe suivant : l'électricité excédentaire est utilisée pour réaliser une électrolyse de l'eau (via un électrolyseur) ; elle est ainsi convertie en hydrogène H_2 stockable sous forme gazeuse, liquide ou solide. Quand le besoin se manifeste, cette énergie est ensuite restituée via, par exemple, une pile à combustible, qui reconvertit l'hydrogène et l'oxygène en électricité (et en eau) pendant les périodes de forte consommation. Il est également possible d'utiliser l'hydrogène en l'injectant dans le réseau de gaz naturel. Ce dernier peut absorber une proportion d'hydrogène allant de 5 % à 15 % selon les différentes sources consultées. Pour aller plus loin, il est nécessaire de passer par le méthane de synthèse. Celui-ci est produit par la combinaison de l'hydrogène avec du CO_2 . Cette opération porte le nom de méthanisations [5].

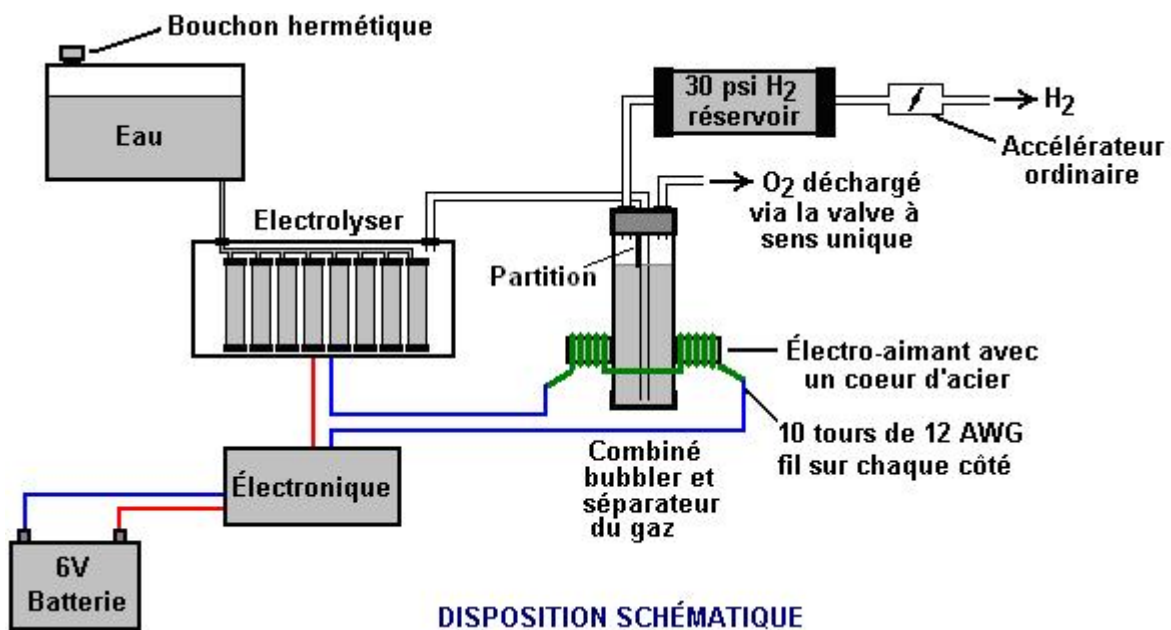


Figure 2.2: schéma hydrogène pile à compressible[5].

II .4 Super condensateur

Les condensateurs sont des composants électroniques dont la capacité se mesure à l'échelle du microfarad. Ils sont présents dans tous nos appareils électroniques. Leurs champs d'application se situent pour l'essentiel en dehors des limites de notre saisine. Il n'en est pas de même des super condensateurs. Leur capacité s'évalue en dizaines voire en milliers de Farad, ce qui les rend comparables aux batteries. Mais, dans les conditions actuelles, les super condensateurs interviennent plutôt en puissance (pour délivrer du courant de manière instantanée) qu'en énergie. Ils peuvent donc représenter un complément intéressant des batteries. La combinaison batterie/super condensateur peut s'avérer particulièrement efficace dans le cas des véhicules hybrides [7].



Figure 2.3: schéma condensateur. [7]

II .5 Stockage d'eau

Le stockage d'eau pour production d'électricités l'un des technologies de stockage par gravitation.

Elles sont composées de deux retenues d'eau à des hauteurs différentes reliées par un système de canalisations. Ou sont équipées d'un système de pompage permettant de transférer l'eau du bassin inférieur vers le bassin supérieur en heures creuses. En heures pleines, la station fonctionne comme une centrale hydroélectrique classique [7].

On distingue deux types de pompage :

- les stations de pompage d'apports : elles permettent de remonter via des pompes un volume d'eau entre son propre réservoir et le réservoir supérieur d'une chute turbinage. Les eaux turbinées proviennent ainsi des apports gravitaires et des apports de la station de pompage
- les stations de transfert d'énergie par pompage (STEP) : elles sont caractérisées par un fonctionnement en cycles pompage-turbinage entre un réservoir inférieur et un

réservoir supérieur, grâce à des turbines-pompes réversibles. Le pompage peut être « mixte » (les eaux turbinées proviennent des apports gravitaires et des apports de la station de pompage) ou « pur » (les apports naturels au réservoir supérieur sont négligeables) [7].

Fonctionnement d'une installation de stockage gravitaire

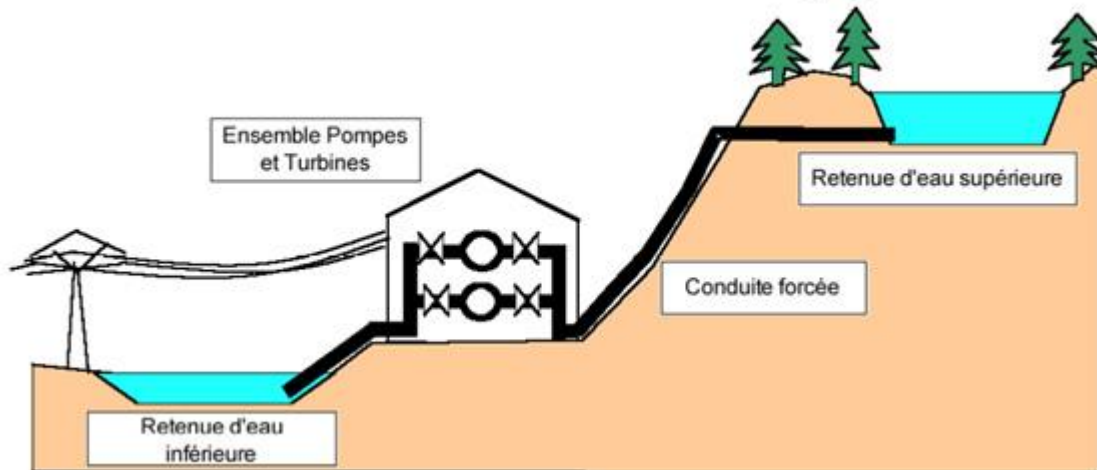


Figure 2.4: schéma Stockage d'eau. [7]

II.6 Air comprimé

➤ Définition

Le « CAES », (de l'anglais Comprimé Air Energie Storage) est un mode de stockage d'énergie par air comprimé, c'est-à-dire d'énergie mécanique potentielle, qui se greffe sur des turbines à gaz.

Dans une turbine à gaz classique, de l'air ambiant est capté et comprimé dans un compresseur à très haute pression (100 à 300 bar). Cette compression de l'air s'accompagne d'un échauffement pouvant aller jusqu'à quelques centaines de degrés. L'air chaud comprimé est injecté avec du gaz dans une chambre de combustion. Le mélange en sortie entraîne une turbine et un alternateur pour produire de l'électricité [10].

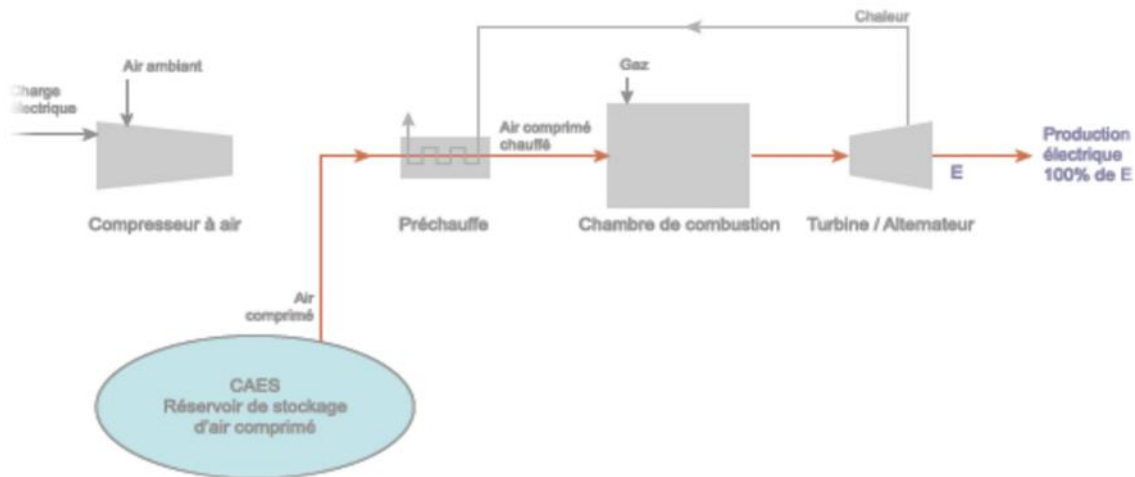


Figure 2.5 : schéma air comprime. [10]

Le principe du CAES consiste à stocker l'air comprimé et ainsi à décorréliser la phase de compression de l'air du reste du processus. Pour ce faire, un système de stockage de ce type est inséré entre le compresseur et la chambre de combustion. En phase de stockage, le compresseur utilise l'énergie disponible sur le réseau électrique pour comprimer de l'air. Cet air comprimé est ensuite acheminé puis stocké dans un réservoir adéquat. En phase de déstockage, l'air comprimé est extrait de son réservoir et envoyé dans la chambre de combustion qui précède la turbine. L'énergie produite est enfin restituée ou vendue au réseau. La compression est une étape très coûteuse en énergie : elle consomme l'équivalent d'environ un tiers de l'énergie produite en sortie de turbine. Le principal intérêt du stockage par air comprimé consiste aujourd'hui à réaliser cette compression en utilisant de l'électricité disponible à un prix faible qui serait potentiellement « fatale », c'est-à-dire perdue si elle n'était pas utilisée à cette fin [10].

➤ Fonctionnement

Types de systèmes CAES

Il existe trois générations de CAES, classées selon les technologies utilisées et leur niveau de maturité :

a- Les systèmes CAES conventionnels :

Dans les CAES dits conventionnels, l'air chaud comprimé en sortie de compresseur est directement envoyé dans une chambre de stockage. A ce jour, il n'existe toutefois pas de réservoir permettant un stockage de l'air maintenant en même temps une haute température et une haute pression : la chambre de stockage d'un CAES conventionnel assure le maintien en pression du gaz mais pas en température. Lorsque l'air comprimé est extrait du réservoir en phase de déstockage, sa température a donc décliné. Cela a deux conséquences pour les CAES :

l'air comprimé doit être préchauffé avant d'être envoyé dans la chambre de combustion en phase de déstockage (par exemple en réutilisant du gaz en sortie de turbine) ; l'efficacité d'un CAES conventionnel est d'environ 50%, ce qui est largement inférieur à l'efficacité de la majeure partie des systèmes de stockage d'énergie. A titre de comparaison, l'efficacité des STEP (Station de Transfert d'Énergie par Pompage) est comprise entre 70% et 85%. L'efficacité limitée des CAES conventionnels est liée à la part d'énergie dissipée sous forme de chaleur [10].

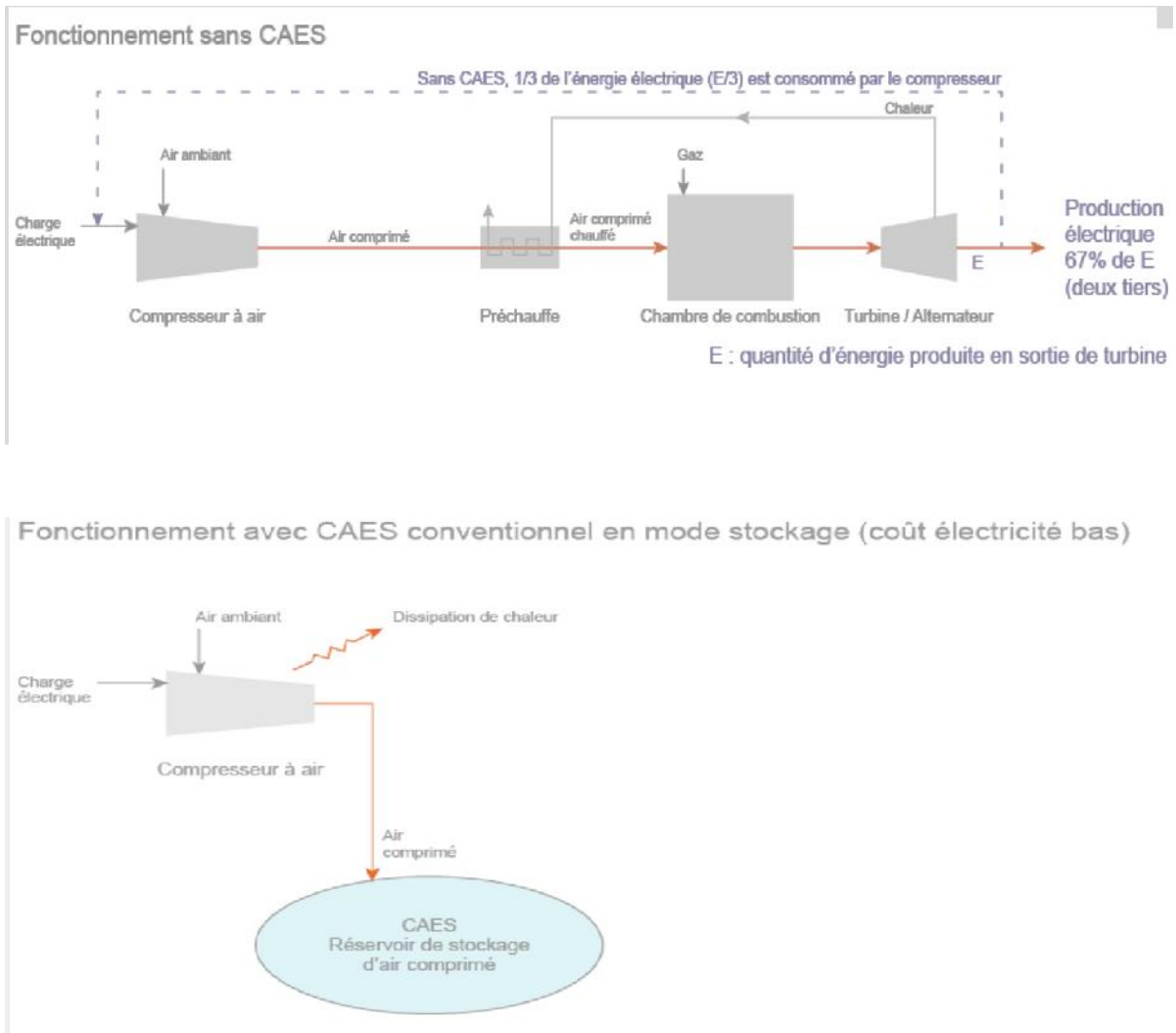


Figure 2.6 : schéma systèmes CAES conventionnels[10].

b- Les systèmes CAES adiabatiques

Un système est dit « adiabatique » quand il n'échange pas de chaleur avec l'extérieur. Les CAES adiabatiques sont donc semblables aux systèmes conventionnels mais incluent en plus un système permettant de stocker la chaleur. Face à la difficulté de créer un réservoir pouvant assurer en même temps le maintien en pression et en température de l'air, un second réservoir est utilisé pour stocker la chaleur [10].

Les CAES adiabatiques sont donc constitués d'un réservoir permettant de stocker l'air comprimé (semblable aux réservoirs des CAES conventionnels) et d'un système de stockage thermique récupérant la chaleur de l'air comprimé en sortie de compresseur. En phase de déstockage, cette chaleur est restituée à l'air comprimé avant le passage dans la turbine. Les CAES adiabatiques atteignent grâce à ce système une efficacité de l'ordre de 70% [10].

Fonctionnement du CAES adiabatique

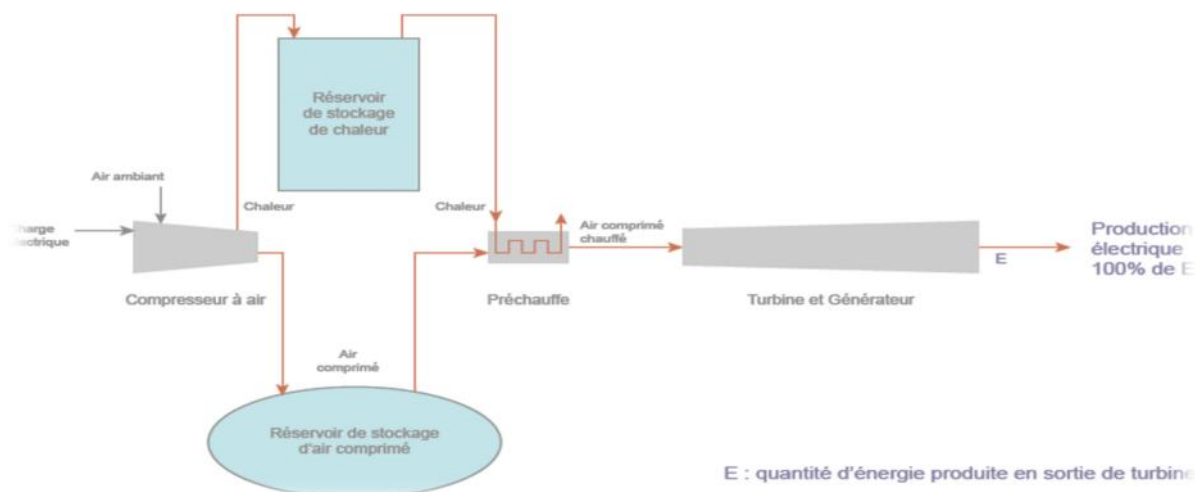


Figure 2.7 : Schéma systèmes CAES adiabatiques. [10]

c- Les systèmes CAES isothermes :

Encore au stade du prototype, les systèmes CAES isothermes relèvent des dernières innovations ayant pour but d'augmenter l'efficacité des CAES. Un processus est dit « isotherme » lorsque la température du système considéré est uniforme et constante. Un CAES isotherme consiste donc à extraire la chaleur de l'air au fur et à mesure de sa compression (et non pas après sa compression comme dans le cas des systèmes adiabatiques). Ce système aurait une efficacité de l'ordre de 95% pour le système détendeur/compresseur [10].

➤ Types de réservoirs :

Hormis les différences technologiques, les CAES se distinguent par le type de réservoir qu'ils utilisent pour stocker l'air comprimé. Pour des volumes importants, les grottes et autres cavités géologiques naturelles ou artificielles (mines) sont favorisées. L'installation d'un CAES est dans ce cas tributaire de l'existence de telles cavités ou de la possibilité d'en creuser et donc de la nature du sous-sol.

Pour stocker des volumes plus restreints, des réservoirs artificiels en surface ou enterrés sont privilégiés. Enfin, des solutions alternatives émergent comme les projets de CAES sous-

marins dans lesquels le poids de l'eau assure le maintien en pression des réservoirs[10].

II .7. Le choix de système de stockage

Pour comparer les technologies de stockage et déterminer les plus pertinentes pour un usage particulier, plusieurs facteurs techniques doivent être pris en compte. En particulier, pour le stockage stationnaire d'électricité :

- **La puissance disponible (en MW) et la capacité énergétique (en MWh) :** La combinaison de ces deux critères permet de définir le ratio énergie/puissance correspondant au temps de décharge réalisable, souvent caractéristique d'une application particulière [9].
- **Le temps de réaction :** est un indicateur de la réactivité du moyen de stockage. Il est parfois préférable de définir la vitesse de montée et de descente en charge qui caractérise de manière plus fine le comportement réactif du système [9].
- **L'efficacité :** définie comme rapport entre l'énergie stockée et l'énergie restituée (en MWh OUT/MWh IN) [9].
- **La durée de vie :** qu'il est parfois préférable de définir en nombre de cycles de charge/décharge admissibles pour des technologies comme les batteries. Pour d'autres usages, d'autres critères sont à prendre en compte, comme la densité énergétique (en MWh/kg ou en MWh/m³) pour la mobilité par exemple. Le graphique ci-dessous positionne les technologies selon leurs temps de décharge et puissance typiques[8].

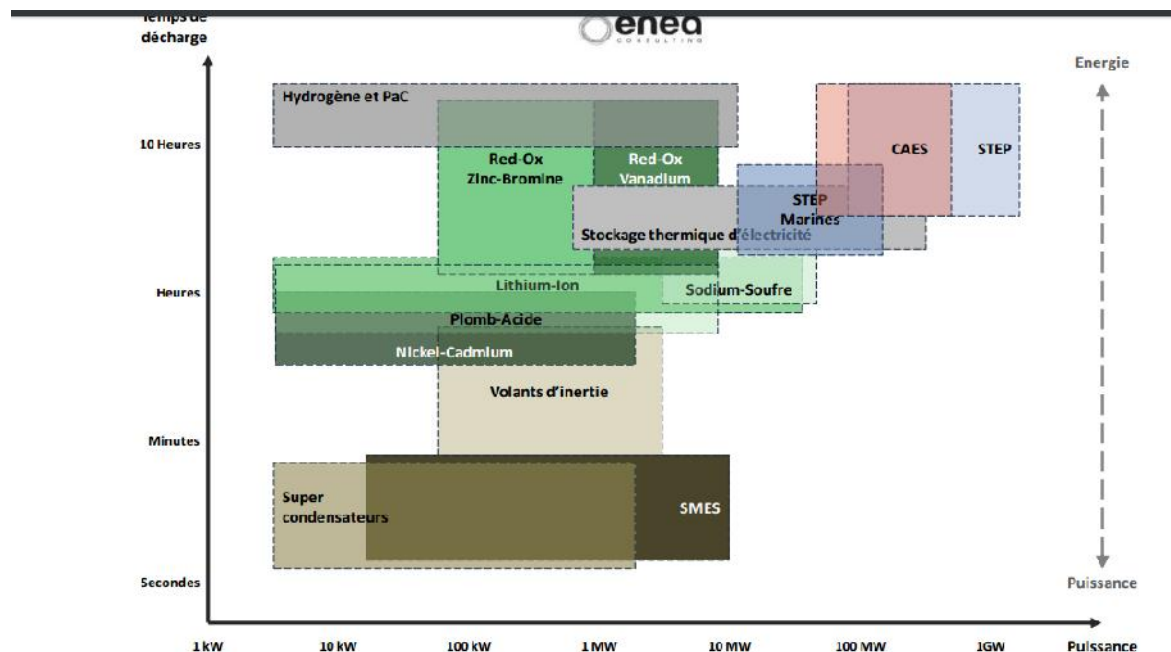


Figure 2.8 : le Choix de système de stockage. [9]

A partir de ces données et d'autres on a choisi dans ce travail de faire une étude sur le stockage d'énergie électrique par air comprimé (CAES) ; qui repose sur l'idée suivante :

Une turbine à gaz utilise environ un tiers de sa puissance pour comprimer l'air à l'entrée, puissance qui dès lors n'est pas vendue au réseau. Choisir de perdre cette puissance en heure creuse plutôt qu'en heure de pointe permet de faire des économies substantielles : c'est un bon exemple d'intégration d'un stockage d'énergie dans un procédé industriel, en tirant parti d'une étape de compression très coûteuse en énergie mais inévitable. Le stockage permet de décorréliser la consommation électrique de son utilisation. Ici, c'est grâce à une cavité souterraine (ou en réservoirs de surface pour les petites installations) qui peut contenir une quantité suffisante d'air comprimé. S'agissant de cavernes creusées, les contraintes de site sont bien moindres que pour des stockages de gaz naturel ou de CO₂ par exemple, qui eux sont stockés dans la porosité des roches. Il est donc possible d'en construire quasiment partout, à des coûts variant de 0,5 à 25 €/kWh [8].

Chapitre 03

Conception et dimensionnement de système

III.1 Conception de systèmes

L'électricité disponible durant les heures creuses sert à comprimer de l'air avec un turbocompresseur (figure 1.3). L'air comprimé est stocké dans des cavernes situées à grande profondeur, des mines de sel par exemple. Pour récupérer l'électricité, l'air comprimé est dirigé vers une turbine à gaz.

La première unité commerciale de 290 MW à Hausdorff en Allemagne a été mise en route en 1978. En 1991 en Alabama a été mise en fonctionnement une installation de 110 MW. Une installation de 2700 MW est prévue à Norton en Ohio en 2012.

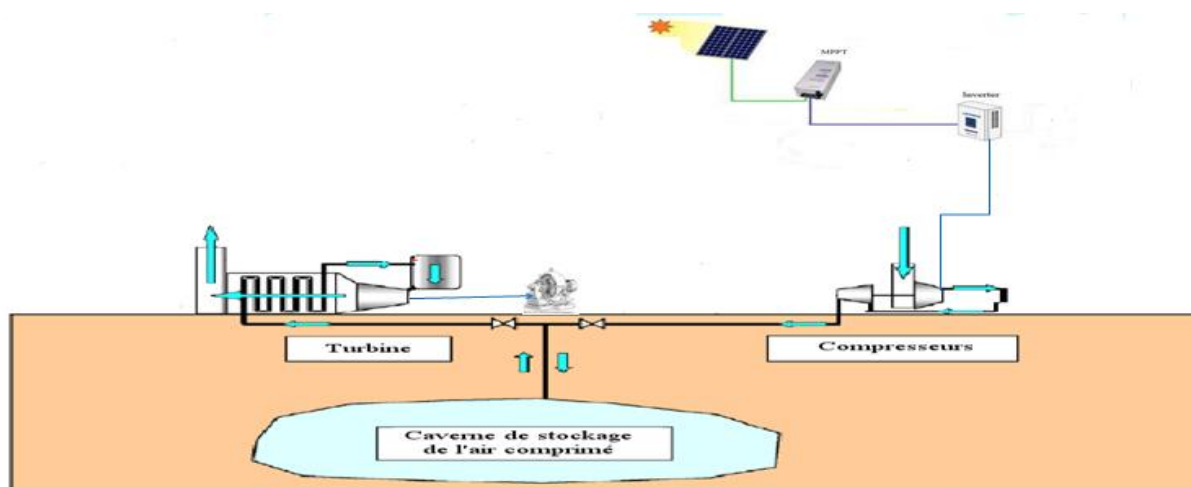


Figure 3.1: schéma de l'installation étudiée (Stockage mécanique par air comprimé) [15]

III.2. Compresseur

Pour produire l'air comprimé, on utilise des compresseurs qui augmentent la pression de l'air.

Il existe en gros deux types fondamentaux de compresseurs [15]

- *Les compresseurs volumétriques
- *Les compresseurs dynamiques.

III.2.1. Compresseurs volumétriques

Dans le type volumétrique, une quantité donnée d'air est aspirée dans une chambre de compression puis le volume que l'air occupe est diminué, ce qui entraîne une augmentation correspondante de sa pression avant qu'il soit refoulé. Les compresseurs d'air rotatifs à vis, les compresseurs à palettes et les compresseurs à pistons sont les trois types les plus répandus de compresseurs volumétriques utilisés dans les petites et moyennes industries [15].

III.2.2. Compresseurs dynamiques

Les compresseurs d'air dynamiques, qui comprennent des machines centrifuges et des machines axiales, sont courants dans les très grosses installations de fabrication. Ces compresseurs sortent du cadre du présent document [15].

a)1. Compresseurs Rotatifs A Vis

Depuis les années 1980, les compresseurs rotatifs à vis connaissent une certaine popularité et ont conquis une part intéressante du marché (par rapport aux compresseurs à pistons). Ils sont les plus répandus pour des puissances comprises entre 5 et 900 HP. Le type le plus courant de compresseur rotatif est le compresseur à vis à deux rotors hélicoïdaux. Deux rotors accouplés sont engrainés ensemble, emprisonnant l'air et réduisant son volume le long des rotors. Selon les exigences de pureté de l'air, les compresseurs rotatifs à vis sont du type lubrifié ou sec (sans huile) [15].

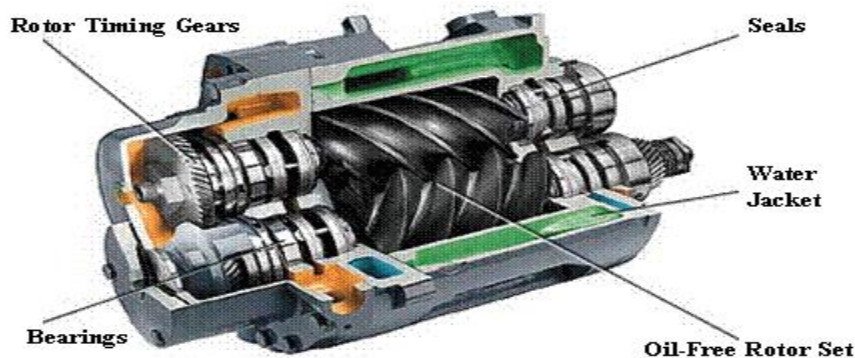


Figure 3.2 Coupe d'un compresseur rotatif à vis type (avec la permission de *AtlasCopco*) [15]

L'avantage :

Majeur des compresseurs à vis par rapport aux compresseurs à pistons de petite puissance refroidis par air est qu'ils peuvent tourner sans interruption à pleine charge, alors que les compresseurs à piston doivent être employés avec un facteur d'utilisation maximal de 60 %. Les compresseurs rotatifs à vis sont en outre bien plus silencieux et produisent de l'air plus froid qu'il est plus facile de sécher. Sachez toutefois que les compresseurs rotatifs à vis peuvent ne pas être le meilleur choix en matière d'efficacité comparativement aux compresseurs à pistons à régulation tout ou rien [15].

a) 2. Compresseur rotatif à vis à injection d'huile

Le compresseur rotatif à vis à injection d'huile constitue le type le plus répandu de compresseur industriel pour de nombreuses applications. Le lubrifiant employé dans ce type de compresseurs peut être soit à base d'hydrocarbures, soit un produit synthétique. En principe, la sortie d'air comprend un mélange d'air comprimé et de lubrifiant injecté et passe par un carter dans lequel le lubrifiant est extrait de l'air comprimé. Des changements de direction et de vitesse permettent de séparer la plus grande partie du liquide. Les aérosols résiduels dans l'air comprimé sont alors séparés dans un élément de séparation situé à l'intérieur du carter et il ne subsiste dans l'air comprimé que quelques parties par million (ppm) de lubrifiant [15].

Dans le cas des compresseurs à deux étages, le refroidissement entre étages et les pertes internes minimales en raison de la pression plus faible dans chaque étage, augmentent l'efficacité du processus de compression. Par suite, la compression de l'air à la pression finale demande moins d'énergie [15].

a).3Compresseur rotatif à vis sec

Dans ce type de compresseur exempt d'huile, les rotors en grenats ne sont pas en contact, des engrenages de synchronisation extérieurs maintenant le jeu qui les sépare dans des tolérances très faibles. Dans la plupart des modèles, on emploie deux étages de compression avec refroidisseur intermédiaire et refroidisseur de sortie. Les compresseurs rotatifs à vis exempts d'huile existent dans une gamme de 25 à 1200 HP ou de 90 à 5200 pcm[15] .

b).Compresseurs à pistons

Les compresseurs de ce type comportent un piston entraîné par un vilebrequin et un moteur électrique. Les compresseurs à piston à usage général sont disponibles sur le marché dans des puissances comprises entre moins de 1 HP et 30 HP environ. Ils sont souvent employés pour fournir de l'air à des dispositifs de régulation et d'automatisation dans les bâtiments[15] .

On trouve encore dans l'industrie des compresseurs à pistons de grande puissance, mais ils ne sont plus commercialisés aujourd'hui sauf pour des procédés spécialisés tels que les applications à haute pression. Piston à usage général sont disponibles sur le marché dans des puissances comprises entre moins de 1 HP et 30 HP environ. Ils sont souvent employés pour fournir de l'air à des dispositifs de régulation et d'automatisation dans les bâtiments [15].

On trouve encore dans l'industrie des compresseurs à pistons de grande puissance, mais ils ne sont plus commercialisés aujourd'hui sauf pour des procédés spécialisés tels que les applications à haute pression [15].

c). Compresseurs à palettes :

Un compresseur rotatif à palettes met en jeu un rotor à rainures excentré, situé dans un cylindre. Les rainures longitudinales du rotor sont équipées chacune d'une palette. Lorsque le rotor tourne, ces palettes sont plaquées vers l'extérieur par la force centrifuge et elles coulisent à l'intérieur des rainures en raison de l'excentricité du rotor par rapport au stator. Les palettes balayent le cylindre, aspirant l'air d'un côté et le rejetant de l'autre. Les compresseurs à palettes servent généralement dans des applications de petite puissance lorsqu'existent des problèmes d'encombrement; ils ne sont toutefois pas aussi efficaces que les compresseurs rotatifs à vis [15].

d). Moteurs de compresseurs

Les moteurs électriques constituent le moyen le plus courant d'entraînement des compresseurs. En tant que moteurs d'entraînement, ils doivent délivrer une puissance suffisante pour démarrer le compresseur, l'accélérer jusqu'à sa pleine vitesse, et assurer son fonctionnement dans les diverses conditions prévues. La plupart des compresseurs d'air utilisent des moteurs électriques triphasés à induction classiques.

Pour les compresseurs d'air neufs ou de remplacement, on devra spécifier des moteurs à haut rendement certifiés Premium plutôt que des moteurs standards. Le coût marginal d'un moteur à haut rendement certifié Premium est en général amorti rapidement en raison des économies d'énergie qu'il procure [15].

III.2.3. Compresseur centrifuge

Dans un compresseur centrifuge, le parcours de l'air s'effectue radialement à partir des roues, et l'air passe à travers des diffuseurs d'un étage à l'autre avant d'être refoulé. L'air peut être refroidi efficacement entre les étages en refroidissant le carter : on obtient ainsi une compression presque idéale à chaque étage. Sauf pour les compresseurs de très grandes dimensions, le rendement global des compresseurs centrifuges est inférieur à celui des compresseurs volumétrique à cause de la perte d'énergie importante dans les diffuseurs. Les compresseurs centrifuges fournissent une pression de refoulement constante pour une vaste gamme de débit d'air. Le refroidissement entre les étages des compresseurs centrifuges est en général assuré par la circulation de l'eau dans le carter. Les appareils dont le

refoulement est inférieur à 400 kPa (eff.) ne nécessitent habituellement pas de refroidissement.

Les compresseurs centrifuges fonctionnent à haut vitesse et la plupart des machines commerciales fonctionnent à environ 20000 tours par minute (tr/min). On peut obtenir des vitesses de 100000 tr/min dans les industries aéronautiques et aérospatiales.

Les avantages des compresseurs centrifuges deviennent lorsque les débits dépassent 1200L/s. les principaux avantages de ces compresseurs sont les suivants : grande capacité, faible taux de vibrations, compacité, refoulement d'air sans huile et une capacité maximum inhérente à chaque machine. Les principaux désavantages comprennent la nécessité d'installer un multiplicateur de vitesse (s'il n'est pas entraîné par turbine), la faible jeu entre les pièces et le coût élevé de l'entretien [14].

III.2.3.1. Eléments constituant le Compresseur centrifuge

L'ensemble statorique:

A. Le Corps de compresseur : est en forme de barillet, ouverte par l'aspiration finale et fermée par une bride de tête.

B. L'ensemble de diaphragmes : comprend le composant statorique et des étages de compression.

. Les étanchéités à labyrinthe : sont installées dans les diaphragmes pour minimiser les fuites de gaz provenant des zones de refoulement et d'aspiration des roues (D) ou impulsors

. Les bagues d'étanchéité : sont installées dans des rainures sur le pourtour du contre corps, empêchent les fuites de gaz vers des zones à pression inférieure.

H. Paliers porteurs : sont du type à patin oscillants et à lubrification forcée, l'huile de graissage passe à travers des orifices pour lubrifier les patins et taquets

I. Palier de butée : placé sur l'une des extrémités du corps pour absorber la poussée agissant sur le rotor

L. Les étanchéités à labyrinthes : installées entre les ensembles statorique et rotorique du compresseur pour réduire les pertes de gaz entre les zones à pression différente.

L'ensemble rotatif:

Le rotor: se compose d'un arbre (C), impulsors et bagues d'écartement, il est soumis à une poussée axiale dirigée du côté d'aspiration, la poussée est équilibrée par le tambour d'équilibrage

E. Le tambour d'équilibrage : est un disque gabarié monté sur l'extrémité de l'arbre adjacent à la roue du dernier étage, sa pression égale à la pression d'aspiration.

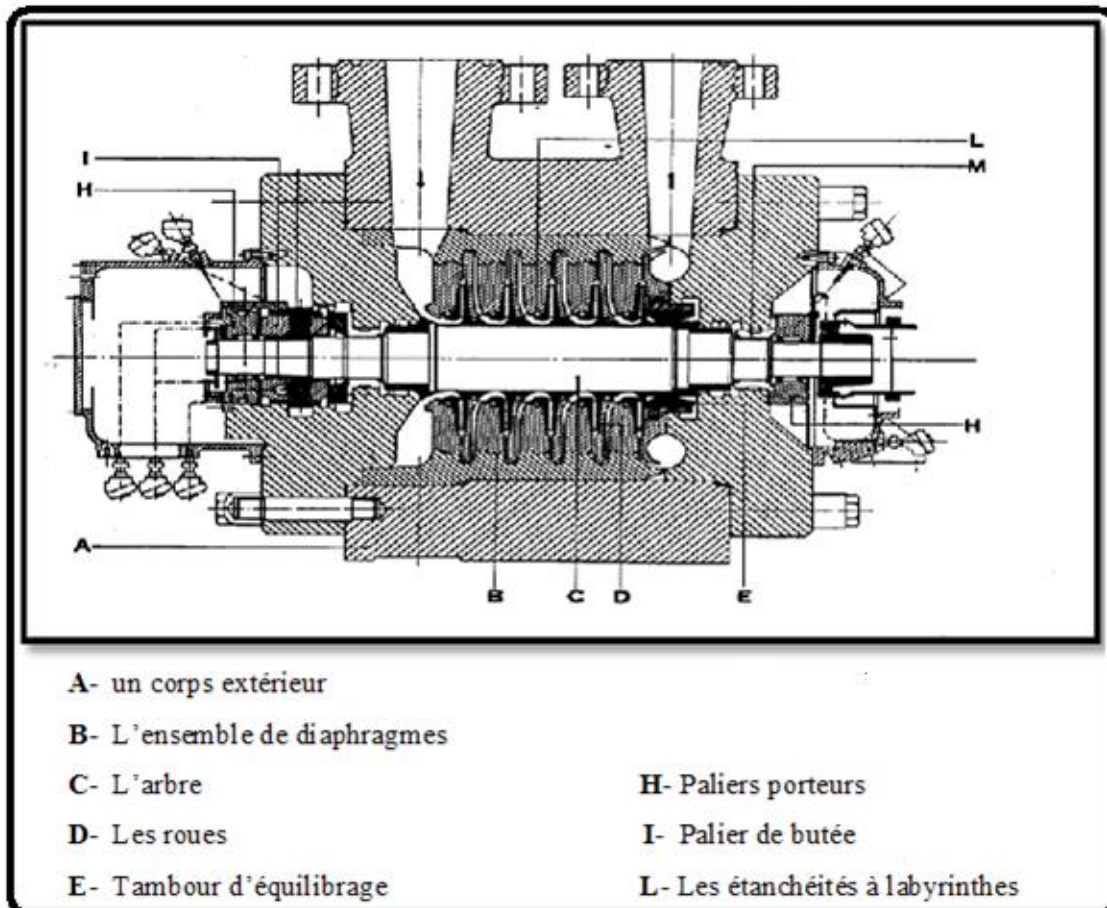


Figure 3.3: Compresseur centrifuge. [14]

III.3 Réservoir de stockage

III.3.1. Types de réservoirs

Hormis les différences technologiques, les CAES (Compressor air énergieStorage) se distinguent par le type de réservoir qu'ils utilisent pour stocker l'air comprimé. Pour des volumes importants, les grottes et autres cavités géologiques naturelles ou artificielles (mines) sont favorisées. L'installation d'un CAES (Compressor air énergieStorage) est dans ce cas tributaire de l'existence de telles cavités ou de la possibilité d'en creuser et donc de la nature du sous-sol [16].

Dans les systèmes d'air comprimé, les réservoirs d'air primaires remplissent plusieurs fonctions importantes [16] :

- Ils amortissent les pulsations engendrées par les compresseurs à pistons.

- Ils offrent un emplacement pour la décantation de l'eau libre et de l'huile contenues dans le flux d'air comprimé.
- Ils alimentent les demandes de pointe à partir de l'air emmagasiné sans qu'il soit nécessaire de démarrer un compresseur supplémentaire.
- Ils diminuent la fréquence des cycles à vide/en charge ou marche/arrêt assurant un fonctionnement plus efficace des compresseurs à vis et réduisant les démarrages de moteurs. La plupart des compresseurs à vis comportent un dispositif de protection interne interdisant plus de 4 à 6 démarrages par heure.
- Ils ralentissent les variations de pression du système pour permettre une meilleure régulation des compresseurs et pour assurer des pressions plus stables dans le système d'air comprimé.

III.4 Turbine à gaz

III.4.1. Définition :

Une turbine à gaz est une machine tournante thermodynamique appartenant à la famille des moteurs à combustion interne dont le rôle est de produire de l'énergie mécanique sous la forme de la rotation d'un arbre, directement à partir de l'énergie cinétique des gaz produits par la combustion d'un hydrocarbure (fioul, gaz combustible...) qui subissent une détente dans une turbine. Le comburant, le plus souvent de l'air ambiant, est généralement comprimé avant de pénétrer dans la chambre de combustion, en utilisant un compresseur rotatif entraîné par le même arbre que la turbine. Le mot « gaz » dans l'ancienne dénomination « turbine à gaz » (longtemps la plus employée) ne signifie pas que la machine ne peut brûler que du combustible gazeux, mais fait référence au caractère gazeux des produits de combustion, par opposition aux turbines à vapeur dans lesquelles le fluide moteur (de la vapeur d'eau) se condense en liquide [17] .

III.4.2. Principe:

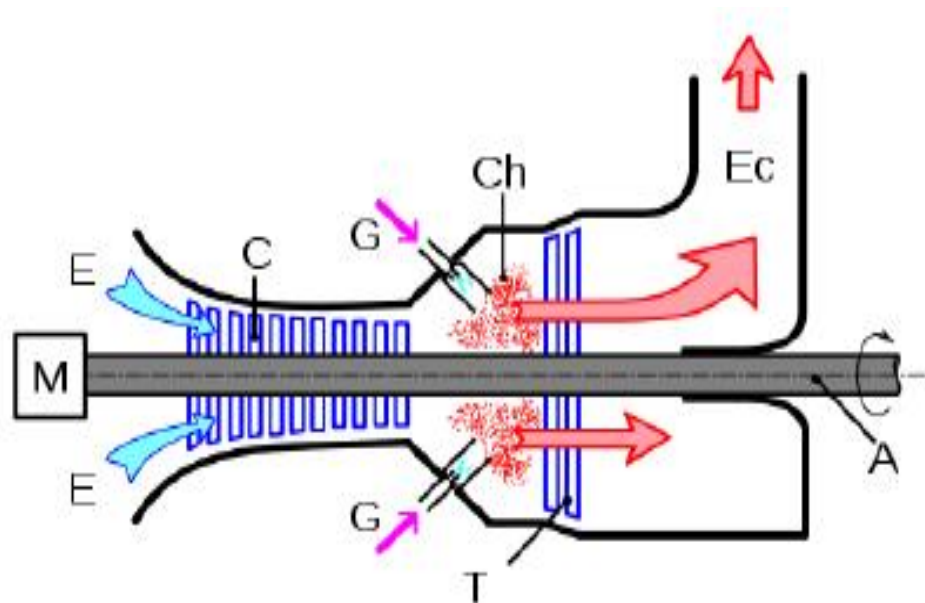


Figure3.4: schéma de turbine à gaz. [17]

- Le compresseur (« C »), constitué d'un ensemble d'ailettes fixes (stator) et mobiles (rotor), comprime l'air extérieur (« E »), simplement filtré, jusqu'à 10 à 15 bars, voir 30 bars pour certains modèles.
 - Du combustible (« G ») (gazeux ou liquide pulvérisé), est injecté dans la (les) chambre(s) de combustion (« Ch ») où il se mélange à l'air comprimé pour entretenir une combustion continue.
 - Les gaz chauds se détendent en traversant la turbine (« T »), où l'énergie thermique et cinétique des gaz chauds est transformée en énergie mécanique. La turbine est constituée d'une ou plusieurs roues également munies d'ailettes précédées d'aubages fixes (directrices). Les gaz de combustion s'échappent par la cheminée (« Ec ») à travers un diffuseur.
 - Le mouvement de rotation de la turbine est communiqué à l'arbre (« A ») qui actionne d'une part le compresseur et d'autre part une charge qui n'est autre qu'un appareil (machine) récepteur (pompe, alternateur, compresseur...) accouplé à son extrémité.
- Pour la mise en route, on utilise un moteur de lancement (« M ») qui joue le rôle de démarreur ; dans certaines configurations, c'est l'alternateur du groupe lui-même qui est utilisé en moteur pendant la phase de lancement. Le réglage de la puissance est possible en agissant sur le débit de l'air à l'entrée et sur l'injection du carburant. Le réglage de la vitesse de rotation n'est possible que si l'organe entraîné le permet. En effet, dans le cas d'un alternateur connecté à un

réseau électrique à fréquence fixe (par exemple 50 ou 60 Hz), cette fréquence impose une vitesse fixe, le débit de carburant sert alors à régler la puissance produite [17] .

III.4.3 Eléments constituant la turbine à gaz :

Une turbine à gaz se compose de trois sections principales, décrites dans les paragraphes suivants [17] :

III.4.3.1 Compresseur turbin

Le compresseur est utilisé pour accroître la pression de l'air. Cette pression permet d'optimiser les processus de combustion et d'extraction de puissance puisque la combustion du mélange fuel/air se fait dans un plus petit volume. D'autre part, l'augmentation du taux de compression entraîne une augmentation de l'efficacité thermique. Deux types de compresseurs existent : les compresseurs axiaux et les compresseurs centrifuges. Un paramètre important à prendre en compte est l'encombrement. Ainsi, si on dispose d'un espace réduit, les compresseurs axiaux sont moins encombrants. D'autre part, la surface faciale d'un compresseur axial est beaucoup plus petite que celle d'un compresseur centrifuge. Chaque ensemble rotor - stator du compresseur constitue un étage de compression. Le taux de compression qu'autorise un seul étage est de l'ordre de 2, toutefois il est beaucoup plus facile de multiplier les étages que dans le cas des compresseurs centrifuges. Les taux de compression autorisés aujourd'hui par les compresseurs axiaux sont de l'ordre de 30 [17] .

III.4.3.2 Chambre de combustion

La chambre de combustion est conçue pour brûler un mélange de fuel et d'air et pour délivrer à la turbine les gaz résultants à une température uniforme la plus élevée possible afin d'optimiser son fonctionnement. Mais la température des gaz ne doit pas dépasser la température maximale autorisée pour la turbine, sinon ce dernier risque d'être endommagée.

Il existe deux types de chambres de combustion : les chambres tubulaires qui ne sont plus utilisées actuellement, et les chambres annulaires plus légères et plus simples. Le carburant est amené à la chambre de combustion sous très forte pression par des pompes, il est alors vaporisé par des injecteurs. Les gouttelettes ainsi formées doivent être les plus fines possible afin de pouvoir réduire la longueur de la chambre de combustion [17] .

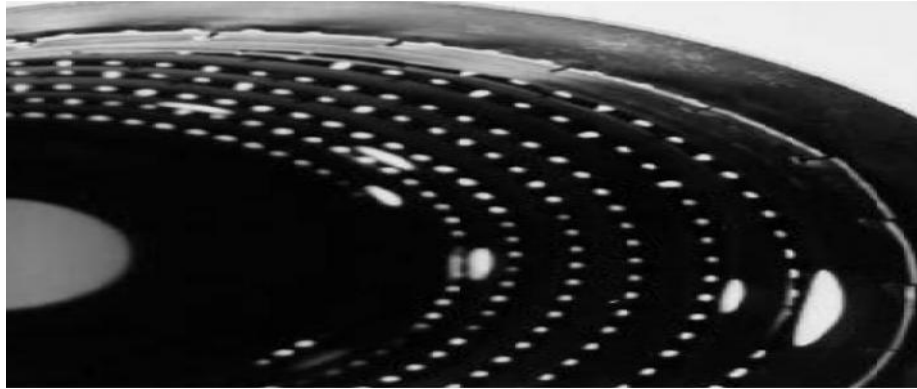


Figure 3.5: Une vue de la sortie de chambre de combustion. [17]

III.4.3.3. Turbine :

La turbine récupère une partie de l'énergie cinétique des gaz générés par la réaction qui sortent de la chambre de combustion. Cette énergie cinétique est convertie en énergie mécanique, utilisée pour entretenir la rotation du compresseur et des différents accessoires.

Près de trois quarts de l'énergie tirée des produits de combustion est nécessaire pour alimenter le compresseur.

Les accélérations que doivent subir les aubes des turbines sont responsables de contraintes de plus de 3 tonnes par cm^2 . Les turbines ainsi peuvent tourner jusqu'à 60000 tr/min et baignent dans un flux de gaz dont la température avoisine 1500 °c. Cette température dépasse parfois de 2000°c, la température de fusion des matériaux constituant les aubes. Cette performance est possible grâce au refroidissement des aubes par de l'air prélevé au niveau du compresseur propulsé à grande vitesse et sous haute pression [17].



Figure 3.6:un stator de turbine à gaz. [17]

Chapitre 04

Modélisation et simulation

V.1 Introduction

Afin de concevoir et de simuler différents composants mécaniques turbine à gaz La simulation en Matlab / Simulink. Tout l'équipement est construit dans un bloc, Ensuite, la mise en correspondance de tous ces blocs pour former le système.

V.2 Programme de Matlab

Le logiciel MATLAB (laboratoire matriciel) est un environnement informatique multi paradigme, il est Développé par Math Works. Matlab permet les manipulations matricielles, le traçage des fonctions et Données, implémentation d'algorithmes, création d'interfaces utilisateur et interfaçage avec des programmes Écrit dans d'autres langues Il existe de nombreuses boîtes à outils différentes qui étendent les Fonctions fondamentales de Matlab dans différents domaines d'application [12]

V.2.1 Outil Simulink

Simulink est un outil de modélisation, de simulation et d'analyse de systèmes dynamiques. Sa principale L'interface est un outil graphique de diagramme de blocs et un ensemble personnalisable de bibliothèques de blocs. Il Offre une intégration étroite avec le reste de l'environnement MATLAB et peut conduire MATLAB ou être scanné de lui. Simulink est largement utilisé dans la théorie du contrôle et le signal numérique Traitement pour la simulation et la conception. Simulink peut être utilisé pour explorer le comportement d'un large Gamme de systèmes dynamiques du monde réel. Un modèle de diagramme à blocs Simulink est un graphique Représentation d'un modèle mathématique d'un système dynamique décrit par un ensemble d'Équations. La figure 4.1 montre l'exemple de la bibliothèque et de l'équation de Simulink définis sous graphique forme [12]

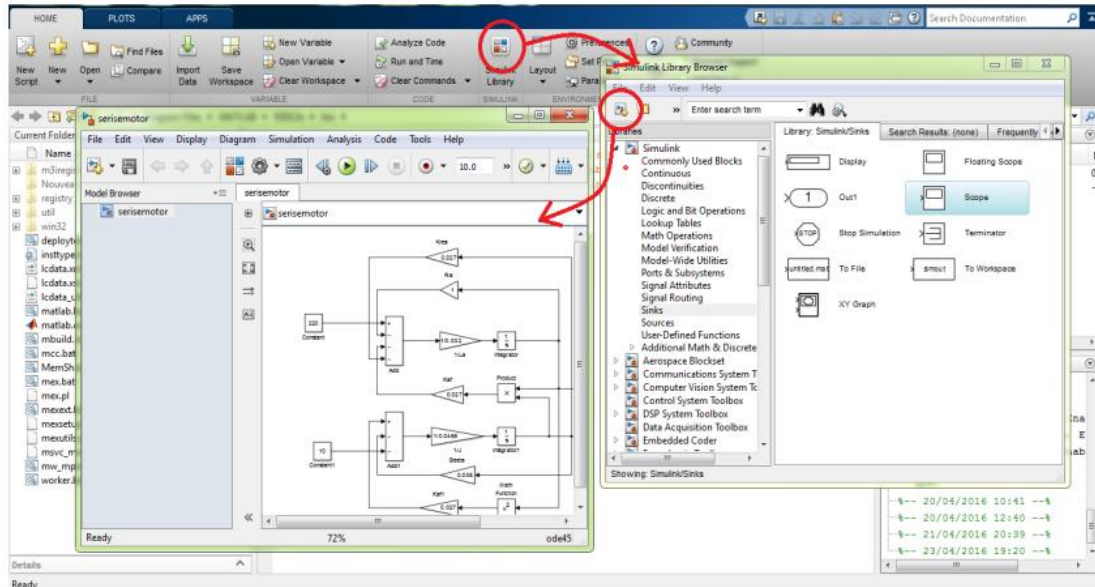


Figure4.1 :Simulink Windows

V.3. Compresseur

Le système photovoltaïque fournit l'énergie pour tourner le compresseur. La puissance de chaque compresseur est calculée par la relation suivante[11]

$$P_c = \frac{1}{\eta_c} m_c C_p T_{01} \left(\beta^{\frac{\gamma-1}{\gamma}} - 1 \right) \quad (4.1)$$

En remplaçant le taux de compression β par le rapport de pression P_{02}/P_{01} dans (4.1) on obtient l'expression de P_{02}

$$\frac{P_c}{\frac{1}{\eta_c} m_c C_p T_{01}} = \left(\left(\frac{P_{02}}{P_{01}} \right)^{\frac{\gamma-1}{\gamma}} - 1 \right)$$

$$P_{02} = \left(\frac{P_c + \frac{1}{\eta_c} m_c C_p T_{01}}{\frac{1}{\eta_c} m_c C_p T_{01} \times \left(\frac{P_{02}}{P_{01}} \right)^{\frac{\gamma-1}{\gamma}}} \right)^{\frac{\gamma}{\gamma-1}} \quad (4.2)$$

Avec : P_{02} pression d'air sortant du compresseur (en Pa), P_{01} pression d'air entrant au compresseur (en Pa), P_c Puissance mécanique de compresseur d'air (en kw), η_c rendement de compresseur(77%), m_c débit massique de compresseur d'air (0.8kg), C_p Chaleur spécifique d'air à pression constante, ($R=1004.5$ kj/kg k).

Pour compresseur

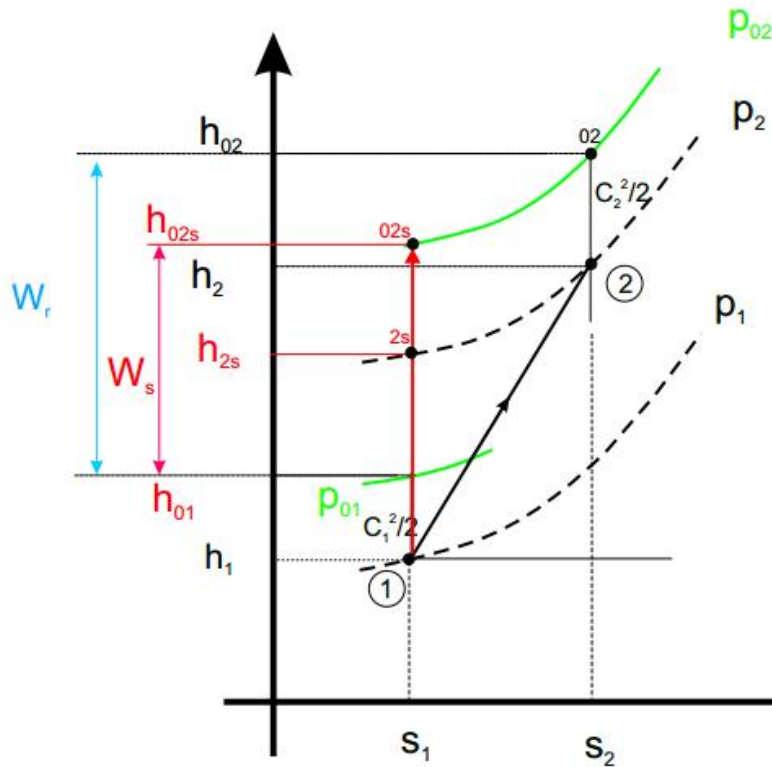


Figure 4.2 :Variation d'enthalpie compresseur

Une définition alternative du rendement emploie des conditions statiques à la sortie. Pour les compresseurs, les pompes et les ventilateurs, le rendement statique-à-total ne considère pas le transfert d'énergie au fluide pour générer de l'énergie cinétique à la sortie. Cette énergie non transmise est considérée comme une perte et le rendement est donné par [13] :

$$\eta_c = \frac{h_{02s} - h_{01}}{h_{02} - h_{01}} \quad (4.3)$$

$$\eta_c = \frac{T_{02s} - T_{01}}{T_{02} - T_{01}} \quad (4.4)$$

$$PV^k = \text{cte} \quad (4.5)$$

$$PV = RT \leftrightarrow V = \frac{RT}{P} \quad (4.6)$$

(4.5) et (4.6) on trouve

$$P = \left(\frac{RT}{P} \right)^{\gamma} = \text{cte} \quad (4.7)$$

$$\frac{P}{P^{\gamma}} T^{\gamma} = \text{cte} \leftrightarrow P^{1-\gamma} T^{\gamma} = \text{cte} \quad (4.8)$$

$$T_{02s} = \left(\frac{P_{01}}{P_{02}}\right)^{\frac{1-\gamma}{\gamma}} T_{01} \quad (4.9)$$

(4.4)et(4.9)on trouve

$$T_{02} = \frac{\left(\frac{P_{01}}{P_{02}}\right)^{\frac{1-\gamma}{\gamma}} T_{01} - T_{01} + \eta_c T_{01}}{\eta_c} \quad (4.10)$$

Avec : T_{02} la température de l'air qui sort du compresseur (enK), P_{01} la pression d'air entrant au compresseur (en Pa), P_{02} pression d'air sortant du compresseur (en Pa) , T_{01} température d'air entrant au compresseur (en K) et η_c rendement du compresseur(77%).

Pour le deuxième et troisième compresseur, on procède de la même façon que le compresseur (1)

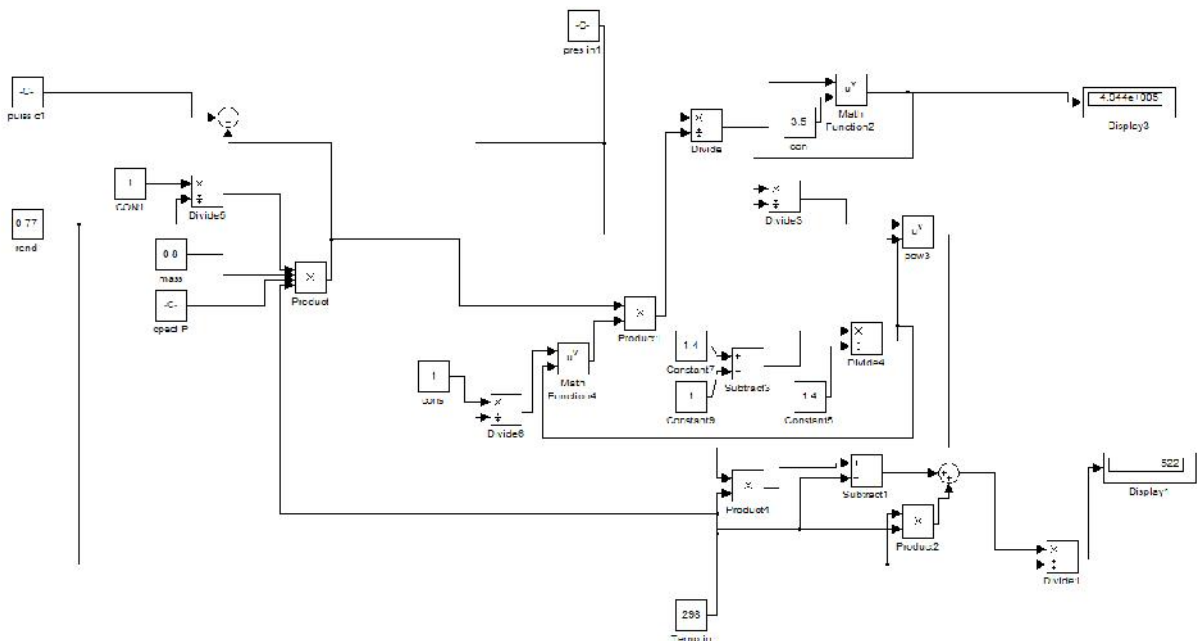


Figure 4.3:Modèle compresseur série

V.4 Echangeur de chaleur

L'efficacité d'un échangeur est le rapport de la puissance thermique réellement échangée à la puissance d'échange maximum théoriquement possible, avec les mêmes conditions d'entrées des fluides (nature, débit,..) dans l'échangeur [13]

V.4.1 refroidissement de l'air

A la sortie de compresseur l'air doit entrer refroidi pour attendre une température convenable afin d'être acheminer au compresseur suivant.

La chaleur extraite est exprimé par la relation suivant

$$P_{e(\text{air})} = \dot{m}_{\text{air}} C_{p(\text{air})} (T_{c1(\text{out})} - T_{c2(\text{in})}) \quad (4.11)$$

$$T_{c2(\text{in})} = T_{c1(\text{out})} - \frac{P_{e(\text{air})}}{\dot{m}_{\text{air}} C_{p(\text{air})}} \quad (4.12)$$

Avec : $T_{c2(\text{in})}$ la température qui sort de la distraction de refroidissement elle-même entrer dans le deuxième compresseur et $T_{c1(\text{out})}$ la température de l'air qui sort du premier compresseur et $P_{(\text{air})}$ Puissance mécanique de l'échangeur de chaleur d'air (kW)et \dot{m}_{air} débit massiques de l'échangeur de chaleur (0.8 kg/s) et C_p Chaleur spécifique d'air à pression constante (1004.5 kj/kg k).

V.4.2Circuit d'eau de refroidissement

Le refroidissement est assuré par un circuit d'eau caloporteur pompé dans l'échangeur. Ennégligeant les pertes calorifique refit la puissance extraite par l'eau est exprimée la relation

$$P_{(e\text{au})} = \dot{m}_{\text{eau}} C_{p(\text{eau})} (T_{1w(\text{out})} - T_{2w(\text{in})}) \quad (4.13)$$

Avec : $P_{(e\text{au})}$ Puissance mécanique de l'échangeur de chaleur d'eau et \dot{m}_{eau} débit massiques de l'échangeur de chaleur d'eau (0.6 kg/s) et $C_{p(\text{eau})}$ Chaleur spécifique d'eau constante (4180 kj/kg k) et $T_{1w(\text{out})}$ Degrés en dehors de la température de l'eau de l'échangeur de chaleur (91.31 c) et $T_{2w(\text{in})}$ Température de l'eau à l'intérieur de l'échangeur de chaleur de température (25 c)

Pour le deux Les deuxième et troisième échangeurs on procède de la même façon que le échangeur (1)

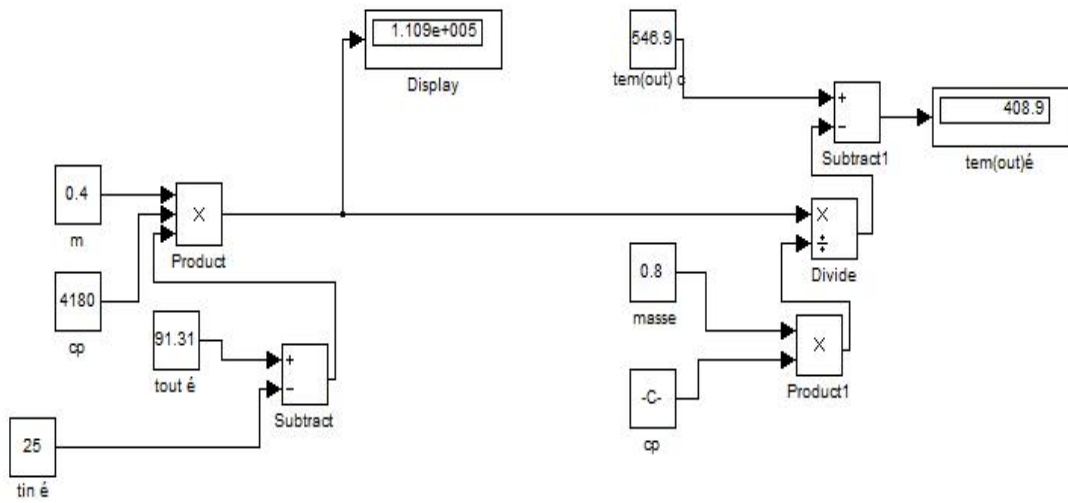


Figure 4.4:Modèle d'échangeur(refroidissement par air) série

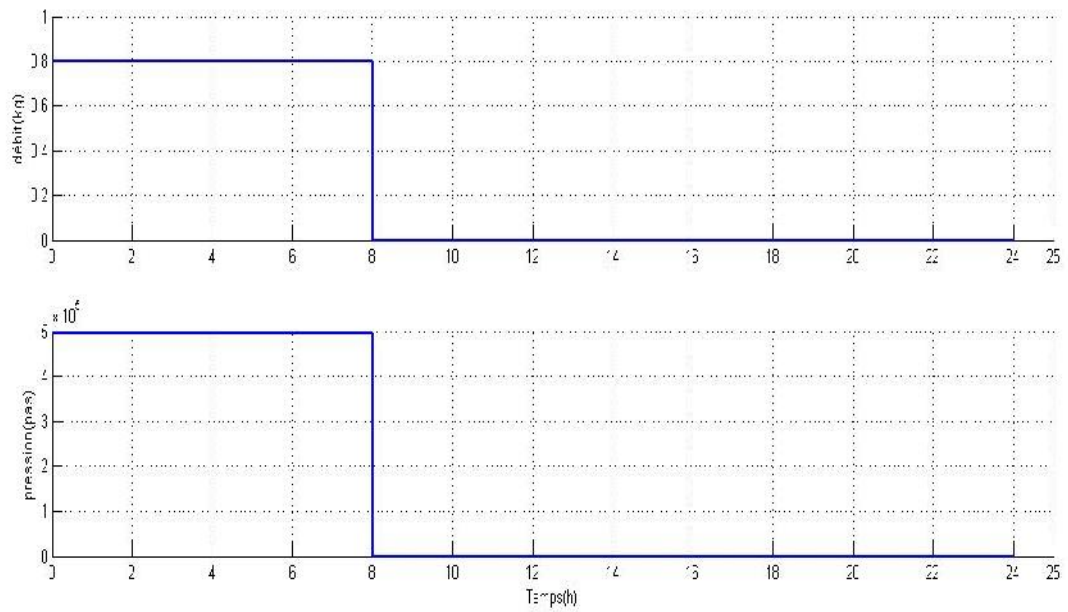


Figure 4.5 :débit et pression sortecompresseur (1)

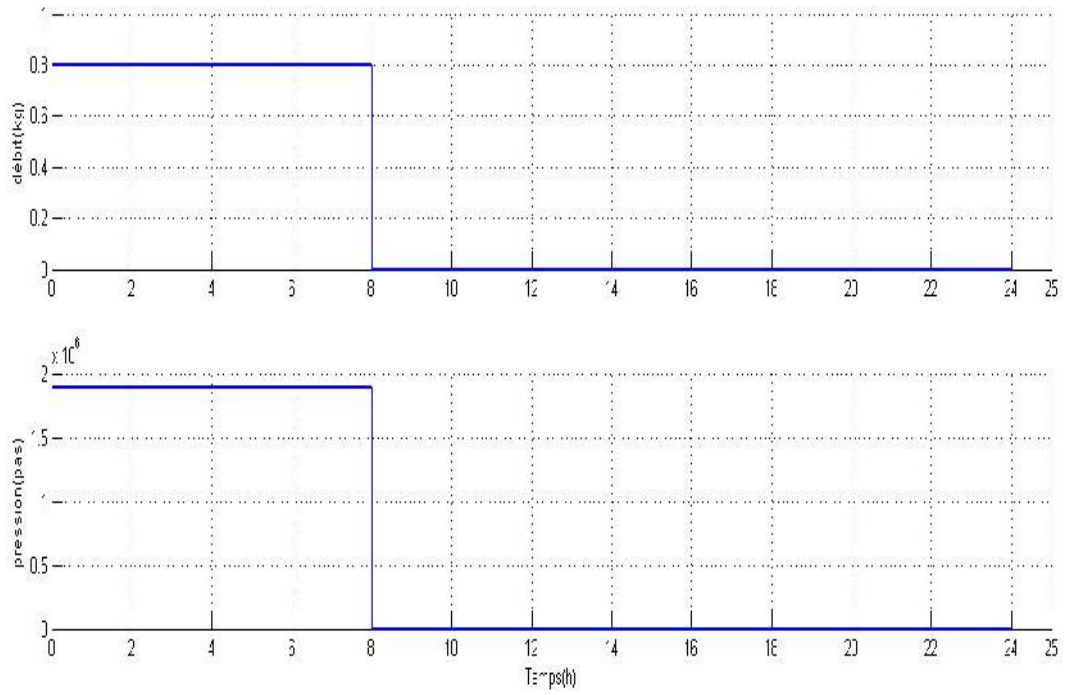


Figure 4.6: débit et pression sortecompresseur (2)

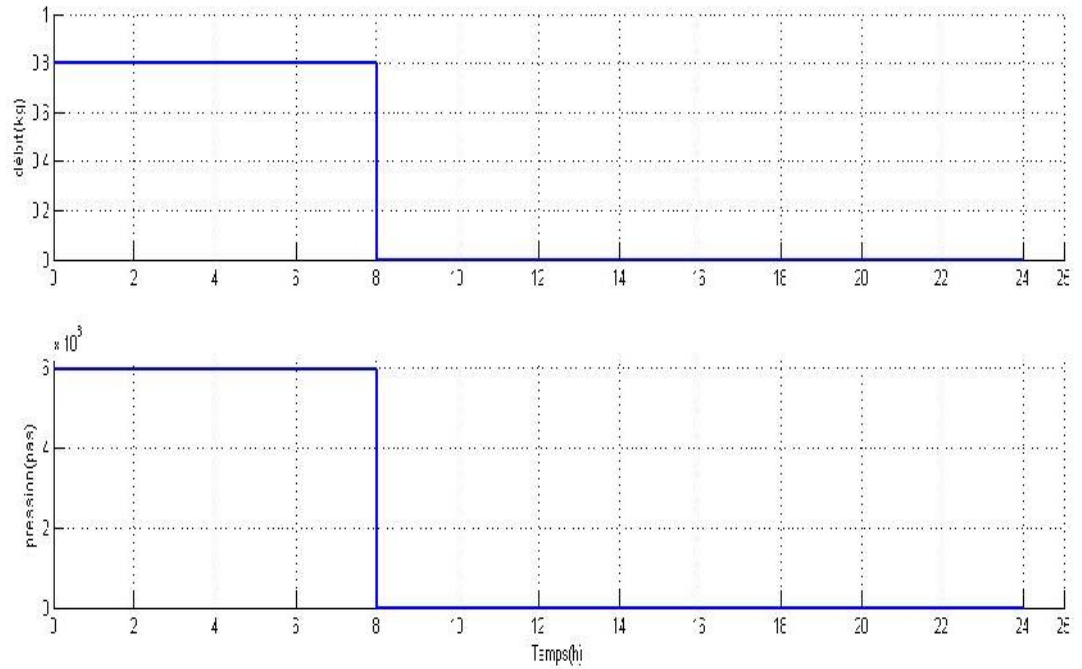


Figure 4.7 : débit et pression sortecompresseur (3)

V.5 Réservoir D'air Comprimé

Pour le stockage de l'air, on a supposé une caverne volumique conventionnelle. Ainsi, que la vitesse d'écoulement d'air à travers les tuyaux d'entrée et de sortie réservoir est des relativement petite de tel sorte que les grandeurs totales de pression et de température sont très proches.

L'équation différentielle de lapression p lors des processus de la charge et de décharge peuvent être obtenue en assumant que l'air est un gaz parfait ; donc il doit abeillierà la relation des gaz parfait :

$$\frac{P}{\rho} = RT \rightarrow P = RT \frac{m}{V} \rightarrow \frac{dp}{dt} = \frac{RT}{V} \frac{dm}{dt} \quad (4.14)$$

On considère que le débit $m=dm/dt$ est constant pendant la charge et le décharge du réservoir l'équation (4.14) devient

$$\frac{dp}{dt} = \frac{RT}{V} \dot{m} \rightarrow dp = \frac{RT}{V} \dot{m} dt \quad (4.15)$$

En intégrant entre le temps t et t_0 on obtient :

$$P - P_0 = \frac{RT}{V} \dot{m}(t - t_0) \quad (4.16)$$

Équation de charge de réservoir d'air

$$P = \frac{RT}{V} \dot{m}(t - t_0) + P_0 \quad (4.17)$$

Équation de décharge de réservoir d'air

$$P = -\frac{RT}{V} \dot{m}(t - t_0) + P_0 \quad (4.17)$$

Avec : p La pression d'air comprimé aux étapes de charge et décharge (en Pa), R constante gaz en kJ/kg K, T température de réservoir et v volume du réservoir en m^3 , \dot{m} débit massique : de charge (0.8kg) et décharge (0.4), et $(t - t_0)$ le temps dans le cas de charge ou décharge l'air comprimé.

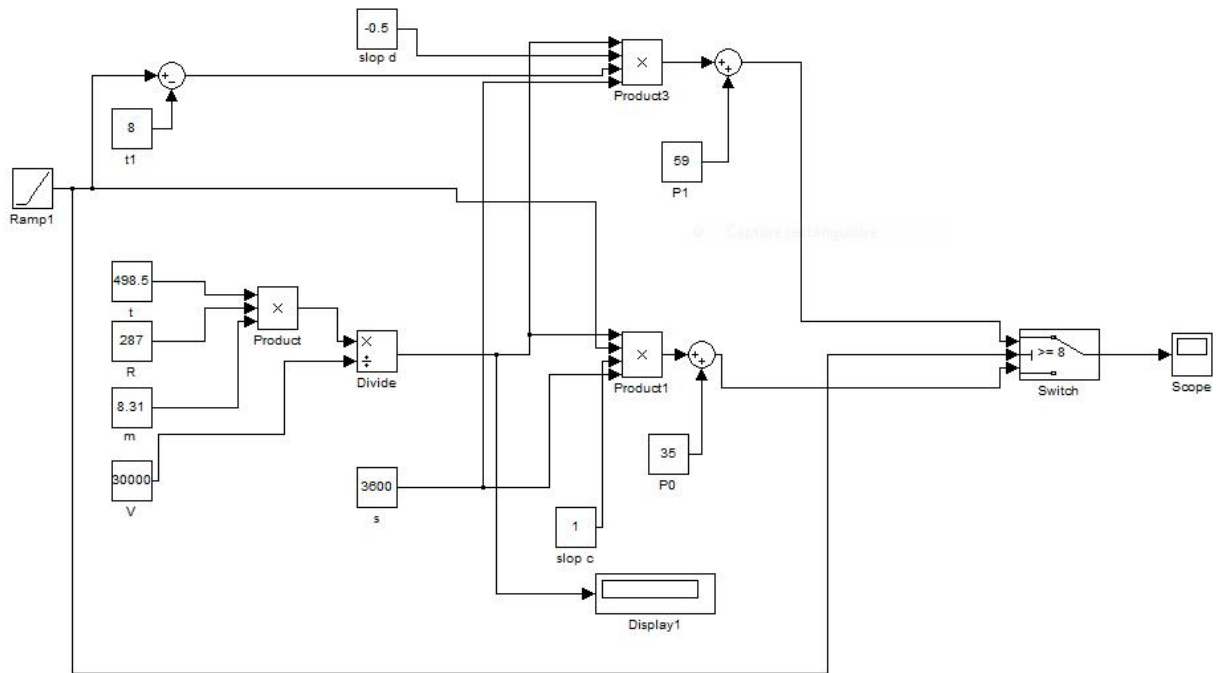


Figure 4.8:Modèle Réservoir D'air Comprimé série

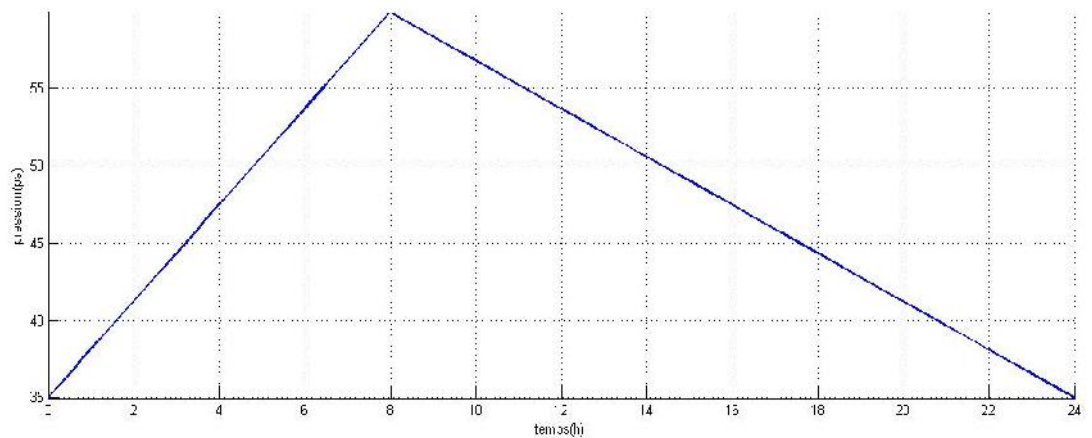


Figure 4.9 : chargé et déchargé de réservoir d'air

Afin de simplifier le traçage du courbe des pressions ou niveau de réservoir on translate le repère de temps vers un point de départ qui commence à partir de l'heure 08 de matin.La figure 4.6 montre l'évolution de la pression d'air à l'intérieur de réservoir. Une pression minimale de 35 bars est gardée à l'intérieur de réservoir pour assurer le démarrage des turbines. Ainsi une pression maximale de 59 bars représente un remplissage total du réservoir qui est attente à 16h

V.6 Réchauffement d'air

Avant l'entrée de chaque turbine on procède au réchauffement d'air à pression constante, cette réchauffement sert à augmenter l'enthalpie afin d'extraire le maximum d'énergie de la turbine.

L'énergie nécessaire à augmenter la température d'air est exprimée comme suit.

$$P_{(air)} = \dot{m}_{air} C_{p(air)} (T_{in(t)} - T_{out(res)}) \quad (4.18)$$

$$T_{in(t)} = \frac{P_{e(air)}}{\dot{m}_{air} C_{p(air)}} + T_{out(res)} \quad (4.19)$$

Avec : $T_{in(t)}$ température d'entrée turbine, $T_{out(res)}$ température sortant de l'échangeur de chaleur, $P_{e(air)}$ la puissance mécanique (166 kW), \dot{m}_{air} débit massique (0.4), $C_{p(air)}$ Chaleur spécifique d'air et sa constante ($R=100.5$ kJ/kg k).

Pour le deuxième échangeur, on procède de la même façon que l'échangeur 1.

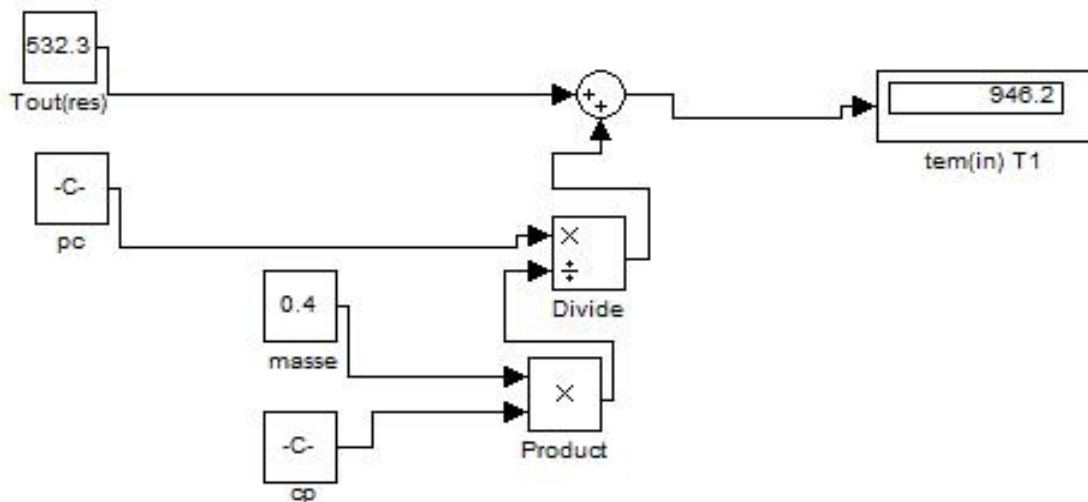


Figure 4.10: Modèle échangeur (Chauffage à air) série

V.7 Turbine à gaz

L'installation comprend une turbine haute pression (HP) et une turbine basse pression (LP). En ce qui concerne le compresseur, la turbine peut fonctionner également à

charge variable pour suivre la pression au réservoir. L'énergie produit à chaque étape d'expansion peut être calculée à partir de l'équation [11] :

$$P_T = \eta_T \dot{m}_T C_{p(\text{air})} T_{e(\text{ch})\text{out}} \left(1 - \frac{1}{\beta^{\frac{\gamma-1}{\gamma}}} \right) \tag{4.20}$$

En remplaçant le taux de compresseur par le rapport de pression P_0/P deux (4. 20) on obtint l'expression de P_0

$$P_T = \eta_T \dot{m}_T C_{p(\text{air})} T_{e(\text{ch})\text{out}} \left(1 - \frac{1}{\left(\frac{P_{01}}{P_{02}} \right)^{\frac{\gamma-1}{\gamma}}} \right) \tag{4.21}$$

Avec : P_T la puissance mécanique du turbine, η_T le rendement du turbine (0.77), \dot{m}_T débit massique du turbine, $C_{p(\text{air})}$ Chaleur spécifique d'air, constante (100.5 kJ/kg k), P_{01} pression d'entrée d'air comprimé de laturbine (en Pa) et P_{02} la pression d'air comprimé à la sortie de la turbine.La transformation sur le diagramme h-s est montrée sur la figure 4.11.

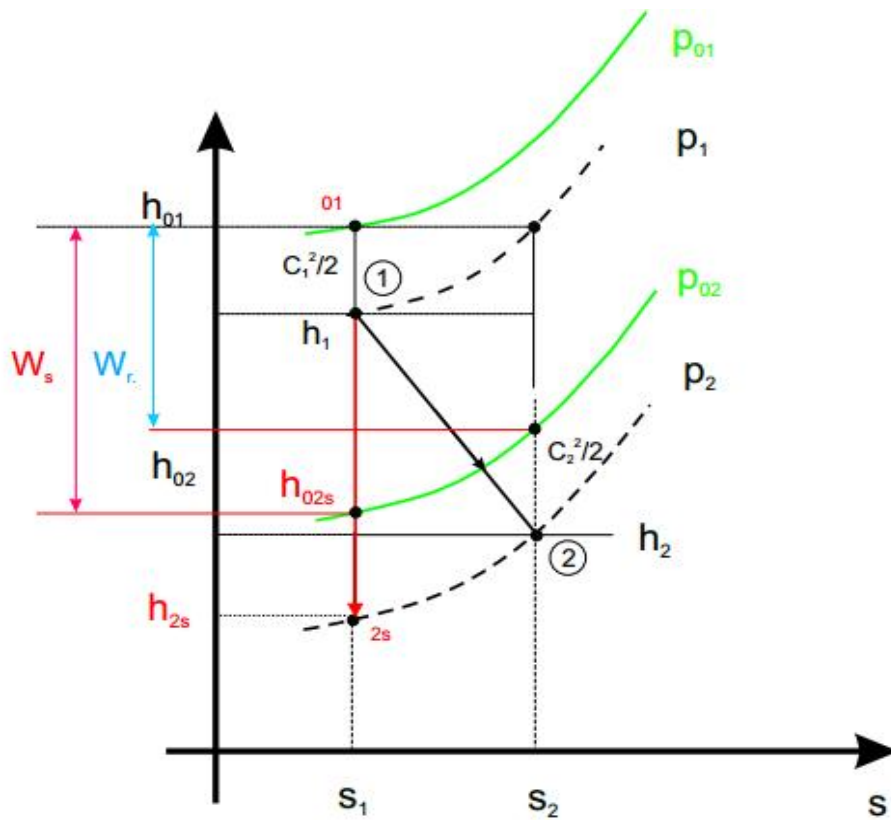


Figure4.11 :Variation d'enthalpies turbine

Pour les turbines, le rendement total-à-statique suppose que la machine n'utilise pas l'énergie cinétique à la sortie. Dans ce cas, le rendement est donné par[13]:

$$\eta_t = \frac{h_{01} - h_{02}}{h_{01} - h_{02s}} \quad (4.22)$$

$$\eta_t = \frac{T_{01} - T_{02}}{T_{01} - T_{02s}} \quad (4.23)$$

$$T_{02s} = \left(\frac{P_{02}}{P_{01}}\right)^{\frac{\gamma-1}{\gamma}} T_{01} \quad (4.24)$$

Degré de la Température de l'air dégagé à partir de turbine l'équationde :

$$T_{02} = T_{01} - \eta_t \left(T_{01} - \left(\frac{P_{02}}{P_{01}}\right)^{\frac{\gamma-1}{\gamma}} T_{01} \right) \quad (4.25)$$

Avec : T_{02} la Température de l'air dégagé de turbine, T_{01} La température de l'air entrant à la turbine, η_t rendement de la turbine (0.7), P_{01} pression d'air comprimé entrant à la turbine (en Pa) et P_{02} pression d'air comprimé sortant de la turbine.

Pour la deuxième turbine on procède de la même façon que la turbine 1 par simulation

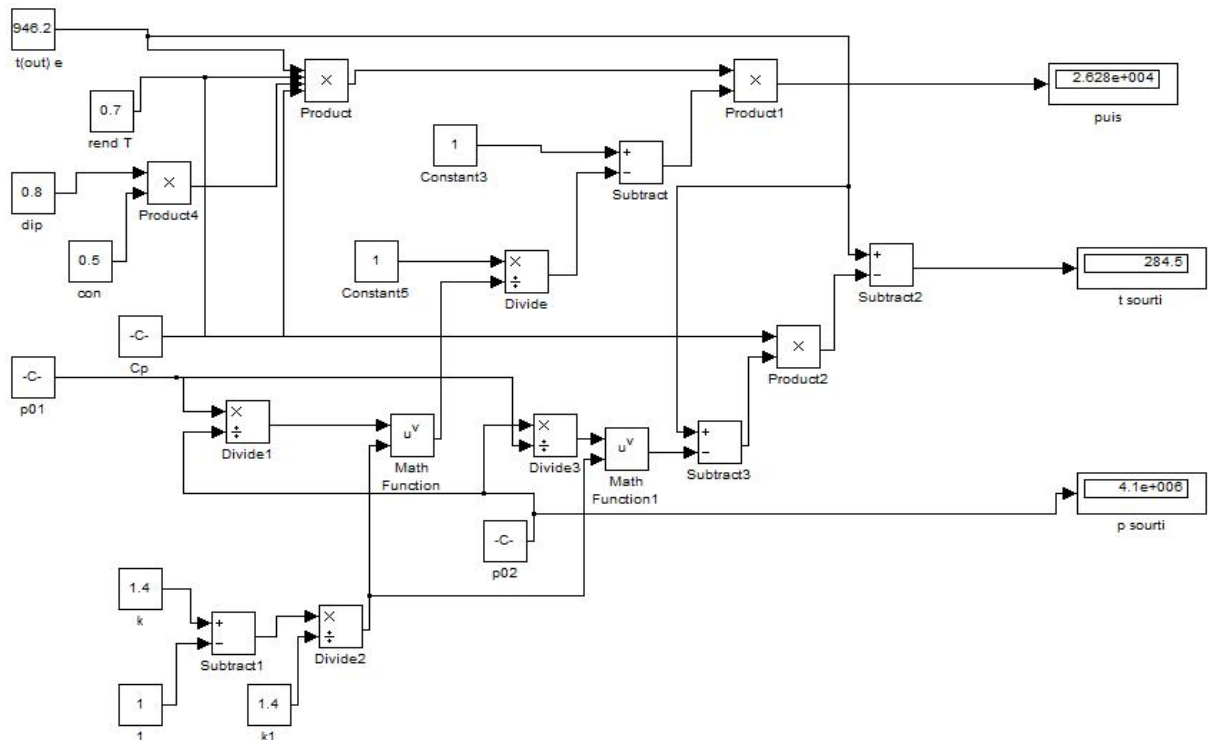


Figure 4.12:Modèle des turbines en série par simulation

- **Courbe de puissance**

La figure 4.13 montre l'évolution de la puissance des turbines. On note que la courbe de puissance des turbines est faite avec la translation de point de l'abscisse (zéro) du repère de temps vers le point (8 h). Une puissance minimale des turbines atteint $2.2 \cdot 10^3$ W, ainsi que, la puissance maximale est de $2.8 \cdot 10^3$ W.

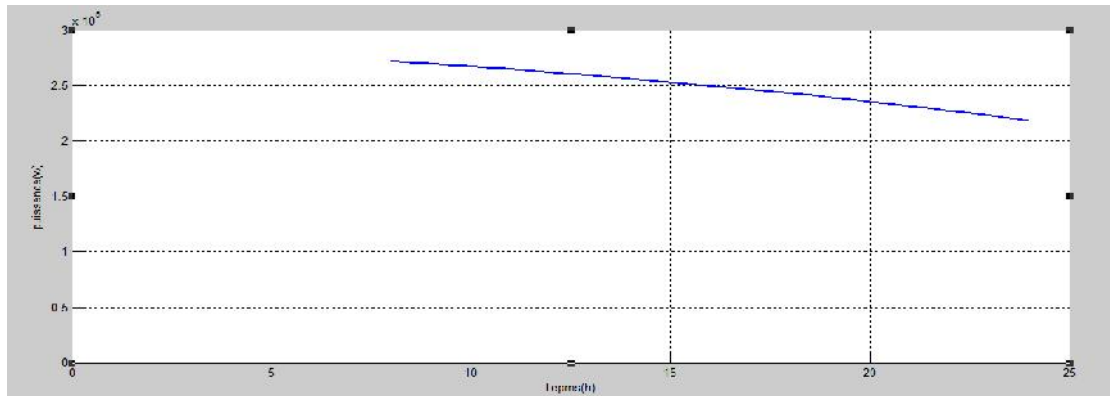


Figure 4.13 : Courbe de puissance

V.8 Installation complète

La figure 4.14 montre le système complet avec toute les entrées et les sorties. On constate que le système complet englobe 08 entrés et 03 sorties. Mais, on va s'intéresser beaucoup plus à la puissance mécanique qui entre aux compresseurs et la puissance mécanique qui se récupère sur l'axe des turbines. Ces paramètres essentiels sont présentés sur la figure 4.15. On constate que en dépensant sur les compresseurs une puissance de l'ordre de 5 kW on peut récupérer sur les turbines une puissance de l'ordre de 2.3 kW. Cette niveau de récupération est considéré très appréciable dans les conditions climatique et avec une forte autonomie du système.

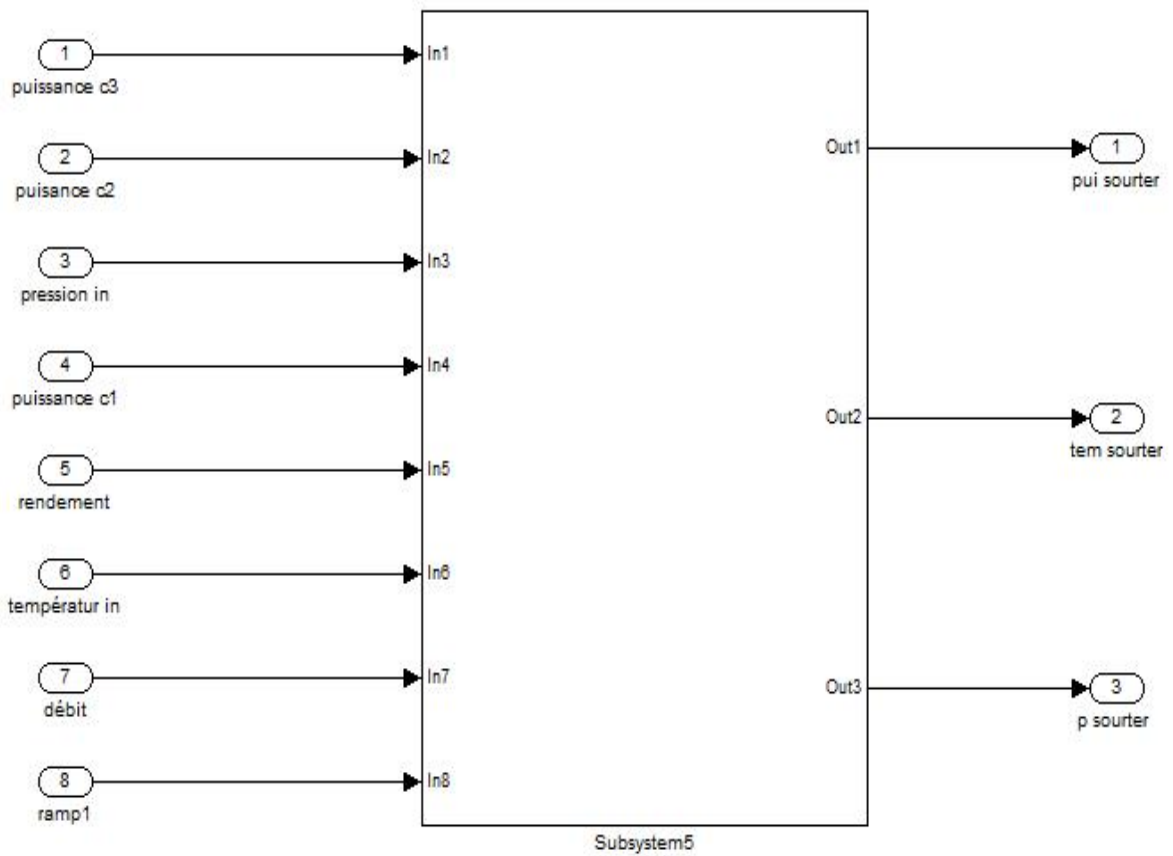


Figure 4.14 :Modèle desystème complet

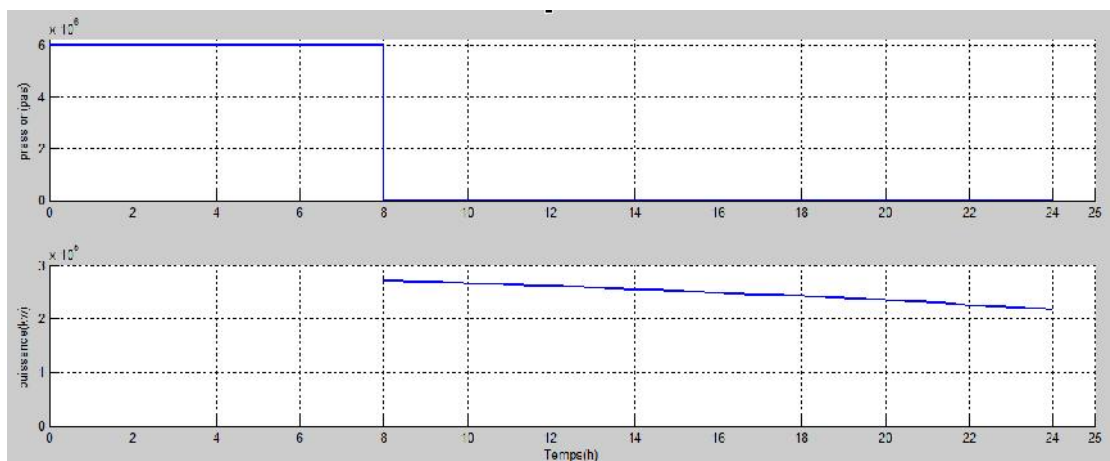


Figure 4.15 :Courbede système complet

VI.9 Résultats et discussions :

Une mise en manche de cas de base pour l'ensemble de l'installation avec les permettes opératoires suivants

P_c : Puissance de compresseur (1) : (180kw)

P_c : Puissance de compresseur (2) : (182kw)

P_c : Puissance de compresseur (3) : (184kw)

η_c : Rendement de compresseur : (77%)

η_t : Rendement de la turbine : (77%)

\dot{m}_{air} : Débit massique de la turbine : (0.4kg)

\dot{m}_c : Débit massiques de compresseur : (0.8kg)

T_{01} : Température qui à l'intérieur du compresseur(1) : (522k)

T_{01} : Température qui à l'intérieur du compresseur(2) : (600.1k)

T_{01} : Température qui al 'intérieur du compresseur(3) : (680.7k)

T_{01} : Température qui le turbin (1) : (532.3k)

T_{01} : Température qui le turbin(2) : (1270k)

T_{01} : Température qui le turbin (3) : (1270k)

P_T : Puissance mécanique de sorte le turbin : (213kw)

P_{01} : Pression l'air comprimé à l'intérieur pour turbine (1) : (40pa)

P_{01} : Pression l'air comprimé à l'intérieur pour turbine(2) : (1.2pa)

T_{02} : Température sortez turbine : (335.3k)

C_p : Chaleur spécifique d'air à pression constante : (1004.5 kJ/kg k)

$T_{1w(out)}$: Degrés en dehors de la température de l'eau de l'échangeur de chaleur :
(364.31k)

$T_{2w(in)}$: Température de l'eau à l'intérieur de l'échangeur de chaleur de température :
(298k)

$C_{p(eau)}$: Chaleur spécifique d'eau constante : (4180 kJ/kg k)

\dot{m}_{eau} : Débit massiques de l'échangeur de chaleur d'eau : (0.6 kg/s)

P_{01} : Pression l'air à l'intérieur du compresseur : (1 Pa)

P_{02} : Pression l'air extérieur à partir du compresseur : (59 Pa)

En fournissant une puissance totale aux deux compresseurs de l'ordre de 5kW, on peut récupérer une puissance de l'ordre de 2.13kW. Donc, en matière de rendement se traduit à une valeur de 42%. Cette valeur de rendement est comparable à celle des systèmes conventionnel d'assistance par l'air comprime qui ont des rendements varient entre 40 et 50%.

Conclusion générale

Le présent travail est très intéressant dans le domaine de stockage d'énergie en transformant l'énergie électrique sous forme d'air comprimé, puisque l'énergie renouvelable est de nature intermittente et qui nécessite la recherche des procédés convenable pour améliorer le rendement de système de stockage. Ainsi que la prolongation de la durée de vie de ces systèmes dans le climat très chaud. Les résultats obtenus montrent que le rendement énergétique qui représente le rapport de gains et dépenses turbine-compresseur atteint 42 %. Les systèmes peuvent être dimensionnés pour des applications de puissances allant du kilowatt au Mégawatt.

Pour un prochain travail on peut prévoir de compléter ce travail par une étude économique qui doit confirmer la rentabilité du système en particuliers dans les climats chauds.

Liste de référence

- [1] A. Lyes, "Etude de la connexion au réseau électrique d'une centrale photovoltaïque université Mouloud Mammeri de Tiziouzou , Mémoire de Magister, 2011.
- [2] M. LOPEZ, "contribution a l'optimisation d'un système de CONVERSION, " Ecole Université Paris-sud 11 THESE DE DOCTORAT
- [3] Y. PANKOW, "Etude de l'intégration de la production décentralisée dans un réseau Basse Tension Application au générateur photovoltaïque," Ecole Nationale Supérieure d'Arts et Metiers Thèse de Doctorat, 2004
- [4] (2006) www.iea.org/papers/2006/bilol.pdf.
- [5] Bal J.L & Philibert C (2013) Les caractéristiques des énergies intermittentes électriques sont-elles problématiques? Les particularités techniques du solaire et de l'éolien.
- Responsabilité et environnement
- [6] Multon, B., & Ahmed, H. B. (2007). Le stockage stationnaire d'énergie électrique: pourquoi et comment?
- [7] le stockage de l'énergie électrique, une dimension incontournable de la transition énergétique Avis du Conseil économique, social et environnemental présenté par M. Alain Obadia, rapporteur au nom de la section des activités économiques.
- [8] <http://www.enea-consulting.com/wp-content/uploads/2015/05/ENEA-Consulting-Le-Stockage-dEnergie1.pdf>.
- [9] https://fr.wikipedia.org/wiki/Stockage_de_l%27%C3%A9nergie.
- [10] <http://www.connaissancedesenergies.org/fiche-pedagogique/stockage-de-l-energie>.
- [11] Application of dynamic programming to the optimal management of a hybrid power plant with wind turbines, photovoltaic panels and compressed air energy storage. Réalisé par Vincenzo Marano, Gianfranco Rizzo, Francesco Antonio Tiano (10 February 2012)
- [12] Design and simulation of electric equipment for hybrid solar vehicle. Réalisé par B M Abderraouf , B Ishak. Publicly supported on: 01/06/2016
- [13] M reggio et J-Y trepanier théorie des turbomachines école polytechnique Montréal
- [14] Oustani Mebrouk / Nedjaa Mohammed Mokhtar Mémoire master professionnel
Thème : « étude maintenance préventive d'un turbocompresseur par analyse des huiles »
Spécialité : Maintenance industriel Université Kasdi Merbah - Ouargla2013/2014
- [15] Guide de référence sur l'efficacité énergétique de L' AIR COMPRIMÉ.
- [16] Site Web connaissance des énergies 2017.
- [17] Mr. BENHAMEL Houssameddine. Mr. GHERRAS Yassine. Mémoire Pour l'obtention d'un diplôme D'un Master en GTER Thème : « Influence des systèmes VSV (variable stator vanes) Sur les performances de la turbine à gaz LM2500+» Spécialité : Génie thermique et énergies renouvelables Université Abou bekr Belkaid – Tlemcen2013/2014