

وزارة البحث العلمي والتعليم العالي

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche
Scientifique

جامعة عبد الحميد بن باديس مستغانم

Université Abdelhamid Ibn Badis Mostaganem

كلية العلوم والتكنولوجيا

Faculté des Sciences et de la Technologie

Département de Génie Mécanique



N° d'ordre : M...../ GM /2025

MEMOIRE

Pour obtenir le diplôme de

Master Académique en Génie Mécanique

Spécialité : Energétique

Présenté par :

- *DJOURDEM Charef*
- *ZERROUKI Wahid*

Intitulé du sujet

Etude et réalisation d'une turbine à vapeur alimentée par une source de chaleur solaire.

Soutenu le 06/10/2025 devant le jury composé de :

Président :	Dr GUERMAT Abdelkader	Université de MOSTAGANEM
Examineur :	Mr SENOUCI Moussa	Université de MOSTAGANEM
Encadreur :	Pr RETIEL Noureddine	Université de MOSTAGANEM

Année Universitaire 2024/2025

Remerciements

Tout d'abord Al-hamdoullillah, Grâce à Dieu, mon succès ne vient que de Dieu, qui nous a donné la force, la volonté, le courage et la patience à mener ce travail à son terme dans les meilleures conditions

Je tiens tout d'abord à exprimer ma profonde gratitude à professeur RETIEL Nouredine pour son encadrement, ses conseils précieux et sa disponibilité tout au long de ce travail.

Je remercie tous mes professeurs pour chaque information, sans eux nous ne serions pas là où nous en sommes aujourd'hui, et je remercie Surtout mon frère Karim pour son orientation, son encouragement et son aide.

Je remercie chaleureusement ma famille et tous les amis qui ont étudié avec moi pour leur soutien moral, leurs encouragements constants et leur patience, qui ont été pour moi une source de motivation inestimable.

Enfin, j'adresse ma reconnaissance à toutes les personnes qui, de près ou de loin, ont contribué à l'aboutissement de ce travail.

DJOURDEM Charef

Remerciements

Louange à Dieu, en premier et en dernier. C'est par Sa grâce et Son soutien que ce travail a pu être mené à bien, Lui qui nous a accordé la force, la détermination et la patience pour l'accomplir dans les meilleures conditions.

J'adresse mes sincères remerciements et ma profonde gratitude à mon honorable professeur **RETIEL Noureddine** pour son encadrement précieux, ses conseils avisés et ses orientations éclairées, qui ont constitué pour moi une véritable lumière tout au long de la réalisation de ce travail.

Je tiens également à remercier l'ensemble de mes professeurs pour le savoir et les orientations qu'ils nous ont transmis, et qui furent la base de ce que nous avons pu atteindre aujourd'hui.

Je rends un hommage particulier à ma chère famille : mes parents bien-aimés, et **tout spécialement ma mère**, véritable pilier de ma vie, par son amour infini, son dévouement inépuisable, ses prières incessantes et ses sacrifices immenses. Elle a été mon soutien indéfectible et ma plus grande source de force et de motivation. J'exprime également ma profonde gratitude à mon cher père, à mes frères et sœurs, à mes proches ainsi qu'à mes amis pour leurs prières, leur soutien et leurs encouragements constants.

Je remercie aussi mes camarades et amis qui m'ont accompagné durant ces années d'études, pour leur collaboration et leur agréable compagnie.

Enfin, j'exprime toute ma reconnaissance à tous ceux qui, de près ou de loin, ont contribué à la réussite de ce travail.

ZERROUKI Wahid

ملخص المذكرة

تتناول هذه المذكرة دراسة وتصميم وإنجاز توربين بخاري يعمل بالطاقة الشمسية باستخدام مجمع شمسي على شكل مرآة قطع مكافئ يسخن الماء لإنتاج بخار يشغل التوربين وفق دورة رانكين لتحويل الطاقة الحرارية إلى طاقة ميكانيكية ثم كهربائية. تمت دراسة الجوانب النظرية (المبادئ الترموديناميكية، أنواع التوربينات، التقنيات الشمسية)، ثم صُمم النظام مكوّنًا من مجمع شمسي، غلاية، توربين. أنجز نموذج مصغّر واختُبر ميدانيًا حيث بلغت القدرة الشمسية المجمّعة 600 واط، والقدرة الميكانيكية الناتجة نحو 252 واط، أي بكفاءة إجمالية قدرها 42%. أظهرت النتائج أن المشروع ممكن تقنيًا رغم محدودية الضغط والحرارة، مع توصيات بتحسين العزل الحراري، واستخدام تتبع شمسي أوتوماتيكي، وتكبير السطح العاكس. تمثل هذه التجربة خطوة نحو تطوير أنظمة توليد كهرباء نظيفة وصغيرة الحجم تناسب ظروف الجزائر المشمسة

Abstract

This thesis examines the study, design, and implementation of a solar steam turbine using a parabolic mirror solar collector. This collector heats water to produce steam. This steam drives the turbine according to the Rankin cycle, converting thermal energy into mechanical and then electrical energy. Theoretical aspects (thermodynamic principles, turbine types, solar technologies) were studied, and the system was then designed. It includes a solar collector, a boiler, and a turbine. A small-scale model was built and field-tested, producing a combined solar power of 600 watts and a mechanical power of approximately 252 watts, for an overall efficiency of 42%. The results demonstrated the technical feasibility of the project despite pressure and temperature constraints. Recommendations include improving thermal insulation, using automatic solar tracking, and enlarging the reflective surface. This experiment represents a step towards the development of clean, small-scale electricity production systems adapted to Algeria's sunny climate.

Résumé

Ce mémoire examine l'étude, la conception et la mise en œuvre d'une turbine à vapeur solaire utilisant un capteur solaire à miroir parabolique. Ce capteur chauffe l'eau pour produire de la vapeur. Celle-ci entraîne la turbine selon le cycle de Rankine, convertissant l'énergie thermique en énergie mécanique puis électrique. Les aspects théoriques (principes thermodynamiques, types de turbines, technologies solaires) ont été étudiés, puis le système a été conçu. Il comprend un capteur solaire, une chaudière et une turbine. Un modèle à petite échelle a été réalisé et testé sur le terrain, produisant une puissance solaire combinée de 600 watts et une puissance mécanique d'environ 252 watts, pour un rendement global de 42 %. Les résultats ont démontré la faisabilité technique du projet malgré les contraintes de pression et de température. Les recommandations comprennent l'amélioration de l'isolation thermique, l'utilisation d'un suivi solaire automatique et l'agrandissement de la surface réfléchissante. Cette expérience représente une étape vers le développement de systèmes de production d'électricité propres à petite échelle, adaptés au climat ensoleillé de l'Algérie.

Nomenclature

Désignation	Notation	Unité
• Densité vapeur	d	
• Enthalpie sortie réelle	h_{2a}	KJ/KG
• Enthalpie sortie isentropique	h_{2s}	KJ/KG
• Débit massique	\dot{m}	KG/S
• Vitesse de rotation turbine	N	tr/Min
• Puissance turbine idéale	$P_{idéal}$	KW
• Puissance turbine réelle	P_t	KW
• Énergie fournie par la Chaudière	Q_{ch}	KJ/KG
• Nombre de Reynolds	Re	
• Vitesse périphérique optimale	U_{opt}	M/S
• Vitesse vapeur sortie	V_{out}	M/S
• Vitesse jet théorique	V_{jet}	M/S
• Travail produit par la turbine	W_t	KJ/KG
• Travail de pompe	W_p	KJ/KG
• Énergie rejetée au condenseur	W_{cd}	KJ/KG
• Rendement thermique du cycle	η	
• Rendement global moteur	η_m	
• Rendement turbine	η_t	
• Variation d'enthalpie isentropique	Δh_i	KJ/KG

Table des matières

Remerciement

Nomenclature

Désignation

Introduction générale	1
Chapitre 1 : Contexte théorique et état de l'art	3
1.1 Introduction.....	4
1.2 Historique des turbines à vapeur	4
1.3 Principes thermodynamiques de la conversion énergétique	4
1.4 Types de turbines à vapeur	5
1.5 Technologies solaires de production de vapeur	6
1.6 État de l'art mondial.....	7
1.7 Situation en Algérie.....	8
1.8 Conclusion	8
Chapitre II : Conception du système.....	10
2.1 Introduction.....	11
2.2 Description générale du système	11
2.3 Choix du collecteur solaire.....	11
2.4 Dimensionnement thermique de la chaudière	12
2.5 Conception de la turbine à vapeur	13
2.6 Conception du condenseur	14
2.7 Dimensionnement de la pompe.....	15
2.8 Intégration du générateur électrique.....	15
2.9 Conclusion	16
Chapitre III : Analyse et modélisation thermodynamique	17
III.1 Introduction	18
III.2 Modèle thermodynamique du cycle de Rankine	18
III.3 Équations fondamentales.....	18
III.4 Diagrammes thermodynamiques	19
III.5 Étude paramétrique	21
III.6 Rendements réels.....	21
III.7 Exemple de calcul numérique simplifié.....	21
III.8 Discussion des résultats	22
III.9 Conclusion.....	22
Chapitre IV : Réalisation et assemblage du système	23

Introduction du chapitre	24
4.1 Fabrication des éléments de la turbine	24
4.2 Intégration avec le système de production de vapeur solaire	25
4.3 Tests et mise en service.....	27
Conclusion	28
Chapitre V : Analyse des performances et optimisation	29
V.1 Résultats expérimentaux et comparaison avec les prévisions	30
5.2 Facteurs influençant l'efficacité du système.....	36
5.3 Propositions d'amélioration et perspectives	37
Conclusion générale et recommandations	38
Annexes et Bibliographie.....	41
Bibliographie.....	42

Table des figures

Chapitre 1 : Contexte théorique et état de l'art	3
FIGURE 1: DIAGRAMME T-S D'UN CYCLE DE RANKINE	5
FIGURE 2 : LA DIFFERENCE ENTRE LES DEUX TYPES DE TURBINE	6
FIGURE 3 : CAPTEURS CYLINDRO-PARABOLIQUES (CSP)	7
FIGURE 4 : CENTRALES SOLAIRES EN ESPAGNE	7
FIGURE 5 : CENTRALES SOLAIRES A TOUR ÉTATS-UNIS.....	8
FIGURE 6 : CENTRALES SOLAIRES EN ALGERIE	8
Chapitre II : Conception du système	10
FIGURE 7 : CYCLE DE RANKINE	11
FIGURE 8: LES AUBES FIXES ET MOBILES D'UN TURBINE A VAPEUR	13
FIGURE 9 : TURBINE A VAPEUR	14
FIGURE 10 : CONDENSEUR A EAU	14
FIGURE 11: LA POMPE.....	15
Chapitre III : Analyse et modélisation thermodynamique	17
FIGURE 12: DIAGRAMME T-S DU CYCLE DE RANKINE.....	20
Chapitre IV : Réalisation et assemblage du système	23
FIGURE 13: REALISATION TURBINE A VAPEUR	25
FIGURE 14: CHAUDIERE SOLAIRE / TUBE COLLECTEUR.....	25
Chapitre V : Analyse des performances et optimisation	29
FIGURE 15: CHAUDIERE SOLAIRE / TUBE COLLECTEUR.....	26
FIGURE 16: MONTAGE D'UNE TURBINE A VAPEUR ALIMENTEE PAR UNE SOURCE DE CHALEUR SOLAIRE	26

Introduction générale

Introduction générale

La transition énergétique vers des sources renouvelables est aujourd'hui une nécessité incontournable face à l'épuisement progressif des ressources fossiles et aux enjeux environnementaux planétaires. La dépendance mondiale au pétrole, au gaz naturel et au charbon a conduit à une augmentation considérable des émissions de gaz à effet de serre, provoquant des changements climatiques aux conséquences graves. Dans ce contexte, le recours aux énergies renouvelables représente une alternative durable et stratégique.

Parmi les différentes sources disponibles, l'énergie solaire occupe une place privilégiée grâce à son abondance, sa gratuité et sa propreté. Chaque année, la Terre reçoit du Soleil une quantité d'énergie largement supérieure à la consommation énergétique mondiale, mais son exploitation reste encore limitée par des contraintes technologiques et économiques. Ainsi, le développement de systèmes performants capables de convertir efficacement cette ressource en énergie utile constitue un enjeu majeur de recherche et d'innovation.

L'utilisation de l'énergie solaire pour produire de la vapeur, ensuite transformée en énergie mécanique et enfin en électricité, est une approche prometteuse qui combine la thermodynamique classique et les technologies modernes de concentration solaire. Dans ce cadre, la turbine à vapeur alimentée par une chaudière solaire se présente comme une solution innovante, capable d'assurer un rendement intéressant tout en réduisant l'empreinte carbone.

Cette étude s'inscrit dans cette dynamique et vise à réaliser une analyse approfondie de la conception, du fonctionnement et de l'optimisation d'une turbine à vapeur alimentée par l'énergie solaire. Elle ne se limite pas uniquement à l'aspect théorique, mais intègre également une réflexion pratique sur la faisabilité, l'efficacité et l'amélioration du système.

Les principaux objectifs de cette recherche peuvent être résumés comme suit :

1. Étudier le contexte énergétique actuel et l'importance de l'intégration de l'énergie solaire dans la production d'électricité.
2. Concevoir un système ouvert complet associant capteur solaire, mini chaudière et turbine.
3. Développer un modèle thermodynamique ouvert basé sur le cycle de Rankine pour analyser les performances du système.
4. Proposer des méthodes d'optimisation afin d'améliorer le rendement global et de réduire les pertes.
5. Évaluer les aspects économiques et environnementaux liés à l'exploitation d'un tel dispositif dans un contexte industriel, notamment en Algérie.

Introduction générale

La méthodologie adoptée repose sur une approche pluridisciplinaire : revue bibliographique des travaux existants, modélisation thermodynamique et énergétique, calculs analytiques, étude paramétrique et proposition de solutions d'optimisation.

En adoptant cette démarche, la présente étude vise non seulement à approfondir la compréhension du fonctionnement d'une turbine à vapeur solaire, mais également à contribuer à la promotion de solutions technologiques durables adaptées aux besoins énergétiques actuels et futurs.

Chapitre I : Contexte théorique et état de l'art

I.1 Introduction

La compréhension du fonctionnement d'une turbine à vapeur alimentée par une source d'énergie solaire nécessite une base théorique solide. Ce chapitre présente d'abord les fondements historiques et scientifiques de la conversion énergétique, puis expose les principes thermodynamiques des turbines à vapeur et enfin les principales technologies solaires permettant de produire de la vapeur. Une revue de l'état de l'art mondial et national sera également incluse pour situer notre travail dans un contexte global.

I.2 Historique des turbines à vapeur

L'utilisation de la vapeur comme fluide moteur remonte au XVIIe siècle avec les premières expériences de Denis Papin. Cependant, ce n'est qu'avec James Watt au XVIIIe siècle que la machine à vapeur a connu un essor considérable, marquant le début de la révolution industrielle.

- **XVIIIe siècle** : invention et amélioration de la machine à vapeur.
- **XIXe siècle** : généralisation dans les trains, bateaux et usines.
- **XXe siècle** : perfectionnement des turbines à vapeur modernes pour la production d'électricité.

Aujourd'hui, les turbines à vapeur représentent encore une grande partie de la capacité électrique mondiale, souvent associées aux centrales thermiques classiques, nucléaires et de plus en plus aux systèmes hybrides solaires.

I.3 Principes thermodynamiques de la conversion énergétique

La production de puissance à partir de la vapeur repose essentiellement sur les lois de la thermodynamique :

- **Premier principe** : conservation de l'énergie.
- **Deuxième principe** : limitation imposée par l'entropie et rendement maximum donné par le cycle de Carnot.

Le cycle de **Rankine**, qui est une adaptation pratique du cycle de Carnot, constitue la base de fonctionnement des centrales à vapeur. Il comprend quatre étapes principales :

1. Compression de l'eau dans une pompe.
2. Chauffage et vaporisation dans la chaudière.
3. Détente de la vapeur dans la turbine (production de travail mécanique).
4. Condensation dans un condenseur avant retour à la pompe.

Ce cycle est représenté sur des diagrammes **T-s** qui permettent d'analyser les performances

T-s diagram for steam

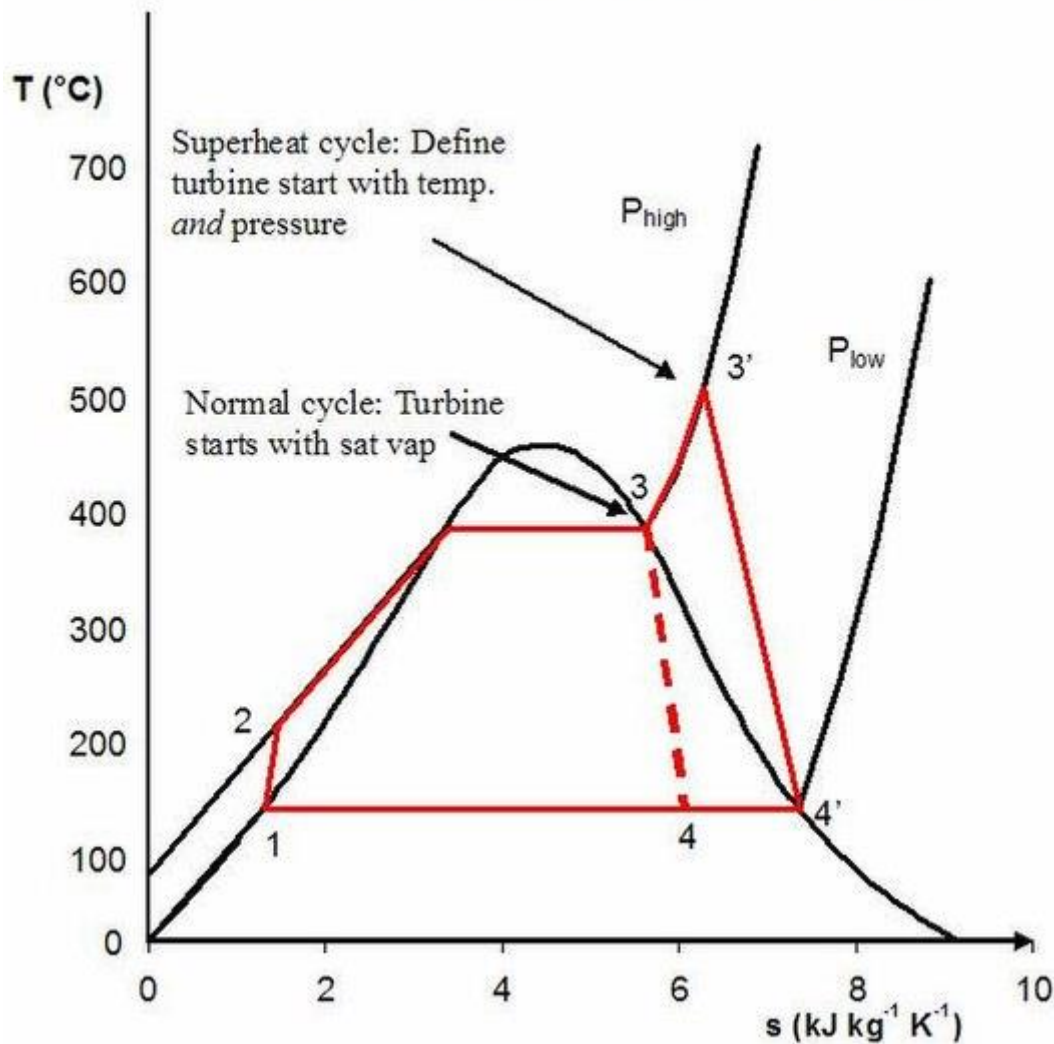


Figure 1: Diagramme T-S d'un cycle de rankine

I.4 Types de turbines à vapeur

Les turbines à vapeur se classent selon plusieurs critères, dont le type de fonctionnement (action ou réaction)

Les turbines à vapeur sont classées par fonctionnement en deux types principaux

- **Turbines à action** : la vapeur se détend totalement dans les buses avant de frapper les aubes de la turbine.
- **Turbines à réaction** : la détente de la vapeur se fait partiellement dans les aubages fixes et mobiles, assurant une réaction dynamique.

- **La différence entre les deux types** : La turbine à réaction utilise à la fois la pression et l'énergie cinétique de l'eau pour faire tourner la turbine et La turbine à impulsion (action) utilise uniquement l'énergie cinétique de l'eau pour faire tourner son rotor.

Chaque type possède ses avantages en termes de rendement, de robustesse et de domaine d'application.

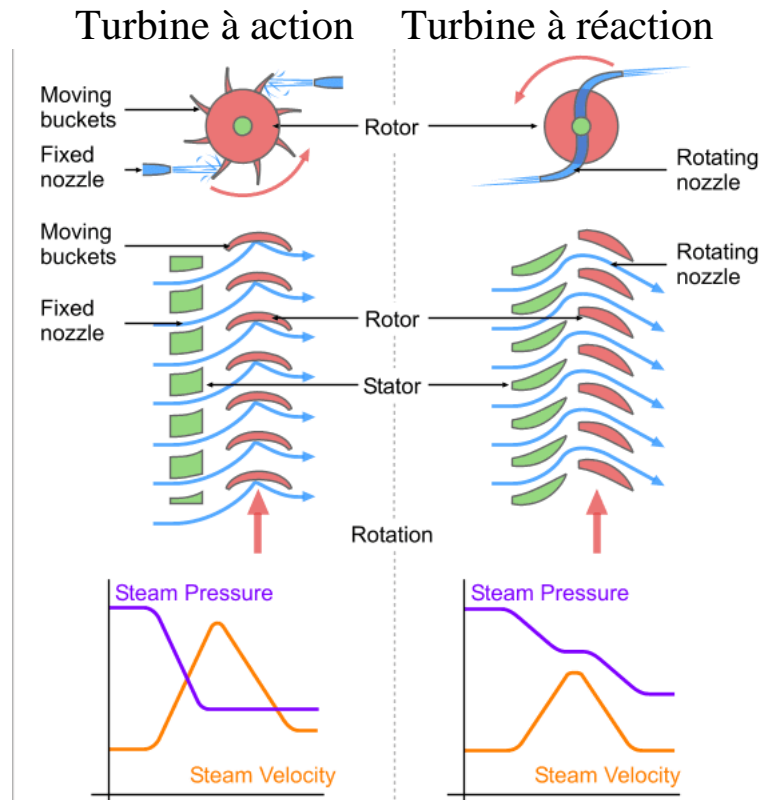


Figure 2 : La différence entre les deux types de turbine

I.5 Technologies solaires de production de vapeur

L'énergie solaire peut être exploitée de plusieurs façons pour produire de la vapeur :

- **Capteurs plans** : simples mais limités en température ($\leq 100^{\circ}\text{C}$).
- **Capteurs cylindro-paraboliques (CSP)** : permettent d'atteindre 400°C .
- **Tours solaires** : utilisent des champs d'héliostats pour concentrer la lumière vers un récepteur central (jusqu'à 1000°C).
- **Systèmes Fresnel** : plus économiques mais avec des rendements modérés.



Figure 3 : Capteurs cylindro-paraboliques (CSP)

I.6 État de l'art mondial

Plusieurs pays ont investi dans la technologie des turbines solaires :

- **Espagne (Valle, Andasol)** : centrales solaires à tour et cylindro-paraboliques.



Figure 4 : centrales solaires en Espagne

- **États-Unis (Nevada Solar One, Ivanpah)** : grandes installations hybrides.



Figure 5 : centrales solaires à tour États-Unis

- **Inde, Australie, Afrique du Sud** : projets pilotes de grande envergure.

I.7 Situation en Algérie

L'Algérie, avec un ensoleillement moyen de plus de 3000 heures par an, possède un potentiel solaire immense. Des projets pilotes comme la centrale hybride de **Hassi R'Mel** ont montré la faisabilité d'intégrer la technologie solaire dans la production électrique. Cependant, le passage à l'échelle industrielle reste limité par des défis financiers et technologiques.



Figure 6 : centrales solaires en algérie

Principe de fonctionnement d'une centrale à capteurs cylindro-paraboliques

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

Les rayons solaires sont concentrés sur un tube horizontal, où circule un fluide caloporteur qui servira à transporter la chaleur vers la centrale elle-même.

La température du fluide peut monter jusqu'à 500° C. Cette énergie est transférée à un circuit d'eau, la vapeur alors produite actionne une turbine qui produit de l'électricité.

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

I.8 Conclusion

Ce premier chapitre a permis d'établir les bases théoriques nécessaires à la compréhension du système étudié. L'historique, les principes thermodynamiques et les technologies disponibles ont été passés en revue, de même que les réalisations internationales et nationales. Dans le chapitre suivant, nous aborderons la **conception détaillée du système étudié**, en mettant l'accent sur le dimensionnement des composants principaux.

Chapitre II : Conception du système

II.1 Introduction

La conception d'un système combinant l'énergie solaire et une turbine à vapeur nécessite une approche intégrée englobant les aspects thermiques, mécaniques et énergétiques. Dans ce chapitre, nous décrirons la structure générale du système, les composants essentiels et les critères de dimensionnement adoptés. L'objectif est de développer un modèle cohérent et fonctionnel capable de produire de l'énergie mécanique et, par extension, de l'électricité à partir d'une ressource solaire.

II.2 Description générale du système

Le système étudié se compose de plusieurs sous-ensembles interconnectés :

1. **Le collecteur solaire** : capte et concentre l'énergie solaire.
2. **La chaudière (ou générateur de vapeur)** : utilise la chaleur concentrée pour transformer l'eau en vapeur à haute pression.
3. **La turbine à vapeur** : convertit l'énergie thermique de la vapeur en énergie mécanique.
4. **Le condenseur** : condense la vapeur après détente, permettant sa réutilisation.
5. **La pompe** : réinjecte l'eau condensée dans la chaudière.
6. **Le générateur électrique** : transforme l'énergie mécanique en énergie électrique.

Ces composants constituent ensemble un **cycle de Rankine solaire**.

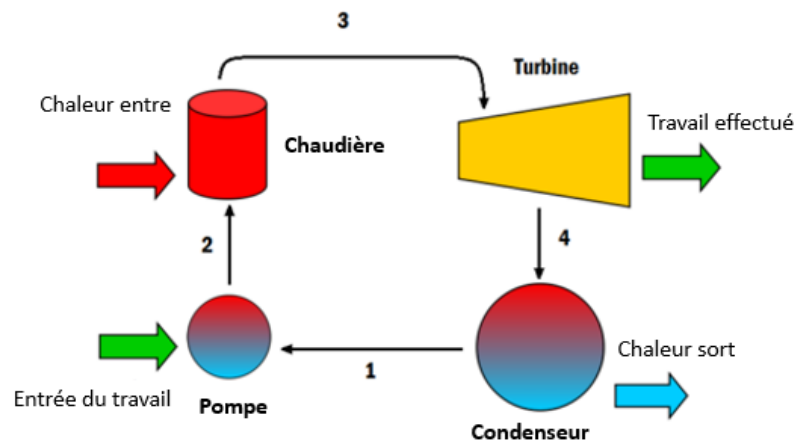


Figure 7 : Cycle de Rankine

II.3 Choix du collecteur solaire

Le choix du collecteur dépend de la température et de la pression nécessaires pour la turbine.

- **Capteur cylindro-parabolique** : atteint 300–400 °C, adapté pour des turbines de petite et moyenne puissance.
- **Capteur parabolique** : C'est un dispositif qui concentre les rayons solaires à l'aide d'un miroir en forme de parabole vers un foyer. Au point focal se trouve un récepteur qui capte

cette énergie concentrée et la transforme en chaleur utile et dont la température peut atteindre jusqu'à 500°C.

- **Tour solaire** : atteint 600–1000 °C, adapté aux grandes installations.
- **Fresnel** : compromis économique mais rendement modéré.

Dans ce projet, le choix se porte sur un **collecteur parabolique**, offrant un bon compromis entre efficacité, coût et faisabilité technique.

II.4 Dimensionnement thermique de la chaudière

Le dimensionnement thermique d'une chaudière est le processus qui consiste à déterminer la puissance nécessaire pour répondre aux besoins de chauffage d'un bâtiment, en tenant compte de ses caractéristiques et des déperditions de chaleur, afin d'assurer un bon rendement et de réduire les coûts de fonctionnement.

La chaudière reçoit l'énergie thermique du collecteur solaire de forme parabolique de diamètre 2 m.

- **Puissance thermique reçue :**

La puissance thermique reçue est l'énergie sous forme de chaleur qu'un système absorbe par unité de temps, mesurée en watts (W)

$$Q_{\text{solaire}} = A_{\text{capteur}} \cdot G \cdot \eta_{\text{optique}} \quad (4.1)$$

Signification des termes :

- Q_{solaire} : Puissance thermique reçue (en Watt).
- A_{capteur} : surface du capteur solaire (m²).
- G : l'irradiation solaire sur le plan du capteur (W/m²).
- η_{optique} : rendement optique du capteur (sans unité, entre 0 et 1).

Chaleur nécessaire pour produire de la vapeur :

Elle représente l'énergie thermique qui permet à l'eau de passer de l'état liquide à l'état vapeur saturée sans que sa température n'augmente au-delà de la température d'ébullition en fonction de la pression de la mini chaudière. Cette quantité d'énergie est de 2257 kJ/kg d'eau à pression atmosphérique.

$$Q_{\text{vapeur}} = \dot{m} \cdot (h_{\text{vapeur}} - h_{\text{eau}}) \quad (4.2)$$

Le dimensionnement consiste à ajuster (A_{capteur}) et le débit massique (\dot{m}) pour assurer la production de vapeur suffisante.

II.5 Conception de la turbine à vapeur

La conception d'une turbine à vapeur moderne, perfectionnée par Sir Charles Parsons en 1884, repose sur la thermodynamique : la vapeur à haute pression se détend à travers le rotor muni d'aubes, convertissant son énergie cinétique en travail mécanique rotatif pour entraîner un arbre et un générateur électrique.

La turbine est conçue en fonction de :

- **La pression** : Une différence de pression significative est nécessaire pour actionner la turbine. La vapeur à haute pression entre dans le corps de la turbine et se détend, créant un débit qui fait tourner les pales. Cette détente réduit la pression de la vapeur au fur et à mesure qu'elle traverse la turbine.
- **La température** : La vapeur entrante est très chaude (souvent entre 500 et 650°C) pour maximiser son énergie thermique. Au cours de sa détente dans la turbine, sa température baisse, entraînant une chute d'énergie thermique qui est convertie en énergie mécanique
- **Le débit massique de vapeur** : stabilise la vitesse de rotation de l'arbre

Les paramètres de conception incluent :

- **Le nombre d'étages** : turbine à simple ou multi-étages.
- **Les aubes fixes et mobiles** : profil aérodynamique pour maximiser la détente.

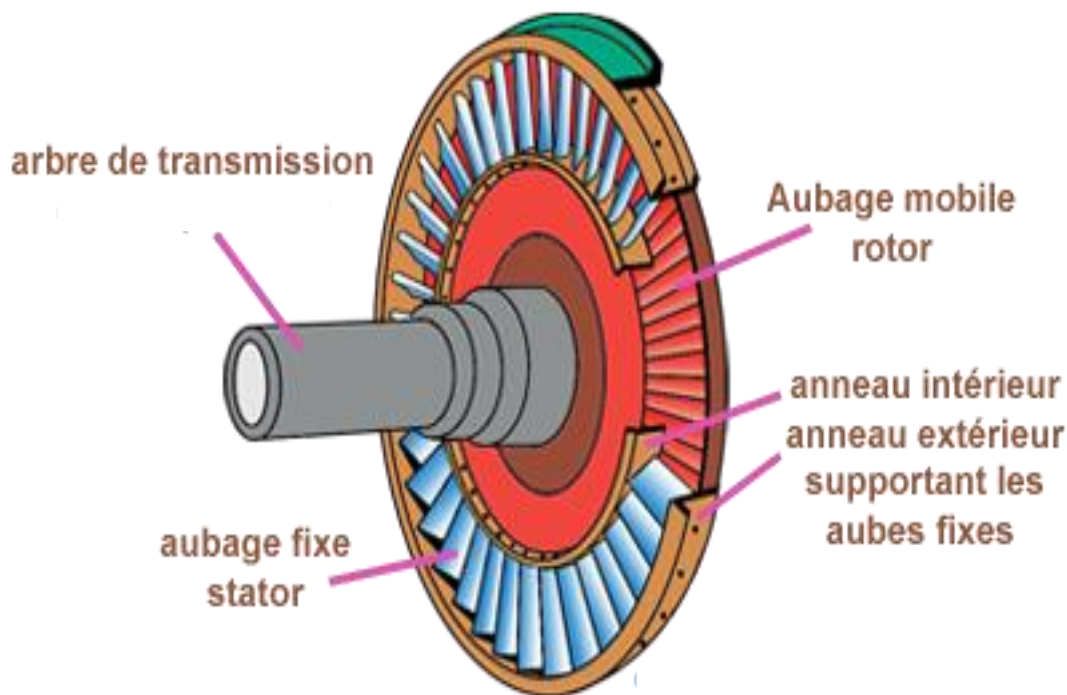


Figure 8: Les aubes fixes et mobiles d'un Turbine à vapeur

- **Le rendement isentropique** : généralement 70–85 % pour de petites turbines.



Figure 9 : Turbine à vapeur

II.6 Conception du condenseur

La conception d'un condenseur vise à transformer un gaz en liquide en évacuant sa chaleur vers un fluide caloporteur comme l'air ou l'eau.

Le condenseur permet de liquéfier la vapeur en sortie de turbine. Deux types existent :

- **Condenseur à surface** (échangeur de chaleur).
- **Condenseur à jet direct** (mélange de vapeur et eau de refroidissement).

Le choix dépend de la disponibilité de l'eau et des contraintes environnementales.

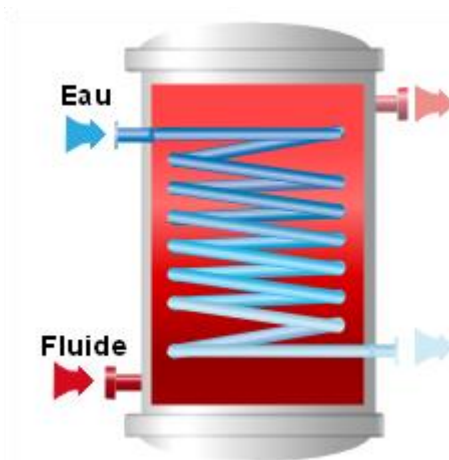


Figure 10 : condenseur à eau

II.7 Dimensionnement de la pompe

Le dimensionnement d'une pompe nécessite la détermination de deux paramètres essentiels: le débit requis et la Hauteur Manométrique Totale (HMT). Le débit correspond au volume de liquide à déplacer par la pompe dans un laps de temps donné. La HMT représente la pression totale que la pompe doit fournir pour vaincre les dénivellations géométriques (hauteurs), les pertes de charge dans les tuyaux, et les éventuelles pressions utiles nécessaires à l'application. Le dimensionnement se fait en calculant ces deux valeurs pour trouver la pompe adaptée à l'installation

La pompe assure la circulation de l'eau dans le cycle.

Puissance nécessaire :

$$\bullet W_{pompe} = \frac{\dot{m} \cdot (P_{sortée} - P_{entrée})}{\rho \cdot \eta_{pompe}} \quad (7.1)$$

Où :

ρ : densité du fluide.

η_{pompe} : Rendement de la pompe.

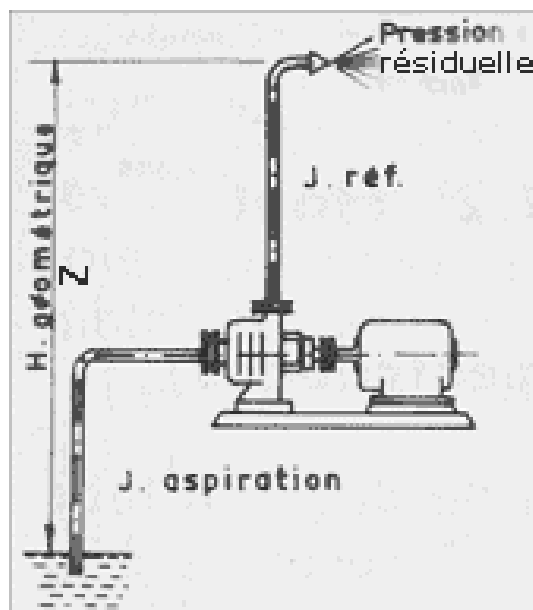


Figure 11: La pompe

II.8 Intégration du générateur électrique

Un générateur électrique est un dispositif permettant de produire de l'énergie électrique à partir d'une autre forme d'énergie. Par opposition, un appareil qui consomme de l'énergie électrique s'appelle une machine réceptrice électrique.

Le générateur est couplé à l'arbre de la turbine. Pour une petite centrale solaire, on utilise généralement :

- **Alternateurs synchrones** pour le raccordement au réseau.
- **Alternateurs asynchrones** pour des systèmes autonomes.

II.10 Conclusion

La conception du système repose sur le choix judicieux des composants et sur leur dimensionnement cohérent. Les équations de base permettent de déterminer les paramètres nécessaires pour produire une puissance mécanique utilisable. Le chapitre suivant abordera **l'analyse et la modélisation thermodynamique**, afin d'évaluer quantitativement les performances du système conçu.

Chapitre III : Analyse et modélisation Thermodynamique

III.1 Introduction

L'analyse thermodynamique constitue une étape essentielle pour évaluer les performances d'une turbine à vapeur alimentée par l'énergie solaire. Elle permet de quantifier les échanges énergétiques, de déterminer les rendements et d'identifier les pertes éventuelles. Dans ce chapitre, nous développons un modèle basé sur le cycle de Rankine, en y intégrant les équations fondamentales, les bilans énergétiques et une étude paramétrique pour explorer l'influence des variables principales.

III.2 Modèle thermodynamique du cycle de Rankine

Le cycle de Rankine solaire se compose de quatre transformations principales :

1. **Compression isentropique** de l'eau liquide dans la pompe.
2. **Chauffage isobare** et vaporisation dans la chaudière solaire.
3. **Détente isentropique** de la vapeur dans la turbine.
4. **Condensation isobare** de la vapeur dans le condenseur.

Ce modèle repose sur les hypothèses suivantes :

- Le fluide de travail est de l'eau pure.
- Les transformations idéales sont isentropiques, sauf lorsqu'un rendement réel est introduit.
- Les pertes thermiques externes sont négligées dans un premier temps.

III.3 Équations fondamentales

- **Énergie à la pompe** : L'énergie à la pompe peut désigner l'énergie mécanique fournie pour augmenter la pression ou la vitesse d'un fluide par une pompe, ou l'énergie générée par un système de pompage :

$$W_{pompe} = \dot{m}(h_2 - h_1) \quad (3.1)$$

- h_2 : enthalpie spécifique du fluide à la sortie de pompe (J/kg).
- h_1 : enthalpie spécifique du fluide à l'entrée de pompe (J/kg).
- h_2-h_1 : augmentation d'enthalpie du fluide due au travail de la pompe

- **Énergie fournie par la chaudière** :

Une chaudière fournit de l'énergie thermique sous forme de chaleur, produite par la combustion d'un combustible comme le gaz ou le fioul :

$$Q_{chaudière} = \dot{m}(h_3 - h_2) \quad (3.2)$$

- h_2 : enthalpie spécifique du fluide à l'entrée de la chaudière (J/kg).

- h_3 : enthalpie spécifique du fluide à la sortie de la chaudière (J/kg).
- $h_3 - h_2$: gain d'enthalpie du fluide grâce à l'apport de chaleur.

Travail produit par la turbine :

Le travail produit par une turbine est l'énergie mécanique rotative qu'elle transforme à partir de l'énergie d'un fluide (eau, vapeur, vent, gaz). Ce travail mécanique sert principalement à entraîner un alternateur pour produire de l'électricité ou un compresseur et il est déterminé à partir de la relation suivante :

$$W_{turbine} = \dot{m}(h_3 - h_4) \quad (3.3)$$

- h_3 : enthalpie spécifique de la vapeur à l'entrée de la turbine (J/kg).
- h_4 : enthalpie spécifique de la vapeur à la sortie de la turbine (J/kg).
- $h_3 - h_4$: baisse d'enthalpie, correspondant à l'énergie mécanique extraite sous forme de travail.

- **Énergie rejetée au condenseur :**

L'énergie rejetée au condenseur est la chaleur que le fluide caloporteur, à l'état de vapeur à haute température, cède au milieu extérieur pour se liquéfier :

$$Q_{condenseur} = \dot{m} \cdot (h_4 - h_1) \quad (3.4)$$

- h_4 : enthalpie spécifique à l'entrée du condenseur (souvent vapeur humide).
- h_1 : enthalpie spécifique à la sortie du condenseur (souvent eau liquide saturée).
- $h_4 - h_1$: perte d'enthalpie du fluide pendant la condensation → c'est la chaleur rejetée vers l'extérieur (air ou eau de refroidissement).

Rendement thermique du cycle de Rankine :

Le rendement thermique du cycle de Rankine, également appelé efficacité, est le rapport entre le travail net produit par la turbine et le travail net reçu par la pompe, divisé par la chaleur totale fournie. La formule générale est :

$$\eta = \frac{W_{net}}{Q_{in}} \quad (3.5)$$

$$\eta_{cycle} = \frac{W_{turbine} - W_{pompe}}{Q_{chaudière}} \quad (3.6)$$

III.4 Diagrammes thermodynamiques

Les diagrammes thermodynamiques sont des graphiques qui représentent les états d'un système (comme un fluide) et les processus qui le modifient, en utilisant différentes variables telles que la température, la pression, le volume ou l'entropie

Pour mieux illustrer le fonctionnement du cycle :

- **Diagramme T-s (Température – Entropie)** : met en évidence les différentes étapes du cycle (compression, chauffage, détente, condensation).

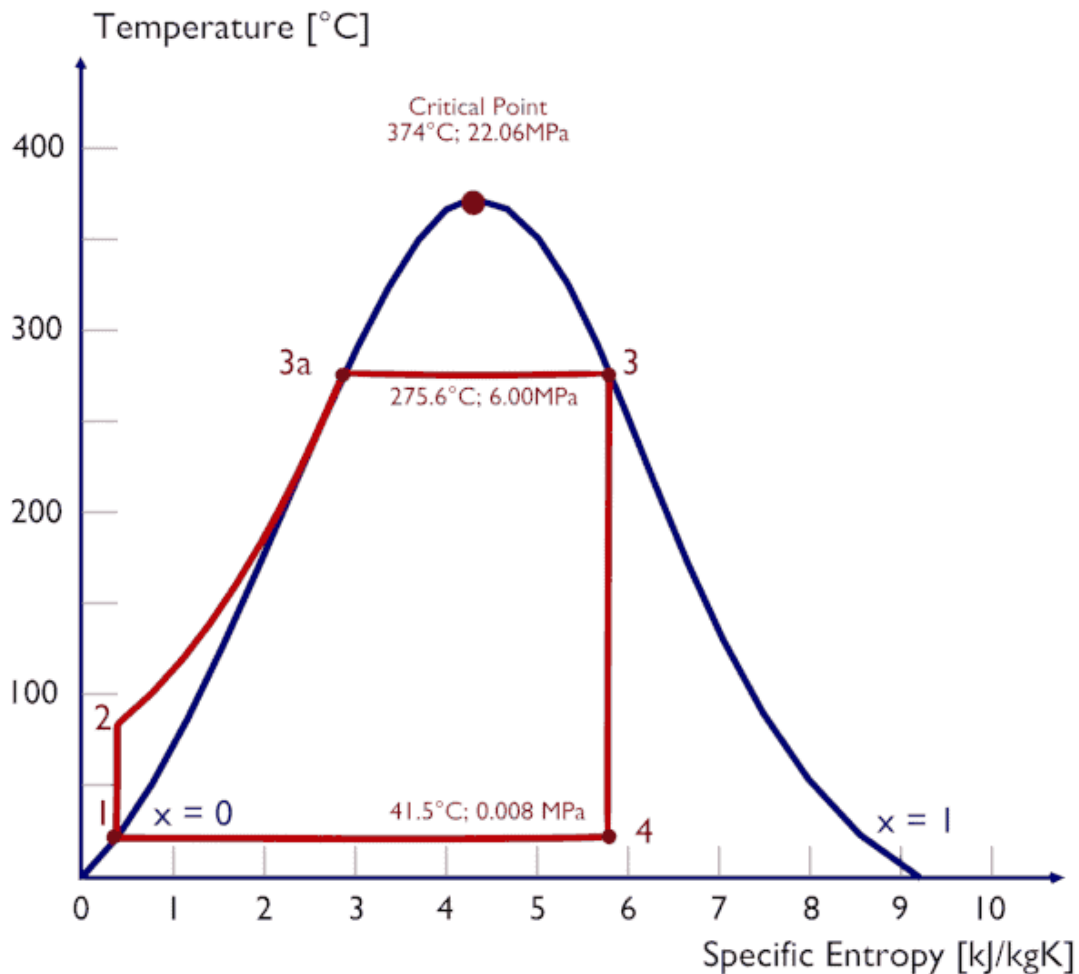


Figure 12: Diagramme T-S du Cycle de Rankine

- **Diagramme h-s (Diagramme de Mollier)** : utilisé pour analyser les transformations de la vapeur dans la turbine.

Ce diagramme permet de visualiser les performances et de comparer le cycle idéal au cycle réel.

III.5 Étude paramétrique

L'efficacité du cycle dépend fortement de certains paramètres :

1. **Température d'entrée dans la turbine :**
 - Plus elle est élevée, plus le rendement augmente.
 - Limitation par la résistance des matériaux et la température maximale du collecteur solaire.
2. **Pression d'entrée dans la turbine :**
 - Une pression élevée permet une meilleure détente et plus de travail mécanique.
 - Toutefois, elle augmente la complexité et le coût de la chaudière.
3. **Pression du condenseur :**
 - Une pression plus basse améliore le rendement du cycle.
 - Mais elle exige des systèmes de refroidissement plus performants.
4. **Débit massique de vapeur :**
 - Influence directe sur la puissance produite.
 - Doit être optimisé pour éviter des pertes énergétiques.

III.6 Rendements réels

Dans la pratique, chaque composant introduit des pertes :

- **Pompe** : rendement hydraulique (70–85 %).
- **Chaudière** : rendement thermique (75–90 %).
- **Turbine** : rendement isentropique (70–85 %).
- **Condenseur** : pertes par échange thermique incomplet.

Le rendement global est donné par :

$$\eta_{global} = \eta_{pompe} \cdot \eta_{chaudière} \cdot \eta_{turbine} \cdot \eta_{condenseur} \quad (6.1)$$

III.7 Exemple de calcul numérique simplifié

Considérons les conditions suivantes :

- Pression d'entrée turbine : 20 bars.
- Température d'entrée : 350 °C.
- Pression de condensation : 0,1 bar.
- Débit massique : 1 kg/s.

Les valeurs d'enthalpies tirées des tables de vapeur permettent de calculer :

- Travail de la turbine : ≈ 1000 kJ/kg.
- Travail de la pompe : ≈ 5 kJ/kg.
- Chaleur fournie par la chaudière : ≈ 2800 kJ/kg.
- Rendement du cycle ≈ 35 %.

III.8 Discussion des résultats

- Le rendement du cycle de Rankine solaire est inférieur à celui des centrales thermiques conventionnelles (40–45 %), mais il reste compétitif compte tenu de la gratuité de la ressource solaire.
- L'optimisation des paramètres (pression, température, débit) peut améliorer significativement les performances.
- L'intégration de systèmes de stockage thermique permet de stabiliser la production et d'augmenter le facteur de charge.

III.9 Conclusion

L'analyse thermodynamique a permis de modéliser le fonctionnement du cycle solaire et de quantifier les performances énergétiques. Les résultats montrent que le rendement reste limité par la température et la pression atteignables avec les technologies actuelles. Le chapitre suivant sera consacré aux **méthodes d'optimisation et d'amélioration de notre système** afin d'augmenter son efficacité globale.

Chapitre IV : Réalisation et assemblage du système

Introduction du chapitre

Après la conception et le dimensionnement de la turbine à vapeur, il est essentiel de passer à la **réalisation physique du système** et à son **assemblage** avec le collecteur solaire thermique. Ce chapitre décrit les étapes de fabrication, l'intégration des composants et les tests préliminaires pour la mise en service.

IV.1 Fabrication des éléments de la turbine à action

Les principaux composants de la turbine sont :

1. **Choix du matériau brut (acier allié)**
 - Sélection d'un acier spécial résistant à la chaleur et à la pression.
2. **Découpage (Découpage des pièces brutes)**
 - Découpage des cylindre ou plaques métalliques aux dimensions nécessaires.
3. **Soudage / Assemblage (Soudage ou emboîtement)**
 - Fixation des aubages (pales) sur le disque du rotor par soudage, rivetage ou emboîtement.
4. **Mise en forme (Forgeage ou Fonderie)**
 - Mise en forme des grandes pièces comme l'arbre ou le disque du rotor.
5. **Polissage et finition**
 - Élimination de la rugosité et amélioration de la surface pour réduire les pertes.
6. **Équilibrage dynamique du rotor**
 - Vérification et correction des balourds pour éviter les vibrations en rotation.
7. **Montage final**
 - Assemblage de l'arbre, du rotor, des aubages fixes, du carter, des joints et des paliers.
8. **Essais et mise en marche**
 - Test de fonctionnement à vide puis en charge avec vapeur pour vérifier la performance et la sécurité.



Figure 13: Réalisation turbine à vapeur

IV.2 Intégration avec le système de production de vapeur solaire

1 Chaudière solaire / Tube collecteur

- Tube de 16 mm,
- Le fluide caloporteur (eau) contenu dans le réservoir en acier (mini chaudière) chauffé par le concentrateur parabolique de diamètre 2 m².



Figure 14: Chaudière solaire / Tube collecteur

IV. 3 Connexion turbine-chaudière

- Tubulure est adaptée pour supporter **5 bars de pression** et **150 °C**.
- Vannes d'admission et de sécurité pour contrôler le débit de vapeur.



Figure 15: Chaudière solaire / Tube collecteur

Schéma simplifié du montage :

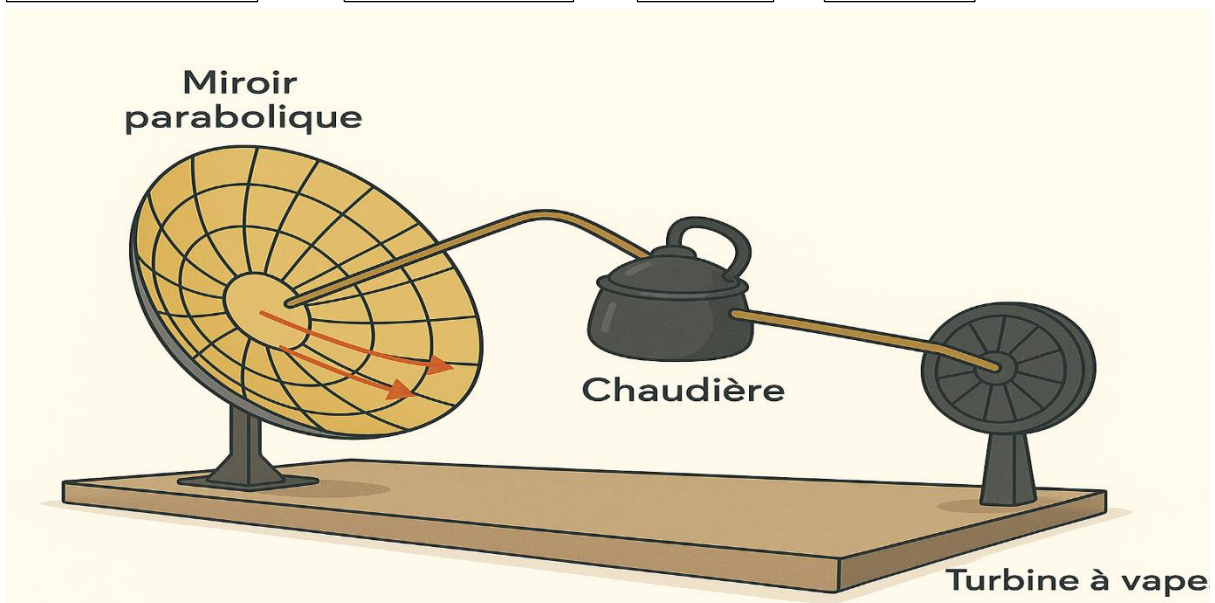
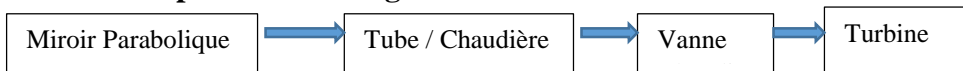


Figure 16: Montage d'une turbine à vapeur alimentée par une source de chaleur solaire

IV.3 Tests et mise en service

1. Tests préliminaires

- **Vérification de l'étanchéité des joints et tuyaux**
Avant la mise en service, le circuit a été rempli d'eau puis soumis à une faible pression afin de contrôler l'absence de fuites au niveau des raccords et des soudures. Cette étape est essentielle pour garantir la sécurité des essais et limiter les pertes de vapeur.
- **Mesure de la température et de la pression en sortie de la chaudière**
Un thermomètre et un manomètre ont été installés à la sortie de la chaudière afin de relever la température et la pression de la vapeur produite. Les mesures obtenues ont été comparées aux valeurs théoriques prévues, permettant de valider le bon fonctionnement initial du système.

2. Tests de rotation de la turbine

- **Contrôle de la vitesse de rotation à vide**
La turbine a d'abord été testée sans charge mécanique. La vapeur a été envoyée directement sur les aubages afin d'observer la mise en rotation de la roue. Cette étape permet de vérifier la capacité du flux de vapeur à entraîner la turbine.
- **Mesure du couple et de la puissance mécanique**
Afin d'estimer les performances, un dynamomètre a été utilisé pour mesurer le couple appliqué sur l'arbre. La puissance mécanique a ensuite été calculée à partir du couple et de la vitesse de rotation. Ces résultats constituent une base pour la comparaison avec les valeurs théoriques prévues.

1. Sécurité et surveillance

- **Soupape de sécurité** : évacuation automatique de la surpression.
- **Manomètre** : contrôle continu de la pression.
- **Thermomètre / sonde** : surveillance de la température de la vapeur.
- **Système de purge** : élimination de l'excès de vapeur ou d'air.
- **Inspection régulière** : contrôle visuel, vérification des joints et fixations.

Ces dispositifs garantissent un fonctionnement sûr et préviennent les risques d'accident.

- Pression maximale autorisée : 5 bars.
- Capteurs de température pour éviter la surchauffe.
- Arrêt automatique en cas de dépassement des limites.

2. Optimisation

L'optimisation d'un prototype de turbine à vapeur en circuit ouvert, alimenté par une mini-chaudière solaire, repose sur plusieurs axes complémentaires :

- **Aubages** : amélioration du profil, de l'angle d'attaque et du matériau des pales pour maximiser la conversion de l'énergie cinétique en énergie mécanique.
- **Isolation thermique** : réduction des pertes de chaleur dans la chaudière et les conduites afin d'augmenter l'efficacité énergétique globale.
- **Matériaux avancés** : choix d'alliages résistants à la chaleur et à la corrosion pour accroître la durabilité et limiter la maintenance.
- **Instrumentation et contrôle** : intégration de capteurs (pression, température, débit) permettant une surveillance en temps réel et une régulation plus précise.
- **Adaptation aux conditions solaires** : ajustement de la taille de la chaudière et du débit de vapeur en fonction de l'ensoleillement pour assurer un fonctionnement stable.
- **Sécurité intégrée** : association des dispositifs de protection (soupape, purge, contrôle manuel) avec une conception optimisée pour limiter les risques.

En résumé, l'optimisation vise à **accroître le rendement, réduire les pertes énergétiques, améliorer la sécurité et assurer la longévité du système**, tout en tenant compte des contraintes liées à l'utilisation d'une source solaire intermittente.

- Ajustement de l'alignement du rotor.
- Réglage des vannes pour réguler le débit de vapeur et la vitesse.

Conclusion

Pour des raisons de sécurité et en absence d'équipements de protection au niveau du laboratoire nous avons préféré ne pas augmenter la pression dans le réservoir d'eau à des pressions trop élevées (5bars) à cause des risques d'accidents.

La réalisation et l'assemblage ont permis de concrétiser la conception théorique. Les tests préliminaires confirment que le système peut fonctionner dans des conditions prévues, mais la production de vapeur saturée à faible pression, n'a pas suffi pour faire tourner la turbine et produire un travail mécanique conséquent. Mais, si les conditions de sécurité sont réunies, ce prototype constitue une base solide pour des essais expérimentaux et des calculs de performance et d'optimisation qui sont développés dans le chapitre suivant.

Chapitre V : Analyse des performances et optimisation

V.1 Résultats expérimentaux et comparaison avec les prévisions

Après la réalisation et la mise en service du système, les mesures expérimentales ont été effectuées afin d'évaluer ses performances réelles. Les paramètres mesurés comprennent :

- La température de la vapeur en sortie de la chaudière solaire.
- La pression effective de la vapeur à l'entrée de la turbine.
- Le débit massique de vapeur.
- La vitesse de rotation de la turbine et la puissance mécanique produite.

En utilisant les données expérimentales, les résultats suivants ont été obtenus :

- **Puissance solaire captée ($Q_{solaire}$) :**

$$Q_{solaire} = G \times S \quad (1.1)$$

Avec les données :

Irradiation solaire : $G = 300 \text{ W/m}^2$

(L'irradiation solaire a été mesurée expérimentalement à l'aide d'un capteur solaire, et la valeur moyenne obtenue est de **300 W/m²**)

Surface du capteur : $S = 2 \text{ m}^2$

Donc :

$$Q_{solaire} = 300 \times 2 = 600 \text{ W}$$

Le capteur solaire reçoit **600 W d'énergie solaire**

- **Puissance thermique transférée à l'eau (Q_{th}) :**

En tenant compte des pertes optiques et thermiques, le rendement de captation est environ 70 %, donc :

$$Q_{th} = \eta_{capteur} \times Q_{solaire} \quad (1.2)$$

Avec les valeurs :

$Q_{solaire} = 600 \text{ W}$

$\eta_{capteur} = 0,7$ (70 %)

Le rendement du capteur solaire a été supposé égal à **0,7**, afin de simplifier les calculs énergétiques. Cette hypothèse reste cohérente avec les valeurs usuelles des capteurs thermiques plans (entre 0,6 et 0,8).

$$Q_{th} = 0,7 \times 600 = 420 \text{ W}$$

Cela veut dire que ton capteur solaire produit **420 W de chaleur utile**

- **Débit massique de vapeur :**

Pour chauffer et vaporiser de l'eau à 5 bars (température de saturation $\approx 152^\circ\text{C}$), l'enthalpie spécifique de vaporisation est environ $h_{fg} = 2100 \text{ kJ/kg}$.

$$\dot{m} = \frac{Q_{th}}{h_{fg}} = \frac{420}{2100000} = 2,0 \cdot 10^{-4} \text{ kg/s. (1.3)}$$

- **Puissance mécanique sur la turbine (P_m) :**

Avec un rendement isentropique moyen de $\eta_t = 0,6$:

$$P_m = \eta_t \times \dot{m} \times \Delta h \quad (1.4)$$

Données :

- $\eta_t=0,6$ (rendement de la turbine)
- $\dot{m}=2 \times 10^{-4}$ kg/s (débit massique)
- $\Delta h=2,1 \times 10^6$ J/kg (enthalpie de vaporisation)

$$P_m = 0,6 \times 420 = 252W$$

Comparée à la puissance solaire incidente (600 W), la turbine restitue environ 42 % de la puissance solaire sous forme mécanique, ce qui correspond à une performance cohérente pour une installation expérimentale de petite échelle.

Sur le tableau thermodynamique vapeur d'eau surchauffée P=3 Bar.

Température de saturation T_{sat} : 133,5

Enthalpie vapeur saturée h_1 : 2724,63

Entropie vapeur saturée s_1 : 6,9903

Sur le tableau thermodynamique liquide et vapeur d'eau saturée

Enthalpie liquide @1 bar h_f = 417,31

Chaleur latente @1 bar h_{fg} = 2257,96

Entropie liquide @1 bar s_f = 1,302

Entropie vapeur @1 bar s_g =7,3589

Sur le tableau récapitulatif des formulesTitre vapeur sortie isentropique x_{2s}

$$x_{2s} = \frac{s_1 - s_f}{s_g - s_f} \quad (1.5)$$

C'est la **formule du titre de vapeur (qualité de vapeur)** exprimée en fonction de l'entropie.

- s_1 : entropie spécifique à l'état étudié ($\text{kJ/kg} \cdot \text{K}$)
- s_f : entropie spécifique du liquide saturé ($\text{kJ/kg} \cdot \text{K}$)
- s_g : entropie spécifique de la vapeur saturée ($\text{kJ/kg} \cdot \text{K}$)
- x_{2s} : titre isentropique (la fraction massique de vapeur, entre 0 et 1)

☞ Elle s'utilise quand le fluide est dans la zone diphasique (mélange liquide + vapeur).

Si $x = 0$ → fluide entièrement liquide saturé.Si $x = 1$ → fluide entièrement vapeur saturée.Si $0 < x < 1$ → mélange liquide-vapeur.- Enthalpie sortie isentropique h_{2s}

$$h_{2s} = h_f + x_{2s} h_{fg} \quad (1.6)$$

🔍 Explication des termes :

- h_{2s} : enthalpie spécifique de l'état 2s (kJ/kg).
- h_f : enthalpie spécifique du liquide saturé (kJ/kg).
- h_{fg} : chaleur latente de vaporisation (kJ/kg).
- x_{2s} : titre de vapeur isentropique (que tu as trouvé avec la formule précédente en fonction de l'entropie).

- Δh_i isentropique

$$\Delta h_i = h_1 - h_{2s} \quad (1.7)$$

Signification :

- Δh_i : chute d'enthalpie isentropique (kJ/kg).
- h_1 : enthalpie spécifique à l'entrée de la turbine (kJ/kg).
- h_{2s} : enthalpie spécifique à la sortie isentropique de la turbine (kJ/kg)

Puissance thermique utile \dot{Q} Chaleur latente entrée $h_{fg}(p_1)$ - Débit massique \dot{m}

$$\dot{m} = \frac{\dot{Q}}{h_{2s} - h_f} \quad (1.8)$$

- Section tube A (m²)
- Densité vapeur ρ

Donnée par les tables vapeur (fonction de T, p)

- Vitesse vapeur sortie V_{out}

$$V_{out} = \frac{\dot{m}}{(\rho \cdot A)} \quad (1.9)$$

Explication

- \dot{m} : débit massique (kg/s)
- ρ : masse volumique du fluide (kg/m³) — dépend de l'état (liquide/vapeur) et de la pression/température
- A : section transversale de la conduite (m²). Pour un tube circulaire $A = (\pi \cdot D^2)/4$
- V_{out} : vitesse moyenne du fluide (m/s)

- Nombre de Reynolds Re

$$Re = \frac{(\rho \cdot V_{out} \cdot D)}{\mu} \quad (1.10)$$

Signification des termes :

- ρ : la densité du fluide [kg/m³]
- V_{out} : la vitesse moyenne de l'écoulement [m/s]
- D : le diamètre du tube (ou diamètre hydraulique) [m]
- μ : la viscosité dynamique du fluide [Pa · s]

- Vitesse jet théorique V_{jet}

$$V_{jet} = \sqrt{(2 \cdot \Delta h_i \cdot 1000)} \quad (1.11)$$

Explication :

- V_{jet} : vitesse du jet [m/s]
- Δh_{is} : enthalpie spécifique isentropique disponible [kJ/kg]
- Le facteur 1000 sert à convertir les kJ/kg,

Puisque :

$$1 \text{ kJ/kg} = 1000 \text{ J/kg}$$

- Vitesse périphérique optimale U_{opt}

$$U_{opt} = \frac{V_{jet}}{2} \quad (1.11)$$

Explication :

- U_{opt} : vitesse périphérique optimale de la roue (ou du rotor) [m/s]
- V_{jet} : vitesse du jet de vapeur ou du fluide [m/s]

- Vitesse de rotation turbine N

$$N = \frac{(60 \cdot U_{opt})}{(2\pi r)} \quad (1.12)$$

Explication des termes :

- N : vitesse de rotation de la roue [tr/min]
- U_{opt} : vitesse périphérique optimale [m/s]
- r : rayon de la roue (distance entre l'axe et la périphérie) [m]
- $2\pi r$: circonférence de la roue [m]

Puissance turbine idéale P_{ideal}

$$P_{ideal} = \dot{m} \cdot \Delta h_i \cdot 1000 \quad (1.13)$$

Explication des termes :

- P_{ideal} : puissance isentropique idéale de la turbine [W]
- \dot{m} : débit massique du fluide [kg/s]
- Δh_{is} : chute d'enthalpie spécifique isentropique [kJ/kg]
- Le facteur 1000 permet de convertir les kJ/kg en J/kg

- Puissance turbine réelle P_t ($\eta_t = 0,6$)

$$P_t = \eta_t \cdot P_{ideal} \quad (1.14)$$

Enthalpie sortie réelle h_{2a}

$$h_{2a} = \frac{h_1 - P_t}{\dot{m}} \quad (1.15)$$

- h_{2a} : enthalpie spécifique réelle à la sortie de la turbine [kJ/kg]
- h_1 : enthalpie spécifique à l'entrée de la turbine [kJ/kg]
- P_t : puissance réelle extraite par la turbine [kW]
- \dot{m} : débit massique [kg/s]

- Rendement turbine η_t

Donnée (ex. 0,6)

- Rendement global moteur η_m

$$\eta_m = \frac{P_t}{Q} \quad (1.16)$$

- η_m : rendement mécanique global de la machine (souvent la turbine).

- P_t : puissance mécanique réelle obtenue [W] ou [kW]
- Q : puissance thermique disponible (apport de chaleur, ou énergie du fluide) [W] ou [kW]

Tableau de Calculs

Pression d'entrée p_1	bar	3	4	5
Température de saturation T_{sat}	°C	133,5	143,6	151,83
Enthalpie vapeur saturée h_1	kJ/kg	2724,63	2737,68	2747,64
Entropie vapeur saturée s_1	kJ/(kg · K)	6,9903	6,8938	6,8188
Enthalpie liquide @1 bar h_f	kJ/kg	417,31	417,31	417,31
Chaleur latente @1 bar h_{fg}	kJ/kg	2257,96	2257,96	2257,96
Entropie liquide @1 bar S_f	kJ/(kg · K)	1,302	1,302	1,302
Entropie vapeur @1 bar S_g	kJ/(kg · K)	7,3589	7,3589	7,3589
Titre vapeur sortie isentropique x_{2s}	—	0,93914	0,92321	0,91083
Enthalpie sortie isentropique h_{2s}	kJ/kg	2537,86	2501,89	2473,93
Δh isentropique	kJ/kg	186,77	235,8	273,71
Puissance thermique utile \dot{Q}	W	600	600	600
Chaleur latente entrée $h_{fg}(p_1)$	kJ/kg	2181	2143	2106
Débit massique \dot{m}	kg/s	0,000275	0,00028	0,000285
Section tube A	m ²	0,000201	0,000201	0,000201
Densité vapeur ρ	kg/m ³	1,56	2,2	2,55
Vitesse vapeur sortie V_{out}	m/s	0,88	0,64	0,55
Nombre de Reynolds Re	—	1462	1400	1380
Vitesse jet théorique V_{jet}	m/s	611,24	686,78	739,92
Vitesse périphérique optimale U_{opt}	m/s	305,62	343,39	369,96
Vitesse de rotation turbine n	tr/min	9730	10928	11779
Puissance turbine idéale P_{ideal}	W	51,3	66,1	78,2
Puissance turbine réelle P_t ($\eta_t = 0.6$)	W	30,8	39,7	47
Enthalpie sortie réelle h_{2a}	kJ/kg	2611	2596	2583
Rendement turbine η_t	—	0,6	0,6	0,6
Rendement global moteur η_m	—	0,051	0,066	0,078

V 2 Facteurs influençant l'efficacité du système

Plusieurs facteurs influencent les performances globales du système :

1. Facteurs solaires et environnementaux

- Irradiation solaire directe et variations climatiques (nuages, poussière).
- Orientation et inclinaison du miroir parabolique.

2. Facteurs thermiques

- Pertes thermiques par conduction et convection dans les tubes.
- Rendement du transfert thermique entre le collecteur et le fluide.

3. Facteurs mécaniques

- Rendement isentropique de la turbine.
- Pertes mécaniques par frottement dans les paliers et engrenages.

4. Facteurs de conception

- Diamètre et profil des aubages de la turbine.
- Qualité de l'isolation thermique.
- Choix des matériaux pour résister aux contraintes thermiques et mécaniques.

V.3 Propositions d'amélioration et perspectives

Pour améliorer le rendement et la durabilité du système, plusieurs pistes peuvent être envisagées :

- **Optimisation optique** : utilisation de miroirs à haute réflectivité (>95 %) et systèmes de suivi solaire automatique (suivi à deux axes).
- **Amélioration thermique** : isolation renforcée des conduites, réduction des pertes thermiques par l'emploi de revêtements sélectifs absorbants.
- **Amélioration mécanique** : conception d'aubages profilés (inspirés des turbines industrielles) pour maximiser l'expansion de la vapeur.
- **Stockage d'énergie** : intégration d'un réservoir de sels fondus pour prolonger la production de vapeur en dehors des périodes d'ensoleillement.
- **Augmentation d'échelle** : passer d'un prototype de 600 W solaire à des champs solaires de plusieurs dizaines de m², permettant d'alimenter un réseau local en électricité ou en chaleur.

En perspective, une telle technologie peut contribuer à la **production décentralisée d'énergie propre** en zones rurales et semi-industrielles, particulièrement dans les pays à fort ensoleillement comme l'Algérie.

Conclusion générale et recommandations

Conclusion générale et recommandations

Cette étude a porté sur la **conception et l'analyse d'un système combinant une turbine à vapeur et un collecteur solaire thermique**. Les principaux résultats peuvent être résumés comme suit :

1. Aspects théoriques

- Les turbines à vapeur transforment efficacement l'énergie thermique en énergie mécanique.
- Le choix du type de turbine (action, réaction) et des paramètres de fonctionnement (pression, température, débit) influence directement le rendement.
- L'énergie solaire thermique offre un potentiel considérable pour alimenter de petites turbines expérimentales ou des centrales à concentration.

2. Aspects pratiques et calculs

- Pour une surface solaire de **2 m²** et une irradiation de **300 W/m²**, la puissance solaire captée est **600 W**, et la puissance thermique transférée à l'eau **420 W** après rendement de captation de 70 %.
- Le débit massique de vapeur produit à 5 bars est **2×10^{-4} kg/s**, ce qui permet une puissance mécanique sur la turbine de **≈ 252 W**.
- Le rendement global de conversion solaire → vapeur → mécanique reste limité (~42 %), mais il constitue une base solide pour des prototypes expérimentaux.

3. Analyse des performances

- Les pertes thermiques et mécaniques réduisent la puissance utile.
- L'efficacité dépend fortement des conditions solaires et de la qualité de conception des aubages et du collecteur.

Limites du projet

- **Échelle réduite** : la petite surface solaire limite la puissance générée.
- **Variabilité solaire** : intermittence et fluctuations météorologiques.
- **Rendement mécanique limité** : prototype expérimental, non optimisé industriellement.
- **Absence d'intégration complète** : stockage d'énergie thermique non intégré dans ce modèle.

Recommandations et perspectives futures

Pour améliorer et étendre l'application de ce projet :

1. Optimisation de la collecte solaire

- Augmenter la surface des miroirs paraboliques.
- Installer un suivi solaire automatique pour maximiser l'irradiation reçue.

2. Amélioration thermique

- Isoler les conduites et utiliser des absorbeurs sélectifs.

Conclusion générale et recommandations

- Étudier l'intégration d'un stockage thermique (sels fondus ou PCM).

3. Optimisation mécanique

- Améliorer le profil des aubages pour réduire les pertes aérodynamiques.
- Employer des matériaux résistants à la haute température et aux contraintes centrifuges pour augmenter la durabilité.

4. Applications futures

- Développement de prototypes plus grands pour l'alimentation d'installations domestiques ou industrielles.
- Couplage avec d'autres sources renouvelables (éolien, biomasse) pour créer un réseau énergétique hybride et fiable.
- Contribution à la recherche universitaire sur l'optimisation des cycles thermodynamiques de petite à moyenne échelle.

Ce mémoire démontre que **l'intégration d'une turbine à vapeur avec une source solaire thermique est réalisable**, même à petite échelle, et offre un cadre pour expérimenter et optimiser les systèmes énergétiques renouvelables. Il ouvre la voie à des développements futurs qui pourraient contribuer à la **production décentralisée d'énergie propre**, particulièrement dans les régions à fort ensoleillement.

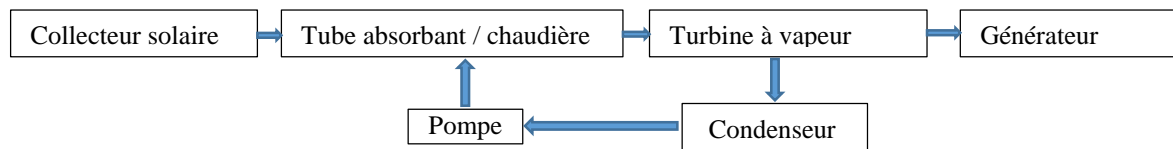
Annexes et Bibliographie

Annexes

Les annexes regroupent tous les éléments techniques, schémas, tableaux et codes utilisés pour le projet.

a) Schémas et plans techniques

1. Schéma global du système solaire-turbine



Coupe transversale du tube solaire

- Tube en acier inoxydable de 16 mm de diamètre.
- Isolation thermique autour du tube.
- Fluide caloporteur : eau.

3. Profil simplifié des aubages de turbine

- Aubages fixes et mobiles.
- Distribution de l'expansion de la vapeur.
- Direction du flux indiquée par flèche

b) Tableaux de résultats

Paramètre	Valeur
Irradiation solaire (G)	300 W/m ²
Surface miroir (S)	2 m ²
Puissance solaire captée	600 W
Rendement capteur (η_c)	70 %
Puissance thermique (Q_{th})	420 W
Débit massique vapeur (\dot{m})	2×10^{-4} kg/s
Puissance mécanique turbine	252 W
Vitesse périphérique turbine	150 m/s
Vitesse rotation turbine (N)	9000 tr/min
Rendement global du système	42 %

7.2 Bibliographie

1. Moran, M.J., Shapiro, H.N. *Fundamentals of Engineering Thermodynamics*, 9th Edition, Wiley, 2018.
2. Çengel, Y.A., Boles, M.A. *Thermodynamics: An Engineering Approach*, 9th Edition, McGraw-Hill, 2018.
3. Duffie, J.A., Beckman, W.A. *Solar Engineering of Thermal Processes*, 4th Edition, Wiley, 2013.
4. Kalogirou, S.A. *Solar Energy Engineering: Processes and Systems*, Academic Press, 2014.
5. Bejan, A., Kraus, A.D. *Heat Transfer Handbook*, Wiley, 2003.
6. IEC Standards for Small Solar Thermal Systems, International Electrotechnical Commission, 2016.
7. Articles scientifiques sur les turbines à vapeur et l'énergie solaire (ScienceDirect, ResearchGate).
8. Tuck Mapping Solutions. (s.d.). *Ivanpah Solar Energy Facility* [photographie aérienne]. Site web de Tuck Mapping Solutions. URL : <https://tuckmapping.com/ivanpah-solar-energy-facility>
9. Çengel, Y. A., & Boles, M. A. (2015). *Thermodynamics: An Engineering Approach* (8^e éd.). McGraw-Hill.
10. Andasol Solar Power Station (Centrale solaire Andasol), Guadix, Andalousie, Espagne. Vue aérienne de champs solaires à miroirs paraboliques. © Marquesado Solar / DLR (ou crédit approprié selon l'origine de l'image)
11. Made internally by a member of the Energy Education team, adapted from Energy Systems Engineering by F. Vanek, L. Albright and L. Angenent
12. Monsonnec, Frédéric. « Éléments d'un turboréacteur », *L'Avionnaire*, [site web], consulté le 1 octobre 2025, <https://www.lavionnaire.fr/MotorElements.php>.
13. Le module sur la cogénération a été réalisé par l'ICEDD, Institut de Conseil et d'Études en Développement Durable asbl – © ICEDD – icedd@icedd.be
14. Institut ThermExcel. « Dimensionnement des pompes / circulateurs ». *ThermExcel* [site web], consulté le 1 octobre 2025, https://www.thermexcel.com/french/ressourc/dimensionnement_pompe_pompes_circulateur.htm.
15. ADEME – Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Énergie. *Les capteurs solaires thermiques : principes et performances*. Paris : ADEME, 2020. Disponible sur : <https://www.ademe.fr>

Référence d'article scientifique utilisée

Conclusion générale et recommandations

Millien, K. (2020). *Prototype Steam Turbine for Solar Power Production*.
<https://onlinelibrary.wiley.com/doi/pdf/10.1155/2020/4589281> [Wiley Online Library](#)

Style APA :

Millien, K. (2020). Prototype Steam Turbine for Solar Power Production. *Journal / Publisher*, (année). PDF disponible sur Wiley :
<https://onlinelibrary.wiley.com/doi/pdf/10.1155/2020/4589281>

Quelques livres utiles avec liens

1. **Duffie, J. A., & Beckman, W. A. — Solar Engineering of Thermal Processes**
 - Version PDF complète :
<https://www.sku.ac.ir/Datafiles/BookLibrary/45/John%20A.%20Duffie%2C%20William%20A.%20Beckman%28auth.%29-Solar%20Engineering%20of%20Thermal%20Processes%2C%20Fourth%20Edition%20%282013%29.pdf> sku.ac.ir
 - <https://www.eng.uc.edu/~beaucag/Classes/SolarPowerForAfrica/Solar%20Engineering%20of%20Thermal%20Processes%2C%20Photovoltaics%20and%20Wind.pdf> eng.uc.edu
2. **Kalogirou, S. — Solar Energy Engineering: Processes and Systems**
 - https://library.uniteddiversity.coop/Energy/Solar/Solar_Energy_Engineering-Processes_and_Systems.pdf library.uniteddiversity.coop
3. (Autre) **“Optimum sizing of steam turbines for concentrated solar power plants”** par A. Poullikkas et al. (2012)
 - PDF : https://www.ijee.ieefoundation.org/vol3/issue1/IJEE_02_v3n1.pdf
ijee.ieefoundation.org

Tables thermodynamiques D'eau.

Source : Van Wylen, Sonntag et Desrochers

Vapeur saturée: table de la température

Temp. °C <i>T</i>	Pres. kPa <i>P</i>	Volume massique m ³ /kg		Énergie interne kJ/kg			Enthalpie kJ/kg			Entropie kJ/kg·K		
		Liquide sat.	Vapeur sat.	Liquide sat.	Évap.	Vapeur sat.	Liquide sat.	Évap.	Vapeur sat.	Liquide sat.	Évap.	Vapeur sat.
		<i>v_f</i>	<i>v_g</i>	<i>u_f</i>	<i>u_{fg}</i>	<i>u_g</i>	<i>h_f</i>	<i>h_{fg}</i>	<i>h_g</i>	<i>s_f</i>	<i>s_{fg}</i>	<i>s_g</i>
0.01	0.6113	0.001 000	206.14	.00	2375.3	2375.3	.01	2501.3	2501.4	.0000	9.1562	9.1562
5	0.8721	0.001 000	147.12	20.97	2361.3	2382.3	20.98	2489.6	2510.6	.0761	8.9496	9.0257
10	1.2276	0.001 000	106.38	42.00	2347.2	2389.2	42.01	2477.7	2519.8	.1510	8.7498	8.9008
15	1.7051	0.001 001	77.93	62.99	2333.1	2396.1	62.99	2465.9	2528.9	.2245	8.5569	8.7814
20	2.339	0.001 002	57.79	83.95	2319.0	2402.9	83.96	2454.1	2538.1	.2966	8.3706	8.6672
25	3.169	0.001 003	43.36	104.88	2304.9	2409.8	104.89	2442.3	2547.2	.3674	8.1905	8.5580
30	4.246	0.001 004	32.89	125.78	2290.8	2416.6	125.79	2430.5	2556.3	.4369	8.0164	8.4533
35	5.628	0.001 006	25.22	146.67	2276.7	2423.4	146.68	2418.6	2565.3	.5053	7.8478	8.3531
40	7.384	0.001 008	19.52	167.56	2262.6	2430.1	167.57	2406.7	2574.3	.5725	7.6845	8.2570
45	9.593	0.001 010	15.26	188.44	2248.4	2436.8	188.45	2394.8	2583.2	.6387	7.5261	8.1648
50	12.349	0.001 012	12.03	209.32	2234.2	2443.5	209.33	2382.7	2592.1	.7038	7.3725	8.0763
55	15.758	0.001 015	9.568	230.21	2219.9	2450.1	230.23	2370.7	2600.9	.7679	7.2234	7.9913
60	19.940	0.001 017	7.671	251.11	2205.5	2456.6	251.13	2358.5	2609.6	.8312	7.0784	7.9096
65	25.03	0.001 020	6.197	272.02	2191.1	2463.1	272.06	2346.2	2618.3	.8935	6.9375	7.8310
70	31.19	0.001 023	5.042	292.95	2176.6	2469.6	292.98	2333.8	2626.8	.9549	6.8004	7.7553
75	38.58	0.001 026	4.131	313.90	2162.0	2475.9	313.93	2321.4	2635.3	1.0155	6.6669	7.6824
80	47.39	0.001 029	3.407	334.86	2147.4	2482.2	334.91	2308.8	2643.7	1.0753	6.5369	7.6122
85	57.83	0.001 033	2.828	355.84	2132.6	2488.4	355.90	2296.0	2651.9	1.1343	6.4102	7.5445
90	70.14	0.001 036	2.361	376.85	2117.7	2494.5	376.92	2283.2	2660.1	1.1925	6.2866	7.4791
95	84.55	0.001 040	1.982	397.88	2102.7	2500.6	397.96	2270.2	2668.1	1.2500	6.1659	7.4159
100	Mpa	0.101 35	1.6729	418.94	2087.6	2506.5	419.04	2257.0	2676.1	1.3069	6.0480	7.3549
105	↓	0.120 82	1.4194	440.02	2072.3	2512.4	440.15	2243.7	2683.8	1.3630	5.9328	7.2958
110		0.143 27	1.2102	461.14	2057.0	2518.1	461.30	2230.2	2691.5	1.4185	5.8202	7.2387
115		0.169 06	1.0366	482.30	2041.4	2523.7	482.48	2216.5	2699.0	1.4734	5.7100	7.1833
120		0.198 53	0.8919	503.50	2025.8	2529.3	503.71	2202.6	2706.3	1.5276	5.6020	7.1296
125		0.2321	0.7706	524.74	2009.9	2534.6	524.99	2188.5	2713.5	1.5813	5.4962	7.0775
130		0.2701	0.6685	546.02	1993.9	2539.9	546.31	2174.2	2720.5	1.6344	5.3925	7.0269
135		0.3130	0.5822	567.35	1977.7	2545.0	567.69	2159.6	2727.3	1.6870	5.2907	6.9777
140		0.3613	0.5089	588.74	1961.3	2550.0	589.13	2144.7	2733.9	1.7391	5.1908	6.9299
145		0.4154	0.4463	610.18	1944.7	2554.9	610.63	2129.6	2740.3	1.7907	5.0926	6.8833
150		0.4758	0.3928	631.68	1927.9	2559.5	632.20	2114.3	2746.5	1.8418	4.9960	6.8379
155		0.5431	0.3468	653.24	1910.8	2564.1	653.84	2098.6	2752.4	1.8925	4.9010	6.7935
160		0.6178	0.3071	674.87	1893.5	2568.4	675.55	2082.6	2758.1	1.9427	4.8075	6.7502
165		0.7005	0.2727	696.56	1876.0	2572.5	697.34	2066.2	2763.5	1.9925	4.7153	6.7078
170		0.7917	0.2428	718.33	1858.1	2576.5	719.21	2049.5	2768.7	2.0419	4.6244	6.6663
175		0.8920	0.2168	740.17	1840.0	2580.2	741.17	2032.4	2773.6	2.0909	4.5347	6.6256
180		1.0021	0.194 05	762.09	1821.6	2583.7	763.22	2015.0	2778.2	2.1396	4.4461	6.5857
185		1.1227	0.174 09	784.10	1802.9	2587.0	785.37	1997.1	2782.4	2.1879	4.3586	6.5465
190		1.2544	0.156 54	806.19	1783.8	2590.0	807.62	1978.8	2786.4	2.2359	4.2720	6.5079
195		1.3978	0.141 05	828.37	1764.4	2592.8	829.98	1960.0	2790.0	2.2835	4.1863	6.4698
200		1.5538	0.127 36	850.65	1744.7	2595.3	852.45	1940.7	2792.2	2.3309	4.1014	6.4323
205		1.7230	0.115 21	873.04	1724.5	2597.5	875.04	1921.0	2796.0	2.3780	4.0172	6.3952
210		1.9062	0.104 41	895.53	1703.9	2599.5	897.76	1900.7	2798.5	2.4248	3.9337	6.3585
215		2.104	0.094 79	918.14	1682.9	2601.1	920.62	1879.9	2800.5	2.4714	3.8507	6.3221
220		2.318	0.086 19	940.87	1661.5	2602.4	943.62	1858.5	2802.1	2.5178	3.7683	6.2861
225		2.548	0.078 49	963.73	1639.6	2603.3	966.78	1836.5	2803.3	2.5639	3.6863	6.2503
230		2.795	0.071 58	986.74	1617.2	2603.9	990.12	1813.8	2804.0	2.6099	3.6047	6.2146
235		3.060	0.065 37	1009.89	1594.2	2604.1	1013.62	1790.5	2804.2	2.6558	3.5233	6.1791
240		3.344	0.059 76	1033.21	1570.8	2604.0	1037.32	1766.5	2803.8	2.7015	3.4422	6.1437
245		3.648	0.054 71	1056.71	1546.7	2603.4	1061.23	1741.7	2803.0	2.7472	3.3612	6.1083
250		3.973	0.050 13	1080.39	1522.0	2602.4	1085.36	1716.2	2801.5	2.7927	3.2802	6.0730
255		4.319	0.045 98	1104.28	1496.7	2600.9	1109.73	1689.8	2799.5	2.8383	3.1992	6.0375
260		4.688	0.042 21	1128.39	1470.6	2599.0	1134.37	1662.5	2796.9	2.8838	3.1181	6.0019
265		5.081	0.038 77	1152.74	1443.9	2596.6	1159.28	1634.4	2793.6	2.9294	3.0368	5.9662
270		5.499	0.035 64	1177.36	1416.3	2593.7	1184.51	1605.2	2789.7	2.9751	2.9551	5.9301
275		5.942	0.032 79	1202.25	1387.9	2590.2	1210.07	1574.9	2785.0	3.0208	2.8730	5.8938
280		6.412	0.030 17	1227.46	1358.7	2586.1	1235.99	1543.6	2779.6	3.0668	2.7903	5.8571
285		6.909	0.027 77	1253.00	1328.4	2581.4	1262.31	1511.0	2773.3	3.1130	2.7070	5.8199
290		7.436	0.025 57	1278.92	1297.1	2576.0	1289.07	1477.1	2766.2	3.1594	2.6227	5.7821
295		7.993	0.023 54	1305.2	1264.7	2569.9	1316.3	1441.8	2758.1	3.2062	2.5375	5.7437
300		8.581	0.021 67	1332.0	1231.0	2563.0	1344.0	1404.9	2749.0	3.2534	2.4511	5.7045
305		9.202	0.019 948	1359.3	1195.9	2555.2	1372.4	1366.4	2738.7	3.3010	2.3633	5.6643
310		9.856	0.018 350	1387.1	1159.4	2546.4	1401.3	1326.0	2727.3	3.3493	2.2737	5.6230
315		10.547	0.016 867	1415.5	1121.1	2536.6	1431.0	1283.5	2714.5	3.3982	2.1821	5.5804
320		11.274	0.015 488	1444.6	1080.9	2525.5	1461.5	1238.6	2700.1	3.4480	2.0882	5.5362
330		12.845	0.012 996	1505.3	993.7	2498.9	1525.3	1140.6	2665.9	3.5507	1.8909	5.4417
340		14.586	0.009 638	1570.3	894.3	2464.6	1594.2	1027.9	2622.0	3.6594	1.6763	5.3357
350		16.513	0.007 740	1641.9	776.6	2418.4	1670.6	893.4	2563.9	3.7777	1.4335	5.2112
360		18.651	0.005 893	1725.2	626.3	2351.5	1760.5	720.5	2481.0	3.9147	1.1379	5.0526
370		21.03	0.004 213	1844.0	384.5	2228.5	1890.5	441.6	2332.1	4.1106	.6865	4.7971
374.14		22.09	0.003 155	2029.6	0	2029.6	2099.3	0	2099.3	4.4298	0	4.4298

Vapeur saturée : table de la pression

Pres. kPa <i>P</i>	Temp. °C <i>T</i>	Volume massique m ³ /kg		Énergie interne kJ/kg			Enthalpie kJ/kg			Entropie kJ/kg·K		
		Liquide sat. <i>v_f</i>	Vapeur sat. <i>v_g</i>	Liquide sat. <i>u_f</i>	Évap. <i>u_{fg}</i>	Vapeur sat. <i>u_g</i>	Liquide sat. <i>h_f</i>	Évap. <i>h_{fg}</i>	Vapeur sat. <i>h_g</i>	Liquide sat. <i>s_f</i>	Évap. <i>s_{fg}</i>	Vapeur sat. <i>s_g</i>
		0.6113	0.01	0.001 000	206.14	.00	2375.3	2375.3	.01	2501.3	2501.4	.0000
1.0	6.98	0.001 000	129.21	29.30	2355.7	2385.0	29.30	2484.9	2514.2	.1059	8.8697	8.9756
1.5	13.03	0.001 001	87.98	54.71	2338.6	2393.3	54.71	2470.6	2525.3	.1957	8.6322	8.8279
2.0	17.50	0.001 001	67.00	73.48	2326.0	2399.5	73.48	2460.0	2533.5	.2607	8.4629	8.7237
2.5	21.08	0.001 002	54.25	88.48	2315.9	2404.4	88.49	2451.6	2540.0	.3120	8.3311	8.6432
3.0	24.08	0.001 003	45.67	101.04	2307.5	2408.5	101.05	2444.5	2545.5	.3545	8.2231	8.5776
4.0	28.96	0.001 004	34.80	121.45	2293.7	2415.2	121.46	2432.9	2554.4	.4226	8.0520	8.4746
5.0	32.88	0.001 005	28.19	137.81	2282.7	2420.5	137.82	2423.7	2561.5	.4764	7.9187	8.3951
7.5	40.29	0.001 008	19.24	168.78	2261.7	2430.5	168.79	2406.0	2574.8	.5764	7.6750	8.2515
10	45.81	0.001 010	14.67	191.82	2246.1	2437.9	191.83	2392.8	2584.7	.6493	7.5009	8.1502
15	53.97	0.001 014	10.02	225.92	2222.8	2448.7	225.94	2373.1	2599.1	.7549	7.2536	8.0085
20	60.06	0.001 017	7.649	251.38	2205.4	2456.7	251.40	2358.3	2609.7	.8320	7.0766	7.9085
25	64.97	0.001 020	6.204	271.90	2191.2	2463.1	271.93	2346.3	2618.2	.8931	6.9383	7.8314
30	69.10	0.001 022	5.229	289.20	2179.2	2468.4	289.23	2336.1	2625.3	.9439	6.8247	7.7686
40	75.87	0.001 027	3.993	317.53	2159.5	2477.0	317.58	2319.2	2636.8	1.0259	6.6441	7.6700
50	81.33	0.001 030	3.240	340.44	2143.4	2483.9	340.49	2305.4	2645.9	1.0910	6.5029	7.5939
75	91.78	0.001 037	2.217	384.31	2112.4	2496.7	384.39	2278.6	2663.0	1.2130	6.2434	7.4564
MPa												
0.100	99.63	0.001 043	1.6940	417.36	2088.7	2506.1	417.46	2258.0	2675.5	1.3026	6.0568	7.3594
0.125	105.99	0.001 048	1.3749	444.19	2069.3	2513.5	444.32	2241.0	2685.4	1.3740	5.9104	7.2844
0.150	111.37	0.001 053	1.1593	466.94	2052.7	2519.7	467.11	2226.5	2693.6	1.4336	5.7897	7.2233
0.175	116.06	0.001 057	1.0036	486.80	2038.1	2524.9	486.99	2213.6	2700.6	1.4849	5.6868	7.1717
0.200	120.23	0.001 061	0.8857	504.49	2025.0	2529.5	504.70	2201.9	2706.7	1.5301	5.5970	7.1271
0.225	124.00	0.001 064	0.7933	520.47	2013.1	2533.6	520.72	2191.3	2712.1	1.5706	5.5173	7.0878
0.250	127.44	0.001 067	0.7187	535.10	2002.1	2537.2	535.37	2181.5	2716.9	1.6072	5.4455	7.0527
0.275	130.60	0.001 070	0.6573	548.59	1991.9	2540.5	548.89	2172.4	2721.3	1.6408	5.3801	7.0209
0.300	133.55	0.001 073	0.6058	561.15	1982.4	2543.6	561.47	2163.8	2725.3	1.6718	5.3201	6.9919
0.325	136.30	0.001 076	0.5620	572.90	1973.5	2546.4	573.25	2155.8	2729.0	1.7006	5.2646	6.9652
0.350	138.88	0.001 079	0.5243	583.95	1965.0	2548.9	584.33	2148.1	2732.4	1.7275	5.2130	6.9405
0.375	141.32	0.001 081	0.4914	594.40	1956.9	2551.3	594.81	2140.8	2735.6	1.7528	5.1647	6.9175
0.40	143.63	0.001 084	0.4625	604.31	1949.3	2553.6	604.74	2133.8	2738.6	1.7766	5.1193	6.8959
0.45	147.93	0.001 088	0.4140	622.77	1934.9	2557.6	623.25	2120.7	2743.9	1.8207	5.0359	6.8565
0.50	151.86	0.001 093	0.3749	639.68	1921.6	2561.2	640.23	2108.5	2748.7	1.8607	4.9606	6.8213
0.55	155.48	0.001 097	0.3427	655.32	1909.2	2564.5	655.93	2097.0	2753.0	1.8973	4.8920	6.7893
0.60	158.85	0.001 101	0.3157	669.90	1897.5	2567.4	670.56	2086.3	2756.8	1.9312	4.8288	6.7600
0.65	162.01	0.001 104	0.2927	683.56	1886.5	2570.1	684.28	2076.0	2760.3	1.9627	4.7703	6.7331
0.70	164.97	0.001 108	0.2729	696.44	1876.1	2572.5	697.22	2066.3	2763.5	1.9922	4.7158	6.7080
0.75	167.78	0.001 112	0.2556	708.64	1866.1	2574.7	709.47	2057.0	2766.4	2.0200	4.6647	6.6847
0.80	170.43	0.001 115	0.2404	720.22	1856.6	2576.8	721.11	2048.0	2769.1	2.0462	4.6166	6.6628
0.85	172.96	0.001 118	0.2270	731.27	1847.4	2578.7	732.22	2039.4	2771.6	2.0710	4.5711	6.6421
0.90	175.38	0.001 121	0.2150	741.83	1838.6	2580.5	742.83	2031.1	2773.9	2.0946	4.5280	6.6226
0.95	177.69	0.001 124	0.2042	751.95	1830.2	2582.1	753.02	2023.1	2776.1	2.1172	4.4869	6.6041
1.00	179.91	0.001 127	0.1944	761.68	1822.0	2583.6	762.81	2015.3	2778.1	2.1387	4.4478	6.5865
1.10	184.09	0.001 133	0.1775	780.09	1806.3	2586.4	781.34	2000.4	2781.7	2.1792	4.3744	6.5536
1.20	187.99	0.001 139	0.1633	797.29	1791.5	2588.8	798.65	1986.2	2784.8	2.2166	4.3067	6.5233
1.30	191.64	0.001 144	0.1512	813.44	1777.5	2591.0	814.93	1972.7	2787.6	2.2515	4.2438	6.4953
1.40	195.07	0.001 149	0.1408	828.70	1764.1	2592.8	830.30	1959.7	2790.0	2.2842	4.1850	6.4693
1.50	198.32	0.001 154	0.1317	843.16	1751.3	2594.5	844.89	1947.3	2792.2	2.3150	4.1298	6.4448
1.75	205.76	0.001 166	0.1134	876.46	1721.4	2597.8	878.50	1917.9	2796.4	2.3851	4.0044	6.3896
2.00	212.42	0.001 177	0.0996	906.44	1693.8	2600.3	908.79	1890.7	2799.5	2.4474	3.8935	6.3409
2.25	218.45	0.001 187	0.0887	933.83	1668.2	2602.0	936.49	1865.2	2801.7	2.5035	3.7937	6.2972
2.5	223.99	0.001 197	0.0799	959.11	1644.0	2603.1	962.11	1841.0	2803.1	2.5547	3.7028	6.2575
3.0	233.90	0.001 217	0.0668	1004.78	1599.3	2604.1	1008.42	1795.7	2804.2	2.6457	3.5412	6.1869
3.5	242.60	0.001 235	0.0570	1045.43	1558.3	2603.7	1049.75	1753.7	2803.4	2.7253	3.4000	6.1253
4	250.40	0.001 252	0.0498	1082.31	1520.0	2602.3	1087.31	1714.1	2801.4	2.7964	3.2737	6.0701
5	263.99	0.001 286	0.0394	1147.81	1449.3	2597.1	1154.23	1640.1	2794.3	2.9202	3.0532	5.9734
6	275.64	0.001 319	0.0324	1205.44	1384.3	2589.7	1213.35	1571.0	2784.3	3.0267	2.8625	5.8892
7	285.88	0.001 351	0.0273	1257.55	1323.0	2580.5	1267.00	1505.1	2772.1	3.1211	2.6922	5.8133
8	295.06	0.001 384	0.0235	1305.57	1264.2	2569.8	1316.64	1441.3	2758.0	3.2068	2.5364	5.7432
9	303.40	0.001 418	0.0204	1350.51	1207.3	2557.8	1363.26	1378.9	2742.1	3.2858	2.3915	5.6772
10	311.06	0.001 452	0.0180	1393.04	1151.4	2544.4	1407.56	1317.1	2724.7	3.3596	2.2544	5.6141
11	318.15	0.001 489	0.0159	1433.7	1096.0	2529.8	1450.1	1255.5	2705.6	3.4295	2.1233	5.5527
12	324.75	0.001 527	0.0142	1473.0	1040.7	2513.7	1491.3	1193.6	2684.9	3.4962	1.9962	5.4924
13	330.93	0.001 567	0.0127	1511.1	985.0	2496.1	1531.5	1130.7	2662.2	3.5606	1.8718	5.4323
14	336.75	0.001 611	0.0114	1548.6	928.2	2476.8	1571.1	1066.5	2637.6	3.6232	1.7485	5.3717
15	342.24	0.001 658	0.0103	1585.6	869.8	2455.5	1610.5	1000.0	2610.5	3.6848	1.6249	5.3098
16	347.44	0.001 711	0.0093	1622.7	809.0	2431.7	1650.1	930.6	2580.6	3.7461	1.4994	5.2455
17	352.37	0.001 770	0.0083	1660.2	744.8	2405.0	1690.3	856.9	2547.2	3.8079	1.3698	5.1777
18	357.06	0.001 840	0.0074	1698.9	675.4	2374.3	1732.0	777.1	2509.1	3.8715	1.2329	5.1044
19	361.54	0.001 924	0.0066	1739.9	598.1	2338.1	1776.5	688.0	2464.5	3.9388	1.0839	5.0228
20	365.81	0.002 036	0.0058	1785.6	507.5	2293.0	1826.3	583.4	2409.7	4.0139	.9130	4.9269
21	369.89	0.002 207	0.0049	1842.1	388.5	2230.6	1888.4	446.2	2334.6	4.1075	.6938	4.8013
22	373.80	0.002 742	0.0036	1961.9	125.2	2087.1	2022.2	143.4	2165.6	4.3110	.2216	4.5327
22.09	374.14	0.003 155	0.0031	2029.6	0	2029.6	2099.3	0	2099.3	4.4298	0	4.4298

Vapeur surchauffée

T	v	u	h	s	v	u	h	s	v	u	h	s
P = .010 MPa (45.81)												
Sat.	14.674	2437.9	2584.7	8.1502	3.240	2483.9	2645.9	7.5939	1.6940	2506.1	2675.5	7.3594
50	14.869	2443.9	2592.6	8.1749								
100	17.196	2515.5	2687.5	8.4479	3.418	2511.6	2682.5	7.6947	1.6958	2506.7	2676.2	7.3614
150	19.512	2587.9	2783.0	8.6882	3.889	2585.6	2780.1	7.9401	1.9364	2582.8	2776.4	7.6134
200	21.825	2661.3	2879.5	8.9038	4.356	2659.9	2877.7	8.1580	2.172	2658.1	2875.3	7.8343
250	24.136	2736.0	2977.3	9.1002	4.820	2735.0	2976.0	8.3556	2.406	2733.7	2974.3	8.0333
300	26.445	2812.1	3076.5	9.2813	5.284	2811.3	3075.5	8.5373	2.639	2810.4	3074.3	8.2158
400	31.063	2968.9	3279.6	9.6077	6.209	2968.5	3278.9	8.8642	3.103	2967.9	3278.2	8.5435
500	35.679	3132.3	3489.1	9.8978	7.134	3132.0	3488.7	9.1546	3.565	3131.6	3488.1	8.8342
600	40.295	3302.5	3705.4	10.1608	8.057	3302.2	3705.1	9.4178	4.028	3301.9	3704.7	9.0976
700	44.911	3479.6	3928.7	10.4028	8.981	3479.4	3928.5	9.6599	4.490	3479.2	3928.2	9.3398
800	49.526	3663.8	4159.0	10.6281	9.904	3663.6	4158.9	9.8852	4.952	3663.5	4158.6	9.5652
900	54.141	3855.0	4396.4	10.8396	10.828	3854.9	4396.3	10.0967	5.414	3854.8	4396.1	9.7767
1000	58.757	4053.0	4640.6	11.0393	11.751	4052.9	4640.5	10.2964	5.875	4052.8	4640.3	9.9764
1100	63.372	4257.5	4891.2	11.2287	12.674	4257.4	4891.1	10.4859	6.337	4257.3	4891.0	10.1659
1200	67.987	4467.9	5147.8	11.4091	13.597	4467.8	5147.7	10.6662	6.799	4467.7	5147.6	10.3463
1300	72.602	4683.7	5409.7	11.5811	14.521	4683.6	5409.6	10.8382	7.260	4683.5	5409.5	10.5183
P = .050 MPa (81.33)												
Sat.	14.674	2437.9	2584.7	8.1502	3.240	2483.9	2645.9	7.5939	1.6940	2506.1	2675.5	7.3594
50	14.869	2443.9	2592.6	8.1749								
100	17.196	2515.5	2687.5	8.4479	3.418	2511.6	2682.5	7.6947	1.6958	2506.7	2676.2	7.3614
150	19.512	2587.9	2783.0	8.6882	3.889	2585.6	2780.1	7.9401	1.9364	2582.8	2776.4	7.6134
200	21.825	2661.3	2879.5	8.9038	4.356	2659.9	2877.7	8.1580	2.172	2658.1	2875.3	7.8343
250	24.136	2736.0	2977.3	9.1002	4.820	2735.0	2976.0	8.3556	2.406	2733.7	2974.3	8.0333
300	26.445	2812.1	3076.5	9.2813	5.284	2811.3	3075.5	8.5373	2.639	2810.4	3074.3	8.2158
400	31.063	2968.9	3279.6	9.6077	6.209	2968.5	3278.9	8.8642	3.103	2967.9	3278.2	8.5435
500	35.679	3132.3	3489.1	9.8978	7.134	3132.0	3488.7	9.1546	3.565	3131.6	3488.1	8.8342
600	40.295	3302.5	3705.4	10.1608	8.057	3302.2	3705.1	9.4178	4.028	3301.9	3704.7	9.0976
700	44.911	3479.6	3928.7	10.4028	8.981	3479.4	3928.5	9.6599	4.490	3479.2	3928.2	9.3398
800	49.526	3663.8	4159.0	10.6281	9.904	3663.6	4158.9	9.8852	4.952	3663.5	4158.6	9.5652
900	54.141	3855.0	4396.4	10.8396	10.828	3854.9	4396.3	10.0967	5.414	3854.8	4396.1	9.7767
1000	58.757	4053.0	4640.6	11.0393	11.751	4052.9	4640.5	10.2964	5.875	4052.8	4640.3	9.9764
1100	63.372	4257.5	4891.2	11.2287	12.674	4257.4	4891.1	10.4859	6.337	4257.3	4891.0	10.1659
1200	67.987	4467.9	5147.8	11.4091	13.597	4467.8	5147.7	10.6662	6.799	4467.7	5147.6	10.3463
1300	72.602	4683.7	5409.7	11.5811	14.521	4683.6	5409.6	10.8382	7.260	4683.5	5409.5	10.5183
P = .10 MPa (99.63)												
Sat.	14.674	2437.9	2584.7	8.1502	3.240	2483.9	2645.9	7.5939	1.6940	2506.1	2675.5	7.3594
50	14.869	2443.9	2592.6	8.1749								
100	17.196	2515.5	2687.5	8.4479	3.418	2511.6	2682.5	7.6947	1.6958	2506.7	2676.2	7.3614
150	19.512	2587.9	2783.0	8.6882	3.889	2585.6	2780.1	7.9401	1.9364	2582.8	2776.4	7.6134
200	21.825	2661.3	2879.5	8.9038	4.356	2659.9	2877.7	8.1580	2.172	2658.1	2875.3	7.8343
250	24.136	2736.0	2977.3	9.1002	4.820	2735.0	2976.0	8.3556	2.406	2733.7	2974.3	8.0333
300	26.445	2812.1	3076.5	9.2813	5.284	2811.3	3075.5	8.5373	2.639	2810.4	3074.3	8.2158
400	31.063	2968.9	3279.6	9.6077	6.209	2968.5	3278.9	8.8642	3.103	2967.9	3278.2	8.5435
500	35.679	3132.3	3489.1	9.8978	7.134	3132.0	3488.7	9.1546	3.565	3131.6	3488.1	8.8342
600	40.295	3302.5	3705.4	10.1608	8.057	3302.2	3705.1	9.4178	4.028	3301.9	3704.7	9.0976
700	44.911	3479.6	3928.7	10.4028	8.981	3479.4	3928.5	9.6599	4.490	3479.2	3928.2	9.3398
800	49.526	3663.8	4159.0	10.6281	9.904	3663.6	4158.9	9.8852	4.952	3663.5	4158.6	9.5652
900	54.141	3855.0	4396.4	10.8396	10.828	3854.9	4396.3	10.0967	5.414	3854.8	4396.1	9.7767
1000	58.757	4053.0	4640.6	11.0393	11.751	4052.9	4640.5	10.2964	5.875	4052.8	4640.3	9.9764
1100	63.372	4257.5	4891.2	11.2287	12.674	4257.4	4891.1	10.4859	6.337	4257.3	4891.0	10.1659
1200	67.987	4467.9	5147.8	11.4091	13.597	4467.8	5147.7	10.6662	6.799	4467.7	5147.6	10.3463
1300	72.602	4683.7	5409.7	11.5811	14.521	4683.6	5409.6	10.8382	7.260	4683.5	5409.5	10.5183
P = .20 MPa (120.23)												
Sat.	.8857	2529.5	2706.7	7.1272	.6058	2543.6	2725.3	6.9919	.4625	2553.6	2738.6	6.8959
150	.9596	2576.9	2768.8	7.2795	.6339	2570.8	2761.0	7.0778	.4708	2564.5	2752.8	6.9299
200	1.0803	2654.4	2870.5	7.5066	.7163	2650.7	2865.6	7.3115	.5342	2646.8	2860.5	7.1706
250	1.1988	2731.2	2971.0	7.7086	.7964	2728.7	2967.6	7.5166	.5951	2726.1	2964.2	7.3789
300	1.3162	2808.6	3071.8	7.8926	.8753	2806.7	3069.3	7.7022	.6548	2804.8	3066.8	7.5662
400	1.5493	2966.7	3276.6	8.2218	1.0315	2965.6	3275.0	8.0330	.7726	2964.4	3273.4	7.8985
500	1.7814	3130.8	3487.1	8.5133	1.1867	3130.0	3486.0	8.3251	.8893	3129.2	3484.9	8.1913
600	2.013	3301.4	3704.0	8.7770	1.3414	3300.8	3703.2	8.5892	1.0055	3300.2	3702.4	8.4558
700	2.244	3478.8	3927.6	9.0194	1.4957	3478.4	3927.1	8.8319	1.1215	3477.9	3926.5	8.6987
800	2.475	3663.1	4158.2	9.2449	1.6499	3662.9	4157.8	9.0576	1.2372	3662.4	4157.3	8.9244
900	2.706	3854.5	4395.8	9.4566	1.8041	3854.2	4395.4	9.2692	1.3529	3853.9	4395.1	9.1362
1000	2.937	4052.5	4640.0	9.6563	1.9581	4052.3	4639.7	9.4690	1.4685	4052.0	4639.4	9.3360
1100	3.168	4257.0	4890.7	9.8458	2.1121	4256.8	4890.4	9.6585	1.5840	4256.5	4890.2	9.5256
1200	3.399	4467.5	5147.3	10.0262	2.2661	4467.2	5147.1	9.8389	1.6996	4467.0	5146.8	9.7060
1300	3.630	4683.2	5409.3	10.1982	2.4201	4683.0	5409.0	10.0110	1.8151	4682.8	5408.8	9.8780
P = .30 MPa (133.55)												
Sat.	.6058	2543.6	2725.3	6.9919	.4625	2553.6	2738.6	6.8959	.4708	2564.5	2752.8	6.9299
150	.6339	2570.8	2761.0	7.0778	.5342	2646.8	2860.5	7.1706	.5951	2726.1	2964.2	7.3789
200	.7163	2650.7	2865.6	7.3115	.6548	2804.8	3066.8	7.5662	.7726	2964.4	3273.4	7.8985
250	.7964	2728.7	2967.6	7.5166	.8893	3129.2	3484.9	8.1913	.8893	3129.2	3484.9	8.1913
300	.8753	2806.7	3069.3	7.7022	1.0055	3300.2	3702.4	8.4558	1.0055	3300.2	3702.4	8.4558
400	1.0315	2965.6	3275.0	8.0330	1.1215	3477.9	3926.5	8.6987	1.1215	3477.9	3926.5	8.6987
500	1.1867	3130.0	3486.0	8.3251	1.2372	3662.4	4157.3	8.9244	1.2372	3662.4	4157.3	8.9244
600	1.3414	3300.8	3703.2	8.5892	1.3529	3853.9	4395.1	9.1362	1.3529	3853.9	4395.1	9.1362
700	1.4957	3478.4	3927.1	8.8319	1.4685	4052.0	4639.4	9.3360	1.4685	4052.0	4639.4	9.3360
800	1.6499	3662.9	4157.8	9.0576	1.5840	4256.5	4890.2	9.5256	1.5840	4256.5	4890.2	9.5256
900	1.8041	3854.2	4395.4	9.2692	1.6996	4467.0	5146.8	9.7060	1.6996			