



وزارة التعليم العالي والبحث العلمي
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique
جامعة عبد الحميد ابن باديس مستغانم
Université Abdelhamid Ibn Badis de Mostaganem
كلية العلوم و التكنولوجيا
Faculté des Sciences et de la Technologie



N° d'ordre : M...../GM/2016

MEMOIRE DE FIN D'ETUDE MASTER ACADEMIQUE

Filière : Génie Mécanique

Spécialité : Transport & Distribution de Gaz

Thème

**Modélisation thermo économique d'un
système énergétique industriel**

Présenté par : BELLEBNA Farida

Soutenu le 09/11/2016 devant le jury composé de :

Président : M. KHALDI Abdelaziz

Examineur : M. MEDJAHED Bendida

Encadreur : M. GUERMAT Abdelkader

Année Universitaire : 2015 / 2016

Remerciements :

Mes premiers remerciements vont à M. Abdelkader GUERMAT, pour sa présence tout au long de ce travail, ses compétences scientifiques, sa sympathie et sa gentillesse.

Je remercie vivement M. MEDJAHED Bendida pour son soutien et son aide et comme étant l'examineur de ce projet.

Je remercie notamment le président M. KHALDI Abdelaziz

Mes remerciements s'adressent également à tous mes enseignants du département « Génie Mécanique » et mes collègues du Master 2 TDG.

Je tiens à remercier tout particulièrement ma famille de m'avoir soutenue.

Dédicaces :

Je dédie ce modeste travail à

Mes parents

Mes frères et sœurs

Mon adorable petite fille Yousra

Tous mes amis.

Nomenclature :

\dot{W}_p	puissance de la pompe	[kj/kg]
η_{motor}	rendement du moteur	%
\dot{m}_{wf}	débit massique du fluide de refroidissement	[m ³ /s]
h_s	l'enthalpie de sortie	[kj/kg]
h_e	l'enthalpie d'entrée	[kj/kg]
S_s	l'entropie de sortie	[kJ/kg.K]
S_e	l'entropie d'entrée	[kJ/kg.K]
T_o	température d'entrée	[°C]
$W_{\text{réel}}$	travail réel	[kj/kg]
W_{is}	travail isentropique	[kj/kg]
$h_{s,\text{is}}$	l'enthalpie isentropique de sortie	[kj/kg]
$\eta_{\text{is,p}}$	rendement isentropique de la pompe.	[%]
Δ_{LMTD}	différence de la température logarithmique	[°C]
T_1	température d'entrée	[°C]
T_2	température de sortie	[°C]
W_{net}	travail net	[kj/kg]
W_{tur}	travail de la turbine	[kj/kg]
W_{pomp}	travail de la pompe	[kj/kg]

Résumé

Dans ce mémoire on a présenté une modélisation thermo-économique d'un système énergétique industriel, et on a pris une installation thermique travaillant par le cycle de Rankine telle que la production d'électricité.

Dans une première partie on a étudié un système énergétique industriel ; ses problèmes et ses limites son efficacité énergétique et ses impacts environnementaux, on a abordé aussi la thermo économie et son objectif de calcul.

On a parlé aussi de la modélisation d'un système ; ses différentes variables et méthodes de résolution.

Dans la dernière partie on a fait une étude sur le cycle de Rankine, avec ses équations de dimensions pour enfin faire une simulation sur MATLAB et discuter les résultats.

Mot clé : cycle de Rankine, modélisation, thermo-économie, système, énergie, industrie.

Abstract :

In this thesis we presented a thermo-economic modeling of an industrial energy system, and we took a thermal installation working by the Rankine cycle such as the production of electricity.

In a first part we studied an industrial energy system; its problems and its limits its energy efficiency and its environmental impacts, we also discussed the thermo economy and its calculation objective.

We also talked about the modeling of a system; its different variables and resolution methods.

In the last part we made a study on the Rankine cycle, with its dimensional equations to finally make a simulation on MATLAB and discuss the results.

Key word: Rankine cycle, modeling, thermo-economy, system, energy, industry.

المخلص:

في هذه الأطروحة قدمنا نموذجًا اقتصاديًا حراريًا لنظام الطاقة الصناعية ، وأخذنا تركيبًا حراريًا يعمل بدورة رانكين مثل إنتاج الكهرباء.

درسنا في الجزء الأول نظام الطاقة الصناعية. مشاكلها وحدودها في كفاءة الطاقة وتأثيراتها البيئية ، كما ناقشنا الاقتصاد الحراري وهدف حسابه.

تحدثنا أيضًا عن نمذجة النظام ؛ المتغيرات المختلفة وطرق القرار.

في الجزء الأخير ، أجرينا دراسة حول دورة رانكين ، مع معادلات الأبعاد الخاصة بها لإجراء محاكاة أخيرًا على MATLAB ومناقشة النتائج.

الكلمة المفتاحية: دورة رانكين ، النمذجة ، الاقتصاد الحراري ، النظام ، الطاقة ، الصناعة.

Liste des figures

Figure I.1 : Production d'électricité mondiale	03
Figure I. 2 : Système énergétique intégré	05
Figure II. 1 : Modèle = transformateur mathématique	16
Figure II.2 : Exemple de flowsheet d'un procédé d'acide nitrique .[1]	18
Figure II. 3 : Représentation schématique d'une unité.	20
Figure II. 4 : Représentation d'une unité.	33
Figure II. 5 : Méthode d'optimisation :Black Box	37
Figure II. 6 : Modèle d'évaluation des équations	39
Figure II.7 : Méthode de résolution à 2 niveaux	42
figure III.1.Schéma d'une centrale à vapeur	54
figure. III. 2 : Diagramme T.S cycle de Rankine	55
Figure III. 3 : Exemple de la turbine	58
Figure III. 4 : Nouveau mode de calcul	60
Figure III. 5 : Boucle itérative	61
figure III.6 : Détente isentrope et modèle de détente dans une turbine	64
Figure III. 7 : Caractéristiques du header	65
Figure III. 8 : Simulation du diviseur ou du mélangeur	66
Figure III. 9 : Modélisation d'un ensemble de headers interconnectés	67
Figure III. 10 : Méthode de Newton Raphson	69
Figure IV. 1 : Diagramme de température et entropie spécifique, du cycle de RANKINE.	71
Figure IV. 2 : Variation du rendement en fonction des températures pour avec hautes pressions constantes.	74
Figure IV.3 : Variation du rendement en fonction des températures pour avec basses pressions constantes.	74
Figure IV. 4 : Variation du rendement en fonction des basses pressions pour hautes pressions constantes.	75
Figure IV. 5 : Variation du rendement en fonction des hautes pressions pour basses pressions constantes.	76

Liste Des Tableaux

Tableau II 1: conclusions de l'étude comparative des approches séquentielle et simultanée	44
Tableau IV. 1 : Les données des calculs	71
Tableau IV.2 : Résultats des calculs	73

Sommaire

Remerciements

Dédicaces

Nomenclature

Sommaire

Introduction générale	01
Chapitre I : Généralités sur les systèmes énergétiques industriels et leurs aspects techniques et économiques.	
Introduction	03
1. Système énergétique industriel	03
1.1 Généralité	03
1.2 Problèmes et limites	08
1.3 Efficacité énergétique	09
1.4 Coefficient de retour énergétique	10
1.5 Comparaison des impacts environnementaux des différentes filières de production d'électricité	11
1.6 Définition de l'exergie	11
1.6.1 rendement exergétique	12
2. Thermoéconomie: généralités	12
2.1. Méthode de modélisation et d'optimisation thermoéconomique	13
2.1.1. Le modèle thermodynamique	13
2.1.2. Le modèle économique	14
2.1.3. Objectif calcul thermo-économique	14
Chapitre2 : Méthodologie de calcul d'un système énergétique industriels (différentes possibilités de calcul énergétique et critères d'optimisation).	
Introduction :	16
1. La modélisation :	16
2. Le modèle	19
3. Définition du système	23
4.Variables explicatives	23
5. Progrès technique	24
6. Méthodes d'analyse de l'évolution de la demande	25
6. 1 Prévission de la demande à court terme	25
6.2 Prévission de la demande d'énergie à moyen terme	26

7. Méthode input-output	26
8. Méthodes d'élasticité	28
9. Méthodes de simulation	29
10. Les variables d'état	30
11. Les types de modèles	33
12. Définition mathématique du problème d'optimisation	35
12.1 Méthode Black-Box, boîte noire	37
13. Méthodes d'optimisation	38
13.1 L'approche simultanée	39
13.2 Algorithmes d'optimisation	40
13.3 Approches hybrides	42
13.4 La résolution du problème de modélisation	43
14. La procédure AGE pour simuler et optimiser les systèmes énergétiques	48
14.1 Analyser : identifier les degrés de liberté	48
14.2 Générer : résoudre le problème d'optimisation	49
14.3 Evaluer les résultats	50
Chapitre3 : Application sur un système énergétique basé sur un cycle de Rankine	
Introduction	53
1. Installation motrice à vapeur	53
2. Cycle de Rankine	53
2.1 Particularité énergie renouvelable	54
2.2 Domaines d'application du cycle de Rankine	55
2.3 Description du cycle de Rankine	55
2.4 Caractéristiques du cycle de Rankine	56
2.4.1 Avantages de cycle de Rankine	56
2.4.2 Inconvénients du cycle de Rankine	57
2.4.3 Ecart entre cycle de Rankine réel et idéal	57
3. Résolution du modèle	57
3.2. Résolution séquentielle	59
3.3 Exemple de quelques modèles	63
4. méthode de Newton Raphson	68

4.1 Historique	68
4.2 La méthode	68
Chapitre 4 : Résultats et discussion	
Résultats et discussion	70
Discussions des graphes	73
Conclusion générale	78
Référence bibliographique	80

Introduction générale

Introduction générale :

Il y'a une corrélation évidente entre la croissance de l'activité économique et la consommation d'énergie, car l'énergie est nécessaire à la réalisation de tout processus de production.

La révolution industrielle n'aurait pas été possible sans la disponibilité de sources d'énergie abondantes

L'utilisation de l'énergie contribue à l'amélioration des conditions de vie et de la qualité du travail : elle est au même titre que les technologies de l'information, un bien vital de la société d'aujourd'hui (Ph Busquin).

C'est pour cela il faut rationaliser l'utilisation des ressources énergétiques, d'abord par la rationalisation au fonctionnement d'une installation thermique et essayer de minimiser la consommation d'énergie en gardant un rendement maximum et améliorer la performance et la robustesse des installations thermiques, pour comprendre ceci, nous allons faire une modélisation thermo-économique d'un système énergétique industriel.

Objectif du projet :

Explorer les différentes possibilités de calcul énergétique d'une installation thermique et présentation d'une méthodologie d'optimisation thermo-économique avec étude de cas.

Ce mémoire est subdivisé en quatre chapitres :

Chapitre 1 : ce chapitre aborde les généralités sur les systèmes énergétiques industriels et leurs aspects techniques et économiques

Chapitre 2 : ce chapitre est consacré à une méthodologie de calcul d'un système énergétique industriel (différentes possibilités de calcul énergétique et critères d'optimisation)

Chapitre 3 : ce chapitre fait une application sur un système énergétique basé sur un cycle de Rankine (faire une hypothèse, choisir une méthode ou plus pour comparer, établissement des équations et choix des paramètres, etc).

Chapitre 4 : ce chapitre est réservé à la discussion des résultats obtenus d'une simulation sur Matlab.

Chapitre I

Généralités sur les systèmes énergétiques industriels et leurs aspects techniques et économiques.

Introduction

Un système énergétique industriel est composé de plusieurs équipements correspondant chacun à une transformation thermique du procédé.

Ce chapitre aborde des généralités sur un système énergétique industriel, sa modélisation et son optimisation, il parle aussi de la thermoéconomie.

1. Système énergétique industriel :

1.1 Généralité :

Nous entendons par système énergétique industriel tout procédé, partie de procédé ou ensemble des procédés qui procèdent par transformation de l'énergie dans l'objectif de produire soit une autre forme d'énergie soit des produits ou biens de consommation.

Les procédés concernés seront par exemple :

- Les procédés de production d'électricité. Plus de 80% de la production mondiale d'électricité (Figure I.1) est réalisée aujourd'hui par l'intermédiaire des systèmes de transformation thermique de la ressource énergétique utilisée.

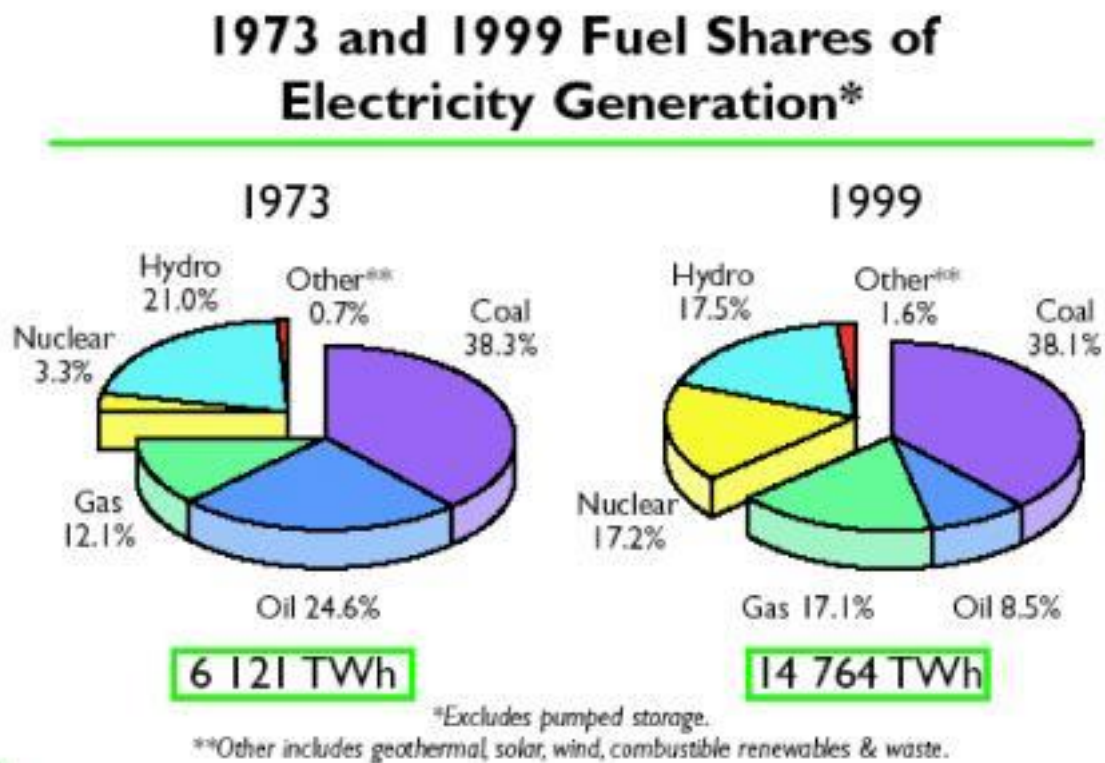


Figure I. 1: production d'électricité mondiale

- Les procédés de transformation de l'énergie : par exemple les pompes à chaleur, les procédés

Chapitre I: Généralités sur les systèmes énergétiques industriels et leurs aspects techniques et économiques

de production d'hydrogène, de gazéification.

- Les procédés chimiques et pétrochimiques.
- Les procédés de l'industrie agro alimentaire. la transformation de matières premières

Le point commun entre ces procédés dans la thermodynamique est la transformation de matières premières.

Ces procédés sont réalisés par différents équipements :

- échangeurs de chaleur, évaporateur, condenseur,
- colonne de distillation, cyclone, filtre, absorbeur,
- chaudière,
- turbine à gaz, moteurs
- compresseurs, turbines,
- réacteur, reformeur, ...

Chaque équipement réalise sa tâche par un ensemble de transformations d'état thermodynamiques : échange de chaleur, séparation, réaction, Les différentes opérations pouvant être fortement intégrées dans un même équipement. Pour un moteur on aura ainsi simultanément des réactions chimiques (combustion et production de polluants), diffusion et mélanges, un échange de chaleur et une détente .[1]

Tout ce système a besoin aussi d'un ensemble de support de production : eau, solvant, catalyseurs, ces derniers doivent aussi par le traitement, la distribution et leur recyclage par exemple le réseau d'eau chaude, filtres, nettoyage des filtres, régénération des catalyseurs,.....

Dans les procédés industriels, les changements d'état thermodynamiques sont réalisés et facilités par un apport d'énergie de l'extérieur du système.

Celle-ci doit ensuite être transformée et distribuée sous la forme adéquate pour réaliser la transformation.

Elle le sera sous différentes formes :

électrique, mécanique, thermique,... L'ensemble des opérations de transformation de la ressource d'énergie en énergie utile pour les procédés sera regroupé dans un sous-système de transformation et de distribution de l'énergie.

Ce sous-système comprendra :

- chaudières,
- Turbines à gaz, moteurs à combustion, moteurs électriques,
- Distribution de vapeur, turbines vapeur,
- Pompe à **chaleur**, cycles de réfrigération

Chapitre I: Généralités sur les systèmes énergétiques industriels et leurs aspects techniques et économiques

- Réseau d'huile chaude,... .[1]

Ces matières premières et ces ressources d'énergie sont pas souvent disponibles, la solution se retrouve dans les émissions et les pertes, donc non seulement on protège l'environnement mais aussi on économise l'énergie ; les déchets de production seront souvent traités et peut être recyclés avant d'être rejetés.

Le système comprendra donc un ou plusieurs sous-systèmes de traitements de rejets.

Ce sous-système comprendra par exemple:

- Système de traitement des eaux usées
- Destruction des résidus de solvants
- Système de tamis et de filtration,
- Système de traitement des gaz : scrubber, filtres, systèmes catalytiques,... .[1]

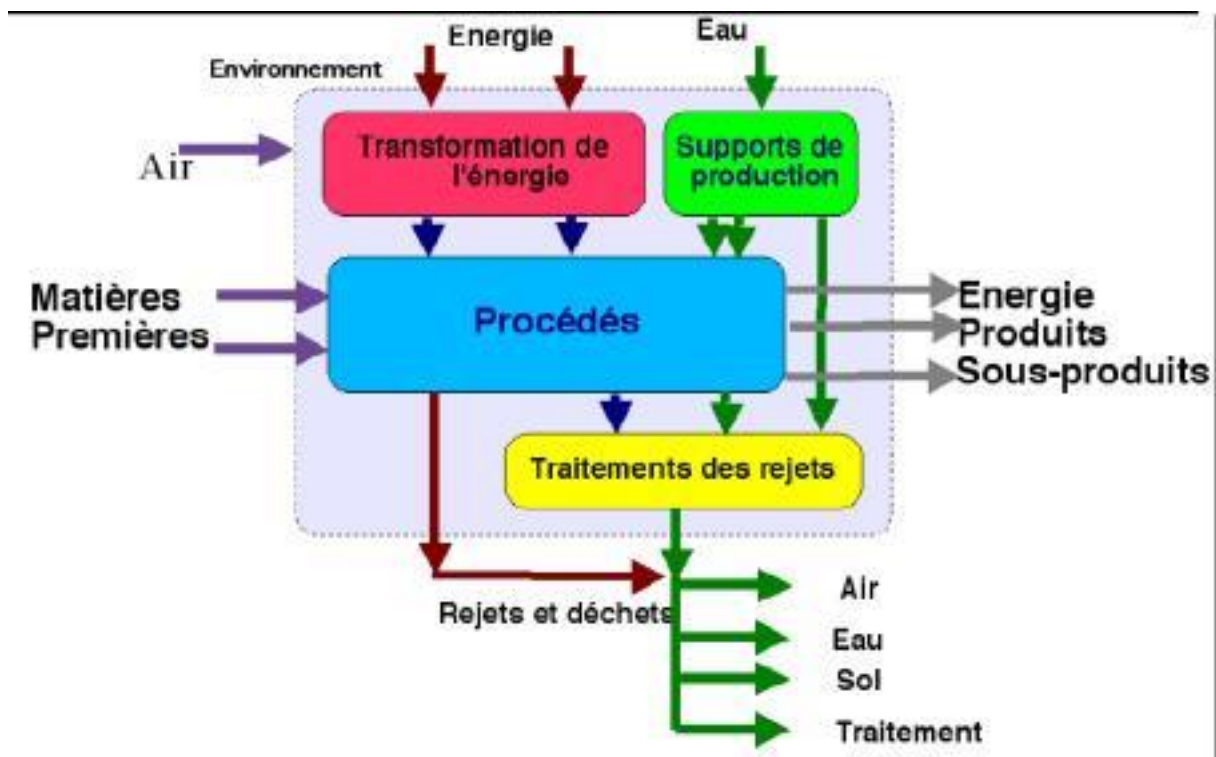


Figure I.2 Système énergétique industriel

Le critère économique qui définira le rendement financier de l'installation par une formule du type :

$$\text{Bénéfices} = \text{Revenus} - \text{Dépenses d'opération} - \text{Investissements}$$

Où Revenus : représente le résultat de la vente des produits et des sous-produits Dépenses

Chapitre I: Généralités sur les systèmes énergétiques industriels et leurs aspects techniques et économiques

d'opérations : représente l'ensemble des dépenses réalisées pour faire fonctionner l'installation à savoir, l'achat des matières premières, l'achat de l'énergie et des supports de production, les coûts des émissions et des déchets, les coûts de maintenances et les taxes ;

Investissements : représente l'immobilisation des moyens financiers requis pour acheter les équipements du système.

Bénéfices : représente les bénéfices de l'installation

L'ensemble de ces coûts devant bien sûr être exprimés dans des unités monétaires cohérentes (par exemple CHF (2002)/ans. [1]

Outre la performance économique qui est fortement dépendante de position économique de l'industriel opérant le système et de son contexte socio-économique, les ingénieurs utiliseront différentes expressions de la performance qui reposeront sur la connaissance des grandeurs thermodynamiques définissant l'état du procédé. On calculera ainsi des rendements énergétiques (énergie utile/énergie entrant), des rendements de matières (kg de produit/kg de matière première) ou des rendements exergetiques (exergie utile/exergie puisé dans les ressources).

Le calcul de ces rendements permettront aux ingénieurs de mieux maîtriser l'énergétique ou l'exégétique des procédés et de proposer des solutions d'amélioration des procédés en vue d'en augmenter les performances. [1]

Aux défis de la performance économique inhérente à l'utilisation d'un procédé industriel, s'ajoutent aujourd'hui d'autres défis relatifs au développement durable de notre société. Afin de répondre aux impératifs des accords de Kyoto qui visent sinon à réduire à tout le moins à stabiliser les émissions de CO₂, les industriels doivent aujourd'hui tenter de maximiser les performances des installations de production. A ce niveau, l'ingénieur a pour responsabilité de proposer des solutions qui réduiront les émissions sans un contexte de maximisation de l'efficacité et de maximisation des profits.

Dans ce contexte, les ingénieurs développent d'une part des concepts avancés de transformation d'énergie de plus en plus complexes faisant appel à des technologies de plus en plus évoluées. On citera par exemple les développements récents dans le domaine des piles à combustible ou des matériaux pour les turbines à gaz. D'autre part, ils tentent de valoriser au mieux les systèmes existants afin d'en augmenter les performances tant au niveau du rendement de conversion de l'énergie qu'au niveau de la diminution des émissions. [1]

La complexité des systèmes mis en oeuvre et la recherche de la valorisation optimale des matières premières et de l'énergie achetées ont conduit au développement de systèmes énergétiques fortement intégrés comme par exemple les systèmes de piles à combustibles ou les centrales de

Chapitre I: Généralités sur les systèmes énergétiques industriels et leurs aspects techniques et économiques

cycles combinés à gazéification du charbon intégrée. [1]

L'ensemble de ces systèmes ont comme point commun un fort niveau d'intégration visant à maximiser la conversion de l'exergie entrante.

Dans le domaine de la production d'énergie électrique, la tendance est aujourd'hui à l'utilisation de ressources énergétiques renouvelables (biomasse, déchets) ou de ressources de qualité moindre (charbon) qui présentent des difficultés supplémentaires : variabilité de la ressource, risques de pollutions, risques de pannes, ...

Face à toutes ses difficultés, l'outil de modélisation et d'optimisation joue un rôle primordial pour la maîtrise de la conception, de la conduite et de l'opération de tels systèmes.

La modélisation des systèmes énergétiques a pour objectif de représenter à l'aide d'un outil de mathématique le comportement d'un système énergétique afin de pouvoir en déduire ses performances et analyser l'impact des différents paramètres pouvant l'influencer. Cela implique que l'outil de modélisation devra permettre de calculer les états thermodynamiques des différents flux entrants, sortants mais également à l'intérieur de l'installation, de manière à pouvoir non seulement calculer la performance globale du système mais également les performances des différents équipements du procédé.

Par ses fonctions, l'ingénieur sera amené à prendre des décisions. Dans cette perspective, l'outil de modélisation permettra de tester l'impact de ces décisions sans avoir recours à l'expérimentation qui peut parfois se révéler très coûteuse.

L'outil de modélisation se révélera d'autant plus utile lorsqu'il sera utilisé pour tester des décisions concernant la conception du système puisque dans ce cas, il n'existe de système expérimental. [1]

L'optimisation aura pour objectif de déterminer les meilleures décisions à prendre en vue d'améliorer au mieux les performances du système. Dans cette perspective, la modélisation permettant de calculer les performances du système sera ainsi le compagnon naturel de l'optimisation.

De nos jours, les outils d'optimisation seront utilisés tout au long de la durée de vie d'un système énergétique industriel: de la conception jusqu'au démantèlement:

- Dans le travail de recherche et développement (R&D), les ingénieurs utiliseront la modélisation et l'optimisation pour identifier les meilleures zones opératoires pour les expériences, pour concevoir les plans d'expérience, exploiter les résultats de mesure, estimer les changements d'échelle (passage d'une installation pilote à une installation industrielle),...

Chapitre I: Généralités sur les systèmes énergétiques industriels et leurs aspects techniques et économiques

- Pour la conception, les ingénieurs utiliseront les outils de modélisation et d'optimisation pour déterminer la configuration du système ,déterminer la taille optimale des équipements , déterminer les meilleures conditions opératoires, concevoir le système de contrôle et concevoir des stratégies de conduite optimale , estimer des impacts environnementaux , évaluer les aspects de sécurité et de fiabilité,...
- Les outils de modélisation seront ensuite utilisés lors du montage et la réception de l'installation. On utilisera les modèle pour vérifier les performances, vérifier des spécifications,...
- L'opération d'un procédé sera bien sûr optimisée. Ceci se fera tout d'abord par la prédiction et suivis des performances du procédé et des équipements, adaptation des consignes de conduite, planification, maintenance prédictive, optimalisation en ligne, model-based control, ...
- Les outils de modélisation et d'optimalisation seront ensuite utilisés pour optimiser les investissements de mise à niveau de l'installation : études de retrofit, augmentation de capacité,..
- Les outils de modélisation seront enfin utilisés pour concevoir le démantèlement de l'installation de la manière la plus appropriée.[1]

1.2 Problèmes et limites :

Il n'est pas évident de définir des limites homogènes pour les différents systèmes énergétiques à comparer. La question se pose en particulier de savoir jusqu'où il convient d'étendre la prise en compte des flux de matière et d'énergie indiqués dans la figure 8.1. Faut-il, par exemple, englober les activités associées à l'approvisionnement en ressources nécessaires à la construction et à l'exploitation des installations concernées ? Toutes ces étapes impliquent des besoins en matières et énergie ; on peut néanmoins admettre que plus on s'éloigne du processus même de production d'énergie électrique, plus les impacts que l'on peut raisonnablement associer à cette production tendent à diminuer. Quoiqu'il en soit, cela montre la nécessité de s'entendre, pour des raisons de compatibilité, sur des limites bien précises, même si elles sont en dernière analyse définies de manière quelque peu arbitraire.

On a déjà signalé qu'il est indispensable dans les évaluations comparatives de filières d'électricité d'indiquer précisément la cadre géographique dans lequel celles-ci s'inscrivent. De nombreux paramètres peuvent différer fortement d'un pays à l'autre, ou tout au moins d'une région du monde à une autre ; les résultats obtenus dans un contexte géographique donné ne peuvent par conséquent pas être transposés sans autre pour obtenir des indications valables dans un environnement différent. Les différences entre les pays en ce qui concerne le niveau de développement technologique, les règlements concernant la sécurité et la protection de l'environnement, les

densités de population dans le voisinage des installations, les pratiques en matière de transport et les distances à parcourir, ainsi que d'autres facteurs locaux rendent hasardeuse l'application hors contexte des résultats d'une évaluation comparative faite pour pays donné. Il est assez rare en outre que la totalité du cycle du combustible se trouve sur territoire d'un même pays. Les étapes de l'extraction et, partiellement, du transport s'effectuent par exemple très souvent dans d'autres pays que ceux dans lesquels ont lieu la production et l'évacuation des déchets. Le cycle de vie est ainsi réparti sur plusieurs pays et, de ce fait, les impacts et les nuisances directes pour le pays directement bénéficiaire de la technologie peuvent être très inférieures à ceux correspondant à l'ensemble du cycle. La question se pose alors de savoir comment distribuer ces impacts et nuisances entre les différents pays concernés et comment prendre en compte, dans une évaluation comparative effectuée pour un pays donné, les effets négatifs engendrés dans d'autres pays.

Pour qu'une évaluation comparative soit pertinente et crédible, il est en outre nécessaire de considérer des systèmes énergétiques dont le niveau de développement technologique est, au minimum, similaire. Dans cette optique, il semble raisonnable de définir des systèmes sur la base de leur développement actuel ou du moins sur la base d'hypothèses cohérentes de développement futur. Il est en effet généralement difficile d'anticiper les progrès à venir des systèmes énergétiques et l'implication de ces évolutions sur les critères pris en compte.[2]

1.3 Efficacité énergétique :

Tout processus de production d'électricité met en jeu la conversion de ressources en énergies primaires, d'une manière qui se doit aussi efficace que possible du point de vue énergétique tout en respectant les contraintes techniques et économiques ainsi que les normes établies concernant les atteintes acceptables à la santé et à l'environnement (concept du développement durable).

Pour les techniques fondées sur l'utilisation de cycles thermodynamiques, on définit l'efficacité énergétique comme étant l'énergie électrique produite par unité d'énergie primaire fournie sous forme de combustible. Cette énergie primaire se détermine généralement sur la base du pouvoir calorifique inférieur, ou PCI, pour les combustibles fossiles, et de l'énergie thermique libérée par ficelle utilisée pour les combustibles fossiles, c'est plutôt dans ce dernier cas sur le potentiel énergétique de la masse de matière fissile présente dans le combustible que devrait être basé le calcul de l'efficacité énergétique d'une centrale nucléaire, il est cependant difficile de lui donner une valeur bien précise, indépendante de l'utilisation qui en sera faite ultérieurement. [2]

1.4 Coefficient de retour énergétique :

La quantité d'énergie qui doit être investie pour construire et maintenir en service les installations destinées à la production d'énergie électrique d'une filière donnée, en particulier l'énergie qui est nécessaire pour fabriquer les équipements de captage, de transformation, et la mise à dispositions des combustibles, etc., est évidemment un critère important pour juger de l'intérêt énergétique de la filière en question. On peut sur ce point comparer entre elles les différentes filières en évaluant leur coefficient de retour énergétique, défini comme étant le rapport l'énergie électrique totale produite durant toute la durée de vie de l'installation à l'énergie cumulée qu'il a fallu investir pour permettre cette production. L'évaluation de ce critère peut en principe être effectuée sur la base d'une analyse de cycle de vie, en recensant les quantités de matériaux nécessaires pour réaliser ces équipements et en estimant l'énergie dépenser pour produire une masse unité des matériaux en question. Les données correspondantes ne sont cependant pas faciles à déterminer dans la pratique ; des nombreuses hypothèses, souvent discutables, doivent être faites, comparaison d'énergie de formes différentes (électrique d'un côté, primaires de l'autre), sur la définition des frontières des systèmes en cause ou sur les conditions de fabrication des matériaux et éléments considérés par exemple. L'énergie nécessaire au démantèlement des installations n'est en outre en règle générale pas prise en considération. Les coefficients de retour énergétique donnés dans le tableau 8.5 sont basés sur des évaluations faites par la maison Siemens, ainsi que par le laboratoire de systèmes énergétiques (LASSEN) de l'Ecole polytechnique fédérale de Lausanne et l'Institut Paul Scherrer (PSI-Villigen).

A défaut de données plus précises, on peut estimer que les filières à pétrole et à gaz devraient avoir des coefficients de retour énergétique proches de ceux attribués aux centrales au charbon (hypothèse probablement assez raisonnable en ce qui concerne les unités de production elles-mêmes, mais peut-être plus discutable pour les parts d'énergie liées aux opérations en amont ou en aval des cycles des combustible) [2]

1.5 Comparaison des impacts environnementaux des différentes filières de production d'électricité :

L'évaluation et la comparaison des effets sur l'environnement des différentes filières posent un certain nombre de problèmes : les relations d'interdépendance entre le temps et l'espace ne sont pas entièrement connues et sont difficiles à ramener à une échelle commune à des fins de comparaison ; les liens entre l'exposition et les dommages sont dans bien des cas mal établis et

peu précis : enfin, le fait que des activités, des émissions et des effluents divers ont des incidences variables sur des cibles différentes rend très ardue la définition d'un critère commun en fonction duquel évaluer et comparer les effets.

Pour qualifier valablement l'importance des rejets polluants, il faut prendre en compte aussi bien les quantités de substances polluantes émises que l'intensité des effets nocifs qu'elles peuvent produire. Une manière simple de tenir compte de ces deux aspects est de calculer le volume de dilution par unité d'énergie produite, quotient de l'émission spécifique (en kg par kWh) de la substance polluante considérée par la valeur limite d'immission fixée pour celle-ci dans les lois et ordonnances, par exemple l'Ordonnance fédérale sur la protection de l'air.

Les valeurs limites d'immissions indiquent les quantités de polluants tolérées dans l'air (en mg/m^3) ; ces concentrations sont considérées comme sans danger pour l'homme, les animaux et les plantes. Le volume de dilution ainsi défini donne par conséquent une évaluation de la quantité d'air qui serait nécessaire pour diluer à la source la quantité de polluant émise par unité d'énergie produite jusqu'à une concentration jugée non dangereuse. [2]

1.6 Définition de l'exergie :

L'exergie d'un système dans des conditions (T, S, U...) données correspond au travail utile maximal que ce système pourrait fournir en rejetant l'énergie thermique inutilisée dans un réservoir d'énergie thermique (RET) de référence à T_0 et p_0 et ceci jusqu'à ce que ce système soit parfaitement relâché et en équilibre avec ce RET. L'exergie dépend du choix du RET de référence : on dit que c'est une fonction d'état extrinsèque du système.

La théorie de l'exergie a pour objet de développer une méthode d'analyse intégrée qui englobe les deux premiers principes de la thermodynamique, et permette ainsi de tenir compte à la fois des quantités d'énergie mises en jeu et de leur qualité, ce que le premier principe ne permet pas de faire. Son intérêt est qu'elle fournit un cadre tout à fait rigoureux pour quantifier la qualité thermodynamique d'un système quelconque, ouvert ou fermé, en régime dynamique ou non.

Le premier à avoir introduit cette notion est G. Gouy, qui, à la fin du XIXe siècle, a défini la notion d'énergie utilisable, aujourd'hui rebaptisée exergie par de nombreux auteurs. L'idée de base est de considérer qu'un système thermodynamique interagit avec son environnement, lequel se comporte comme un réservoir infini à *température* et pression constantes et de composition fixée, ce qui signifie que le système étudié est suffisamment petit devant cet environnement pour ne pas le perturber.

Cet environnement servira par exemple de source froide pour un cycle moteur, ou de source chaude pour un cycle de réfrigération. Étant donné que l'état de l'environnement conditionne les performances du système étudié, la théorie de l'exergie permet d'en tenir compte implicitement lorsqu'on cherche à les calculer. [3]

1.6.1 RENDEMENT EXERGÉTIQUE :

L'exergie permet de définir rigoureusement la notion de rendement d'une installation, et donc de quantifier sa qualité thermodynamique : c'est le rapport des utilisations exergétiques aux ressources exergétiques. Il est toujours compris entre 0 et 1, et d'autant plus élevé que les irréversibilités sont faibles. Les ressources exergétiques correspondent à la somme de toutes les exergies que l'on a dû fournir au cycle en provenance de l'extérieur. Les utilisations exergétiques représentent le bilan net du cycle, c'est-à-dire la somme algébrique des exergies produites et consommées en son sein. [3]

2. Thermoéconomie: généralités :

Les méthodes d'intégration énergétique des systèmes thermiques s'inscrivent dans le contexte actuel de préservation des ressources et de rationalisation de la production et de l'utilisation de l'énergie. Parmi elles, la thermoéconomie [Tribus, 1956, Evans, 1961, Gaggioli, 1977, von Spakovsky, 1994, Frangopoulos, 1994, Tsatsaronis and Pisa, 1994, Valero et al., 1994, El-Sayed, 1989, Olsommer et al., 1997, Curti, 1998, Pelster, 1998] est l'approche visant à combiner les principes énergétiques et les principes économiques pour pouvoir prendre des décisions rationnelles pour la configuration, pour le dimensionnement et pour le fonctionnement des systèmes énergétiques. La méthode d'optimisation thermoéconomique consiste à formuler l'objectif à atteindre (minimiser les coûts, par exemple) sous la forme d'une fonction mathématique (fonction objectif, notée F) soumise à différentes contraintes (faisabilité technique ou de fonctionnement par exemple). La fonction est optimisée dans tout l'espace par rapport à ses variables d'optimisation (variables indépendantes, notées \mathbf{z}) en recourant à des algorithmes mathématiques. Mathématiquement, les contraintes s'expriment sous forme de contraintes d'égalité (notées \mathbf{h}), représentant les liens de causalité du système ou certaines conditions particulières, ou sous la forme de contraintes d'inégalité (notées \mathbf{g}), caractérisant certaines limites ou restrictions. A ces relations mathématiques peut encore être ajouté un ensemble de relations logiques (notées \mathbf{L}). Ces dernières sont formulées sous la forme de propositions logiques, exprimées au moyen d'"implications", de "et", "ou" et "ou exclusif". Finalement, le vecteur des variables indépendantes et le système d'équations défini par l'ensemble des contraintes et

expression logiques (\mathbf{h} , \mathbf{g} , \mathbf{L}) détermine univoquement les inconnues du problème (appelées vecteur des variables dépendantes, noté \mathbf{y}). [4]

2.1. Méthode de modélisation et d'optimisation thermoéconomique :

La méthode de modélisation et d'optimisation thermoéconomique développée dans ce travail est une approche générale permettant, lorsque la dépendance temporelle intervient, de répondre simultanément et de façon rationnelle aux questions fondamentales: (i) quand investir et réinvestir, (ii) comment et combien de composants choisir, comment les dimensionner et les connecter entre eux, (iii) comment opérer les différents paramètres de réglage. La démarche proposée se compose de trois étapes. La première (i) consiste à déterminer une super configuration du système regroupant un nombre fini d'alternatives susceptibles de répondre de façon satisfaisante au cahier des charges. Le modèle thermoéconomique est ensuite formulé (ii). Il se compose principalement du modèle économique (fonction objectif, coûts du système et paramètres économiques), des paramètres d'optimisation (variables indépendantes, contraintes) et du **modèle** thermodynamique. Ce dernier est constitué d'un modèle pour le dimensionnement du système et d'un modèle pour le fonctionnement (charges partielles). Le problème peut ensuite être résolu (iii) au moyen d'un algorithme mathématique. [4]

2.1.1. Le modèle thermodynamique :

Le modèle thermodynamique exprime à la fois les liens de causalité du système énergétique, et certaines conditions particulières, comme par exemple certaines prestations que le système doit remplir. Ils représentent les contraintes d'égalité du modèle thermodynamique . Le modèle permet également d'exprimer certaines limites d'utilisation du système ou autres restrictions (contraintes d'inégalité), et d'exprimer des expressions logiques.

Le but du modèle thermodynamique est de pouvoir décrire le comportement du système (efficacités, débits, températures, pressions, etc.). Une façon d'y parvenir efficacement est d'avoir recours à une approche modulaire qui confère une certaine structure au modèle.

2.1.2. Le modèle économique :

De la même façon que le modèle thermodynamique permet de prédire le comportement physique du système, le modèle économique traduit ses performances économiques. Sans vouloir systématiser la modélisation du système économique, le modèle économique est caractérisé par les coûts associés au système.

Ils se composent principalement des coûts liés à l'achat et à la construction du système, des coûts engendrés par les flux d'énergie et de matière entre le système et l'extérieur, des coûts liés à l'exploitation et à la gestion financière du système . Ces coûts s'inscrivent dans des conditions

Chapitre I: Généralités sur les systèmes énergétiques industriels et leurs aspects techniques et économiques

cadres, déterminées par certains paramètres financiers, comme les taux d'intérêt, les taux de changes, les coûts unitaires des matières premières et des produits, etc. Les coûts s'expriment en fonction des variables dépendantes (y) et indépendantes (z) du système au moyen de relations mathématiques (contraintes d'égalité). Certaines restrictions économiques d'utilisation peuvent être exprimées sous forme de contraintes d'inégalités ou d'expressions logiques. Le modèle économique, et spécialement les fonctions exprimant les coûts du système sont validées selon les procédures habituelles (bases de données du marché et/ou d'études paramétriques systématiques).

[4]

2.1.3. Objectif calcul thermo-économique :

Estimer la grandeur d'un investissement Calculer sa rentabilité :

- Investissement
- Bénéfices
- Coût total

Exemple : achat d'un échangeur pour économie d'énergie

- Investissement
- Echangeur de chaleur
- Installation
- Fondation
- Connexions (tuyauteries)
- Contrôle
- Financement
- Opération
- Achat d'énergie (production)
- Maintenance[5]

Chapitre2

Méthodologie de calcul d'un système énergétique industriels (différentes possibilités de calcul énergétique et critères d'optimisation).

Chapitre II: Méthodologie de calcul d'un système énergétique industriels (différentes possibilités de calcul énergétique et critères d'optimisation).

Introduction :

La modélisation d'un système énergétique représente son comportement à l'aide d'un outil mathématique .

Cette modélisation a pour but de déduire les performances et faire une analyse sur les impacts des paramètres pouvant influencer ce système énergétique.

L'optimisation d'un système détermine les meilleures décisions pour améliorer les performances du système.

3. La modélisation :

Comme nous venons de le voir, un modèle doit permettre de calculer et de caractériser les transformations d'états thermodynamiques qui ont lieu dans un procédé. Cela suppose la transcription sous forme de modèle mathématique du comportement de l'installation et de ses limites de fonctionnement. Si nous considérons le système énergétique dans son ensemble, le modèle mathématique sera un opérateur qui transformera les valeurs d'entrée en valeurs de sortie(Figure II.1).

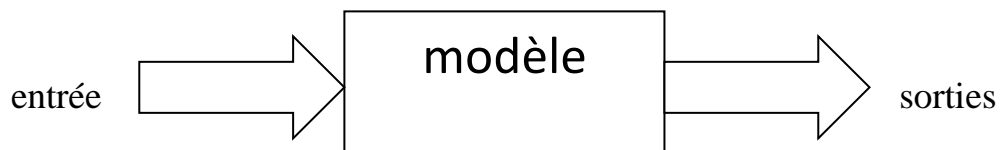


Figure II. 1 : modèle = transformateur mathématique

Pour la modélisation, il convient de faire une distinction entre les entrées matières et les entrées d'information. Enfin, une entrée matière d'un procédé peut être une sortie d'information car elle résulte d'un calcul par le modèle. Ce sera par exemple le cas du débit de combustible qui est calculé pour fournir une demande de chaleur donnée.

Les entrées d'un modèle seront les spécifications : les demandes que le système doit satisfaire, les caractéristiques des matières premières et des ressources, les caractéristiques de l'environnement dans lequel le système doit s'intégrer (par exemple, la température et la pression ambiante, la température de l'eau de refroidissement, les données économiques, etc...), ainsi que les spécifications du marché : qualité des produits et des sous-produits, limites d'émissions.

Les sorties seront les productions demandées, les émissions et les déchets de la fabrication (par exemple l'énergie dégradée sous différentes formes et les polluants), le coût d'opération de l'installation, la taille requise pour les appareils, etc...

Chapitre II: Méthodologie de calcul d'un système énergétique industriels (différentes possibilités de calcul énergétique et critères d'optimisation).

En plus des valeurs qui caractérisent les performances du système par rapport à l'extérieur, le modèle permettra également d'obtenir la valeur des variables qui caractérisent l'état du système.

De manière générique, le modèle mathématique du système peut se représenter par :

$$X_{\text{sortie}} = F(X_{\text{entrée}}) \quad (1)$$

Avec X_{sorties} la valeur des variables qui définissent les sorties.

$X_{\text{entrées}}$ la valeur des variables qui définissent les entrées.

En général, la complexité du modèle fait qu'il n'est pas facile d'obtenir une forme explicite pour le modèle du système qui sera décrit de manière générale par un système d'équations à résoudre:

$$F(X_{\text{entrées}}, X_{\text{état}}) = 0 \quad (2)$$

Avec $X_{\text{état}}$: les variables qui caractérisent l'état du système .

Les variables X_{sortie} ne représentent qu'un sous-ensemble des variables $X_{\text{état}}$.

Un système énergétique industriel peut être représenté conceptuellement un ensemble de boîtes interconnectées (Figure II.1)

Chapitre II: Méthodologie de calcul d'un système énergétique industriels (différentes possibilités de calcul énergétique et critères d'optimisation).

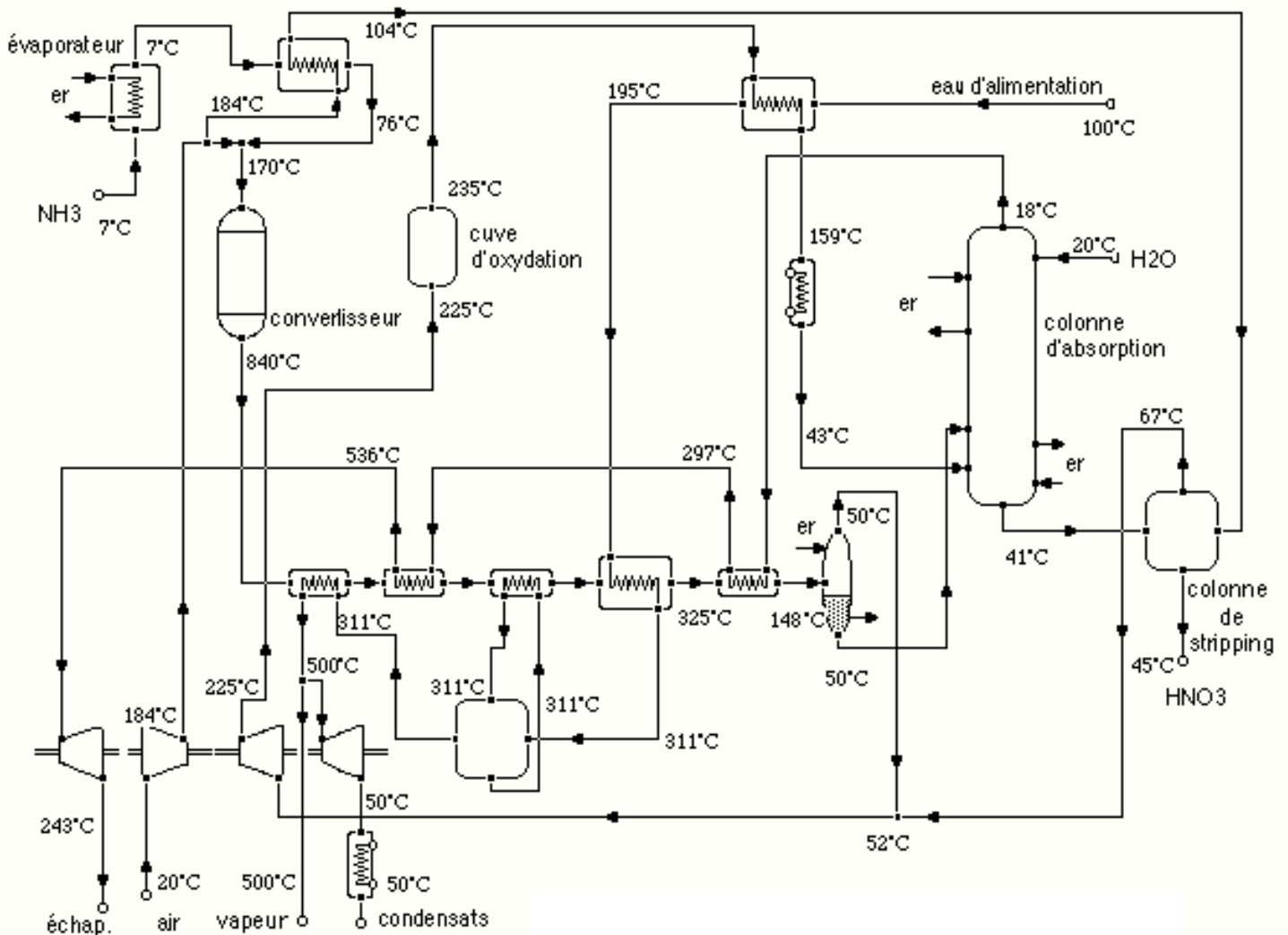


Figure II.2 : Exemple de flowsheet d'un procédé d'acide nitrique .[6]

Les interconnexions représentent des flux qui relient les boîtes entre elles.

Chaque boîte, que nous appellerons dans la suite unités opératoires représente un opérateur mathématique (modèle) qui transforme l'état des flux qui lui sont connectés. Cet opérateur mathématique représente les transformations thermodynamiques par les phénomènes physiques et chimiques qui ont lieu dans l'unité. L'opérateur mathématique représentera ainsi les bilans de matière et d'énergie ainsi que la formulation mathématique de la transformation thermodynamique qui se passe dans l'unité : transfert de chaleur, transfert de matière, réaction chimique, détente, compression,...

Chapitre II: Méthodologie de calcul d'un système énergétique industriels (différentes possibilités de calcul énergétique et critères d'optimisation).

Chaque connexion entre deux unités définit un flux dont l'état permet de caractériser la matière et/ou l'énergie qu'il transfère d'une unité à une autre.

Dans un système énergétique, on distinguera différents types de flux :

Les flux de matières qui représentent l'écoulement de la matière dans les tuyaux du procédé ;

Les flux de chaleur qui représentent les transferts de chaleur ;

Les flux mécaniques qui représentent les transferts de travail ;

Les flux électriques qui représentent les transferts de puissance électrique ;

Les flux d'information pourront être utilisés pour représenter les boucles de contrôle .

Le modèle d'un tel système comprendra trois types de relations : les relations de transfert qui représentent le transfert de l'information entre les unités et représentent dès lors la manière dont les unités sont interconnectées. Ces relations indiquent par exemple que le flux en sortie du compresseur entre dans l'échangeur qui le suit les relations de modélisation des unités qui représentent mathématiquement les bilans de matières et de chaleurs ainsi que les transformations physique et chimiques qui ont lieu dans l'unité.

Les relations de liaison thermodynamique qui lient entre-elles les variables d'état qui caractérisent les flux de matière.[6]

4. Le modèle :

Un modèle est un assemblage de modules (unités) interconnectés.

Chaque module apportera les équations qui modélisent de manière générique son fonctionnement; ces équations seront appelées équations de modélisation.

On peut représenter schématiquement une unité (ou module) par la Figure II.3 .

Chapitre II: Méthodologie de calcul d'un système énergétique industriels (différentes possibilités de calcul énergétique et critères d'optimisation).

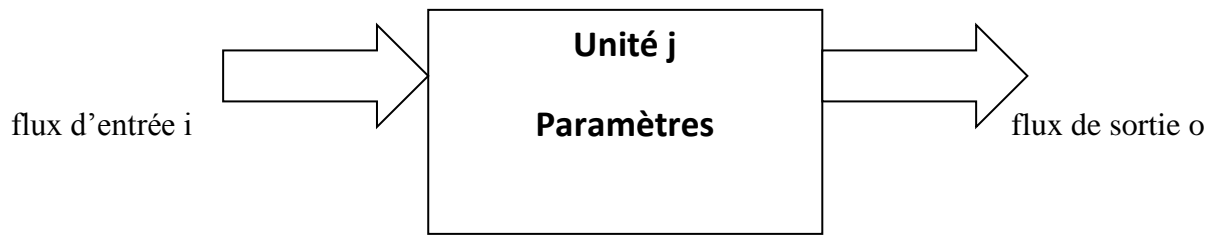


Figure II. 3 : représentation schématique d'une unité.

Les équations de modélisation constitueront un ensemble d'équations

$F(X_{\text{état}})=0$ qui seront classées en différents groupes :

- les bilans de matière;
- les bilans de chaleur;
- les bilans d'impulsion;
- les équations de dimensionnement qui définissent le fonctionnement de l'unité.

Les équations de modélisation de l'unité j définissent un sous-ensemble de la matrice $F(X_{\text{état}})=0$ soit :

$$F_j(X_{\text{état}},j)=0$$

Où : $X_{\text{état},j}=(m_{ij},p_{ij},h_{ij},m_{oj},p_{oj},h_{oj},par_j)$.

Avec

m_{ij} le débit du flux d'entrée i de l'unité j ;

p_{ij} la pression du flux d'entrée i de l'unité j ;

h_{ij} l'enthalpie molaire du flux d'entrée i de l'unité j ;

m_{oj} le débit du flux de sortie o de l'unité j ;

p_{oj} la pression du flux de sortie o de l'unité j ;

h_{oj} l'enthalpie molaire du flux de sortie o de l'unité j ;

par_j les paramètres de l'unité j .

Chapitre II: Méthodologie de calcul d'un système énergétique industriels (différentes possibilités de calcul énergétique et critères d'optimisation).

La connexion de deux modules définit les variables Xétat qui sont partagées par les deux modules ($d_{ij}=d_{ok}$ si le flux d'entrée i de l'unité j est le flux de sortie o de l'unité k). En décrivant les interconnexions entre les module, nous obtenons un ensemble d'équations et de variables qui réalisent la modélisation du système. [6]

Le nombre d'équation de modélisation (m) est inférieur au nombre de variables Xétat(n).

Nous appellerons nombre de degré de liberté n_{DDL} la différence entre le nombre se variables d'état et celui des équations du modèle :

$$n_{DDL}=n-m$$

avec

n le nombre de variables qui définissent l'état du système ;

m le nombre d'équations de modélisation.

Afin de définir l'état du système , il convient de fixer la valeur de n_{DDL} variables d'état .

Pour ce faire , nous allons ajouter n_{DDL} équations que nous allons répartir en deux ensembles :les équations de spécification et les équations de consigne .

Les équations de spécification définissent les conditions que le système doit satisfaire :

les équations extérieures :

- Caractéristiques des combustibles,
- Température ambiante,
- Spécification du marché, etc.....

l'état des éléments constituant l'installation :

- Encrassement des échangeurs ,
- Rendement de détente ,
- Courbes caractéristiques des pompes et compresseurs ,etc...

les demandes que doivent satisfaire le procédé :

- Puissance mécanique des turbines ,
- Températures à la sortie des échangeurs ,etc...[6]

Chapitre II: Méthodologie de calcul d'un système énergétique industriels (différentes possibilités de calcul énergétique et critères d'optimisation).

L'état des éléments constituant le système sera déterminé par identification paramétrique sur base d'un ou de plusieurs jeux de mesures qui auront été rendus cohérents par un calcul de validation.

Moyennant une identification adéquate des variables d'état, les équations de spécification peuvent être écrites sous la forme simple :

$$\mathbf{S}(\mathbf{X}_{\text{état}}) = \mathbf{0} [\mathbf{S}_i(\mathbf{X}_{\text{état}}) : \mathbf{X}_i - \mathbf{V}_{si} = \mathbf{0}, i=1, \dots, n_s] \quad (3)$$

Avec

$\mathbf{S}(\mathbf{X}_{\text{état}})$ = le vecteur des équations de spécifications,

$S_i(\mathbf{X}_{\text{état}})$: l'élément i du vecteur \mathbf{S} qui définit la spécification i ,

X_i : la variable d'état correspondant à la spécification i ,

V_{si} la valeurs de spécification i ,

n_s le nombre de spécifications .

Les équations de consigne portent sur les variables dont l'ingénieur peut manipuler la valeur afin d'optimiser les performances du procédé .

La valeur des consignes résulte d'une commande de l'ingénieur.

Les variables concernées par les consignes seront appelées variables de décision .

Elles seront au nombre n_c qui représente le nombre de degrés de liberté réel du procédé.

Tout comme les équations de spécification, les équations de consignes prendront la forme :

$$\mathbf{C}(\mathbf{X}_{\text{état}}) = \mathbf{0} [\mathbf{c}_i(\mathbf{X}_{\text{état}}) : \mathbf{x}_i - \mathbf{v}_{ci} = \mathbf{0}, i=1, \dots, n_c] \quad (4)$$

avec

$\mathbf{C}(\mathbf{X}_{\text{état}})$ le vecteur des équations de consigne i ,

$c_i(\mathbf{X}_{\text{état}})$ l'élément i du vecteur \mathbf{C} qui définit la consigne i ,

x_i la variable d'état correspondant à la valeur de commande i ,

v_{ci} la valeur de la consigne i ,

n_c le nombre de variables commande .

Chapitre II: Méthodologie de calcul d'un système énergétique industriels (différentes possibilités de calcul énergétique et critères d'optimisation).

pour que le système soit calculable , il faut que :

$$nDDL = n_c + n_s \quad (5)$$

cette condition est nécessaire mais pas suffisante , car il faut en plus en plus que les équations $F(X_{\text{état}})$, $S(X_{\text{état}})$ et $C(X_{\text{état}})$ soient indépendantes et que le système soit calculable.

Il peut se faire qu'en plus de la connaissance des variables d'état, certaines valeurs indicatrices soient également nécessaires. Ces valeurs seront déterminées par des équations que nous appellerons équations de liaison .

Chacune de ces équations correspond une variable supplémentaire .

Le système d'équations qui définit les variables de liaison constitue avec celles-ci un système carré qui peut être calculé une fois que la valeur des variables $X_{\text{état}}$ est connue.

Dans ce jeu d'équations , on trouve par exemple : le calcul du rendement de l'installation :

$$\text{Rendement} = (\text{prix de vente de ce qui sort}) / (\text{cout de ce qui entre}) \quad [6]$$

3. Définition du système :

Le rôle de l'énergie dans le système socio-économique a été au chapitre 1 c'est dans ce contexte que doit être abordé le problème de l'évolution de la demande d'énergie. Le système à étudier est en premier lieu défini par ses limites géographiques et temporelles. Le système socio-économique inscrit dans ces limites est constitué de l'ensemble des consommateurs en relation avec leurs activités économiques et sociales.

les méthodes d'analyse de l'évolution de la demande d'énergie sont très différentes selon qu'on s'intéresse au court, au moyen ou au long terme. Il importe en conséquence de bien respecter les domaines de validité de ces méthodes d'analyse. De façon générale cependant, toutes les méthodes reposent pour l'essentiel sur l'analyse de l'évolution enregistrée dans le passé. [7]

4. Variables explicatives :

Pour analyser l'évolution de la demande de l'énergie utile dans un système défini selon les indications du paragraphe précédent, on fait intervenir des variables explicatives x_i . Celles-ci rendent compte des influences qui s'exercent sur la consommation et déterminent son évolution. Ces variables explicatives peuvent être elles mêmes des fonctions du temps $x_i(t)$. On obtient donc

Chapitre II: Méthodologie de calcul d'un système énergétique industriels (différentes possibilités de calcul énergétique et critères d'optimisation).

l'expression de l'évolution temporelle de la demande énergétique $W(t)$ en exprimant cette dernière en fonction de ces variables explicatives. Ce changement de variables s'exprime par :

$$W = W(t) = W [x_1(t), x_2(t), \dots, x_n(t)]$$

Les variables explicatives peuvent également faire intervenir des événements antérieurs d'une durée τ au temps t de l'analyse et donc prendre dans ce cas une forme convolutive $x_i(t-\tau)$.

Les principales variables explicatives, qui ne dépendent guère du système considéré, sont les suivantes :

- Le prix,
- L'évolution démographique,
- L'évolution économique (macro- et micro-économie),
- L'évolution sociale,
- Le progrès technique,

auxquelles on peut rajouter tout autre paramètre susceptible de modifier la nature des besoins et leur intensité. [7]

5. Progrès technique :

Le progrès technique intervient, en tant que variable explicative de la demande d'énergie, généralement dans le sens d'une réduction de la demande spécifique d'énergie du fait de l'amélioration des performances. Dans certains cas cependant, par exemple la mise sur le marché de nouveaux équipements, le progrès technologique se traduit au contraire par une augmentation de la demande.

L'utilisation d'équipement consommateurs d'énergie permet par ailleurs d'augmenter considérablement la production par individu, c'est-à-dire sa productivité. Ce progrès sociétal se paie par une consommation plus importante d'énergie par individu. Ce phénomène, qui s'est d'abord développé dans les pays industrialisés, s'étend petit à petit à toutes les parties du monde.

On observe des phénomènes semblables du côté des consommateurs dont la qualité de vie (niveau et confort) est améliorée grâce au progrès technique des équipements qu'ils peuvent acquérir. [7]

Chapitre II: Méthodologie de calcul d'un système énergétique industriels (différentes possibilités de calcul énergétique et critères d'optimisation).

6. Méthodes d'analyse de l'évolution de la demande :

Comme indiqué plus haut, l'évaluation des besoins énergétiques futurs s'appuie essentiellement sur une analyse de la demande observée dans le passé.

Ces analyses de la demande d'énergie fournissent l'information indispensable pour estimer les quantités et formes d'énergies qui devront être fournies à l'avenir (niveaux de consommation et leur répartition dans le temps) et, dans un premier temps, pour gérer l'appareil de production existant (système d'offre) de manière à satisfaire la demande avec la fiabilité de service requise. A plus long terme, il s'agit d'adapter le système en question de manière à ce qu'il puisse répondre à l'évolution future probable de la demande. La réalisation de cet objectif implique de prendre suffisamment à l'avance les décisions concernant l'opportunité d'investissements ou d'ouvertures de nouveaux marchés.

L'analyse peut être effectuée :

- au niveau d'une entreprise ;
- par secteur de production homogène (ensemble d'entreprises appartenant à un même secteur et présentant des caractéristiques semblables en ce qui concerne la consommation d'énergie)
- pour un agent énergétique déterminé, par exemple : produits pétroliers ou électricité ;
- au niveau global (pays).

Les modèles mathématiques utilisées pour la prévision de la demande en énergie peuvent être classés en modèles statistiques, économétriques et de simulation technico-économique.

6.1 Prévision de la demande à court terme :

La prévision à court terme est utilisée pour gérer de la meilleure manière possible le système de production, de transport et de distribution d'énergie. Les séries chronologiques (consommations) utilisées, qui peuvent avoir comme unité temporelle le quart d'heure par exemple, sont souvent caractérisées par des fluctuations importantes autour d'une courbe lissée type.

Ces fluctuations sont dues aux variations du rythme des activités économiques, aux comportements des consommateurs en relation avec les modes d'utilisation de l'énergie, aux facteurs climatiques (température, humidité, couverture nuageuse). Les méthodes de prévision reposent fondamentalement sur l'analyse de séries temporelles, en pratique essentiellement par

Chapitre II: Méthodologie de calcul d'un système énergétique industriels (différentes possibilités de calcul énergétique et critères d'optimisation).

des approches statistiques (auto-projectives, de régression et mixte). Dans la mesure où l'on dispose de certaines informations de nature qualitative, on peut également recourir aux systèmes à base de connaissances (système experts) ou aux capacités d'apprentissage des réseaux neuronaux artificiels.

6.2 Prévision de la demande d'énergie à moyen terme :

La prévision de la demande d'énergie à moyen terme fait appel aux méthodes économiques ou technico-économiques. Quelques exemples des approches utilisées dans ce contexte sont présentés ci-dessous.

7. Méthode input-output :

La méthode input-output (I/O) est utilisée pour l'analyse des interactions entre les sous-secteurs de production dans le secteur industriel. Cette méthode peut être étendue à l'ensemble de l'économie dans des modèles dits d'équilibre général.

Dans cette approche, on considère la production industrielle représentée par un vecteur x dont les composantes x_i sont les productions des différents sous-secteurs industriels i . la méthode consiste à exprimer quantitativement, en valeurs monétaires, l'interdépendance qui existe entre ces différents sous-secteurs.

Ainsi, la production du sous-secteur i est utilisée d'une part pour fournir des contributions aux autres sous-secteurs industriels j pour assurer leur production propre (production intermédiaire) et d'autre part pour répondre à la demande finale du sous-secteur i lui-même.

Pour chaque sous-secteur i , la production x_i s'exprime ainsi par :

$$x_i = \sum_{j=1}^n (a_{ij}x_j + d_i)$$

avec

x_i : production du sous-secteur i [Sfr/an].

x_j : production du sous-secteur j [Sfr/an].

a_{ij} : part de la production du sous-secteurs j (production intermédiaire), utilisé dans le sous-secteurs i {-},

Chapitre II: Méthodologie de calcul d'un système énergétique industriels (différentes possibilités de calcul énergétique et critères d'optimisation).

d_i : demande finale du sous-secteur i (sans la part de production intermédiaire de ce secteur utilisée dans les sous-secteurs, autre que i , la demande des ménages et l'exportation) [Sfr/an].

En notation matricielle, la production industrielle s'exprime par :

$$X = A \cdot X + d$$

soit, en inversant la matrice :

$$x = (I - A)^{-1} \cdot d$$

Où A est la matrice des coefficients I/O, c'est-à-dire des coefficients qui définissent les relations d'interdépendance entre les sous-secteurs industriels, et I la matrice unitaire.

Dans certains pays, qui disposent de bases de données suffisantes (ex. : Etats Unis), la matrice A peut prendre en compte des échanges entre plus de 300 sous-secteurs.

Si l'on connaît pour chaque sous-secteurs i l'intensité énergétique e_i , c'est-à-dire la quantité d'énergie consommée par unité de valeur ajoutée, la demande énergétique W_i du sous-secteur i est donnée par :

$$W_i = x_i e_i$$

La demande en énergie de l'ensemble des sous-secteurs industriels s'écrit ainsi :

$$W = x^t \cdot e = [(I - A)^{-1} \cdot d]^t \cdot e$$

Rappelons qu'il convient d'être particulièrement prudent lorsque l'on procède à l'agrégation de différentes formes d'énergie, qu'il s'agisse d'agents énergétique différents, substituables les uns aux autres, mais avec des efficacités différentes, ou encore que l'on considère des formes d'énergie particulières, par exemple mécanique, thermique ou électrique dont les qualités et donc les valeurs ne sont pas directement comparables.

Par ailleurs, les incertitudes ou les imprécisions qui peuvent entacher certains coefficients de la matrice I/O se traduisent par des écarts considérables sur les résultats de l'analyse. La disponibilité et la précision de ces coefficients est un des problèmes ou limites d'application de l'approche *input-output*.

Une autre difficulté d'application de la méthode I/O réside dans la détermination de l'évolution de la demande finale des biens produits par le secteur i . Enfin, on remarquera que les

Chapitre II: Méthodologie de calcul d'un système énergétique industriels (différentes possibilités de calcul énergétique et critères d'optimisation).

équations ci-dessus sont algébriques et qu'elles établissent des relations linéaires entre les sous-secteurs. Les coefficients constants de la matrice I/O représentent les interdépendances entre sous-secteurs mesurées dans le passé, qui ne sont pas forcément valables dans l'avenir.[7]

8. Méthodes d'élasticité :

Dans les méthodes de prévision de la demande d'énergie à moyen terme sur l'élasticité, on admet qu'il existe une relation entre la demande d'énergie W , désagrégée suivant les différents agents énergétiques, et plusieurs variables explicatives u_i :

$$W(t) = f(u(t), \varepsilon)$$

L'élasticité ε de la demande est définie comme suit :

$$\varepsilon = \frac{\Delta W}{W} \cdot \frac{u}{\Delta u} = \frac{\text{variation relative de la variable expliquée (demande d'énergie)}}{\text{variation relative de la variable explicative}}$$

ou, en passant à la limite : $\varepsilon = \frac{dW}{W} \cdot \frac{u}{du}$ ou $dW = \varepsilon \cdot \frac{du}{u} \cdot W$

Ainsi, dans le cas où l'élasticité est une constante définie à partir des séries chronologiques (avec toutes les conséquences qu'une telle hypothèse implique), l'équation de la demande s'écrit :

$$\frac{dW}{W} = \varepsilon \cdot \frac{du}{u}$$

ou, en intégrant : $\ln W = \varepsilon \cdot \ln u + \ln k$, où k est une constante ; soit encore :

$$W = k u^\varepsilon$$

C'est le modèle exponentiel à élasticité constante.

Dans un tel modèle, on peut faire intervenir :

- Plusieurs élasticités directes de la demande par rapport à plusieurs variables explicatives,
- Des élasticités croisées (par ex. : demande de gaz par rapport à la variation relative des prix d'électricité).

Dans le cas où plusieurs élasticités de la demande interviennent, la variation relative de la variable expliquée satisfait à l'équation :

Chapitre II: Méthodologie de calcul d'un système énergétique industriels (différentes possibilités de calcul énergétique et critères d'optimisation).

$$\frac{dW}{W} = \sum_i \varepsilon_i \cdot \frac{du_i}{u_i}$$

avec

ε_i = élasticité relative à la variable explicative i ,

u_i = variable explicative i ,

En intégrant cette équation, on trouve : $\ln W =$

$$\ln W = \sum_i \varepsilon_i \cdot \ln u_i + \ln k$$

ou encore

$$W = k \prod_i u_i^{\varepsilon_i}$$

Pour obtenir l'évolution de la demande, il faut d'abord déterminer l'évolution dans le temps des variables explicatives. [7]

9. Méthodes de simulation :

Lorsque la demande d'énergie à moyen terme est caractérisé par de multiples évolution structurelles possibles du système, on fait appel à des technique de simulation susceptibles de couvrir un large spectre d'évolution différentes.

Dans ce but, différente scénarios sont élaborés. On cherche les consommateurs appartenant au système qui exercent une activité analogue et présentent un comportement énergétique similaire.

Ces groupes de consommateurs constituent des unités de consommation ou des modules homogènes dont la demande d'énergie peut être définie jusqu'au niveau des usages si le degré d'homogénéité est suffisant (ce qui implique la satisfaction simultanée de l'ensemble des critères d'homogénéité).

L'ensemble de ces modules doit constituer un système complet (au sens mathématique), c'est-à-dire que les juxtapositions de tous les modules doit représenter le système entier.

Chapitre II: Méthodologie de calcul d'un système énergétique industriels (différentes possibilités de calcul énergétique et critères d'optimisation).

L'analyse des modules a pour but de mettre en évidence les mécanismes de formation et d'évolution de la demande d'énergie. Ces mécanismes comportent des relations qui décrivent la manière dont les besoins d'énergie se constituent (intensité des besoins). Afin de tenir compte de l'évolution éventuelle du système d'offre au niveau des technologies d'utilisation finale, la demande d'énergie est exprimée en énergie utile, c'est-à-dire en termes de prestation et pas seulement en quantité d'énergies distribuées en amont de l'utilisation. [7]

On simule ensuite l'évolution du système, en analysant chaque module sur la base d'hypothèses d'évolution des paramètres définissant les différents scénarios.

La méthode de simulation comporte ainsi les étapes suivantes :

- Identification des modules homogènes de consommation d'énergie dans le système étudié.
- Identification des facteurs sociaux, économique et technique qui agissent sur le demande d'énergie de chaque module.
- Définition des relations mathématiques qui lient la consommation d'énergie dans les modules aux facteurs explicatifs de cette demande.
- Définition de scénarios d'évolution de ces facteurs.
- Calcul de la consommation d'énergie du système pour chaque scénario en s'appuyant sur les relations mathématiques établies plus haut.

Une série de critères peut être utilisé pour définir les modules homogènes. [7]

10. Les variables d'état :

Les variables d'état des flux de matières :

De manière générale, la matière transférée se caractérise par deux informations: d'une part des variables extensives (le débit ou les débits partiels) et d'autre part, la composition (intensive). Pour caractériser l'énergie transférée, plusieurs variables peuvent être utilisées : la pression, la température, l'enthalpie totale, l'enthalpie molaire ou massique , l'entropie,...

D'un point de vue thermodynamique , un flux de n_x sera complètement caractérisé en fixant la valeur de n_e variables extensives (avec $n_e \geq 1$) (par exemple le débit)

Et de $2+n_x-n_e$ variables intensives. Il sera ensuite possible de calculer à l'aide des équations d'état de la thermodynamique la valeur des autres variables . par exemple , un flux de vapeur(fluide mono- substance) sera entièrement caractérisé en fixant son débit et deux variables intensives qui

Chapitre II: Méthodologie de calcul d'un système énergétique industriels (différentes possibilités de calcul énergétique et critères d'optimisation).

permettent de caractériser son état thermodynamique : par exemple l'entropie et la pression. Par les relations thermodynamiques, les autres variables d'état pourront être calculées au départ de la valeur des deux variables choisies . [6]

Il convient de remarquer que le choix des variables indépendantes définissant l'état thermodynamique d'un fluide doit être réalisé de manière à s'assurer :

1. que les variables sont indépendantes (ce qui explique que l'on doit choisir au moins 1 variable extensive)
2. que les relations thermodynamiques permettent de représenter de manière bi-univoque l'état thermodynamique. Le choix de la température et de la pression comme variable d'état pour représenter l'état thermodynamique de l'eau n'est pas valable lorsque l'eau change de phase. A la pression de saturation, une même température correspond à plusieurs états enthalpiques (entre l'état liquide et l'état vapeur saturé) correspondant a des valeurs différentes de la fraction vaporisée. Lorsque le fluide change de phase il donc nécessaire de fixer une variable supplémentaire à la température, soit la fraction vapeur ou l'enthalpie pour pouvoir calculer l'état thermodynamique . [6]

les variables d'état des flux de chaleur :

Un flux de chaleur sera caractérisé par la quantité d'énergie transférée. Celle-ci est couramment exprimée par unité de temps définissant ainsi la puissance transférée. Dans certain cas, on pourra caractériser le flux de chaleur par son niveau de température, bien que cette définition ne soit pas généralisable et ne sera qu'indicative. [6]

Les variables d'état des flux de mécanique

Un flux mécanique sera caractérisé par la puissance et par la vitesse de rotation de l'arbre.

Les variables d'état des flux électrique

Par analogie, on définira un flux électrique par son intensité et son potentiel et ou la puissance.

Chapitre II: Méthodologie de calcul d'un système énergétique industriels (différentes possibilités de calcul énergétique et critères d'optimisation).

Les variables des modèles d'unité

Les paramètres des unités sont les variables qui décrivent l'état de fonctionnement de l'unité. Ce sera par exemple la pression de fonctionnement, la perte de charge, la puissance mécanique produite, la surface d'échange, ...

Comme nous le verrons dans la discussion des modèles d'unités, la définition des paramètres sera liée aux expressions des équations de modélisation.

Leur choix peut avoir un impact considérable sur la résolution du modèle. [6]

Quelles sont les variables d'état à utiliser

Les variables d'état seront utilisées pour le calcul des modèles. En raison du nombre de degrés de liberté de l'état concerné, il est important de choisir les variables indépendantes et celles qui seront calculées par le modèle thermodynamique.

Si lors de l'établissement d'un modèle, le choix des variables est entièrement libre, nous recommandons d'utiliser les critères suivants pour faire le choix le plus approprié. [6]

Choix d'une variable intensive plutôt qu'extensive

On essaiera d'utiliser principalement des grandeurs molaires ou massique plutôt que des grandeurs totales, en utilisant une seule grandeur de débit.

Ceci se justifie par le fait que les grandeurs thermodynamiques seront calculées en valeurs molaires. Cela permet notamment d'éviter la dégénérescence de l'état thermodynamique lorsque le débit est nul. Le calcul de la température en fonction de l'enthalpie totale peut être impossible dans le cas où le débit est nul. Dans ce cas l'équation devient indéterminée, ce qui n'est pas le cas avec l'enthalpie molaire, même si l'état n'existe pas.

S'assurer que les variables représentent l'état de manière bi-univoque.

Bien que la thermodynamique soit développée en fonction de la température et de la pression, le choix de l'enthalpie molaire sera préféré à celui de la température dans le cas d'un fluide mono-substance. La température ne caractérise en effet pas complètement l'état de saturation et une variable supplémentaire, la fraction vaporisée, doit être donnée pour calculer le contenu enthalpique. Par contre, l'enthalpie molaire et la pression caractérisent parfaitement le contenu enthalpique du flux. Le choix de l'enthalpie molaire est ainsi justifié.

Chapitre II: Méthodologie de calcul d'un système énergétique industriels (différentes possibilités de calcul énergétique et critères d'optimisation).

L'enthalpie totale sera calculée par:

$$H_i = h_i \cdot m_i$$

Et la température par :

$$T_i = f(h_i, p_i, x_i)$$

La fonction $f(h_i, p_i, x_i)$ correspond à un calcul thermodynamique d'équilibre à enthalpie molaire, pression et composition fixée . [6]

11. Les types de modèles :

Un modèle est constitué d'un ensemble d'équations faisant intervenir un ensemble de variables d'état.

Une unité est représentée schématiquement par la figure 1 .

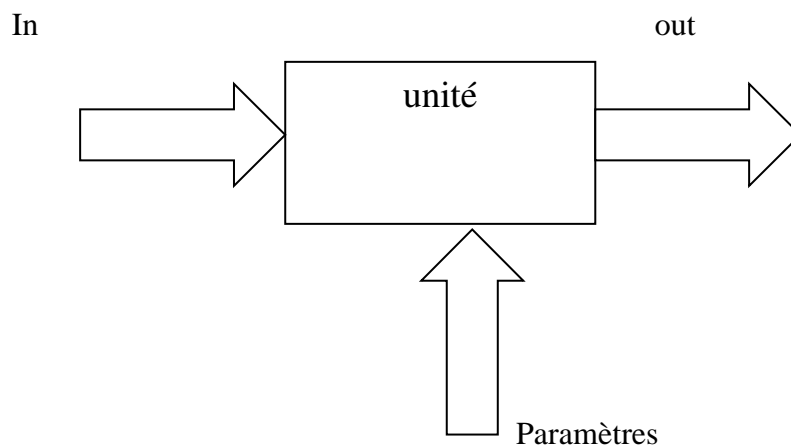


Figure II. 4 : représentation d'une unité.

Equations : n_c

Bilan de matière n_c

Bilan d'énergie 1

Bilans d'impulsion n_i

Modèle n_m

Spécification n_s

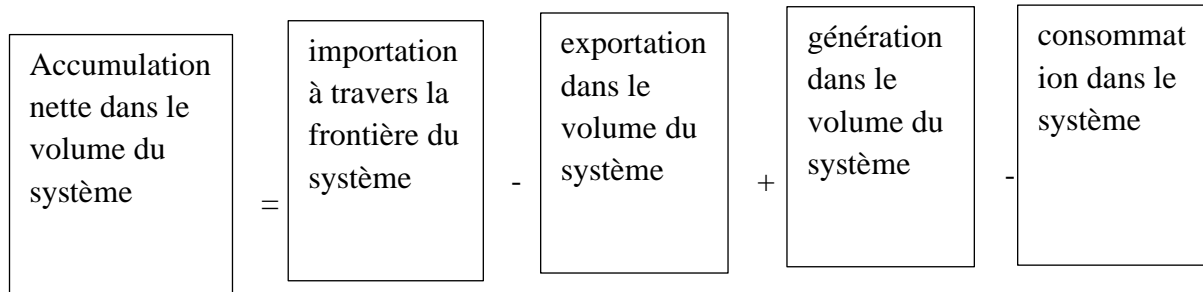
Chapitre II: Méthodologie de calcul d'un système énergétique industriels (différentes possibilités de calcul énergétique et critères d'optimisation).

variables : n_v

état des flux $n_x = (N_{out} + N_{in}) * (n_c + 2)$

paramètres de l'unité n_p

variables internes n_t



Dans ce chapitre nous n'aborderons que les modèles stationnaires.

Les termes d'accumulation seront donc nuls.

Le nombre de degré de liberté est égale à $n_{DDL} = n_v - n_e$ il représente le nombre de variables ou le nombre d'équations supplémentaires permettant de calculer l'unité. [8]

La forme la plus simple de l'équation supplémentaire est la consigne ou la spécification de la forme $x_i = x_i^{spec}$.

Pour identifier le nombre de degrés de liberté, on utilise la matrice d'incidence (figure 2).

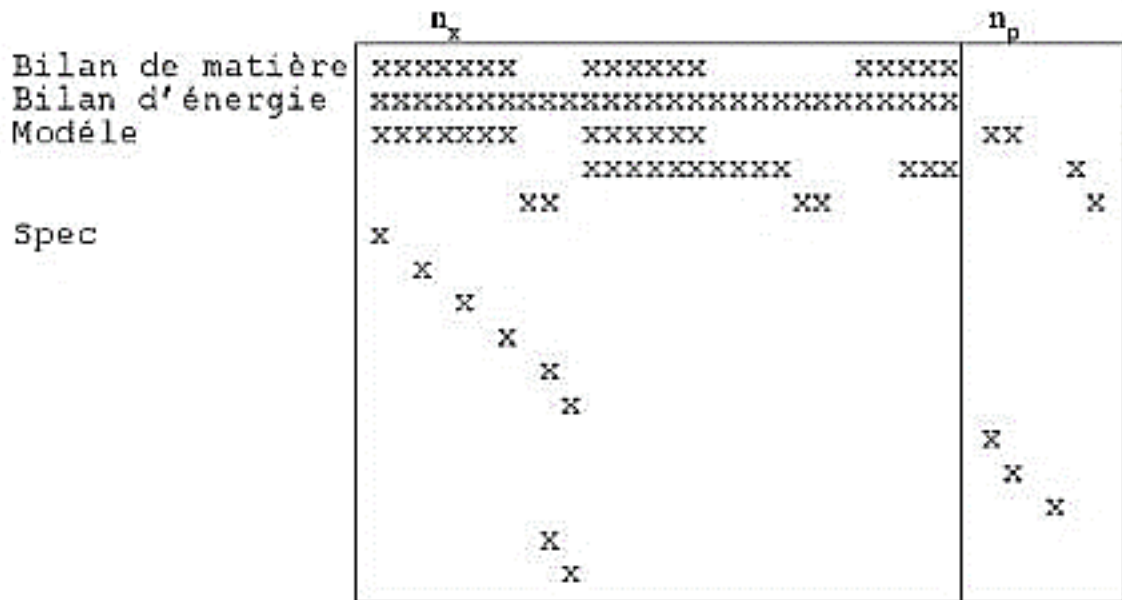
Dans cette matrice, les lignes représentent les équations et les colonnes sont les variables. Dans une matrice d'incidence on place un élément non nul si la variable i (colonne i) intervient dans l'équation j (ligne j). Dans cette matrice les équations de spécifications sont représentée par une ligne avec un seul élément non nul. [8]

Afin de pouvoir calculer l'unité il existe deux conditions nécessaires :

- a) La matrice d'incidence doit être carrée : on doit disposer d'autant d'équations que de variables.
- b) Les équations doivent être indépendantes. Pour cela, il doit être possible de permuter les lignes et les colonnes de manière à placer un élément non nul sur chaque élément diagonal de la matrice.

Si ces deux conditions sont satisfaites, il sera effectivement possible d'inverser la matrice, les éléments sur la diagonale étant choisis comme pivot (voir méthode de Gaus-Newton et décomposition LU).

Chapitre II: Méthodologie de calcul d'un système énergétique industriels (différentes possibilités de calcul énergétique et critères d'optimisation).



Pour pouvoir résoudre le modèle il faudra bien sur pouvoir effectivement inverser la matrice et donc que la valeur des pivots ne deviennent pas nuls au cours de la procédure de d'inversion de la matrice : Dans ce cas, on dira que le problème est numériquement singulier. [8]

12. Définition mathématique du problème d'optimalisation :

Le problème d'optimalisation consiste à déterminer la valeur optimale des variables de décision qui permet d'atteindre un objectif fixé $o(X_{\text{état}})$, par exemple minimiser les coûts opératoires, dans un contexte déterminé, par exemple sans dépasser les limites opératoires de sécurité de l'installation. Nous définissons ainsi un problème d'optimalisation dont la forme générique suivante:[8]

min $o(X_{\text{état}})$

soumis à $F(X_{\text{état}}) = 0$

$S(X_{\text{état}}) = 0$

$G(X_{\text{état}}) \geq 0$

avec $o(X_{\text{état}})$ la fonction objectif;

$F(X_{\text{état}})$ l'ensemble des équations de modélisation;

$S(X_{\text{état}})$ l'ensemble des équations de spécification;

Chapitre II: Méthodologie de calcul d'un système énergétique industriels (différentes possibilités de calcul énergétique et critères d'optimisation).

$G(X_{\text{état}})$

l'ensemble des équations d'inégalité

Les équations d'inégalités représentent sous forme mathématique les limites acceptables pour les variables considérées. On peut classer les équations d'inégalité en différentes catégories :

1. les limites d'opérations des unités : celles-ci peuvent être obtenues dans les feuilles de spécification des équipements. Pour les équipements existants, les limites d'opérations peuvent être des valeurs contractuelles qui délimitent la responsabilité du fabricant de l'équipement. Ces limites sont également fixées au moment de la réception de l'installation, auquel cas elles sont partie intégrante de l'autorisation d'exploiter: par exemple pression d'épreuve.
2. les contraintes environnementales et/ou relatives à l'autorisation d'exploiter l'installation. Les émissions de certain polluant sont par exemple réglementées et impose des limites de concentration et de quantité. Dans les problèmes de conception, ces limites pourront représenter soit les conditions actuelles soit les conditions futures que l'on désire voir satisfaite par la nouvelle installation.
3. les limites technologiques : lors d'un calcul de conception d'une nouvelle installation ou de la rénovation d'une installation existante, on fixe les limites de fonctionnement des nouveaux équipements (pression, température, débits, puissances) afin qu'elles représentent les caractéristiques des équipements que l'on peut raisonnablement trouver sur le marché. Ces contraintes représenteront les limites des matériaux ou des techniques de construction.
4. les limites numériques : lorsque le modèle utilise des corrélations pour modéliser le comportement des équipements ou pour calculer la fonction objective, il est nécessaire d'incorporer les limites de validité de ces corrélations dans le calcul d'optimalisation afin de s'assurer de la pertinence des solutions obtenues. Les limites numériques représentent également les limites de validité des modèles utilisés, que ce soit les modèles des unités ou même des contraintes concernant la configuration du système. On introduira par exemple des contraintes d'inégalité interdisant l'inversion de sens des débits si cette inversion n'est pas explicitement prévue dans le modèle développé. Il sera également important de considérer les limites de validité des méthodes thermodynamiques utilisées pour évaluer les propriétés thermodynamique des fluides, en effet, si on dépasse les conditions de validité, certaines valeurs peuvent devenir inconsistantes.

Nous classerons les contraintes d'inégalité en deux catégories :

1. les contraintes « soft » qui doivent être satisfaite à l'issue de la procédure d'optimalisation mais dont la satisfaction ou non n'a pas d'incidence sur le calcul du modèle : limite d'émission, débit

Chapitre II: Méthodologie de calcul d'un système énergétique industriels (différentes possibilités de calcul énergétique et critères d'optimisation).

maximum, ...

2. les contraintes « hard » qui doivent être impérativement satisfaites pour toute évaluation du modèle. Ces contraintes représentent des gardes fous numériques. Il convient les traiter de manière appropriée dans le modèle afin de prévenir des échecs dans les procédures itératives de convergence.

Les différentes stratégies de résolution des problèmes d'optimisation peuvent être classées en fonction du niveau d'intégration entre la méthode d'optimisation et la résolution du modèle.[9]

12.1 Méthode Black-Box, boîte noire :

La méthode Black box consiste à considérer le modèle et la méthode d'optimisation comme deux entités indépendantes (Figure 1). La méthode d'optimisation envoie au modèle un jeu de valeur pour les variables de décision et reçoit en retour la valeur de la (des) fonction(s) objectif(s) et des contraintes d'inégalité. Il est donc supposé que le modèle comprenne une procédure de résolution robuste qui sera à même de calculer la fonction objective pour n'importe quelles valeurs des variables de décision. [9]

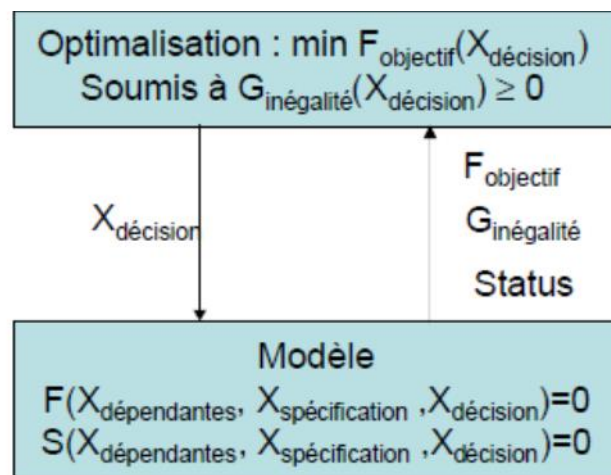


Figure II.5 Méthode d'optimisation :Black.Box

13. Méthodes d'optimisation :

L'approche black box permet l'utilisation de pratiquement tous les types d'algorithmes d'optimisation.

Elle convient à la fois aux méthodes directes (sans calcul de dérivées), aux méthodes indirectes avec calcul des dérivées et aux méthodes heuristiques énumératives et évolutives (type algorithmes

Chapitre II: Méthodologie de calcul d'un système énergétique industriels (différentes possibilités de calcul énergétique et critères d'optimisation).

génétique, recuit simulé, taboo) ou même des approches graphiques. La méthode devient plus lourde d'utilisation lorsque la méthode d'optimisation fera appel au calcul des dérivées.

Cette méthode repose sur l'hypothèse que le modèle est unimodal, c'est-à-dire qu'il n'existe qu'une seule valeur de la fonction objective pour un jeu de variable de décision. [9]

Avantages :

Le principal avantage de cette méthode est sa simplicité et sa flexibilité. Elle repose principalement sur la qualité du modèle. Elle permet également de développer un modèle pour lequel on aura développé une méthode de résolution efficace et fiable et robuste.

Le modèle peut être discontinu et contenir de la programmation conditionnelle : « si telle conditions... alors ... » ce qui sera beaucoup plus difficile avec la méthode simultanée.

Chaque calcul du modèle correspond à un point de fonctionnement faisable et donc peut être exploité pour évaluer les résultats.

Le nombre de variables traitées par l'algorithme de résolution est le nombre de variables de décision qui peut être relativement limité même dans le cas de calcul de grands systèmes,

Inconvénients :

Cette méthode repose sur la qualité du modèle et aura des difficultés à résoudre les problèmes avec des contraintes d'inégalité. Dans la procédure de résolution, il faut prévoir des sécurités et notamment utiliser le statut des résultats de calcul. Afin que l'algorithme d'optimisation reçoive une information indiquant si les valeurs renvoyées par le modèle sont cohérentes et correspondent à un point significatif.

Cette méthode est coûteuse en temps calcul particulièrement lorsque des calculs itératifs sont nécessaires pour calculer le modèle.

Le succès et l'efficacité de la méthode dépend fortement de la robustesse du modèle et de sa capacité à trouver une solution pour chaque ensemble de variables de décision : lorsque le modèle répond qu'il n'y a pas de solution, cela ne doit pas signifier que les procédures internes n'ont pas trouvé de solution mais qu'il n'y a effectivement pas de solution. Le temps de développement doit dès lors être dépensé au niveau du modèle et de son initialisation lorsque des procédures itératives sont utilisées.

Le calcul des contraintes d'inégalité est relativement difficile dans le cas des approches black box. Seules les contraintes « soft » pourront être traitées de manière aisée. Pour les contraintes hard, le

Chapitre II: Méthodologie de calcul d'un système énergétique industriels (différentes possibilités de calcul énergétique et critères d'optimisation).

seul moyen de les considérer de manière efficace est de les reporter au niveau des variables de décision, ce qui signifie qu'il faudra une connaissance à priori de la localisation de l'optimum par rapport à ces contraintes « hard » et qu'il faudra programmer le modèle et sa résolution en fonction de l'activation probable de ces contraintes.

Le modèle est développé pour le calcul de la fonction objectif choisie. Si on désire utiliser le modèle à une autre fin il conviendra de le reprogrammer. Cette méthode ne sera donc pas très pratique dans le cas d'une approche qui concerne la durée de vie de l'installation ou il pourrait être utile d'utiliser le même modèle pour optimiser la conception puis pour faire le suivi de performance et finalement l'optimisation des conditions opératoires en fonction de la demande du marché. Comme l'ensemble des variables de décision varie d'un cas à l'autre, le modèle devra être modifié en conséquence.

La méthode black box est fortement dépendante de la précision des algorithmes de résolution du modèle puisqu'elle suppose que la valeur de la fonction objective pour un jeu donné de variables.

.[9]

13.1 L'approche simultanée :

Dans l'approche simultanée, le problème d'optimisation et le modèle sont résolus simultanément. Cela suppose l'utilisation d'algorithmes d'optimisation non linéaires et contraint qui utilisent la plupart du temps des méthodes indirectes basée sur la valeur des dérivées. Dans l'approche simultanée, le modèle n'a pas la responsabilité de résoudre le modèle, Il calcule en fonction des variables d'état, la valeur des équations de modélisation et de spécification et c'est l'algorithme d'optimisation qui se charge de calculer la valeur de toutes les variables d'état afin de satisfaire les équations de modélisation, les équations de spécifications et de vérifier les contraintes d'inégalité et de minimiser la fonction objective.[9]

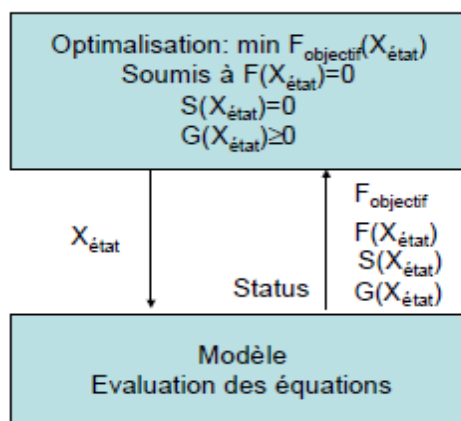


Figure II.6 Modèle d'évaluation des équations

13.2 Algorithmes d'optimisation :

Dans le cas d'une approche simultanée, les algorithmes d'optimisation seront des algorithmes non linéaires contraints. Qui doivent être à même de traiter les systèmes de grande taille. Pour ces méthodes on distinguera les méthodes faisibles et infaisibles, selon qu'elles chercheront tout d'abord à résoudre le système d'équation d'égalités puis suivront ensuite un chemin d'optimisation pour atteindre l'optimum ou qu'elles chercheront à atteindre simultanément la vérification des contraintes d'égalité et les conditions d'optimalité (voir cahier optimiseur). [9]

Avantages :

L'avantage des méthodes simultanées est leur grande souplesse au niveau de la définition du problème : le modèle définit une liste d'équations à résoudre et l'algorithme d'optimisation est en charge de la résolution. Elle est donc particulièrement bien adaptée lorsque l'on dispose d'un algorithme de résolution performant. Ceci sera d'autant plus vrai que le modèle sera à même de calculer les dérivées de manière analytique. Ce type d'approche sera donc particulièrement indiqué si on utilise des logiciels développés pour les calculs d'optimisation et de modélisation : gProms, GAMS ou les langages de programmation AMPL. Ces logiciels offrent un langage de programmation développé spécifiquement pour le développement de modèles d'optimisation et incorporent implicitement le calcul des dérivées et l'utilisation des techniques avancées d'optimisation.

Le temps de calcul des méthodes simultanées est considérablement réduit par rapport à celui d'une méthode back box. Cette approche sera donc particulièrement adaptée pour les calculs d'optimisation en ligne pour lesquels la solution précédente sera utilisée comme point de départ du nouveau calcul.

Il est possible d'utiliser aisément des solutions de continuation afin d'aider à la résolution des problèmes fortement non linéaires.

Étant basés sur des méthodes basées sur les dérivées, les approches simultanées présentent l'avantage de toute l'information générée au point solution, à savoir les multiplicateurs de Lagrange, la sensibilité des paramètres, ...

Cette remarque concerne également la formulation du problème, l'analyse de la matrice d'incidence permettant de vérifier que le problème est bien posé.

Les approches simultanées permettent de changer aisément de formulation de problème, sans avoir à intervenir sur la définition du modèle et sans avoir à choisir la liste des variables dépendantes.

Chapitre II: Méthodologie de calcul d'un système énergétique industriels (différentes possibilités de calcul énergétique et critères d'optimisation).

Inconvénients :

Reposant sur des informations de direction basées sur la valeur des dérivées, l'efficacité des méthodes simultanées est fortement liée aux valeurs initiales des variables d'état. Il conviendra de réaliser un travail d'initialisation préalable à la stratégie de résolution. Si l'initialisation préalable est bien réalisée, la résolution du problème sera aisée. A la différence de l'approche Black Box, le travail d'initialisation est réalisé avant la procédure d'optimalisation à proprement parlé alors que dans le cas de l'approche Black Box, une bonne initialisation sera requise à chaque évaluation.

La procédure de résolution simultanée ne fournit de point faisable qu'à l'issue de la procédure. En cas de non convergence, les calculs réalisés ne seront pas exploitables alors que dans l'approche black box, tous les points calculés représentent un état du modèle.

Dans l'approche simultanée, on évitera autant que faire ce peut le recours aux calculs itératifs pour l'évaluation des résidus des équations. En effet, tout calcul itératif entraîne une perte de précision qui sera d'autant plus cruciale qu'elle risque d'affecter non seulement la valeur des résidus mais également la valeur des dérivées.

Les approches simultanées ne s'adapte pas facilement aux problème de simulation conditionnelle. Seuls les cas ou la condition ne conditionne pas la définition de l'optimum pourront être facilement considérée dans une approche d'optimisation. Lorsque la solution optimale est conditionnée par la décision, il sera nécessaire d'avoir recours aux systèmes impliquant des nombres entiers et donc de considérer les conditions comme des contraintes à part entières du problème d'optimalisation.

.[9]

13.3 Approches hybrides :

Les deux approches précédentes ayant chacune des avantages et des inconvénients, de nombreux développements ont été réalisés afin de proposer des solutions qui allient les avantages des deux approches.

Le principe de ces méthodes dites à deux niveaux est de résoudre une partie du modèle de manière black-box mais de confier à l'algorithme d'optimalisation une partie des équations de spécifications. (Figure 3).

Chapitre II: Méthodologie de calcul d'un système énergétique industriels (différentes possibilités de calcul énergétique et critères d'optimisation).

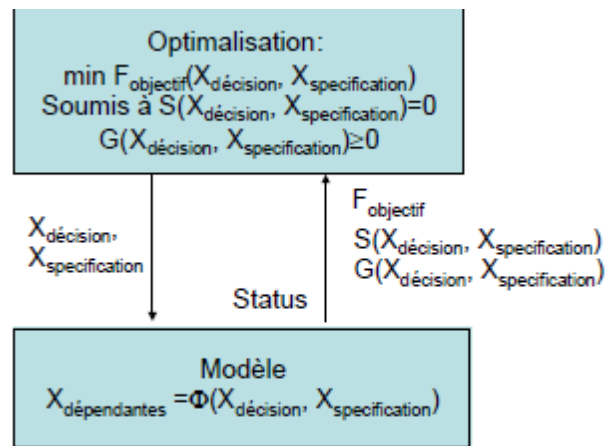


Figure II.7 Méthode de résolution à 2 niveaux

Dans cette approche, la résolution d'un sous-système d'équations au niveau du modèle a pour objectif de permettre une résolution robuste et rapide qui élimine une partie des variables ($X_{dépendantes}$) et une partie des équations du problème global, en confiant à l'algorithme de résolution la tâche de résolution du problème réduit. Cette approche s'apparente à une approche du gradient réduit, cependant, dans ce cas, la réduction est réalisée programmée dans la stratégie de résolution alors que dans l'approche réduite, elle résulte d'une manipulation mathématique de l'approximation linéaire ou quadratique du problème d'optimisation.

Cette approche combine les avantages des deux approches, elle en hérite cependant de certains désavantages : principalement au niveau de la lourdeur de la programmation et du calcul des dérivées.

Ce type d'approche requiert des algorithmes d'optimisation non linéaires avec contraintes. Une telle approche ne pourra donc pas utiliser des algorithmes d'optimisation heuristiques. [9]

13.4 La résolution du problème de modélisation :

Que ce soit dans l'approche black box, l'approche deux niveaux, il convient à présent d'examiner les techniques qui peuvent être utilisées pour résoudre le modèle.

$$F(X) = 0$$

$$S(X) = 0$$

Deux grandes familles de méthode peuvent être envisagées : l'approche séquentielle modulaire qui est l'approche la plus couramment utilisée dans la modélisation des systèmes énergétiques et l'approche "equationsolver".

Chapitre II: Méthodologie de calcul d'un système énergétique industriels (différentes possibilités de calcul énergétique et critères d'optimisation).

La plupart des logiciels de simulation sont basés sur des approches séquentielles modulaires. Le procédé à modéliser est décomposé en briques standards de construction correspondant aux principaux types d'opérations unitaires. Les bibliothèques de simulation fournissent des sous-programmes pour modéliser le comportement de ces unités en se basant sur les bilans matière, d'énergie et sur quelques équations empiriques efficaces. Les unités sont résolues de manière séquentielle en suivant le trajet de la matière et de l'énergie dans le procédé : les sorties des unités sont calculées à partir des entrées et de paramètres. Les recyclages et les boucles de contrôle sont résolus de manière itérative en commençant avec des valeurs estimées pour les flux coupés. Des blocs mathématiques sont utilisés pour résoudre les équations de coupure (avec possibilité de certaines équations supplémentaires) en faisant correspondre les valeurs estimées avec les résultats obtenus en bouclant à travers la séquence d'unités. Puisque les dérivées sont rarement disponibles, la promotion de la convergence est généralement basée sur la substitution ou sur des améliorations basées sur la plus grande valeur propre ou sur l'extrapolation de Wegstein. Les méthodes semblables à Newton essayant de construire de manière itérative les approximations de la matrice jacobienne en utilisant une méthode de mise à jour (par exemple, Broyden) ont également été utilisées avec succès. [9]

Dans le cas de l'approche simultanée appelée "equationsolver", toutes les équations et les variables sont traitées simultanément par un algorithme de résolution qui résout le système global.

De nombreuses recherches ont été réalisées afin de comparer les deux approches qui présentent chacune des avantages et des inconvénients. Il convient de remarquer que l'approche séquentielle a été longtemps préférée en raison de la puissance de calcul des ordinateurs qui ne permettait pas de résoudre des problèmes de grande taille de manière simultanée. Cette contrainte n'existe plus aujourd'hui ce qui explique la montée en puissance des méthodes simultanées. La tendance actuelle est aujourd'hui au développement de méthodes hybrides permettant de tirer profit des avantages respectifs des deux approches.

De nombreux travaux ont été réalisés afin de déterminer l'approche la plus adéquate pour résoudre les problèmes de simulation et d'optimisation des systèmes énergétiques. L'étude présentée par Kontopoulos et al. (1991) compare les deux approches afin d'en déterminer les conditions d'application. Une des conclusions principales de ce travail est le fait que le choix dépend du type de problème posé. Pour le cas d'application réalisé, à savoir la simulation d'un système frigorifique complexe, l'approche "equationsolver" s'est montrée tout à fait adaptée. L'étude comparative réalisée dans Kontopoulos et al. (1991) fournit les conclusions du Tableau 1.[9]

Chapitre II: Méthodologie de calcul d'un système énergétique industriels (différentes possibilités de calcul énergétique et critères d'optimisation).

Opération	Approche Séquentielle	Approche Simultanée	Remarque
Position du problème	*	****	1
Traitement des pressions	*	****	2
Initialisation	****	*	3
En cas d'erreurs	***	**	4
Modèle rigoureux	****	**	5
Modification des conditions opératoires (efficacité)	*	****	6
Modification des conditions opératoires (robustesse)	****	****	6
Problème d'optimisations	-	***	7
Total	**	***	

* peu satisfaisant , ** satisfaisant , *** bon , **** très bon

Tableau II 1: Conclusions de l'étude comparative des approches séquentielle et simultanée

Remarques :

1. Pour l'approche simultanée, la position du problème ne requiert pas la définition de la séquence. L'algorithme de détermination des degrés de liberté (décrit plus loin) aide à la détermination des spécifications. [9]
2. Dans nombre de problèmes de simulation et d'optimisation de systèmes énergétiques, cycles frigorifiques ou cycles vapeurs, les pressions sont déterminées à contre-courant des autres variables : la pression est fixée à la sortie du condenseur et remonte par l'intermédiaire des pertes de charge vers les appareils précédents. Ceci est difficile à traiter dans une approche séquentielle puisqu'il faudra estimer la pression en entrée et espérer que l'ensembles de pertes de charges ne conduiront pas à des calculs impossibles en cours de résolution (ex : pression négative). [9]
3. Une bonne valeur initiale pour toutes les variables est nécessaire pour obtenir un résultat par l'approche simultanée alors que dans le cas de l'approche séquentielle, seule la valeur des variables de coupures doit être bien estimée.

Ce désavantage de l'approche simultanée peut être atténué lorsqu'on considère l'utilisation du modèle dans une méthode globale. Dans ce cas, une des opérations préliminaires est la validation des mesures, laquelle fournit une valeur à toutes les variables du modèle de simulation et

Chapitre II: Méthodologie de calcul d'un système énergétique industriels (différentes possibilités de calcul énergétique et critères d'optimisation).

d'optimisation. Cette opération revient toutefois à reporter le problème de l'initialisation à l'outil de validation qui procède également par une approche simultanée.

Les logiciels actuels possèdent souvent un mode interactif qui permet de réaliser une initialisation préalable des unités par un calcul séquentiel approximatif. [9]

4. Identifier la cause d'une non convergence est plus difficile en approche simultanée qu'en approche séquentielle.

En approche séquentielle, la non convergence est associée à la résolution d'unité particulière. L'analyse de la séquence et des valeurs permet de comprendre de manière plus aisée la cause du problème. En approche simultanée, toutes les équations et toutes les variables sont traitées simultanément. Dans ce cas il n'est pas facile d'identifier la cause de la non convergence. Il est cependant possible de tirer profit de l'information glanée au cours de la résolution pour aider à l'identification des problèmes de convergence. Il est en effet important de pouvoir distinguer les vrais problèmes de convergences liés aux difficultés rencontrées par le logiciel de résolution des problèmes de convergences liés au fait que le problème est impossible et qu'il n'existe pas de solution ayant une signification physique. [9]

5. L'utilisation d'un modèle de simulation rigoureux peut, dans certains cas, s'avérer difficile dans l'approche simultanée. La raison est principalement la présence de discontinuités des équations ou des dérivées du modèle. L'approche simultanée s'accommode difficilement des calculs conditionnels; un effort particulier doit donc être réalisé pour traiter ces cas. L'approche séquentielle ne présente pas le même type de problème.

Un exemple simple permettant d'illustrer cette affirmation est le mélangeur.

La pression de sortie est égale à la plus petite des pressions d'entrée. Cette équation ne pose aucun problème en approche séquentielle alors qu'elle est difficile à gérer en approche simultanée. [9]

6. L'approche simultanée est très efficace et très robuste lorsqu'un point initial est trouvé. L'obtention d'un nouveau point en modifiant la valeur d'une spécification ou d'une consigne s'obtient en quelques itérations. L'approche séquentielle est pénalisée par une évaluation plus lourde des dérivées qui pénalise le temps de calcul. Les deux approches sont cependant robustes pour calculer un nouveau point de fonctionnement au départ d'une solution connue. [9]

7. Dans le cas considéré, l'optimisation n'a pas été utilisée pour l'approche séquentielle. Plusieurs arguments jouent en faveur de l'approche simultanée pour résoudre les problèmes d'optimisation. Les méthodes simultanées sont particulièrement bien adaptées pour traiter les problèmes d'optimisation surtout lorsqu'il est nécessaire de traiter les équations d'inégalité. Dans le cas de

Chapitre II: Méthodologie de calcul d'un système énergétique industriels (différentes possibilités de calcul énergétique et critères d'optimisation).

l'approche simultanée, les équations d'inégalité définissent la zone de validité du modèle. Moyennant un choix approprié des variables d'état, les inégalités seront exprimées sous la forme d'équations linéaires qui seront toujours vérifiées en cours de résolution. Ceci permet de ne pas calculer les unités dans des conditions impossibles (températures ou débits négatifs par exemple). Dans l'approche séquentielle, les inégalités apparaissent sous la forme d'équations d'inégalité non linéaires qui demanderont un traitement particulier si on désire qu'elle n'empêche pas la convergence. Le traitement des inégalités sera fortement dépendant de la robustesse du logiciel de résolution[9]

La disponibilité des dérivées représente un autre atout de l'approche simultanée, que ce soit pour le calcul de l'optimisation ou pour l'exploitation des résultats.

Dans l'approche simultanée le calcul de la matrice jacobienne est l'information indispensable pour résoudre le problème puisque c'est celle-ci qui définira la direction de recherche. [9]

Le Jacobien A est la matrice des dérivées du système d'équations dont l'élément ij est défini par :

$$A_{ij}(X^K) = (\Delta F_i(X^K)/\Delta x_j) \quad (7)$$

Avec

$F(X)$ regroupant à la fois les équations de modélisation et celles de spécification;

$A_{ij}(X^K)$ l'élémentij de la matrice A au point X^k ;

$(\Delta F_i(X^K)/\Delta x_j)$ la valeur de la dérivée partielle de la fonction F_i par rapport à la variable x_j au point défini par les variables X^k .

Deux aspects doivent être envisagés :

- la taille et l'éparsité de cette matrice sont en général très importantes. Dans le cas des réseaux vapeur, la moyenne est de 4 éléments non nuls par ligne. Il était donc important d'utiliser une matrice éparsée pour stocker le jacobien,

- le calcul des dérivées peut se faire de manière analytique au départ de la formulation des équations. Lorsque la forme des équations n'est pas connue et/ou que celle-ci est trop complexe

Chapitre II: Méthodologie de calcul d'un système énergétique industriels (différentes possibilités de calcul énergétique et critères d'optimisation).

(par exemple dans le cas de simulation conditionnelle), les dérivées seront calculées de manière numérique par une différence finie ou une différence centrale :

$$A_{ij}(X^K) = (\Delta F_i(X^K) / \Delta x_j) = F_i(X^K + \Delta x_j^k) - F_i(X^K)$$

avec

$F_i(X^K + \Delta x_j^k)$ est la valeur de l'équation j pour laquelle seule la variable j parmi les variables X^k a l'itération k a été perturbée d'une petite valeur $+\Delta x_j^k$;

Le calcul des dérivées de manière numérique est coûteux en temps de calcul puis qu'il est nécessaire de calculer les équations de manière systématique pour chaque variables du problème. Il est évident que les logiciels modernes de calculs de modélisation essaient de réaliser le calcul analytique lorsque cela est possible et que lorsque le calcul numérique est envisagé, celui-ci doit se faire de manière « intelligente » de manière à éviter les calculs inutiles. Dans le cas de la modélisation des systèmes énergétiques, le calcul des dérivées des fonctions thermodynamiques se fera souvent de manière numérique en raison des discontinuités de la fonction enthalpie-température. En effet, au niveau de la discontinuité, la dérivée possède deux valeurs, le choix de la valeur correcte dépend en réalité de la direction qui sera choisie sur base de la valeur des dérivées pour réaliser le pas d'itération. .[9]

14. La procédure AGE pour simuler et optimiser les systèmes énergétiques :

La procédure AGE, Analyser, Générer, Evaluer représente une méthodologie générique en trois étapes qui sera appliquée lors de la réalisation de calculs de modélisation et d'optimisation. [9]

La première étape, *Analyser*, consiste à poser le problème. C'est-à-dire, tout d'abord choisir et assembler les modules puis ensuite analyser les degrés de liberté du système pour déterminer les équations de spécification et les équations de consigne (ou les variables de commande).

La seconde étape, *Générer*, correspond à la résolution du système d'équations. Cela suppose d'initialiser les variables et de résoudre le système d'équations non linéaires par une méthode adéquate.

La troisième étape, *Evaluer*, consiste à transformer un résultat numérique en solution. Il aura pour objectif de vérifier la consistance des résultats numériques fournis par le modèle et de confronter ces valeurs numériques à la réalité et au bon sens de l'ingénieur. Une fois le modèle approuvé, il pourra être utilisé pour appuyer les décisions des ingénieurs. L'étape Evaluer sera également utilisée dans le cas où la solution n'a pas été trouvée afin d'en déterminer la cause de l'échec.

Chapitre II: Méthodologie de calcul d'un système énergétique industriels (différentes possibilités de calcul énergétique et critères d'optimisation).

En effet la cause peut être attribuée soit à l'algorithme de résolution qui n'a pas réussi à trouver la solution, soit l'ensemble des spécifications qui est inconsistant et qui correspond donc à un système non faisable. [9]

14.1 Analyser : identifier les degrés de liberté :

Après avoir choisi les modèles des unités et déterminé leurs interconnexions, la seconde étape de la phase *Analyser* consiste à déterminer l'ensemble des équations de spécification $S(X_{\text{état}}) = 0$ et de consigne $C(X_{\text{état}}) = 0$. Le nombre d'équations à ajouter correspond au nombre de degrés de liberté (n_{DDL}). Pour les problèmes de grande taille dans lesquels il existe de nombreux recyclages, l'analyse des degrés de liberté est un problème complexe.

Pour mener à bien cette tâche, il existe des algorithmes d'aide à la détermination des degrés de liberté basé sur l'analyse de la structure de la matrice d'incidence. L'approche présentée ici est une adaptation de la méthode qui sera présentée plus loin pour les calculs de réconciliation des données. Le principe de cet algorithme est de tenter de déterminer une permutation des lignes et des colonnes de manière à placer un élément sur chaque diagonale. L'algorithme permettant de réaliser cette opération est décrit dans Duff (1981).

Dans le cas des problèmes de simulation, l'algorithme est appliqué au problème du choix des spécifications. Si une telle permutation existe, alors il existe une séquence de pivotage pour l'inversion de la matrice, ce qui permet d'affirmer que le problème est structurellement bien défini.

Lorsqu'il n'est pas possible de trouver la permutation, cela signifie que plusieurs variables, c'est-à-dire des colonnes, entrent en conflit pour occuper la place diagonale d'une ligne. Dans ce cas, le problème est sous-spécifié. L'ajout d'une ligne supplémentaire (spécification), qui s'attribuera une des colonnes qui entraînent en conflit, permettra à l'algorithme de continuer sa recherche. Pour une ligne (équation) donnée, la liste des variables qui entrent en conflit pour la place diagonale définit la liste de celles parmi lesquelles une seule variable sera appelée à être spécifiée.

De la même manière, l'application de l'algorithme à la matrice transposée permet d'identifier les sur-spécifications (équations excédentaires). Les équations excédentaires qui entrent en conflit pour une variable et qui appartiennent à l'ensemble $S(X_{\text{état}})$ définissent un sous-ensemble de spécifications dans lequel il conviendra de supprimer un élément.

Appliqué à la matrice d'incidence du problème, cet algorithme permet de définir un système carré ($m+s=n$) dans lequel il est possible de réaliser une permutation des lignes et des colonnes telle qu'il existe un élément non nul sur chaque position diagonale. En termes d'inversion de la matrice jacobienne, cela signifie qu'il existe au moins une séquence de pivots mais cela ne garantit pas que

Chapitre II: Méthodologie de calcul d'un système énergétique industriels (différentes possibilités de calcul énergétique et critères d'optimisation).

la valeur des pivots en cours de factorisation restera significative (non nulle). Si un pivot devient nul en cours de factorisation, le problème sera numériquement singulier.

Cet algorithme ne garantit pas non plus que la solution sera obtenue car en raison du caractère non linéaire du modèle mathématique, il ne suffit pas de donner une valeur aux spécifications pour que le modèle trouve une solution. L'ensemble des valeurs des spécifications doit être cohérent de manière à ce que les équations puissent être résolues simultanément et que les variables $X_{\text{état}}$ à la solution soient dans le domaine de validité du modèle.

Lorsque le problème calculé est un problème d'optimisation, l'étape d'analyse des degrés de liberté ne portera que sur la recherche des surspécifications. .[9]

14.2 Générer : résoudre le problème d'optimisation :

L'étape *Générer* de la procédure consiste à résoudre le modèle et/ou le problème d'optimisation. Nous verrons dans les chapitres suivants les différents algorithmes qui peuvent être utilisés pour générer un résultat numérique.

Celui-ci devra ensuite être évalué pour constituer une solution. Que le problème soit la simulation ou l'optimisation, l'approche simultanée requiert l'initialisation préliminaire de toutes les variables. En effet, celles-ci définissent le point de départ de la procédure itérative et elles interviennent dans le calcul des dérivées utilisées pour calculer la direction de recherche. Un bon point de départ est donc primordial. Dans le cas de la simulation d'une installation existante, le calcul de la réconciliation des mesures permet d'obtenir un bon point de départ pour le calcul de simulation. .[9]

14.3 Evaluer les résultats :

Une fois les résultats de simulation ou d'optimisation générés, nous entamons la troisième étape de la méthode: *Evaluer*. L'outil de simulation joue pour cette étape un rôle très important car il permet de tester la solution obtenue avec d'autres spécifications pour tester, par exemple, l'opérabilité ou la flexibilité du réseau d'utilités et du réseau d'échangeurs calculés. Ce calcul est effectué en simulant plusieurs scénarios de charges et en vérifiant l'adéquation de la structure obtenue.

L'approche simultanée possède ici un atout considérable car il est possible de changer l'ensemble des spécifications sans changer la séquence de calcul (ce qui n'est pas possible dans le cas de l'approche séquentielle). Par exemple, supprimer la spécification de la température de sortie d'un échangeur et la remplacer par un calcul à surface d'échange fixée. D'autre part, l'approche

Chapitre II: Méthodologie de calcul d'un système énergétique industriels (différentes possibilités de calcul énergétique et critères d'optimisation).

simultanée est particulièrement bien adaptée pour calculer des alternatives au départ d'une solution connue.

L'analyse de la solution par la génération de la matrice des sensibilités est un des avantages de la modélisation par résolution simultanée d'un système d'équations. Son application au modèle de simulation du réseau d'utilités a été décrite par Kalitventzeff et Maréchal (1988). L'objectif est de calculer la tendance des variables à une variation de la valeur des spécifications. .[9]

Supposons que nous disposons de la solution de la simulation obtenue par la résolution d'un système:

$$F(X) = 0$$

Nous considérons donc le système avec les variables entières fixées.

Le développement du premier ordre par la formule de Taylor dans le voisinage de la solution est donnée par :

$$F^*(X) = FO + A(X^0) (X - X^0)$$

Avec

$F^*(X)$ le vecteur des équations linéaires

FO le vecteur défini par les équations au point de linéarisation $FO = F(X^0)$

X^0 le vecteur des variables au point de linéarisation

$A(X^0)$ la matrice jacobienne du système au point X^0

Lorsque X_0 définit la solution du système, $FO = 0$ et la fonction $F^*(X)$ est donnée par :

$$F^*(X) = A(X^*) (X - X^*)$$

Avec

X^* le vecteur X telque $F(X^*)$

Le vecteur $F(X)$ reprend les équations de modélisation, les équations de spécification et les équations de consigne. Le système résultant de la linéarisation peut donc être divisé en trois parties:

$$\begin{matrix} f^*(X) & Af(X^*) \\ S^*(X) & = As(X^*) (X - X^*) = 0 \\ C^*(X) & Ac(X^*) \end{matrix}$$

Avec

$(Af(X^*))$ la matrice jacobienne (rectangulaire) de l'ensemble des équations de modélisation à la solution X^*

$As(X^*)$ la matrice jacobienne des spécifications

Chapitre II: Méthodologie de calcul d'un système énergétique industriels (différentes possibilités de calcul énergétique et critères d'optimisation).

$Ac(X^*)$ la matrice jacobienne des consignes) .

Dans ce système, les équations de modélisation $F^*(X)$ doivent impérativement être égales à zéro soit $F^*(X) = 0$.

Moyennant un choix adéquat des variables, $As(X^*)$ est une matrice rectangulaire unitaire : un seul élément non nul et égal à 1 par ligne. $As(X^*)$ est donc indépendante des valeurs de X et sera notée As . Le raisonnement qui suit sera également appliqué aux consignes :

$AC(X^*)$ sera constante : AC . [9]

Chapitre3

Application sur un système énergétique basé sur un cycle de Rankine

Introduction :

Il existe plusieurs types de moteurs qui peuvent transformer l'énergie thermique en énergie mécanique ou électrique, les moteurs thermiques les plus utilisés sont les moteurs alternatifs à combustion interne, les turbines à gaz et les installations à cycle de Rankine à vapeur d'eau ; qui est notre étude dans ce chapitre.

3. Installation motrice à vapeur :

Les installations motrices à vapeur (IMV) sont des moteurs à apport externe de chaleur qui fonctionnent de manière cyclique, le fluide échangeant de la chaleur avec une source froide, en général le milieu ambiant (air ou eau), et une source chaude constituée par des fumées issues d'une combustion ou un fluide chauffé par une réaction nucléaire. Ce sont des machines à flux continu dont le fluide, très généralement de l'eau qui est un fluide idéal car bien adapté sur le plan thermodynamique et intéressant sur le plan économique, subit une évolution thermodynamique cyclique en traversant un minimum de quatre composants.[10]

4. Cycle de Rankine :

C'est Rankine qui a dégagé la notion d'énergie et fait la différence entre énergie potentielle et énergie cinétique. Le cycle de Rankine est un cycle thermodynamique moteur qui comprend deux isobares et deux adiabatiques. C'est le cycle qui se rapproche le plus du cycle de Carnot. Il se distingue de ce dernier par la substitution des deux transformations isothermes par deux transformations isobares qui rendent possible sa réalisation technique.

Dans le domaine des vapeurs condensables, ce cycle peut également s'appeler Rankine-Hirn, selon que la vaporisation est arrêtée à la sortie de la chaudière, ou qu'elle est prolongée par une surchauffe supplémentaire (point 5, cas de la turbine). La position de ce dernier point doit permettre d'accomplir la détente adiabatique ultérieure 5-6, à l'abri de toute manifestation de condensation. En effet, la vitesse généralement considérable atteinte par la vapeur au cours de sa détente provoquerait fatalement une dangereuse abrasion du métal des parois par suite de la projection violente des gouttelettes engendrées.

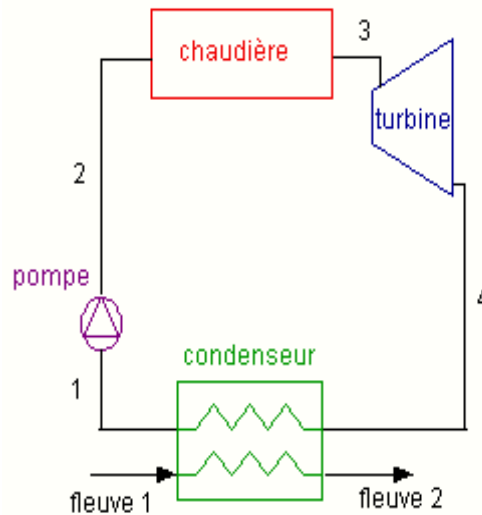


Figure III.1 Schéma d'une centrale à vapeur

Dans le cas fréquent où le volume spécifique du liquide est négligeable devant celui de la vapeur en équilibre, le travail utile de compression ($V_{liq} \Delta p$) par unité de masse, consommé par la pompe d'alimentation de la chaudière, l'est également. Dès lors, les points 1 et 2 de la figure sont régulièrement confondus dans les diagrammes usuels (superposition du réseau des isobares de l'état liquide à la courbe limite de la zone d'équilibre $x = 0$). Les conséquences du premier principe confèrent aux accroissements d'enthalpie, des propriétés énergétiques essentielles, telles que la mesure de la chaleur échangée avec le milieu extérieur le long d'un arc d'isobare, la mesure du travail utile ou celle d'un accroissement d'énergie cinétique, le long d'un tronçon d'adiabatique. Ces diverses propriétés ont largement contribué à mettre en valeur l'intérêt du diagramme enthalpie - entropie H, S , de Mollier, où ces accroissements sont directement mesurés par de simples différences d'ordonnées. Il possède de surcroît l'avantage de permettre la représentation graphique des propriétés des mélanges. En effet, les différents mélanges de composés organiques pour définir le fluide de fonctionnement sont également directement lisibles sur le diagramme $T-S$ ainsi que pour l'optimisation du cycle, l'exergie et les différentes irréversibilités sont lisibles directement. Cela nous permettra de les comparer rapidement face à la référence du cycle de Carnot. [11]

2.1 particularité énergie renouvelable :

Le cycle de Rankine a besoin d'une source chaude et d'une source froide pour fonctionner. Sa particularité est que grâce aux propriétés thermodynamiques du fluide organique, le cycle peut fonctionner avec des sources de température plus faibles que le cycle classique. En effet, ces fluides ont l'avantage de pouvoir changer d'état avec des écarts de température et pression beaucoup plus minces que pour l'eau. Leurs cloches sur le diagramme entropique sont très fines. Et c'est exactement ces exceptionnelles propriétés que nous allons exposer.[11]

2.2 Domaines d'application du cycle de Rankine :

- Biomasse
- L'énergie solaire
- La géothermie
- La cogénération
- La récupération de chaleur

Le choix du fluide est très important car celui-ci doit s'adapter au mieux à la source chaude. [11]

2.3 Description du cycle de Rankine :

Le cycle, parcouru dans le sens moteur, est composé des quatre transformations suivantes :

1^2 : Compression adiabatique et réversible (isentropique).

2^3 : Vaporisation isobare et irréversible.

3^4 : Détente adiabatique et réversible (isentropique). [12]

4^1 : Liquéfaction isobare.

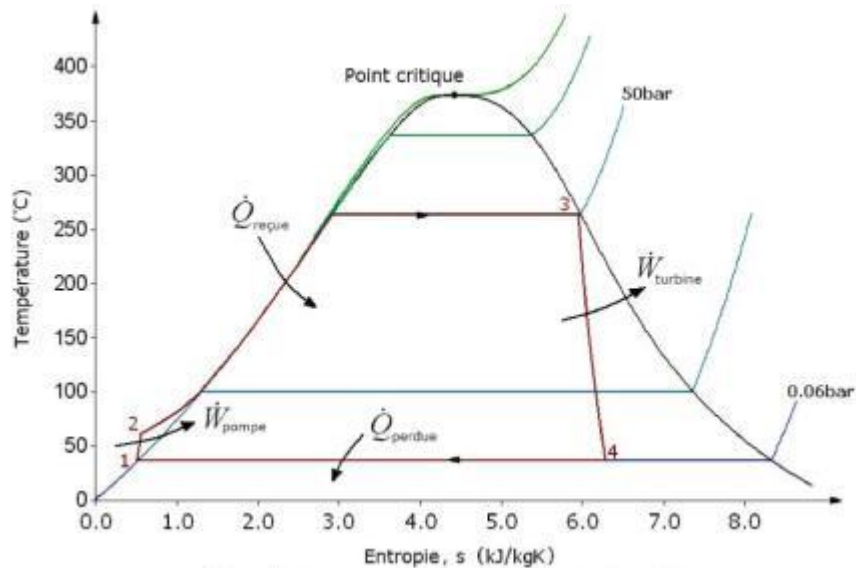


Figure III.2 Diagramme T.S cycle de Rankine[12]

L'évaporation isobare du fluide peut être divisée en deux étapes successives : chauffe du liquide de façon isobare uniquement puis évaporation isobare et isotherme.

Pompes à piston :

Rendement isentropique: $\eta_{is,p} = (W_{is}/W_{réel}) = (h_{s,is} - h_e/h_s - h_e)$

puissance hydraulique : $\dot{W} = \dot{m}_{wf}(h_s - h_e)$

puissance électrique: $\dot{W}_{elec} = \dot{W}_p / \eta_{motor}$

flux d'exergie: $\dot{E}_{xp} = \dot{m}_{wf}(h_s - h_e - T_0(s_s - s_e))$

exergie détruite : $\dot{I}_p = \dot{m}_{wf} T_0(s_s - s_e)$

turbine à vapeur :

Rendement isentropique : $\eta_{is,p} = (W_{réel}/W_{is}) = (h_s - h_e / h_e - h_{s,is})$

Puissance hydraulique: $\dot{W}_t = \dot{m}_{wf} (h_e - h_s)$

Puissance électrique : $\dot{W}_{elec} = \eta_{gen} \dot{W}_t$

flux d'exergie : $\dot{E}_{xt} = \dot{m}_{wf} (h_e - h_s - T_0(s_e - s_s))$

Exergie détruite : $\dot{I}_t = \dot{m}_{wf} T_0(s_s - s_e)$

Récupérateur

$$\dot{Q} = \epsilon \cdot \dot{C} (T_{chaude,e} - T_{froide,e})$$

$$\dot{I} = T_0[\dot{m}_{wf}(s_{froide,s} - s_{froide,e}) - \dot{m}_{ex}(s_{chaude,e} - s_{chaude,s})]$$

$$\Delta_{LMTD} = (\Delta T_1 - \Delta T_2) / \ln(\Delta T_1 / \Delta T_2)$$

$$\dot{Q} = UA \Delta_{LMTD}$$

$$U = [1/h_o + R_{f,o} + (d_o \ln(d_o/d_i)) + (d_o/h_i d_i) + (d_o R_{f,i}/d_o)]^{-1}$$

$$h = Nu \cdot k / De$$

$$\Delta p = f L \rho V^2 / 2 D_h$$

Evaporateur :

$$\dot{Q} = \dot{m}_{wf} (h_{wf,s} - h_{wf,e})$$

$$\dot{E}_{xh} = \dot{m}_{ex} [h_{ex,e} - h_{ex,s} - T_0(s_{ex,e} - s_{ex,s})]$$

$$\dot{I} = T_0[\dot{m}_{wf}(s_{wf,s} - s_{wf,e}) - \dot{m}_{ex}(s_{ex,e} - s_{ex,s})]$$

Condenseur :

$$\dot{Q} = \dot{m}_{wf} (h_{wf,e} - h_{wf,s})$$

$$\dot{I} = T_0[\dot{m}_{wf}(s_{wf,s} - s_{wf,e}) - \dot{m}_{ex}(s_{ex,e} - s_{ex,s})] [3]$$

2.4 Caractéristiques du cycle de Rankine :

2.4.1 Avantages de cycle de Rankine :

➤ Travail effectué d'autant plus grand que la différence de volume massique entre les phases de détente et de compression

$$W_{net} = W_{*turbine} - W_{pompe}$$

Changement de phase afin de maximiser cette différence.

➤ Rendement exergetique du cycle de Rankine (> 80%) inférieure à celui du cycle de Carnot (production d'entropie chauffage 2-2').

➤ Le cycle de Rankine est un cycle adéquat pour les centrales thermiques ; par contre le cycle de Carnot car il représente de grands dangers d'endommagement des matériels lors d'une compression du mélange liquide/vapeur.

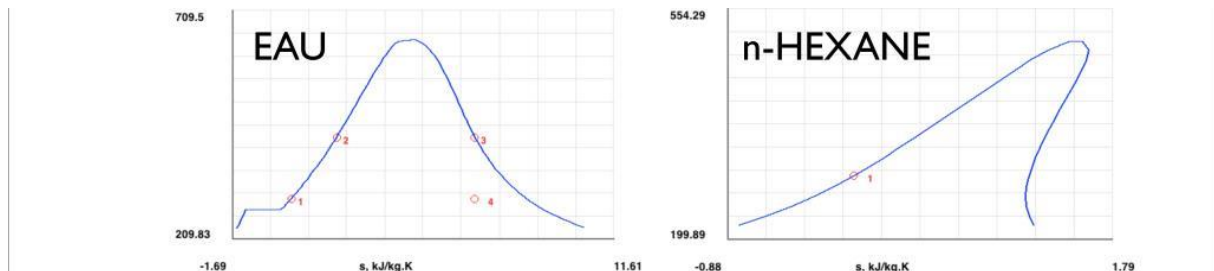
➤ Le titre de vapeur à la sortie de la turbine du cycle de Rankine est élevé , contrairement au titre de vapeur à la sortie de la turbine du cycle de Carnot n'est pas assez élevé (érosion).

2.4.2 Inconvénients du cycle de Rankine :

Le condenseur : Le condenseur sous vide pour utiliser l'ambiance comme source froide (en générale eau 298 K) complications technologiques.

Condensation partielle dans la turbine : Titre de vapeur à la sortie de la turbine inférieur à 0.88 (valeur limite pour éviter l'érosion).

- $T_e < 573 \text{ K}$ (titre après détente > 0.88).
- Machine volumétrique puissances limitées.
- Fluides organiques (cloche penchée vers la droite du diagramme Ts). [13]



2.4.4 Ecart entre cycle de Rankine réel et idéal :

Pertes en tuyauterie :

- Pertes de charge dues à la dissipation visqueuse
- Pertes de chaleur vers l'ambiance.

Pertes dans la turbine et dans la pompe :

Pertes par dissipation visqueuse (rendements isentropiques)

$$\eta_p = w_{p,ideal} / w_p = h_2^* - h_1 / h_2 - h_1$$

$$\eta_t = w_t^* / w_{t,ideal} = h_3 - h_4 / h_3 - h_4^* \quad (\text{voir diagramme T-S})$$

perdes dans le condenseur:

refroidissement du liquide sous la température de saturation dans le condenseur. [13]

3. Résolution du modèle :

Avant de s'attaquer à la définition des équations de modélisation des principales unités d'un système industriel, nous allons analyser la stratégie de résolution de ce modèle.

Deux stratégies de résolution peuvent être adoptées la résolution simultanée ou la résolution séquentielle. [14]

3.1. La résolution simultanée

Pour la résolution simultanée, on écrit l'ensemble des équations du modèle auxquelles on ajoute l'ensemble des équations de spécifications. On obtient ainsi un système de n_e équations non linéaires et de n_v variables (variables d'état, paramètres d'unités et variables internes) à résoudre

par une méthode idoine.

$$M(\mathbf{X}_x, \mathbf{X}_p) = 0$$

$$S(\mathbf{X}_x, \mathbf{X}_p) = 0 \leftrightarrow F(\mathbf{X}) = 0 (N_e \times N_v)$$

$$IN(\mathbf{X}_x) = 0$$

Avec :

$M(\mathbf{X}_x, \mathbf{X}_p)$	Les équations du modèle
$S(\mathbf{X}_x, \mathbf{X}_p)$	les équations de spécifications
$IN(\mathbf{X}_x)$	les équations de spécifications des entrées
$F(\mathbf{X})$	le système d'équations à résoudre
\mathbf{X}_x	les variables d'état des flux d'entrée
N_p	les paramètres et les variables internes du modèle
N_e	le nombre d'équations
N_v	le nombre de variables.

Prenons par exemple le cas du calcul d'une turbine (Figure 3):

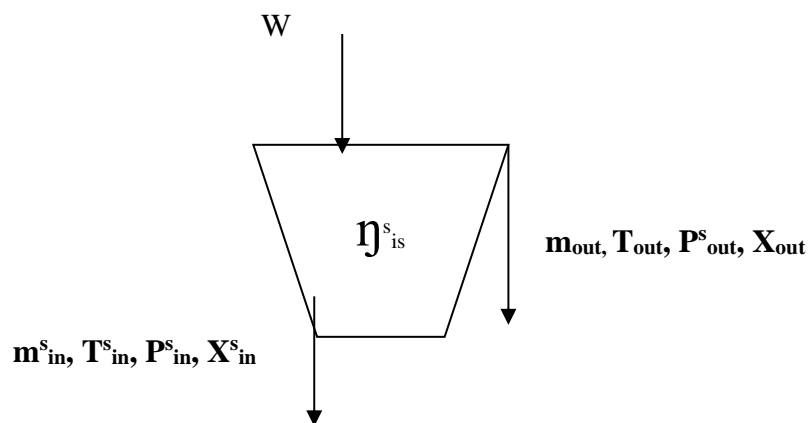


Figure III 3. Exemple de la turbine.

Sur cette figure, les suffixes « s » représente les valeurs spécifiées. L'objectif de ce modèle est donc de calculer la puissance mécanique et l'état du flux de sortie, connaissant le débit, la température, la pression et les compositions en entrée, le rendement isentropique de la turbine et la pression de sortie. [14]

Les équations de modélisation sont les suivantes :

$$m_{out} - m_{in} = 0 \quad \text{bilan de matière}$$

$$x_{out}^j - x_{in}^j = 0 \quad j=1, \dots, n_c \quad \text{bilan de matière (compositions)}$$

$$h_{in} - h(T_{in}, P_{in}, X_{in}) = 0 \quad \text{équation constitutive : calcul de l'enthalpie d'entrée}$$

Chapitre III: Application sur un système énergétique basé sur un cycle de Rankine

$s_{in} - s(T_{in}, P_{in}, X_{in})=0$ équation constitutive :calcul de l'entropie d'entrée

$h_{out}^{is} - h(s_{in}, P_{out}, X_{out})=0$ équation de détente isentropique

$h_{out} - h_{in} + \eta_{is} * (h_{in} - h_{out}^{is})=0$ équation de rendement isentropique

$T_{out} - T(h_{out}, P_{out}, X_{out})=0$ équation de liaison : calcul de température de sortie

$W - m_{in} * (h_{in} - h_{out})=0$ bilan d'énergie

A ces équations, nous ajoutons les équations de spécification des entrées et les spécifications du modèle:

Entrées :

$m_{in} - m_{in}^s = 0$ débit d'entrée

$x_{in}^j - x_{in}^{j,s} = 0$ compositions d'entrée

$T_{in} - T_{in}^s = 0$ température d'entrée

$P_{in} - P_{in}^s = 0$ pression d'entrée

Modèle :

$P_{out} - P_{out}^s = 0$ pression de sortie

$\eta_{is} - \eta_{is}^s = 0$ rendement isentropique

3.1. Résolution séquentielle :

Le principe de la résolution séquentielle est d'associer à chaque variable l'équation qui permettra de la résoudre et de déterminer l'ordre de résolution. Dans cette démarche, l'ordre de résolution est déterminé de manière à résoudre les équations en séquence, l'une après l'autre. Cette approche s'apparente à la séquence de pivotage lors de l'inversion de la matrice des équations en résolvant pour chaque élimination du pivot une équation non linéaire. Pour cette démarche, nous tenterons dans la mesure du possible de formuler la résolution de manière explicite. Ainsi pour le calcul de la i ème variable du modèle, nous écrirons : [14]

$$x_i = f_i^*(x_j), \quad i=1, \dots, i-1$$

avec $f_i^*(x_j)$ une expression non linéaire représentant la même équation

Dans cette approche, la séquence de résolution dépend de la séquence de pivotage et donc de la liste des spécifications. Dans une approche de résolution séquentielle, on essaiera lorsque c'est possible de considérer les flux d'entrées comme spécifiés. On choisira ensuite un ensemble de spécifications qui représentera un mode de fonctionnement de l'unité modélisée. Ainsi pour l'exemple, nous aurons : [14]

$$m_{out} = m_{out}^s$$

$$x_{out}^j = x_{in}^{j,s}$$

$$h_{in} = h(T_{in}^s, P_{in}^s, X_{in}^s)$$

$$s_{in} = s(T_{in}^s, P_{in}^s, X_{in}^s)$$

$$h_{out}^{is} = h(s_{in}, P_{out}^s, X_{out})$$

$$h_{out} = h_{in} - \eta_{is}^s (h_{in} - h_{out}^{is})$$

$$T_{out} = T(h_{out}, P_{out}^s, X_{out})$$

$$W = m_{in}^s (h_{in} - h_{out})$$

Ce qui correspond à la matrice d'incidence suivante :

mout	x	
xout	x	
Hin		x
Sin		x
Houtis	x	xx
Hout	x	xx
Tout	x	xx
W	x	x x

La différence principale distingue ces deux stratégies de résolution est le fait qu'il est nécessaire qu'un mode de fonctionnement différent obligera au développement d'une nouvelle séquence de résolution.

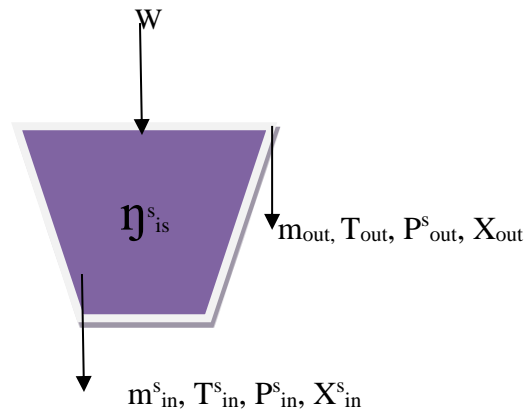


Figure.III. 4 Nouveau mode de calcul

Ainsi pour la turbine de l'exemple, si nous changeons les spécifications et que nous désirons calculer le débit pour une puissance mécanique, et une pression de sortie (Figure 4), nous devons développer une nouvelle stratégie de résolution, qui implique une reformulation importante des équations du modèle et de la séquence de résolution. [14]

$$X_{out}^j = X_{in}^{j,s}$$

$$h_{in} = h(T_{in}^s, P_{in}^s, X_{in}^s)$$

$$s_{in} = s(T_{in}^s, P_{in}^s, X_{in}^s)$$

$$h_{out}^{is} = h(s_{in}, P_{out}^s, X_{out})$$

$$h_{out} = h_{in} - \eta_{is}^s * (h_{in} - h_{out}^{is})$$

$$T_{out} = T(h_{out}, P_{out}^s, X_{out})$$

$$m = W^s / (h_{in} - h_{out})$$

$$m_{out} = m_{in}$$

Une autre méthode de résolution est de ne pas modifier la séquence de résolution et d'utiliser une boucle de promotion de convergence (Figure 5) : le modèle calcule la puissance mécanique et on modifie la valeur du débit jusqu'à ce que la puissance mécanique soit égale à la valeur spécifiée. Cette seconde approche présente l'avantage de ne pas devoir réécrire la séquence de résolution elle présente par contre le désavantage de présenter une boucle itérative qui peut se révéler coûteuse au niveau du temps de calculs.

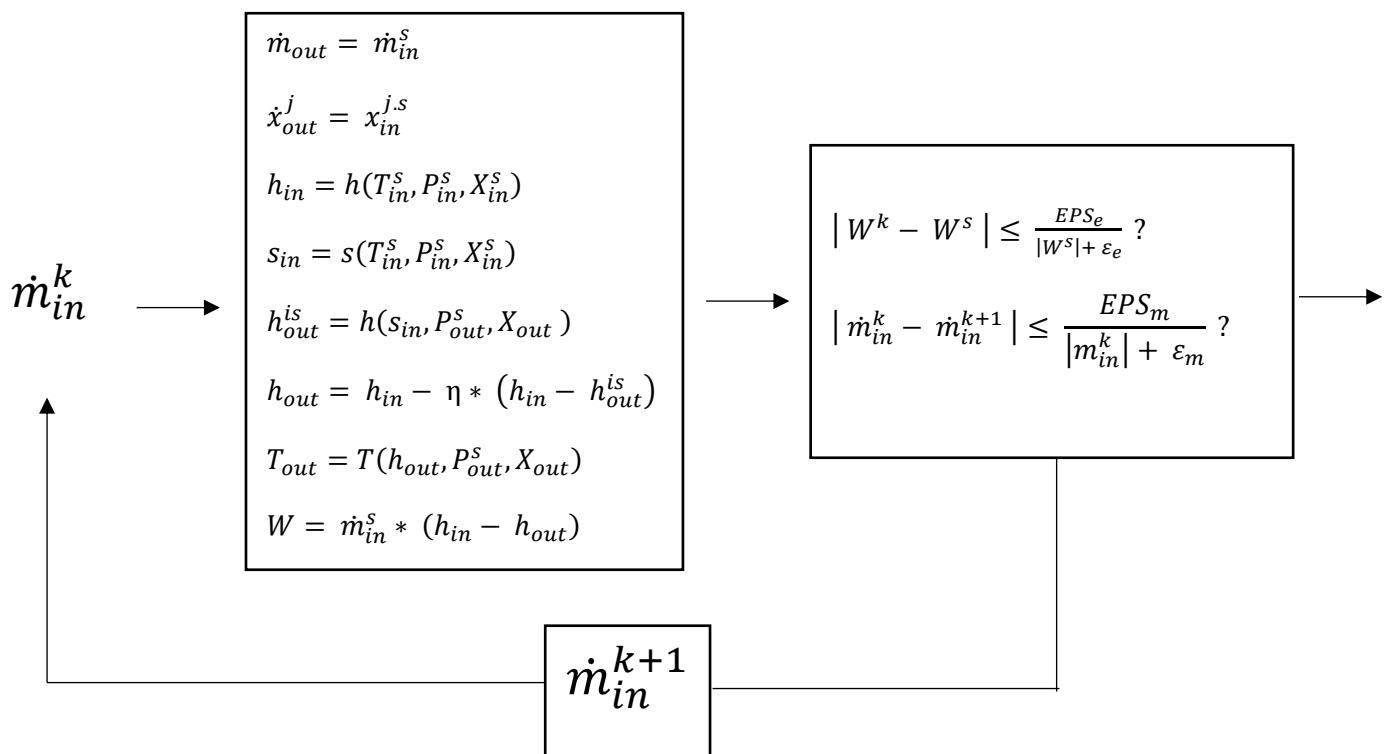


Figure III.5 : boucle itérative

Plus simples) devront être modifiées et les équations de modèles restent inchangées : [14]

Entrées :

$$x_{in}^i - x_{in}^{j,s} = 0 \quad j=1, \dots, n_c \quad \text{compositions}$$

$$T_{in} - T_{in}^s = 0 \quad \text{température}$$

$$P_{in} - P_{in}^s = 0 \quad \text{pression}$$

Spécifications modèle :

$$P_{out} - P_{out}^s = 0 \quad \text{pression de sortie}$$

$$\eta_{is} - \eta_{is}^s = 0 \quad \text{rendement isentropique}$$

Chapitre III: Application sur un système énergétique basé sur un cycle de Rankine

$W - W^s = 0$ puissance mécanique

Entrées

$\dot{m}_{in} - \dot{m}_{in}^s = 0$ débits d'entrées

$x_{in}^i - x_{in}^{j,s} = 0$ compositions d'entrée

$T_{in} - T_{in}^s = 0$ température d'entrée

Au lieu de

$P_{in} - P_{in}^s = 0$ pression d'entrée

Modèle :

$P_{out} - P_{out}^s = 0$ pression de sortie

$\eta_{is} - \eta_{is}^s = 0$ rendement isentropique

La différence se marquera également lorsque l'on désire rendre le modèle plus précis en utilisant une corrélation pour calculer le rendement plutôt que de le considérer comme constant :

$$\eta_{is} = a * \tau + b * \dot{m}_{in} + \tilde{v} + c * (\dot{m}_{in} * \tilde{v})^2 + d$$

Avec

\tilde{v} : le volume massique moyen

τ : le taux de compression

étudiée,

Pour la stratégie simultanée, les équations de définition du rendement s'ajoutent aux équations du modèle avec dans ce cas, la définition de variables internes supplémentaires représentant le volume massique moyen et le taux de compression. Au niveau des spécifications, la spécification de modélisation considérant le rendement isentropique comme une constante sera remplacée par la spécification des valeurs des coefficients de corrélation. [14]

$$\dot{m}_{out} - \dot{m}_{in} = 0$$

$$x_{out}^i - x_{in}^i = 0$$

$$h_{in} - h(T_{in}, P_{in}, X_{in}) = 0$$

$$s_{in} - s(T_{in}, P_{in}, X_{in}) = 0$$

$$\tau * P_{out} - P_{in} = 0$$

$$\tilde{v} - [v(T_{in}, P_{in}, X_{in}) + v(T_{out}, P_{out}, X_{out})] / 2 = 0$$

$$\eta_{is} - a * \tau + b * \dot{m}_{in} + \tilde{v} + c * (\dot{m}_{in} * \tilde{v})^2 + d = 0$$

$$h_{out} - h_{in} - \eta_{is} * (h_{in} - h_{out}^s) = 0$$

$$T_{out} - T(h_{out}, P_{out}, X_{out}) = 0$$

$$W - \dot{m}_{in} * (h_{in} - h_{out}) = 0$$

Et pour les spécifications :

$$\dot{m}_{in} - \dot{m}_{in}^s = 0$$

Chapitre III: Application sur un système énergétique basé sur un cycle de Rankine

$$x_{in}^j - x_{in}^{j,s} = 0$$

$$T_{in} - T_{in}^s = 0$$

$$P_{in} - P_{in}^s = 0$$

$$P_{out} - P_{out}^s = 0$$

$$a - a^s = 0$$

$$b - b^s = 0$$

$$c - c^s = 0$$

$$d - d^s = 0$$

Pour le même modèle mais avec une stratégie séquentielle, il n'est plus possible de trouver une stratégie de résolution 1 variable/ 1 équation, en effet, le calcul du volume massique moyen nécessite la connaissance du volume massique à la sortie qui ne peut être calculé que si on connaît la température de sortie et donc le rendement isentrope.

Il sera donc nécessaire d'introduire une boucle de résolution itérative. [14]

$$\dot{m}_{out} = \dot{m}_{in}^s$$

$$X_{out}^i = X_{out}^{j,s}$$

$$h_{in} = h(T_{in}^s, P_{in}^s, X_{in}^s)$$

$$s_{in} = s(T_{in}^s, P_{in}^s, X_{in}^s)$$

$$h_{out}^{is} = h(s_{in}, P_{out}^s, X_{out}^s)$$

$$\zeta = P_{in}^s / P_{out}^s$$

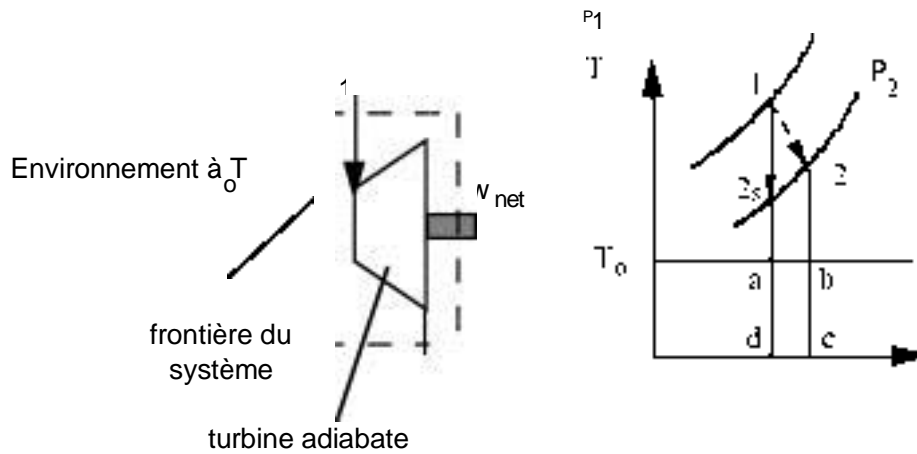


Figure III. 6: Détente isentropique et modèle de détente dans une turbine

L'équation est de la forme suivante:

$$W = m \cdot (h_{in} - h_{out})$$

avec
$$h_{in} - h_{out} - \eta (h_{in} - h_{out}^s(P_{in}, h_{in}, P_{out})) = 0 \quad (8)$$

h_{in} l'enthalpie molaire d'entrée de l'étage de détente;

h_{out} l'enthalpie molaire de sortie de l'étage de détente;

P_{in} la pression d'entrée de l'étage de détente;

P_{out} la pression de sortie de l'étage de détente;

η le rendement isentropique de la détente;

$h_{out}^s(P_{out}, h_{in}, P_{in})$ l'enthalpie molaire résultant d'une détente isentropique entre h_{in}, P_{in} et la pression de sortie P_{out} .

3.2 Exemple de quelques modèles :

a) Les turbine et compresseur :

Le modèle de l'unité de la turbine ou du compresseur simule un étage de détente (ou de compression). Une turbine multi-étagée sera donc représentée par une succession d'étages de détente et de diviseurs pour représenter les soutirages. Le modèle de l'étage de détente (ou de compression) est basé sur l'équation de détente (compression) isentropique. [5] Cette équation est écrite en fonction des variables intensives (enthalpie molaire et pression). Elle peut donc être évaluée même lorsque le débit qui traverse la turbine est nul.

Le rendement et le taux de compression ainsi que l'expression du débit volumique limite pourront être exprimés en fonction des autres variables d'état sous la forme de courbes caractéristiques.

Celles-ci permettront de représenter le comportement d'une turbine ou d'un compresseur du procédé lorsque les conditions de fonctionnement varient. Dans le cas où l'unité n'existe pas (conception de procédé), on choisira un rendement isentropique constant pour chaque étage de détente (taux de détente moyen : 3) ou on utilisera une corrélation basée sur l'analyse du marché par exemple Peltzer (1998). L'utilisation de corrélation définissant le rendement doit être considérée avec prudence, il faut notamment s'assurer de la similitude des conditions de fonctionnement.

Le choix de la valeur sera fonction du type de la turbine choisie. On se référera par exemple à Chauvel et al. (2001) pour obtenir une valeur typique.

La distribution de la vapeur (header)

Dans les systèmes énergétiques intégrés, la vapeur peut être produite dans différentes chaudières ou turbine puis être distribuée vers différents utilisateurs : turbine, procédés, réseau de chauffage urbain, etc... La distribution de la vapeur est assurée par un réseau de tuyaux qui est maintenu à un niveau de pression donné. Chaque réseau de pression est appelé « header », il joue un rôle de collecte et de distribution de la vapeur. Le modèle du header suppose que la pression de tous les flux de sortie sera identique. Ce faisant, on néglige la perte de charge dans les tuyaux séparant deux points d'alimentation ou de soutirage.

Une caractéristique importante du header est que le débit dans les portions de tuyaux est inconnu et peut s'inverser suivant la valeur des débits d'alimentation et de soutirage. Ceux-ci sont en fait définis en fonction des choix réalisés par l'optimisation et en fonction des demandes à satisfaire.

[5]

Ceci est illustré par l'exemple de la Figure 7.

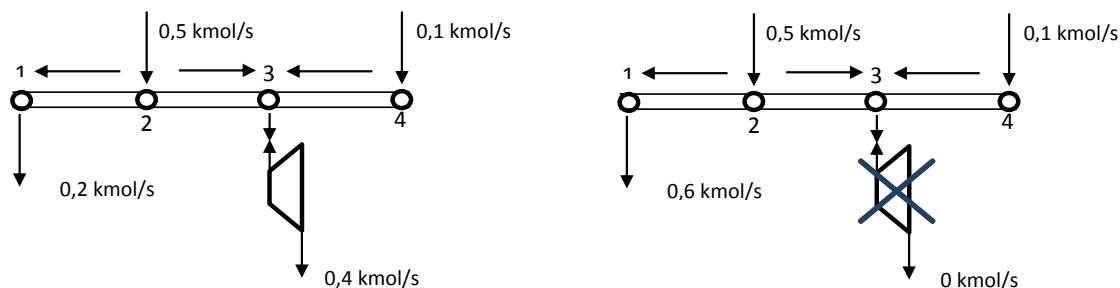


Figure III.7 Caractéristique du Header

Lorsque la turbine fonctionne, les deux entrées du header sont mélangées (point 3) pour alimenter la turbine. L'entrée (2) est le siège d'une division. Par contre, lorsque la turbine n'est pas utilisée, le point d'alimentation (2) devient un mélangeur et l'état thermodynamique du soutirage (1) peut

être totalement différent.

Le modèle développé pour simuler le header permet de calculer les changements de direction dans le sens d'écoulement (Figure 7) du fluide concerné. Le changement du sens de l'écoulement entre deux headers est également calculé. Dans ce cas, la perte de charge qui dépend du débit qui s'écoule entre les deux headers permettra de calculer la pression des deux headers

La difficulté de la modélisation d'une situation telle que celle décrite ci-dessus est que, malgré le fait que le nombre de degrés de liberté de l'ensemble reste identique, le nombre d'équations générées à chaque noeud (point de connexion d'un flux sur le header) change. [14]

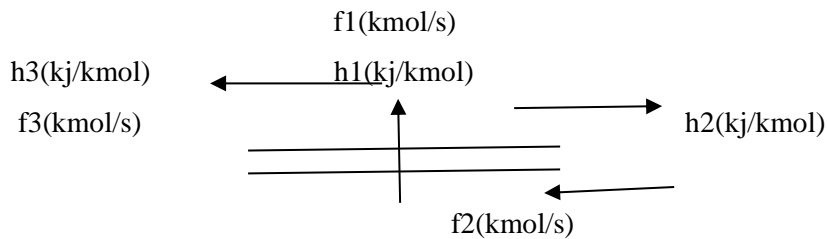


Figure III 8 : Simulation du diviseur ou du mélangeur

Si le débit du flux 2 (Figure 8) va de gauche à droite, le noeud est un diviseur dont la simulation introduit 3 équations:

1) Bilan de matière :

$$f_1 - f_2 - f_3 = 0$$

2) équation de simulation :

$$h_2 - h_1 = 0 \quad h_3 - h_1 = 0$$

Par contre, si le débit va de droite à gauche, la simulation du mélangeur introduit 2 équations:

bilan de matière

$$f_1 + f_2 - f_3 = 0$$

Equation de bilan de chaleur

$$f_3 h_3 - f_1 h_1 - f_2 h_2 = 0$$

Nous voyons que si en cours d'itération, les débits sont tels que le type des noeuds change, nous ne pourrons réaliser le calcul par une approche.

simultanée, puisque le type et les incidences, c'est-à-dire les variables qui interviennent dans les équations, vont changer.

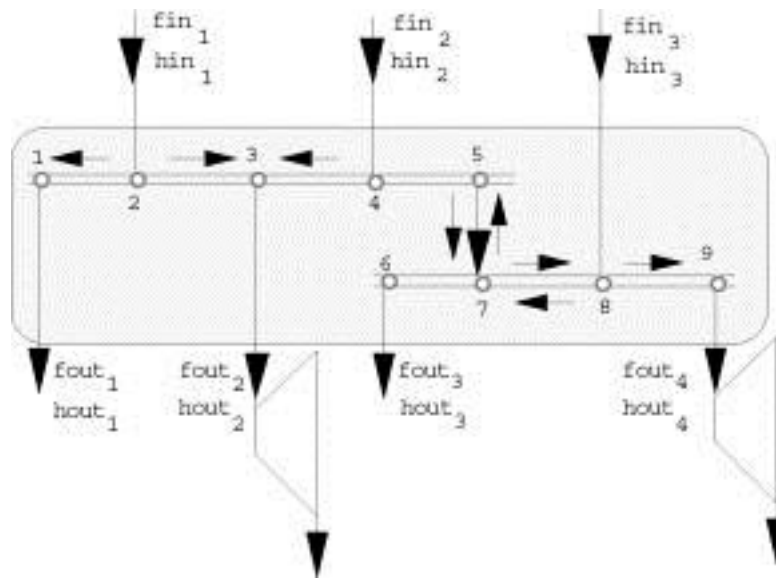


Figure III. 9: Modélisation d'un ensemble de headers interconnectés

Cette situation est difficile à gérer dans les deux approches de résolution. Dans une approche séquentielle il sera nécessaire d'adapter la séquence de résolution en fonction des débits et donc de calculer les noeuds soit sous la forme de mélangeurs soit sous la forme de diviseurs. Dans le cas de l'approche simultanée, il est nécessaire de choisir une approche hybride combinant l'approche simultanée et l'approche séquentielle. L'algorithme utilisé est le suivant:

considérons le système (Figure 10) de tous les headers interconnectés comme un ensemble d'unités en ce qui concerne les débits et les pressions et comme une seule unité pour calculer les bilans de chaleurs.

1. Les bilans de matière étant linéaires, ils seront satisfaits à chaque itération de la procédure itérative, pour autant que l'on accepte des débits négatifs.
2. Connaissant les débits, nous pouvons déterminer le type, mélangeur ou diviseur, de chaque noeud.
3. Il est alors toujours possible de déterminer une séquence de calcul des noeuds (suite de diviseurs et de mélangeurs) qui permette de calculer le contenu enthalpique des flux de sortie du système.
4. Générer les équations de modélisation du header à partir des enthalpies molaires calculées .

$$H_{ci}(f_{in_j}, h_{in_j}) - h_{out_i} = 0 \quad i=1, \dots, n_{out} \quad (9)$$

Avec

h_{ci} : l'enthalpie molaire calculée pour la sortie i du système ; calculée en fonction des débits et des enthalpies d'entrées .

f_{in_j} : le débit de l'entrée j du système .

h_{in_j} : l'enthalpie molaire de l'entrée j du système .

h_{out_i} : l'enthalpie molaire de la sortie i (dans la liste des variables d'état).

Dans ce cas, bien que l'ordre de calcul des différents noeuds puisse changer en cours d'itération, la

définition des équations restera identique. Par cette représentation, nous ne supprimons pas les discontinuités dans les dérivées des équations lors du passage d'un type à un autre. Cependant, afin d'atténuer la valeur de ces discontinuités, les dérivées de h_{c_i} sont calculées par perturbation numérique des fin_j et des hin_j .

Remarquons que les équations sont à nouveau écrites en fonction de l'enthalpie molaire. Les équations peuvent donc être évaluées même lorsque le débit est nul.

Nous présentons ce modèle pour illustrer l'ensemble des possibilités ou astuces qui peuvent être utilisées lors de la formulation d'un modèle. [14]

b) L'échangeur de chaleur :

Dans les systèmes énergétique industriel, les échangeurs de chaleur procèdent souvent par des changement de phase : condenseur et évaporateur d'une pompe à chaleur, échangeurs de préchauffe par condensation de vapeur, condenseur en sorti de turbine de condensation, ... Le modèle de simulation de l'échangeur de chaleur doit tenir compte des changements de phase. Dans ce cas, la formule classique (10) qui résulte de l'hypothèse de c_p constants ne peut plus être appliquée. [14]

$$Q = UA DT_{LM} \quad (10)$$

Q : la chaleur échangée dans l'échangeur;

U : le coefficient de transfert de chaleur moyen de l'échangeur;

A : la surface d'échange de l'échangeur;

DT_{LM} : la moyenne logarithmique des écarts de températures entre les flux chaud et froid.

Dans le cas d'un changement de phase, l'échangeur sera modélisé en considérant une succession de zones (Figure 11) dans lesquelles les c_p des deux fluides peuvent être considérés comme constants et pour chacune desquelles la formule pourra être appliquée. [14]

4.méthode de Newton Raphson :

4.1Historique :

La méthode de résolution des équations numériques a été initiée par Isaac Newton vers 1669 sur des exemples numériques mais la formulation était fastidieuse. Dix ans plus tard, Joseph Raphson met en évidence une formule de récurrence. Un siècle plus tard, Mouraille et Lagrange étudient la convergence des approximations successives en fonction des conditions initiales par une approche géométrique. Cinquante ans plus tard, Fourier et Cauchy s'occupe de la rapidité de la convergence. [15]

4.2 La méthode :

La méthode consiste à introduire une suite (x_n) d'approximation successives de l'équation $f(x) = 0$.

- On part d'un x_0 proche de la solution.

Chapitre III: Application sur un système énergétique basé sur un cycle de Rankine

- À partir de x_0 , on calcule un nouveau terme X_1 de la manière suivante : on trace la tangente à Cf en x_0 . Cette tangente coupe l'axe des abscisses en x_1 comme indiqué sur la figure ci-dessous.
- On réitère ce procédé en calculant x_2 en remplaçant x_0 par x_1 , puis x_3 en remplaçant x_1 par x_2 et ainsi de suite . . . [15]

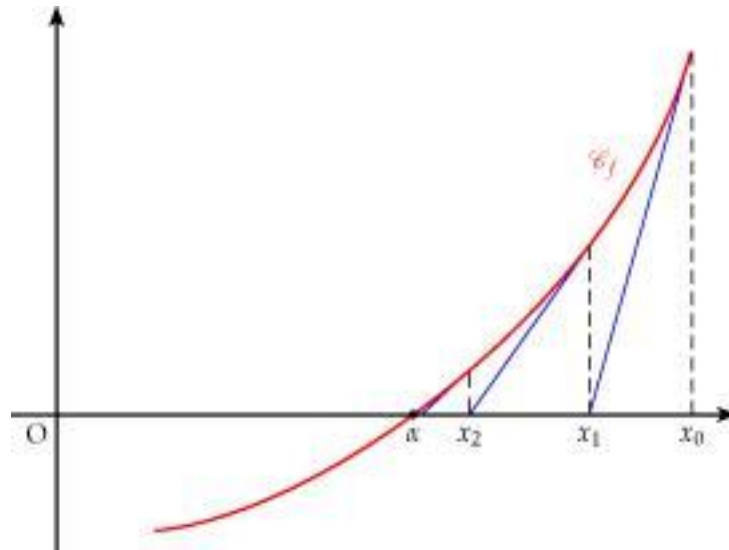


Figure III.10 : Méthode de Newton Raphson

Chapitre4

Résultats et discussion

Résultats et discussions :

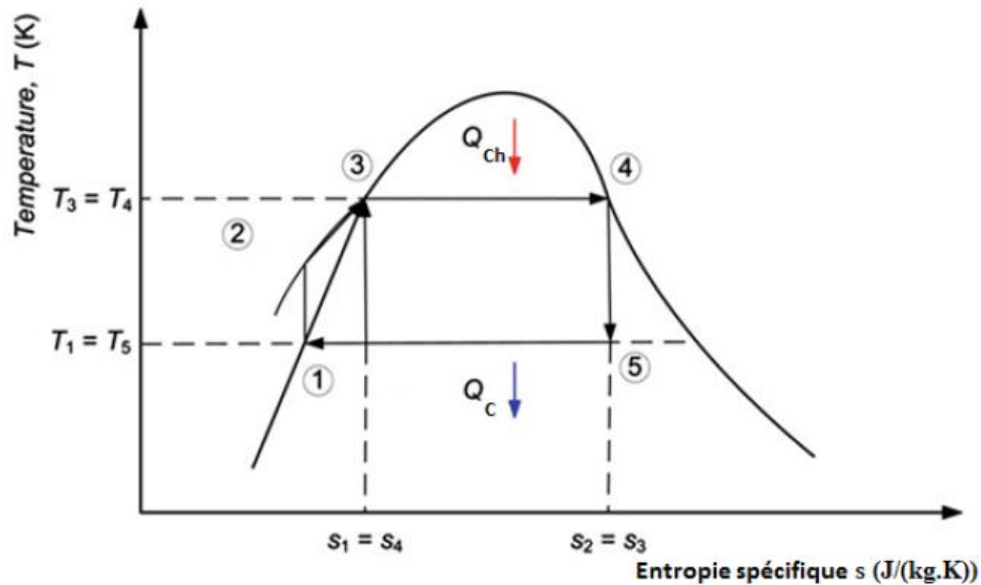


Figure IV. 1 : Diagramme de température et entropie spécifique, du cycle de RANKINE.

Tableau 1 : Les données des calculs (Voir la figure 1)

Points	Les données	Test 1	Test 2	Test 3
1	L'enthalpie h_1	417.51 kJ/kg	379.787 kJ/kg	459.424 kJ/kg
	Température T_1	$T_1 = 99.61^\circ\text{C}$	90.61°C	109.61°C
2	L'enthalpie h_2	427.836 kJ/kg	389.441 kJ/kg	470.497 kJ/kg
	Température T_2	100.287°C	91.287°C	110.287°C
3	L'enthalpie h_3	/	/	/
	Température T_3	311.000°C	302°C	321°C
4	L'enthalpie h_4	2725.5 kJ/kg	2646.627 kJ/kg	2813.136 kJ/kg
	Température T_4	311.000°C	302°C	321°C
5	L'enthalpie h_5	2025.274 kJ/kg	90.61°C	2228.594 kJ/kg
	Température T_5	$T_1 = 99.61^\circ\text{C}$	1842.285 kJ/kg	109.61°C

Exemple de calcul :

Bilan thermique (évolution isentropique) :

La quantité de chaleur de la chaudière (q_{ch}) :

$$q_{ch} = h_4 - h_2$$

$$q_{ch} = 2725.5 \text{ kJ/kg} - 427.836 \text{ kJ/kg}$$

$$q_{ch} = 2297.66 \text{ kJ/kg}$$

La quantité de chaleur du condenseur (q_c) :

$$q_c = h_5 - h_1$$

$$q_c = 2025.274 \text{ kJ/kg} - 417.51 \text{ kJ/kg}$$

$$q_c = 1607.764 \text{ kJ/kg}$$

Le travail de la pompe (w_p) :

$$w_p = h_2 - h_1$$

$$w_p = 427.836 \text{ kJ/kg} - 417.51 \text{ kJ/kg}$$

$$w_p = 10.326 \text{ kJ/kg}$$

Le travail de la turbine (w_t) :

$$w_t = h_4 - h_5$$

$$w_t = 2725.5 \text{ kJ/kg} - 2025.274 \text{ kJ/kg}$$

$$w_t = 700.226 \text{ KJ/Kg}$$

Le travail utile (w_u) :

$$w_u = w_t - w_p = q_{ch} - q_c$$

$$w_u = 700.226 \text{ kJ/kg} - 10.326 \text{ kJ/kg}$$

$$w_u = 689.9 \text{ kJ/kg}$$

Le rendement (η) :

$$\eta = w_u / q_{ch} = q_{ch} - q_c / q_{ch}$$

$$\eta = 689.9 \text{ kJ/kg} / 2297.99 \text{ kJ/kg}$$

$$\eta = 0.30$$

Tableau 2 : Résultats des calculs

	Test 1	Test 2	Test 3
Quantité de chaleur de la chaudière (KJ/Kg)	$q_{ch} = 2297.99 \text{ KJ/Kg}$	$q_{ch} = 2257.187 \text{ KJ/KG}$	$q_{ch} = 2342.639 \text{ KJ/KG}$
Quantité de chaleur du condenseur (KJ/Kg)	$q_c = 1607.764 \text{ KJ/Kg}$	$q_c = 1462.498 \text{ KJ/Kg}$	$q_c = 1769.17 \text{ KJ/Kg}$
Travail de la pompe (KJ/Kg)	$W_p = 10.326 \text{ KJ/Kg}$	$W_p = 9.654 \text{ KJ/Kg}$	$W_p = 11.073 \text{ KJ/Kg}$
Travail de la turbine (KJ/Kg)	$W_t = 700.226 \text{ KJ/Kg}$	$W_t = 804.342 \text{ KJ/Kg}$	$W_t = 584.542 \text{ KJ/Kg}$
Travail utile (KJ/Kg)	$W_u = 689.9 \text{ KJ/Kg}$	$W_u = 794.988 \text{ KJ/Kg}$	$W_u = 573.469 \text{ KJ/Kg}$
Rendement (%)	$\eta = 30\%$	$\eta = 35\%$	$\eta = 24\%$

Discussions des graphes :

Les figures (2) et (3) présentent le sens de la variation du rendement thermique en fonction de la température de la surchauffe pour une installation travaillant suivant le cycle RANKINE.

Notre étude consiste à étudier l'influence de la basse pression ainsi que de la haute pression en fonction de la température sur les performances du cycle RANKINE. Systématiquement, notre travail se divise en deux parties.

Dans la première partie, nous avons choisi une valeur fixe de la haute pression, on a fait varier la température. Les résultats présentés dans les graphes de la figure (2) montrent nettement l'évolution du rendement en fonction de la température basses, plus la température est haute plus le cycle possède un rendement meilleur.

L'évolution du rendement est proportionnelle à la variation de la température et inversement proportionnelle à la variation de la basse pression.

La deuxième partie consiste à étudier l'influence du choix de la haute pression sur les performances de notre installation en fonction de la température.

On a choisi une valeur fixe de la basse pression, on a fait varier la haute pression, on constate l'évolution du rendement dans les graphes présentés dans la figure (3) en fonction de la température, plus la température augmente plus le cycle possède un rendement meilleur.

L'évolution du rendement est en parallèle avec la variation de la température et inversement proportionnelle à la variation de la haute pression.

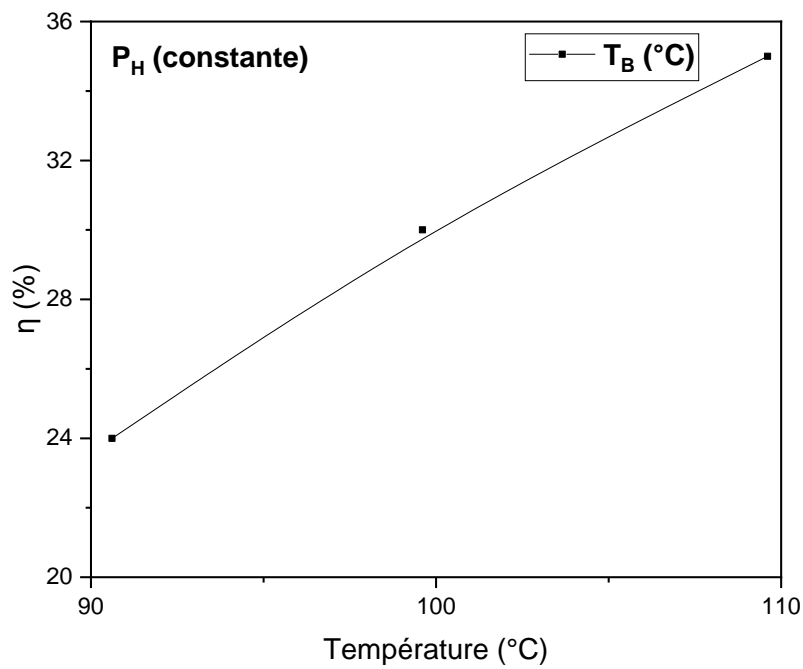


Figure IV. 2 : Variation du rendement en fonction des températures pour avec hautes pressions constantes.

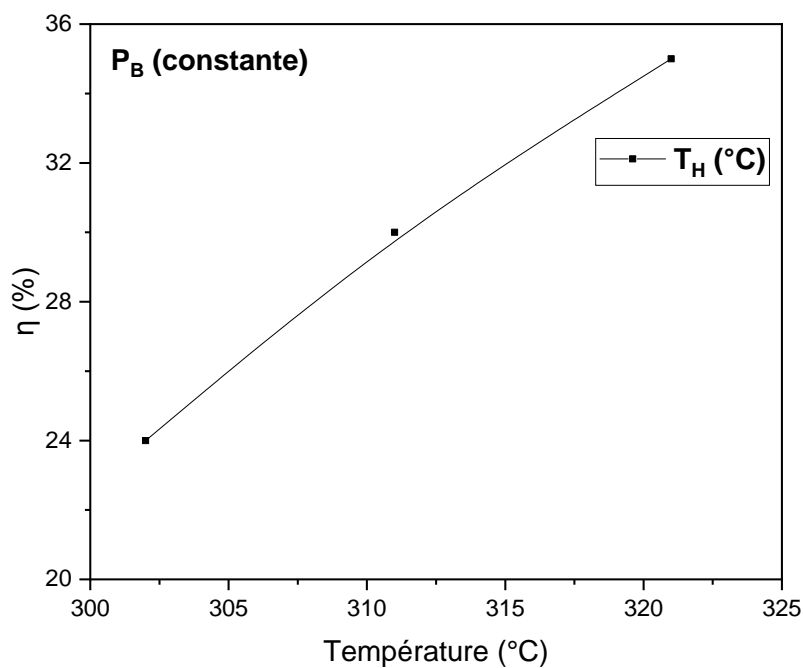


Figure IV.3 : Variation du rendement en fonction des températures pour avec basses pressions constantes.

Les figures (4) et (5) présentent la variation du rendement en fonction des pressions. La première figure (4) consiste à étudier l'influence du choix de la basse pression sur les performances du cycle de RANKINE, alors que la deuxième Figure (5) montre l'effet du choix de la haute pression sur le rendement de ce dernier.

Pour clarifier et valoriser nos résultats nous avons établi notre étude avec une valeur constante pour la haute pression dans la première partie et de la basse pression dans la dernière.

Dans la première analyse, Figure (4), on a choisi une pression haute constante pour voir l'influence de la basse pression qu'on l'a fait varier, nous avons remarqué qu'à l'augmentation de cette dernière, le rendement évolue inversement.

La figure (5) illustre l'aspect de l'effet de la haute pression sur le rendement du cycle de RANKINE, ce qui nous a poussés à faire la deuxième analyse : l'influence de la haute pression sur les performances thermodynamiques.

Ainsi dit, nous avons établi la deuxième analyse, et à partir des résultats, nous avons confirmé ce que nous avons remarqué avant, l'évolution du rendement est directement proportionnelle à la variation de la haute pression.

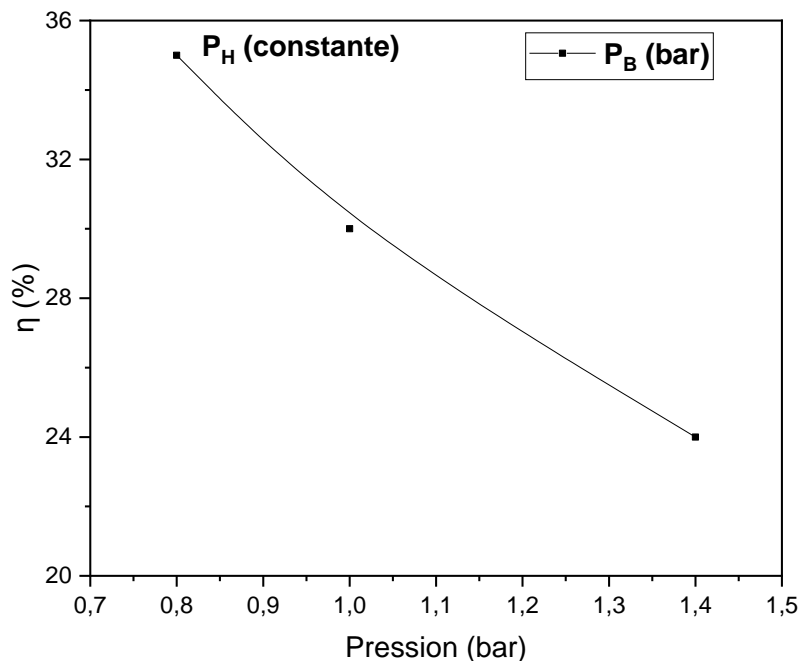


Figure IV. 4 : Variation du rendement en fonction des basses pressions pour hautes pressions constantes.

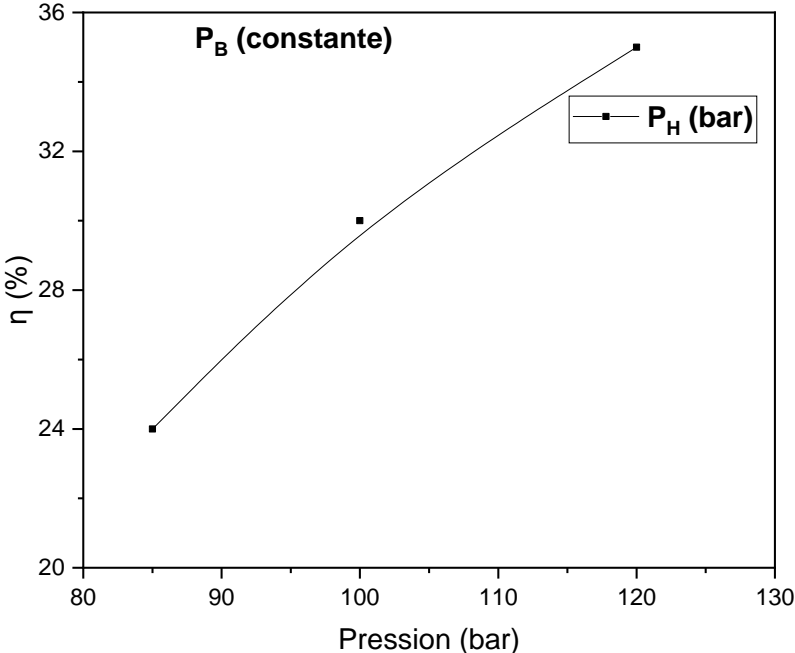


Figure IV. 5 : Variation du rendement en fonction des hautes pressions pour basses pressions constantes.

Conclusion générale

Conclusion général

Dans ce mémoire on a présenté une modélisation thermo-économique d'un système énergétique industriel, et on a pris une installation thermique travaillant par le cycle de Rankine telle que la production d'électricité.

Dans une première partie on a étudié un système énergétique industriel ; ses problèmes et ses limites son efficacité énergétique et ses impacts environnementaux, on a abordé aussi la thermo économie et son objectif de calcul.

On a parlé aussi de la modélisation d'un système ;ses différentes variables et méthodes de résolution.

Dans la dernière partie on a fait une étude sur le cycle de Rankine, avec ses équations de dimensions pour enfin discuter les résultats.

On a remarqué dans le dernier chapitre celui des résultats que le rendement thermique en fonction de la température de surchauffe pour une installation travaillant suivant le cycle de Rankine est proportionnel à l'élévation de la température et inversement proportionnel à la variation de la haute et de la basse pression en maintenant la valeur de haute pression constante et l'autre fois la valeur de la basse pression constante.

On a observé aussi que l'évolution du rendement est proportionnelle à la variation de la haute pression et inversement proportionnelle à la variation de la basse pression.

Référence

Bibliographique

Références bibliographiques :

- [1] : Dr François MARECHAL . livret 1 modélisation et optimisation des systèmes énergétiques industriels (introduction) . v29.04.2002.
- [2] : Gérard Sarlos, Pierre André Haldi, Pierre Verstraete. Systèmes énergétiques (volume21). Presses polytechniques et universitaires romandes.
- [3] : [http//direns.mines-paritech.fr/sites/hop/fr/co/exergie.html](http://direns.mines-paritech.fr/sites/hop/fr/co/exergie.html)
- [4] : Dr Benoit Olsommer. Optimisation thermoéconomique de la centrale d'incinération du chatillon (FR).école polytechnique fédérale de Lausanne. C:\Users\hp\Downloads\Documents\LENI-1998-023_2.pdf
- [5] : Dr François MARECHAL.livret5 solving méthodes pdf.fm 09.2004.EPA
- [6] : Dr François MARECHAL . livret 1 modélisation et optimisation des systèmes énergétiques industriels . v29.04.2002.
- [7] : Gérard Sarlos, Pierre André Haldi, Pierre Verstraete. Systèmes énergétiques (volume21). Presses polytechniques et universitaires romandes.
- [8] : Dr François MARECHAL . livret 2 modélisation et optimalisation des systèmes énergétiques industriels(les modèles d'unité). v29.04.2002.
- [9] : Dr François MARECHAL . livret 4 modélisation et optimalisation des systèmes Energétique industriel. (méthodologie d'optimalisation). v29.04.2002.
- [10] : André l'Allemand. BE8053. V1.10 .04.2007.
- [11] : Téo Polliman. Thermodynamique réversible appliquée à l'étude et l'optimisation du cycle de Rankine organique alimenté par l'énergie solaire. session : 03.09.2014. université de Lorraine.
- [12] : Van Long Le, Michel Feidt, Abdelhamid Kheiri. Modélisation et optimisation des technologies de récupération de chaleur, exemple de L'ORC. Université de Lorraine. Paris le 22.11.2013.
- [13] : Alessandro Parente. Thermodynamique appliquée (cycles moteurs). Université Libre de Bruxelles.16.11.2011.
- [14] : Dr François MARECHAL . livret 2 modélisation et optimalisation des systèmes énergétiques industriels(les modèles d'unité). v29.04.2002.
- [15] : Paul Milan. Algorithme sur la méthode Newton-Raphson. 5.11.2015.