

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR



جامعة بجاية  
Tasdawit n'Bgayet  
Université de Béjaïa

ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE



جامعة بجاية  
Tasdawit n'Bgayet  
Université de Béjaïa

UNIVERSITE ABDERRAHMANE MIRA BEJAIA

FACULTE DE TECHNOLOGIE

DEPARTEMENT DE GENIE MECANIQUE

MEMOIRE

Présenté pour l'obtention du diplôme de

MASTER

Filière : Génie Mécanique

Spécialité : **Installations énergétiques et turbomachines**

Par :

**Ramdani Sofiane**

**Deflaoui Kaci**

**Génie Mécanique**

# Thème

---

**Modélisation et simulation d'une turbine à vapeur**

---

Soutenu le 03/07/2024

Devant le jury composé de:

M. Hamdi Messaoud

Président

M. M'hamdi Mohammed Salah

Rapporteur

M. Adnani Massinissa

Examineur

**Année Universitaire : 2023-2024**



## Déclaration sur l'honneur

### Engagement pour respecter les règles d'authenticité scientifique dans l'élaboration d'un travail de recherche

Arrêté ministériel n° 1082 du 27 Décembre 2020(\*)  
Fixant les règles relatives à la prévention et la lutte contre le plagiat

Je soussigné,

Nom : RAMDANI  
Prénom : Sofiane  
Matricule : 161633001300  
Spécialité et/ou Option : Installations Energétiques et turbomachines  
Département : Génie Mécanique  
Faculté : Technologie  
Année universitaire : 2023/2024

Et chargé de préparer un mémoire de (*Licence, Master, Autres à préciser*) : Master

Intitulé: Etude thermo-énergétique d'un échangeur de chaleur à plaques.

Déclare sur l'honneur, m'engager à respecter les règles scientifiques, méthodologiques, et les normes de déontologie professionnelle et de l'authenticité académique requises dans l'élaboration du projet de fin de cycle cité ci-dessus.

Fait à Béjaïa le ...../...../.....

Signature de l'intéressé

(\*) *Lu et approuvé*

.....



## Déclaration sur l'honneur

### Engagement pour respecter les règles d'authenticité scientifique dans l'élaboration d'un travail de recherche

Arrêté ministériel n° 1082 du 27 Décembre 2020(\*)

Fixant les règles relatives à la prévention et la lutte contre le plagiat

Je soussigné,

Nom : DEFLAUOI  
Prénom : Kaci  
Matricule : 191933004902  
Spécialité et/ou Option : Installations Energétiques et turbomachines  
Département : Génie Mécanique  
Faculté : Technologie  
Année universitaire : 2023/2024

Et chargé de préparer un mémoire de (*Licence, Master, Autres à préciser*) : Master

Intitulé: Etude thermo-énergétique d'un échangeur de chaleur à plaques.

Déclare sur l'honneur, m'engager à respecter les règles scientifiques, méthodologiques, et les normes de déontologie professionnelle et de l'authenticité académique requises dans l'élaboration du projet de fin de cycle cité ci-dessus.

Fait à Béjaïa le ...../...../.....

Signature de l'intéressé

(\*) *Lu et approuvé*

.....

# Remerciements

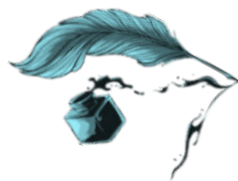
*Tout d'abord, nous tenons à remercier Allah le tout-puissant de nous avoir donné la force et le courage de mener à bien ce modeste travail.*

*Nous tenons à exprimer nos sincères remerciements à notre encadreur M. M'hamed Mohammed Salah qui nous a soutenu et guidé dans notre travail et nous a aidé à trouver des solutions pour avancer.*

*Nous remercions aussi les membres de jury qui nous ont fait l'honneur d'accepter le jugement de notre travail.*

*Nous tenons à exprimer nos sincères remerciements à toutes les professeures qui nous ont enseignés et qui par leurs compétences nous ont soutenu dans la poursuite de nos études.*

*Enfin, on remercie tous ceux qui, de près ou de loin, ont contribué à la réalisation de ce travail.*



*-R.Sofiane & D.Kaci-*

# *Dédicaces*

*Je dédie ce modeste travail :*

*A la mémoire de mon père.*

*A ma très chère mère.*

*A ma grande sœur, mon grand frère.*

*A tous mes amis.*

*A tous ceux qui m'ont aidé de près ou de loin durant  
toutes mes années d'études.*



*-R.Sofiane-*

# *Dédicaces*

*Je tiens c'est avec grande plaisir que je dédie ce modeste  
travail :*

*A l'être le plus cher de ma vie ma mère.*

*A celui qui m'a fait de moi un homme mon père.*

*A tous mes amis toute personne qui occupe une place dans  
mon cœur.*

*A tous les membres de ma famille.*



*-D.Kaci-*

# *Sommaire*

# Sommaire

---

## Remerciements

## Dédicaces

## Sommaire

Liste des tableaux

Liste des figures

Liste Nomenclature

**Introduction Générale..... 1**

### Chapitre I

#### Généralités

I.1. Introduction .....	4
I.2. Élément thermique .....	4
I.3. Les différents types d'élément thermique .....	5
I.4. Outils de modélisation d'élément thermique .....	7
I.5. Généralités sur les turbines à vapeur .....	9
I.5.1. Définition .....	9
I.5.2. Principe de fonctionnement.....	9
I.5.3. Classification des turbines à vapeur .....	10
I.5.4. Le mode de détente de la vapeur.....	10
I.5.5. Éléments constituant la turbine à vapeur .....	13
I.5.6. Configurations des turbines à vapeur .....	13
I.5.7. Domaines d'utilisation .....	14
I.5.8. Avantages et inconvénients de la turbine à vapeur .....	14
I.5.9. Installations turbine à vapeur .....	15
I.5.10. Transformations énergétiques dans une installation turbine à vapeur .....	15
I.6. Modélisation de la turbine à vapeur .....	15
I.6.1. Modèle thermodynamique de la turbine.....	17
I.6.2. Modèle linéaire.....	18
I.6.3. Modèle non linéaire.....	18
I.7. Conclusion.....	19

### Chapitre II

#### Outil de simulation numérique

II.1. Introduction.....	21
II.2. Système dynamique et simulation .....	21
II.2.1. Présentation de l'environnement de calcul et de l'outil de Simulation.....	21



## *Sommaire*

---

II.2.2. Présentation du logiciel.....	22
II.2.3. Construire un modèle.....	24
II.3. Maths Works pour la Turbine.....	27
II.4. Conclusion.....	30

### **Chapitre III**

#### **Implémentation, simulation numérique et validation**

III.1. Introduction.....	32
III.2. Exemples d'applications, simulation et validation.....	32
III.2.1. Exemple d'application « Cas 1 ».....	33
III.2.1.1. Calcul théorique.....	34
III.2.1.2. Calcul numérique (code simulation numérique).....	36
III.2.2. Exemple d'application « Cas 2 ».....	39
III.2.2.1. Calcul numérique (code simulation numérique).....	42
III.3. Recommandations et discussion.....	45
III.3.1. Exemple d'application « Cas 3 ».....	45
III.3.2. Discussion.....	48
III.4. Conclusion.....	49
<b>Conclusion Générale.....</b>	<b>50</b>
<b>Références bibliographiques.....</b>	<b>52</b>

## *Liste des tableaux*

---

### **Liste des tableaux**

<b>Tableau III.1:</b> Paramètres d'entrées .....	33
<b>Tableau III.2:</b> Paramètres de sorties .....	33
<b>Tableau III.3:</b> Propriétés thermodynamiques de l'équilibre liquide vapeur pour le palier de 5 kPa .....	39
<b>Tableau III.4:</b> Propriétés thermodynamiques de la vapeur surchauffée .....	39

## *Liste des figures*

---

### Liste des figures

<b>Figure I.1</b> : Cycle à vapeur .....	6
<b>Figure I.2</b> : Turbine à vapeur.....	9
<b>Figure I.3</b> : Turbine à action et à réaction .....	11
<b>Figure I.4</b> : Turbine à vapeur à condensation et à contre pression.....	12
<b>Figure I.5</b> : Turbine à soutirage et condensation et à soutirage et contre-pression .....	12
<b>Figure I.6</b> : Mécanisme de turbine à vapeur.....	13
<b>Figure I.7</b> : Turbine vue comme un système stockage-étranglement Adaptée .....	18
<b>Figure II.1</b> : Modèles d'interfaces de simulation.....	21
<b>Figure II.2</b> : Interface du logiciel pour accéder à l'outil de simulation .....	22
<b>Figure II.3</b> : Bibliothèques de l'outil de simulation.....	23
<b>Figure II.4</b> : Logiciel Library Browser.....	24
<b>Figure II.5</b> : Exemple pour résoudre un problème de Cauchy avec un outil de simulation .....	25
<b>Figure II.6</b> : Graphe associé au modèle construit avec scoop.....	25
<b>Figure II.7</b> : Graphe associé au modèle construit avec 'data inspector' .....	26
<b>Figure II.8</b> : Graphe de sinus avec la commande 'fplot' sous logiciel.....	26
<b>Figure II.9</b> : Schéma chemin de l'outil de simulation vers Steam Turbine and Governor. 27	
<b>Figure II.10</b> : Chemin de simulation vers Steam Turbine and Governor.....	27
<b>Figure II.11</b> : Implémentation de 'Steam Turbine and Governor' dans le modèle de simulation turbine complete. slx.....	28
<b>Figure II.12</b> : Entrée et sortie de la « Steam Turbine and Governor ».....	28
<b>Figure II.13</b> : Les composantes de « Steam Turbine and Governor » .....	29
<b>Figure II.14</b> : Composantes, entrées et sorties de la turbine à vapeur sous un outil de simulation .....	29
<b>Figure III.1</b> : Schéma de validation des sorties numériques .....	32
<b>Figure III.2</b> : Bloc de simulation pour la turbine à vapeur - cas (1) .....	36
<b>Figure III.3</b> : Schéma de simulation TAV - Cas (1) .....	36
<b>Figure III.4</b> : Pm de chaque étage Cas(1) .....	37
<b>Figure III.5</b> : Puissance mécanique de la turbine Cas(1) .....	37
<b>Figure III.6</b> : Différence d'enthalpie (delta H) Cas (1).....	38
<b>Figure III.7</b> : Rendement de la turbine cas (1).....	38
<b>Figure III.8</b> : Représentation graphique de la détente dans la turbine .....	40
<b>Figure III.9</b> : Bloc de simulation pour la turbine à vapeur - cas (2) .....	42

## *Liste des figures*

---

<b>Figure III.10</b> : Schéma de simulation TAV - Cas (2) .....	42
<b>Figure III.11</b> : Puissance mécanique de chaque étage cas (2) .....	43
<b>Figure III.12</b> : Puissance mécanique de la turbine cas (2) .....	43
<b>Figure III.13</b> : Différence d'enthalpie ( $\Delta H$ ) cas (2) .....	44
<b>Figure III.14</b> : Rendement de la turbine cas (2) .....	44
<b>Figure III.15</b> : Bloc de simulation pour la turbine à vapeur à 4 étages .....	45
<b>Figure III.16</b> : Schéma de simulation TAV à 4 étages .....	46
<b>Figure III.17</b> : Puissance mécanique de chaque étage à 4 étages .....	46
<b>Figure III.18</b> : Puissance mécanique de la turbine (4étages) .....	47
<b>Figure III.19</b> : Puissance mécanique de la turbine (5étages) .....	47
<b>Figure III.20</b> : Rendement de la turbine (4 étages) .....	47
<b>Figure III.21</b> : Rendement de la turbine (5étages) .....	48

## *Liste Nomenclature*

### Liste Nomenclature

Symbole	Définition	Unité (SI)
$m$	Masse initiale à l'intérieur du stockage	[kg]
$\dot{m}_e$	Débit massique en entrée	[kg/s]
$\dot{m}_s$	Débit massique sortie	[kg/s]
$U$	Énergie interne	[J]
$h_e$	L'enthalpie spécifique en entrée	[J/kg]
$h_s$	L'enthalpie spécifique en sortie	[J/kg]
$p$	Pression	[bar]
$\rho$	La masse volumique du fluide	[kg/m <sup>3</sup> ]
$g$	L'accélération gravitationnelle.	[m/s <sup>2</sup> ]
$Z$	L'altitude	[m]
$C$	Vitesse	[m/s]
$P_{th}$	Puissance thermodynamique	[kW]
$\Delta h$	Différence d'enthalpie	[J/kg]
$\dot{m}$	Débit massique de la vapeur	[kg/s]
$\dot{W}'$	Puissance mécanique	[kW]
$qm$	Débit massique	[kg/s]
$\dot{Q}$	Puissance calorifique	[kW]
$\dot{W}_e$	Puissance mécanique	[kW]
$\eta$	Rendement	[-]
$(\eta_{is})_D$	Rendement isentropique	[-]
$h_{2is}$	L'enthalpie isentropique	[J/kg]
$s_{2is}$	L'entropie isentropique	[kJ/kgk]
$s$	L'entropie	[kJ/kgk]
$x$	Titre en vapeur	[-]

# *Introduction Générale*

## *Introduction Générale*

---

La simulation des paramètres d'un élément thermique joue un rôle crucial dans l'ingénierie moderne, permettant aux ingénieurs et chercheurs d'analyser, de concevoir et d'optimiser divers systèmes thermiques. Ce mémoire se propose de développer une compréhension générale des éléments thermiques et de leur modélisation, en mettant l'accent sur les turbines à vapeurs en particulier, et d'illustrer l'utilisation de logicielle comme outil de modélisation et simulation.

Le premier chapitre de ce mémoire est consacré à une introduction aux éléments thermiques, en abordant quelques caractéristiques et applications pratiques. Une attention particulière sera portée aux turbines à vapeurs, en raison de leur importance dans de nombreux domaines industriels tels que la production d'énergie et les systèmes de propulsion.

Dans le deuxième chapitre, nous nous concentrerons sur l'outil de simulation, ce dernier est développé par Math Works, offre une interface graphique qui permet de modéliser (implémenter), simuler et analyser des systèmes dynamiques complexes. Nous discuterons des fonctionnalités principales de logicielle, de sa structure pour la modélisation des systèmes thermiques. Ce chapitre visera à fournir une compréhension claire sur le chemin à suivre vers le « Steam Turbine and Governor » sous l'outil de simulation et de son fonctionnement, facilitant ainsi son utilisation dans le cadre de notre étude du chapitre3 sur l'implémentation d'une turbine à vapeur sous l'outil de simulation et simulation des paramètres de cette dernière.

Le troisième et dernier chapitre vise à présenter l'implémentation et la simulation des paramètres d'une turbine à vapeur sous l'outil de simulation. Nous développerons un modèle détaillé de la turbine à vapeur à l'aide de la plateforme de Math Works, en intégrant les paramètres, et validerons ce modèle par des simulations numériques. Les résultats obtenus seront ensuite comparés avec les résultats théoriques suivant deux exemples d'applications (essai 1&2) pour évaluer la précision et l'efficacité du modèle développé. Cette validation permettra d'identifier d'éventuelles améliorations pour des applications futures sous forme de recommandation.

En conclusion, ce mémoire vise non seulement à enrichir la compréhension théorique des éléments thermiques et de leur modélisation, mais également à démontrer l'efficacité de logiciel comme outil de simulation dans ce contexte. À travers cette étude,

## *Introduction Générale*

---

nous espérons fournir un des outils de modélisation et de simulation de systèmes thermiques en générale et aux turbines à vapeur en particulier.



*Chapitre I*  
*Généralités*

## **I.1. Introduction**

Dans cette partie du mémoire, nous allons exposer quelques définitions sur les éléments thermiques ainsi que les différents types, et les outils utilisés pour leur implémentation sous logiciel et simulation des paramètres.

Nous concluons par des détails supplémentaires sur la turbine à vapeur en générale.

## **I.2. Élément thermique**

Composant ou dispositif impliqué dans le traitement ou l'utilisation de l'énergie thermique. Cela inclut typiquement des équipements tels que les chaudières, les échangeurs de chaleur, les générateurs de vapeur, les pompes de circulation d'eau chaude, les condenseurs, et autres dispositifs qui manipulent la chaleur ou la vapeur dans le système. Ces éléments sont essentiels pour générer de la vapeur à haute pression et haute température à partir d'une source d'énergie thermique, comme la combustion de combustibles fossiles ou l'utilisation de la chaleur résiduelle d'un processus industriel, afin de fournir la puissance nécessaire à la turbine à vapeur pour la production d'électricité[1].

L'énergie thermique provient du mouvement de minuscules particules à l'intérieur de toute matière. Tous les solides, liquides et gaz sont constitués de petites particules, tels les atomes et les molécules. Ces particules ont une énergie cinétique et sont en mouvement constant.

On peut observer lors d'une transformation physique ou chimique, une libération ou une consommation de chaleur ou d'énergie. On appelle cela un effet thermique[2].

Le terme 'thermique' fait référence à quelque chose causé par la chaleur ou en relation avec la température. En science, il est utilisé pour décrire un type particulier d'énergie : l'énergie thermique.

Cette forme d'énergie est générée en élevant la température des molécules et des atomes, les incitant à se déplacer à une vitesse suffisante pour interagir les uns avec les autres par collision.

### **I.3. Les différents types d'élément thermique**

#### **➤ La pompe**

C'est une machine hydraulique qui aspire et refoule un liquide (l'eau, l'huile, essence) d'un point à endroit voulu. Les pompes sont des dispositifs qui créent une différence de pression entre le condenseur et la chaudière. Sur le plan physique, la pompe convertit l'énergie mécanique de son moteur d'entraînement en énergie hydraulique. Le rôle de la pompe dans une turbine à vapeur est de [3] :

- Alimenter la chaudière en eau condensée provenant du condenseur.
- Augmenter la pression de l'eau liquide.

#### **➤ Le générateur de vapeur**

Est un élément essentiel de chaque turbine à vapeur, utilisée pour transformer l'eau en vapeur. Elle se compose essentiellement d'un grand réservoir d'eau avec des tuyaux d'entrée et de sortie, ainsi qu'un élément chauffant, fonctionnant comme une bouilloire géante. Les combustibles courants tels que le gaz, le pétrole, le bois, le charbon et les déchets municipaux sont brûlés pour chauffer l'eau. Dans les centrales nucléaires, des générateurs de vapeur sont utilisés pour convertir la chaleur de la fission nucléaire en électricité. Le rôle du générateur de vapeur est d'extraire la chaleur du combustible pour la transférer à l'eau, produisant ainsi de la vapeur selon des paramètres prédéfinis. Il constitue la source de chaleur du cycle thermodynamique, la vapeur étant ensuite utilisée par la turbine pour produire de l'énergie mécanique[4].

#### **➤ La turbine**

Après avoir été chauffée pour devenir de la vapeur, l'eau quitte la chaudière via un tuyau renforcé et se dirige vers la turbine. La turbine est composée d'un ensemble de lames disposées de manière à capturer la vapeur qui entre. La vapeur d'eau circulant dans le tuyau est sous haute pression, et lorsqu'elle pénètre dans la turbine, qui est plus spacieuse, elle se dilate pour remplir l'espace disponible. Certains générateurs ont une seule turbine, tandis que d'autres possèdent plusieurs étages de turbines de tailles différentes pour exploiter davantage l'énergie de la vapeur[5].

#### **➤ Le condenseur**

Afin d'optimiser le rendement de la turbine à vapeur, il est essentiel de réduire autant que possible la pression et la température de la vapeur en sortie. Pour cela, la vapeur sortant de la turbine est dirigée vers le condenseur, où elle est refroidie et transformée en

liquide. Le condenseur agit comme un échangeur de chaleur, avec des milliers de tubes à travers lesquels circule l'eau du circuit de refroidissement. La vapeur passe sur ces tubes et se condense au contact de ces derniers. Ensuite, l'eau du circuit de refroidissement extrait la chaleur de la vapeur.

La combinaison de ces éléments nous donne une centrale thermique qui peut produire de l'électricité. Les turbines à vapeur sont classées parmi les machines à combustion externe contrairement aux turbines à gaz qui sont des machines à combustion interne. Ces machines à combustion externe sont entraînées par la vapeur d'eau (énergie thermique) produite par des chaudières. Cette énergie thermique du fluide est transformée en énergie mécanique, qui à son tour, est convertie en énergie électrique par une génératrice[6].

Plus exactement les combustibles fossiles sont brûlés dans une chaudière au sein d'une centrale à vapeur. La combustion génère une grande quantité de chaleur qui est utilisée pour chauffer un fluide, généralement de l'eau. Cette pression résultante fait tourner la turbine à une vitesse très élevée, laquelle, via un arbre, transmet le couple à l'alternateur pour produire de l'électricité.

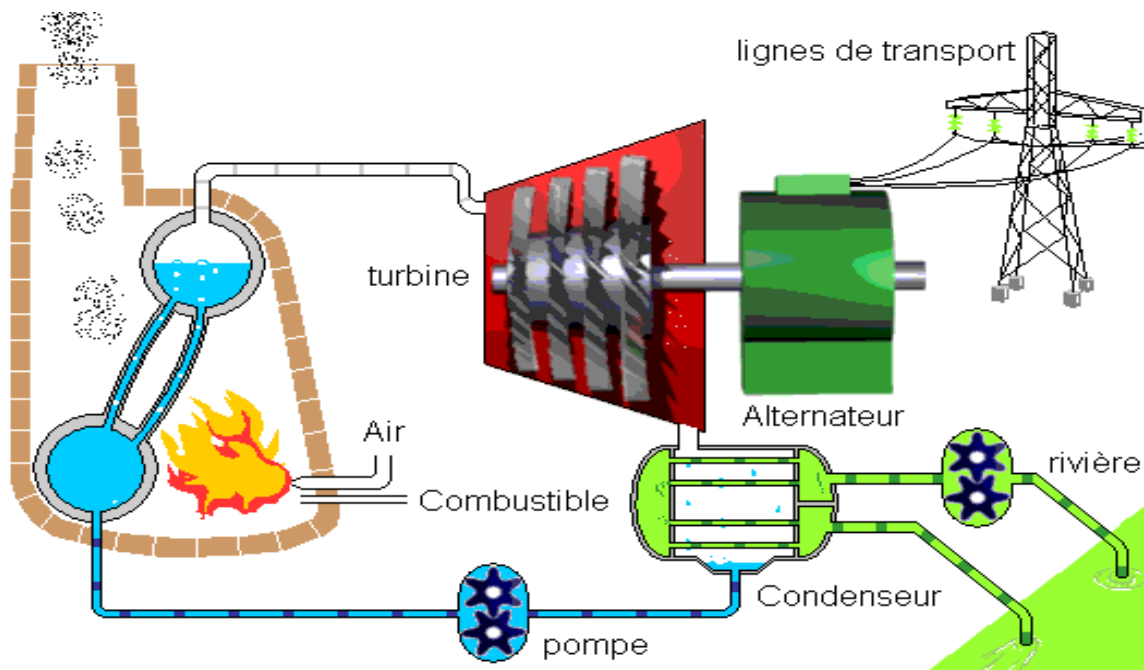


Figure I.1 : Cycle à vapeur [6]

## **I.4. Outils de modélisation d'élément thermique**

La modélisation thermique est un domaine essentiel de l'ingénierie qui permet de simuler et d'analyser le comportement thermique des systèmes, des composants et des processus. Pour ce faire, une gamme d'outils logiciels avancés est utilisée, offrant des fonctionnalités pour la création de modèles, la résolution d'équations thermiques, et la visualisation des résultats. Ces outils permettent aux ingénieurs de concevoir, d'optimiser et de valider des systèmes thermiques dans divers domaines tels que l'aérospatiale, l'automobile, l'énergie, et bien d'autres encore. En combinant des principes physiques avec des techniques de simulation numérique, les outils de modélisation thermique fournissent des informations cruciales pour améliorer l'efficacité énergétique, la durabilité et la performance des systèmes thermiques dans un large éventail d'applications[7].

### ➤ **ANSYS Fluent**

Un logiciel de simulation de fluides très utilisé pour modéliser la thermique des fluides, y compris les transferts de chaleur. ANSYS, Inc. Est un éditeur de logiciel américain spécialisé dans l'ingénierie assistée par ordinateur et la simulation numérique appliquée à la conception de produit.

### ➤ **COMSOL Multiphysics**

Un logiciel de simulation multi physique qui permet de modéliser et de résoudre des problèmes couplés de transferts thermiques, Mécaniques, électriques.

Le logiciel COMSOL Multiphysics offre une expérience et une interface utilisateur identique quels que soient les phénomènes physiques et l'application étudiée.

### ➤ **SolidWorks**

Intégré au logiciel de conception assistée par ordinateur (CAO) SolidWorks, il permet la modélisation et l'analyse thermique des pièces et assemblages.

SOLIDWORKS Simulation est un portefeuille d'outils d'analyse structurelle faciles à utiliser qui font appel à l'analyse par éléments finis (FEA) pour prédire le comportement physique réel d'un produit en testant virtuellement des modèles de CAO. Le portefeuille propose des fonctionnalités d'analyse dynamique et statique non linéaire et linéaire.

**➤ MATLAB**

Bien qu'il soit principalement un langage de programmation, il propose également des outils et des modules pour la simulation et la modélisation des systèmes thermiques.

L'intégration de systèmes virtuels permet de réduire la dépendance au hardware de prototypage, et donne la possibilité aux ingénieurs d'accéder virtuellement au système à n'importe quelle phase du cycle de développement produit. Vous pouvez utiliser Simulink pour modéliser, simuler et analyser des systèmes virtuels complexes qui comportent du hardware physique, du software embarqué, des algorithmes, ainsi que l'environnement dans lequel le système opère. Il n'existe pas d'autre outil qui puisse proposer un environnement de simulation ainsi qu'une vérification et une validation du hardware. Ces fonctions sont réunies en un seul environnement : c'est la raison pour laquelle on utilise MATLAB c'est le plus efficace.

**➤ ANSYS IcePak**

Spécialisé dans la simulation thermique des systèmes électroniques, il est utilisé pour modéliser le refroidissement des composants électroniques. Il s'agit de l'écoulement de l'air, de refroidissement ou de conception, AnsysIcepak vous permet de valider et d'optimiser vos produits dès la phase de conception.

AnsysIcepak propose des simulations réalistes dédiées à la dissipation de la chaleur des appareils électroniques, de l'alimentation électrique à la zone du capteur. Vous bénéficiez d'une visualisation complète des résultats, d'interfaces flexibles avec la simulation électrique et mécanique, et d'une modélisation détaillée.

**➤ OpenFOAM**

Un logiciel de simulation numérique basé sur la méthode des Volumes finis, adapté à la modélisation des transferts de chaleur et des fluides.

OpenFOAM (Open Field Operation and Manipulation) est une boîte à outils de simulation multi-physiques principalement axée sur la résolution des équations de la mécanique des fluides.

### ➤ Aspen Plus (HYSYS)

Il est un logiciel de simulation de procédés largement utilisé dans l'industrie chimique et pétrochimique. Il peut être utilisé pour modéliser les processus de combustion et de transfert de chaleur à l'intérieur d'une chaudière.

Ces outils offrent une gamme de fonctionnalités pour modéliser différents aspects d'une chaudière, y compris la combustion, le transfert de chaleur, le flux de fluides et la performance globale du système. En utilisant ces logiciels, les ingénieurs peuvent optimiser la conception et le fonctionnement des chaudières pour améliorer leur efficacité énergétique et leur fiabilité.

## I.5. Généralités sur les turbines à vapeur

### I.5.1. Définition

La turbine à vapeur est un moteur thermique à combustion externe fonctionnant selon le cycle thermodynamique dit Clausius-Rankine. Elle transforme l'énergie thermique de la vapeur d'eau pendant la détente en énergie mécanique de rotation d'arbre pour entraîner un dispositif mécanique tournant[5].

La turbine à vapeur est intégrée dans un système comprenant divers éléments d'une centrale thermique ou similaire. Pendant son fonctionnement le fluide moteur est généralement de l'eau, circule en continu à travers un circuit fermé.

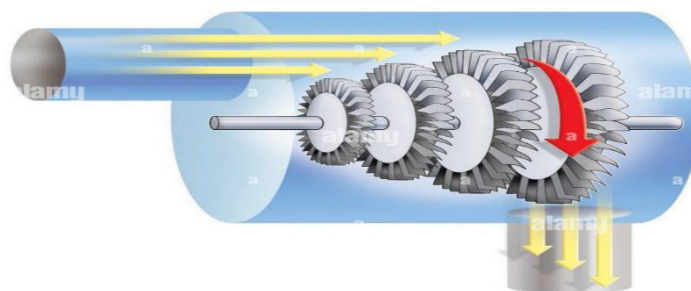


Figure I.2 : Turbine à vapeur [5]

### I.5.2. Principe de fonctionnement

Les turbines à vapeur font partie des machines à combustion externe, tandis que les turbines à gaz sont classées comme des machines à combustion interne. Les turbines à combustion externe fonctionnent en utilisant la vapeur d'eau générée par des chaudières

pour convertir l'énergie thermique du fluide en énergie mécanique. Cette énergie mécanique est ensuite transformée en énergie électrique par une génératrice[5].

Le composant central essentiel de la turbine est le rotor, sur lequel les pales sont installées. Ces pales sont cruciales pour la conversion d'énergie. Elles captent l'énergie thermique du fluide et se mettent en mouvement, transformant ainsi l'énergie thermique en énergie mécanique.

### **I.5.3. Classification des turbines à vapeur**

On peut classer les turbines à vapeur selon

- La méthode de fonctionnement de la vapeur.
- Le sens d'écoulement de la vapeur.
- La nature de fonctionnement thermodynamique.
- La méthode de transmission d'énergie thermique.
- Le mode de construction.

### **I.5.4. Le mode de détente de la vapeur**

On distingue les turbines suivantes :

#### ➤ **Turbines à action**

La détente de la vapeur s'effectue en une seule fois dans les tuyères ou les aubes fixes distributrices avant l'entrée dans la couronne d'aubes. Toute l'énergie disponible est transformée en énergie cinétique avant l'entrée dans la roue[9].

#### ➤ **Turbines à réaction**

Une partie seulement de la détente s'effectue dans les tuyères avant l'entrée dans la roue. Le reste de la détente s'effectue pendant la traversée de la couronne d'aubes. Autrement dit la détente de la vapeur s'effectue dans les canaux fixes et mobiles[9].



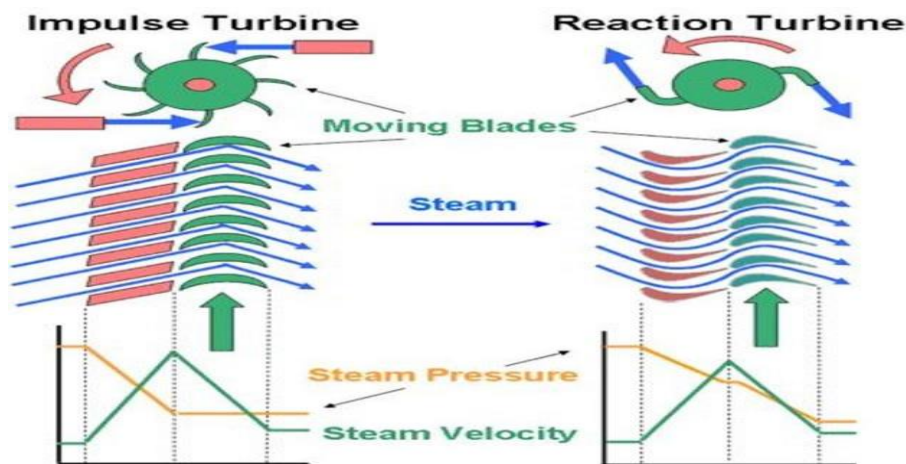


Figure I.3 : Turbine à action et à réaction [9]

### Le sens d'écoulement de la vapeur

#### ➤ Turbine axiale

Ce type est le plus utilisé où les aubes sont placées radialement sur la roue ce qui exige un déplacement de vapeur presque parallèle à l'axe de la turbine.

#### ➤ Turbine radiale

L'écoulement de la vapeur se fait dans toutes les directions perpendiculaires à l'axe de la turbine.

### La nature de fonctionnement thermodynamique

#### ➤ Turbine à condensation

Sont principalement utilisées dans les centrales thermiques. Dans ce type de turbine, on extrait le maximum d'énergie de la vapeur, car la différence d'enthalpie est significative entre l'entrée et la sortie. Pour ce faire, la vapeur d'échappement est dirigée vers un condenseur, également appelé condenseur de surface, où elle est refroidie et condensée. Ce condenseur réduit la température et la pression de la vapeur d'échappement, permettant ainsi de maximiser l'extraction d'énergie. La vapeur condensée est évacuée en passant à travers des tubes contenant de l'eau provenant du système de refroidissement[10].

#### ➤ Turbine à contre pression

Les turbines à contre-pression amplifient la vapeur vive provenant de la chaudière jusqu'à atteindre la pression requise pour le processus en cours. La pression de sortie est réglée par une vanne de régulation pour répondre aux exigences de pression de vapeur du processus. Ces turbines sont principalement utilisées dans les raffineries, les réseaux de chauffage urbain, les usines de fabrication de papier, ainsi que dans les installations de dessalement, là où des volumes importants de vapeur basse pression sont nécessaires. La

quantité d'électricité produite par une turbine à contre-pression est directement proportionnelle à la quantité de vapeur requise par le processus. [10]

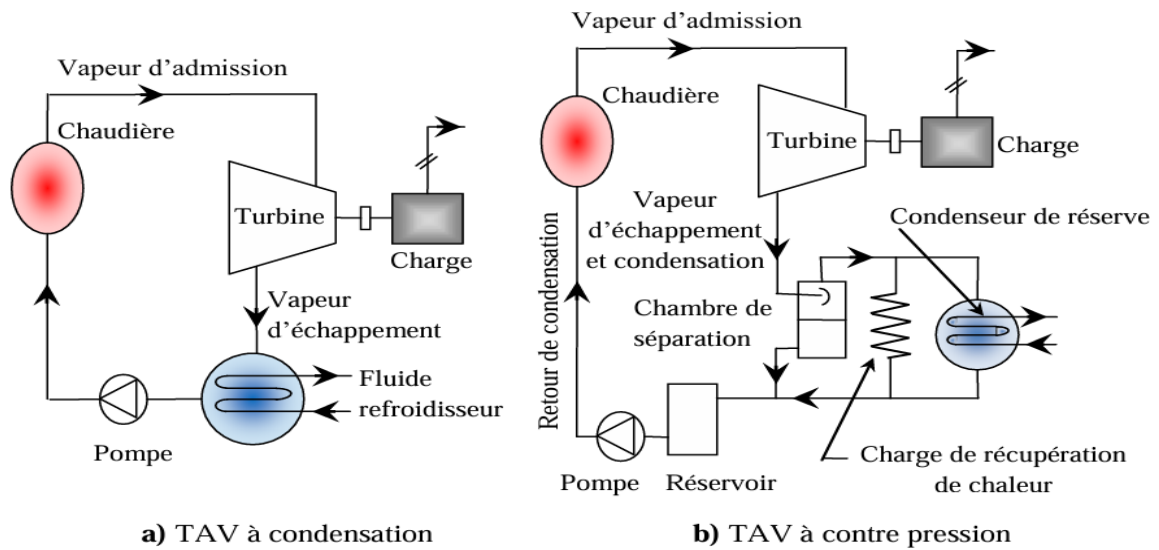


Figure I.4 : Turbine à vapeur à condensation et à contre pression [10]

➤ **Turbine à soutirage et condensation**

Dans lesquelles la vapeur subit une détente partielle jusqu'à une moyenne pression dans un corps haute pression. Ensuite une partie est dirigée vers un réseau d'utilisation, tandis que le reste de la vapeur est détendu dans un corps basse pression [10].

➤ **Turbine à soutirage et contre-pression**

La seule différence par rapport à la précédente, est que la vapeur d'eau s'échappe à basse pression dans BP au lieu d'être condensée [10].

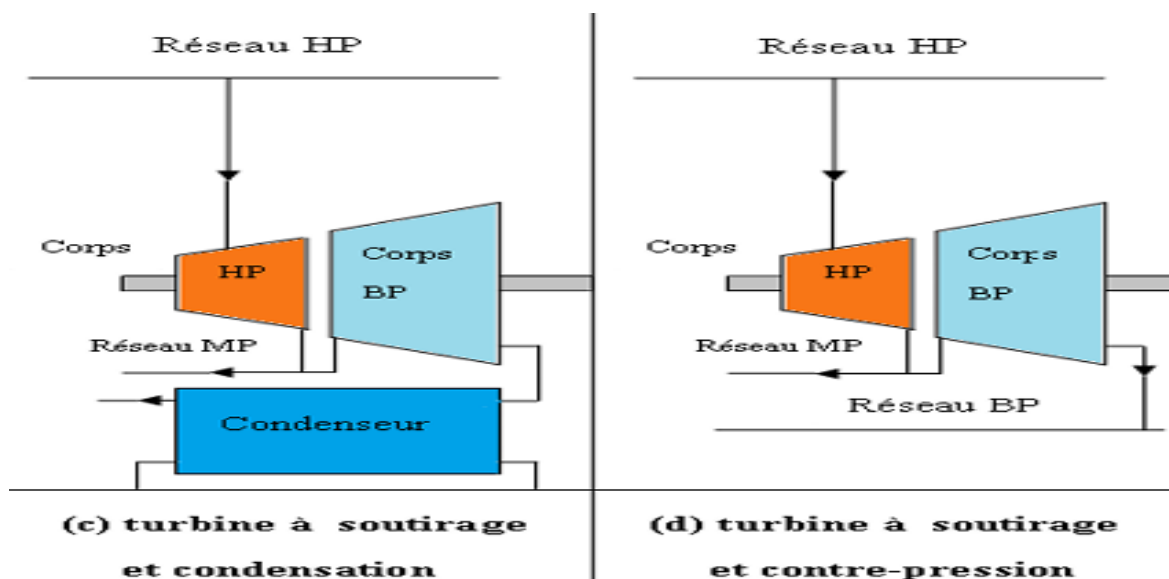


Figure I.5 : Turbine à soutirage et condensation et à soutirage et contre-pression [10]

### I.5.5. Éléments constituant la turbine à vapeur

Une turbine se compose d'un rotor comprenant un arbre sur lequel sont fixées des aubes, ainsi que d'un stator constitué d'un carter portant des déflecteurs fixes, généralement en deux parties assemblées selon un plan axial. Elle comprend également un trou d'admission segmenté et un divergent d'échappement dirigé vers le condenseur. Les déflecteurs fixes sont chargés de gérer tout ou partie de la détente en formant un réseau de tuyères et en modifiant la direction de l'écoulement issu de l'étage précédent.

De plus, elle est équipée d'un système d'huile pour le graissage des paliers, ainsi que de joints pour réduire les pertes de vapeur tout au long de son parcours. Un dispositif d'étanchéité empêche la vapeur de s'échapper à l'extérieur de la turbine.

La vitesse de rotation est contrôlée par des soupapes situées aux entrées d'admission de la machine, pilotées par des systèmes de régulation électronique ou mécanique. Une turbine à vapeur comprend un ou plusieurs étages, chacun remplissant deux fonctions principales[11].

- La détente de la vapeur, ce qui correspond à la conversion de l'énergie potentielle en énergie cinétique.
- La conversion de l'énergie cinétique en couple de rotation de la machine grâce aux aubes mobiles.

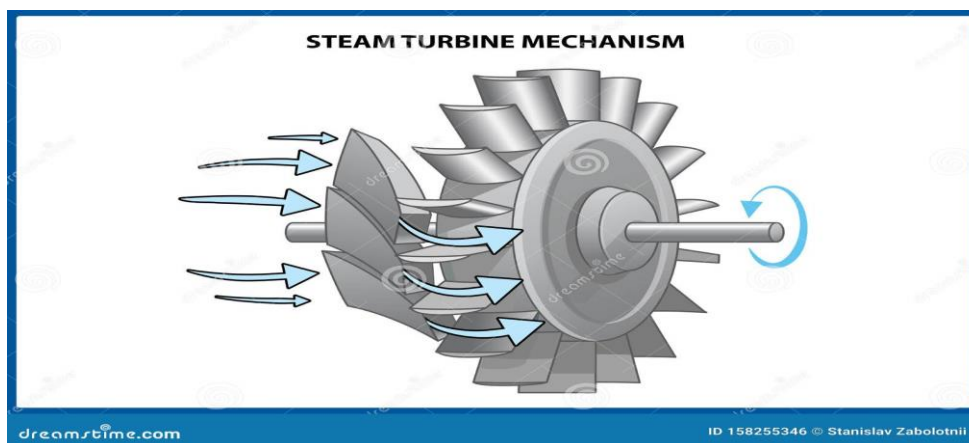


Figure I.6 : Mécanisme de turbine à vapeur [11]

### I.5.6. Configurations des turbines à vapeur

Les turbines à vapeur peuvent être configurées de façons différentes. Une turbine à vapeur peut incorporer un seul étage haute pression (HP), un seul étage haute pression et

plusieurs étages à pression intermédiaire (IP) et à faible pression (LP) ou un seul étage très haute pression (VHP). Un seul arbre ou plusieurs arbres peuvent être utilisés aussi.

Le choix de la configuration dépend du procédé où la turbine est utilisée, cogénération ou production d'électricité pure. Pour la cogénération, la pression de la vapeur est très haute lorsqu'elle est utilisée comme vapeur du procédé d'où la nécessité des sections VHP, HP, IP et LP. La pression est faible lorsque la vapeur est utilisée pour la production d'électricité, si la puissance demandée est petite on utilise juste une section HP et si elle est élevée on utilise plusieurs étages notamment HP, IP et LP[12].

### **I.5.7. Domaines d'utilisation**

Les turbines à vapeur sont utilisées dans divers domaines, notamment dans la production d'électricité à partir d'énergie thermique et pour la propulsion des bateaux. Elles sont également utilisées dans les systèmes de cogénération, où la vapeur est utilisée à la fois pour produire de la chaleur et de l'électricité. Ces turbines peuvent fonctionner en cycle combiné avec un générateur de vapeur pour récupérer la chaleur. En outre, dans les unités industrielles, elles servent à entraîner des machines, des pompes, des compresseurs et des générateurs, avec une plage de puissance nominale allant de quelques centaines de watts à plus de 1 300 MW [10].

### **I.5.8. Avantages et inconvénients de la turbine à vapeur**

#### **➤ Avantages**

- Étant un moteur thermique rotatif, la turbine à vapeur est idéale pour entraîner un générateur électrique.
- Les turbines à vapeur sont adaptées aux grandes centrales thermiques et sont fabriquées dans une gamme de tailles allant jusqu'à 1,5 GW, utilisées pour la production d'électricité.
- La turbine se déplace dans une direction unique, réduisant ainsi les vibrations.
- Elles offrent une fiabilité accrue, surtout dans les applications nécessitant une puissance élevée et continue.
- Leur coût initial est inférieur à celui d'autres types de centrales.
- Les centrales thermiques à vapeur sont capables de répondre efficacement à la demande de charge et de soutenir les performances du réseau électrique.

**➤ Inconvénients**

- Leur démarrage est plus long que celui des turbines à gaz.
- Elles sont moins sensibles aux fluctuations de la demande de puissance.
- Le coût de leur fonctionnement nocturne est relativement élevé.
- La maintenance des centrales à vapeur est complexe.

**I.5.9. Installations turbine à vapeur**

La plupart des centrales à turbine à vapeur visent à produire de l'électricité en utilisant un groupe turbo-alternateur. Pour obtenir l'énergie rotative nécessaire au turbo, plusieurs composants sont essentiels. Ils transforment l'énergie contenue dans la vapeur surchauffée en énergie mécanique.

- La chaudière chauffe l'eau pour la vaporiser (état 2-3). La vapeur est ensuite dirigée vers une turbine.
- Dans la turbine, la vapeur se détend de haute à basse pression (3-4), fournissant ainsi un travail moteur sur l'arbre qui alimente généralement un alternateur.
- Après la détente, la vapeur passe par un condenseur où elle se liquéfie (4-1), en échangeant de la chaleur avec un fluide froid, comme de l'eau de cours d'eau.
- Elle est ensuite pompée à haute pression (1-2) pour retourner au générateur de vapeur.

C'est le processus de production d'électricité à partir de la vapeur dans une installation à turbine [11].

**I.5.10. Transformations énergétiques dans une installation turbine à vapeur**

Avant d'expliquer le fonctionnement de la centrale, il est important de rappeler les trois transformations énergétiques qui ont contribué à la production d'électricité[11].

- Transformation de l'énergie contenue à l'état latent dans le combustible (énergie Chimique) en énergie thermique. (Chaudière)
- Transformation de l'énergie thermique en énergie mécanique. (Turbine)
- Transformation de l'énergie mécanique en énergie électrique. (Alternateur)

**I.6. Modélisation de la turbine à vapeur**

Les turbines à vapeur sont indispensables dans les centrales électriques, propulsant des générateurs qui convertissent leur mouvement en électricité. Elles fonctionnent grâce à

la vapeur produite par des chaudières. Cette vapeur, à haute pression et haute température est transformée en énergie mécanique rotative par la turbine.

La turbine comprend plusieurs étages avec des pales fixes et mobiles. Les pales fixes convertissent l'énergie potentielle de la vapeur (température et pression) en énergie cinétique (vitesse). Les pales mobiles ont une forme aérodynamique : lorsque la vapeur passe à travers, elle crée une pression basse sous l'aile et haute au-dessus, générant une force de rotation sur l'arbre de la turbine. Cet arbre est connecté à un générateur produisant de l'électricité.

Dans les grandes centrales, la turbine à vapeur est segmentée en trois sections selon la pression de la vapeur : haute pression (HP), pression intermédiaire (IP), et basse pression (LP). Après la section HP, la vapeur est renvoyée à la chaudière pour être réchauffée (au réchauffeur), améliorant ainsi l'efficacité. Elle passe ensuite par les sections IP et LP avant d'atteindre les conditions nécessaires pour être dirigée vers le condenseur [13].

La production d'électricité par une turbine à vapeur repose sur le "Cycle de Rankine", où la vapeur, initialement à haute pression et haute température, se dilate à travers la turbine vers des conditions de basse pression et basse température.

Pour modéliser une turbine à vapeur sous Simulink de manière détaillée, il est essentiel d'utiliser les équations fondamentales de la thermodynamique et de la mécanique des fluides. Voici les principales équations détaillées utilisées dans la modélisation d'une turbine à vapeur :

L'équation de continuité assure la conservation de la masse dans la turbine :

$$m(t) = m_0 + \int_0^t (\dot{m}_e(\tau) - \dot{m}_s(\tau)) d\tau \quad (\text{I.1})$$

Où  $\dot{m}_e$ ,  $\dot{m}_s$ ,  $m_0$  représentent respectivement le débit massique en entrée et en sortie du stockage et la masse initiale à l'intérieur du stockage.

Équation de Conservation de l'Énergie (Premier Principe de la Thermodynamique)  
L'équation de conservation de l'énergie pour une turbine à vapeur, qui est un système ouvert, est donnée par :

$$U(t) = U_0 + \int_0^t (Q(\tau) + \dot{m}_e(\tau)h_e(\tau) - \dot{m}_s(\tau)h_s(\tau))d\tau \quad (\text{I.2})$$

Où  $h_e, h_s$  représente respectivement l'enthalpie spécifique en entrée et en sortie du stockage, ici la pression, la température et l'enthalpie sont calculées à partir des bilans de masse et d'énergie

Équation de Bernoulli pour l'écoulement de la vapeur l'équation de Bernoulli peut être utilisée pour décrire l'écoulement de la vapeur à travers les aubes de la turbine et le débit massique à travers une conduite :

$$p_a + \frac{1}{2}\rho c_a^2 + \rho g z_a = p_b + \frac{1}{2}\rho c_b^2 + \rho g z_b \quad (\text{I.3})$$

Ou  $p, c, z, \rho, g$  représentent respectivement la pression, la vitesse, l'altitude, la masse volumique du fluide et l'accélération gravitationnelle.

Équation de Rendement Isentropique de la Turbine, mesure l'efficacité avec laquelle la turbine convertit l'énergie thermique en énergie mécanique :

$$(\eta_{is})_D = \frac{h_e - h_s}{h_s - h_{s_{ts}}} \quad (\text{I.4})$$

La puissance thermodynamique  $P_{th}$  à la sortie de la turbine est calculée à partir du travail du fluide. Elle est liée au débit massique de la vapeur  $\dot{m}$  et à la différence d'enthalpie  $\Delta h$ .

$$P_{th} = \Delta h \times \dot{m} \quad (\text{I.5})$$

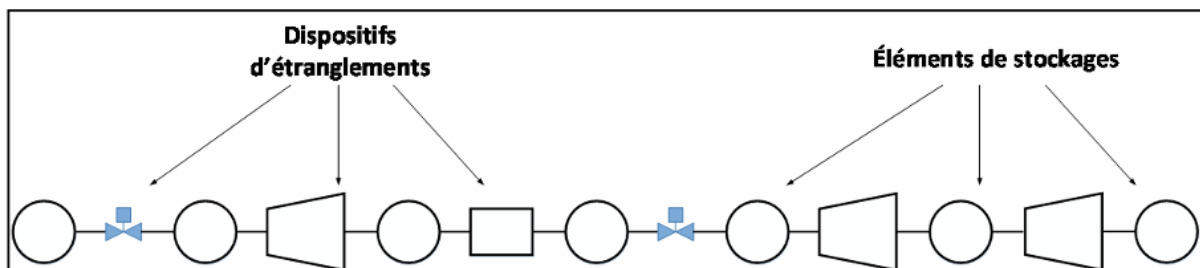
### I.6.1. Modèle thermodynamique de la turbine

Lors de la modélisation d'un système complexe, il est essentiel de garder à l'esprit l'objectif du modèle. Dans notre étude, le modèle est conçu pour représenter de manière réaliste le régime thermodynamique transitoire de la turbine à vapeur. Pour la simulation des algorithmes de commande, le régime transitoire thermodynamique de la turbine a un impact négligeable sur les variables de sortie du système. Ainsi, cette section présente un modèle linéaire utilisé pour valider les algorithmes de commande, ainsi qu'un modèle non linéaire plus adapté pour les besoins des constructeurs de turbines à vapeur.

Pour simplifier la modélisation thermodynamique de la turbine à vapeur, elle est conceptualisée comme un système de stockage-étranglement. Cela signifie que le volume

interne de la turbine est segmenté en plusieurs compartiments de stockage de vapeur, reliés entre eux par des dispositifs d'étranglement. Ainsi, les conduites, vannes et sections de la turbine sont considérés comme des points d'étranglement, où les volumes associés représentent les capacités de stockage respectives.

Ce principe général est représenté à la figure suivante :



**Figure I.7 :** Turbine vue comme un système stockage-étranglement Adaptée [13]

Cette approche de modélisation est très utile, car elle permet de modéliser les différentes configurations de turbine à vapeur.

### I.6.2. Modèle linéaire

Le modèle linéaire ne considère pas le changement de température ce qui rend le modèle fonctionnel juste autour des points de fonctionnement choisis. Le changement de température implique un changement des autres propriétés de la vapeur surchauffée et mène à un modèle non-linéaire lorsque considéré.

### I.6.3. Modèle non linéaire

Le modèle linéaire capture la dynamique de la vapeur à travers les vannes et les sections de la turbine, mais il néglige les variations de température et de pression. En conséquence, il n'est pas capable de représenter fidèlement le régime thermodynamique transitoire de la turbine. Ainsi, un modèle exhaustif, capable de décrire précisément la thermodynamique à l'intérieur de la turbine sur toute la plage des points de fonctionnement, est nécessaire. À ma connaissance, le seul modèle dans la littérature qui décrit avec précision le régime thermodynamique transitoire de la turbine à vapeur [13].

La modélisation est divisée en deux parties, une modélisation dynamique et une modélisation statique.



Les équations qui régissent la modélisation dynamique proviennent principalement d'un bilan de masse et d'un bilan d'énergie. La modélisation statique concerne les états stationnaires de la vapeur, tels que le calcul des débits massique, des pressions, des températures et des enthalpies.

### **I.7. Conclusion**

En conclusion, ce chapitre a posé les bases essentielles sur les éléments thermiques, leur modélisation et l'utilisation d'outils de simulation. Nous avons également exploré quelques détails sur les principes fondamentaux de la turbine à vapeur.

*Chapitre II*  
*Outíl de simulation numérique*

## II.1. Introduction

L’outil de simulation est un outil utile pour la modélisation et la simulation de divers systèmes. Dans cette section, nous allons définir logiciel, un composant essentiel de Matlab, ainsi que les étapes pour son fonctionnement. Nous illustrerons cela à travers un exemple simple : la résolution graphique d’une équation du premier ordre et la validation des résultats obtenus. Enfin, nous expliquerons comment modéliser une turbine sous l’outil de simulation en utilisant la bibliothèque « Machine », conformément aux directives fournies par Math Works.

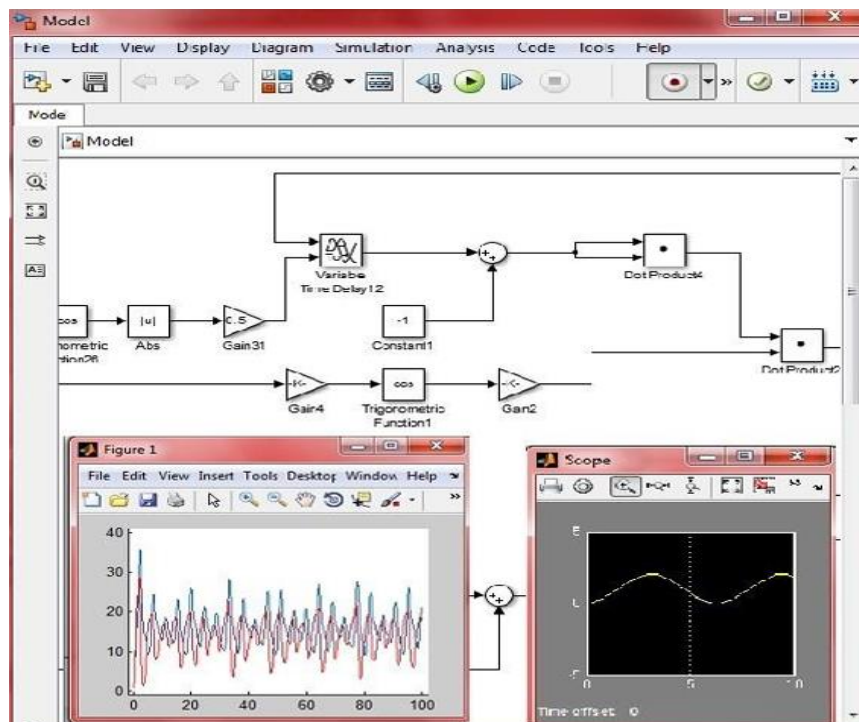


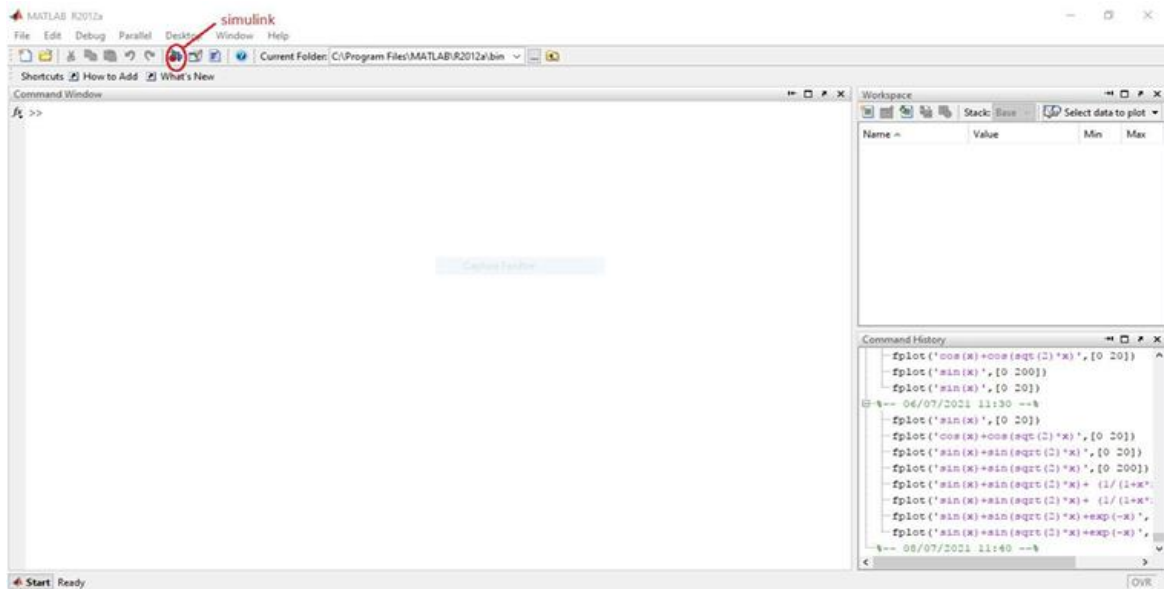
Figure II.1 : Modèles d'interfaces de simulation [14]

## II.2. Système dynamique et simulation

### II.2.1. Présentation de l'environnement de calcul et de l'outil de Simulation

Afin de résoudre les différents problèmes scientifiques et techniques, des millions d’ingénieurs et de scientifiques partout dans le monde ont opté pour MATLAB tout en le considérant le logiciel le plus accessible et le plus productif. MATLAB est un langage de haut niveau pour le calcul scientifique et technique, Il permet d’analyser et concevoir de différents systèmes et de résoudre des problèmes de calcul très complexes d’une façon simple et rapide comparée aux langages de programmation traditionnels. Il est utilisé dans les domaines de l’apprentissage automatique, en industrie, en finance, la géométrie

algorithmique, la robotique et bien plus. Grâce à sa vaste bibliothèque de boîtes à outils prédéfinies et aux graphiques intégrés, la visualisation des données nous permet de dégager des informations facilement. L'interface de MATLAB est présentée dans la figure II. 2 [14].



**Figure II.2 :** Interface du logiciel pour accéder à l'outil de simulation [14]

### II.2.2. Présentation du logiciel

Logiciel est un en environnement de diagramme fonctionnel destiné à la simulation multi-domaine et à l'approche de conception par modélisation. Il prend en charge la conception et la simulation, la génération automatique de code, ainsi que le test et la vérification des systèmes étudiés.

Logiciel propose un éditeur graphique, un ensemble personnalisable de bibliothèques de blocs et des solveurs pour la modélisation et la simulation des systèmes dynamiques. Il est intégré à MATLAB, ce qui nous permet d'incorporer les algorithmes MATLAB les modèles et d'exporter le résultat des simulations vers MATLAB pour compléter les analyses [14].

#### ➤ Les principales fonctionnalités sont :

- Éditeur graphique pour la création et la gestion de diagrammes fonctionnels hiérarchiques.
- Moteur de simulation avec des solveurs ODE à pas fixes ou variables.
- Scopes et affichage de données pour la consultation du résultat de la simulation.

- Outils de gestion de données et de projets pour les données et fichiers des modèles.

➤ **Les librairies**

Les librairies sont des ensembles de blocs répartis selon la catégorie de fonctions réalisées. Parmi ces librairies, nous trouvons, entre autres, les plus utilisées :

- Sources : Générateurs de signaux, lecture dans fichiers de données.
- Sinks : Blocs d’affichage, enregistrement dans fichiers de données.
- Math operations : Opérations mathématiques.
- Signal Routing : Routage des fils de liaison entre blocs.
- Additional Math & Discrete : Blocs additionnels d’opérations mathématiques et de systèmes discrets.
- Logic and Bit Operations Blocs d’opérations logiques et binaires.

On présente l’ensemble des librairies sur la figure (II. 3) :

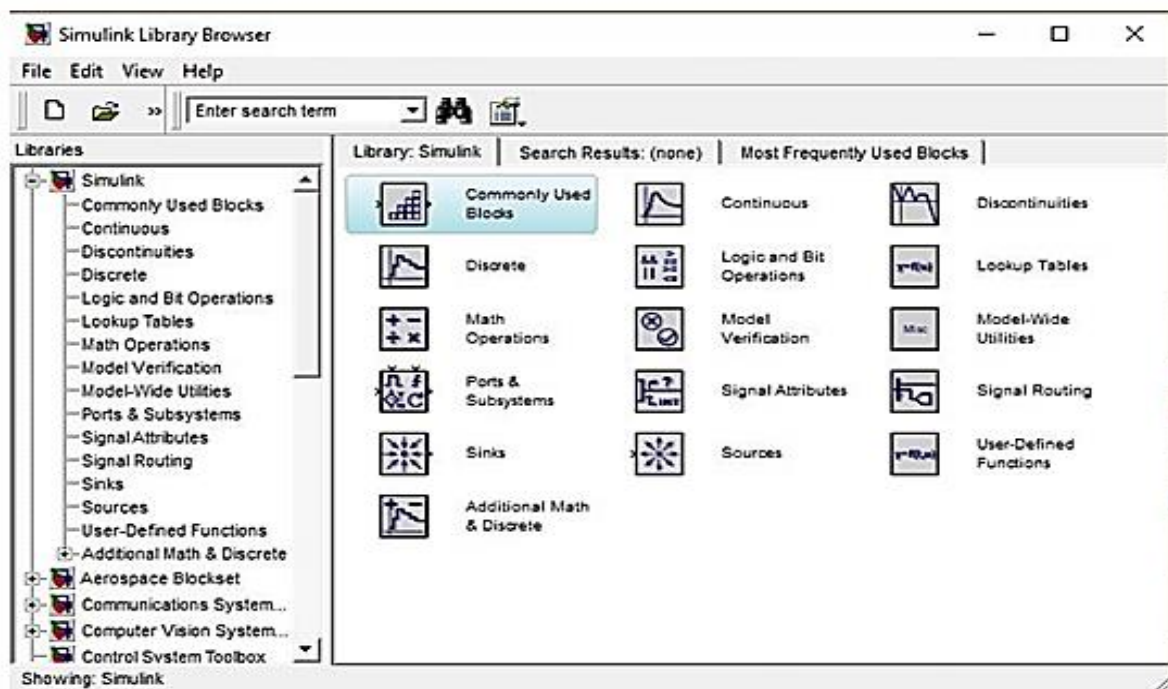


Figure II.3 : Bibliothèques de l’outil de simulation [14]

L’intérêt principale de l’outil de simulation réside dans la possibilité de travailler directement sur le schéma-bloc en lieu et place des équations mathématiques d’un système.

➤ **Remarque**

L’outil de simulation communique parfaitement avec MATLAB dont il profite de toutes les fonctionnalités. Il est possible par exemple de recueillir la réponse d’un modèle et de la visualiser dans MATLAB pour l’analyser et tirer des informations

**II.2.3. Construire un modèle**

L’outil de simulation manipule des blocs fonctionnels disponibles dans des bibliothèques spécialisées, et qu’on copie dans une fenêtre d’édition en les reliant selon le schéma bloc pour représenter le système à étudier. Pour cela il faut :

Ouvrir une session de logiciel

- Aller sur MATLAB et cliquer sur l’icône Simulink de la barre des tâches (ou taper Simulink puis entrer dans la fenêtre commande de MATLAB). Cette action ouvre la fenêtre : Simulink Library Browser (voir figure II. 3)
- Ouvrir une fenêtre d’édition, en cliquant sur file » New » Model

Ou bien à partir du clavier en cliquant sur CTRL + N

Commencer la construction du modèle

Ouvrir une bibliothèque, par exemple (Maths opérations), ensuite on fait glisser le bloc choisi à l’aide de la souris et le déposer là on veut sur la fenêtre créée, ou bien en cliquant sur le bouton droit de la souris sur le bloc et choisir (add to model) expliqué sur la figure (II. 4) [14].

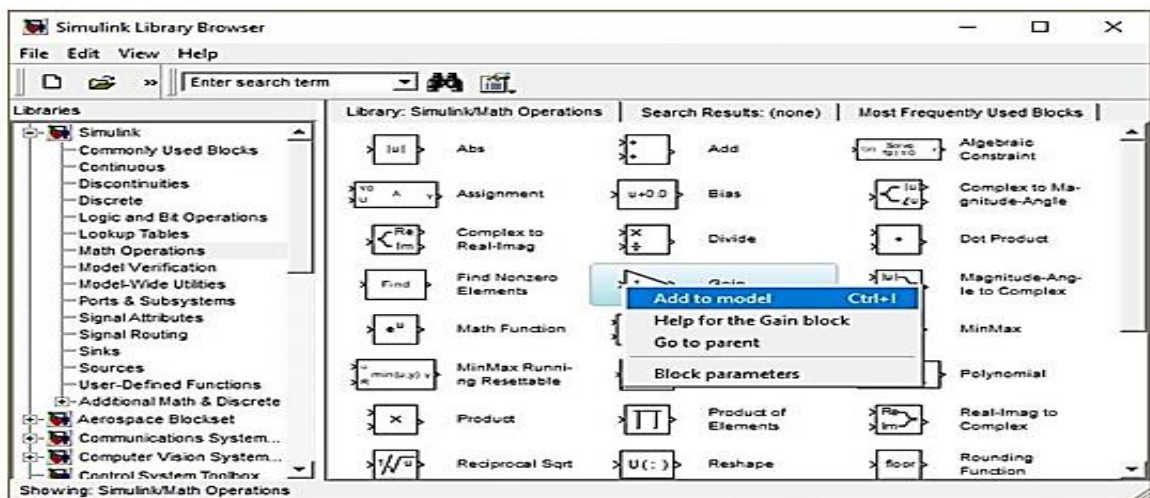


Figure II.4 : Logiciel Library Browser [14]

On peut modifier ce qui est à l'intérieur du bloc selon nos besoins.

Une fois on a ramené tous les blocs souhaités, on relie entre eux en utilisant la souris.

Voici un exemple dans la figure (II. 5) :

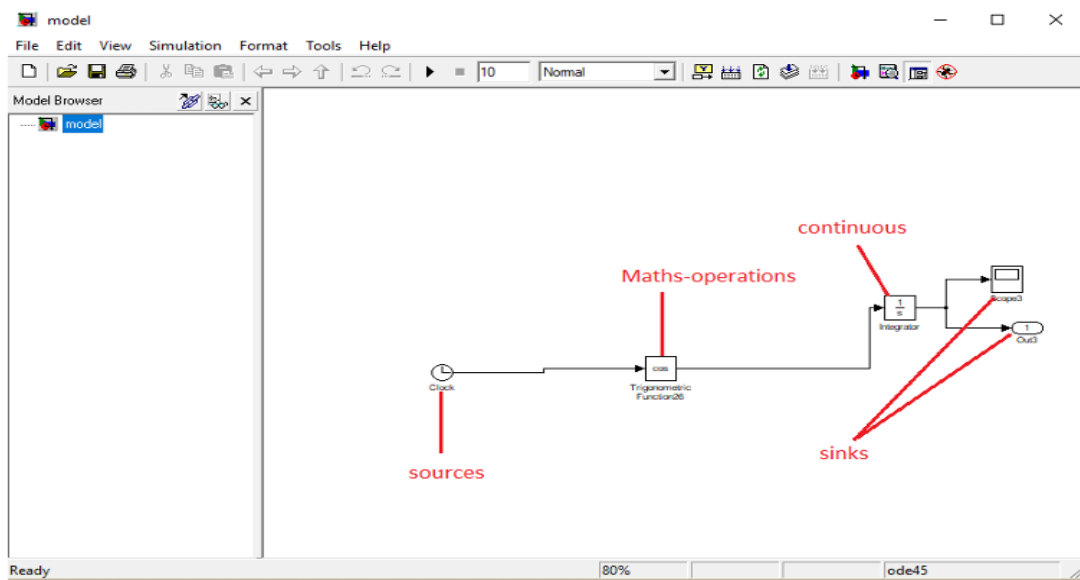


Figure II.5 : Exemple pour résoudre un problème de Cauchy avec un outil de simulation[14]

Pour afficher le graphe associé à notre modèle, il y'a deux différentes méthodes : Soit on fait double clique sur le bloc (scoop) et on obtient le graphe présenté dans la figure (II. 6) suivante :

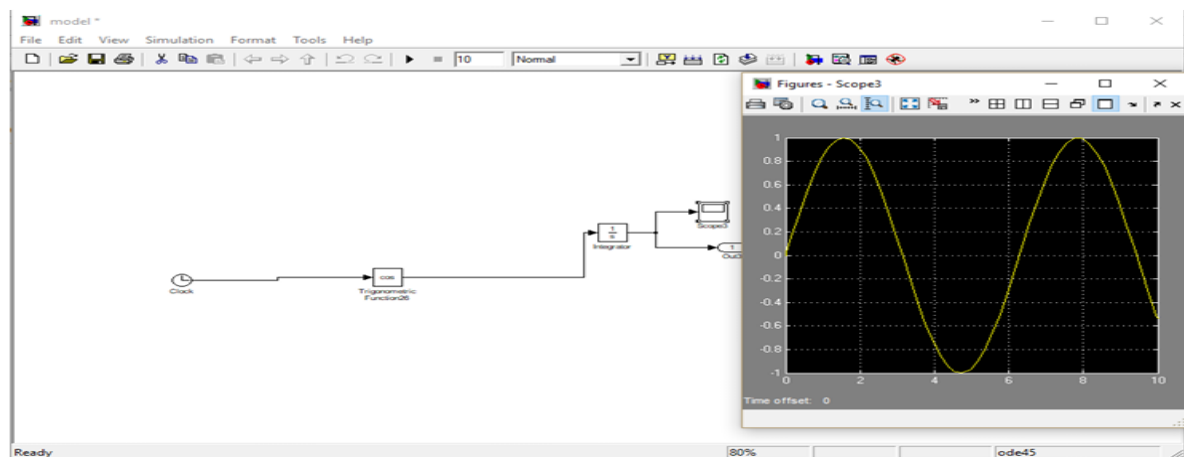


Figure II.6 : Graphe associé au modèle construit avec scoop [14]

Soit en suivant une autre méthode qui nous fournit plus d'options (nommer les axes, saisir un titre pour la figure ...) tout en cliquant sur le bouton « Run » de l'exécution, il nous affiche un lien « Simulation Data Inspector », en clique dessus, ça nous mène directement à la fenêtre des graphes dans la figure (II. 7) [14] :

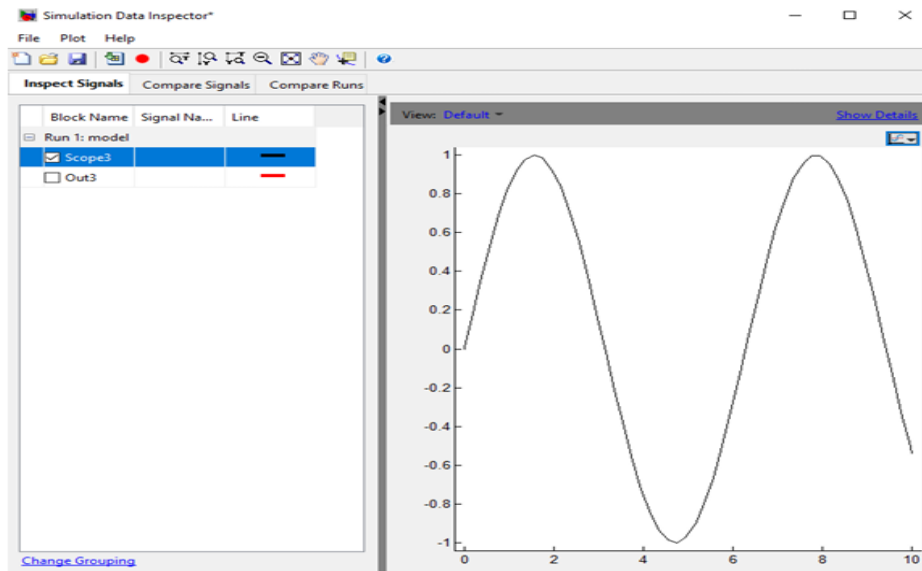


Figure II.7 : Graphe associé au modèle construit avec 'data inspector' [14]

Pour confirmer que le graphe associé au modèle construit est bien notre solution en utilisant la commande `fplot` sur MATLAB et on obtient le graphe présenté dans la figure (II. 8)

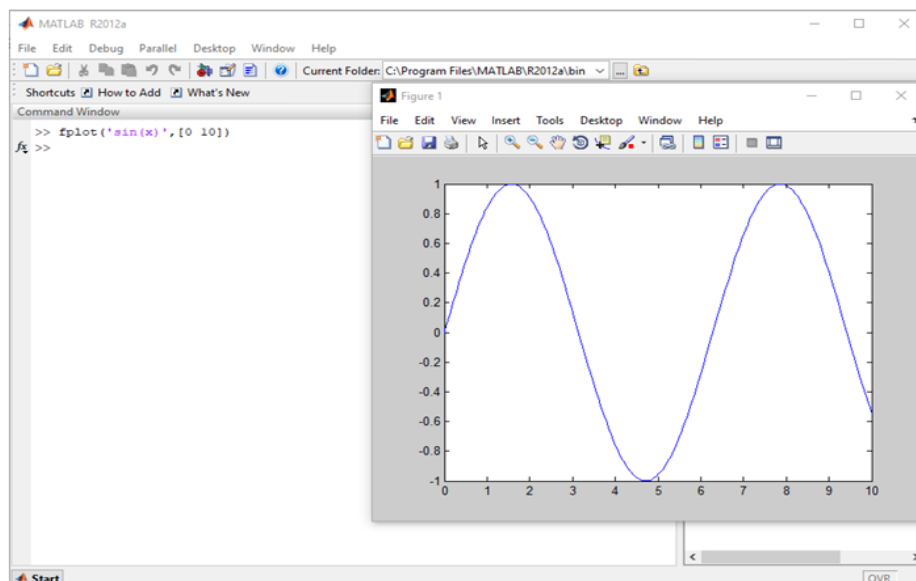


Figure II.8 : Graphe de sinus avec la commande 'fplot' sous logiciel [14]



### II.3. Maths Works pour la Turbine

Dans cette sous-partie, nous allons indiquer la procédure sous Simulink pour ouvrir le modèle complet de la turbine à vapeur appelé « Steam Turbine and Governor ». Le chemin d'accès à ce modèle est le suivant :

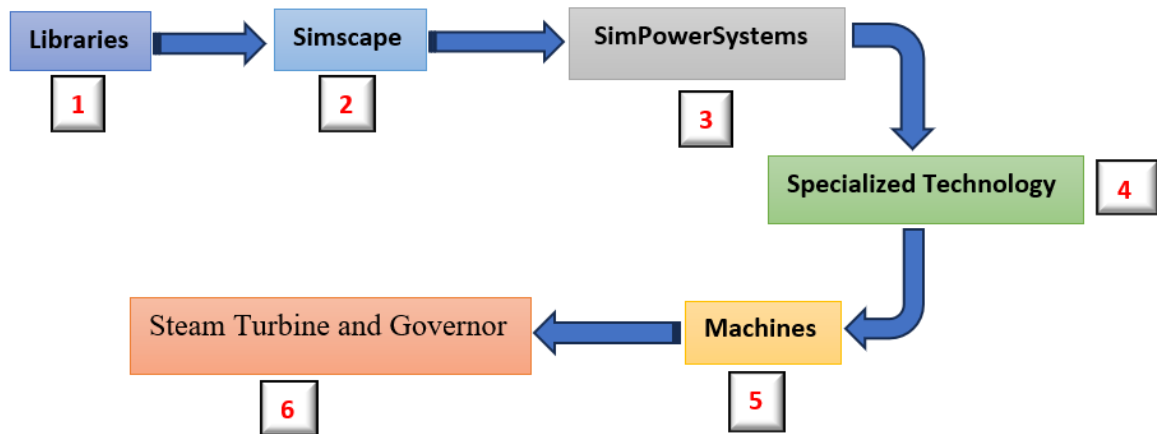


Figure II.9 : Schéma chemin de l'outil de simulation vers Steam Turbine and Governor

[15]

En suivant le chemin indiqué précédemment, nous accéderons à la bibliothèque nommée « Machine ». À l'intérieur de cette bibliothèque, nous sélectionnerons notre modèle de l'outil de simulation « Steam Turbine and Governor », comme illustré dans la figure (II. 10) [15].

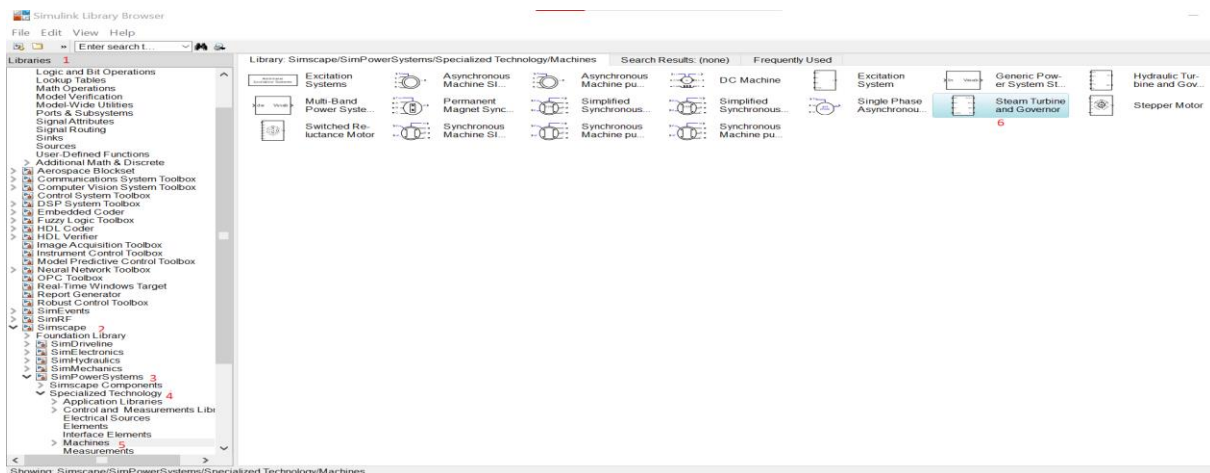
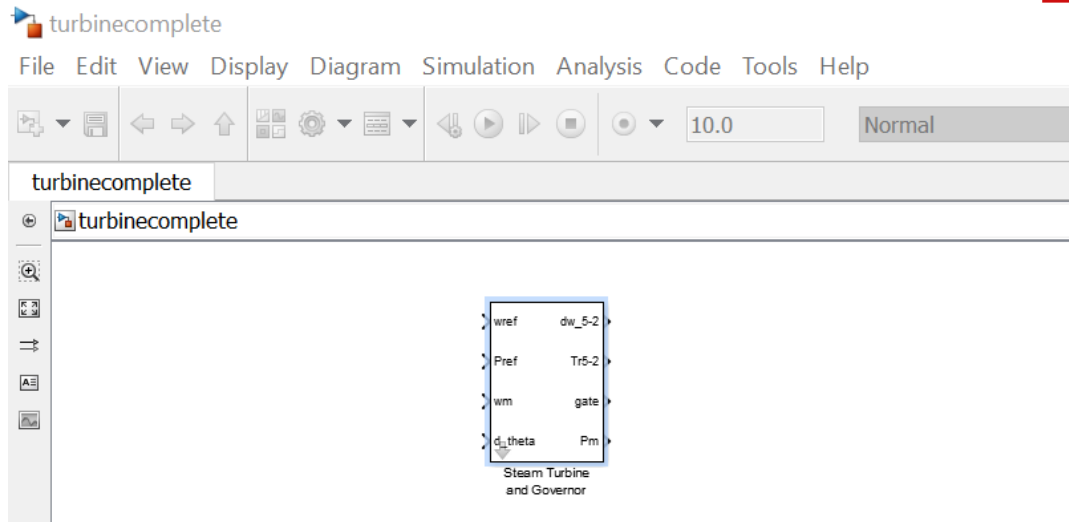


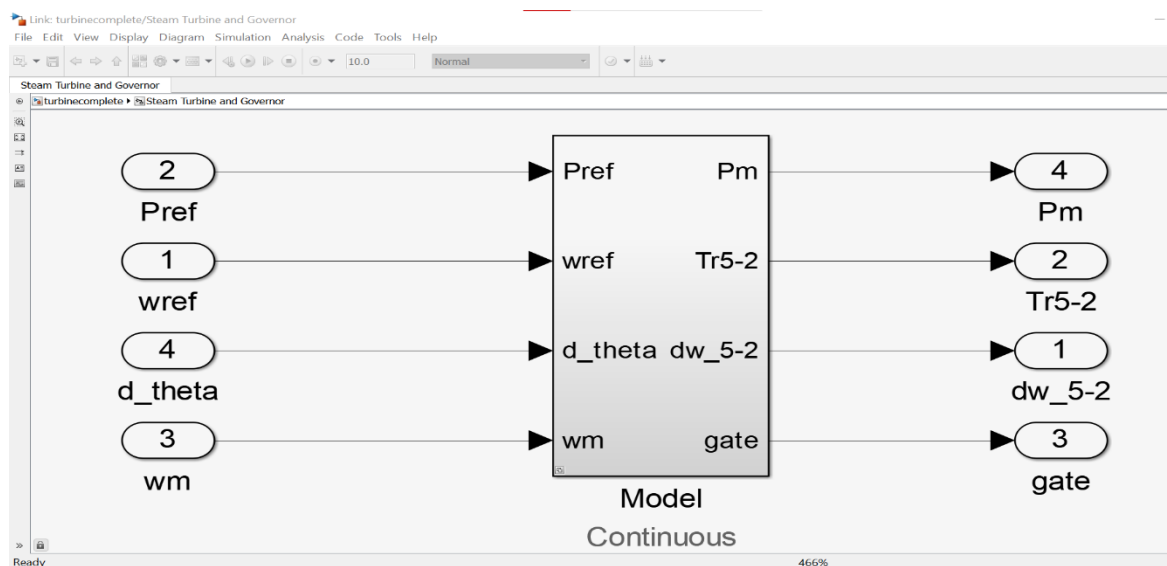
Figure II.10 : Chemin de simulation vers Steam Turbine and Governor[15]

Après avoir créé un nouveau modèle (.slx) nommé « turbinecomplete » et ajouté celui-ci à notre modèle en faisant un clic droit sur « Steam Turbine and Governor » puis en sélectionnant « Add to a new model », voici le résultat obtenu dans la figure (II. 11) [15].



**Figure II.11 :** Implémentation de 'Steam Turbine and Governor' dans le modèle de simulation turbine complete. slx [15]

Pour explorer le contenu du bloc « Steam Turbine and Governor », cliquez sur la petite flèche située en bas à gauche de la boîte « Steam Turbine and Governor ». Cela permet d’ouvrir le bloc et de visualiser ses composants, comme illustré dans la figure (II. 12) [15].



**Figure II.12 :** Entrée et sortie de la « Steam Turbine and Governor »[15]

Un double clic sur « Model Continuous » indiqué dans la figure au-dessus, nous allons visualiser le contenu de cette dernière comme suit [15].

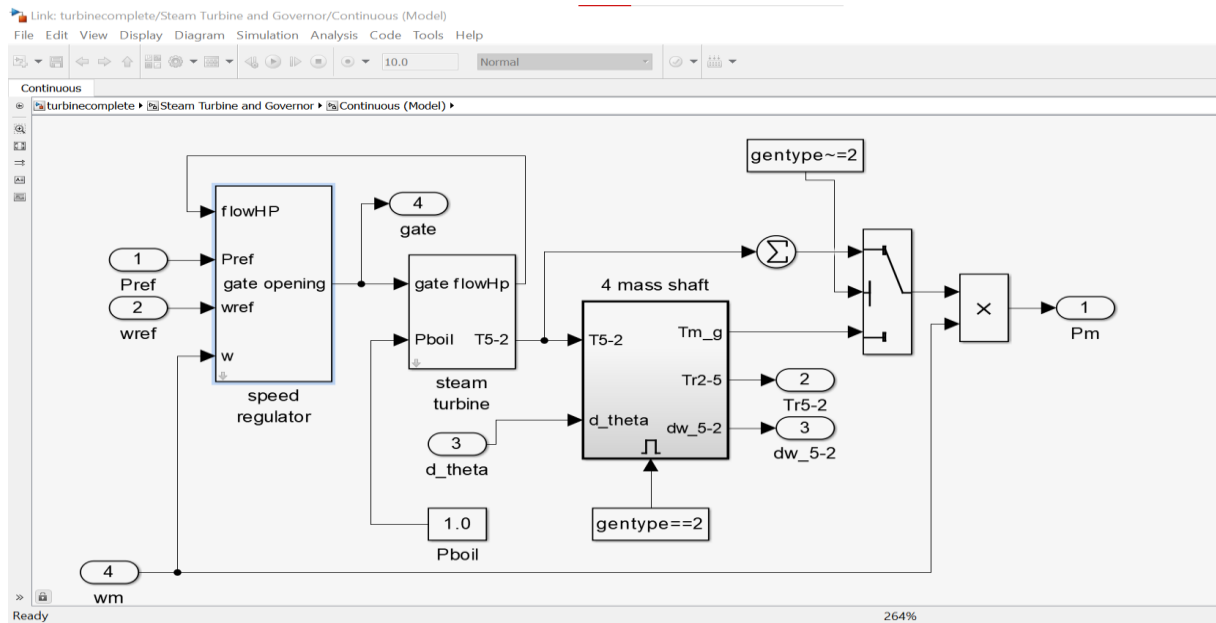


Figure II.13 : Les composantes de « Steam Turbine and Governor »[15]

En suivant les étapes précédentes telles qu'indiqué dans le chemin ainsi que dans les figures, nous parvenons finalement au modèle de base de la turbine à vapeur « Steam Turbine ». Ce modèle sera ajusté pour créer un modèle de simulation qui sera présenté dans le chapitre 3, objectif principal de notre travail. En double-cliquant sur le bloc « Steam Turbine » de la figure actuelle, nous obtenons la figure suivante montrant le modèle de la turbine à vapeur ainsi que ses entrées et sorties.

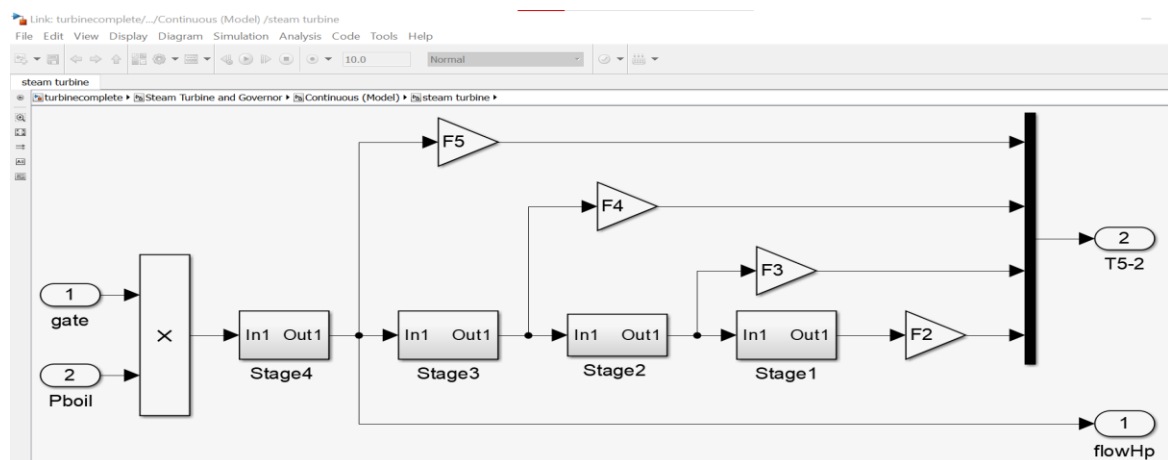


Figure II.14 : Composantes, entrées et sorties de la turbine à vapeur sous un outil de simulation [15]

Pour plus d'information nous donnons comme utile « **MathsWorks** » pour plus de détails sur le chemin à suivre vers la turbine à vapeur « **Steam Turbine** » passant par le bloc générale « **Steam Turbine and Governor** » ainsi que la modélisation par la fonction de transfert et les différentes opérations existantes sur Simulink pour la réalisation et l'implémentation de cette dernière et on termine par le chemin [15] :

Turbine complete/Steam Turbine and Governor/Continous (Model)/steam turbine

## **II.4. Conclusion**

Ce chapitre a guidé pas à pas à travers la démarche pour atteindre la modélisation d'une turbine à vapeur sous l'outil de simulation, en utilisant son bloc « Steam Turbine » dans la modélisation et la simulation. Nous avons commencé par identifier le modèle complet « Steam Turbine and Governor », puis nous l'avons intégré à un nouveau modèle nommé « turbine complete ». En explorant ses composants et en ajustant le modèle de base « Steam Turbine », nous avons préparé le terrain pour le développement d'un modèle de simulation détaillé, qui sera présenté dans le chapitre 3. Cette approche nous permettra de donner une idée sur les composantes (entrées/sorties) de la turbine à vapeur d'une manière générale et de comprendre son fonctionnement en particulier.

## *Chapitre III*

### *Implémentation, simulation numérique et validation*

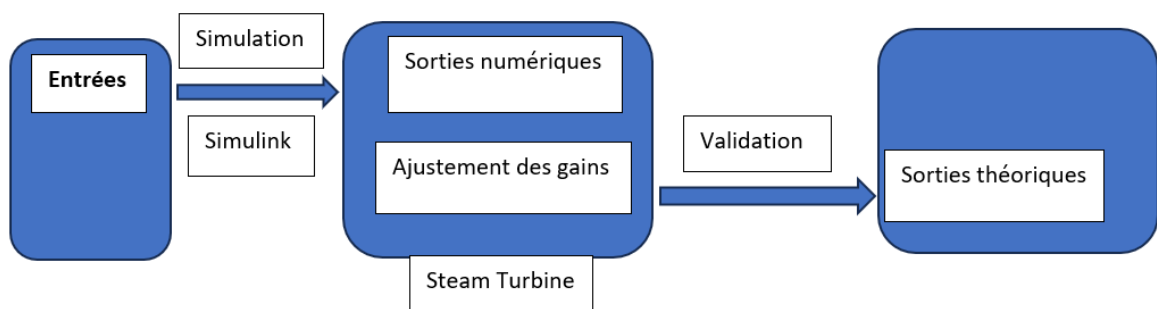
### III.1. Introduction

Dans cette dernière partie du mémoire, nous allons nous appuyer sur le bloc général présenté dans la partie précédente sur les outils de simulation de la turbine à vapeur appelée "SteamTurbine". Avec des simplifications, des ajustements et des modifications, en ajoutant quelques blocs utiles pour intégrer des paramètres d'entrée et obtenir des sorties correspondantes à nos paramètres de sortie, nous allons aboutir à un modèle standard de turbine "entrée-sortie". En utilisant deux exemples d'applications (essai 1 et essai 2), nous présenterons en entrée les trois paramètres suivants : la pression, le débit et les enthalpies, et en sortie, nous aurons les paramètres suivants : la puissance mécanique et le rendement. Ces résultats seront validés par des simulations numériques et une validation théorique par des calculs algébriques utilisant les lois de la thermodynamique.

En plus de ces deux exemples d'applications, nous allons ajouter une dernière partie dans le chapitre 3 sur quelques recommandations, voire des propositions, pour rendre le système plus complexe, telles que le changement du nombre de chambres (étages), accompagnées d'une discussion pour évaluer les paramètres et envisager une optimisation.

### III.2. Exemples d'applications, simulation et validation

Le but de cette partie est de présenter deux exemples de turbines à vapeur avec leurs entrées et sorties calculés théoriquement afin de valider les résultats obtenus par simulation numérique en utilisant le modèle de turbine à vapeur ajusté. L'idée est qu'en ajoutant des commandes (opérations), nous obtiendrons un bloc "Steam Turbine" dont les sorties sont ajustées par la modification des gains.



**Figure III.1** : Schéma de validation des sorties numériques

En utilisant le diagramme de simulation-validation déjà défini, nous allons procéder en deux étapes : la première pour le calcul numérique des sorties et l'ajustement des gains, et la deuxième pour la validation théorique des sorties obtenues.

### III.2.1. Exemple d'application « Cas 1 »

Dans ce premier exemple, on considère la turbine à vapeur suivantes dont les entrées et sorties sont données dans le tableau suivant [16].

$P_1$ [bar]	$T_1$ [K]	$h_1$ [KJ /Kg]	$C_1$ [m/s]	$Z_1$ [m]
150	873 ,15	3583,30753	50	10

**Tableau III.1:** Paramètres d'entrées

$P_2$ [bar]	$T_2$ [K]	$h_2$ [KJ /Kg]	$C_2$ [m/s]	$Z_2$ [m]
4	674,83	3218,34315	150	4

**Tableau III.2:** Paramètres de sorties

Le débit massique traversant la turbine est de 1,5 kg/s.

Le rendement isentropique de détente est  $(\eta_{is})_D = 0,9$

La puissance calorifique perdue par la turbine vers le milieu extérieur est de 8,5 kW.

Quelques explications :

La turbine est un système ouvert car elle échange de la matière avec le milieu extérieur. Elle est traversée par un débit de vapeur d'eau qui entre dans la turbine aux conditions thermodynamiques de l'état (1) et qui en sort aux conditions de l'état (2). La turbine est une machine destinée à produire de l'énergie mécanique c'est-à-dire du travail : c'est donc une machine motrice : algébriquement le travail produit par la turbine est compté négativement ( $W' < 0$ ).

Au point de vue thermodynamique cette production de travail se fait grâce à la détente du fluide moteur c'est-à-dire à la détente de la vapeur d'eau qui, comme on le voit passe de 150 bars à 4 bars. Cette chute de pression s'accompagne aussi d'une chute de température mais surtout d'une chute d'enthalpie : la turbine convertit essentiellement cette chute d'enthalpie en travail.

### III.2.1.1. Calcul théorique

Il s'agit d'un système ouvert en régime permanent. Le premier principe de la thermodynamique s'écrit alors :

$$\dot{W}' + \dot{Q} = qm \left[ (h_s - h_e) + \left( \frac{c_s^2 - c_e^2}{2} \right) + g(Z_s - Z_e) \right] \quad (\text{III.1})$$

Les deux termes de gauches ( $W'$ ) et ( $Q'$ ) représentent respectivement la puissance mécanique et la puissance calorifique échangées par la turbine avec le milieu extérieur. Tout en insistant que c'est deux termes sont algébriquement négatifs c'est-à-dire :

$$\dot{Q} = -8,5 \text{ kW}$$

$$\dot{W}' < 0$$

Signalons aussi, que les variations des énergies, cinétique et potentielle sont prises en compte dans cet exercice (elles ne sont pas négligées).

$$\dot{W}' = -\dot{Q} + qm \left[ (h_2 - h_1) + \left( \frac{C_2^2 - C_1^2}{2} \right) + g(Z_2 - Z_1) \right]$$

$$\begin{aligned} \dot{W}' = & -(-8.5) + 1.5[(3218.34315 - 3583.30753) + \left( \frac{150^2 - 50^2}{2} \right) \times 10^{-3}) \\ & + (9.81 \times (4 - 10) \times 10^{-3})] \end{aligned}$$

$$\dot{W}' = -524.03486 \text{ kW}$$

Remarquons que les termes des variations des énergies, cinétique et potentielle, sont négligeables devant le terme de variation d'enthalpie. C'est pour cette raison que nous disons que la turbine produit du travail par la chute d'enthalpie du fluide moteur.

Remarque importante :

Dans le cas des machines motrices et particulièrement des turbines, nous avons l'habitude de faire intervenir, dans d'autres calculs, le travail fourni au milieu extérieur par la turbine, noté :

$$\dot{W}' = -\dot{W}_e$$



Dans le cas de la turbine étudiée on a la puissance mécanique à la sortie de la turbine :

$$P_m = \dot{W}_e = 524,035 \text{ kW}$$

Puissance thermique d'entrée avec vapeur :

$$(\eta_{is})_D = \frac{h_1 - h_2}{h_1 - h_{2s}} \quad (\text{III.2})$$

$$h_{2s} = h_1 - \frac{h_1 - h_2}{(\eta_{is})_D} \quad (\text{III.3})$$

$$h_{2s} = 3583.30753 - \frac{(3583.30753 - 3218.34315)}{0.9}$$

$$h_{2s} = 3177.79166$$

Rendement de la turbine :

$$(\eta_{is})_D = \frac{h_1 - h_2}{h_1 - h_{2s}}$$

$$(\eta_{is})_D = \frac{(3583.30753 - 3218.34315)}{(3583.30753 - 3177.79166)}$$

$$(\eta_{is})_D = 0.9$$

III.2.1.2. Calcul numérique (code simulation numérique)

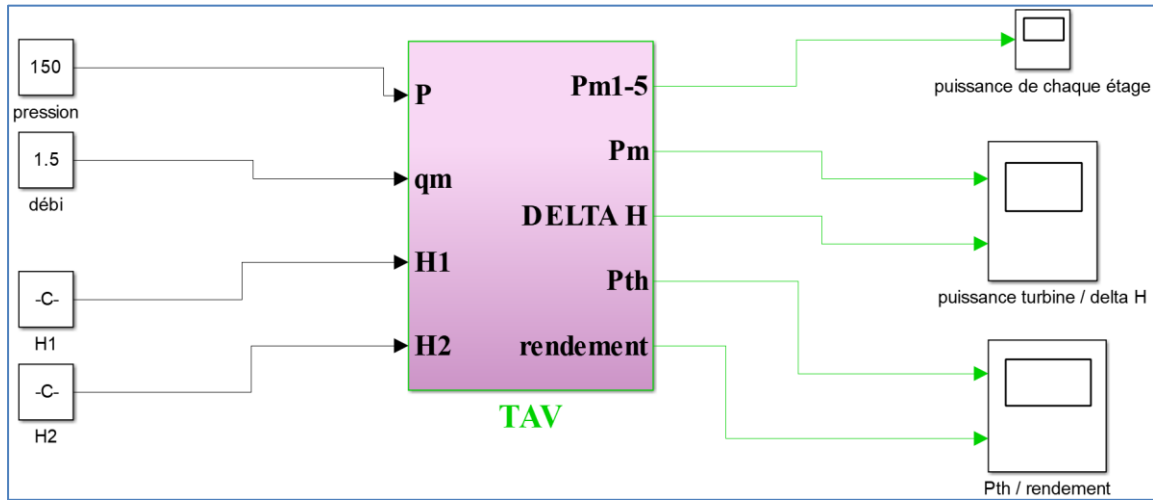


Figure III.2 : Bloc de simulation pour la turbine à vapeur - cas (1)

En double clic sur le bloc TAV nous allons visualiser le contenu de cette dernière comme suit :

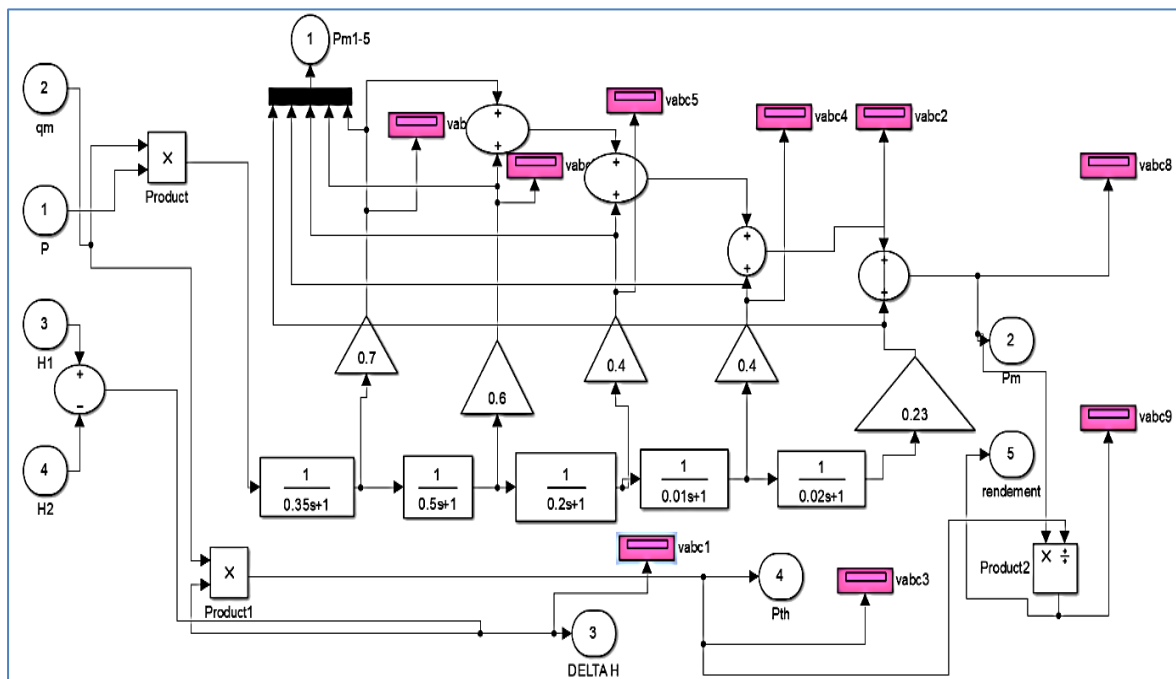


Figure III.3 : Schéma de simulation TAV - Cas (1)

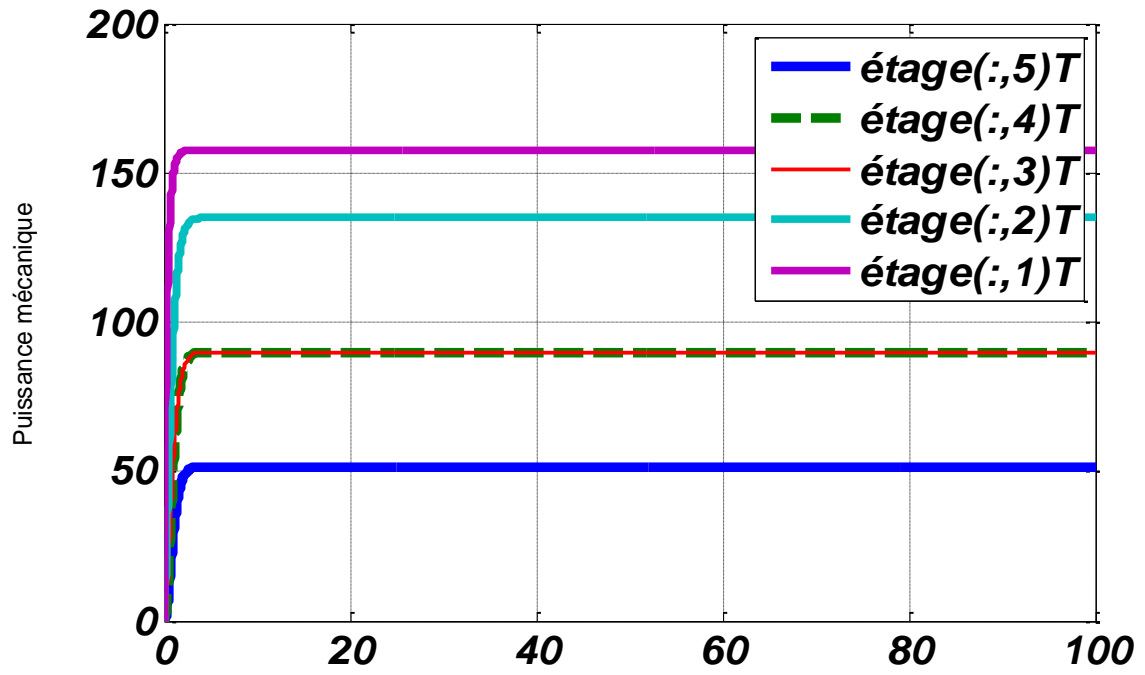


Figure III.4 : Pm de chaque étage Cas(1)

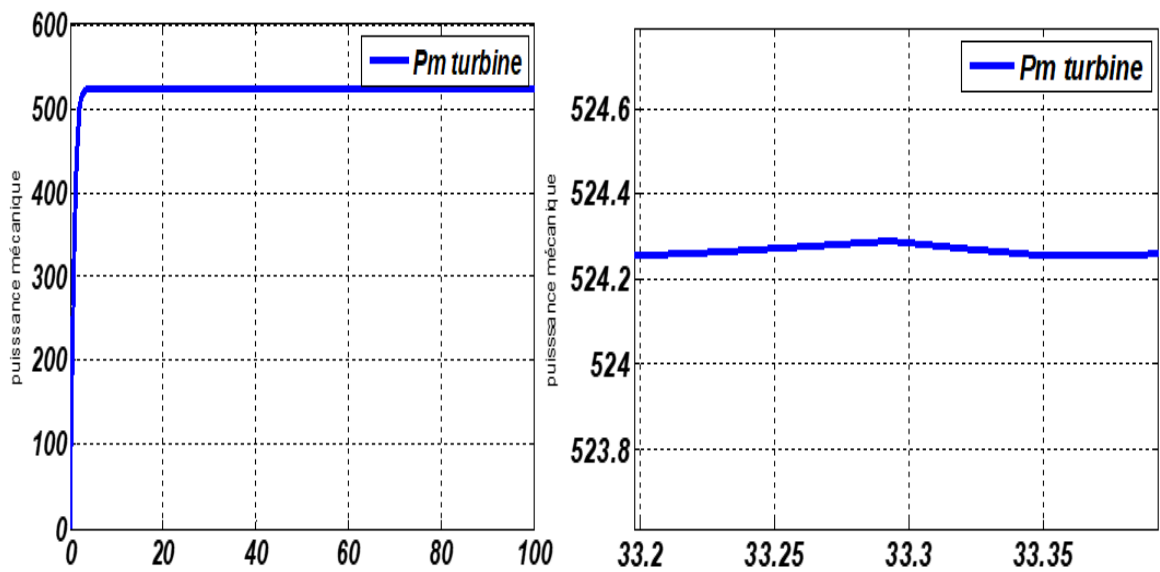


Figure III.5 : Puissance mécanique de la turbine Cas(1)

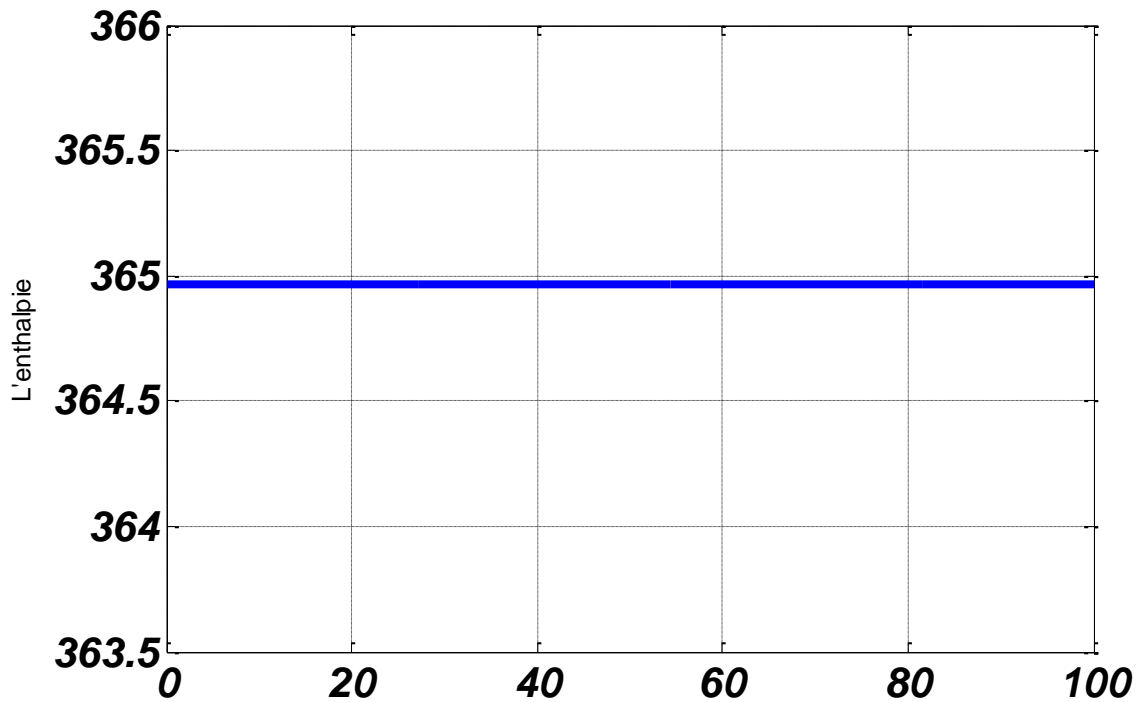


Figure III.6 : Différence d'enthalpie (delta H) Cas (1)

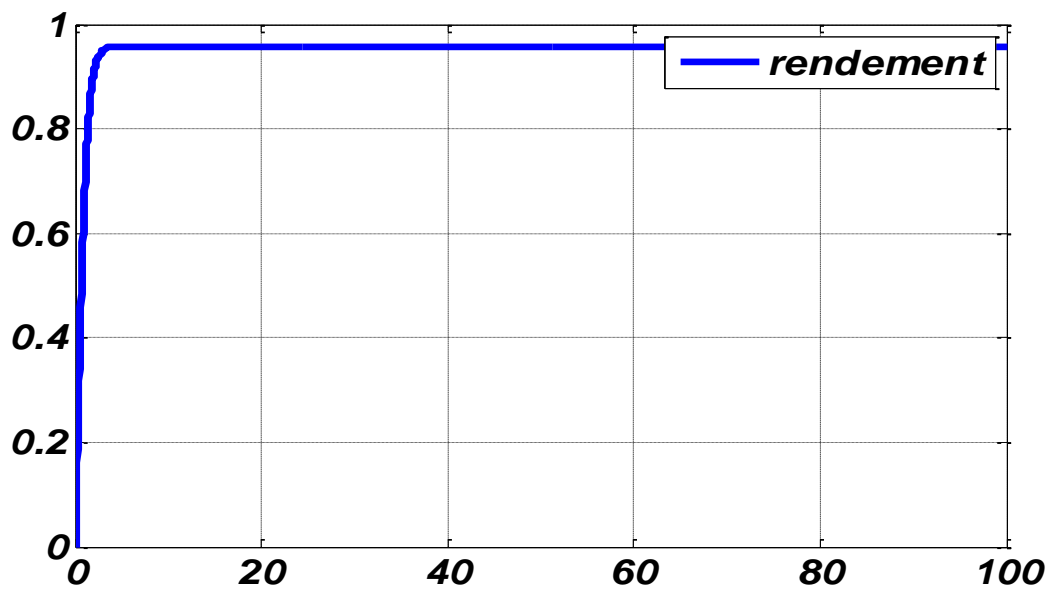


Figure III.7 : Rendement de la turbine cas (1)

#### ➤ Validation

On constate bien qu'après l'ajustement des gains, les sorties théoriques sont obtenues, validant ainsi notre modèle de l'outil de simulation ainsi que les résultats de l'exemple « cas 1 »

III.2.2. Exemple d'application « Cas 2 »

Dans ce deuxième exemple, on considère la turbine à vapeur suivantes dont les entrées et sorties sont données dans le tableau suivant [17].

Considérons la détente adiabatique irréversible de la vapeur d'eau dans une turbine. A l'entrée de la turbine, la vapeur est dans un état surchauffé à une pression  $P_e$  de 15 bars et une température  $\theta_e$  de 550 °C. La détente se fait jusqu'à une pression  $P_s$  de 0,05 bar (5 kPa). A la sortie de la turbine (état 2), le fluide est dans un état diphasique liquide-vapeur. Le rendement isentropique de détente est  $(\eta_S) = 0,9$  et le débit massique traversant la turbine est de 27 kg/s. La table thermodynamique de l'eau et de sa vapeur permet d'obtenir les caractéristiques suivantes :

Psat (kPa)	Tsat (°C)	Liquide saturé (x=0)			Vapeur saturée (x=1)		
		v liq (m <sup>3</sup> /kg)	h liq (kJ/kg)	s liq (kJ/kg K)	v liq (m <sup>3</sup> /kg)	h vap (kJ/kg)	s vap (kJ/kg K)
5	32,88743	0,00100533	137,749	0,476198	28,1853	2560,73	8,3938

Tableau III.3: Propriétés thermodynamiques de l'équilibre liquide vapeur pour le palier de 5 kPa

Point	P[bar]	$\theta$ [°C]	s[kJ/kg.K]	h[kJ/kg]	v[m <sup>3</sup> /kg]	Etat Physique
1	15	550	7,70948	3583,57	0,251017	Vapeur Surchauffée

Tableau III.4: Propriétés thermodynamiques de la vapeur surchauffée

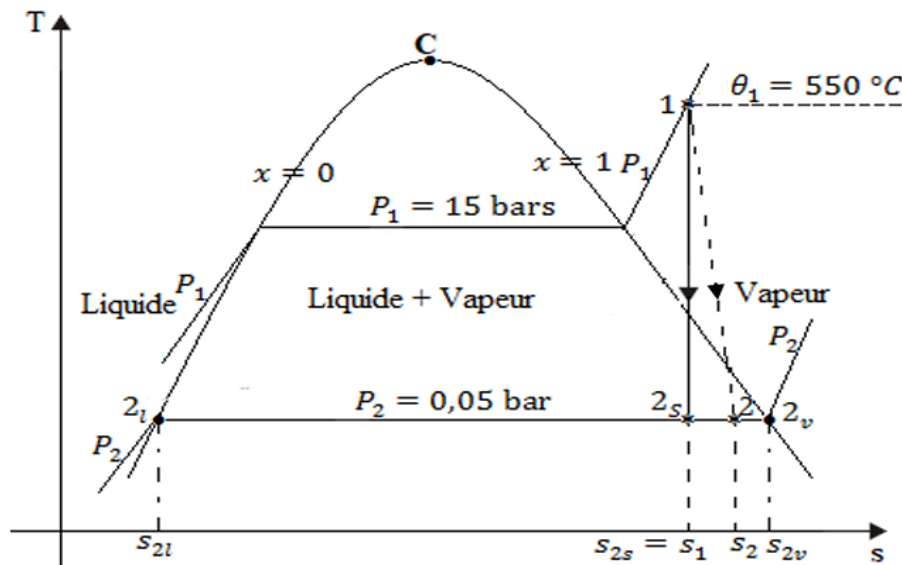


Figure III.8 : Représentation graphique de la détente dans la turbine [17]

**Remarque :**

- Le point (1) correspondant à l'entrée turbine, est dans un état de vapeur surchauffée ; il est donc dans le domaine vapeur, situé à droite de l'iso titre ( $x = 1$ ).
- Le point (1) est à l'intersection de l'isobare  $P_e = 15 \text{ bars}$  et de l'isotherme  $\theta_e = 550^\circ\text{C}$ .
- La détente adiabatique irréversible est représentée en trait pointillé par la transformation : (1 - 2). Cette détente étant adiabatique et irréversible s'accompagne donc d'un accroissement d'entropie :  $s_s > s_e$ .
- Si la détente était adiabatique réversible, elle serait représentée par la transformation : (1 - 2s), c'est-à-dire par une transformation isentropique. Cette détente isentropique est plus que nécessaire pour étudier la détente « réelle ».
- Le point (2) correspondant à la sortie de la turbine est dans un état diphasique (liquide-vapeur) ; il est à l'intérieur du domaine diphasique délimité par les iso titres. ( $x = 0 \text{ et } x = 1$ ).

**Calcul théorique**

A partir de la définition du rendement isentropique de la détente :

$$(\eta_{is})_D = \frac{h_e - h_s}{h_e - h_{s_{is}}} \tag{III.4}$$

On peut retrouver l'expression de l'enthalpie du fluide à la sortie de la turbine

$$h_s = h_e - (\eta_{is})_D (h_e - h_{s_{is}}) \quad (\text{III.5})$$

Il faut donc déterminer d'abord l'enthalpie du fluide  $h_{2s}$  qui représente l'enthalpie du fluide à la sortie de la turbine en fonctionnement isentropique. Détermination de  $h_{s_{is}}$  :

$$s_{s_{is}} = s_e = 7,70948 \frac{kJ}{kg \cdot K}$$

Connaissant l'entropie au point  $s_{is}$ , on peut alors calculer le titre en vapeur en ce point:

$$s_{s_{is}} = (1 - x_{2s})s_{s_l} + x_{2s}s_{s_v}$$

$$x_{2s} = \frac{s_{s_{is}} - s_{s_l}}{s_{s_v} - s_{s_l}} = \frac{s_e - s_{s_l}}{s_{s_v} - s_{s_l}} \quad (\text{III.6})$$

$$x_{2s} = \frac{7,70948 - 0,476198}{8,3938 - 0,476198}$$

$$x_{2s} = 0,91357$$

Calculons l'enthalpie massique au point  $2s$  :

$$h_{s_{is}} = (1 - x_{2s})h_{s_l} + x_{2s}h_{s_v} \quad (\text{III.7})$$

$$h_{s_{is}} = (1 - 0,91357) \times 137,749 + 0,91357 \times 2560,73 = 2351,311 \text{ kJ/kg}$$

On calculera l'enthalpie massique à l'aide de la relation (III. 5):

$$h_s = h_e - (\eta_{is})_D (h_e - h_{s_{is}})$$

$$h_s = 3583,57 - 0,9 \times (3583,57 - 2351,311)$$

$$h_s = 2474,54 \text{ kJ/kg}$$

Puissance de la turbine fournie au milieu extérieur

$$\dot{W}'_e = qm \times (h_1 - h_2) \quad (\text{III.8})$$

$$\dot{W}'_e = 27 \times (3583,57 - 2474,54)$$

$$\dot{W}'_e = 29943,88 \text{ kW}$$

III.2.2.1. Calcul numérique (code simulation numérique)

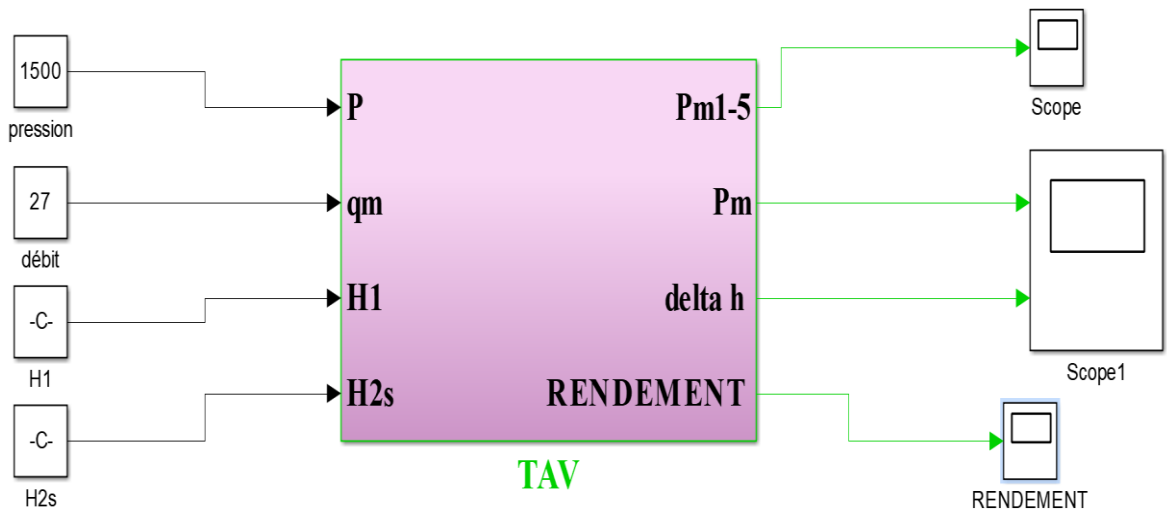


Figure III.9 : Bloc de simulation pour la turbine à vapeur - cas (2)

En double clic sur le bloc TAV nous allons visualiser le contenu de cette dernière comme suit :

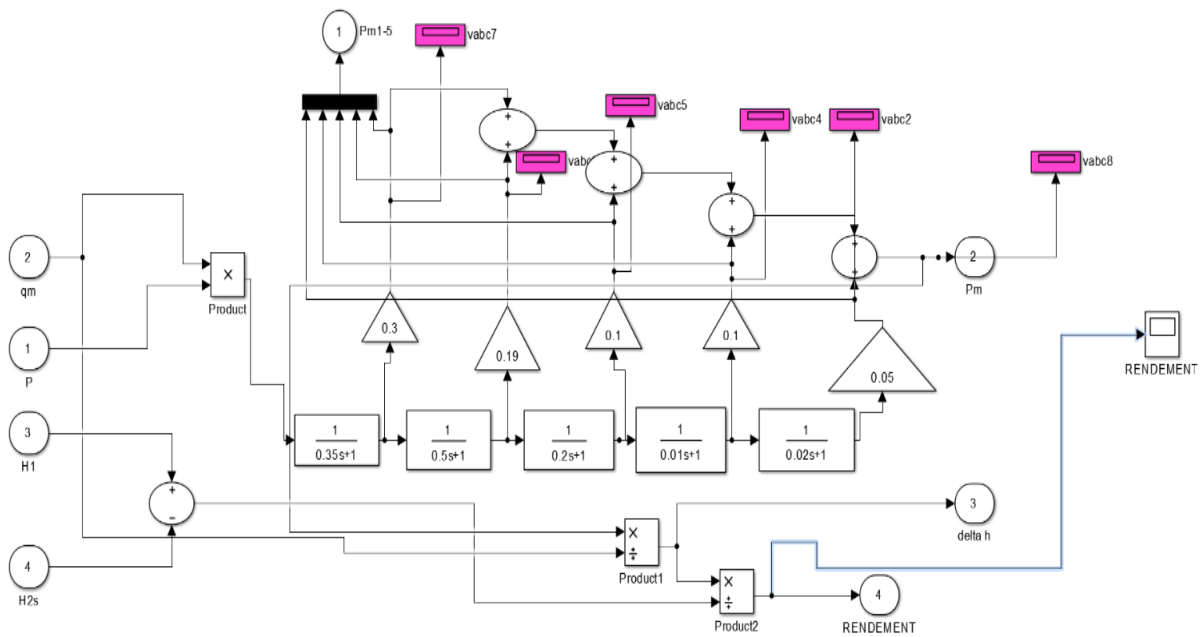


Figure III.10 : Schéma de simulation TAV - Cas (2)



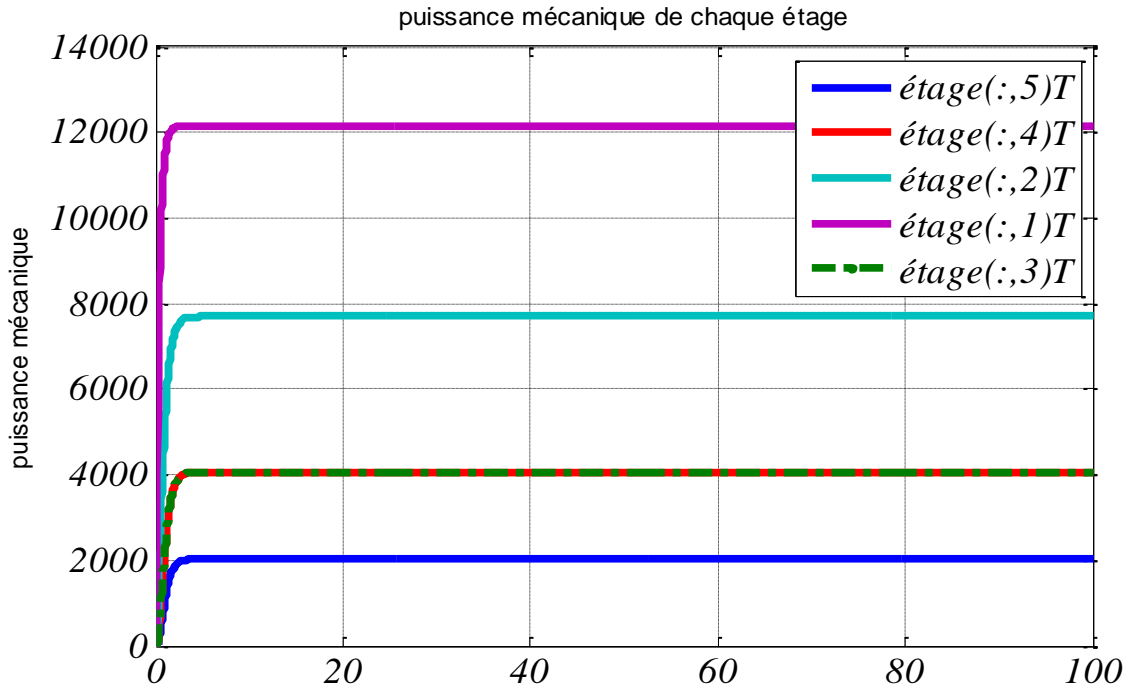


Figure III.11 : Puissance mécanique de chaque étage cas (2)

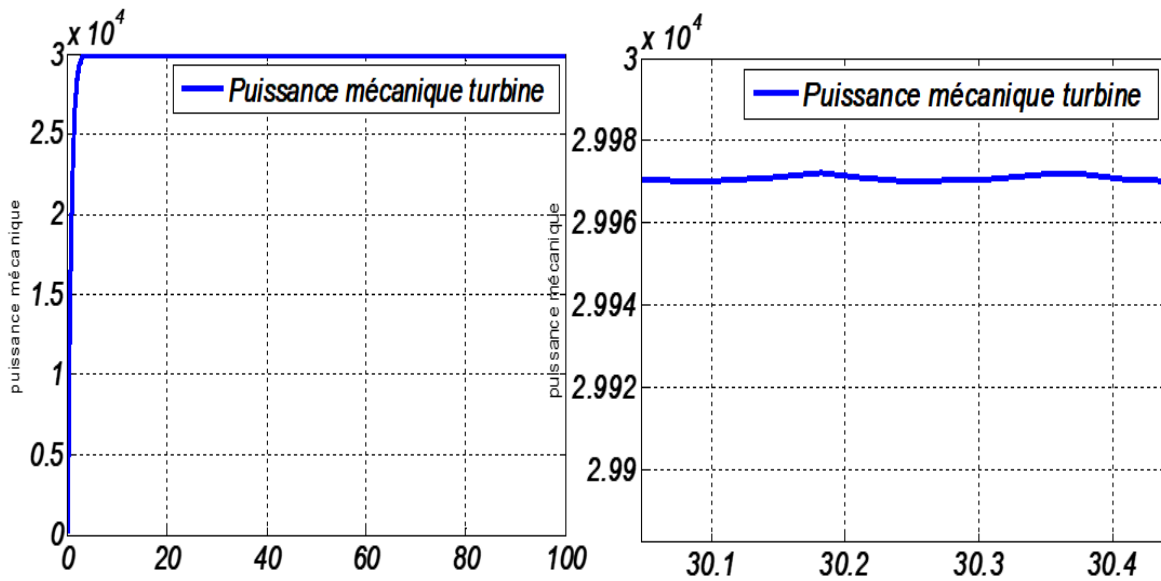


Figure III.12 : Puissance mécanique de la turbine cas (2)

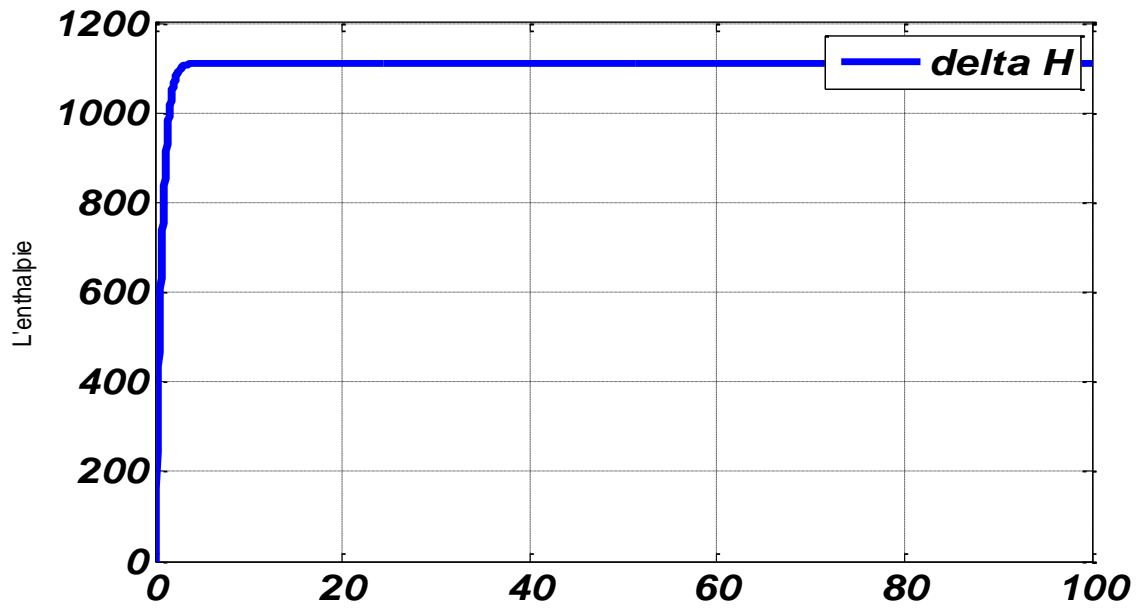


Figure III.13 : Différence d'enthalpie (delta H) cas (2)

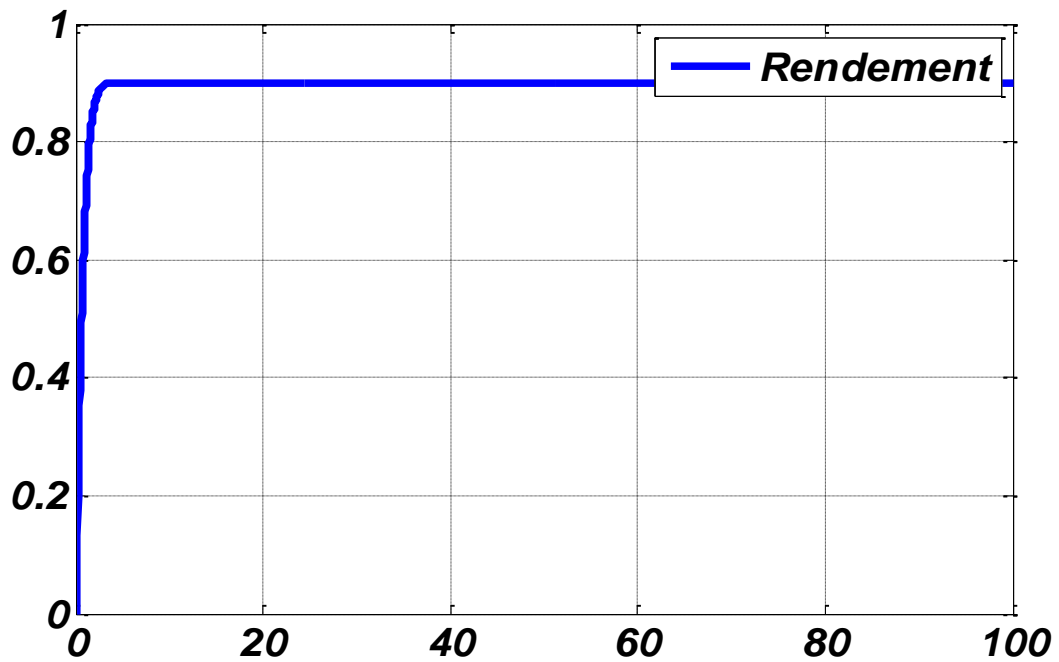


Figure III.14 : Rendement de la turbine cas (2)

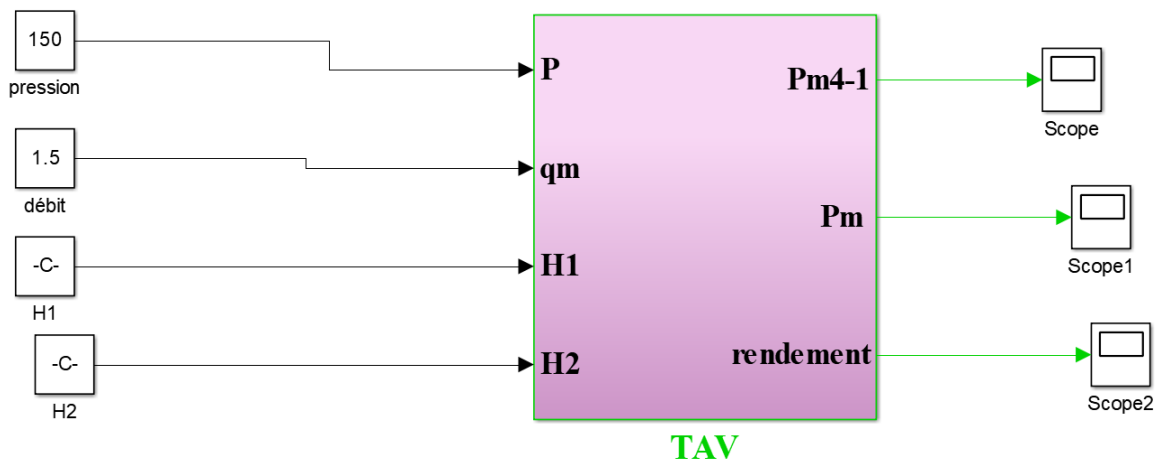
**Validation :** On constate bien qu'après l'ajustement des gains, les sorties théoriques sont obtenues, validant ainsi notre modèle de l'outil de simulation ainsi que les résultats de l'exemple « cas2 »

### III.3. Recommandations et discussion

#### III.3.1. Exemple d'application « Cas 3 »

Dans cette dernière partie du chapitre 3, nous allons proposer quelques recommandations. Nous allons envisager une turbine avec moins de nombre d'étages, qui était précédemment de 5. À cet effet, nous reprendrons l'essai 1 en 4 étages et nous comparerons les résultats numériques avec ceux de l'essai précédent.

Le code de simulation numérique est donné comme suit :



**Figure III.15 :** Bloc de simulation pour la turbine à vapeur à 4 étages

En double clic sur le bloc TAV nous allons visualiser le contenu de cette dernière comme suit :

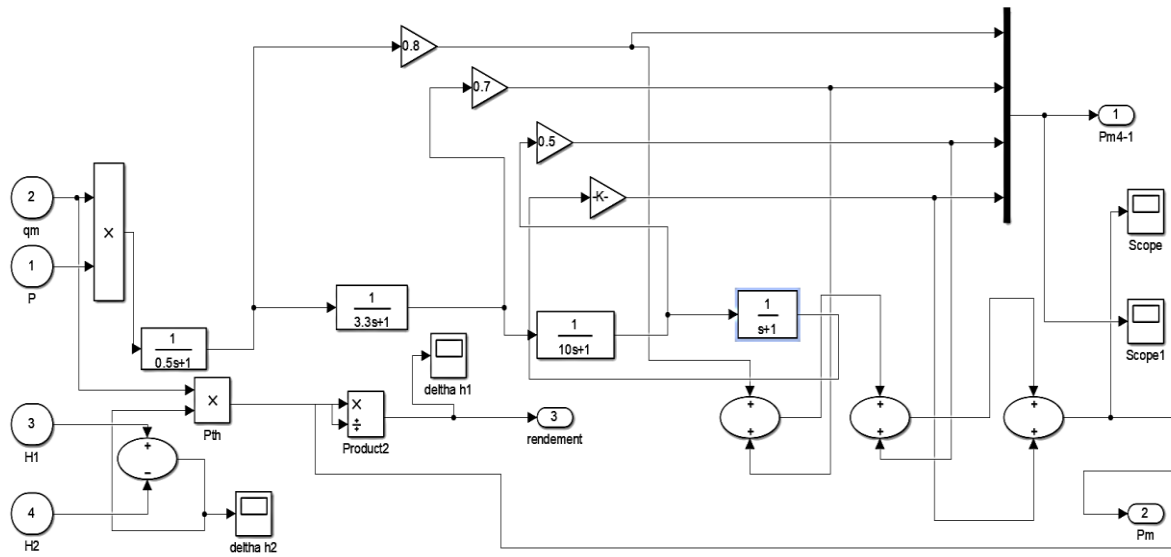


Figure III.16 : Schéma de simulation TAV à 4 étages

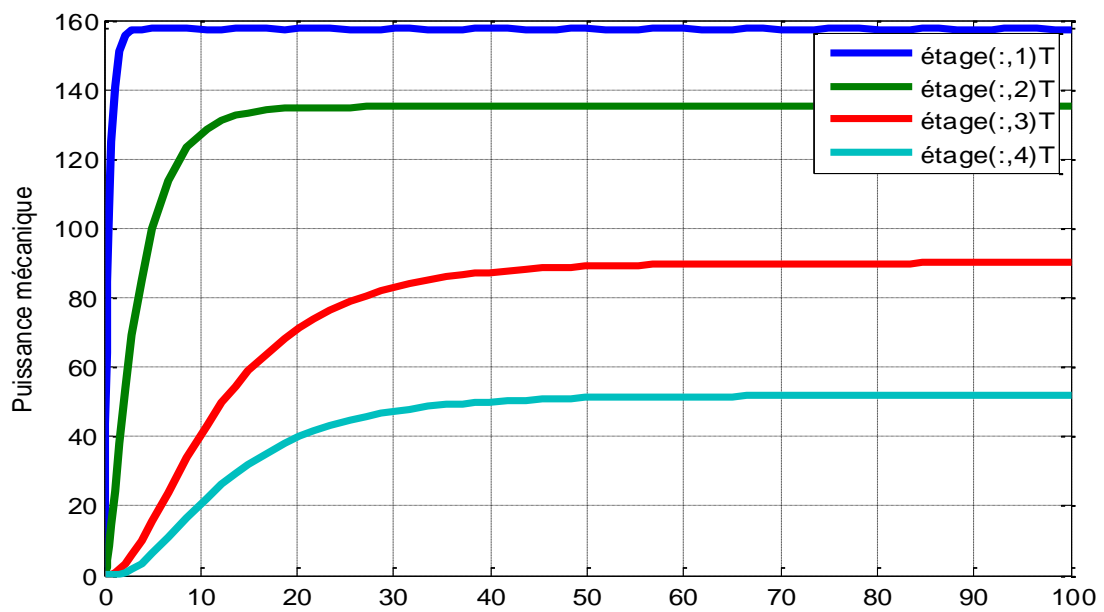


Figure III.17 : Puissance mécanique de chaque étage à 4 étages

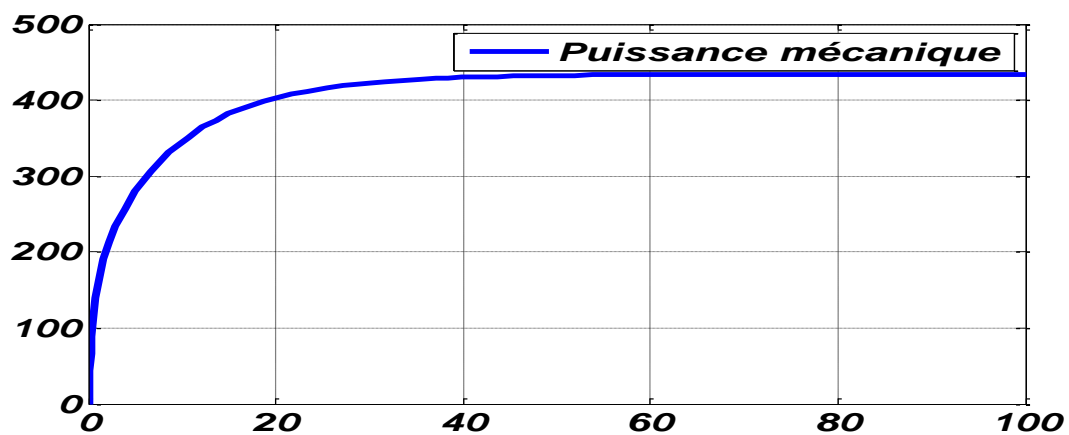


Figure III.18 : Puissance mécanique de la turbine (4étages)

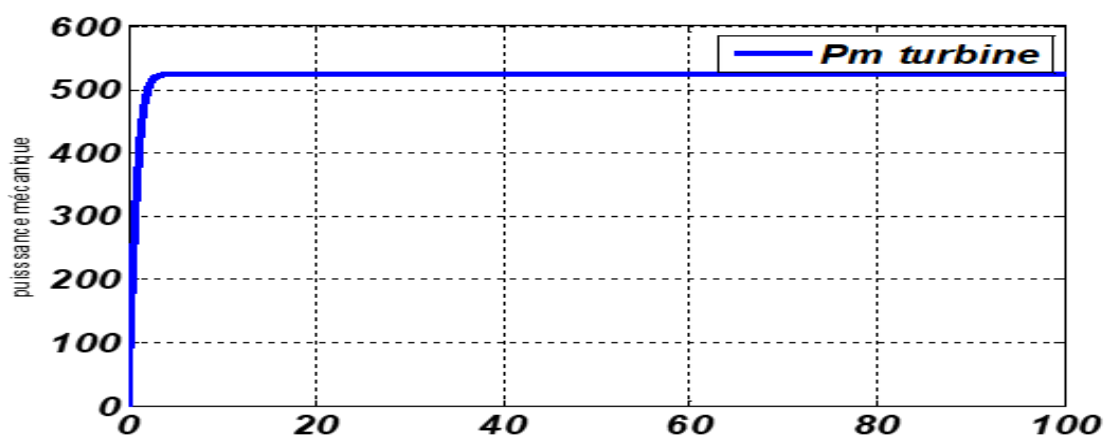


Figure III.19 : Puissance mécanique de la turbine (5étages)

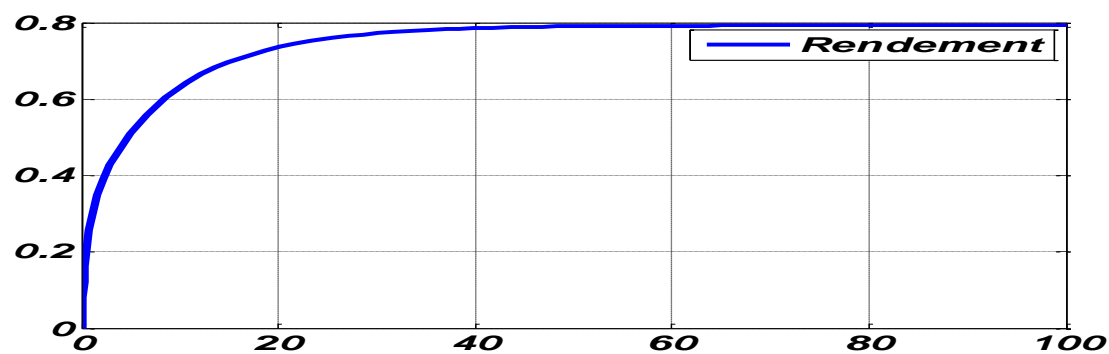


Figure III.20 : Rendement de la turbine (4 étages)

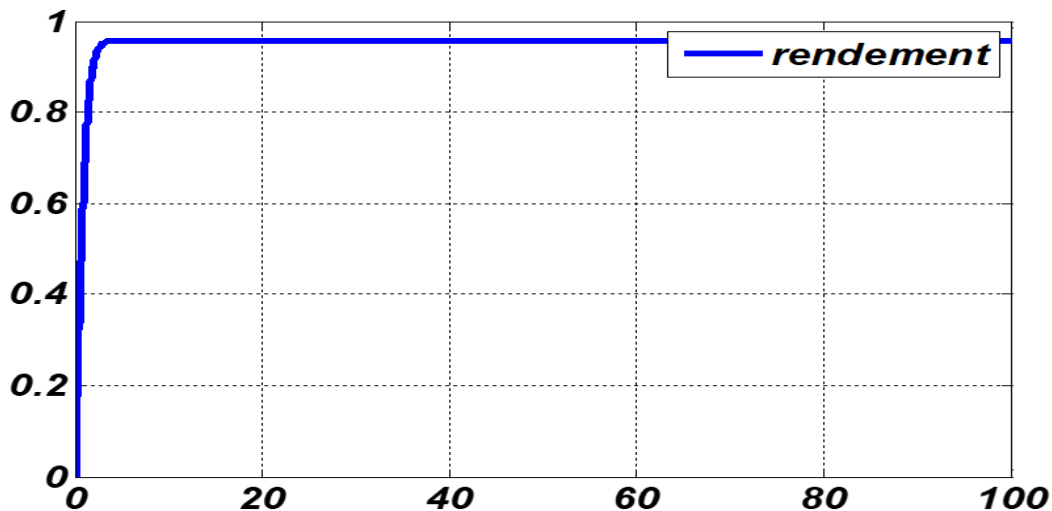


Figure III.21 : Rendement de la turbine (5étages)

### III.3.2. Discussion

En proposant un test de réduction du nombre d'étages de l'exemple d'application (essai 1) par la suppression d'un bloc, comme indiqué dans la figure précédente du code de simulation numérique, nous observons une diminution de la puissance, comme illustré dans la simulation numérique présentée dans la figure.

L'objectif ici est d'évaluer certains paramètres, comme dans ce test où la puissance diminue. Le nombre d'étages dans une turbine à vapeur est un facteur critique qui influence plusieurs aspects de son fonctionnement et de ses performances, dans une turbine à vapeur est directement lié à son efficacité thermodynamique.

Plus il y a d'étages, plus la turbine peut extraire efficacement l'énergie de la vapeur à haute pression et haute température, chaque étage permet d'exploiter davantage l'énergie de la vapeur en l'amenant à se détendre ou se dilater à plusieurs reprises supplémentaire, augmentant ainsi l'efficacité globale de la conversion de l'énergie thermique en énergie mécanique.

En résumé, le nombre d'étages dans une turbine à vapeur joue un rôle crucial dans la détermination de son efficacité, de sa puissance de sortie, Il est important d'optimiser le nombre d'étages en fonction des exigences spécifiques de l'application pour maximiser l'efficacité énergétique et la performance globale du système.

L'évaluation de certains paramètres par simulation pourrait révéler des opportunités pour optimiser l'efficacité énergétique du système, par exemple en ajustant les paramètres de fonctionnement.

Des tests supplémentaires pourraient être envisagés pour formuler d'autres recommandations afin de garantir qu'elles répondent aux objectifs de performance énergétique et de stabilité du système.

### **III.4. Conclusion**

En conclusion, ce dernier chapitre a permis de démontrer l'efficacité du modèle de l'outil de simulation ajusté pour la simulation des paramètres de turbines à vapeur. À travers deux exemples d'application (essai 1 & 2), nous avons observé comment les paramètres d'entrée influencent les performances de sortie telles que la puissance mécanique et le rendement. L'ajustement des gains a joué un rôle crucial dans l'obtention de résultats théoriques cohérents, validant ainsi notre approche de modélisation et de simulation pour des systèmes de turbine à vapeur.

## *Conclusion Générale*



## *Conclusion Générale*

---

Ce mémoire a exploré la simulation des paramètres d'un élément thermique, en se concentrant sur les turbines à vapeurs, en utilisant logiciel. À travers trois chapitres, nous avons couvert les éléments thermiques, présenté l'outil de simulation, et développé une simulation de turbine à vapeur sur deux essais validés par des résultats théoriques.

Dans le premier chapitre, nous avons introduit les principes fondamentaux des systèmes thermiques et des turbines à vapeurs. Le deuxième chapitre a présenté logiciel comme outil de modélisation thermique, montrant ses capacités à modéliser et simuler des systèmes dynamiques. Le troisième chapitre a mis en pratique ces connaissances en développant et validant un modèle de turbine à vapeur avec deux exemples.

En conclusion, ce mémoire a démontré l'efficacité de logiciel pour la modélisation, l'implémentation et la simulation d'un élément thermique appelé turbine à vapeur. Les résultats obtenus montrent que logiciel est un outil utile pour l'optimisation des systèmes thermiques, offrant des perspectives pour des recherches et applications futures dans l'ingénierie thermique.

## *Références bibliographiques*

## *Références bibliographiques*

---

- [1] Thermal Environmental Engineering" par Thomas H. Kuehn, James D. Ramsey, and James L. Threlkeld.
- [2]-<https://www.maxicours.com/se/cours/mise-en-evidence-de-l-effet-thermique-d-une-transformation-physique-ou-chimique/#>
- [3] JOEL.M. ZINSALO, note de cours « pompes et stations de pompage » université d'abomeycalavi.
- [4] J. Kern, et al. Energy conversion. CRC press. New York. 2008.
- [5] BÉRIBÉCHE Abdeldjalil. Calcul optimal des soutirages dans une turbine à vapeur d'un cycle hybride (hassir'emel). Master'sthesis.
- [6] Bensalem Ahmed, « Analyse Et Gestion De La Production Des Centrales Electriques liées Aux Réseaux Electrique De Grande Taille ». Thèse de doctorat d'état, Université de El Hadj Lakhdar, Batna, 28 juin 2007.
- [7] Cengel, Y. A., &Boles, M. A. (2014). *Thermodynamics: An Engineering Approach*. McGraw-Hill Education.
- [8] L, Takfarinas. D, zoheir, « étude et réalisation d'une micro-turbine à vapeur », mémoire de Fine d'étude, université Akli Mohand Oulhadj de Bouira, 2016.
- [9] B. Hamid, « analyse énergétique de l'influence de la resurchauffe sur la performance d'une turbine à vapeur », mémoire de fin d'étude, université Djilali Bounaamakhmismiliana, 2020.
- [10] J. KRYSINSKY, turbomachines théories générales. Ed. opu, (1994).
- [11] M. Alexandes, « modélisation et régulation d'une turbine à vapeur dans une centrale thermique », mémoire de fin d'étude, école supérieure chikh ANTA Diop,2005.
- [12] Kundur, P., et al. 1994. Power system stability and control, McGraw-hill New York.
- [13] Zimmer, Gerta. 2008. « Modelling and simulation of steam turbine processes : individualmodels for individualtasks ». Mathematical and Computer Modelling of DynamicalSystems : Methods, Tools and Applications in Engineering and Related Sciences, vol.14 no 6, p.469-493.

## *Références bibliographiques*

---

- [14] ZERKAK, Nesma, SALAH, Mohammed, et al. Oscillations dans un modèle de compétition et de coopération entre deux entreprises avec retards. 2020. Mémoire de master. Université A/Mira Bejaia. 14, 55
- [15] MathWorks. MATLAB and Simulink Documentation. 2023. Web. <https://www.mathworks.com/help/simulink/>
- [16] A. DJERRADA, travaux dirigé « Système ouvert », Département de Génie Mécanique, Université A.Mira de Bejaïa, 2018.
- [17] A. DJERRADA, Exercices corrigés de Thermodynamique, Chapitre 3, « Changement de phase d'un corps pur » – Département de Génie Mécanique, Université A.Mira de Bejaïa, 2018.

# Modélisation et simulation d'une turbine à vapeur

## Résumé

Le mémoire présenté se concentre sur l'utilisation de logiciel pour modéliser et simuler les paramètres d'une turbine à vapeur et son importance. La première partie est une vue d'ensemble des éléments thermiques couramment utilisés en mettant leurs caractéristiques en applications, notamment les turbines à vapeur.

Dans la deuxième partie, on décrit en détail les fonctionnalités de logiciel pour la modélisation des systèmes thermiques. La troisième partie est consacrée à l'implémentation pratique d'une turbine à vapeur dans logicielle. Les résultats des simulations sont ensuite comparés aux données théoriques pour valider la précision du modèle. Le mémoire conclut en affirmant que logiciellest un outil efficace pour la simulation des turbines à vapeur.

**Mots clés :** Elément thermique, Turbine à vapeur, Modélisation, Simulation.

## Abstract

The thesis presented focuses on the use of software to model and software the parameters of a steam turbine and its importance. The first part is an overview of commonly used thermal elements, applying their characteristics, particularly steam turbines.

In the second part, the functionalities of software for modeling thermal systems are described in detail. The third part is dedicated to the practical implementation of a steam turbine in software. The simulation results are then compared to theoretical data to validate the accuracy of the model. The thesis concludes by stating that software is an effective tool for the simulation of steam turbines.

**Keywords :** Thermal element, Steam turbine, Modeling, Simulation.

## الملخص

يرتكز البحث على استخدام برمجة لنمذجة ومحاكاة معلمات التوربين البخاري وأهميته. الجزء الأول هو نظرة عامة على العناصر الحرارية المستخدمة بشكل شائع وتطبيق خصائصها، لا سيما التوربينات البخارية.

في الجزء الثاني، يتم وصف وظائف برمجة لنمذجة الأنظمة الحرارية بالتفصيل. الجزء الثالث مخصص للتنفيذ العملي لتوربين بخاري في برمجة. ثم تتم مقارنة نتائج المحاكاة بالبيانات النظرية للتحقق من دقة النموذج. تختتم الرسالة بالتأكيد على أن برمجة هو أداة فعالة لمحاكاة التوربينات البخارية.

**الكلمات الرئيسية:** عنصر حراري، توربين بخاري، نمذجة، محاكاة.