

**REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR
ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE**

**UNIVERSITE CONSTANTINE 1
FACULTE DES SCIENCES EXACTES
DEPARTEMENT DE PHYSIQUE**

N° d'ordre:.....
Série :.....

THESE

PRESENTEE POUR OBTENIR LE DIPLOME DE DOCTORAT EN SCIENCES

SPECIALITE : PHYSIQUE ENERGETIQUE

OPTION : PHOTO-THERMIQUE

THEME

**ETUDE NUMERIQUE DU TRANSITOIRE ACCIDENTEL D'UNE
CHAUDIERE INDUSTRIELLE PAR LE CODE RELAP5/MOD3.2**

Présentée par :

M^{me} DEGHAL Née CHERIDI Amina Lyria

Soutenu le : 29 / 09 / 2013

Devant le jury:

Président:	M.DJEZZAR	Prof.	Univ. Constantine 1
Rapporteur:	A.CHAKER	Prof.	Univ. Constantine 1
Examineur:	H.BENMOUSSA	Prof.	Univ. Batna
	B.BENYOUCEF	Prof.	Univ. Tlemcen
	B.BOUCHEKIMA	Prof.	Univ. Ouargla
	B.DRAOUI	Prof.	Univ. Bechar

A la mémoire de mon cher regretté grand père Mehdi

Combien tu avais aimé me voir grandir devant tes yeux bleu de mer qui sablaient de larmes d'innocence, combien tu avais aimé me chérir et me porter sur tes long bras de fer pour m'accueillir avec ta chaleur pleine d'affection et de tendresse alors que j'étais toute petite et frileuse.

Combien tu attendais de me voir grandir, Tu avais voulu me voir m'épanouir et arriver aux sommets de tes pensées.

Oui, oui grand père je suis arrivée, oui je me rappelle, et mes larmes ne cessent d'écrire les mots.

Merci grand père de ton aide, et de ta patience dont tu avais fais preuve durant toute ta vie.

Tu es absent, mais tu resteras vivant dans mon esprit et dans mon cœur tout au long de mon chemin.

A toi mon cher regretté grand père, je dédie ce travail.

« Repose en paix grand père et que dieu t'accueille en son vaste paradis »

Dédicaces

Je dédie ce modeste travail à mes chers parents

A mon cher mari

A mes chers frères

A mes nièces Chiraz et Nouna

A toute ma famille

Et à tous ceux qui m'ont aidée de près ou de loin et contribué par leur précieux apport à la réalisation de ce travail.

Remerciements

Je tiens à saluer toute personne qui, de près ou de loin, a contribué à la concrétisation de ce travail de thèse de doctorat. Ces remerciements sont rédigés dans des instants de relâchement intellectuel, sans véritable rigueur ni souci. J'ai laissé au hasard de ma mémoire, impressionnée par les événements récents et chargée d'émotions, le soin de retrouver ces personnes. Dans un autre état d'esprit, ces remerciements auraient certainement été tout autre, et j'aurais peut être oublié un des noms qui suivent.

Tout d'abord, mes remerciements s'adressent en la personne de mon encadreur qui m'a dirigée et encadrée tout au long de ces années d'étude **Mme. Abla Chaker** Professeur à l'Université de Constantine. Lors de nos discussions enrichissantes, elle m'a apportée une compréhension plus approfondie des divers aspects du sujet. Je salue aussi la souplesse et l'ouverture d'esprit dont elle a fait preuve, qui a su me laisser une large marge de liberté pour mener à bien ce travail de recherche.

Je tiens à exprimer ma profonde gratitude à celui qui m'a fait l'honneur de présider le jury de la thèse de doctorat, **Mr. Djeddar Mahfoud**, Professeur à l'université de Constantine.

Je remercie vivement **Mr. Benmoussa Hocine**, Professeur à l'Université de Batna d'avoir accepté d'examiner cette thèse.

J'adresse mes vifs remerciements à **Mr. Benyoucef Boumédiène**, Professeur à l'Université de Tlemcen, pour l'intérêt qu'il a bien voulu accorder à cette thèse et participer à la soutenance.

Mes remerciements s'adressent à **Mr. Bouhekima Bachir**, Professeur à l'Université d'Ouargla pour avoir bien voulu examiner le contenu de ce travail et participer à la soutenance.

J'adresse mes remerciements à **Mr. Draoui Belkacem**, Professeur à l'Université de Bechar, pour son intérêt à ce travail et pour m'avoir fait l'honneur d'accepter de faire partie de ce jury.

Je remercie **Mr. Loubar Ahcene**, Attaché de Recherche au Centre de Recherche Nucléaire de Birine, qui a notablement contribué à ma compréhension des problèmes liés au code RELAP5 et à l'analyse des données. En outre, je lui suis reconnaissante de l'accueil, de la patience, et de la disponibilité dont il a fait preuve pour discuter certains des aspects scientifiques et techniques du sujet.

Je tiens à exprimer ma reconnaissance à **Mr. Halladja Brahim**, Chef de Service d'Etude et **Mr. Benyazar Abd-Essalam** pour leur accueil chaleureux au **Complexe GNL de Skikda SONATRACH**. Le séjour a été trop bref et précipité à mon goût, mais enrichissant aussi bien sur le plan théorique que pratique.

Ma gratitude s'adresse à ceux qui ont été mes collègues de bureau. Tout d'abord pour leur accueil, mais surtout pour les nombreuses discussions que nous avons eu pour la bonne compréhension du code, des systèmes de référence et de l'analyse des données, pour leurs conseils, et pour leur aide inestimable en fin de thèse. De même, je remercie ma Hiérarchie à commencer par **Mr. Bouhli Said**, Directeur de Division de Sûreté Nucléaire et de Radioprotection ainsi qu'à **Mrs. Keris Abdelmoumene** Directeur Général et **Benazza Mohamed El-Hafid**, Secrétaire Général Du Centre de Recherche Nucléaire de Birine, qui m'ont aidé à exécuter mes travaux de recherche dans de bonnes conditions.

Je tiens à exprimer ma connaissance à **Mr. Le Directeur du Complexe GNL de Skikda** pour son accueil chaleureux et pour m'avoir autorisé à mener le sujet de ce travail dans son institution, de même que pour m'avoir autorisé à accéder à des informations qui m'étaient nécessaires pour accomplir ce travail.

Je souhaite également remercier **le personnel du Complexe GNL de Skikda SONATRACH**. Pour tous les efforts qu'il a fournis afin que j'achève mon travail dans les meilleures conditions possibles.

Je clos enfin ces remerciements en exprimant mes vifs remerciements à mon cher et adorable mari que j'ai eu beaucoup de chance de l'avoir à mes côtés, qui m'a soutenu tout au long de ces années de travail. Pour sa patience, pour sa remarquable compréhension sans lesquelles ce travail n'aurait jamais abouti.

NOMENCLATURE

Caractères latins

FIG	: Coefficient de friction à l'interphase gaz	
FIF	: Coefficient de friction à l'interphase liquide	
FWG	: Coefficient de friction aux parois pour la phase gazeuse	
FWF	: Coefficient de friction aux parois pour la phase liquide	
B_x	: Coefficient de frottement à l'interphase suivant la direction x	
V	: Vitesse	m/s
U	: Energie interne	J
h	: Enthalpie phasique	J/kg
M	: Masse totale du gaz non-condensable dans la phase gazeuse	g
P	: Pression	Pa
T	: Température	K
A	: Section d'écoulement	m ²
S	: Section de chauffage	m ²
C _p	: Chaleur spécifique	J/kg.K
K	: Conductivité thermique	W/m.K
M	: Débit massique	kg/s
PCI	: Pouvoir calorifique inférieur du combustible	kcal/kg
q	: Densité de flux thermique	W/m ²

Lettres grecques

α	: Taux de vapeur	
ρ	: Masse volumique	kg/m ³
Γ	: Coefficient de transfert de masse	kg/m ³ .s

Indices

f	: fluide
g	: vapeur ou gaz

n	: non condensable
b	: bore
fuel	: combustible
fum	: fumée
air	: air
inl	: entrée
oul	: sortie
w	: paroi

Abréviations

GN	: Gaz naturel
GNL	: Gaz naturel liquéfié
EDM	: Eau de mer
MEA	: Mono-Ethanol amine
GPL	: Unité gaz pétrolier liquéfié
CP1K	: Complexe matière plastique
C1	: Méthane
C2	: Ethane
C3	: Propane
C4	: Butane
C5	: Pentane
SHT	: Surchauffeur à haute température
SBT	: Surchauffeur à basse température
ECO	: Economiseur
LOCA	: Loss Of Coolant Accident
LOFA	: Loss Of Flow Accident
RELAP	: Reactor Excursion and Leak Analysis Program

TABLE DES MATIERES

INTRODUCTION GENERALE.....	1
-----------------------------------	----------

Chapitre I – LES GENERATEURS DE VAPEUR

I.1. INTRODUCTION.....	5
I.2. HISTORIQUE DES GENERATEURS DE VAPEUR.....	5
I.3. CLASSIFICATION DES GENERATEURS DE VAPEUR.....	9
I.3.1. Les générateurs de vapeur à tubes de fumée.....	11
I.3.2. Les générateurs de vapeur à tubes d'eau.....	12
I.3.3. Comparaison des performances des deux types de générateur de vapeur.....	15
I.4. CLASSIFICATION DES GENERATEURS DE VAPEUR A TUBES D'EAU.....	15
I.5. MODE DE CIRCULATION D'EAU	16
I.5.1. Circulation naturelle.....	17
I.5.2. Circulation forcée.....	18
I.6. LES DIFFERENTS COMPOSANTS D'UN GENERATEUR DE VAPEUR.....	18
I.6.1. Le réservoir.....	18
I.6.2. La chambre de combustion.....	20
I.6.3. Les échangeurs de chaleur.....	21
I.6.3.1. Economiseur.....	21
I.6.3.2. Surchauffeurs.....	22
I.6.3.3. Réchauffeurs.....	22
I.6.3.4. Désurchauffeurs.....	23
I.7. REGULATION DES CHAUDIERES	23

Chapitre II–LA CHAUDIERE ABB ALSTOM

II.1. INTRODUCTION.....	27
II.2. PRESENTATION DE L'INSTALLATION.....	27

II.2.1.	Les principaux composants du générateur de vapeur.....	31
II.2.1.1.	La chambre de combustion.....	32
II.2.1.2.	Le ballon supérieur (drum).....	34
II.2.1.3.	Les économiseurs.....	35
II.2.1.4.	Les surchauffeurs.....	36
II.2.2.	La bêche alimentaire.....	38
II.2.3.	La pompe alimentaire.....	39
II.2.4.	Les vannes et les clapets.....	40
II.2.5.	Le système de purge.....	41
II.3.	LA CIRCULATION DE FUMEE ET D’EAU/VAPEUR.....	41
II.4.	LE SYSTEME DE REGULATION DANS LA CHAUDIERE.....	43
II.4.1.	Régulation du niveau dans le ballon.....	43
II.4.2.	Régulation de la température de vapeur surchauffée.....	44
II.5.	OPERATION ET SURVEILLANCE DE LA CHAUDIERE.....	44
II.5.1.	Contrôle d’eau d’alimentation.....	44
II.5.2.	Surchauffe.....	45
II.5.3.	Contrôle de la combustion.....	45
II.6.	DEMARRAGE ET ARRET DE LA CHAUDIERE.....	46
II.6.1.	L’arrêt.....	46
II.6.1.1	Arrêt normal avec refroidissement.....	46
II.6.1.2.	Arrêt sans refroidissement.....	47
II.6.2.	Le démarrage.....	47
II.7.	LES PROBLEMES DANS LA CHAUDIERE.....	47
II.7.1.	Manque d’eau.....	49
II.7.2.	Rupture des tubes.....	50
II.7.3.	Mauvaise combustion.....	50
II.7.4.	Explosion du foyer.....	51
II.7.5.	Fatigue et fragilisation du métal.....	51
II.7.6.	Qualité de l’eau.....	51

<i>Chapitre III– PRESENTATION DU CODE RELAP5/MOD3.2</i>
--

III.1.	INTRODUCTION.....	54
III.2.	RELAP5/MOD3.....	55

III.3.	STRUCTURE DU CODE RELAP5.....	55
III.3.1.	Etat stationnaire.....	56
III.3.2.	Etat transitoire.....	56
III.3.3.	Option RESTART.....	57
III.4.	MODELISATION HYDRODYNAMIQUE DU CODE RELAP5/MOD3.2.....	58
III.4.1.	Description des composants de base du code RELAP5/MOD3.2.....	58
III.4.1.1.	les volumes.....	58
III.4.1.2.	Les jonctions.....	60
III.4.1.3.	Les vannes.....	60
III.4.1.4.	L'accumulateur.....	61
III.4.1.5.	Le pressuriseur.....	62
III.4.2.	Les caractéristiques communes des composants.....	62
III.4.3.	Les signaux.....	63
III.4.4.	Le système de contrôle.....	63
III.5.	LE MODELE HYDRODYNAMIQUE DU CODE RELAP5.....	64
III.5.1.	Le système d'équations.....	64
III.5.1.1.	Equation de continuité.....	64
III.5.1.2.	Equation de conservation de quantité de mouvement.....	65
III.5.1.3.	Equation de conservation d'énergie.....	66
III.5.2.	La relation constitutive.....	66
III.5.3.	Le modèle de transfert de chaleur.....	67

<p><i>Chapitre IV – MODELISATION DE LA CHAUDIERE ABB ALSTOM</i></p> <p><i>PAR LE CODE RELAP5/MOD3.2</i></p>

IV.1.	INTRODUCTION.....	69
IV.2.	DECOUPAGE ET NODALISATION DE L'INSTALLATION.....	70
IV.2.1.	Nodalisation et découpage du générateur de vapeur.....	72
IV.2.2.	Nodalisation des économiseurs et des surchauffeurs.....	73
IV.2.3.	Nodalisation des lignes principales d'eau d'alimentation et de la vapeur surchauffée.....	75
IV.3.	MODELISATION DES STRUCTURES DE CHALEUR.....	76
IV.4.	MODELISATION DE LA REGULATION.....	78
IV.4.1.	Modélisation de la régulation du niveau.....	79
IV.4.2.	Modélisation de la régulation de température de la vapeur surchauffée.....	79

IV.5. SIMULATION DE L'ETAT STATIONNAIRE.....	79
IV.6. QUALIFICATION.....	83
IV.7. CONCLUSION.....	84

<p><i>Chapitre V – SIMULATION THERMOHYDRAULIQUE DES TRANSITOIRES ACCIDENTELS</i></p>
--

V.1. INTRODUCTION.....	85
V.2. SIMULATION DES TRANSITOIRES ACCIDENTELS.....	86
V.2.1. Les conditions initiales des accidents.....	86
V.2.2. Simulation des ruptures des tubes vaporisateurs.....	86
V.2.3. Simulation de l'arrêt de la pompe alimentaire.....	88
V.3. RESULTATS ET DISCUSSION.....	89
V.3.1. Simulation de la fuite d'eau d'émulsion.....	89
V.3.2. Simulation de perte d'eau d'alimentation.....	104
V.4. CONCLUSION.....	113
 <i>CONCLUSION GENERALE.....</i>	 114
<i>REFERENCES.....</i>	117

Liste des Figures

Figure	Titre	Page
I.1	L'éolipile d'Héron.....	6
I.2	Locomotive de Trevithick.....	7
I.3	Premières chaudières à tubes d'eau (Babcock & Wilcox).....	8
I.4	Générateur de vapeur nucléaire.....	10
I.5	Principe d'un générateur de vapeur à tubes de fumée.....	11
I.6	Générateur de vapeur à tubes de fumée typique.....	12
I.7	Principe d'un générateur de vapeur à tubes d'eau.....	13
I.8	Générateur de vapeur à tubes d'eau typique.....	14
I.9	Transfert de la chaleur par radiation dans la chambre de combustion de la chaudière.....	14
I.10	Différents types de générateur de vapeur à tubes d'eau.....	16
I.11	Principe de la circulation naturelle.....	17
I.12	Principe de la circulation forcée.....	18
I.13	Ballon supérieur (Drum).....	19
I.14	Les deux types de ballons.....	20
I.15	Echangeur de chaleur.....	21
I.16	Economiseur.....	22
I.17	Surchauffeur.....	22
I.18	Régulation à un élément.....	24
I.19	Régulation à deux éléments.....	24
I.20	Régulation à trois éléments.....	25
II.1	Schéma simplifié d'une unité de liquéfaction.....	29
II.2	Schéma représentatif de toute l'installation.....	30
II.3	Coupe longitudinale du générateur de vapeur.....	32
II.4	Brûleurs dans la chambre de combustion.....	33
II.5	Bilan thermique dans la chambre de combustion.....	34
II.6	Ballon supérieur.....	35

II.7	Economiseurs de la chaudière.....	36
II.8	Présentation du surchauffeur.....	38
II.9	Bâche alimentaire de la chaudière.....	39
II.10	Pompe centrifuge alimentaire de la chaudière.....	40
II.11	Circulation de fumée/eau/vapeur.....	42
II.12	Exemples d'explosion des chaudières à vapeur.....	48
II.13	Explosion de la chaudière Clark Chapman à Skikda.....	53
III.1	Structure du code RELAP5.....	56
III.2	Structure modulaire de calcul transitoire dans le code RELAP5.....	57
III.3	Schéma de discrétisation.....	68
IV.1	Schéma de découpage pour la modélisation de la chaudière ABB ALSTOM.....	71
IV.2	Nodalisation du générateur de vapeur.....	73
IV.3	Nodalisation et découpage de l'économiseur.....	74
IV.4	Nodalisation et découpage des surchauffeurs.....	75
IV.5	Evolution temporelle des principaux paramètres thermohydrauliques lors de l'état stationnaire.....	81
V.1	Modélisation de la rupture.....	87
V.2	Variation temporelle des débits de l'eau alimentaire et de la vapeur.....	90
V.3	Variation temporelle de la pression dans le ballon.....	93
V.4	Variation du niveau d'eau dans le ballon.....	96
V.5	Variation temporelle de la température de la vapeur surchauffée entrée/sortie des surchauffeurs.....	95
V.6	Variation temporelle de la température externe de la paroi des surchauffeurs.....	96
V.7	Variation temporelle du débit dans les tubes vaporisateurs.....	97
V.8	Variation temporelle de la température d'eau et de la paroi dans les tubes vaporisateurs.....	99
V.9	Variation temporelle du coefficient de transfert de chaleur dans les tubes vaporisateurs...	100
V.10	Variation temporelle du taux de vapeur dans les tubes vaporisateurs.....	101
V.11	Variation temporelle du débit de la fuite dans la brèche.....	103
V.12	Variation temporelle débits de l'eau alimentaire et de la vapeur.....	105
V.13	Variation temporelle de la pression dans le ballon.....	106
V.14	Variation temporelle du niveau d'eau dans le ballon.....	107
V.15	Variation temporelle de la température de la vapeur surchauffée entrée/sortie des surchauffeurs.....	108

V.16	Variation temporelle de la température de la paroi interne des tubes vaporisateurs.....	110
V.17	Variation temporelle du coefficient de transfert de chaleur dans les tubes vaporisateurs.....	111
V.18	Variation temporelle du taux de vapeur dans les tubes vaporisateurs.....	112

Liste des Tableaux

Tableau	Titre	Page
I.1	Comparaison entre les deux types de générateur de vapeur.....	15
II.1	Paramètres thermohydrauliques des économiseurs.....	36
II.2	Paramètres thermohydrauliques des surchauffeurs.....	37
IV.1	Caractéristiques de fonctionnement de la chaudière.....	78
IV.2	Paramètres thermohydrauliques obtenus par le code RELAP5 de la chaudière ABB ALSTOM.....	82
IV.3	Comparaison entre les résultats théoriques du code RELAP5 et les données d'exploitation de la chaudière ABB ALSTOM.....	84
V.1	Les principales séquences accidentelles du transitoire 1.....	88
V.2	Les principales séquences accidentelles du transitoire 2.....	88

Introduction générale

INTRODUCTION GENERALE

Un générateur de vapeur est l'un des composants clés d'une installation thermique. Sa fonction principale est de produire de la vapeur (à basse, moyenne ou haute température). Cette vapeur est utilisée pour des raisons industrielles telle que la production de l'énergie électrique. Ce système est conçu pour opérer à de longues périodes et à des variations de charge incessantes, rapides et parfois importantes. Pendant l'opération, plusieurs problèmes peuvent être rencontrés et mener à limiter l'opération normale de l'installation produisant des troubles sérieux dans le programme de la production. Des accidents qui menacent l'intégrité structurale du système et provoquer de sérieuses pertes économiques et parfois humaines peuvent en résulter.

Les défaillances les plus graves des générateurs de vapeur en milieu industriel sont en relation avec les charges thermiques importantes supportées par les tubes vaporisateurs. En effet, le métal se trouve soumis à une variété de contraintes qui accélèrent l'altération de cohésion des matériaux sous les effets du flux de chaleur externe et du phénomène de l'ébullition du côté interne.

L'analyse de sûreté des installations thermiques s'appuie essentiellement sur la simulation numérique. L'utilité grandissante des outils de simulation numérique repose principalement sur le développement des méthodes numériques, l'avancement de la programmation et l'apport de moyens informatiques puissants [1]. Plusieurs investigations numériques et analytiques ont été effectuées dans le but d'étudier le comportement thermohydraulique des chaudières industrielles [2, 3, 4, 5, 6]. Ces travaux sont basés, d'une part sur le modèle homogène avec l'équilibre thermique et mécanique entre les deux phases d'écoulement et d'autre part, sur des simplifications géométriques et phénoménologiques du système, ce qui rend ces modèles incapables de prévoir des situations complexes tels que les phénomènes de gonflement et de tassement. Le calcul des situations complexes nécessite l'utilisation de logiciels adaptés qui se basent sur des modèles physiques décrivant le mieux possible ces phénomènes.

Aujourd'hui, il y a plusieurs codes systèmes d'analyse transitoire qui nous donnent la possibilité de simuler le comportement global d'une installation thermique en fonctionnements normal et accidentel. L'utilisation des codes de calcul dans les études de conception des systèmes énergétiques est devenue une voie incontournable. Parmi ces codes, le code RELAP5 qui sera utilisé comme outil indispensable pour la réalisation de ce sujet de recherche. Le code RELAP5 est un code système d'analyse thermohydraulique d'un niveau d'estimation réaliste (best estimate). Il s'avère indispensable d'étudier le comportement global des installations thermohydrauliques, ainsi que la modélisation et la simulation des installations thermiques et prévoir des accidents postulés survenant dans les installations thermiques et les réduire (gestion des risques). RELAP5 est largement utilisé dans les études de sûreté nucléaire, son champ d'application s'étend aux systèmes énergétiques utilisant l'eau et sa vapeur. Les travaux de recherche effectués dans ce sens sont très peu et sont limités au domaine nucléaire. L'extrapolation du champ d'application du code est possible pour l'étude du comportement thermohydraulique d'une chaudière industrielle.

L'objectif principal de ce travail est l'étude et la simulation réaliste du comportement global d'une chaudière à vapeur industrielle d'une marque de ABB ALSTOM (Complexe GNL, SKIKDA), lors de fonctionnements normal et accidentel par le code système thermohydraulique RELAP5/Mod3.2 avec une analyse de performances thermohydrauliques des principaux équipements de l'installation. Une meilleure compréhension des phénomènes physiques ayant lieu durant toutes les phases d'un accident hypothétique est nécessaire pour la sûreté d'une installation. Les transitoires envisagés sont la perte d'eau d'alimentation (arrêt de pompe) et la perte d'eau d'émulsion (par une fissure dans les tubes vaporisateurs). La performance des machines actuelles permettra de faire de ce travail un modèle de calcul réaliste pour les utilités de conception des chaudières industrielles.

L'intérêt pratique de ce travail est de rassembler toutes les informations nécessaires sur l'évolution des paramètres thermohydrauliques du système (perte de charge, coefficient de transfert de chaleur, températures de fluide et de la paroi, pression, débit, ...). Les résultats obtenus intéressent beaucoup plus les utilités industrielles de production de la vapeur et d'énergie électrique. En outre, cette étude permettra de mener correctement l'opération d'expertise et de formuler des recommandations aux exploitants. Ce travail est un modèle de calcul réaliste d'aide à la conception et à l'exploitation du système énergétique, en outre il permettra de tester la réponse et la fiabilité des systèmes de contrôle et de protection lors des accidents postulés.

La thèse est organisée en cinq chapitres complétés par une introduction et une conclusion générale.

Le premier chapitre présente un historique succinct sur les chaudières industrielles, leurs applications ainsi que les différents types de générateurs de vapeur. Le lecteur y trouvera également les différents modes de circulation d'eau dans la chaudière à tube d'eau (circulation naturelle ou forcée), ainsi qu'une description du système de contrôle de régulation de la chaudière et des différents composants constituant l'installation.

Le deuxième chapitre présente une étude descriptive détaillée des différentes parties de l'installation ABB ALSTOM du complexe GNL à SKIKDA, ainsi que les systèmes de contrôle et de régulation associés à l'installation, une description du mouvement des fluides, eau, vapeur et fumée ainsi que le mécanisme de transfert de chaleur et de changement de phase dans la chaudière.

Le troisième chapitre est consacré à une présentation succincte du code système thermohydraulique RELAP5/Mod3.2. Le développement des différentes versions du code, l'architecture de base, les méthodes numériques utilisées, une description des composants de base du code, le modèle de transfert de chaleur, ainsi que les principaux modèles hydrodynamiques de base seront largement exposés.

Le quatrième chapitre se focalise sur la méthode et les techniques de découpage suivies pour la modélisation de l'installation de la chaudière par le code RELAP5/Mod3.2. Le modèle adopté englobe les composants de toute l'installation (la ligne d'eau d'alimentation, le générateur de vapeur, et la ligne de la vapeur surchauffée). Les systèmes de contrôle et de régulation du niveau d'eau dans le ballon du générateur de vapeur et la température de la vapeur surchauffée ainsi que les structures de chaleur sont modélisées par le code RELAP5. Une qualification du modèle sous les conditions stationnaires est effectuée par la confrontation des résultats théoriques obtenus par le code avec les données d'exploitation de la chaudière ABB ALSTOM.

L'ensemble des résultats obtenus et leur discussion feront l'objet du dernier chapitre. Les accidents traités sont l'accident de perte de débit provoqué par l'arrêt de la pompe alimentaire et la perte d'eau d'émulsion au niveau des tubes de la zone de passages des gaz de combustion provoqué par une fuite dans les tubes vaporisateurs, avec et sans les opérations de protection et le système de sécurité.

Chapitre I

Les générateurs de vapeur

LES GENERATEURS DE VAPEUR

I.1. INTRODUCTION

La vapeur d'eau est utilisée dans la production d'énergie et dans de nombreux procédés industriels. La production d'électricité dépend en grande partie de la production de vapeur, que la chaleur soit produite à partir de charbon, de gaz, ou par fission nucléaire de l'uranium. Pour produire de la vapeur, il est nécessaire de chauffer l'eau à son point d'ébullition puis de fournir une quantité suffisante de chaleur pour changer l'eau bouillante en vapeur. Les techniques de production et d'utilisation de la vapeur sont donc d'importants aspects de la technologie de l'ingénierie. Le générateur de vapeur est l'un des moyens utilisés pour produire de la vapeur.

I.2. HISTORIQUE DES GENERATEURS DE VAPEUR

L'utilisation des systèmes diphasiques accompagnés de changement de phase pour transformer l'énergie thermique en énergie mécanique est ancienne. Elle remonte au 1^{er} siècle Apr JC avec l'invention de l'éolipile par le mathématicien grec Héron d'Alexandrie (figure I.1). La vapeur produite par le chauffage de l'eau dans le récipient inférieur monte dans la sphère et s'échappe par les deux becs recourbés. La sphère est ainsi mise en rotation autour de son support. On lui attribue aussi les systèmes d'ouverture et de fermeture des portes des temples qui utilisaient le principe de changement de phase [7]. Cependant, il semble qu'aucun système pratique n'ait été construit jusqu'à ce que l'architecte et inventeur italien Giovanni Branca conçoive une chaudière dont la vapeur, en s'échappant, frappait les pales d'une roue, faisant tourner cette dernière. Mais ce n'est véritablement qu'à partir de la fin du 17^{ème} siècle que les ingénieurs ont développé les machines à vapeur modernes.



Figure I.1 L'œolipile d'Héron

Le premier moteur à piston fut mis au point en 1690, par le physicien français Denis Papin, et utilisé pour le pompage de l'eau. La machine de Papin, plus qu'une curiosité, est une machine sommaire fonctionnant sous pression atmosphérique, la vapeur n'étant donc pas comprimée. Elle est constituée d'un unique cylindre qui sert également de chaudière. Une faible quantité d'eau est chauffée dans le cylindre jusqu'à sa transformation en vapeur. La pression de cette vapeur refoule un piston coulissant dans le cylindre. Après détente complète, on retire la source de chaleur du dessous du cylindre. Ce dernier se refroidit, la vapeur se condense et la pression de l'air sur la partie supérieure du piston le ramène en position basse [9].

La première véritable machine à vapeur, fut construite par l'ingénieur anglais Thomas Savery en 1698. Elle est munie de deux récipients de cuivre remplis alternativement par la vapeur d'une chaudière. Cette machine a été utilisée pour le pompage de l'eau. Il en fut de même pour le moteur atmosphérique conçu en 1705 par l'inventeur anglais Thomas Newcomen [7].

Le dispositif de Thomas Newcomen est constitué d'un cylindre vertical et d'un piston à contrepoids. La vapeur admise dans le fond du cylindre à très faible pression provoque le déplacement du piston, avec l'aide du contrepoids, vers le haut du cylindre. À la fin du mouvement, une soupape s'ouvre automatiquement et pulvérise un jet d'eau froide dans le cylindre. L'eau condense la vapeur et la pression atmosphérique ramène le piston vers le bas du cylindre. Une bielle fixée au bras du balancier reliant le piston et son contrepoids, actionne une pompe par un mouvement vertical alternatif. La machine de Newcomen a un faible rendement, mais elle suffisait pour le pompage de l'eau dans les mines de charbon [8].

L'inventeur écossais James Watt améliora le moteur à vapeur de Newcomen en y ajoutant des cuves sphériques ou cylindriques chauffées en dessous par un feu ouvert. La chaudière de Watt, construite en 1785, se composait d'un caisson horizontal encastré dans la brique, avec des conduits pour faire circuler les gaz de combustion chauds sur la chaudière. Watt, qui fut l'un des premiers ingénieurs à parvenir aux propriétés thermodynamiques de la vapeur d'eau, utilisa la soupape de sécurité à levier, des manomètres de pression et des robinets pour contrôler le flux d'eau et de vapeur dans ses chaudières [9].

Un autre développement important, dans le domaine de la machine à vapeur, fut l'introduction de machines fonctionnant sans condenseur. Bien que Watt ait connu le principe des machines sans condenseur, il fut incapable de perfectionner ce type de machines, probablement parce qu'il utilisait de la vapeur sous très basse pression. Au début du XIX^e siècle, l'ingénieur britannique Richard Trevithick et l'inventeur américain Oliver Evans mirent au point des machines sans condenseur utilisant de la vapeur sous haute pression. Trevithick utilisa ce modèle de machine à vapeur pour équiper la première locomotive ferroviaire (figure I.2). Trevithick et Evans construisirent des véhicules routiers propulsés par la vapeur [9].

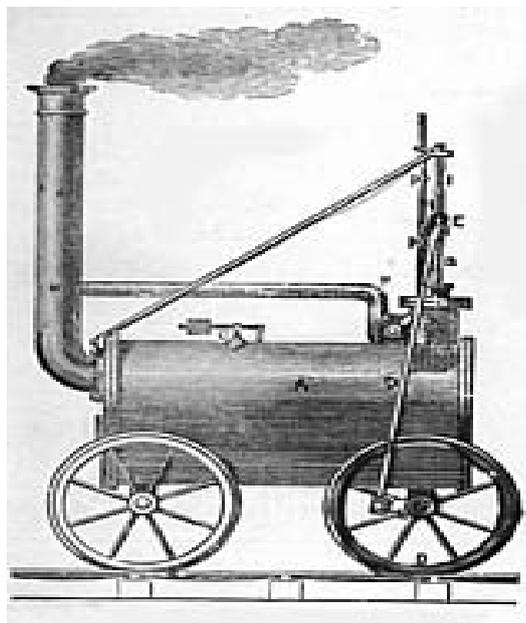


Figure I.2 : Locomotive de Trevithick.

Les moteurs de Savery, Watt et Newcomen fonctionnaient tous à des pressions légèrement supérieures à la pression atmosphérique. En 1800, l'inventeur américain Oliver Evans construisit un moteur à vapeur à haute pression utilisant un précurseur de la chaudière à tubes de fumée.

La chaudière d'Evans se composait de deux cuves cylindriques placées l'une dans l'autre ; l'eau circulait entre elles. La grille de feu et le tuyau d'évacuation étaient situés dans le cylindre intérieur, permettant un accroissement rapide de la pression de vapeur [8]. L'ingénieur Français Marc Seguin (1781-1875) mit au point une chaudière à tubes de fumée, qui équipa en 1827 la fameuse locomotive « Rocket » de George Stephenson. La première amélioration importante apportée à la chaudière d'Evans fut la chaudière « Lancashire » à tubes de fumée brevetée en 1845 par l'ingénieur britannique William Fairbairn, dans laquelle les gaz de combustion circulaient à travers des tubes insérés dans le réservoir d'eau, augmentant la surface à travers laquelle la chaleur pouvait être transmise. Les chaudières à tubes de fumée avaient cependant une capacité et une pression limitées et présentaient parfois des risques d'explosion [7].

La première chaudière à tubes d'eau (figure I.3), brevetée en 1867 par les inventeurs américains George Herman Babcock et Stephen Wilcox [17,12], autorisa une pression supérieure à celle de la chaudière à tubes de fumée. Dans cette dernière, l'eau passait à travers des tubes chauffés depuis l'extérieur par les gaz de combustion et la vapeur était collectée dans un tambour supérieur. Cette disposition utilisait à la fois la chaleur de convection des gaz et la chaleur radiale du feu et des parois de la chaudière. Au XX^{ème} siècle, la chaudière à tubes d'eau trouva de larges applications, grâce à des progrès tels que les alliages d'acier à haute température et les techniques de soudages modernes, qui firent de la chaudière à tubes d'eau le type de chaudière standard pour toutes les chaudières de grosse capacité.

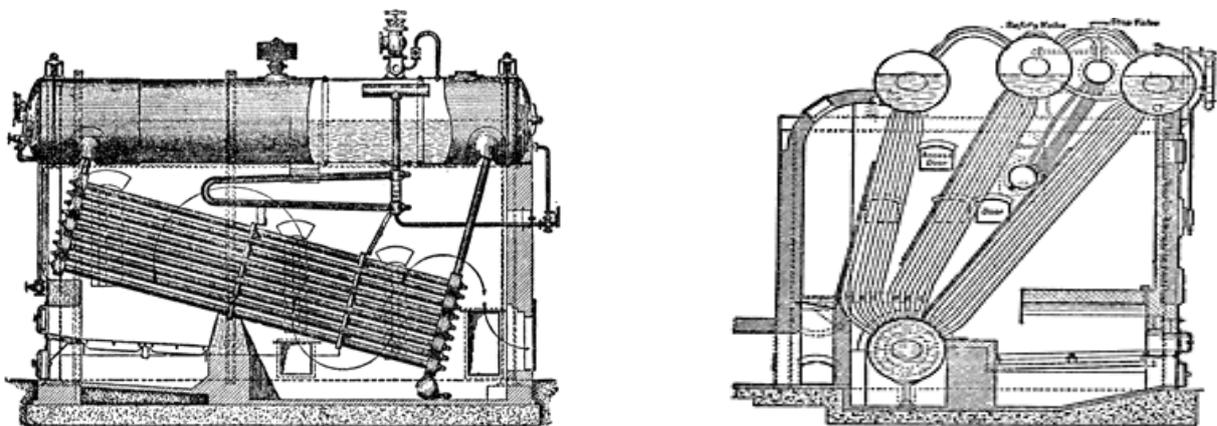


Figure I.3 : Premières chaudières à tubes d'eau (Babcock & Wilcox).

Bien que ces types de systèmes montrent l'ingéniosité de leurs auteurs, ils n'ont pas été suivis par des applications méthodiques. Il fallu attendre l'arrivée du monde industriel moderne, en particulier l'exploitation intensive des ressources énergétiques, le développement de l'industrie chimique pour accélérer les études théoriques et expérimentales sur les phénomènes d'écoulement diphasique et l'ébullition.

I.3. CLASSIFICATION DES GENERATEURS DE VAPEUR

Le générateur de vapeur est un dispositif permettant de chauffer l'eau et de produire de la vapeur si l'eau est chauffée au-delà de la pression atmosphérique. C'est un exemple principal d'application du procédé de transfert de chaleur avec changement de phase. Le fait important, étant d'apporter de la chaleur dans le but de convertir le liquide en vapeur. Les générateurs de vapeur peuvent être classés selon divers paramètres. On distingue notamment:

❖ Selon la conception :

- Générateurs de vapeur à tubes de fumée
- Générateurs de vapeur à tubes d'eau
- Générateurs de vapeur ambi-tubulaires qui combinent les tubes d'eau et les tubes de fumée (relativement rares)

❖ En fonction du support :

- Générateurs de vapeur posés
- Générateurs de vapeur suspendus

❖ Selon la méthode de circulation de l'eau, de la vapeur et du mélange eau/vapeur :

- Générateurs de vapeur à circulation naturelle
- Générateurs de vapeur à circulation forcée

Ces Générateurs de vapeur sont des générateurs de vapeur à combustible, ils se composent de deux compartiments distincts, un dans lequel brûle le combustible et l'autre dans lequel circule l'eau.

❖ Si l'on se réfère au critère le plus simple qui est sans doute la puissance thermique ou production de vapeur, on peut constater de façon très globale que :

- Au dessous de 20 t/h de production de vapeur, il existe une très grande variété de modèles de générateurs de vapeur à tubes d'eau ou à tubes de fumée, dont la pression est limitée à 12 ou 18 bars et qui produisent seulement de la vapeur saturée.
 - Entre 20 et 140 t/h de production de vapeur, ce sont principalement des générateurs de vapeur monoblocs ou transportables. Il s'agit de chaudières à tubes d'eau et à circulation naturelle, équipées d'un surchauffeur lorsque la vaporisation est entre 30 et 50 t/h, et la gamme de pression de ces chaudières s'étend jusqu'à 120 bars.
 - Au delà de 140 t/h de production de vapeur, ce sont le plus souvent des générateurs de vapeur à circulation naturelle et équipées d'un surchauffeur ou plus.
- ❖ Il existe également des générateurs de vapeur nucléaires. ils renferment des tubes en forme de U, et sont utilisées dans les installations nucléaires dans le but de refroidir le réfrigérant du réacteur et de produire de la vapeur pour la production d'électricité (figure I.4).

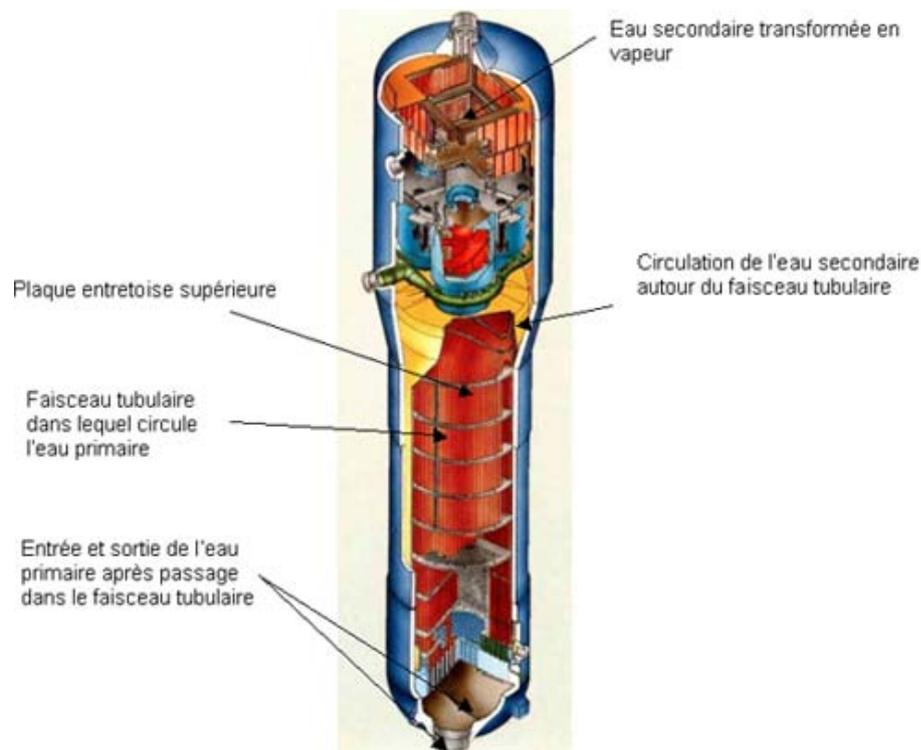


Figure I.4 : Générateur de vapeur nucléaire.

Le choix du type de générateur de vapeur industriel à retenir peut se faire en fonction de plusieurs critères, le principal étant la puissance thermique à fournir ou son équivalent en production de vapeur.

Il est à noter que les chaudières à tubes d'eau, sont le type de générateurs de vapeur le plus utilisé dans beaucoup d'installations industrielles. Néanmoins, il existe d'autres modèles parmi lesquels nous pouvons citer :

- Les générateurs de vapeur de type D, A et O qui contiennent un faisceau de convection
- Les générateurs de vapeur avec faisceau vaporisateur et sans le faisceau de convection (les générateurs de vapeur radiants)
- Les générateurs de vapeur électriques

I.3.1. Les générateurs de vapeur à tubes de fumée

Ce sont des générateurs de vapeur où les gaz de combustion passent à l'intérieur de tubes submergés dans l'eau [16] (figure I.5), ces générateurs de vapeur sont largement utilisés dans les installations industrielles et commerciales, beaucoup plus dans les locomotives. Un générateur de vapeur à tubes de fumée moderne peut produire de la vapeur à pression jusqu'à 25 bars (basse et moyenne pressions), et un débit de 1 à 25 tonnes/h [12]. Ces générateurs de vapeur peuvent utiliser du gaz naturel, de l'huile ou du combustible solide.

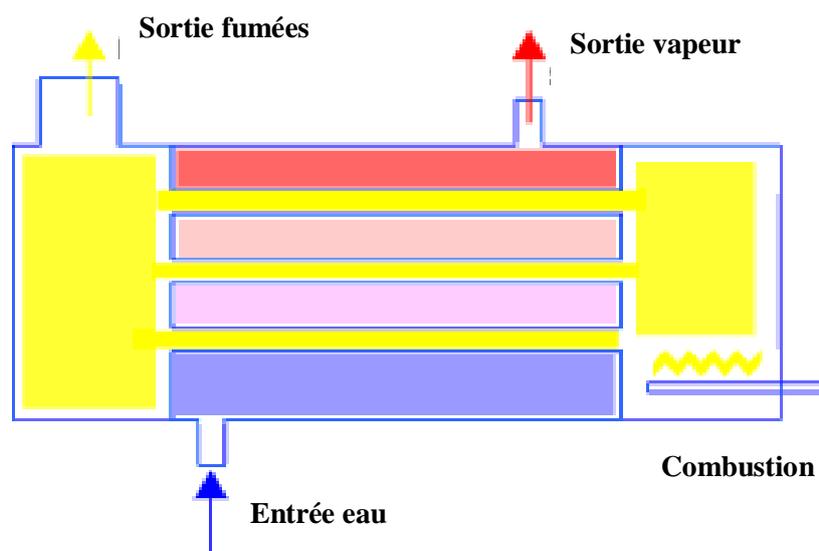


Figure I.5 : Principe d'un générateur de vapeur à tubes de fumée.

Le générateur de vapeur à tubes de fumée est constitué d'une cuve cylindrique (le ballon) qui contient des tubes à l'intérieur (tube foyer). Ces tubes collectent les gaz chauds à la sortie du brûleur. Les gaz chauds, accumulés dans un premier caisson à l'arrière du générateur de vapeur, sont véhiculés par un groupe de tubes immergés dans l'eau du ballon vers un second caisson à l'avant de la chaudière. Un second groupe de tubes immergés emmène les gaz vers un troisième caisson à l'arrière du générateur de vapeur, ce troisième caisson débouche sur la cheminée pour l'évacuation des fumées vers l'extérieur. Un exemple typique de ce générateur de vapeur est illustré par la figure I.6. La chambre de combustion de ces générateurs de vapeur peut être à l'extérieur du bloc du générateur de vapeur. Le transfert de chaleur entre les tubes et les gaz de combustion se fait principalement par le mode de convection.



Figure I.6 : Générateur de vapeur à tubes de fumée typique.

I.3.2. Les générateurs de vapeur à tubes d'eau

C'est un type de générateur de vapeur dans lequel l'eau circule dans les tubes qui sont chauffés extérieurement par les gaz de combustion [16,12] (figure I.7). Ils représentent la grande majorité des générateurs de vapeur en service.

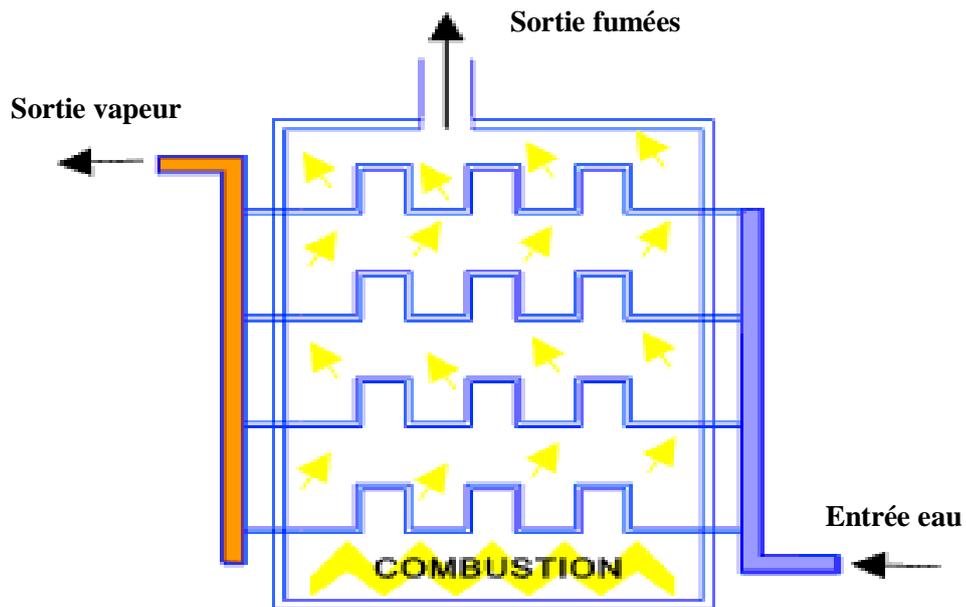


Figure I.7 : Principe d'un générateur de vapeur à tubes d'eau.

Ces générateurs de vapeur sont utilisés dans les grandes installations industrielles et les centrales électriques pour produire de la vapeur à haute pression. Ils utilisent comme combustible du gaz, de l'huile ou du combustible solide [12]. Un générateur de vapeur à tubes d'eau typique est illustré par la figure I.8. Les générateurs de vapeur à tubes d'eau possèdent en général deux réservoirs ou plus, le réservoir supérieur appelé ballon collecteur, et le (ou les) réservoir inférieur appelé ballon distributeur. Les gaz chauds produits par le brûleur sont directement en contact avec les tubes vaporisateurs, à l'intérieur de ceux-ci se produit la vaporisation. La vapeur ainsi générée est collectée dans le ballon supérieur, l'eau excédentaire est ramenée vers le ballon ou le collecteur inférieur par des tubes non soumis à la chaleur (downcomer).

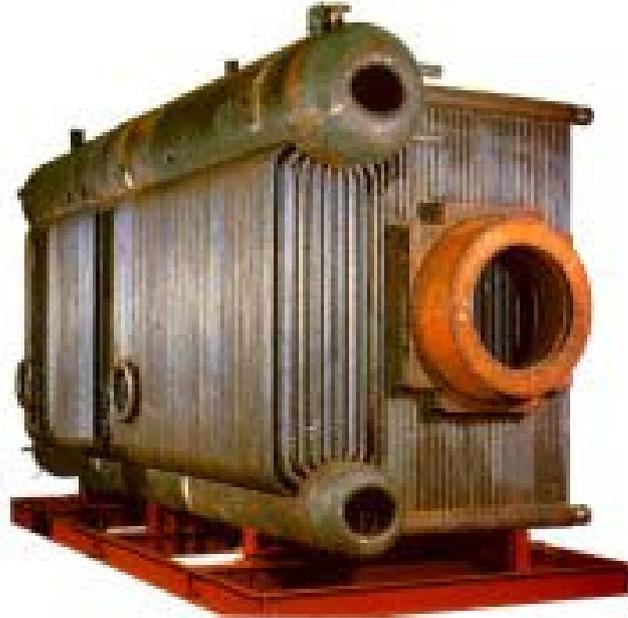


Figure I.8 : Générateur de vapeur à tubes d'eau typique.

- ❖ Le transfert de chaleur entre les tubes et les gaz de combustion se fait principalement par radiation (figure I.9), contrairement à la chaudière à tubes de fumées, où le transfert de la chaleur se fait par convection entre les gaz de combustion (fumées) et les tubes. Les gaz de combustion peuvent être aussi utilisés dans le préchauffage de l'air de combustion et l'eau d'alimentation.

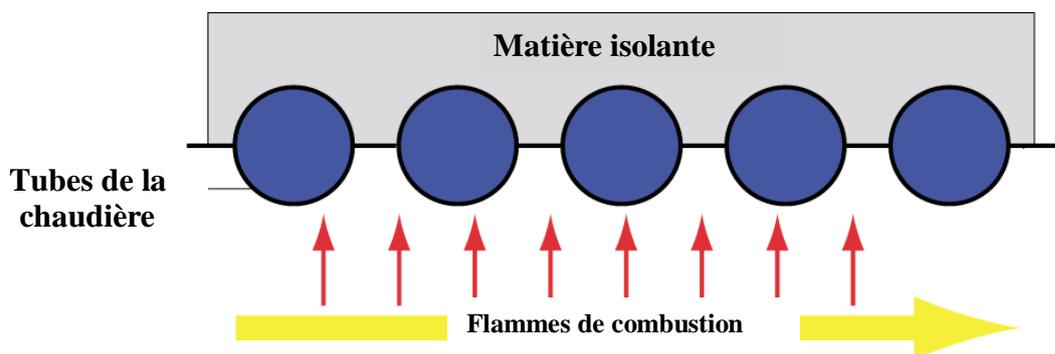


Figure I.9 : Transfert de la chaleur par radiation dans la chambre de combustion de la chaudière

I.3.3. Comparaison des performances des deux types de générateur de vapeur

Quelques paramètres des générateurs de vapeur à tubes d'eau et à tubes de fumée sont regroupés dans le tableau I.1.

Tableau I.1 : Comparaison entre les deux types de générateurs de vapeur

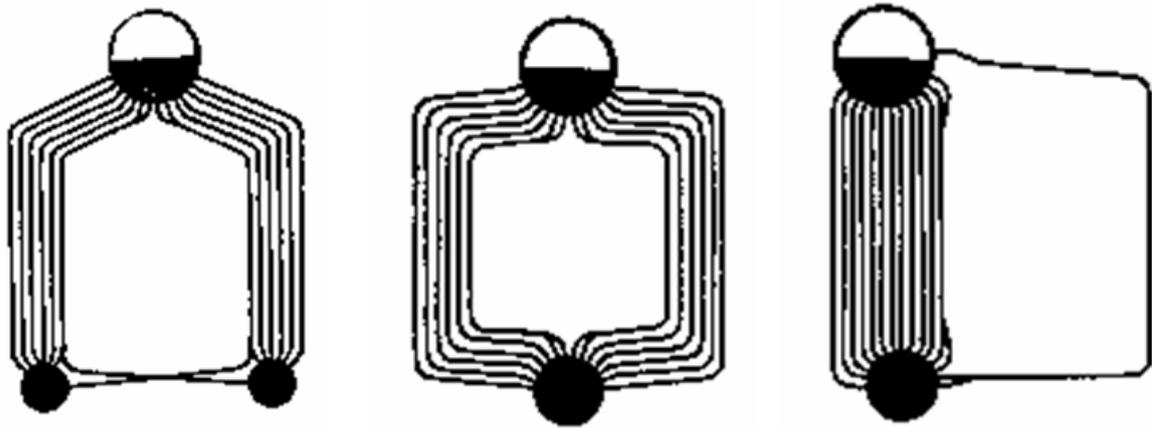
Propriétés	Générateur de vapeur à tubes de fumée	Générateur de vapeur à tubes d'eau
Mise en route (à puissance équivalente).	Lente (grand volume d'eau à chauffer)	Rapide
Adaptation aux changements de régime	Médiocre (inertie importante)	Bonne
Surface de chauffe	Moyenne	Elevée
Sécurité	Médiocre	Bonne
Encombrement	Faible	Fort
Prix	Limité	Elevé
Applications usuelles		
<ul style="list-style-type: none"> • Puissance • Débit • Pression max d'utilisation 	<ul style="list-style-type: none"> • Moyennement élevée • 1.5 à 25 t/h • 10 à 20 bars 	<ul style="list-style-type: none"> • Importante • Plus élevées • 90 à 225 bars

I.4. CLASSIFICATION DES GENERATEURS DE VAPEUR A TUBES D'EAU

Les générateurs de vapeur à tubes d'eau sont généralement classifiés suivant les caractéristiques suivantes :

- La position du réservoir supérieur
- La nature de la circulation d'eau, naturelle ou forcée.
- Le nombre de ballons
- La capacité de la chaudière

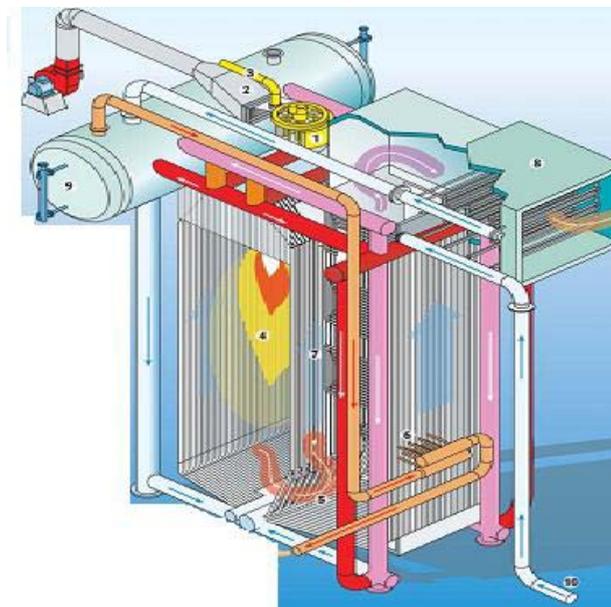
Ainsi et comme nous l'avons mentionné précédemment, il existe différents modèles, des générateurs de vapeur type-D, type-O, type-A, radiant, etc (figure.10).



Générateur de vapeur type-A

Générateur de vapeur Type-O

Générateur de vapeur Type-D



Générateur de vapeur type radiant

Figure I.10 : Différents types de générateurs de vapeur à tubes d'eau.

I.5. MODE DE CIRCULATION D'EAU

Le rôle de la circulation de l'eau ou de l'émulsion d'eau et de vapeur dans les tubes de la chaudière est d'assurer d'une part le refroidissement correct des tubes situés dans les zones les plus chaudes ou exposées au rayonnement direct du feu, et qui reçoivent à cette partie, le flux maximal de chaleur, et d'autre part, d'assurer la génération de la vapeur saturée, c'est-à-dire, le

passage du fluide chauffé de l'état eau à l'état émulsion eau et vapeur. Il y a deux types principaux de circulation, la circulation naturelle et la circulation forcée.

I.5.1. Circulation naturelle

Elle s'établit d'elle-même dans les circuits de la chaudière. Elle est assurée par la différence de poids entre deux colonnes de fluides, l'une contenant uniquement de l'eau, et l'autre un mélange d'eau et de vapeur. Il en résulte que la circulation est d'autant plus intense que la différence de masse volumique entre l'eau et la vapeur est plus grande. L'effet de la circulation naturelle diminue lorsqu'on se rapproche de la pression critique de 221 bars [19]. La limite pratique d'utilisation de la circulation naturelle est de 180 bars. Dans les chaudières à circulation naturelle on détermine les débits d'eau à l'entrée des différents circuits de façon à ce que l'ébullition se fasse en tout point sous forme nucléée [19,16], ce qui garantit un bon refroidissement des tubes vaporisateurs. Lorsque la puissance diminue, le taux de vapeur varie relativement peu et par suite le débit en circulation décroît beaucoup moins vite que le débit de vapeur de la chaudière, cela garantit d'autant mieux le refroidissement des tubes. La circulation naturelle est donc relativement plus active à basse puissance, elle s'amorce facilement lors du démarrage des installations. Cela explique la souplesse et la simplicité des chaudières à circulation naturelle.

Il faut noter que la circulation naturelle dont le principe est schématisé par la figure I.11, est meilleure lorsque la pression est basse, la hauteur motrice est plus grande à condition que les pertes de charge ne deviennent pas trop importantes, et la partie de chauffage soit située en partie basse des écrans.

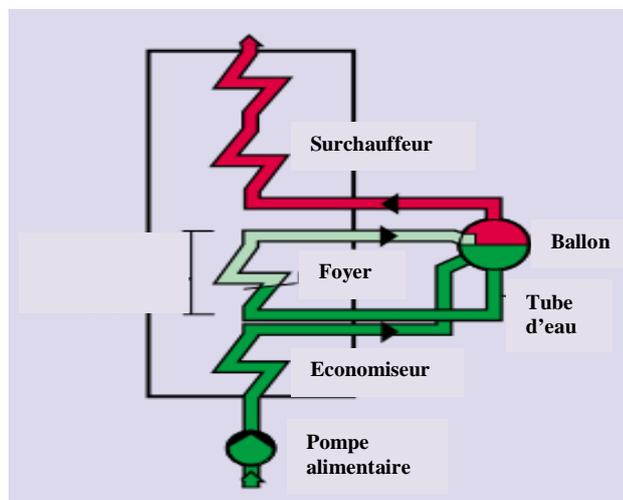


Figure I.11 : Principe de la circulation naturelle.

I.5.2. Circulation forcée

La circulation d'eau dans une telle chaudière dont le principe est illustré par la figure I.12, est assurée par les pompes d'alimentation dont la hauteur de refoulement est déterminée en tenant compte de la perte de charge totale des circuits évaporateurs et surchauffeurs [19]. Cette circulation permet une grande liberté dans la conception des circuits, puisque la circulation est toujours assurée. De plus, le diamètre des tubes peut être plus petit que dans les chaudières à circulation naturelle. Dans les chaudières à circulation forcée, l'eau étant vaporisée en totalité, le régime de vaporisation par film instable, puis par film stable s'établit nécessairement dans les parties finales du circuit, il faut alors contrôler que la vitesse de l'émulsion est suffisante pour assurer le refroidissement du tube. La chaudière à circulation forcée peut être utilisée pour toutes les pressions sous-critiques et supercritiques.

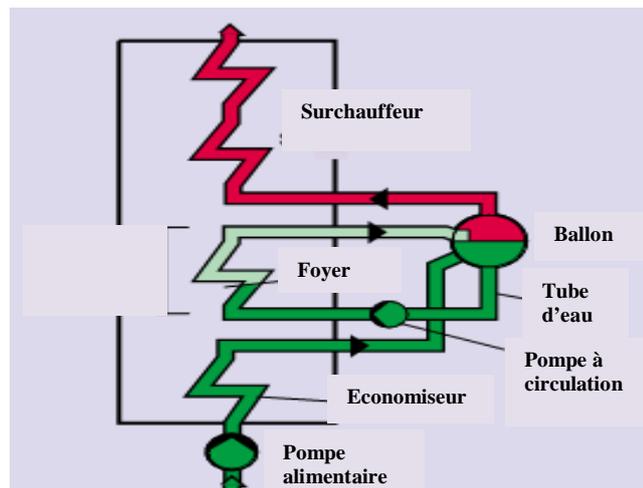


Figure I.12 : Principe de la circulation forcée.

I.6. LES DIFFERENTS COMPOSANTS D'UN GENERATEUR DE VAPEUR

On distingue principalement :

I.6.1. Le réservoir

Elément principal dans la chaudière, le réservoir est le lieu où elle reçoit le mélange d'eau et de vapeur qui provient des tubes d'écran et de faisceaux vaporisateurs. Le ballon est un gros cylindre horizontal (figure I.13) à parois épaisse qui se trouve à la partie supérieure de la chaudière et dont le rôle est multiple, à savoir:

- La séparation de l'eau et de la vapeur contenues dans l'émulsion
- L'équilibrage des pressions eau et de vapeur grâce au maintien d'un plan d'eau
- L'introduction de l'eau d'alimentation dans le système évaporateur
- La répartition correcte de l'eau d'alimentation dans les tubes de descente, avec le minimum d'entraînement de vapeur
- L'introduction et la dilution des produits de traitement de l'eau de la chaudière
- L'extraction de déconcentration

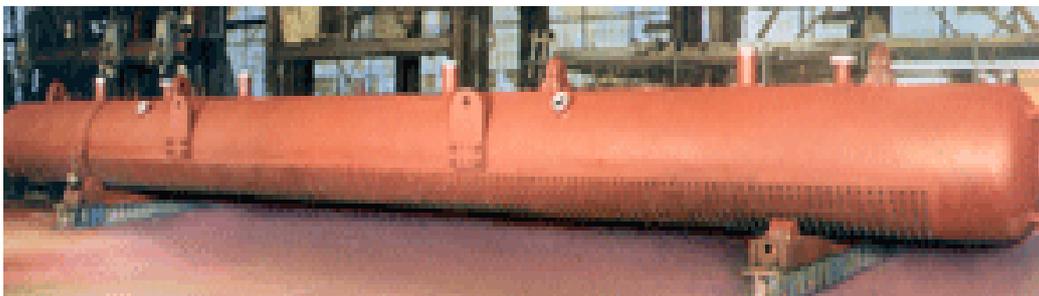


Figure I.13 : Ballon supérieur (Drum)

Il existe deux types de ballons (figure I.14) :

❖ Le type B utilise la séparation par la gravité d'eau. Il contient des grilles de séchage (chicanes) pour séparer les gouttelettes d'eau dans la vapeur dans la partie haute du ballon pour n'avoir que de la vapeur sèche.

❖ Le type C utilise des séparateurs cyclones (à recommander aux pressions élevées). Ils utilisent la vitesse de rotation pour centrifuger et projeter l'eau sur les parois, le long desquelles elle se rassemble, tandis que la vapeur se dégage au centre, avec une faible proportion d'eau entraînée. Cette vapeur passe ensuite par des sécheurs qui se trouvent au-dessus des cyclones, en partie haute du ballon pour obtenir que de la vapeur sèche.

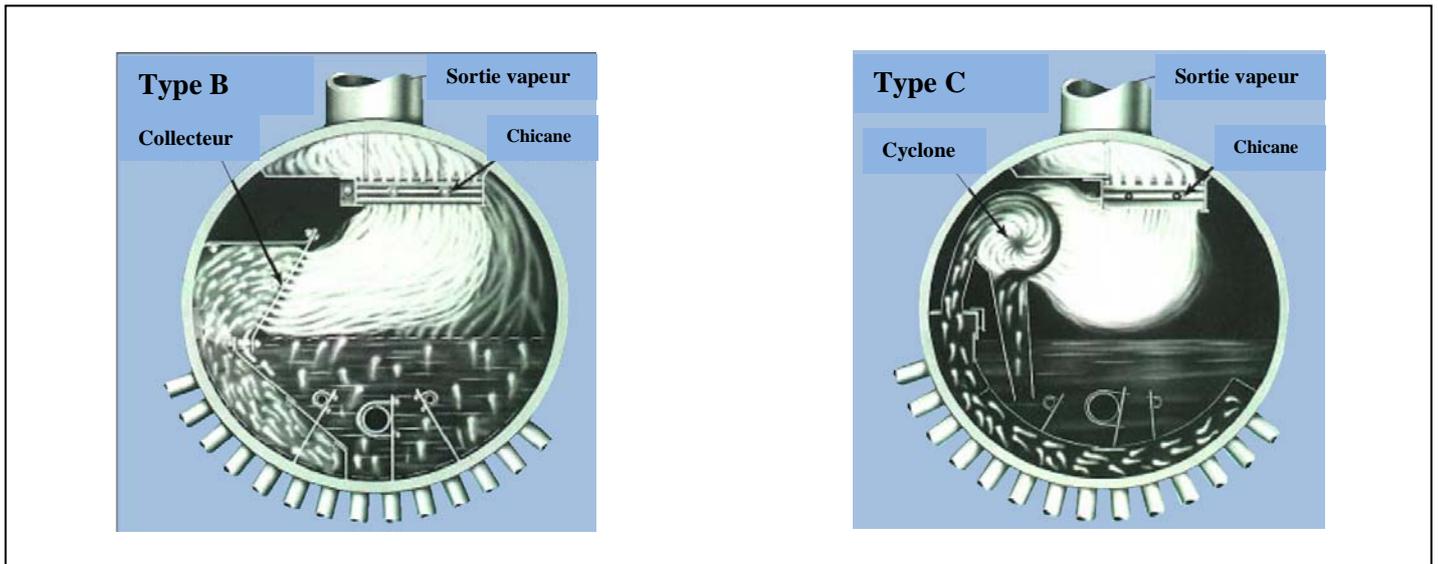


Figure I.14 : Les deux types de ballons.

L'efficacité des dispositifs de séparation ne peut être obtenue que si le niveau de l'eau dans le ballon est correctement réglé. En effet, si le niveau est trop haut et dépasse les dispositifs de mise en rotation des séparateurs centrifuges, ceux-ci ne peuvent assurer leur fonction et la séparation se fait mal, il ya alors entrainement d'eau dans la vapeur. Par ailleurs, le niveau ne doit pas descendre en-dessous d'un seuil de sécurité, afin qu'il subsiste toujours une garde d'eau permettant d'éviter la création de vortex à l'intérieur des tubes de descente et d'assurer avec une sécurité suffisante, l'alimentation des écrans vaporisateurs. Le niveau doit donc être maintenu, quelque soit les conditions de fonctionnement, entre deux limites relativement rapprochées.

I.6.2. La chambre de combustion

C'est une chambre constituée par les tubes d'écrans vaporisateurs, dont le rôle principal est d'assurer la combustion dans des conditions correctes, à savoir une sécurité, un bon rendement, un minimum d'entretien, avec parfois la possibilité d'utiliser soit séparément ou ensemble plusieurs combustibles afin d'assurer une partie non négligeable de l'échange thermique de la chaudière et de préférence une partie importante de la vaporisation.

La chaleur introduite dans la chambre de combustion après la combustion se divise en :

- Chaleur transférée au fluide directement par les parois
- Chaleur évacuée par les fumées à la sortie du foyer

- Chaleur perdue vers l'extérieur par les calorifugées du foyer (souvent négligeable, de l'ordre de 0.2%)

I.6.3. Les échangeurs de chaleur

Ils sont utilisés principalement pour transférer l'énergie contenue dans les gaz de combustion à la vapeur ou à l'eau. Ils sont constitués d'une multitude de tubes regroupés en panneaux ou éléments qui sont dans le même plan, parallèles au sens de parcours des fumées et équidistants entre eux d'un pas transversal (ST) (figure I.15). Dans un même élément, les tubes sont perpendiculaires au trajet des fumées, distants entre eux d'un pas longitudinal (SL), plus ou moins nombreux, alimentés en parallèle par le même collecteur d'entrée et débitant dans le même collecteur de sortie [19].

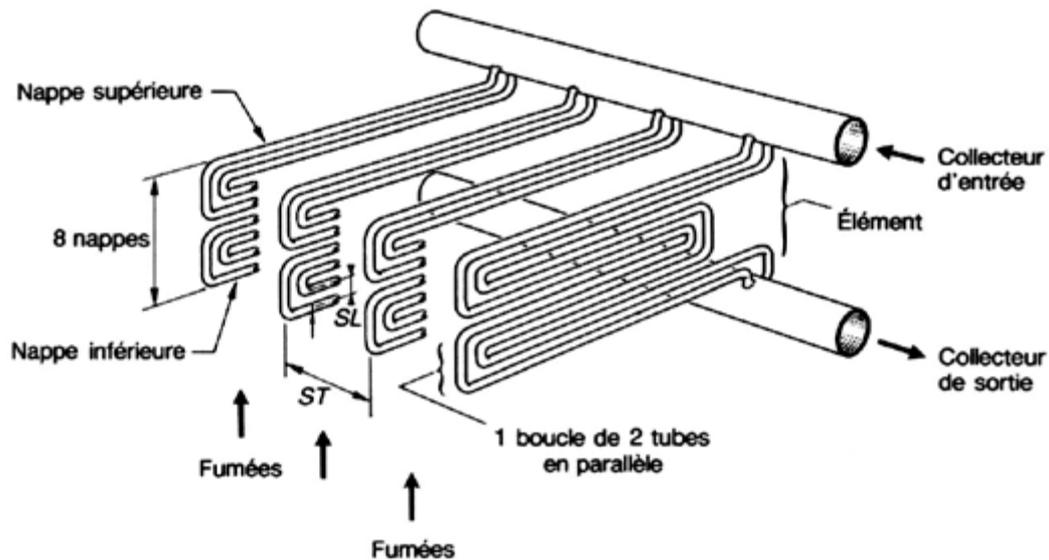


Figure I.15 : Echangeur de chaleur.

I.6.3.1. Economiseur

L'économiseur (figure I.16) est un échangeur de chaleur à multi passages situé dans l'écoulement des gaz d'échappement chauds sortant du générateur de vapeur. Le rôle principal de celui-ci est de réchauffer l'eau d'alimentation avant son entrée dans la chaudière.

L'économiseur divisé parfois en différents éléments, est généralement constitué de tubes à ailettes ou de tubes lisses.

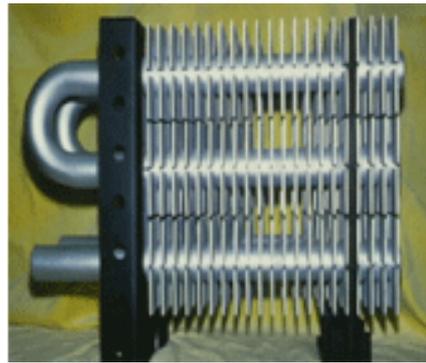


Figure I.16 : Economiseur.

I.6.3.2. Surchauffeurs

Ils sont situés sur le parcours des fumées entre la sortie de la chambre de combustion et l'économiseur. Le rôle des surchauffeurs (figure I.17) est d'augmenter la température de la vapeur à la température désirée sans changer la pression. La position du surchauffeur varie suivant le type de la chaudière et l'importance de la surchauffe de la vapeur. Ce sont généralement des échangeurs tubulaires et comprenant parfois deux parties, un surchauffeur primaire et un surchauffeur secondaire, comportant entre eux un système de régulation de température de la vapeur surchauffée.



Figure I.17 : Surchauffeur.

I.6.3.3. Réchauffeurs

Les réchauffeurs ont un rôle identique à celui des surchauffeurs, à savoir élever la température de la vapeur surchauffée provenant de la turbine à un niveau déterminé.

I.6.3.4. Désurchauffeurs

Destinés à refroidir et moduler la température de la vapeur surchauffée ou resurchauffée, ils sont rarement tubulaires mais généralement assimilables à des échangeurs par mélange puisqu'ils procèdent par injection d'eau dans la vapeur.

I.7. REGULATION DES CHAUDIERES

La régulation des chaudières présente, par rapport à celle d'autres systèmes industriels, des caractères particuliers résultant du fait que ces systèmes doivent faire face à des variations de charge incessantes, rapides et parfois importantes.

En effet, les chaudières sont systématiquement suivies d'utilisateurs de vapeur qui représentent des grandeurs perturbatrices extrêmement variables. Il en résulte que cette régulation est placée sous le signe de la vitesse de réponse dynamique. Les chaînes de régulation, les appareils de mesure, les servomoteurs eux même, agissant sur les organes de réglage, doivent être établis pour tenir compte de cette condition.

La régulation du niveau d'eau dans le ballon du générateur de vapeur, entre deux limites admissibles de niveau haut et bas, est un élément essentiel pour le bon fonctionnement de la chaudière à la norme de sûreté. Suivant la précision exigible, on fait appel à des systèmes de régulation à un, deux ou trois éléments, qui sont le niveau, les débits de vapeur et d'eau d'alimentation.

La régulation par un élément (figure I.18) est piloté par le niveau seulement, néanmoins, elle est faussée par le phénomène de gonflement. En effet, un accroissement de la demande de vapeur entraîne instantanément un retard de l'apport thermique du combustible par rapport au prélèvement thermique de la vapeur et par suite, une légère chute de pression. Ceci entraîne une auto vaporisation instantanée d'une partie de l'eau dans toute la chaudière, qui augmente instantanément le taux de vapeur de l'émulsion et son volume massique. Il en résulte une élévation transitoire, mais très sensible, du niveau d'eau dans le ballon, correspondant au gonflement de l'émulsion [18].

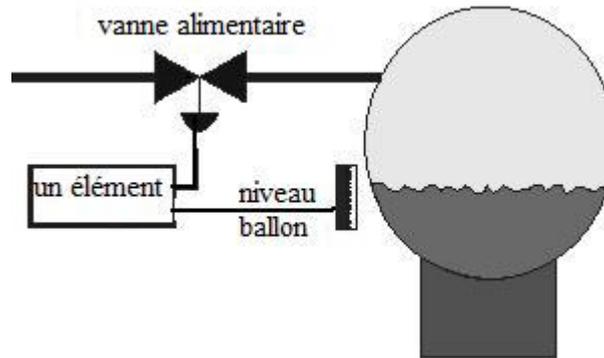


Figure I.18 : Régulation à un élément.

La régulation à deux éléments (figure I.19) est pilotée par le débit de vapeur et le niveau, ce dernier intervenant à titre correctif, à plus longue échéance lors des transitoires. Le système est logique puisqu'il s'agit d'apporter à la chaudière un débit d'eau équivalent au débit de vapeur prélevé, et constitue une amélioration sensible mais souvent insuffisante.

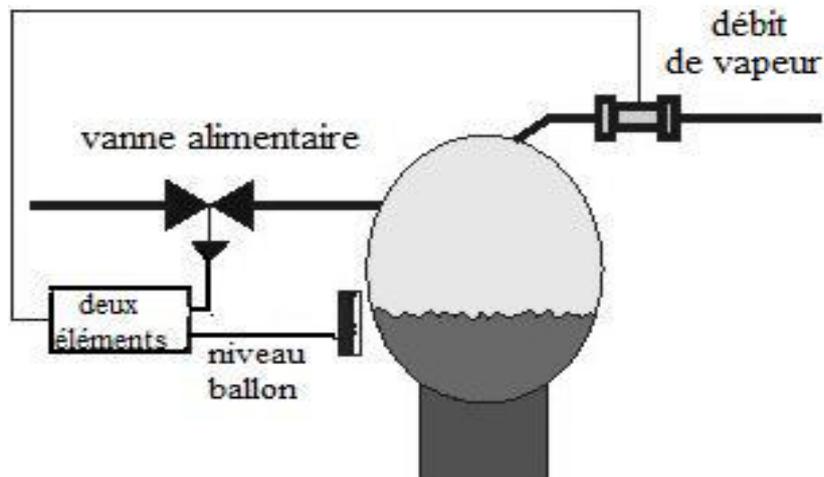


Figure I.19 : Régulation à deux éléments.

La régulation à trois éléments (figure I.20) est pilotée par les débits d'eau, de vapeur et le niveau. Le signal pilotant la vanne d'alimentation résulte alors de la différence entre débit de vapeur et débit d'eau, ce qui évite de modifier le débit d'eau plus que nécessaire, même en cas de variations importantes. On évite ainsi d'accentuer les fluctuations de pression. Le niveau agit toujours en terme correctif à plus longue échéance.

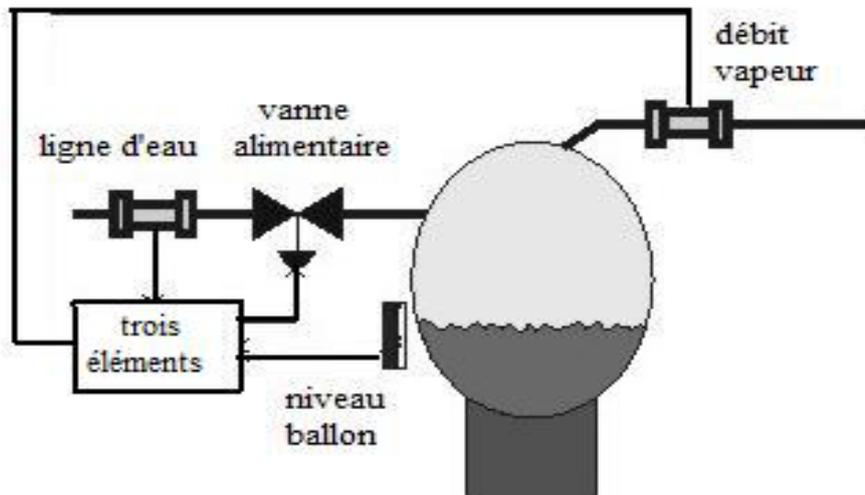


Figure I.20 : Régulation à trois éléments.

Dans les chaudières à surchauffe élevée, il est nécessaire d'introduire une régulation de température de vapeur, puis que d'une part cette grandeur ne se règle plus spontanément, et d'autre part les températures rencontrées sont à la limite des résistances des aciers utilisés. Cette régulation est probablement celle qui présente le plus de difficultés pour deux raisons, à savoir:

- ✓ La masse métallique du surchauffeur est toujours importante puisqu'on cherche à obtenir une température élevée de vapeur, il en résulte une constante de temps élevée de cet appareil qui répond lentement aux actions de régulation qu'on peut exercer sur lui.
- ✓ La régulation de température de vapeur est toujours une régulation de répartition de flux thermique, il s'agit à chaque instant de corriger, par un moyen de réglage approprié, la mauvaise répartition des flux thermiques entre le circuit de vaporisation d'une part, et le circuit de surchauffe d'autre part.

Il y a donc une corrélation étroite entre la régulation de la pression et la régulation de la température de vapeur, puisque toutes les deux interviennent sur le flux thermique.

On est donc obligé de faire appel à des régulations complexes dans lesquelles il est nécessaire de faire intervenir des actions de découplage entre les chaînes de régulation de pression et de la température.

❖ Dans le cadre de ce travail de thèse notre intérêt portera sur la chaudière industrielle à vapeur ABB ALSTOM utilisé dans le complexe de liquéfaction du gaz naturel GNL de Skikda et qui fera l'objet du chapitre II.

Chapitre II

La chaudière ABB ALSTOM

LA CHAUDIERE ABB ALSTOM

II.1. INTRODUCTION

La chaudière est l'une des principales applications du procédé de transfert de chaleur avec changement de phase. Notre travail, comme il a été mentionné à la fin du chapitre précédent portera sur la chaudière type radiante d'une marque ABB ALSTOM du complexe de liquéfaction du gaz naturel GNL de Skikda qui a été installée pour remplacer la chaudière de Clarke-Chapman de type D, de la même puissance détruite pendant l'explosion de 2004. Cette chaudière fonctionne à haute densité de flux thermique pour produire 374 t/h de vapeur. L'unité de liquéfaction de gaz naturel du complexe SONATRACH GNL de Skikda est illustrée par la figure II.1.

Ce complexe reçoit du gaz naturel de Hassi R'Mel, il y extrait les fractions les plus lourdes que le méthane (naphta léger, butane, propane et éthane) avant de liquéfier le gaz (production destinée à l'exploitation) dont la plus grande proportion est composée de méthane.

Chaque unité du complexe est équipée d'une chaudière dont le rôle de chacune d'elles est d'assurer l'alimentation de l'unité avec de la vapeur surchauffée servant essentiellement à l'entraînement d'une turbine de compresseur.

II.2. PRESENTATION DE L'INSTALLATION

La chaudière de marque ABB ALSTOM est de type radiante, de grande puissance, à circulation naturelle, à un seul ballon, et de type monobloc suspendu, elle est maintenue par des élingues métalliques permettant les dilatations vers le bas. Elle fonctionne avec une puissance élevée pour produire 374 t/h de vapeur sous une pression de 73 bars, pour avoir de la vapeur surchauffée à une température de 487°C.

Cette chaudière se compose de :

- Un seul réservoir
- Trois économiseurs, deux à ailettes et le troisième lisse
- Deux surchauffeurs, un à haute température et l'autre à basse température
- Le ventilateur de soufflage
- La robinetterie et les accessoires équipant les économiseurs et la chaudière

- Les équipements de chauffe au gaz
- Le système de régulation et de contrôle
- Deux pompes d'alimentation
- Des vannes et des clapets
- Douze brûleurs à trois niveaux
- Canalisation de vapeur et d'eau d'alimentation

On peut subdiviser toute l'installation en trois parties principales, la ligne d'eau d'alimentation qui désigne la phase liquide saturée, le générateur de vapeur et en dernier lieu, la ligne principale de la vapeur et ses transformations. La figure II.2 schématise toute l'installation.

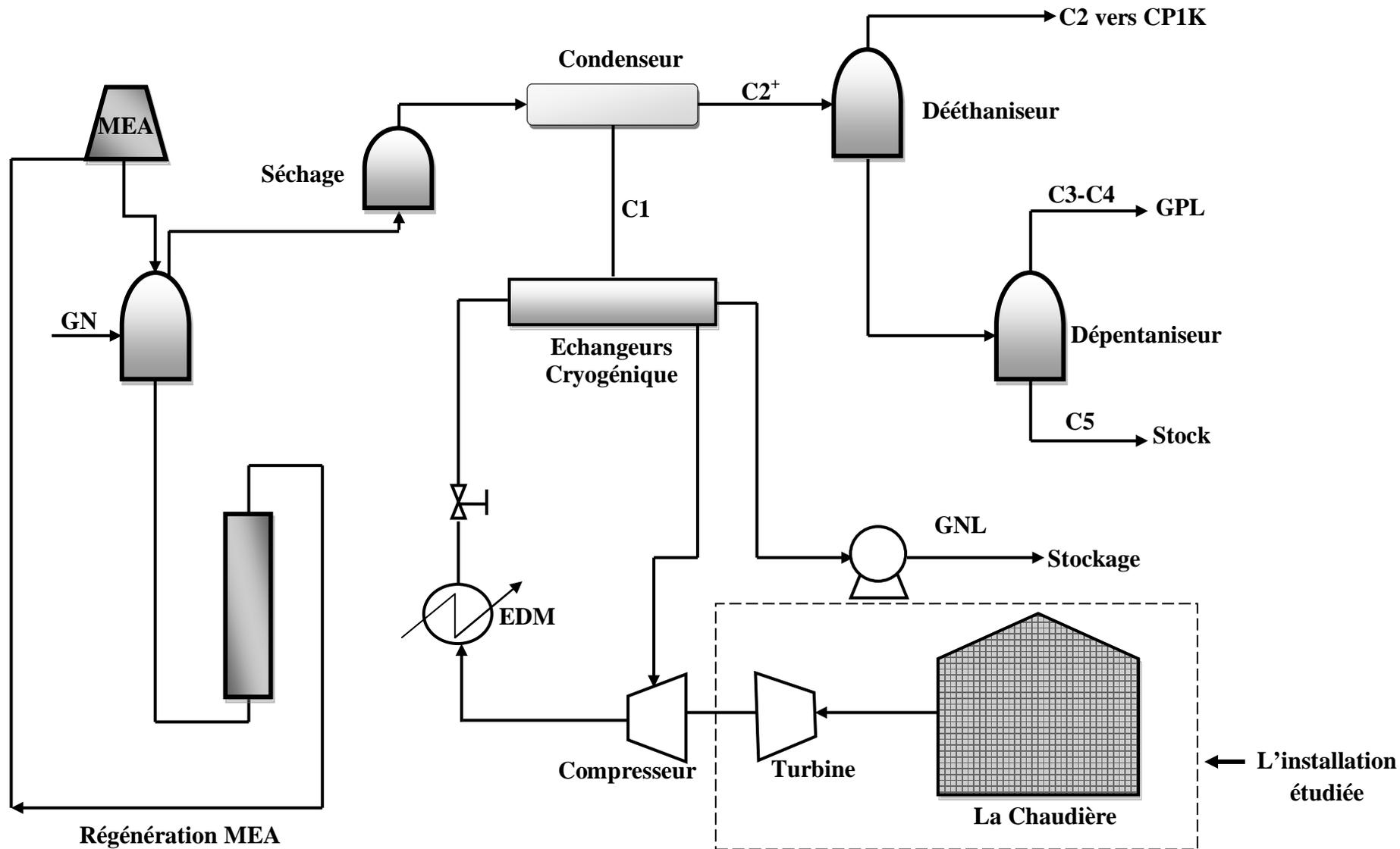


Figure II.1 : Schéma simplifié d'une unité de liquéfaction.

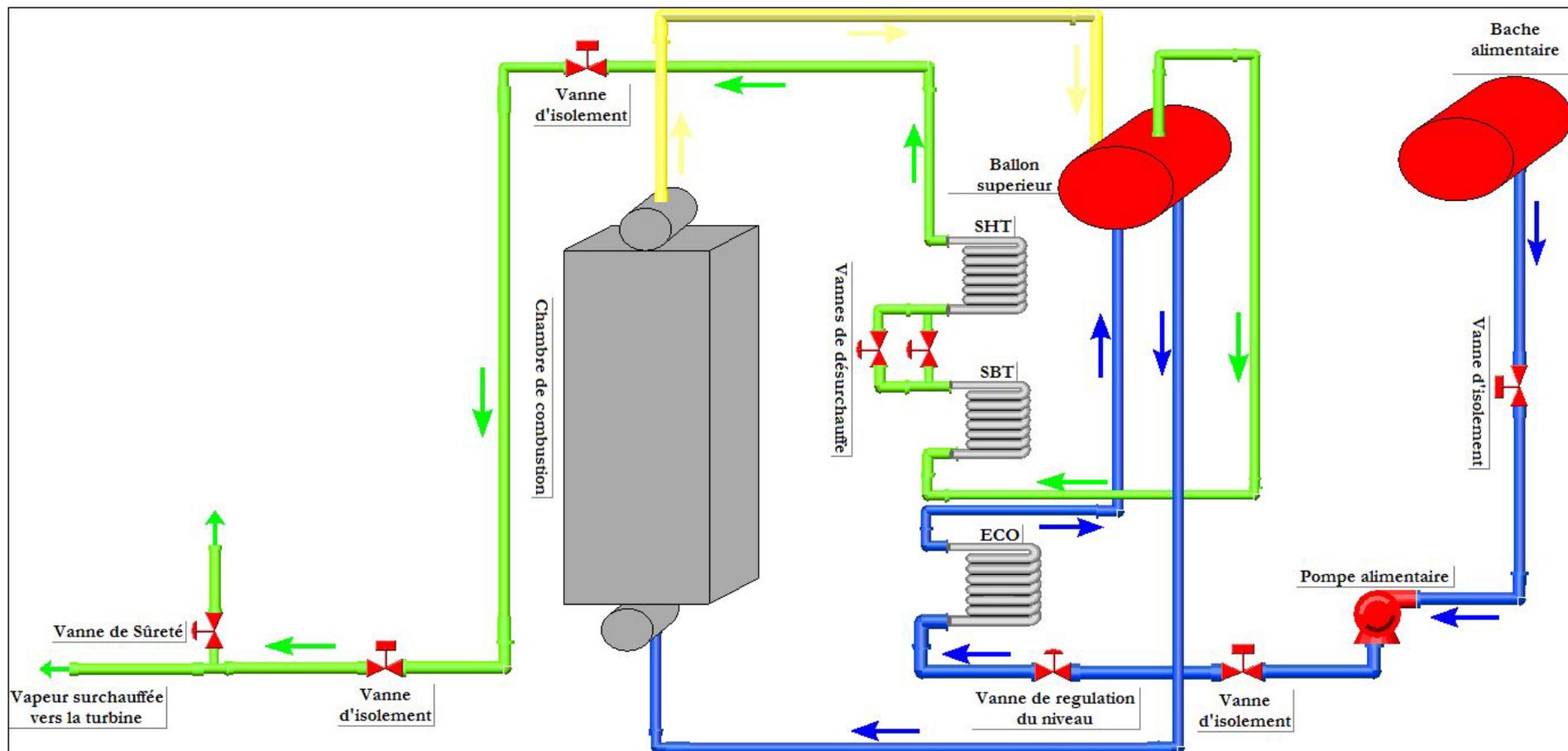


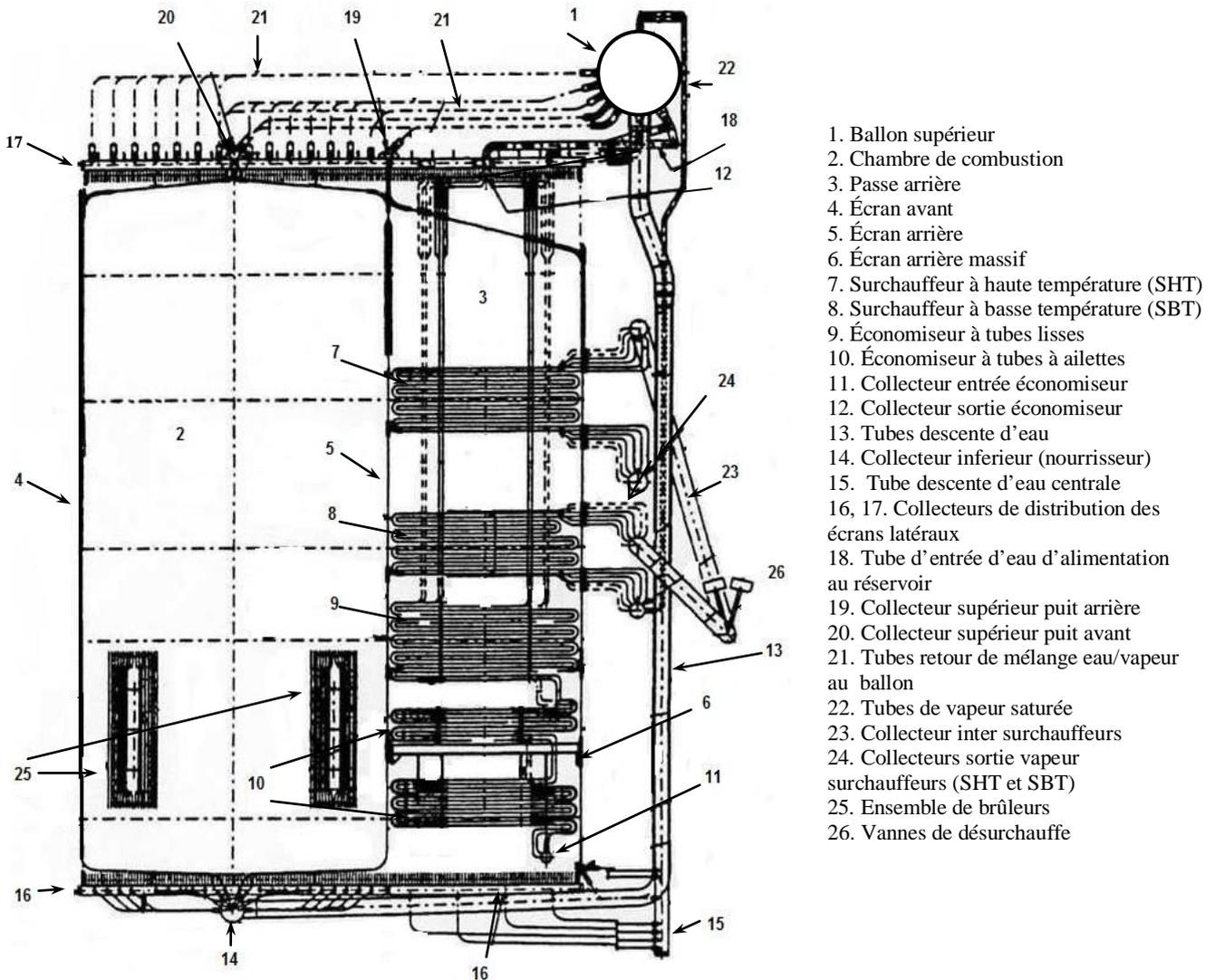
Figure II.2 : Schéma représentatif de toute l'installation.

II.2.1. Les principaux composants du générateur de vapeur

Le générateur de vapeur illustré par la figure II.3 est de type radiant, à circulation naturelle, à un seul ballon. Il est constitué de deux parties principales, la première concerne la chambre de combustion (puit avant), et la deuxième est le passe arrière matérialisé par les murs d'eau qui forment le faisceau évaporateur. La cloison commune entre le foyer et le passe arrière laisse passer les gaz de combustion en partie haute, entre les tubes qui sont disjointes. Le passe arrière reçoit les surchauffeurs à haute et basse températures en partie haute, et les économiseurs en dessous.

Ce générateur de vapeur contient un seul réservoir (ballon supérieur), et des collecteurs d'eau et du mélange (eau/vapeur). L'eau extraite du réservoir est acheminée par 5 tubes descendants extérieurs ayant un diamètre extérieur de 406.4 mm, dont quatre alimentent la chambre de combustion, et un alimente le passe arrière. Le mélange eau/vapeur venant de la chambre de combustion et du passe arrière circule dans des tubes au nombre de 74 dont le diamètre est de 171.3 mm, allant vers le réservoir.

Il y a 20 tubes (diamètre 101.6 mm) d'alimentation de surchauffeurs qui conduisent la vapeur saturée du réservoir au collecteur d'entrée du surchauffeur primaire (SBT).



1. Ballon supérieur
2. Chambre de combustion
3. Passe arrière
4. Écran avant
5. Écran arrière
6. Écran arrière massif
7. Surchauffeur à haute température (SHT)
8. Surchauffeur à basse température (SBT)
9. Économiseur à tubes lisses
10. Économiseur à tubes à ailettes
11. Collecteur entrée économiseur
12. Collecteur sortie économiseur
13. Tubes descente d'eau
14. Collecteur inférieur (nourrisseur)
15. Tube descente d'eau centrale
- 16, 17. Collecteurs de distribution des écrans latéraux
18. Tube d'entrée d'eau d'alimentation au réservoir
19. Collecteur supérieur puit arrière
20. Collecteur supérieur puit avant
21. Tubes retour de mélange eau/vapeur au ballon
22. Tubes de vapeur saturée
23. Collecteur inter surchauffeurs
24. Collecteurs sortie vapeur surchauffeurs (SHT et SBT)
25. Ensemble de brûleurs
26. Vannes de désurchauffe

Figure II.3: Coupe longitudinale du générateur de vapeur.

II.2.1.1. La chambre de combustion

La chambre de combustion est un grand volume de métal de 7637 mm de longueur, de 16627 mm de hauteur, et de 7853 mm de largeur, dans lequel le mélange d'air et de combustible brûle et fournit la chaleur nécessaire pour produire de la vapeur.

La chambre de combustion étanche aux gaz de combustion dans la partie haute, est constituée par des panneaux de tubes à ailettes (tubes d'écran vaporisateurs) jointifs formant des membranes ondulées sur les six faces de la chambre de combustion. Les tubes d'écran avant et arrière de la chambre de combustion constituent un acheminement continu du collecteur nourrissant inférieur au collecteur supérieur, qui est connecté par des tubes d'émulsion au ballon supérieur.

Il y a 102 x 2 tubes d'écran avant et arrière ayant un diamètre de 63.5 mm, et 100 x 2 tubes de diamètre 63.5 mm dans les murs latéraux. Le rôle principal des murs d'eau à l'intérieur du foyer est de maintenir la température pour que la partie du métal ne soit pas fondue, et en même temps de générer de la vapeur.

Les quatre collecteurs supérieurs et inférieurs des parois latérales de la chambre de combustion auxquels les panneaux des parois sont connectés sont tous construits de manière semblable de chaque côté du générateur de vapeur.

Le générateur de vapeur est composée de 12 brûleurs à gaz naturel placés sur les 4 angles du foyer (figure II.4) répartis en 3 niveaux, et chacun d'eux se divise en 2 diagonales. Une diagonale est constituée de 2 brûleurs et 2 allumeurs, ces derniers sont alimentés en gaz naturel par ligne séparée. Les brûleurs sont insérés dans les caissons d'admission d'air au foyer.

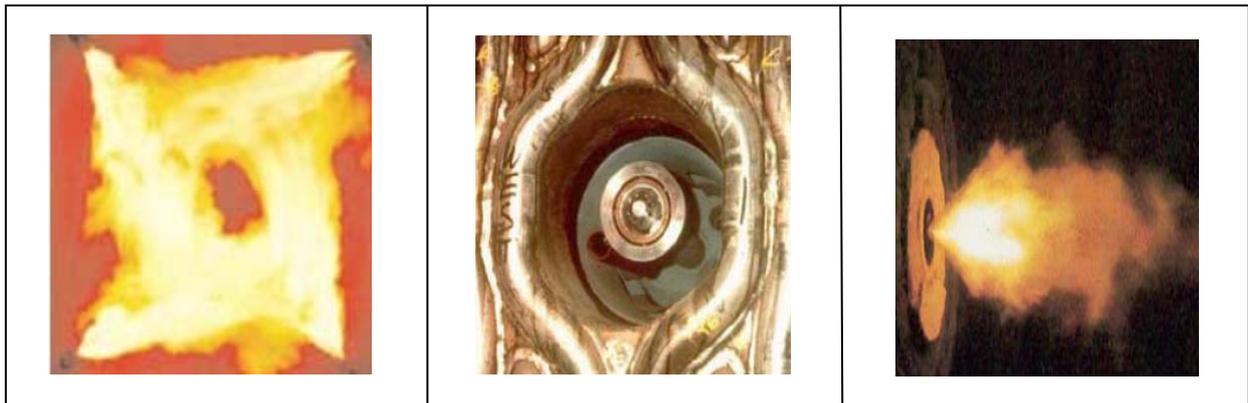


Figure II.4 : Brûleurs dans la chambre de combustion.

L'air de combustion est poussé par un turbo-ventilateur de soufflage alimenté en vapeur auxiliaire et contre pression. La présence de la flamme dans le foyer est contrôlée par des cellules de détection de flamme placées sur chaque brûleur.

La chaleur introduite dans la chambre de combustion (figure II.5) se divise en :

- ✓ Chaleur transférée au fluide directement par les parois
- ✓ Chaleur évacuée par les fumées à la sortie du foyer

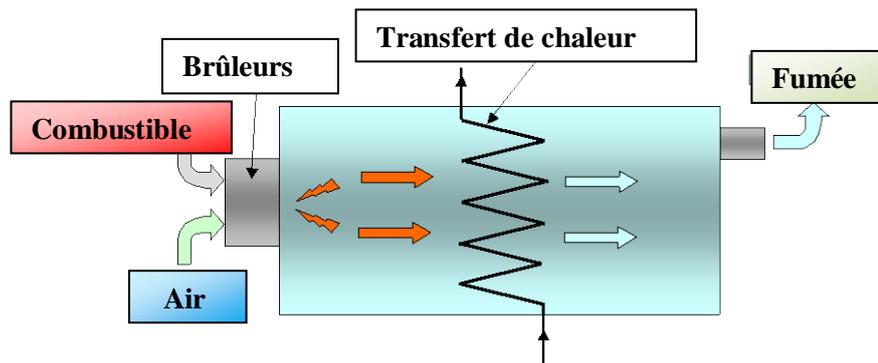


Figure II.5: Bilan thermique dans la chambre de combustion.

Le transfert de chaleur entre la paroi des tubes et les gaz de combustion se fait généralement par deux modes, radiatif et convectif [26, 27, 28], dans les générateurs de vapeur radiants, comme le nom l'indique, il reçoit la quasi totalité de la chaleur par radiation [26], la convection et la conduction ne représentent que 5% [27,28].

La chaleur reçue par les murs d'eau est menée à travers les membranes et les parois des tubes, et transféré par convection forcée en ébullition nucléée au mélange eau/vapeur dans les tubes vaporisateurs [26].

II.2.1.2. Le ballon supérieur (drum)

La chaudière radiante ABB ALSTOM comprend un seul ballon (grand réservoir horizontal), de longueur totale égale à 11700 mm, d'épaisseur de 57 mm, et un diamètre de 1830 mm. Le réservoir a pour fonction de constituer une réserve d'eau nécessaire pour l'alimentation permanente des faisceaux évaporateurs. Il reçoit de ceux-ci le mélange eau/vapeur dans un compartiment ouvert placé au bas du ballon. Il est équipé, en partie haute, d'un compartiment dans lequel sont placées deux rangées de chicanes, dont le rôle est de libérer la vapeur des gouttelettes d'eau qui sont entraînées par la vapeur au moment de la séparation naturelle. Dans ce type de ballon (figure II.6) il n'y a pas des cyclones de séparation, mais elle se fait d'une manière naturelle.

Il y a trois soupapes de sûreté placées sur le réservoir, qui servent à purger le ballon dans le cas de pressions de vapeur égales respectivement à 86, 85.5 et 85 bars.

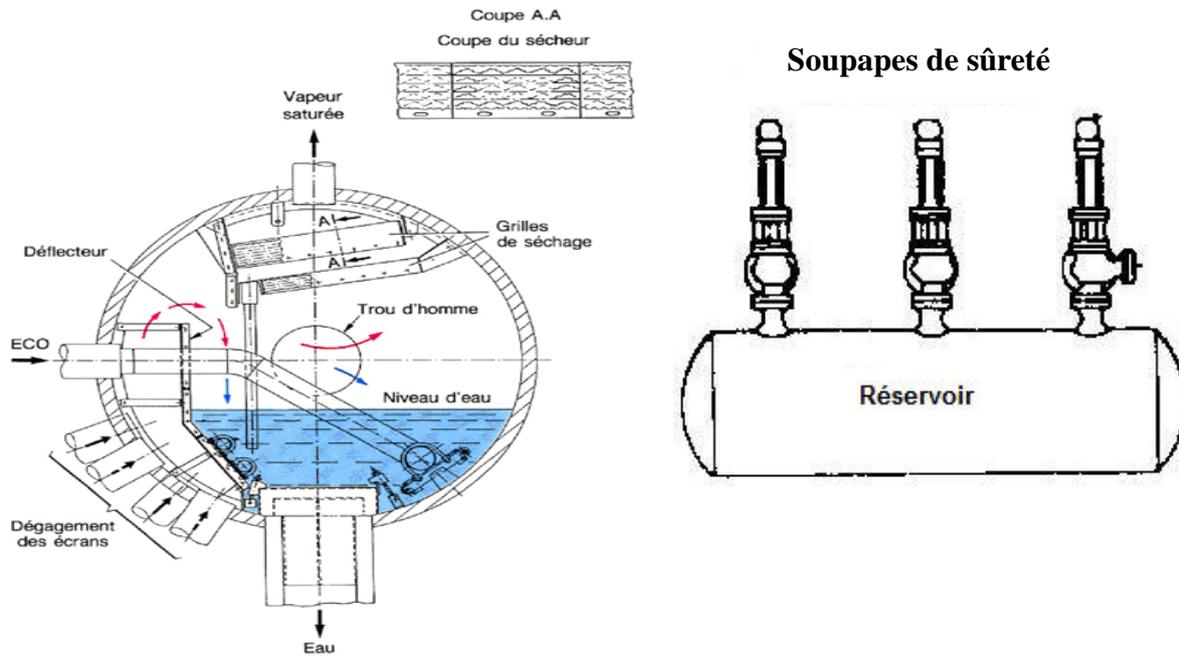


Figure II.6 : Ballon supérieur.

Le niveau d'eau dans le réservoir est mesuré par des transmetteurs de niveau, reposant sur le principe de la mesure de pression différentielle entre une colonne de référence et la hauteur d'eau dans le réservoir, du fait de la différence de température, donc de la densité, entre la colonne de référence et l'eau du réservoir, le signal est corrigé pour obtenir le niveau d'eau réel. Deux vannes de régulation placées sur le collecteur d'eau d'alimentation permettent de régler le niveau. L'une d'elles est utilisée pour la phase de démarrage quand il existe une grande différence de pression entre l'eau alimentaire et la chaudière.

Le plan d'eau dans le ballon doit toujours se situer entre le niveau très haut (1115mm) et le niveau très bas (315 mm), valeurs limites qui provoquent le déclenchement de la chaudière.

II.2.1.3. Les économiseurs

L'économiseur est un échangeur de chaleur multi passages placé dans la chaudière dont le but est de réchauffer l'eau d'alimentation par les fumées de combustion avant d'entrer au réservoir.

Il y a trois économiseurs, deux ailettes, et le troisième lisse. Ces économiseurs sont placés dans le puit arrière en partie inférieure.

Chaque économiseur est constitué de deux panneaux, inférieur et supérieur, chaque panneau consiste en 67 éléments avec des tubes de nuance TU 37-C, de diamètre 63.5 mm et d'épaisseur 5.6 mm, pour l'économiseur à ailettes, et 51 mm de diamètre et 5 mm d'épaisseur pour l'économiseur lisse. Les collecteurs d'entrée et de sortie d'eau d'alimentation des économiseurs sont des cylindres ayant la même orientation que le réservoir, avec une longueur de 7863.5 mm et un diamètre de 273 mm.

La figure II.7 illustre schématiquement des économiseurs lisse et à ailettes.



Economiseur lisse



Economiseur à ailettes

Figure II.7 : Economiseurs de la chaudière.

Les économiseurs récupèrent l'énergie résiduelle des gaz de combustion sortant de la chambre de combustion et la transfèrent à l'eau d'alimentation pour maximiser l'efficacité thermique et réduire les émissions thermiques.

Les paramètres thermohydrauliques des économiseurs sont regroupés dans le tableau II.1.

Tableau II.1 : Paramètres thermohydrauliques des économiseurs.

<i>Paramètres thermohydrauliques</i>	<i>Unité</i>	<i>Valeurs</i>
Température d'entrée d'eau d'alimentation	°C	118
Température de sortie d'eau d'alimentation	°C	287
Température d'entrée des fumées	°C	653
Température de sortie des fumées	°C	188
Débit d'eau d'alimentation	t/h	349
Débit des fumées	Nm ³ /h	390499

II.2.1.4. Les surchauffeurs

Il y a deux surchauffeurs, un surchauffeur primaire travaillant à haute température (SHT), et un secondaire qui travaille à basse température (SBT), connectés en série, placés dans la partie haute du puit arrière du générateur de vapeur. Ils fonctionnent pour augmenter la température de la vapeur saturée sortant du réservoir jusqu'au 487 °C (vapeur surchauffée).

Le surchauffeur SHT est un échangeur de chaleur, tubulaire à quatre passes (figure II.8). Il consiste en 67 éléments, dont chacun est constitué par 4 longueurs de tubes qui vont des tubes tronqués sur le collecteur d'entrée à ceux sur le collecteur de sortie. Les tubes forment un passage de retour horizontal unique entre les collecteurs. Les tubes sont de 51 mm de diamètre extérieur et de 5,6 mm d'épaisseur, de nuance TU 15 CD 2-05. Pour le SBT, c'est un aménagement semblable au surchauffeur SHT qui est monté au-dessus de lui dans le puit arrière. Il consiste en 67 éléments avec des tubes de nuance TU 15 CD 2-05, de diamètre 51 mm et d'épaisseur 5 mm.

Les paramètres thermohydrauliques des surchauffeurs sont regroupés dans le tableau II.2.

Tableau II.2 : Paramètres thermohydrauliques des surchauffeurs.

<i>Paramètres thermohydrauliques</i>	<i>Unité</i>	<i>Valeurs</i>
Température d'entrée de la vapeur au SBT	°C	292
Température de sortie de la vapeur du SBT	°C	370
Température d'entrée de la vapeur au SHT	°C	322
Température de sortie de la vapeur du SHT	°C	487
Température d'entrée de fumées au SHT	°C	1147
Température de sortie de fumées du SHT	°C	853
Température de sortie de fumées au SBT	°C	653
Débit de vapeur surchauffée	t/h	349
Débit des fumées	Nm ³ /h	390499

Les surchauffeurs reçoivent la chaleur par convection des fumées qui sort de la chambre de combustion. La variation de la température de la vapeur à travers les surchauffeurs est représentée sur la figure II.8.b.

La température de la vapeur surchauffée est contrôlée par une injection d'eau de désurchauffe pratiquée au niveau du collecteur inter surchauffeurs. Deux vannes de désurchauffe, aux caractéristiques identiques (un débit d'eau réglable de 0.5 t/h à 25 t/h avec une différence de pression de 20 à 16 bars) travaillent en cascade.

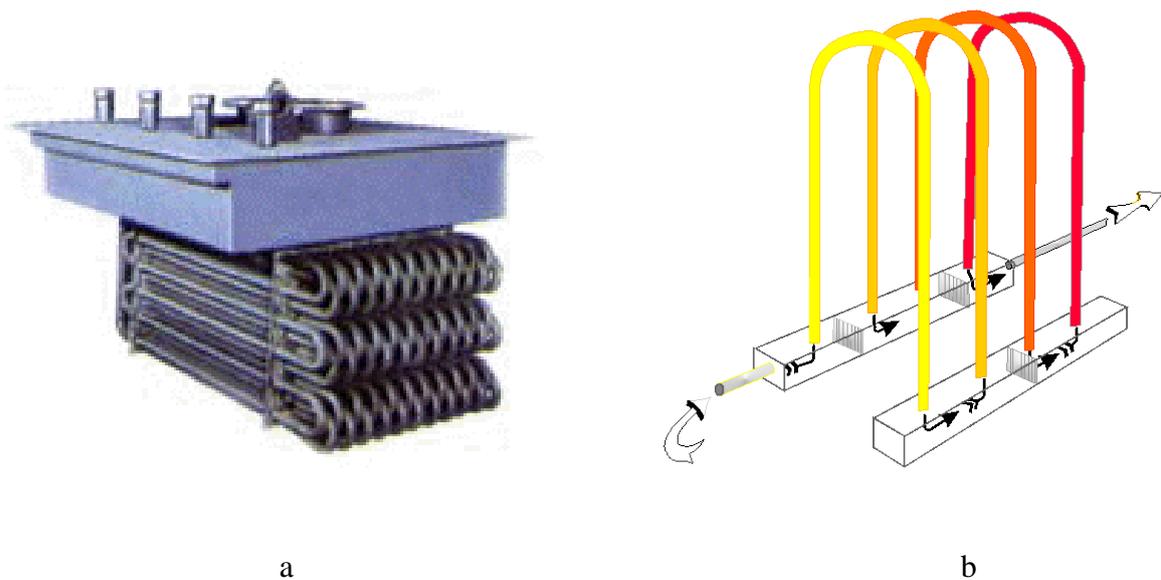


Figure II.8 : Présentation du surchauffeur.

II.2.2. La bêche alimentaire

La chaudière est alimentée en eau condensée non polluée (ni matière organique, ni huiles,... etc.), complétée par une faible proportion d'eau d'appoint déminéralisée dont la préparation est continuellement contrôlée. Cette eau est collectée dans la bêche alimentaire (figure II.9). Cette dernière est un grand réservoir ayant un diamètre intérieur de 3658 mm, et une longueur de 12 m. La température d'eau d'alimentation dans la bêche est de 118 °C, avec une pression de 1.89 bars. Elle est placée à une altitude de 8 m par rapport à l'axe de la pompe alimentaire.

L'eau d'alimentation de la chaudière contient de l'oxygène, agent de corrosion qui doit être éliminé. L'élimination peut s'effectuer par voie physique par la mise en place d'un dégazeur thermique ou par voie chimique avec l'utilisation de réducteurs d'oxygène.

L'eau d'alimentation est dégazée thermiquement par deux dégazeurs qui se trouvent sur la bêche alimentaire, pour éviter la cavitation de la pompe.

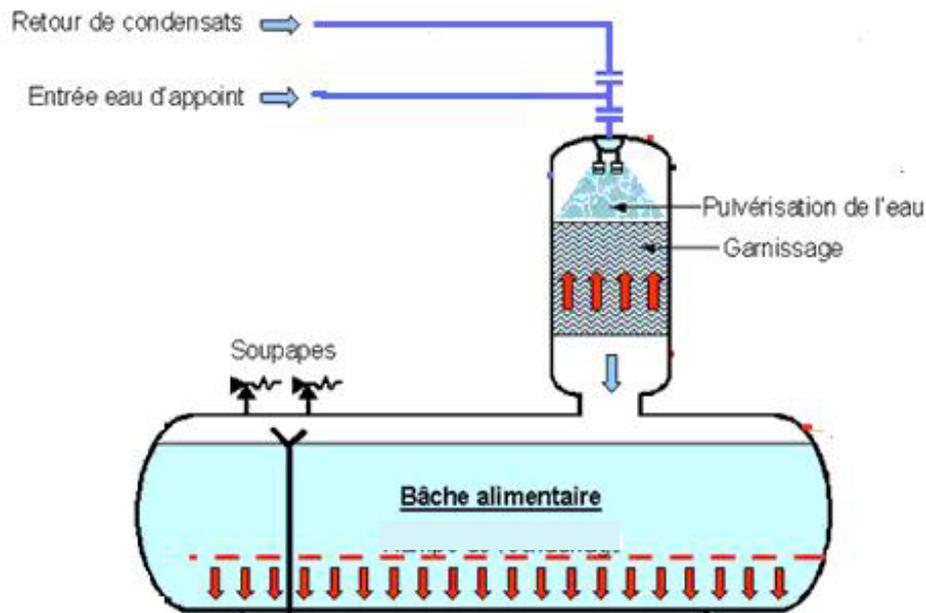


Figure II.9 : Bâche alimentaire de la chaudière.

II.2.3. La pompe alimentaire

Les pompes centrifuges (figure II.10) sont des pompes qui changent l'énergie mécanique en énergie hydraulique. Elles sont les plus utilisées dans les installations industrielles [25]. Leur popularité est due à la simplicité de construction, à leurs petites exigences d'espace et à leur capacité d'opération à hautes vitesses [17].

La pompe alimentaire sert à alimenter la chaudière en eau déminéralisée. Dans l'installation, il y a deux pompes alimentaires, une en marche, l'autre en arrêt. Ces dernières sont des pompes centrifuges horizontales de type DVMX 6x8x11 E/4 étages. Les caractéristiques de la pompe de la chaudière sont:

- Longueur : 2086 mm
- Capacité (débit) au point de fonctionnement : 446 m³/h
- Masse du mobile (rotor pompe) : 200 kg
- Puissance machine d'entraînement : 1600 kw
- Diamètre d'aspiration : $\varnothing=304.8$ mm, à la bride d'aspiration de la pompe $\varnothing= 203.2$ mm
- Diamètre de refoulement à la bride de refoulement de la pompe $\varnothing=152.4$ mm
- Hauteur manométrique au point de fonctionnement : 977 m
- Vitesse de rotation : 3950 tr/mn
- Position de la pompe : horizontale

- Pression de refoulement : 91.93 bars
- Température de service : 118 °C



Figure II.10 : Pompe centrifuge alimentaire de la chaudière.

II.2.4. Les vannes et les clapets

Dans l'installation, il y a plusieurs vannes et clapets, dont les plus importants sont:

- ❖ 01 Vanne d'isolement à l'aspiration pour isoler l'eau alimentaire en cas de nécessité
- ❖ 01 Filtre d'aspiration : pour filtrer l'eau et protéger la pompe contre les corps étrangers
- ❖ Deux vannes de régulation d'eau d'alimentation (une à grand débit et l'autre à faible débit)
- ❖ Trois clapets anti-retour, un de refoulement, un juste à l'entrée de la chaudière, et l'autre dans la ligne de désurchauffe
- ❖ Deux vannes de désurchauffe pour la régulation de la température de la vapeur surchauffée
- ❖ Un diaphragme dans la ligne de la vapeur surchauffée
- ❖ Deux débit-mètres (ligne principale d'eau d'alimentation, et ligne de désurchauffe)
- ❖ Deux vannes d'isolement de la vapeur
- ❖ Une vanne d'isolement d'eau de désurchauffe
- ❖ Une vanne d'isolement d'eau d'alimentation

Conditions de fonctionnement

Les vannes et les clapets sont ouverts en marche et fermés à l'arrêt.

Le clapet anti-retour s'ouvre automatiquement sous l'effet de la pression et se ferme par un ressort de rappel en cas de chute de pression à un certain seuil.

II.2.5. Le système de purge

Les purges ont pour rôle d'éliminer les condensats qui se forment dans les surchauffeurs et les collecteurs de vapeur pendant les démarrages froids ou les périodes de refroidissement. Les vannes placées sur ces purges sont équipées de servomoteurs et commandées soit par l'opérateur soit par automatisme. Elles sont placées aux points bas de :

- ✓ L'entrée SBT
- ✓ L'entrée SHT
- ✓ La sortie SHT
- ✓ Les collecteurs vapeur

La purge continue du réservoir, actionnée manuellement, a pour rôle est de déconcentrer les produits contenus dans l'eau de la chaudière, dont on aura déterminé la qualité par analyse chimique.

Les vannes de vidange manuelle permettent de vider complètement la chaudière. Elles sont principalement localisées :

- ✓ A l'entrée de l'économiseur
- ✓ Aux collecteurs de bas d'écrans de murs d'eau (le nourrisseur)

Ces robinets ne doivent jamais être actionnés quand la chaudière est en marche. En cas de vidange de la chaudière, il faut ouvrir les événements situés sur le collecteur de vapeur saturée pour éviter de passer la chaudière sous vide.

II.3. LA CIRCULATION DE FUMÉE ET D'EAU/VAPEUR

La figure II.11 illustre le circuit eau/vapeur et le circuit des fumées de combustion. Les gaz de combustion sortent du foyer en partie haute de la chambre de combustion par une cloison commune entre les tubes qui sont disjoints. Le sens de circulation des fumées est vertical descendant, dans le passe arrière en traversant successivement les surchauffeurs à haute

température (SHT), à basse température (SBT), et les économiseurs. Ces gaz sont ensuite envoyés à l'atmosphère par la cheminée.

La chaudière est alimentée en eau condensée non polluée à partir de la bêche alimentaire à l'aide d'une pompe, cette eau est réchauffée dans les économiseurs et dans les tuyauteries de suspension des échangeurs puis acheminée au réservoir via une tubulure perforée située à la partie inférieure du réservoir. L'eau du ballon descend vers les collecteurs inférieurs des murs d'eau par les colonnes de descentes extérieures, au nombre de 5, dites downcomer. Par la suite, l'eau se dirige vers les faisceaux évaporateurs dans la chambre de combustion et dans le passe arrière, où elle est chauffée dans les murs d'eau, et se transforme partiellement en vapeur. Le mélange eau/vapeur remonte jusqu'aux collecteurs supérieurs pour arriver à la fin dans le réservoir. Cette boucle se fait par la circulation naturelle produite par la différence de densité entre l'eau alimentaire dans les tubes descendants et le mélange diphasique eau/vapeur dans les tubes ascendants [54, 45].

Dans le ballon, la vapeur se sépare de l'eau de façon naturelle, l'eau de séparation est recueillie dans le compartiment du liquide et la vapeur passe dans les paniers sécheurs où les gouttelettes d'eau présentes encore dans la vapeur sont alors retenues, ce qui permet d'obtenir de la vapeur saturée parfaitement sèche. La vapeur se dirige après vers les surchauffeurs au nombre de deux, primaire et secondaire, qui élèvent sa température, avant d'être acheminée par un collecteur vers la turbine.

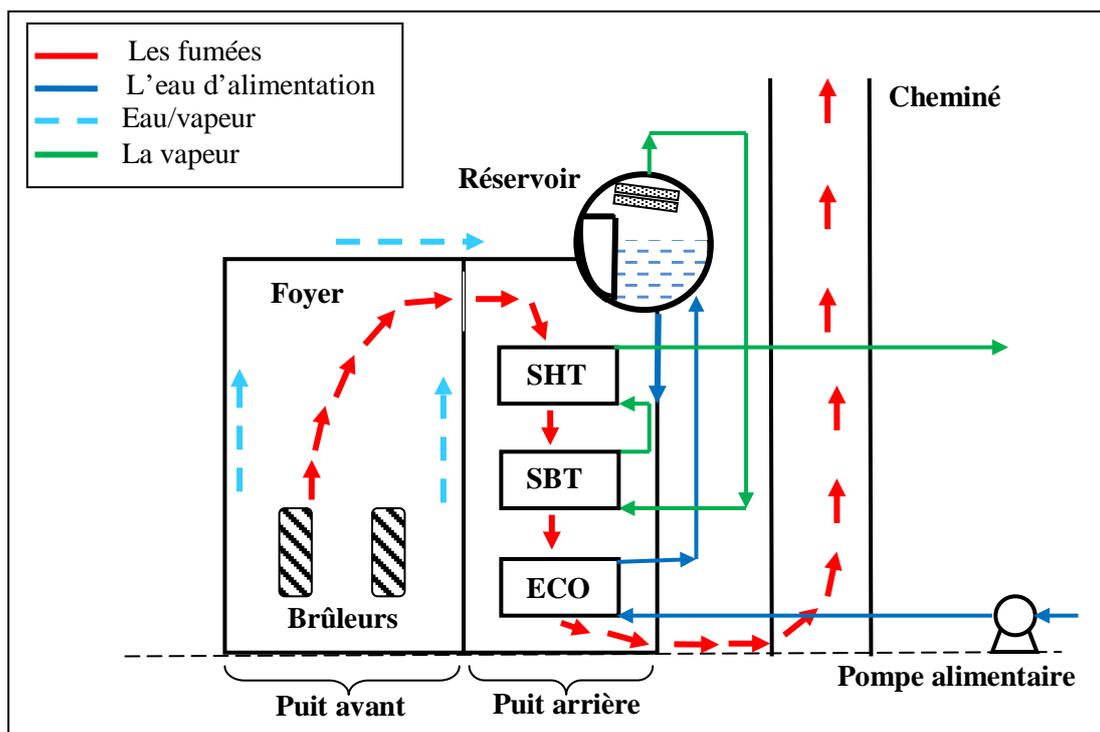


Figure II.11 : Circulation de fumée/eau/vapeur.

II.4. LE SYSTEME DE REGULATION DANS LA CHAUDIERE

Le bon fonctionnement et la prévention des installations industrielles reposent incontestablement sur la régulation. Ainsi pour maintenir la stabilité d'un système énergétique [18] il est nécessaire de recourir à une chaîne de régulation automatique dont la fonction principale est d'assurer le suivi, la surveillance et maîtrise de l'équipement. Cette surveillance s'effectue par l'acquisition des mesures sur le site et la transmission de celles ci jusqu'à la salle de contrôle où elles seront visualisées par l'opérateur. La qualité de la mesure dépend de celle du capteur-transmetteur [22]. Les capteurs doivent être régulièrement étalonnés. Il faut veiller que l'information fournie correspond à la mesure effectuée, cette vérification est d'autant plus fréquente que la mesure (température, débit et niveau) [22] est sensible pour la qualité de la production ou la sécurité de l'installation. Le choix du type de chaîne de régulation dépend des variations de charge (importantes et rapides) aux quelles sont soumis ces systèmes [43].

II.4.1. Régulation du niveau dans le ballon

Quelque soit la demande de vapeur, il est indispensable de maintenir le plan d'eau du ballon supérieur à une position prédéterminée. Pour cela la régulation du niveau est utilisée afin de maîtriser les phénomènes de gonflement et de tassement résultants d'une variation importante de la charge. Il faut noter que le processus de régulation est difficile à établir du fait de l'existence des deux phases liquide et vapeur. Parmi les causes principales qui peuvent conduire à des fluctuations de niveau on peut citer [22] :

- ✓ Variation dans la pression de vapeur
- ✓ Variation soudaine dans la demande de vapeur
- ✓ Variation soudaine dans le régime de chauffage
- ✓ Rentrée d'eau par suite d'une concentration excessive d'impuretés
- ✓ Extraction par les soupapes de sécurités

Le niveau d'eau dans le réservoir est mesuré à l'aide de transmetteur de niveau, reposant sur le principe de la mesure de la différence de pression entre une colonne de référence et la hauteur d'eau dans le réservoir. Le plan d'eau doit toujours se situer au milieu, entre deux valeurs limites (315 et 1115 mm) qui provoquent le déclenchement de la chaudière. La régulation est de type un élément (niveau) dans les périodes de démarrage, et à trois éléments (niveau, débit vapeur, débit d'eau) pour un débit de vapeur élevé. Il y a deux vannes de régulation placées sur le collecteur d'eau d'alimentation permettent de régler le niveau. L'une d'elle est utilisée en phase de

démarrage quand une grande différence de pression entre l'eau alimentaire et la chaudière existe.

II.4.2. Régulation de la température de vapeur surchauffée

Les tubes des surchauffeurs SHT et SBT étant soumis à des flux importants, il est nécessaire de maintenir la température de vapeur surchauffée constante à la sortie de la chaudière afin d'assurer le bon fonctionnement de cette dernière. Pour cela, de l'eau de désurchauffe est injectée au niveau des collecteurs intersurchauffeurs. Deux vannes de désurchauffe parfaitement identiques travaillant en cascades sont utilisées pour la régulation de la température de la vapeur surchauffée.

La fermeture des vannes est conditionnée par un [22]:

- Non ouverture de la vanne motorisée d'isolement
- A l'arrêt de la chaudière
- Un débit de vapeur < 10%

Les vannes sont en régulation avec la présence de toutes les conditions suivantes :

- Vannes motorisées ouverte
- Chaudière en marche
- Débit vapeur > 10%

II.5. OPERATION ET SURVEILLANCE DE LA CHAUDIERE

II.5.1. Contrôle de l'eau d'alimentation

Le niveau de l'eau dans la chaudière doit être surveillé. Un niveau trop haut peut être la cause d'entraînement d'eau dans la vapeur. La concentration dans la chaudière, l'alcalinité, le PH, la teneur en oxygène etc..., doivent être vérifiés périodiquement pour éviter les incidents d'exploitation correspondants à [22]:

- L'entartrage
- La corrosion
- L'entraînement de solides dans la vapeur
- Le primage excessif

S'il y a entrainement d'eau, la température de la vapeur baissera brusquement, puis se rétablira. Les fluctuations de température augmenteront en fréquence et importance, avec l'accroissement du taux des matières solides et de l'alcalinité de l'eau.

II.5.2. Surchauffe

Un certain nombre de facteurs peuvent provoquer une température anormale de la vapeur, parmi lesquels nous pouvons citer [22]:

- Un excès d'air insuffisant
- Une teneur excessive en humidité de la vapeur
- Une surchauffe encrassée extérieurement et/ou intérieurement

D'autre part, les conditions suivantes tendent à produire des températures anormalement élevées pour une marche déterminée :

- Chambre de combustion sale
- Trop d'excès d'air
- Température d'eau d'alimentation trop basse
- Allumage irrégulier ou combustion déplacée vers le haut de la chambre, donc vers les surchauffeurs

II.5.3. Contrôle de la combustion

Il faut vérifier périodiquement les bonnes conditions de marche de la combustion. L'examen des pertes est à effectuer périodiquement ce qui permettra de prendre en temps utile toutes les mesures propres à rétablir la bonne marche de la combustion.

Les pertes contrôlables sont [22]:

- Pertes par chaleur sensible à la cheminée. Elles dépendent de la température et du volume des fumées évacuées. Pour maintenir la perte sensible au minimum, il est nécessaire de réduire au minimum le volume des fumées évacuées à la cheminée en utilisant un excès d'air aussi peu élevé que possible pour la combustion et de réduire le plus possible la température des fumées à la sortie.
- Pertes par imbrûlés gazeux. La formation de CO est due à un manque d'air ou à un mauvais mélange de l'air et le combustible. Toutes les précautions devront donc être prises pour réduire à zéro la teneur en CO.

II.6. DEMARRAGE ET ARRET DE LA CHAUDIERE

II.6.1. L'arrêt

II.6.1.1 Arrêt normal avec refroidissement

Pour un arrêt normal avec refroidissement de l'installation qui est à pleine pression, et en régulation automatique, il faut réduire la pression à zéro puis laisser la chaudière se refroidir totalement. Pour cela il faut [22]:

- Réduire le débit de vaporisation jusqu'au minimum
- Après coupure des feux, laisser fonctionner le ventilateur de soufflage avec un débit de 40% pendant au minimum 5 minutes. La chaudière sera refroidie au rythme de 60°C/heure.
- Fermer la vanne principale de la vapeur à la sortie de la chaudière, et ouvrir les purges du surchauffeur.
- Maintenir le niveau d'eau dans le ballon sous contrôle. Maintenir la pompe alimentaire en service pour permettre les appoints d'eau pendant le refroidissement de la chaudière.
- Contrôler la descente en température. Si nécessaire, conserver la ventilation en service pendant quinze minutes et ajuster le débit d'air en manuel jusqu'à ce que la pression soit nulle.
- Ramener la température de la chaudière à moins de 70°C avant quelle ne soit éventuellement vidangée.

II.6.1.2. Arrêt sans refroidissement

Pour cela, on cherche à maintenir les températures et la pression de la chaudière pour permettre un redémarrage rapide.

Les différences avec l'arrêt de la chaudière décrit précédemment sont [22]:

- Après coupure des feux, fermer la vanne de sortie de la chaudière
- Conserver la ventilation au minimum 5 minute avec un débit de 40% après la coupure des feux puis arrêter le ventilateur de soufflage
- Maintenir en service l'air de refroidissement des cellules
- Maintenir le niveau du réservoir au voisinage du niveau haut

II.6.2. Le démarrage

L'arrêt à chaud, avec ventilation, de durée limitée, provoque la formation de condensat dans le circuit vapeur du fait du refroidissement des échangeurs. Simultanément et même sans ventilation, la chaudière continue de se refroidir. Durant la phase d'allumage, la séquence de balayage provoque un refroidissement supplémentaire [22].

Le circuit vapeur est équipé d'un système de récupération de ces condensats dans les circuits surchauffeurs pour permettre l'élimination de ceux-ci.

Supposons que la chaudière a été arrêtée pour un délai court et que les événements et les purges de la chaudière et les surchauffeurs sont fermées, deux cas de figurés peuvent se présenter :

- ✓ Si l'arrêt a été inférieur à 5 heures, le temps nécessaire à l'évacuation des condensats est inférieur à 5 mn. Il est alors recommandé d'ouvrir les purges inter surchauffeurs pendant le temps de balayage pour éliminer tous les condensats avant l'allumage de la chaudière.
- ✓ Si l'arrêt a été supérieur à 5 heures, le temps nécessaire à l'évacuation des condensats peut être supérieur à 5 mn, il est par conséquent recommandé d'ouvrir les purges inter surchauffeurs, une dizaine de minute avant de débiter le balayage de la chaudière.

Les séquences de redémarrage en cas d'arrêt chaud sont les suivantes :

- Ouverture des purges inter surchauffeurs (si l'arrêt est plus de 5h), pendant 10 mn
- Balayage de la chaudière et ouverture des purges inter surchauffeurs
- A la fin de balayage, il faut ouvrir l'événement de démarrage, ouvrir la purge de sortie SHT, allumer la première diagonale, et fermer des purges inter surchauffeurs

II.7. LES PROBLEMES DANS LA CHAUDIERE

Dans la chaudière, plusieurs problèmes peuvent survenir durant son service, du fait qu'elle travaille dans des conditions sévères, haute température (487°C), haute pression (73 bars), environnement corrosif et fonctionnement continu (parfois des jours sans arrêt).

Ces problèmes ont une influence sur le bon fonctionnement de la chaudière, et parfois des conséquences graves, telles que des explosions. Généralement, les explosions des générateurs de vapeur sont de deux sortes :

1. Explosion des parties sous pression (côté eau).
2. Explosion de la chambre de combustion (côté feu).

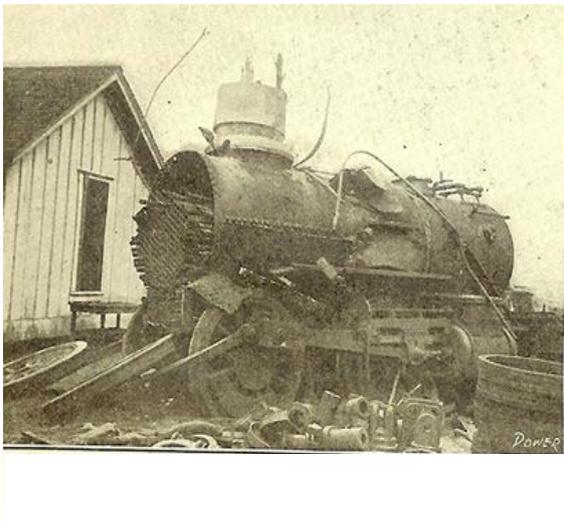
La figure II.12 représente quelques exemples d'explosion des générateurs de vapeur.



London, 15 Avril 1862



New-Hampshire, 22 Mai 1893



Texas, 8 Février 1911.



Singapour, 9 Décembre 2000

Figure II.12 : Exemples d'explosion des chaudières à vapeur.

Les causes qui conduisent à l'explosion d'une chaudière sont diverses. Les plus importantes et les plus fréquentes étant:

II.7.1. Manque d'eau

Pour une chaudière, le manque d'eau est sans doute l'incident le plus sérieux qui puisse survenir, car, le niveau d'eau dans le ballon diminue rapidement et les parois des tubes sont surchauffées. Cet incident peut être provoqué par un mauvais fonctionnement de l'alimentation, causé par la défaillance d'une pompe d'eau alimentaire, la carence de la commande automatique, ou par une rupture dans un tube, etc. Cet accident menace l'intégrité structurale du système et provoque l'explosion des parties sous pression du générateur de vapeur [31].

Les opérations à effectuer dans ce cas sont [22] :

- Stopper les feux immédiatement (ils seront coupés automatiquement si le niveau de l'eau est très bas).
- Prendre l'alimentation en manuelle et procéder à:
 - a) Si le débit d'eau d'alimentation, bien qu'insuffisant, s'est maintenu il faut le réduire progressivement sans toutefois l'annuler.
 - b) Si l'eau d'alimentation, après disparition temporaire, redevient disponible, il faut reprendre l'alimentation à un débit très nettement inférieur à celui enregistré au moment de l'incident, pour le stabiliser à une valeur faible correspondant à celle de la dernière phase du cas précédent.

Le but de la mise en commande de l'alimentation et de la réduction graduelle du débit d'eau est d'éviter de baigner brutalement certaines parties sous pressions où le métal aurait pu être surchauffé.

- A faible débit, et feux stoppés, le niveau doit se refaire très lentement. Il faut donc suivre la montée pour la mise à niveau normal, puis fermer l'alimentation pour contrôler la tenue de ce niveau. S'il se maintient, (preuve que la chaudière n'a pas souffert) l'unité pourra être normalement remise à feu.
- Si le niveau ne se maintient pas, il faut réduire la pression de la vapeur graduellement en ouvrant la purge à la sortie du surchauffeur. La chaudière se refroidit peu à peu, et le débit d'air est réduit. Dès que la chaudière est refroidie et sa pression abaissée à la pression atmosphérique, le ventilateur sera arrêté.
- Ne jamais vider la chaudière jusqu'à ce que le foyer soit assez froid. Avant la vidange de la chaudière, examiner l'unité pour y déceler les effets possibles d'une surchauffe localisée tels que fuites ou déformation de certaines parties sous pression.

II.7.2. Rupture des tubes

Plusieurs paramètres peuvent produire une rupture dans les tubes vaporisateurs, on peut citer la défaillance ou la corrosion des tubes. Quand l'incident se produit, le ballon supérieur (réservoir) se vide rapidement. L'eau d'alimentation qui entre dans le réservoir vient directement en contact avec les parois du ballon, ce qui entraîne des tensions dangereuses du fait de la grande différence de température entre l'eau d'alimentation et celle des tôles.

Les opérations à effectuer dans le cas de cet incident sont les suivantes [22] :

- Si la fuite dont la conséquence est une perte d'eau peu importante, le niveau doit être maintenu et la chaudière mise hors service de manière normale.
- En cas de rupture créant une perte d'eau tel que le niveau ne peut être maintenu avec le débit maximum des pompes alimentaires, il faut procéder sans délai aux opérations successives suivantes :
 - Stopper les feux immédiatement et complètement.
 - Réduire les ventilateurs de soufflage dès la disparition de la flamme
 - Couper l'alimentation de la chaudière.
 - Régler le soufflage pour assurer l'échappement à la cheminée de la vapeur formée dans le foyer.
 - Isoler la chaudière côté vapeur.
 - Pendant la chute de la pression à la chaudière, réduire progressivement le soufflage, et assurer l'échappement de la vapeur à la cheminée.
 - Laisser en service le soufflage pendant 2 à 3 heures après la chute de la pression effective de la chaudière à zéro.

II.7.3. Mauvaise combustion

Si la combustion est élevée plus que la moyenne de fonctionnement, le niveau d'eau diminue rapidement dans la chaudière et la pompe d'alimentation travaille beaucoup ce qui peut causer sa surchauffe et par la suite son endommagement.

Un autre incident peut se produire tel que l'arrêt d'urgence du combustible, dans ce cas il faut exécuter les opérations suivantes [22]:

- Maintenir le débit d'air à 30% environ pour purger le circuit des fumées pendant au moins 5 minutes
- S'assurer que toutes les vannes individuelles gaz aux brûleurs sont fermées

II.7.4. Explosion du foyer

Les explosions de foyer sont généralement le résultat des causes suivantes :

- L'existence de combustible imbrûlé dans le foyer résultant d'une combustion incomplète ou d'un manque d'allumage
- Le mélange de ce combustible imbrûlé avec l'air en proportion explosive

Les explosions de foyer peuvent être évitées en prenant quelques précautions telles que [22]:

- Maintenir un débit d'air de combustion minimum de 30% de la pleine charge pendant l'allumage pour prévenir toute accumulation de mélanges explosifs.
- S'assurer que les vannes d'entrée du combustible sur les brûleurs non utilisés sont étanches lorsqu'elles sont fermées.
- Porter attention aux feux afin que le combustible puisse être coupé sans délai s'il y a extinction. Purger immédiatement le foyer pendant plusieurs minutes avec le ventilateur maintenu en service, avant de rallumer.
- En démarrage, si l'allumage n'est pas établi en quelques secondes, purger le foyer, comme indiqué ci-dessus, avant d'essayer à nouveau d'allumer.
- Ne pas maintenir la pression des combustibles dans le circuit alimentant les brûleurs si cela n'est pas nécessaire.

II.7.5. Fatigue et fragilisation du métal

Les chocs thermiques provoquent des cycles de dilatation restreinte, engendrant des gradients de contraintes qui s'initieront généralement sur les défauts géométriques des surfaces [32].

La fatigue à chaud traduit une évolution en fonction du temps et sous l'effet des contraintes de service qui ont tendance à accélérer des phénomènes de précipitation [33].

II.7.6. Qualité de l'eau

La qualité de l'eau influe fortement et peut conduire à la destruction des surfaces internes des tubes vaporisateurs. Il est donc impératif de traiter l'eau de la chaudière afin d'éviter le dépôt de tartre à l'extérieur du tube foyer. En effet, le tartre provoquerait un mauvais échange thermique, un temps de mise en pression-température plus long, un risque de surchauffe au niveau du tube

foyer, une surconsommation de combustible, une augmentation de la température des fumées au niveau de la cheminée.

L'expérience [34] a montré qu'il est nécessaire de maintenir à une valeur convenable [34] les caractéristiques chimiques de l'eau des différents circuits afin d'éviter :

- La corrosion définie comme étant l'ensemble des processus destructifs que subit un corps solide sous l'action de certains paramètres extérieurs (agent atmosphérique ou produit chimique).
- L'entartrage ou dépôt qui est localisé directement sur les parois externes des tubes de la chaudière. Le tartre joue le rôle d'un isolant thermique au transfert de chaleur. La chaleur s'accumule dans la paroi ce qui engendre des points chauds [36].

La figure II.13, illustre l'explosion de la chaudière Clark-Chapman type-D du complexe de GNL du Skikda, qui a eu lieu le 20/01/2004 à 18 :40, et dont les conséquences dramatiques ont été 27 morts et de nombreux blessés. La chaudière a été complètement détruite et fondue.

La chaudière détruite a été remplacée par la chaudière ABB ALSTOM de même puissance (374 t/h) que nous avons présenté dans ce chapitre et fera l'objet de notre travail.

Avant d'aborder la modélisation de cette chaudière (objet de quatrième chapitre), le lecteur trouvera une présentation du code utilisé dans le chapitre suivant.



Figure II.13: Explosion de la chaudière Clark Chapman à Skikda.

Chapitre III

Présentation du code

Relap5/Mod3.2

PRESENTATION DU CODE RELAP5/MOD3.2

III.1. INTRODUCTION

RELAP5 a été développé à Idaho National Engineering Laboratory (INEL) à la demande de la commission de normalisation nucléaire des Etats-Unis (NRC) [37]. Il est principalement destiné à l'analyse des transitoires du réacteur à eau légère (LWR), cependant, la généralisation du code RELAP5 a permis son application aux champs nucléaire et non-nucléaire, aux types de réacteurs horizontal et vertical, et au réacteurs à eau lourde et légère [37,41]. Il a été conçu pour la simulation du comportement thermohydraulique des installations lors des transitoires accidentels ou incidentels. RELAP5 est basé sur un modèle hydrodynamique non homogène et non équilibré pour le système diphasique. Il résout l'équation instable et unidimensionnelle de masse, d'énergie et de quantité de mouvement pour chaque phase en utilisant la méthode numérique semi-implicite des différences finies [39,41]. La série des codes RELAP dérivé par RELAPSE (Reactor Leak And Power Safety Excursion), qui a été libéré en 1966. Les versions précédentes du code RELAP sont RELAP2, RELAP3, où le nom RELAPSE a été changé en RELAP (Reactor Excursion and Leak Analysis Program). Toutes ces versions sont basées sur un modèle homogène équilibré (HEM : Homogeneous Equilibrium Model) pour l'écoulement diphasique [37]. Le développement d'un modèle de déséquilibre non-homogène, a été entrepris pour RELAP4. En 1976, et au Centre National des Logiciels d'Energie (NESC), la dernière version (RELAP4/MOD7) de cette série du code a été libérée. Il est devenu évident qu'une réécriture totale du code a été exigée pour accomplir efficacement ce but. Le résultat de cet effort était le commencement du projet RELAP5 [37].

Le code RELAP dans toutes ses versions, a constitué un champ ouvert dans son développement par tous les utilisateurs possédant la licence d'utilisation, il a fait l'objet de plusieurs versions et modes. La version récente RELAP5/MOD3 est issue des différents travaux de développement effectués sur la série des versions précédentes [40], elle a été développée conjointement par l'INEL et plusieurs pays membres de ICAP (International Code Assessment and Application Program) et de CAMP (Code Application and Maintenance Program). En outre, des améliorations ont été apportées à la nouvelle version RELAP5/MOD3 grâce aux résultats de plusieurs expériences tels que LOFT (Loss Of Flow Transient) [38].

III.2. RELAP5/MOD3

RELAP5/MOD3 est la troisième version majeure du code système thermohydraulique RELAP5 qui a été réalisé en 1985. Elle est écrite en FORTRAN 77 pour une variété d'ordinateurs 64-bits et de 32-bits [37]. Il demeure une version réaliste 'best estimate' pour la simulation des comportements thermohydrauliques, stationnaire et transitoire des réacteurs refroidis à l'eau légère ou à l'eau lourde dans divers situations, telles que [39, 37, 41] :

- ✓ Perte du fluide dans le circuit primaire LOCA (Loss Of Coolant Accident).
- ✓ Perte de puissance (insertion de réactivité).
- ✓ Perte d'eau d'alimentation (loss of feedwater).
- ✓ Perte d'alimentation dans le circuit secondaire.
- ✓ Transitoires induits par un arrêt de pompe (s) dans le circuit primaire.
- ✓ Transitoires accidentels et incidentels divers.

Le code RELAP5/MOD3 inclut plusieurs modèles de composants génériques tels que, pompe, turbine, séparateur, accumulateur, pipe, cinétique ponctuelle des réacteurs, chauffage électrique, structure de chaleur, et composants du système de contrôle [37].

La dernière version du code RELAP5 (RELAP-3D), permet de simuler des phénomènes thermohydrauliques et neutroniques à trois dimensions.

III.3. STRUCTURE DU CODE RELAP5

RELAP5 est conçu d'une façon modulaire, utilisant une structure ordonnée. Les procédures et les modèles sont séparés en sous programmes et constituent la base de traitement thermique, hydraulique et neutronique. La première structure comporte les blocs suivants [37,39] (figure III.1):

- Introduction des données (INPUT)
- Etat stationnaire (SSTCTL)
- Etat transitoire (TRNCTL)
- Enregistrement des résultats générés du bloc stationnaire ou transitoire (PLOTMOD)
- Extraction des données de simulation du PLOT-RESTART pour d'autres programmes de calcul (STRIP)

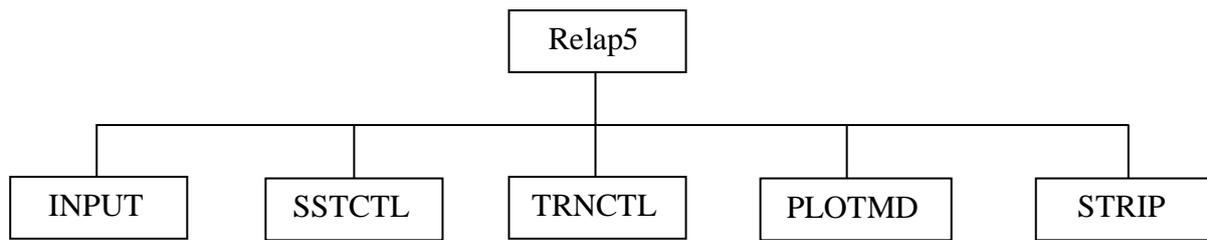


Figure III.1: Structure du code RELAP5.

Le bloc d'introduction des données INPUT vérifie les données d'entrée et prépare les blocs de données pour toutes les options programmées. Le bloc état stationnaire SSTCTL détermine les conditions de l'état stationnaire d'un problème. Cet état est obtenu par l'exécution d'un transitoire accéléré jusqu'à l'annulation des dérivées par rapport au temps. Le bloc transitoire TRNCTL achève la solution et résout la phase du transitoire [37,39]. Le bloc STRIP extrait les données de simulation à partir d'un dossier de restart pour passer des résultats de simulation du code RELAP5 à un autre programme de computer [37].

III.3.1. Etat stationnaire

Une option introduite permet de performer les différents calculs reliés à l'état stationnaire, en utilisant les algorithmes suivants :

- Algorithme pour la cinétique
- Algorithme pour le système de contrôle
- Algorithme pour le transitoire hydrodynamique
- Algorithme pour le transitoire thermique

Les paramètres tels que, la pression, les débits et les densités s'ajusteraient rapidement, mais les effets thermiques évoluent plus lentement. La technique transitoire accélérée est donc employée pour réduire le temps de calcul transitoire requis pour atteindre l'état stationnaire. La conduction thermique est accélérée artificiellement en réduisant la capacité thermique des structures métalliques.

III.3.2. Etat transitoire

Le calcul transitoire est caractérisé par la variation temporelle d'une ou plusieurs variables liées au problème étudié. Généralement, le régime transitoire doit être précédé par un état stationnaire bien établi dans lequel les conditions initiales de l'accident simulé sont achevées.

L'introduction des valeurs initiales est nécessaire pour l'exécution d'un problème soit à l'état stationnaire ou à l'état transitoire. Ces valeurs sont fournies par l'utilisateur dans l'input pour chaque composant [37].

Les conditions aux limites sont simulées par:

- Des volumes infinis (TMDPVOL) pour imposer les conditions thermodynamiques.
- Des jonctions infinies (TMDPJUN) pour imposer les débits ou les faire varier en fonction du temps ou d'autres variables.
- Les actions conditionnées peuvent être simulées par des signaux variables ou logiques (tripes).

La variation des conditions aux limites peut être simulée par des tables ou des variables de contrôle conditionnées par des signaux.

La figure III.2 montre la structure modulaire de calcul transitoire dans le code RELAP5.

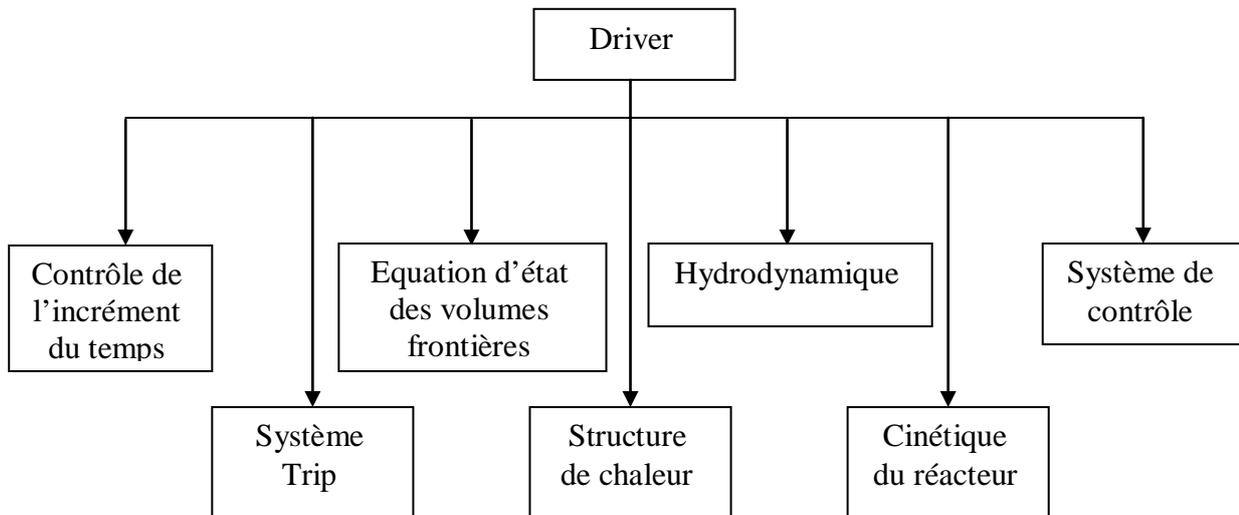


Figure III.2 : Structure modulaire de calcul transitoire dans le code RELAP5.

III.3.3. Option RESTART

L'option RESTART permet le relancement d'un transitoire au temps où celui-ci est terminé (arrêté) après une première exécution, et permet par conséquent d'exécuter le même problème après une première exécution.

III.4. MODELISATION HYDRODYNAMIQUE DU CODE RELAP5/MOD3.2

Des modèles de composants sont introduits dans le code RELAP5/MOD3.2 pour la modélisation de plusieurs systèmes et phénomènes physiques. Ces composants incluent les pompes, les vannes, les conduits (pipe et annulu), les structures métalliques, la cinétique des réacteurs, les accumulateurs, les turbines, et les systèmes de contrôle. D'autres modèles à processus spéciaux sont introduits pour les différentes formes de perte, les écoulements dans les conduites à surfaces variables, les branches, les étouffements.

Deux modèles de composants, le volume infini TMDPVOL et la jonction infinie TMDPJUN sont utilisés pour simuler des volumes à une jonction ou sans jonction, ainsi :

1. Le volume infini TMDPVOL peut être utilisé pour fixer ou imposer les conditions hydrodynamiques, le sens d'écoulement et la pression du système. Il permet aussi l'introduction des quantités scalaires dépendantes du temps en introduisant des variables de contrôle conditionnées par un signal en fonction des conditions imposées.
2. La jonction infinie TMDPJUN permet d'imposer un débit dépendant du temps ou d'une variable de contrôle conditionnée par un signal. Chaque jonction infinie doit être reliée à un volume infini pour fixer les conditions hydrodynamiques.

III.4.1. Description des composants de base du code RELAP5/MOD3.2

La programmation des différents calculs hydrodynamiques est basée sur un concept de volumes et de jonctions. La simulation d'un système consiste à découper ce dernier en composants connectés par des jonctions d'écoulement, ceci pour convenance d'INPUT, ou pour spécifier un processus spécial.

Il y a plusieurs types de composants pour le code, dont:

III.4.1.1. les volumes

➤ Volume singulier (SNGLVOL,)

C'est un système composé d'un seul volume. Il peut être considéré comme composant pipe (tube) à un seul volume. Il peut être relié à un ou deux volumes de contrôle par le biais d'une ou de deux jonctions. De même, il peut être mis en contact d'une ou plusieurs structures de chaleur échangeant ainsi avec eux de la chaleur.

➤ **Volume infini (TMDPVOL, )**

C'est un volume de dimension infinie où les paramètres thermodynamiques du fluide ne varient pas en fonction du temps. Il est utilisé pour simuler l'atmosphère, fixer la pression dans un composant, le sens d'écoulement, la température du liquide et de vapeur, le taux de vide, etc.

➤ **Interconnections (BRUNCH, )**

Ils sont introduits pour la modélisation des réseaux de conduites interconnectées. Ce modèle est basé sur l'écoulement unidimensionnel, adéquat à plusieurs types de branchement, et d'écoulement de mélange pour tenir compte des effets dus à la quantité de mouvement et à la gravité dans diverses situations de branchement. Le nombre de jonctions associées au composant BRUNCH est limité à 9 jonctions.

➤ **Séparateur**

C'est un volume de contrôle utilisé pour modéliser un séparateur de phase liquide-vapeur possédant une jonction d'entrée liquide-vapeur et deux jonctions de sortie, l'une liquide et l'autre vapeur.

➤ **Pipe et Annulus (PIPE, )**

Ce sont deux systèmes identiques composés d'une série de volumes de contrôle dont le nombre NV ne doit pas dépasser 100 connectés par NV-1 jonctions. Ils sont utilisés pour représenter une conduite verticale, horizontale ou inclinée. La seule différence entre le pipe est l'annulus se résume dans le type de carte du régime d'écoulement introduite pour les deux composants.

➤ **Pompe (PUMP, )**

Le composant pompe est utilisé pour modéliser une pompe. Il est composé d'un volume de contrôle hydrodynamique et de deux jonctions, l'une d'aspiration et l'autre de refoulement. Le modèle hydrodynamique de la pompe se traduit par une source d'énergie cinétique qui produit une différence de pression entre l'amont et l'aval de la pompe correspondant à une hauteur manométrique spécifique à la pompe. Cette hauteur est calculée à partir d'un ensemble de courbes caractéristique en tenant compte des conditions d'écoulement calculées.

➤ **Turbine (TURBIN)**

Le composant Turbine est une branche spécialisée qui tient compte de l'extraction. Une turbine simple peut être modélisée en utilisant le composant de la turbine, et plusieurs turbines peuvent être modélisées par l'utilisation d'une combinaison de série de composants de la turbine. Chaque composant de la turbine peut définir deux jonctions, une la jonction d'admission et l'autre une

jonction d'extraction de la vapeur. Le composant TURBINE nécessite des données d'entrée additionnelles pour définir les paramètres géométriques et mécaniques de la partie tournante.

III.4.1.2. Les jonctions

➤ **Jonction singulière (SNGLJUN, —→)**

C'est la jonction qui relie les volumes de contrôle entre eux. La jonction détermine également l'orientation du volume de contrôle, la vitesse d'écoulement ou le débit. Un volume de contrôle sans jonction est considéré comme fermé.

➤ **Jonction infinie (TMDPJUN, —→)**

C'est une jonction de dimension infinie permettant d'imposer un débit dépendant du temps ou d'une variable de contrôle conditionnée par un signal comme pour le cas d'un système d'injection d'eau sous certaines conditions. Chaque TMDPJUN doit être reliée à un TMDPVOL pour fixer les conditions hydrodynamiques.

III.4.1.3. Les vannes (VALVE,)

Ce sont des modèles quasi stationnaires utilisés pour spécifier une option dans un modèle du système, ou simuler des mécanismes de contrôle d'un système hydrodynamique. Elles sont composées d'un volume de contrôle et de deux jonctions. Les modèles introduits dans le code peuvent être classés en deux catégories :

- Modèle de vannes à fermeture ou ouverture instantanées:

Cette catégorie sont des vannes conditionnées par un signal (TRIP VALVE), et des vannes de contrôle (CHEK VALVE). Ces vannes doivent être ouvertes ou fermées. La position de la vanne prend la valeur 0 ou 1 pour indiquer respectivement la fermeture ou l'ouverture de celle-ci. L'inertie et les effets de la quantité de mouvement ne sont pas considérés pour ces deux types de vannes. Le modèle de changement brusque de surface est employé pour le calcul des facteurs de perte cinétique, si la vanne est utilisée comme jonction à ouverture brusque.

- Modèle de vannes à fermeture ou ouverture graduelles:

Les vannes de cette catégorie sont des vannes motorisées (MOTOR VALVE), des vannes de régulation (SERVO VALVE), et des clapets anti-retour (INERTIAL VALVE). Pour ces types de vannes, des équations différentielles sont utilisées pour le contrôle de leur

fonctionnement. Des options sont introduites utilisant le modèle de changement de surface brusque pour le calcul des pertes à travers ce type de vannes.

❖ Trip Valve

Ce type de vanne est utilisé dans la simulation des soupapes de sécurité, vanne d'isolement, ou bien une action pour initier un accident tel que la rupture d'un tube. Le composant TripValve est employé quand l'état de la vanne est actionné par un signal TRIP. Si le trip est vrai, la vanne est totalement ouverte, et si le trip est faux, la vanne se ferme instantanément. La condition qui définit le trip peut être une variable de temps, de pression, de température, de débit. ect.

❖ Inertial Valve

Ce composant permet la simulation de la réponse détaillée de la partie mobile d'un clapet en se basant sur les forces hydrodynamiques appliquées sur l'obturateur du clapet et la gravitation.

❖ Servo Valve

C'est le modèle le plus flexible dans le code RELAP5. Sa section normale d'écoulement est égale à la valeur courante d'une variable de contrôle. Dans ce cas, la position de la vanne est donnée par une variable de contrôle qui elle même peut être calculée au cours de l'exécution du problème. En effet, une chaîne de régulation peut être introduite par des variables de contrôle pour commander la position de la vanne.

❖ Check Valve

C'est un clapet anti-retour, utilisé pour empêcher le retour de l'écoulement. L'ouverture ou la fermeture du clapet sont conditionnées respectivement par la différence de pression entre l'amont et l'aval de la vanne. Si cette différence est positive, la vanne est ouverte et reste ainsi jusqu'au moment où la différence devient négative.

❖ Motor Valve

Ce composant est utilisé pour simuler la variation de la section d'une vanne motorisée dans un intervalle de temps bien défini en fonction de la vitesse du moteur choisie. Une réponse non linéaire de la section de la vanne reste possible par l'utilisation d'une table. Le sens de variation de la vanne est conditionné par deux trips, un, actionnant l'ouverture et l'autre la fermeture.

III.4.1.4. L'accumulateur (ACCUM)

Le modèle d'accumulateur inclus dans le code RELAP5/Mod3.2 comprend des relations entre l'hydrodynamique, le transfert de chaleur entre la paroi et l'eau, la condensation de la vapeur au

dôme de l'accumulateur, ainsi que la vaporisation de la surface d'eau vers le sommet de l'accumulateur.

III.4.1.5. Le pressuriseur

Le code ne possède pas un modèle spécifique pour ce composant, mais il est décomposé en volumes, jonctions, structure métallique et source de chaleur.

III.4.2. Les caractéristiques communes des composants

Chaque composant doit être défini au minimum par deux des trois quantités, la longueur du volume, la surface d'écoulement et le volume. Les techniques numériques utilisées pour le calcul hydrodynamique exigent l'égalité du volume au produit de la surface d'écoulement par la longueur du volume, cette condition est satisfaite pour les volumes à surface constante, et pose certaines difficultés de calcul pour les volumes présentant certaines irrégularités de forme. Il est donc recommandé d'introduire des volumes exacts en considérant une surface moyennée sur la longueur du volume, tel que ce dernier soit égal au produit de la surface par la longueur. L'orientation du volume doit être donnée en introduisant l'angle d'inclinaison du volume par rapport à la verticale. La direction de l'écoulement est donnée par le signe de la vitesse du fluide ou du débit.

L'élévation d'un tube droit est reliée à la longueur du volume et à l'angle d'inclinaison par rapport à la verticale. Elle doit être égale ou inférieure à la longueur du volume. Les données reliées au changement d'élévation servent à déterminer la charge du système étudié. Pour un système hydrodynamique constitué d'une ou plusieurs boucles, la somme des élévations doit être nulle. La rugosité et le diamètre hydraulique sont à introduire pour chaque volume pour prendre en considération les effets de friction aux parois. Le code calcul le diamètre hydraulique si celui-ci n'est pas introduit, en utilisant la surface d'écoulement.

Un code est utilisé pour spécifier les jonctions de connections entre les volumes. Le code de connections est composé de 5 chiffres CCCXX, les trois premiers CCC représentent le numéro de composant, c'est-à-dire de la jonction considérées, le reste XX peut prendre deux valeurs 00 ou 01, utilisées pour indiquer respectivement l'entrée ou la sortie du composant. Les jonctions internes sont introduites automatiquement après l'introduction du nombre de volumes constituant le composant. L'inversion d'une jonction est suivie par l'inversion des quantités vectorielles qui lui sont associées, de même pour les vitesses dépendantes du temps pour le cas des jonctions infinies.

Deux volumes à deux surfaces d'écoulement différentes peuvent être connectés par une jonction de section différente aux deux volumes connectés. Deux options sont introduites pour tenir compte des effets de changement de surfaces sur l'écoulement à travers les trois régions, en amont, en aval de la section de la jonction et à travers la section même de la jonction. La première option est utilisée pour les changements de surfaces uniformes, la deuxième option est introduite pour tenir compte des pertes dues aux effets des orifices, d'expansion, et contractions brusques.

L'option de changement de surface est également utilisée pour les jonctions de vannes. Le rapport de surfaces varie en fonction de l'ouverture ou de la fermeture de la vanne. Le débit d'une phase au niveau de la jonction est égal au produit de la fraction de vide, de la densité, de la vitesse et de la surface d'écoulement au niveau de cette jonction. Pour les orifices et les vannes, la vitesse est maximale au niveau de la plus petite surface des deux volumes connectés. Cette vitesse est égale au produit de la surface de la jonction par le rapport de surfaces (surface minimale/surface de la jonction). Ce rapport est utilisé en cas de besoin du calcul de la vitesse au niveau de la surface minimale (cas d'un étouffement).

III.4.3. Les signaux (TRIP)

Les trips sont utilisés pour exécuter des actions telles que l'ouverture ou la fermeture d'une vanne, l'arrêt d'une pompe, le démarrage du chauffage, etc. l'état de trip peut être défini à partir des paramètres variables tels que le temps, la pression, la température, le débit ou toute variable de contrôle. Deux types de signaux sont introduits pour conditionner un système ou un composant, et utilisés fréquemment pour la simulation des systèmes de contrôle. Le premier étant les trips variables utilisés pour la comparaison de deux variables en utilisant les opérateurs =, ≠, <, >, ≤, ≥, l'autre, les trips logiques utilisés pour relier deux signaux variables par un des deux opérateurs ou, et.

III.4.4. Le système de contrôle (CNTRLVAR)

Le système de contrôle est constitué de plusieurs composants appelés composants de contrôle, chaque type de composant définit une variable de contrôle qui peut varier en fonction du temps, ou en fonction d'autres variables. Les variables de contrôle peuvent être reliées aux volumes hydrodynamiques, structure métalliques, jonctions, signaux, pompes, vannes, cinétique du réacteur, ou en fonction d'autres variables de contrôle définies précédemment. Les contrôles variables permettent d'effectuer toutes les opérations mathématiques de base telle que, la somme, division, multiplication, intégrale, dérivés... L'utilisation des variables de contrôle

permet également la modélisation des chaînes de régulation comme la régulation du niveau et de la température.

III.5. LE MODELE HYDRODYNAMIQUE DU CODE RELAP5

C'est un modèle d'écoulement unidimensionnel, transitoire, à deux-fluides eau/vapeur, et qui peut contenir les composants non condensables dans la phase de vapeur et/ou un composant soluble dans la phase de l'eau. Le modèle hydrodynamique du code RELAP5 contient plusieurs options pour appeler des modèles hydrodynamiques plus simples. Ceux-ci incluent l'écoulement homogène, l'équilibre thermique, et les modèles d'écoulement sans frottement, ces options peuvent être employées indépendamment ou en association. Les modèles homogènes et d'équilibre étaient inclus, principalement pour pouvoir comparer des résultats du code aux calculs à partir de codes plus anciens basés sur le modèle homogène d'équilibre. Les équations de mouvement de deux-fluides qui sont employées comme base pour le modèle hydrodynamique du code RELAP5 sont formulés en termes de volume et paramètres temporairement moyennés de l'écoulement.

Les phénomènes qui dépendent de gradients transversaux, tels que le frottement et le transfert thermique, sont formulés en termes de propriétés en bloc employant des formulations empiriques de coefficient de transfert. Dans les situations où les gradients transversaux ne peuvent pas être représentés sous la forme de coefficients empiriques de transfert, comme l'ébullition sous-saturée, des modèles additionnels sont utilisés et particulièrement développés pour des situations insolites.

III.5.1. Le système d'équations

Le modèle physique utilisé par le code RELAP5 est un modèle diphasique à déséquilibres thermique et mécanique, basé sur six équations, deux de continuité, deux de conservation de quantité de mouvement et deux d'énergie. Ce modèle décrit donc les déséquilibres thermiques et mécaniques de l'une des phases, la phase la moins présente, étant supposée à la saturation. Dans le modèle, seulement deux relations d'interphase ont été utilisées, le transfert de masse à l'interphase (vapeur-liquide) et le frottement interfacial.

III.5.1.1. Equation de continuité

$$\frac{\partial}{\partial t}(\alpha_g \rho_g) + \frac{1}{A} \frac{\partial}{\partial x}(\alpha_g \rho_g V_g A) = \Gamma_g \quad (\text{III.1})$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\alpha_f \rho_f) + \frac{1}{A} \frac{\partial}{\partial x}(\alpha_f \rho_f V_f A) = \Gamma_f \quad (\text{III.2})$$

Avec : $\Gamma_f = -\Gamma_g$

III.5.1.2. Equation de conservation de quantité de mouvement

- Phase liquide

$$\begin{aligned} & (\alpha_f \rho_f A) \frac{\partial V_f}{\partial t} + \frac{1}{2} (\alpha_f \rho_f A) \frac{\partial V_f^2}{\partial x} \\ & = -\alpha_f A \frac{\partial P}{\partial x} + \alpha_f \rho_f B_x A - (\alpha_f \rho_f A) FWG(V_f) + \Gamma_g A (V_{fl} - V_f) \\ & - (\alpha_f \rho_f A) FIG(V_f - V_g) - C \alpha_f \alpha_g \rho_m A \left[\frac{\partial (V_f - V_g)}{\partial t} + V_g \frac{\partial V_f}{\partial x} - V_f \frac{\partial V_g}{\partial x} \right] \end{aligned} \quad (\text{III.3})$$

- Phase vapeur

$$\begin{aligned} & (\alpha_g \rho_g A) \frac{\partial V_g}{\partial t} + \frac{1}{2} (\alpha_g \rho_g A) \frac{\partial V_g^2}{\partial x} \\ & = -\alpha_g A \frac{\partial P}{\partial x} + \alpha_g \rho_g B_x A - (\alpha_f \rho_f A) FWG(V_g) + \Gamma_g A (V_{gi} - V_g) \\ & - (\alpha_g \rho_g A) FIG(V_g - V_f) - C \alpha_g \alpha_f \rho_m A \left[\frac{\partial (V_g - V_f)}{\partial t} + V_f \frac{\partial V_g}{\partial x} - V_g \frac{\partial V_f}{\partial x} \right] \end{aligned} \quad (\text{III.4})$$

Les termes de force, dans le second membre des équations (III.3) et (III.4) à droite représentent respectivement, le gradient des forces de pression, de frottement à l'interphase, frictions aux points, transfert de la quantité de mouvement due au transfert de masse à l'interphase, trainée à l'interphase (drag force) et force due à la masse virtuelle.

La valeur de C (coefficient de la masse virtuelle) dépend du régime d'écoulement. C est considéré supérieur à 1/2 pour les écoulements diphasés ou en présence de bulles, et nul pour un écoulement stratifié ou séparé.

La vitesse d'apparition ou de disparition d'une phase est représentée par les deux vitesses V_{gi} et V_{fi} dans les termes de transfert de la quantité de mouvement à l'interphase.

FIG et FIF : coefficients de frottement à l'interphase.

V_f et V_g : vitesses des deux phases (liquide et vapeur).

FWG et FWF : coefficients de friction aux parois pour les deux phases (vapeur et liquide).

B_x : coefficient de frottement à l'interphase suivant la direction x.

α_g et α_f : fractions volumiques des phases liquide et vapeur.

ρ_g et ρ_f : densités phasiques (liquide/vapeur).

III.5.1.3. Equation de conservation d'énergie

- Phase liquide

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t} (\alpha_f \rho_f U_f) + \left(\frac{1}{A}\right) \frac{\partial}{\partial x} (\alpha_f \rho_f V_f U_f A) \\ = -P \frac{\partial \alpha_f}{\partial t} - \left(\frac{P}{A}\right) \frac{\partial}{\partial x} (\alpha_f V_f A) + Q_{wf} + Q_{if} + \Gamma_{ig} h_f^* - \Gamma_w h_f' + DISS_f \end{aligned} \quad (III.5)$$

- Phase vapeur

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t} (\alpha_g \rho_g U_g) + \left(\frac{1}{A}\right) \frac{\partial}{\partial x} (\alpha_g \rho_g V_g U_g A) \\ = -P \frac{\partial \alpha_g}{\partial t} - \left(\frac{P}{A}\right) \frac{\partial}{\partial x} (\alpha_g V_g A) + Q_{wg} + Q_{ig} + \Gamma_{ig} h_g^* - \Gamma_w h_g' + DISS_g \end{aligned} \quad (III.6)$$

h_g^* , h_f^* : Enthalpies phasiques associées au transfert de masse à l'interface liquide/vapeur.

h_g' et h_f' : Enthalpies phasiques associées au transfert de masse à l'interface paroi/fluide.

Q_{wg} et Q_{wf} : Quantités de chaleur transférées de la paroi vers les phases liquide et vapeur.

$DISS_f$ et $DISS_g$: Somme de l'effet de frottement aux parois et l'effet de pompage.

III.5.2. La relation constitutive

Le modèle de six équations utilise cinq variables d'état indépendantes (P , α_g , U_g , U_f , et X_n) en ajoutant une équation pour le gaz non condensable.

RELAP5 utilise des corrélations standards développées à partir de données expérimentales. Une seule relation constitutive ajoutée, est la friction de la paroi, des corrélations ont été adaptées pour ce cas.

En résumé, quatre relations constitutives ont été développées pour le modèle hydrodynamique du code RELAP5, le taux de génération de vapeur, les frottements à l'interphase, la friction aux parois, et le transfert de chaleur paroi/fluide. L'approche faite pour le développement de ces relations constitutives est inspirée de données et informations existantes.

Le modèle de génération de vapeur est basé sur les relations expérimentales de Moby-dick et les travaux de Jones [1,3]. Le modèle de frottement à l'interphase est basé sur des cartes de régimes d'écoulement existantes et des corrélations de frottement associés. Quatre types de cartes sont utilisés :

- Carte de régime d'écoulement vertical
- Carte de régime d'écoulement horizontal
- Carte de régime d'écoulement annulaire (Downcomer d'un PWR)
- Carte de régime d'écoulement du mélange (à grande vitesse), cas des pompes.

III.5.3. Le modèle de transfert de chaleur

Le code permet le calcul de la chaleur transférée à travers les parois solides délimitant le volume hydrodynamique. Les structures de chaleur sont des éléments solides générateurs de chaleur ou pas, mis en contact avec le volume fluide. Chaque structure de chaleur est définie par les indices des volumes de contrôle gauche et droit, le volume du solide, son épaisseur et le type du matériau.

La modélisation des structures métalliques inclut généralement les crayons combustibles et les plaques (source de chaleur électrique, ou nucléaire), le transfert de chaleur à travers les tubes du générateur de vapeur, le transfert de chaleur aux parois des conduites et des cuves dans le cas d'un réacteur. La distribution des températures dans les structures de chaleur est représentée par l'équation de conduction de chaleur sous une forme unidimensionnelle, exprimée en coordonnées sphériques, rectangulaires ou cylindriques. Des multiplicateurs de surface sont introduits pour le calcul des surfaces des structures métalliques à partir des surfaces unités. La conductivité thermique et la capacité calorifique peuvent être simulées par une série de valeurs tabulées en fonction de la température ou une fonction donnée.

La forme intégrale de l'équation de conduction de chaleur est donnée par l'équation:

$$\iiint_V \rho C_p(T, \bar{x}) \frac{\partial T}{\partial t}(\bar{x}, t) dV = \iint_S k(T, \bar{x}) \bar{\nabla} T(\bar{x}, t) \cdot d\bar{s} + \iiint_V S(\bar{x}, t) dV \quad (\text{III.7})$$

Les différences finies sont utilisées pour la résolution de l'équation de conduction de chaleur. La figure III.3 illustre la position des différents nœuds (mesh points) pour le calcul des températures. Chaque intervalle peut contenir des espacements différents entre nœuds, matériaux différents ou les deux à la fois. L'intervalle entre nœuds prend une direction axiale pour une structure rectangulaire, et une direction radiale pour une structure cylindrique ou sphérique. Les sources de chaleur dépendantes du temps peuvent être simulées par la cinétique du réacteur (source nucléaire), par une série de valeurs tabulaires en fonction du temps, ou par une variable de contrôle.

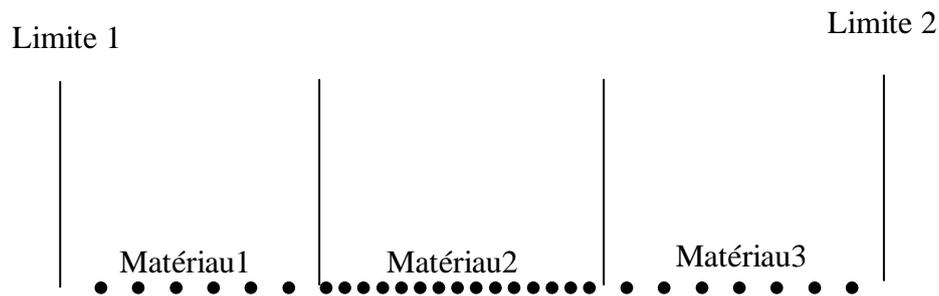


Figure III.3 : Schéma de discrétisation.

Le code permet l'introduction des différentes conditions aux limites telles que les conditions d'isolation et le calorifugeage des tubes, les tables de température des surfaces en fonction du temps, et les déperditions atmosphériques. Ces conditions aux limites peuvent être simulées de différentes manières, flux de chaleur imposé, température et coefficient de convection imposés.

Une série de corrélation de transfert de chaleur est utilisée pour le calcul du transfert de chaleur entre le fluide en circulation et les structures métalliques connectées aux volumes hydrodynamiques. Cette série couvre les différents modes de transfert de chaleur, convection, rayonnement, ébullition nucléée, ébullition transitoire, et ébullition par film.

Les courbes d'ébullition sont utilisées pour sélectionner les corrélations du transfert de chaleur. Les régimes de transfert de chaleur modélisés sont classifiés en régime d'ébullition nucléée (pré-CHF), point du flux thermique critique (CHF), et régime d'écoulement dispersé (post-CHF). Le transfert de chaleur à la condensation est aussi modélisé. Le régime pré-ébullition (pré-CHF) concerne la convection monophasique liquide, l'ébullition nucléée sous refroidie et l'ébullition nucléée à la saturation.

Les coefficients de transfert de chaleur utilisés sont des corrélations de Dittus-Boelter et Chen [37] pour les régimes, convection transitoire par film, l'ébullition par film, et la convection en phase.

Chapitre IV

Modélisation de la chaudière par le code

Relap5/Mod3.2

MODELISATION DE LA CHAUDIERE ABB ALSTOM PAR LE CODE RELAP5/MOD3.2

IV.1. INTRODUCTION

La connaissance de tous les composants et parties de l'installation ainsi que l'ensemble des phénomènes physiques qui peuvent se produire dans le système est indispensable pour la modélisation de toute installation thermique. Dans ce qui suit nous exposerons les principales étapes qui seront suivies pour la modélisation de la chaudière ABB ALSTOM par le code RELAP5, et qui sont :

- Préparation des données géométriques, thermohydrauliques et techniques qui décrivent l'ensemble de l'installation.
- Découpage et nodalisation du circuit hydrodynamique de l'installation en volumes de contrôle connectés par des jonctions d'écoulement.
- Modélisation du système de contrôle et de régulation.
- Simulation des conditions aux limites de l'installation, pression, température, débit, et flux de chaleur échangé aux niveaux des échangeurs et de la chambre de combustion.
- Validation et qualification des résultats théoriques obtenus par le code RELAP5 avec les données d'exploitation de la chaudière à l'état stationnaire.

La préparation des données pour accéder à ce type de travail en utilisant le code RELAP5, demande des efforts considérables du fait de la masse importante d'informations requise pour l'ensemble de l'installation et les composants qui lui sont associés, comme la collecte des données, les informations relatives à chaque élément de l'installation de la chaudière qui la compose. Le problème de l'éloignement constitue un élément très important et sérieux dans l'élaboration et l'exécution du travail dans le temps à savoir la distance de réalisation du projet et le lieu de la chaudière.

Pour pallier à certains problèmes rencontrés au cours de cette étude, à savoir le manque et l'absence des données représentatives dans le calcul, des efforts supplémentaires ont du être fournis.

La philosophie de l'utilisation du code RELAP5 consiste à subdiviser le système hydrodynamique en volumes de contrôle connectés par des jonctions d'écoulement. Le comportement thermique de la paroi métallique des tubes de la chaudière, tel que le transfert de chaleur avec le fluide, est modélisé par des structures de chaleur qui sont connectées aux tubes vaporisateurs et aux échangeurs de chaleur. Les densités de chaleur entre les gaz de combustion et les surfaces externes des tubes vaporisateurs sont calculées à partir du bilan énergétique effectué sur les fumées au niveau de chaque échangeur.

Les conditions thermohydrauliques à l'entrée et à la sortie de l'installation représentent le fluide condensé qui entre dans la bêche alimentaire, et la vapeur surchauffée allant vers la turbine. La régulation joue un rôle très important dans l'exploitation de la chaudière, le code RELAP5 nous donne la possibilité de modéliser les chaînes de régulation par des composantes propres au code.

La modélisation de la chaudière à l'aide du code RELAP5, sera suivie d'une qualification du modèle élaboré par le code.

IV.2. DECOUPAGE ET NODALISATION DE L'INSTALLATION

La chaudière ABB ALSTOM est composée principalement de trois parties, un générateur de vapeur, une ligne principale d'eau d'alimentation et une ligne principale de vapeur surchauffée. L'installation de toute la chaudière est modélisée en 582 volumes de contrôle, 591 jonctions et 142 structures de chaleur. Les conditions thermodynamiques aux limites du système sont imposées par des volumes infinis « Time-Dependent-Volume ». La figure IV.1 donne le schéma représentatif de la nodalisation de toute l'installation.

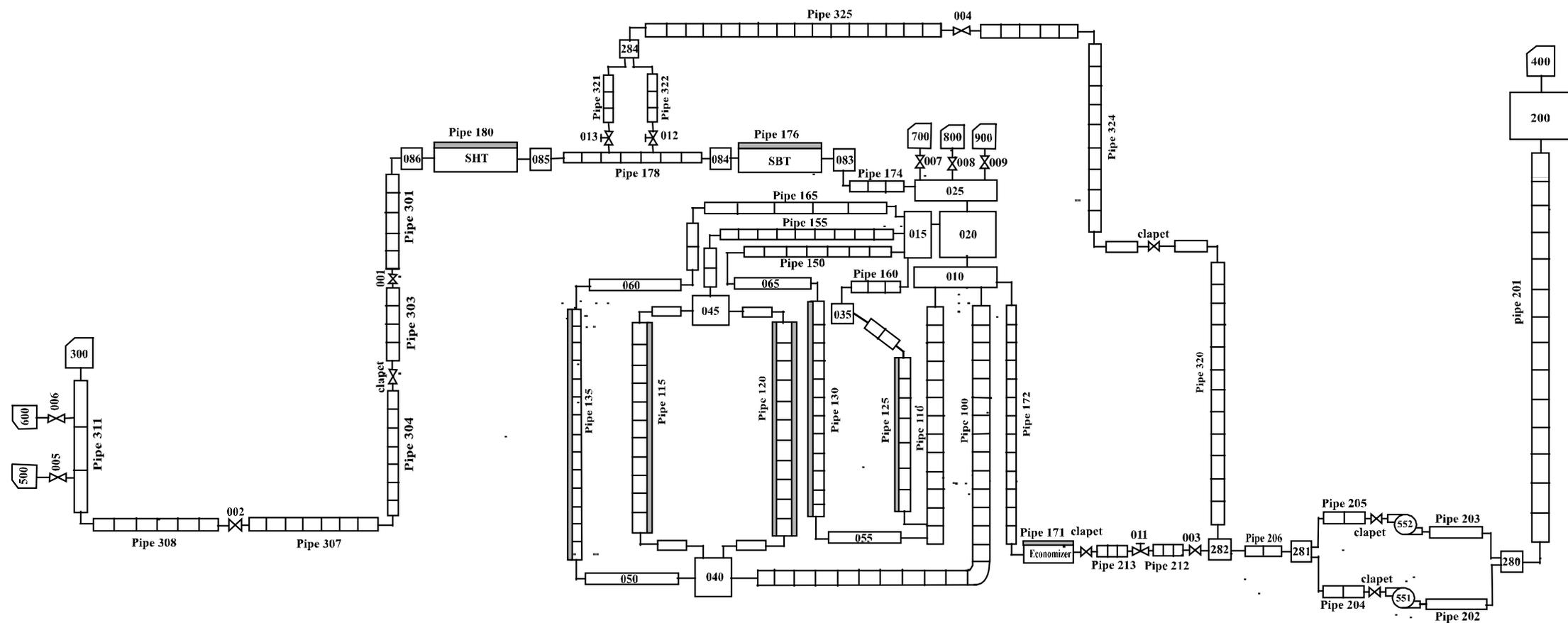


Figure IV.1 : Schéma de découpage pour la modélisation de la chaudière ABB ALSTOM.

IV.2.1. Nodalisation et découpage du générateur de vapeur

Le générateur de vapeur comporte un ballon, des collecteurs et des ensembles de tubes. Il est modélisé en 188 volumes de contrôle, en 191 jonctions et en 69 structures de chaleur. Le ballon, appelé aussi réservoir supérieur, est le siège de plusieurs phénomènes physiques tel que la séparation de l'eau et de la vapeur et la condensation de la vapeur. Il est par conséquent très important de suivre une certaine stratégie pour reproduire tous ces phénomènes. L'approche suivie pour modéliser ce réservoir est de le subdiviser en quatre composants « BRUNCH » : 010, 015, 020, et 025. Les collecteurs d'eau d'alimentation et d'émulsion eau/vapeur sont modélisés par dix composants « BRUNCH » : 030, 035, 040, 045, 050, 055, 060, 065, 070, et 075.

Les écrans tubulaires qui constituent le puit avant (chambre de combustion) et le puit arrière sont modélisés par le composant « PIPE ». Le pipe 100 représente les quatre tubes descente d'eau qui alimentent la chambre de combustion, et le pipe 110 est le tube descente d'eau centrale qui alimente le puit arrière. Les tubes de vaporisation des écrans avant et arrière de la chambre de combustion sont regroupés et modélisés par les composants pipes 115 et 120 respectivement, et pour les écrans latéraux par le pipe 135. L'écran latéral côté puit arrière est modélisé par le pipe 130. Les tubes vaporisateurs du puit arrière sont modélisés par le composant pipe 125. Les tubes qui alimentent le ballon supérieur par l'eau d'alimentation sortant de l'économiseur sont modélisés par les pipes 172 et 173. Les tubes d'émulsion eau/vapeur qui sortent des puits avant et arrière allant vers le réservoir sont modélisés par les pipes : 150, 155, 160 et 165. Les 20 tubes de la vapeur saturée qui sortent du ballon supérieur allant vers les surchauffeurs sont modélisés par le pipe 174.

Il y a trois soupapes de sûreté installées sur le réservoir (ballon). Elles sont modélisées par les composants « Trip-Valve » 007, 008 et 009 connectés respectivement par les composants « Time-Depent-Volume » 700, 800, et 900 pour imposer les conditions atmosphériques.

La figure IV.2 illustre le schéma de découpage du générateur de vapeur.

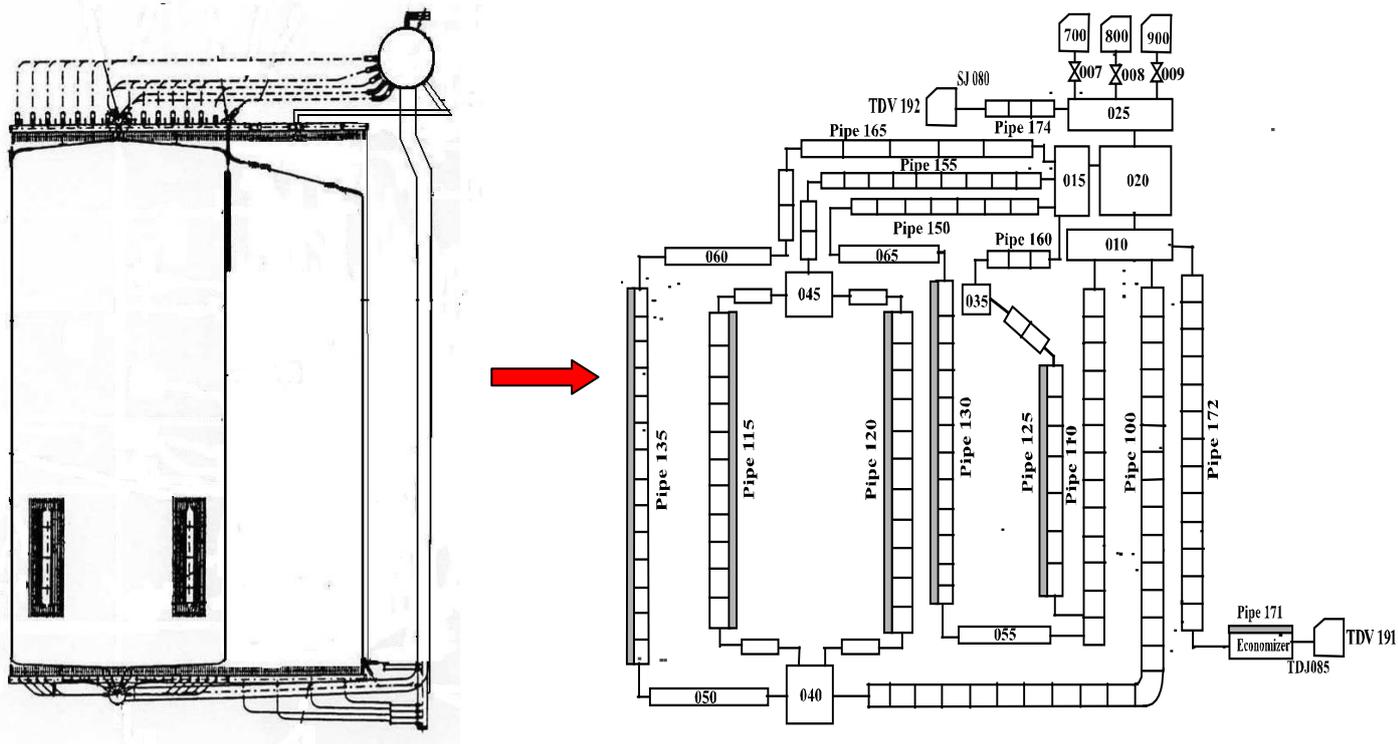


Figure IV.2 : Nodalisation du générateur de vapeur.

IV.2.2. Nodalisation des économiseurs et des surchauffeurs

La chaudière ABB ALSTOM contient cinq échangeurs de chaleur, trois économiseurs dont deux à tubes à ailettes et le troisième lisse, et deux surchauffeurs l'un à basse température et l'autre à haute température.

Ces trois économiseurs sont regroupés dans un seul tube (économiseur) modélisé par le composant pipe 171, avec 41 volumes de contrôle, 40 jonctions, et 20 structures de chaleur. Les collecteurs d'entrée et de sortie sont modélisés respectivement par les BRUNCH 070 et 075, (figure IV.3).

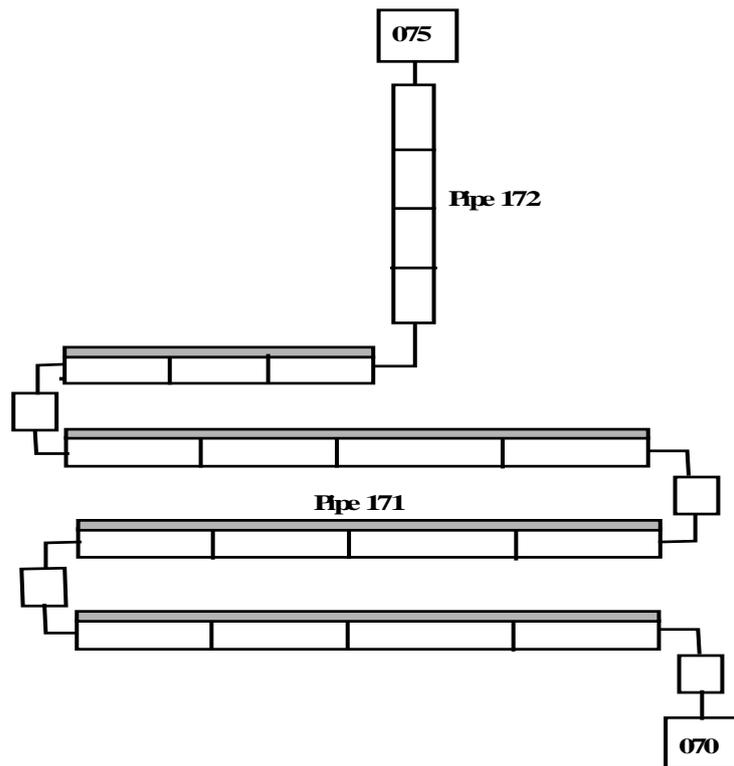


Figure IV.3 : Nodalisation et découpage de l'économiseur.

Les surchauffeurs à basse et à haute températures sont modélisés en utilisant 16 volumes de contrôle, 15 jonctions, et 20 structures de chaleur pour chaque surchauffeur. Le surchauffeur à basse température (SBT) est modélisé par le composant pipe 176, le surchauffeur à haute température (SHT) est modélisé par le composant pipe 180 (figure IV.4). Les collecteurs d'entrée et de sortie pour le SBT sont modélisés respectivement par les « BRUNCH » 083 et 084, et pour le SHT par « BRUNCH » 085 et 086. Le tube inter-surchauffeur est modélisé par le composant pipe 178.

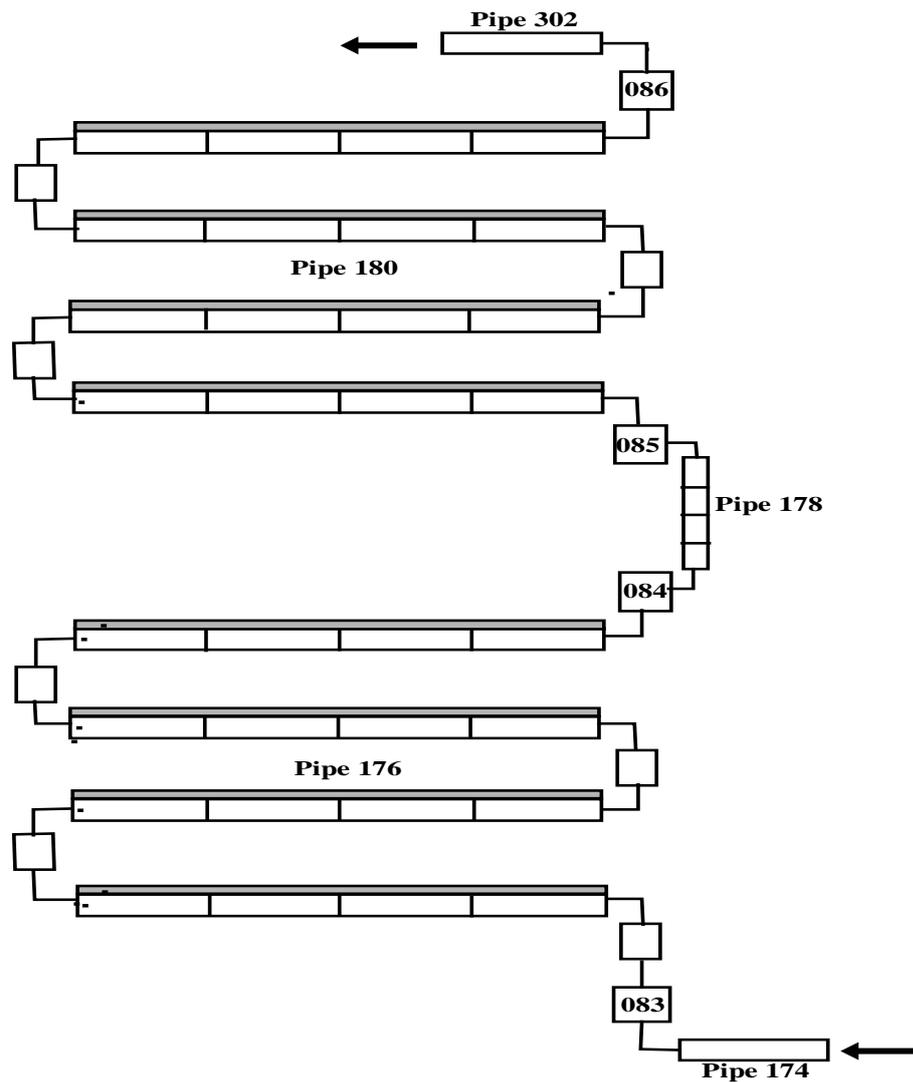


Figure IV.4 : Nodalisation et découpage des surchauffeurs.

IV.2.3. Nodalisation des lignes principales d'eau d'alimentation et de la vapeur surchauffée

❖ La ligne principale d'eau d'alimentation inclut la bêche alimentaire, les pompes d'alimentation, la tuyauterie principale, les vannes de régulation et d'isolement, et l'économiseur. Cette ligne est modélisée par 157 volumes de contrôle et 150 Jonctions. La bêche alimentaire est modélisée par le composant « BRUNCH » 200. Les deux pompes d'alimentation sont modélisées par le composant « PUMP » 151 et 152. Les conduites qui alimentent le générateur de vapeur par l'eau d'alimentation sont modélisés par les composants « PIPE » : 201, 202, 203, 204, 205, 206, 207, 208, 209, 210, 211, 212, 213, 214, 217, et 218 et les « BRUNCH » : 280, 281 et 282 (figure IV.1). Les clapets qui se trouvent au refoulement de la

pompe et à l'entrée de la chaudière ainsi qu'à la ligne de désurchauffe sont modélisées respectivement par les composants « Check-Valve » 215, 216, 219, et 323.

Le composant « Trip-Valve » 003 est utilisé pour simuler la vanne d'isolement qui se trouve juste avant l'entrée de l'économiseur. Les vannes de régulation du niveau dans le ballon sont modélisées par les composants « Servo-Valve » 010 et 011.

La ligne principale de la vapeur surchauffée est modélisée par les composants « PIPE » : 301, 302, 303, 304, 305, 306, 307, 308, 309, 310, et 311.

Les vannes d'isolement de la vapeur sont modélisées par les composants « Trip-valve » : 001 et 002. Les soupapes de sûreté installées sur la ligne principale de la vapeur sont modélisées par les composants « Tripe-Valve » : 005 et 006 connectés respectivement aux « TMDV » 500 et 600. Les vannes de régulation de température de la vapeur surchauffée sont modélisées par les composants « Servo-Valve » : 012 et 013, et le clapet est modélisé par le composant « Check-Valve » 391.

Le désurchauffe est une ligne de tuyauterie qui connecte la ligne principale d'eau d'alimentation et la ligne inter surchauffeurs (figure IV.1), à cet endroit, la régulation se fait par une injection d'eau d'alimentation, ce désurchauffeur est modélisée par les composants « Pipe » : 320, 321, 322, 324 et 325, et le « BRUNCH » 284. La vanne d'isolement qui se trouve sur la ligne de désurchauffe est modélisée par le composant « Trip-Valve » 004.

IV.3. MODELISATION DES STRUCTURES DE CHALEUR

Le comportement thermique des structures métalliques qui constituent la chaudière, à savoir, le transfert de chaleur avec le fluide dans les tubes, a été simulé par des structures de chaleur, qui sont incluses dans le modèle du code RELAP5/Mod3.2. Ces structures sont connectées aux tubes de la chaudière.

Les structures de chaleur dans la chambre de combustion sont reliées avec les pipes 115, 120, et 135. Pour le puit arrière, les structures de chaleur sont connectées avec les pipes 130 et 125. Concernant les échangeurs de chaleur ceux-ci sont connectés aux pipes, 171, 176, et 180 (figure IV.1).

Les densités de flux de chaleur échangées entre les gaz chauds de combustion et les surfaces externes des tubes sont imposées uniformes sur toute la longueur des tubes des parties citées précédemment. Des tables des densités de flux thermique en fonction du temps sont introduites

dans le modèle comme conditions aux limites, pour la simulation de l'échange radiatif dans la chambre de combustion, ainsi que l'échange convectif des fumées avec les surchauffeurs, les économiseurs, et les tubes de puit arrière.

❖ La puissance thermique échangée au niveau de la chambre de combustion est déduite à partir de la puissance totale de la combustion et de la somme des puissances échangées avec les échangeurs de chaleur. La puissance totale de combustion [30, 49, 50] est:

$$Q_{tot} = M_{fuel} PCI + M_{air} Cp_{air} T_{air} - M_{fum} Cp_{fum} T_{fum} \tag{IV.1}$$

M_{fuel} : Débit massique du combustible

PCI : Pouvoir calorifique inférieur du combustible

M_{air} : Débit massique d'air

M_{fum} : Débit massique des fumées

T_{air} : Température de l'air d'admission

T_{fum} : Température des fumées à la sortie de cheminée

Cp_{air} et Cp_{fum} respectivement les capacités calorifiques de l'air et des fumées

La puissance thermique échangée dans la chambre de combustion est déterminée par la relation [30]:

$$Q_{foyer} = Q_{tot} - (Q_{SHT} + Q_{SBT} + Q_{ECO}) \tag{IV.2}$$

Q_{SHT} , Q_{SBT} , et Q_{ECO} représentent respectivement les chaleurs transférées au surchauffeur à haute température, au surchauffeur à basse température, et à l'économiseur.

Pour déterminer les densités des flux thermiques pour chaque échangeur de chaleur, le bilan énergétique sur les fumées à l'entrée et à la sortie de chaque échangeur de chaleur est utilisé.



$$Q = M_{fumée} Cp_{fumée} (T_{out} - T_{inl}) \tag{IV.3}$$

En utilisant la surface d'échange thermique, les densités de flux thermiques sont obtenues par la relation : $q = Q/S$.

Le tableau IV.1 regroupe les paramètres techniques de la chaudière ABB ALSTOM utilisés pour le calcul des densités de flux de chaleur pour la modélisation de la chaudière par le code RELAP5/Mod3.2.

Tableau IV.1 Caractéristiques de fonctionnement de la chaudière.

<i>Paramètres techniques</i>	<i>Unité</i>	<i>Valeurs</i>
Débit de vapeur surchauffée	t/h	374
Débit de combustible	Nm ³ /h	45699
Débit d'air	Nm ³ /h	344800
Débit des fumées	Nm ³ /h	390499
Température de fumée entrée SHT	°C	1147
Température de fumée entrée SBT	°C	853
Température de fumée entrée ECO	°C	653
Température de fumée sortie ECO	°C	188
Densité de flux (chambre de combustion)	kW/m ²	162
Densité de flux au niveau du surchauffeur SHT	kW/m ²	60.539
Densité de flux au niveau du surchauffeur SBT	kW/m ²	34.97
Densité de flux au niveau de l'économiseur	kW/m ²	34.348

IV.4. MODELISATION DE LA REGULATION

La régulation joue un rôle incontournable dans le fonctionnement et la prévention des installations industrielles. Pour arriver à un fonctionnement assez stable et sûr d'un système énergétique, il est recommandé de recourir à une chaîne de régulation automatique, cette dernière sert à maintenir la stabilité du système pendant son fonctionnement normal et anormal [43].

La chaudière ABB ALSTOM est contrôlée pour fournir de la vapeur surchauffée à une température de 487 °C et une pression de 73 bars. Les systèmes de régulation dans l'installation comportent par conséquent la régulation de la température de vapeur surchauffée et le niveau

d'eau dans le ballon. Le code RELAP5/Mod3.2 contient deux composants pour modéliser et simuler les chaînes de régulation de la chaudière « Steamctl » et « Feedctl », se sont des régulateurs de type PI [44].

IV.4.1. Modélisation de la régulation du niveau

La carte « Feedctl » est utilisée pour modéliser la régulation du niveau d'eau d'alimentation dans le réservoir. Le but de cette régulation est de maintenir le niveau d'eau d'alimentation dans le ballon au niveau de consigne pour la charge de vapeur désirée. La carte « Feedctl » calcule le signal de position de la vanne de régulation d'eau d'alimentation qui est modélisée par le composant « Servo-Valve » 011 par le code RELAP5 (figure IV.1). En effet, la régulation règle le niveau d'eau dans le ballon par action sur la vanne principale d'alimentation en se basant sur trois éléments, le débit d'eau d'alimentation, le débit de la vapeur surchauffée et le niveau d'eau d'alimentation dans le ballon [44].

IV.4.2. Modélisation de la régulation de température de la vapeur surchauffée

Le but de cette régulation est de maintenir la valeur de la température de la vapeur surchauffée constante à la sortie de la chaudière. Cette régulation ce fait par l'injection d'eau de désurchauffe au niveau du collecteur entre les deux surchauffeurs (SHT et SBT). Il ya deux vannes de désurchauffe aux caractéristiques identiques.

La carte « Steamctl » est utilisée pour simuler la régulation de la température de la vapeur surchauffée. Les deux vannes de régulation sont modélisées par les composants « Servo-Valve » 012 et 013 (figure IV.1). Le régulateur adopté par le code RELAP5 compare la température moyenne de la vapeur à la sortie du surchauffeur à haute température à celle de consigne ($T=487^{\circ}\text{C}$), le signal généré est appliqué aux vannes 012 et 013.

IV.5. SIMULATION DE L'ETAT STATIONNAIRE

La simulation numérique permet une meilleure compréhension des phénomènes thermohydrauliques qui pourraient avoir lieu dans les installations industrielles. Ils sont d'un apport capital, particulièrement dans les situations accidentelles [46]. Le code RELAP5/Mod3.2 donne la possibilité de prévoir le comportement et la réponse thermohydraulique de la chaudière lors des fonctionnements normal et accidentel. Avant d'entamer l'analyse transitoire, il est indispensable de vérifier l'établissement de l'état stationnaire dans différents points de l'installation [30]. L'état stationnaire est atteint après exécution du code RELAP5/Mod3.2 pendant 5000 secondes. Pour la démonstration de l'établissement du régime stationnaire, nous avons sélectionné quelques paramètres de fonctionnement de la chaudière. Ces paramètres sont

les débits d'eau d'alimentation et de la vapeur surchauffée, la pression du ballon, les pressions de refoulement et d'aspiration de la pompe, la pression entrée chaudière, le niveau d'eau ainsi la température dans le ballon, et les températures aux niveaux des échangeurs de chaleur (ECO, SBT, SHT). L'évolution temporelle de ces paramètres est illustrée par la figure IV.5. L'analyse des courbes permet de remarquer sans ambiguïté que le régime est stationnaire et bel et bien établi, et les valeurs de consigne sont atteintes. Les oscillations observées pendant les 1500 premières secondes sur les différentes courbes de la figure IV.5 correspondent à la recherche des conditions de fonctionnement normal à partir des quantités introduites comme des conditions initiales.

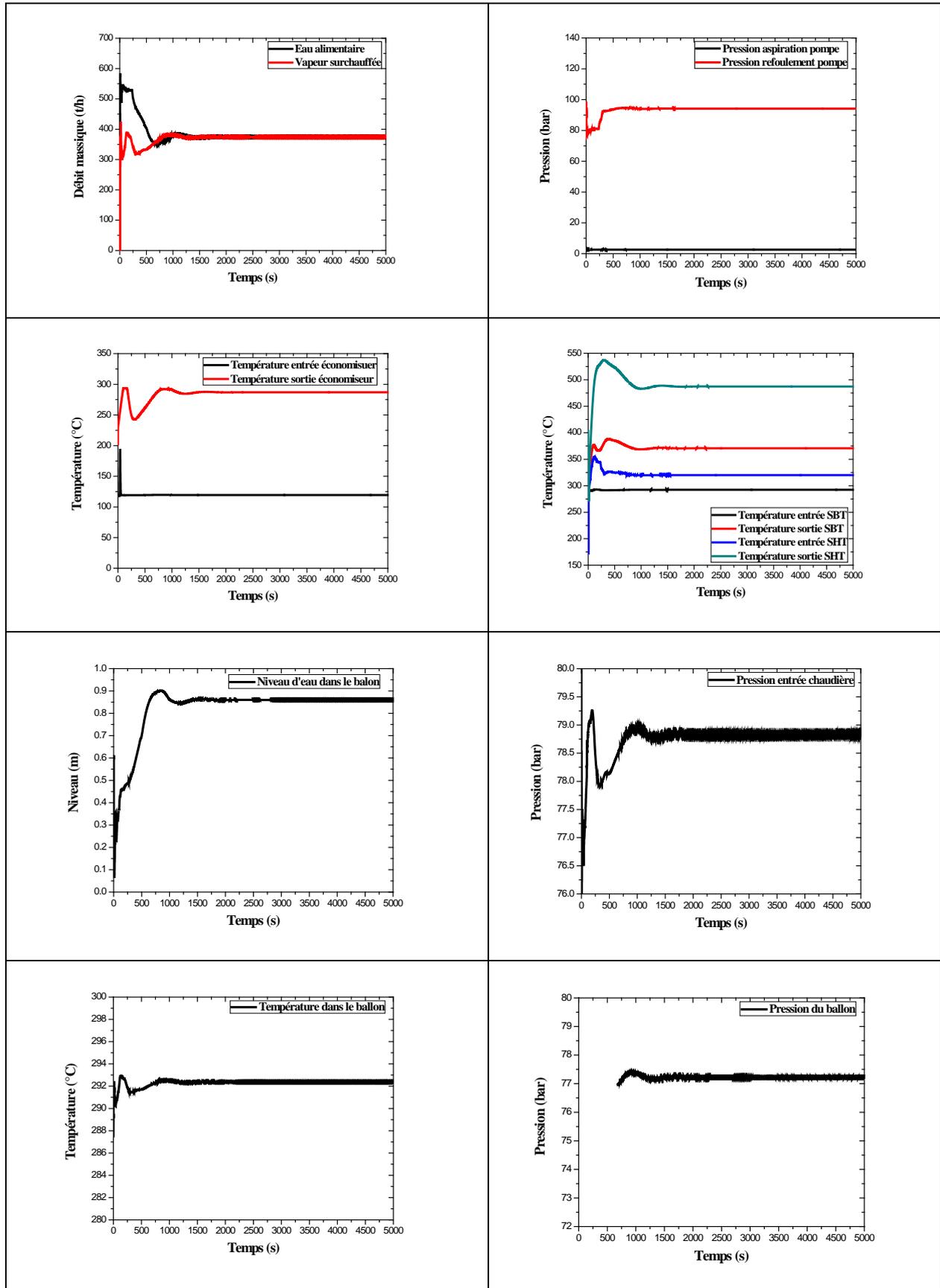


Figure IV.5 : Evolution temporelle des paramètres thermohydrauliques de la chaudière lors de l'état stationnaire.

Pour donner une idée au lecteur sur les données dans chaque composant de la chaudière, le tableau IV.2 regroupe quelques paramètres thermohydrauliques calculés par le code RELAP5 à l'état stationnaire.

Tableau IV.2 Paramètres thermohydrauliques obtenus par le code RELAP5 de la chaudière ABB ALSTOM.

<i>Paramètres thermohydrauliques</i>	<i>Unité</i>	<i>RELAP5</i>
<i>Ecran avant puit avant (pipe115)</i>		
• Débit massique	kg/s	190.650
• Température moyenne du fluide	°C	292.850
• *Température de la paroi interne	°C	295.815
• Taux de vapeur	%	47.270
• Pression moyenne	bar	78.230
<i>Ecran arrière puit avant (pipe120)</i>		
• Débit massique	kg/s	193.480
• Température moyenne du fluide	°C	292.700
• *Température de la paroi interne	°C	295.769
• Taux de vapeur	%	47.160
• Pression moyenne	bar	78.300
<i>Ecran arrière puit arrière (pipe125)</i>		
• Débit massique	kg/s	83.830
• Température moyenne du fluide	°C	292.680
• *Température de la paroi interne	°C	295.834
• Taux de vapeur	%	15.459
• Pression moyenne	bar	78.120
<i>Ecran latéral puit arrière (pipe130)</i>		
• Débit massique	kg/s	80.793
• Température moyenne du fluide	°C	292.400
• *Température de la paroi interne	°C	295.848
• Taux de vapeur	%	20.620
• Pression moyenne	bar	78.170
<i>Ecran latéral puit avant (pipe135)</i>		
• Débit massique	kg/s	371.050
• Température moyenne du fluide	°C	292.620
• *Température de la paroi interne	°C	302.850
• Taux de vapeur	%	40.395
• Pression moyenne	bar	78.120
<i>Pipe descente d'eau (downcomer pipe100)</i>		
• Débit massique	kg/s	756.010
• Température moyenne du fluide	°C	291.969
• Pression moyenne	bar	78.400

Pipe descente d'eau (downcomer pipe110)		
• Débit massique	kg/s	164.620
• Température moyenne du fluide	°C	291.960
• Pression moyenne	bar	78.200
Ballon supérieure (brunch 020)		
• Pression	Bar	77.200
• Température	°C	292.620
• Taux de vapeur	%	45.940

* Dernier volume du pipe

IV.6. QUALIFICATION

La qualification du modèle d'une installation a pour objectif de vérifier qu'il reproduit son comportement et ce de la manière la plus proche possible de la réalité. Une confrontation des résultats de simulation aux relevés expérimentaux nous renseigne sur la qualité de la nodalisation, de la sélection des options adéquates du code RELAP5/Mod3.2 et du bon choix des conditions initiales et aux limites [46].

La qualification du modèle élaboré par le code RELAP5/Mod3.2 de la chaudière ABB ALSTOM, est basée sur les données d'exploitation de la chaudière en marche stable. L'exécution du code RELAP5/Mod3.2 en régime transitoire nécessite une exécution préalable afin d'atteindre l'état stationnaire. Ce dernier est caractérisé par des conditions thermodynamiques d'eau et de vapeur en équilibre thermique. L'état stationnaire est atteint en exécutant le code RELAP5/Mod3.2 pendant 5000 secondes. Les résultats obtenus par la simulation sont confrontés aux données d'exploitation de la chaudière à l'état stationnaire. La comparaison des résultats du code RELAP5/Mod3.2 avec les relevés expérimentaux couvre plusieurs paramètres. Il s'agit des paramètres thermohydrauliques (température, débit massique et pression) mesurés au niveau du générateur de vapeur, des pompes et échangeurs de chaleur (surchauffeurs primaire et secondaire, et économiseurs).

Les principaux résultats obtenus par le code RELAP5/Mod3.2 ainsi que les relevés d'exploitation en régime stationnaire [22] sont regroupés dans le tableau IV.3.

La comparaison montre que les résultats de la simulation concordent avec satisfaction avec les données réelles d'exploitation de la chaudière.

Tableau IV.3 Comparaison entre les résultats théoriques du code RELAP5 et les données d'exploitation de la chaudière ABB ALSTOM.

<i>Paramètres techniques</i>	<i>Unité</i>	<i>Données</i>	<i>RELAP5</i>
Débit vapeur surchauffée	t/h	374.000	374.357
Débit d'eau d'alimentation	t/h	374.000	374.121
Débit d'eau de désurchauffe	t/h	25.000	26.043
Température de vapeur sortie ballon	°C	292.000	292.368
Température de vapeur entrée SBT	°C	292.000	292.316
Température de vapeur sortie SBT	°C	370.000	370.848
Température de vapeur entrée SHT	°C	322.000	320.141
Température de vapeur sortie SHT	°C	487.000	487.338
Température d'eau entrée ECO	°C	118.000	119.000
Température d'eau sortie ECO	°C	287.000	287.030
Niveau d'eau dans le ballon	mm	860.000	860.003
Pression à la bêche alimentaire	bar	1.890	1.890
Pression au ballon supérieur	bar	76.900	77.200
Pression entrée chaudière	bar	82.000	78.200
Pression sortie chaudière	bar	73.000	73.199
Pression d'aspiration de la pompe	bar	2.910	2.587
Pression de refoulement de la pompe	bar	91.930	94.150

IV.7. CONCLUSION

L'analyse des résultats de la simulation à l'état stationnaire montre un accord satisfaisant entre les résultats théoriques obtenus par le code RELAP5/Mod3.2 et les données d'exploitation de la chaudière radiante ABB ALSTOM, exprimant ainsi la capacité et la fiabilité du code RELAP5/Mod3.2 dans l'analyse thermohydraulique des installations industrielles.

Chapitre V

Simulation thermohydraulique des transitoires accidentels

SIMULATION THERMOHYDRAULIQUE DES TRANSITOIRES ACCIDENTELS

V.1. INTRODUCTION

De nos jours, l'utilisation de codes de calcul pour l'analyse de sûreté des installations thermiques, en particuliers les systèmes sous pression, est devenue incontournable. Ces codes systèmes dont les plus répandus sont RELAP5, TRAC, CATHARE, ATHLET et APROS [64, 65, 66, 67, 69] permettent de simuler le comportement global d'une installation (pompes, tuyauterie, échangeurs de chaleur, réservoirs, vannes, chaînes de contrôle,...) en fonctionnement normal et accidentel et de reproduire les phénomènes physiques pouvant y avoir lieu [53]. Ils sont principalement produits pour simuler le comportement des installations nucléaires mais ils peuvent également être utilisés pour étudier les fonctionnements normal ou accidentel des installations thermiques conventionnelles [27, 75].

Les scénarios accidentels traités dans ce chapitre sont l'arrêt de la pompe alimentaire et la fuite d'eau d'émulsion dans les tubes vaporisateurs. Les deux cas, sont simulés avec et sans l'intervention des mesures de sûreté et des actions de prévention.

L'objectif de cette simulation est d'analyser la réponse et le comportement thermohydraulique de la chaudière lors des transitoires accidentels par l'évolution de certains paramètres tels que les températures, les pressions, les débits, le coefficient de transfert de chaleur, le taux de vapeur, et le niveau d'eau dans le ballon et de montrer l'intérêt et le rôle de l'action de sûreté et du système de contrôle pour la protection et l'intégrité du générateur de vapeur en cas d'accident.

V.2. SIMULATION DES TRANSITOIRES ACCIDENTELS

Pour une chaudière, le manque d'eau d'alimentation est l'incident sans doute le plus sévère qui puisse survenir, du fait que le niveau d'eau dans le ballon diminue rapidement et les parois des tubes sont surchauffées. Cet accident peut être provoqué par un mauvais fonctionnement de l'alimentation en eau, une défaillance de la pompe d'eau alimentaire, ou de la commande automatique, une rupture dans un tube de la tuyauterie principale d'eau d'alimentation, un

blocage de la vanne principale d'alimentation par inadvertance ou encore par la défaillance de la régulation. Cet accident peut menacer l'intégrité structurale du système et provoquer l'explosion des parties sous pression de la chaudière [31].

Plusieurs paramètres peuvent produire une rupture dans les tubes vaporisateurs parmi lesquels la défaillance mécanique ou la corrosion des tubes. La transmission de la chaleur par ébullition nucléée doit être utilisée pour le refroidissement des tubes. Si ce refroidissement n'est pas assuré, la surface qui transmet la chaleur sera détériorée par fusion ou par une corrosion très rapide provoquée par la haute température ou par fluage qui engendre l'explosion des tubes.

Quand l'incident se produit, le ballon supérieur (réservoir) se vide rapidement et l'eau d'alimentation se trouve ainsi en contact direct avec les parois chaudes de celui-ci. Cette phase de l'accident entraîne des tensions dangereuses à cause du gradient thermique important entre l'eau d'alimentation et les parois du ballon.

V.2.1. Les conditions initiales des accidents

Avant d'entamer l'analyse du transitoire accidentel, il est nécessaire de vérifier l'établissement de l'état stationnaire dans différents points de l'installation. Chaque simulation du transitoire est précédée par une période d'état stationnaire égale à 3000 secondes (ce temps correspondant à la stabilité de toute l'installation). Les principaux paramètres de fonctionnement de la chaudière obtenus par le code RELAP5/Mod3.2 à l'état stationnaire sont comparés aux données expérimentales (relevés d'exploitation de la chaudière) (tableau IV.1).

Les principaux paramètres thermohydrauliques de la chaudière ABB ALSTOM lors des transitoires accidentels sont illustrées par les figures V.2 à V.18. L'intervalle de temps qui est compris entre -500 et 0.0 secondes correspond au régime stationnaire avant l'apparition de l'accident.

V.2.2. Simulation de la rupture des tubes vaporisateurs

Dans cette partie on s'intéresse à la simulation par le code RELAP5/MOD3.2 d'un accident d'une perte partielle d'eau d'émulsion dans les tubes de la zone de passage des fumées de la chambre de combustion vers le puit arrière. L'accident considéré est une rupture localisée au niveau de trois tubes de la chambre de combustion dont la valeur de la section totale équivalente de la brèche est de l'ordre de 21.482 cm^2 correspondant au diamètre de 52.3 mm.

La rupture est simulée par les composants de vanne « Trip-valve-666 », « Trip-valve-777 », et « Trip-valve-888 » conditionnée par un signal. Les TMDPVOL-601, 701, et 801 sont connectés aux vannes à l'endroit de la rupture pour imposer les conditions atmosphériques. La figure V.1 schématise les composants introduits pour la simulation du transitoire.

Nous avons simulé le scénario de la rupture de deux manières différentes. Il s'agit d'étudier le comportement de la chaudière dans les mêmes conditions, en actionnant le système de protection dans le premier cas et de l'omettre dans le second. Nous avons simulé le scénario protégé et le scénario non-protégé. Les hypothèses sur la chaleur d'inertie des gaz de combustion et l'écoulement d'air de ventilation sont prises en considération.

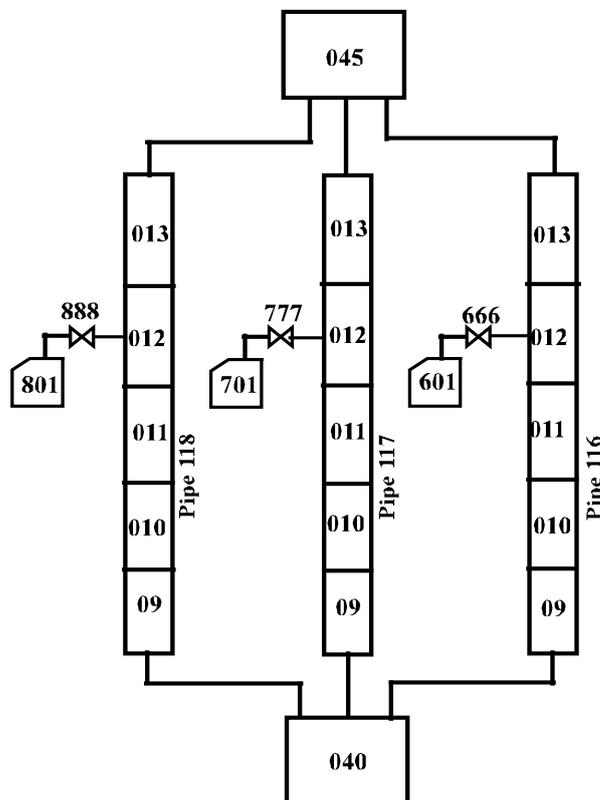


Figure V.1 Modélisation de la rupture.

Au temps 3000 secondes, un signal est généré pour actionner l'ouverture totale des Trip-valves introduites pour la simulation de la brèche. Ainsi, la section d'ouverture correspond à celle de la brèche. L'accident est détecté suite au déclenchement du signal d'alarme du niveau « très-très » bas (315 mm). Le déclenchement de l'arrêt de la chaudière s'effectue automatiquement suite à cette alarme. Les principaux événements du scénario accidentel sont regroupés dans le tableau V.1.

Tableau V.1 : Les principales séquences accidentelles du transitoire 1.

Instant d'occurrence	Séquence	
	Scénario protégé	Scénario non-protégé
De -500 à 0 s	Etat stationnaire	X
t = 0 s	Ouverture de la brèche	X
t niveau très-très bas	Arrêt des brûleurs	
t= 210 s	Arrêt de la pompe alimentaire	
t=1000 s	Fin du transitoire	

V.2.3. Simulation de l'arrêt de la pompe alimentaire

L'arrêt accidentel de la pompe alimentaire de la chaudière peut être provoqué par un mauvais fonctionnement de l'alimentation, la défaillance de la pompe d'eau alimentaire, la carence de la commande automatique, une chute de tension ou coupure de l'électricité [52]. L'accident étudié dans notre cas est l'arrêt instantané de la pompe alimentaire de la chaudière.

Le régime transitoire est initié lorsque la pompe d'alimentation est arrêtée accidentellement. L'arrêt des brûleurs est effectué immédiatement (ils seront coupés automatiquement si le niveau très bas de 315 mm est atteint) par l'annulation du flux de chaleur suite au déclenchement de l'alarme de l'arrêt de la pompe alimentaire. La chaleur d'inertie des gaz de combustion est également introduite, ainsi que le refroidissement des surfaces externes des tubes chauffés par l'écoulement d'air de ventilation. En premier lieu, on suppose que tous les systèmes de contrôle fonctionnent correctement pour atténuer les séquences de l'accident (scénario protégé). En second lieu, on suppose qu'il y a une défaillance dans le système de sûreté et de contrôle (scénario non-protégé). Le tableau V.2 regroupe les principaux événements décrivant le scénario accidentel en fonction du temps.

Tableau V.2 : Les principales séquences accidentelles du transitoire 2.

Instant d'occurrence	Séquence	
	Scénario protégé	Scénario non-protégé
De -500 à 0 s	Etat stationnaire	X
t = 0 s	Arrêt de la pompe alimentaire	X
t = 5s	Arrêt des brûleurs	
t = 100 s	Fermeture de la vanne d'isolement de la vapeur	
t=1000 s	Fin du transitoire	

V.3. RESULTATS ET DISCUSSION

V.3.1. Simulation de la fuite d'eau d'émulsion

Nous avons porté une attention particulière à l'évolution temporelle des principaux paramètres thermohydrauliques de la chaudière ABB ALSTOM. Les résultats obtenus par le code RELAP5/Mod3.2 relatifs à l'accident de la fuite dans les tubes vaporisateurs sont illustrés par les figures V.2 à V.11. Les courbes de ces figures décrivent le comportement et la réponse de la chaudière lors de cet accident.

L'évolution temporelle des débits massiques d'eau d'alimentation et de la vapeur surchauffée durant le transitoire est présentée par la figure V.2 qui permet de remarquer qu'à l'état stationnaire, les deux débits d'eau d'alimentation et de la vapeur surchauffée sont à la même valeur de 374 t/h. A l'instant $t = 155$ secondes, après l'ouverture de la brèche, il apparaît que le débit d'eau d'alimentation augmente jusqu'à la valeur de 492 t/h, résultant de l'ouverture de la vanne de régulation du niveau, en réponse à la chute du niveau d'eau dans le ballon (figure V.4). À l'instant $t = 210$ secondes, une chute du débit d'eau d'alimentation jusqu'à ce qu'il s'annule est observé, résultant de l'arrêt de la pompe alimentaire.

Par ailleurs et suite à la fuite, le débit de la vapeur subit une décroissance jusqu'à atteindre la valeur de 257.57 t/h à l'instant $t = 155$ secondes, puis il chute brutalement jusqu'à s'annuler, conséquence de l'arrêt des brûleurs.

Dans le cas du deuxième scénario (non-protégé), le débit d'eau d'alimentation augmente jusqu'à atteindre la valeur de 541 t/h à l'instant $t = 278$ secondes et le débit de la vapeur diminue quant à lui au bout de 368 secondes jusqu'à la valeur de 171 t/h. Par la suite les deux débits se stabilisent respectivement autour des valeurs de 514 t/h et 164 t/h, jusqu'à la fin du transitoire.

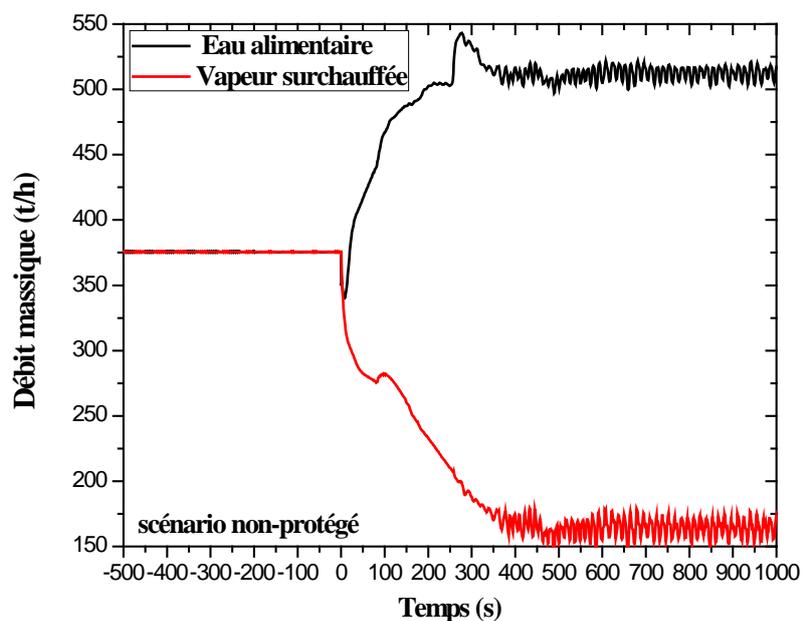
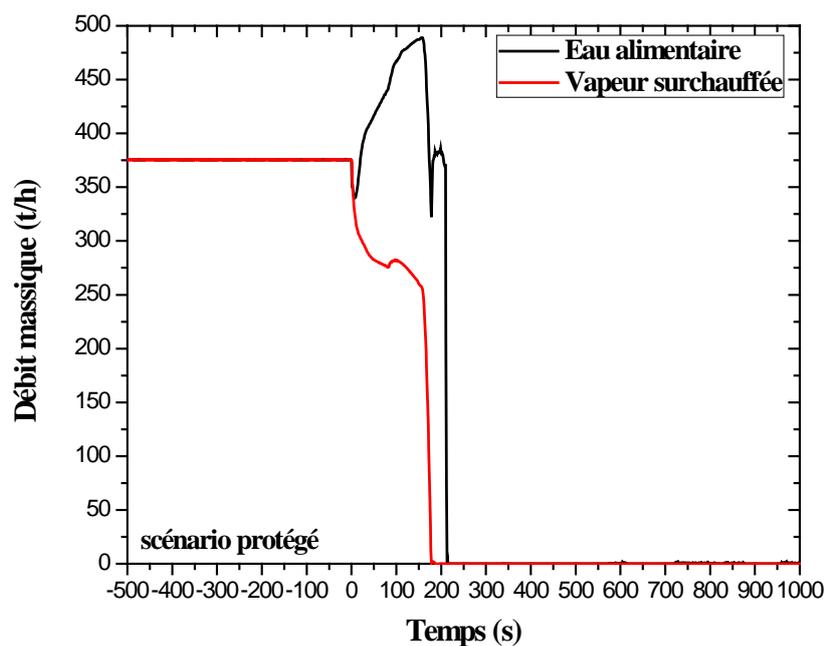


Figure V.2 Variation temporelle des débits de l'eau alimentaire et de la vapeur.

La figure V.3 met en évidence la variation temporelle de la pression dans le ballon supérieur de la chaudière. Dans le cas du scénario protégé, dès que la brèche se produit, il y a une fuite de vapeur et la pression dans le ballon décroît de 77.2 à 75.37 bars, valeur à laquelle elle reste jusqu'à $t = 155$ secondes, instant où les brûleurs s'arrêtent. Elle continue alors à diminuer jusqu'à atteindre la valeur 5 bars, vers la fin du transitoire.

Pour le scénario non-protégé, il est aisé de remarquer sur la figure V.3, que la diminution de la pression dans la chaudière n'est pas significative étant donné qu'elle chute de 77.2 à 73.8 bars tout au long des 346 secondes après l'apparition de l'accident et même jusqu'à la fin du transitoire. Ceci est dû en fait à l'apport suffisant d'énergie par les brûleurs dont le rôle est de maintenir une production en continu de la vapeur ce qui entraîne une pressurisation de la chaudière et donc une compensation de la chute de pression provoquée par la brèche.

Il faut noter que le niveau d'eau dans le ballon est un paramètre clé, puisqu'il indique la masse d'eau dans la chaudière. Ainsi, pour des raisons de sécurité il doit être gardé dans une gamme limitée [54]. Il est déterminé par deux facteurs, la somme totale des quantités d'eau et de vapeur dans la boucle (ballon, tubes vaporisateurs, tubes descentes d'eau (downcomer)) et la distribution de la vapeur dans la boucle [56,54]. Ces facteurs sont influencés par les conditions d'écoulement d'eau d'alimentation et de vapeur ainsi que par le taux de chauffage dans les tubes vaporisateurs. Cependant quand un changement soudain se produit dans ces conditions le niveau décroît rapidement (figure V.4). Le niveau d'eau dans le ballon initialement à 860 mm (état stationnaire) diminue pour atteindre sa valeur d'alarme de 315 mm après un temps de 155 secondes. A cet instant, les brûleurs s'arrêtent automatiquement et le niveau d'eau chute brusquement pour s'annuler au bout de 39 secondes et reste à cette valeur jusqu'à la fin du transitoire (scénario protégé).

Dans le cas du scénario non-protégé, l'apparition de la brèche entraîne une production intense de vapeur par la conjugaison de deux effets, chute de la pression et fonctionnement en continu des brûleurs. Bien que la pompe d'alimentation en eau de la chaudière travaille à sa capacité maximale elle n'arrive pas à compenser la quantité de vapeur produite, ce qui entraîne une chute de niveau d'eau dans la chaudière de sa valeur initiale de 860 mm à 162 mm durant les premières 256 secondes du transitoire. A partir de 450 secondes le niveau d'eau se stabilise à la valeur 4.9 mm suite à l'équilibre qui s'établit entre les débits d'eau d'alimentation et de vapeur produite.

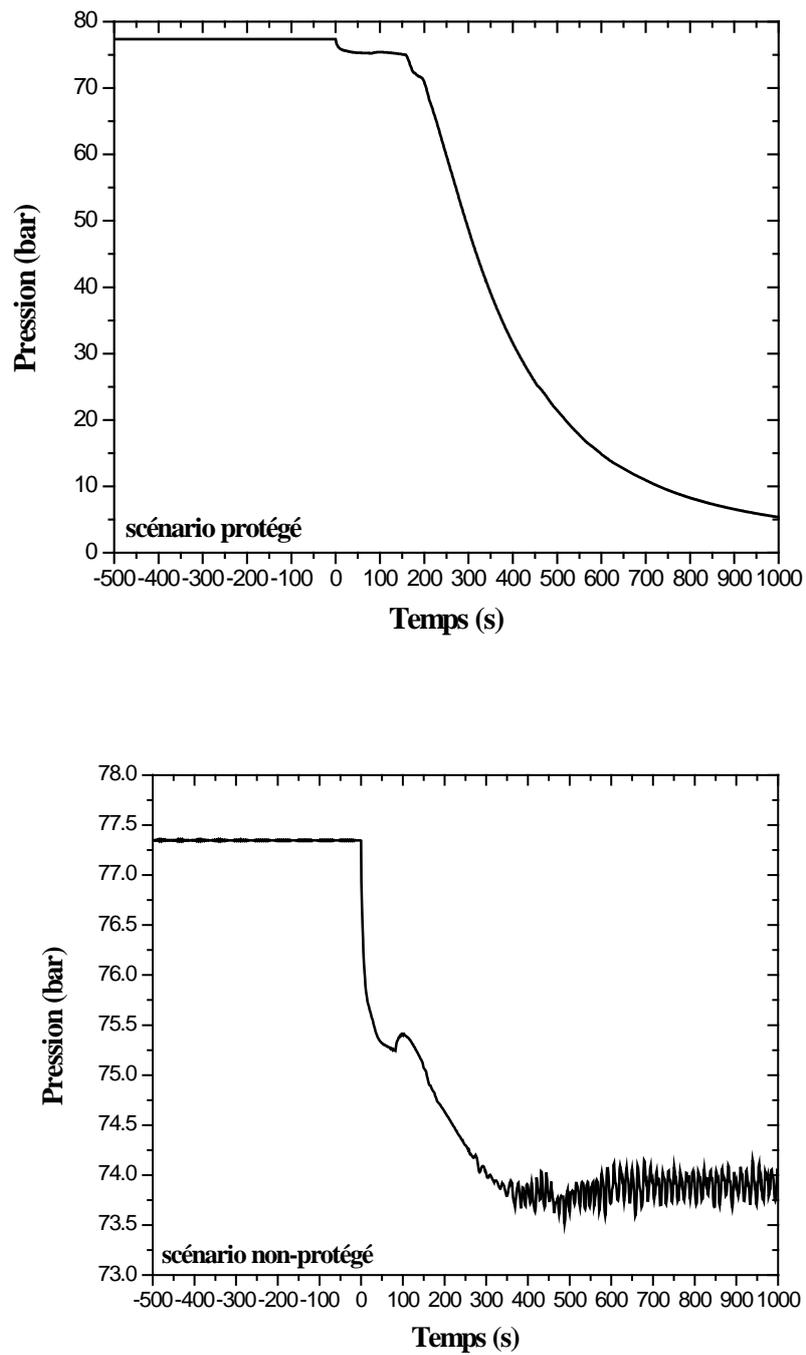


Figure V.3 : Variation temporelle de la pression dans le ballon.

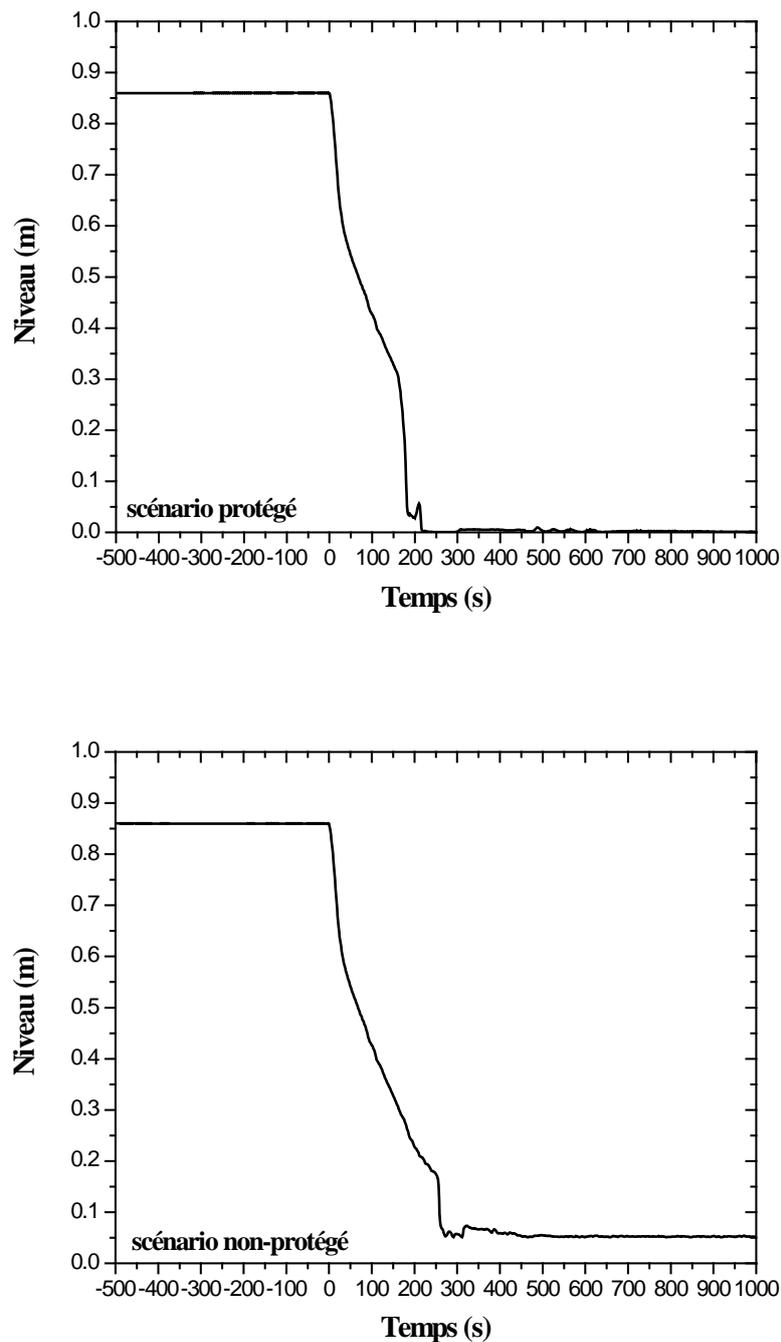


Figure V.4 : Variation temporelle du niveau d'eau dans le ballon.

L'évolution des températures d'entrée et de sortie des deux surchauffeurs SBT et SHT est illustrée par la figure V.5. Dans le cas du scénario protégé, nous constatons durant les 230 secondes qui suivent l'apparition de la brèche, une augmentation des températures de sortie du SBT ainsi que celles d'entrée et sortie du SHT. Ceci est dû à la diminution du débit de vapeur dans cette branche durant cette phase alors que les deux surchauffeurs reçoivent le même flux de chaleur initialement imposé et ce jusqu'au moment du déclenchement de l'arrêt automatique des

brûleurs à 155 secondes environ. Une fois l'énergie stockée dans les parois dissipée et en conjugaison avec l'arrêt de la pompe alimentaire à 210 secondes, ces températures commencent à diminuer lentement du fait de la convection forcée imposée sur les parois externes par le soufflage de l'air pour le refroidissement.

Dans le cas du scénario non-protégé, les températures de sortie des deux surchauffeurs augmentent d'une manière significative et cela même, lorsque le débit de désurchauffe reste maintenu (pas d'arrêt de la pompe alimentaire). Ceci s'explique par le fonctionnement en continu des brûleurs (pas d'arrêt automatique) associé à la chute du débit de vapeur passant par cette branche suite à l'apparition de la brèche.

Concernant les températures des parois des deux surchauffeurs, la figure V.6 permet d'observer que les températures augmentent de façon significative pour atteindre des valeurs de l'ordre de 946 °C pour le SHT vers la fin du transitoire ce qui provoque un endommagement ou une dégradation des tubes par fluage [57].

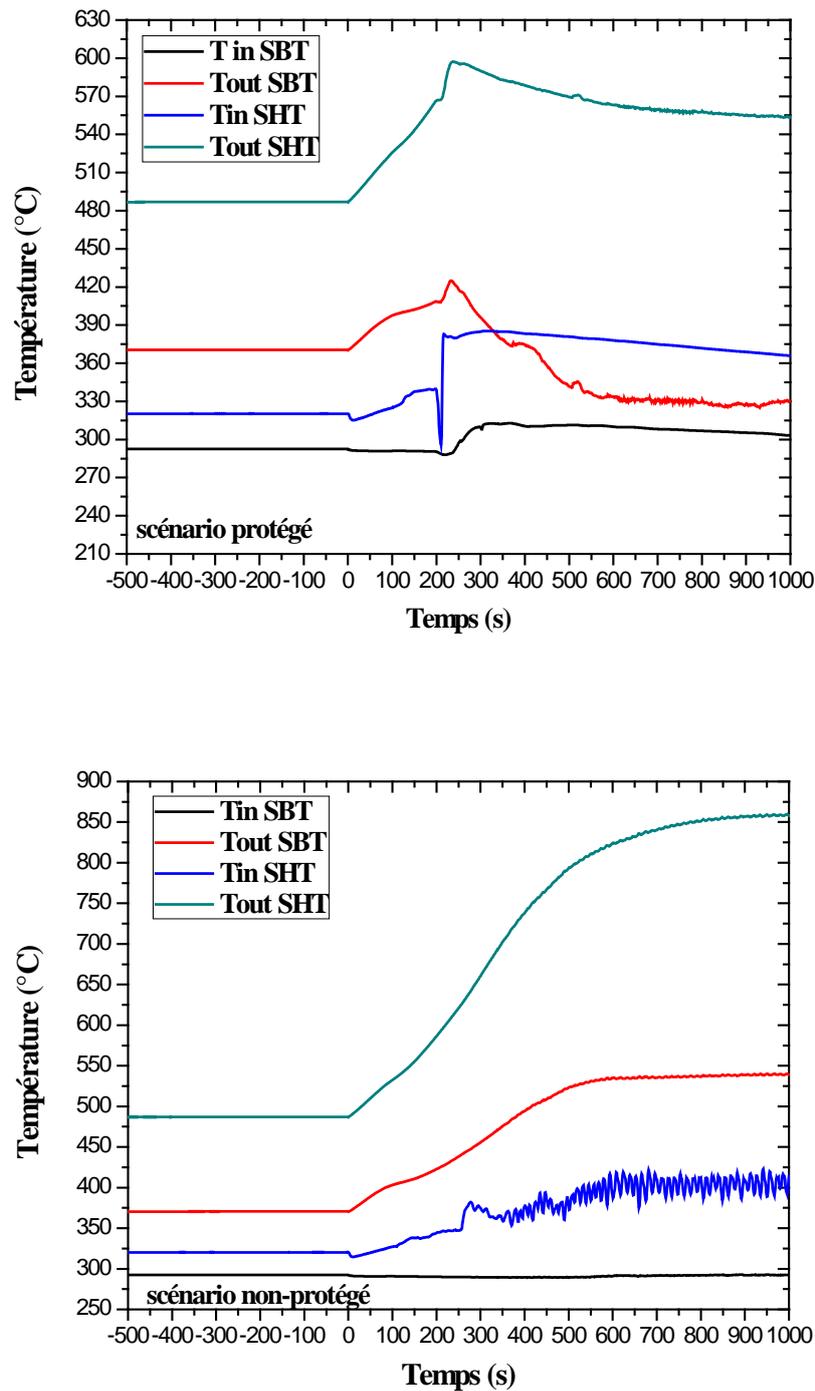


Figure V.5 : Variation temporelle de la température de la vapeur surchauffée entrée/sortie des surchauffeurs.

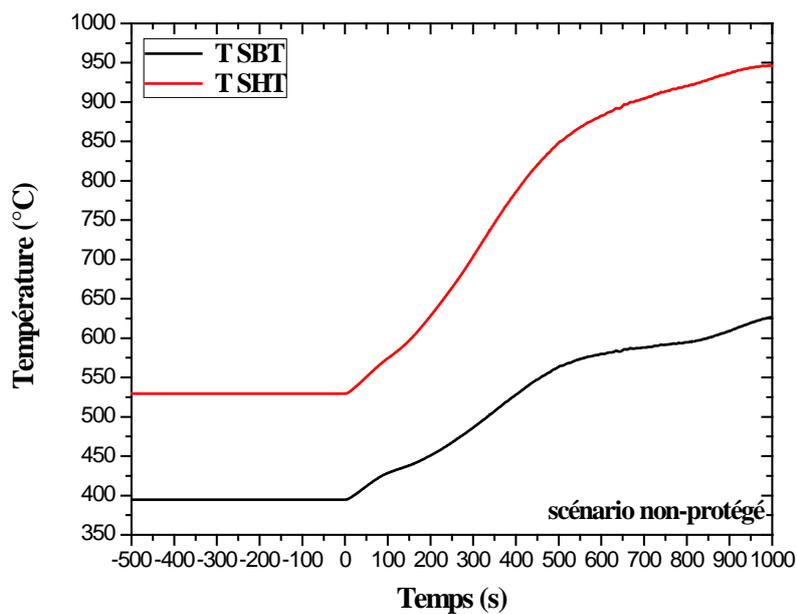
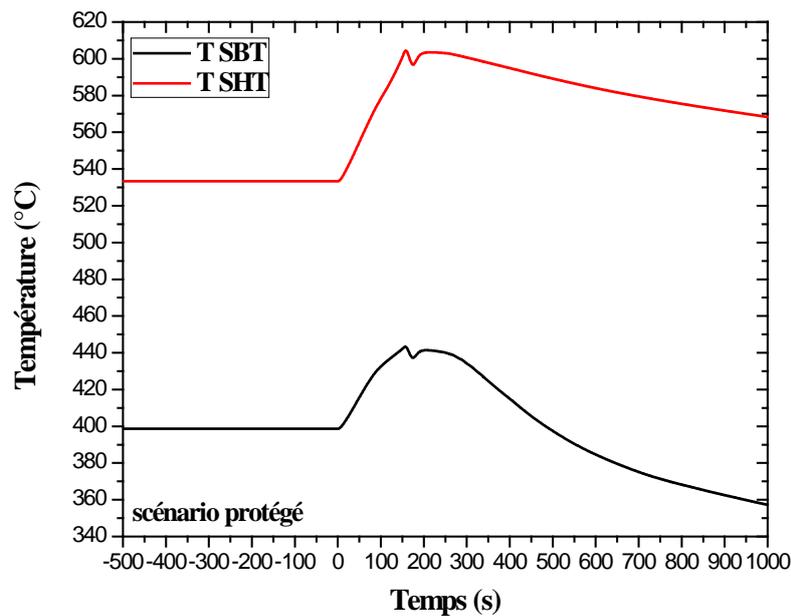


Figure V.6 : Variation temporelle de la température externe de la paroi des surchauffeurs.

La figure V.7 présente l'évolution temporelle du débit massique à l'intérieur des tubes vaporisateurs restés intacts durant l'apparition de la brèche. Nous pouvons observer que partant d'un débit de 190 kg/s à l'état stationnaire (scénario protégé), cette valeur commence à diminuer linéairement suite à l'ouverture de la brèche pour atteindre la valeur de 104.5 kg/s à l'instant $t = 155$ secondes. Cette diminution est due à la fuite d'une partie de ce débit à travers la brèche, ce qui conduit à une baisse du débit total de la vapeur surchauffée à la sortie de la chaudière (figure

V.2). Après arrêt des brûleurs (155 secondes) nous constatons une chute nette du débit passant par les tubes vaporisateurs jusqu'à ce qu'il s'annule. La chaudière continue sa dépressurisation par le biais de la brèche jusqu'à la fin du transitoire.

Dans le cas où les brûleurs ne s'arrêtent pas (scénario non-protégé), le débit diminue jusqu'à la valeur de 25 kg/s. Il aura tendance à se stabiliser à cette valeur jusqu'à la fin du transitoire et la totalité de la vapeur produite est évacuée à travers la brèche.

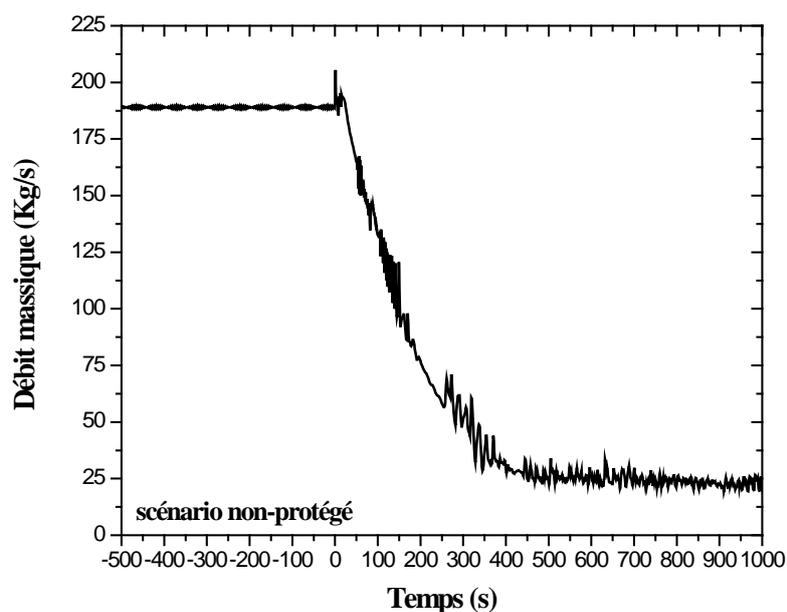
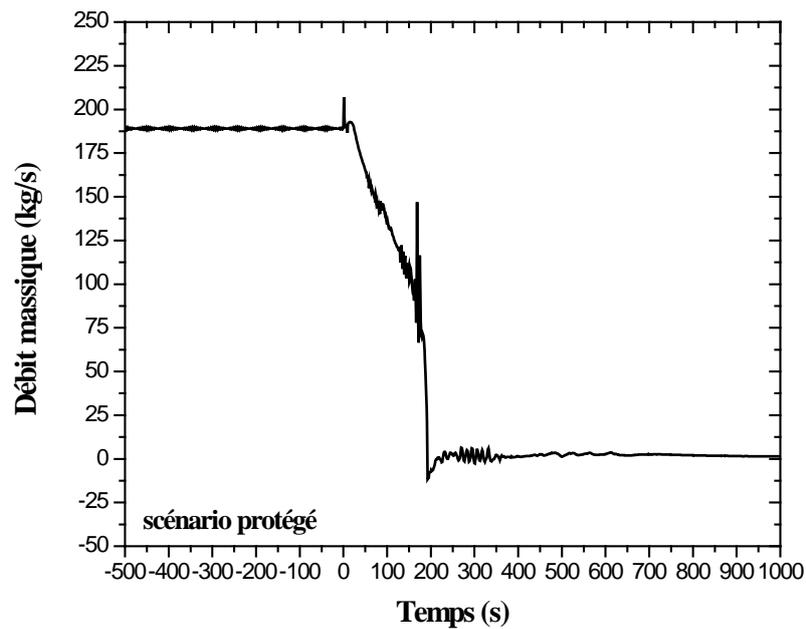


Figure V.7 : Variation temporelle du débit dans les tubes vaporisateurs.

Dans les chaudières à circulation naturelle, le régime de vaporisation se fait en tout point sous forme d'ébullition nucléée dans le but d'assurer le refroidissement continu de la paroi chauffée par l'eau [58]. Tant que ce régime de vaporisation est maintenu, la température interne de la paroi reste supérieure à celle de la saturation. Le scénario protégé dans la figure V.8 montre une légère diminution des différentes températures (fluide, parois interne et externe) de 2 °C environ par rapport à celles de l'état stationnaire durant les 150 secondes suivant l'apparition de la brèche. Ceci s'explique par le passage des conditions de saturation du fluide d'un état initial à un autre caractérisé par une nouvelle pression inférieure de 2 bars.

Puis, au moment de l'arrêt des brûleurs, les températures des parois augmentent légèrement à cause de la chaleur d'inertie des gaz de combustion. Les parois des tubes sont alors refroidies par l'air de ventilation, ce qui provoque une diminution des températures jusqu'à la fin des transitoire. En parallèle, le coefficient de transfert de chaleur tel que le montre la figure V.9 chute brutalement.

Dans le cas d'un fonctionnement en continu des brûleurs, il y a lieu de remarquer à travers le scénario non-protégé une augmentation rapide des températures des parois des tubes vaporisateurs à partir de 150 secondes environ du début de l'accident. A partir de cet instant, le taux de production de vapeur s'accroît (figure V.10) de telle sorte qu'une couche de vapeur vient isoler la paroi suite à une chute sensible du débit après l'apparition de la brèche. En fait, il s'agit d'une nette diminution du coefficient de transfert de chaleur sur la paroi interne du faisceau tubulaire donnant naissance à une crise d'ébullition.

Il y a lieu de signaler que dans le cas de ce scénario, la température maximale enregistrée se trouve nettement supérieure à la valeur de consigne de fonctionnement (500 °C) [22] de la chaudière. Donc, le fluage peut être l'origine de l'explosion fréquente des tubes de la chaudière.

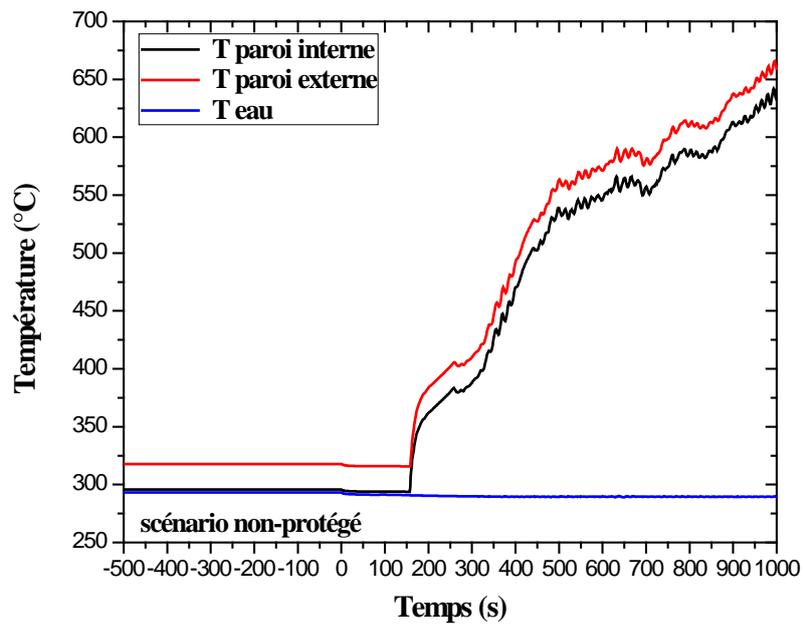
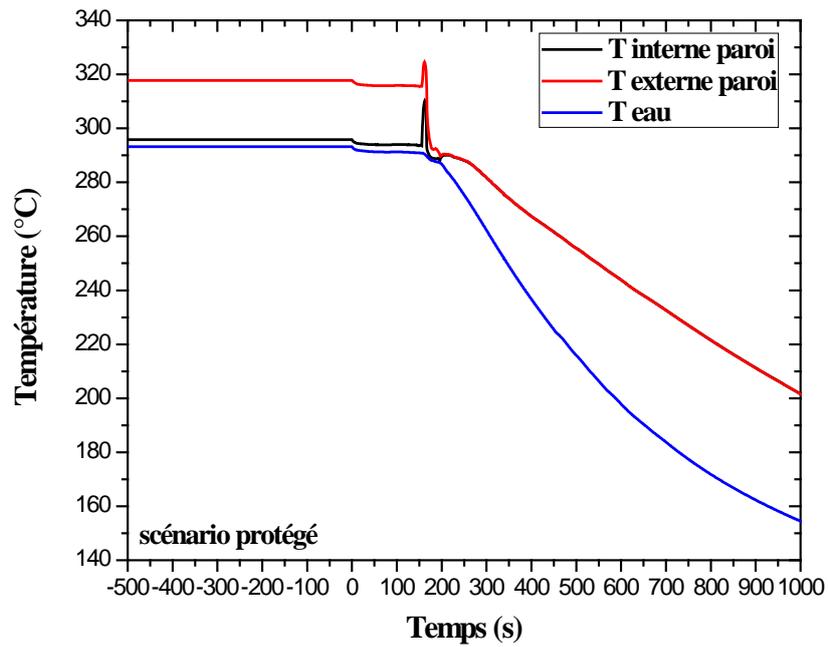


Figure V.8 : Variation temporelle des températures d'eau et des parois dans les tubes vaporisateurs.

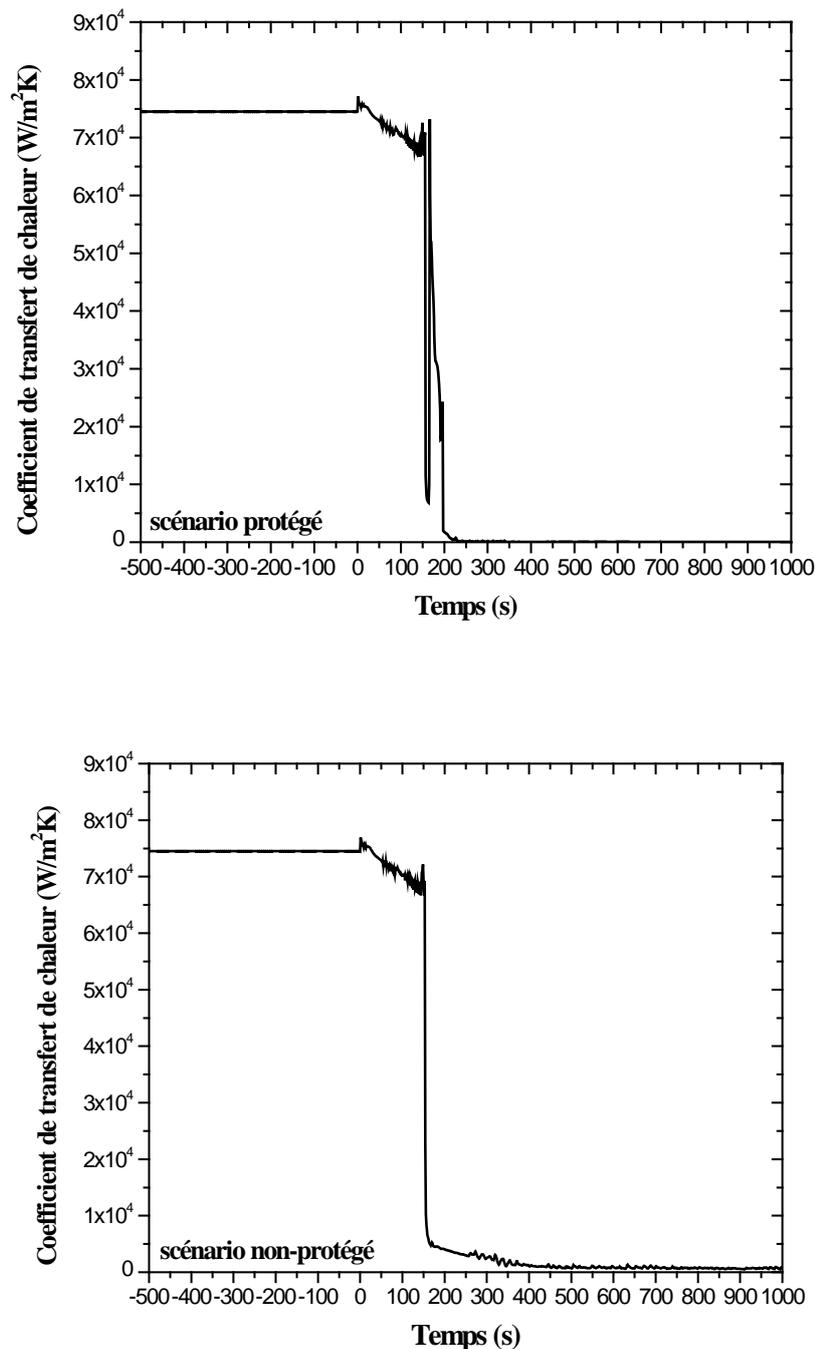


Figure V.9 : Variation temporelle du coefficient de transfert de chaleur dans les tubes vaporisateurs.

La figure V.10 montre la variation temporelle du taux de vapeur au niveau des tubes vaporisateurs suite à la brèche. Pour le scénario protégé, deux phases caractérisent l'évolution de ce paramètre après l'accident. Au cours de la première phase qui va jusqu'à 155 secondes (arrêt des brûleurs), nous constatons une augmentation graduelle du taux de vapeur due à la chute importante du débit associé à la dépressurisation de la chaudière provoquée par la brèche. Après

l'arrêt des brûleurs nous assistons à la deuxième phase de cet accident. Ainsi, le taux de vapeur enregistre une augmentation instantanée jusqu'à atteindre l'unité résultant de la dépressurisation rapide de la chaudière et ce jusqu'à la fin du transitoire.

S'agissant du cas où la chaudière n'est pas protégée (scénario non-protégé), il est clair que l'augmentation significative du taux de vapeur dans cette partie de la chaudière est le résultat de la chute importante du débit associé au fonctionnement en continu des brûleurs ainsi qu'à la dépressurisation occasionnée par la brèche.

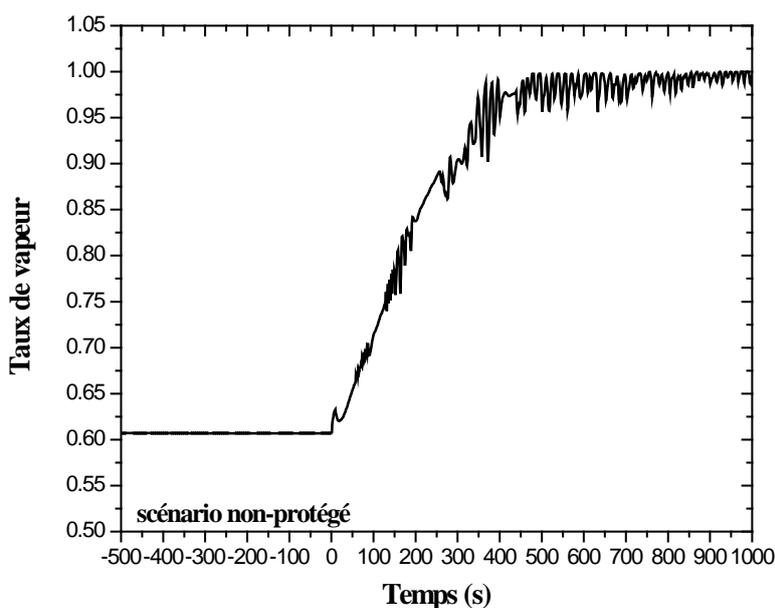
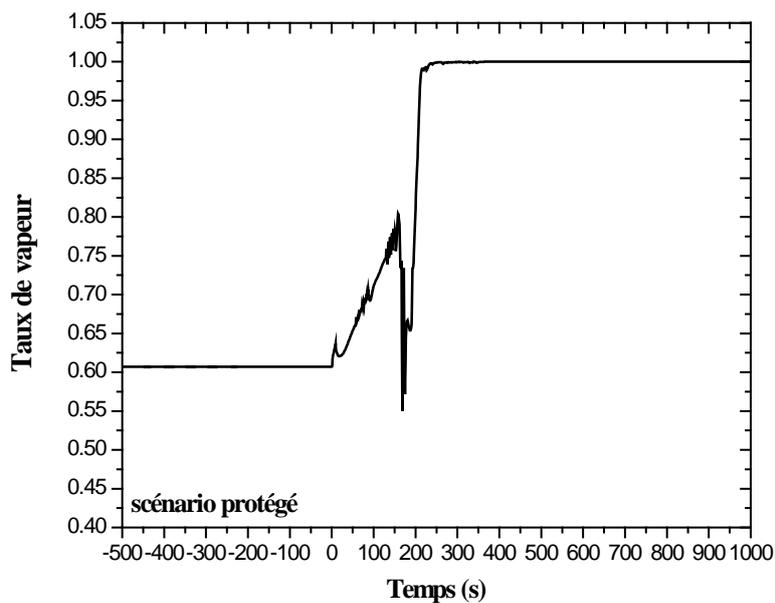


Figure V.10 : Variation temporelle du taux de vapeur dans les tubes vaporisateurs.

Le figure V.11 représente l'évolution temporelle du débit de fuite après l'initiation de la brèche pour les deux scénarios avec et sans la mise en action des mesures de protection.

Dans le premier scénario, le débit au niveau de la brèche, initialement nul à l'état stationnaire, prend instantanément une valeur de 156 Kg/s. Il continue à fluctuer autour de cette valeur jusqu'au moment où les brûleurs se mettent à l'arrêt automatiquement. A partir de cet instant il augmente rapidement pour atteindre un pic de 175 Kg/s au bout des 37 secondes qui suivent. Ce pic est le résultat d'une chute rapide de la pression suite à l'arrêt des brûleurs ce qui provoque une ébullition de la masse d'eau de la chaudière et par conséquent une production intense de vapeur. Puis, ce débit chute d'une manière proportionnelle à la pression et ce jusqu'à la fin du transitoire sachant que la plus grande proportion de la masse d'eau présente dans la chaudière s'est évaporée.

Dans le second scénario, la chaudière se comporte de manière similaire que le cas précédent durant les 164 premières secondes suivant l'apparition de la brèche. Etant donné que ce scénario ne prévoit pas la mise en marche des mesures de protection, le fait de laisser les brûleurs en marche procure à la chaudière un mécanisme de compensation de la perte de pression par la brèche par une production en continu de la vapeur. Ainsi, un nouveau état stationnaire s'établit à partir de l'instant 400 secondes environ et le débit de la brèche garde une valeur quasi constante de 100 Kg/s, jusqu'à la fin du transitoire.

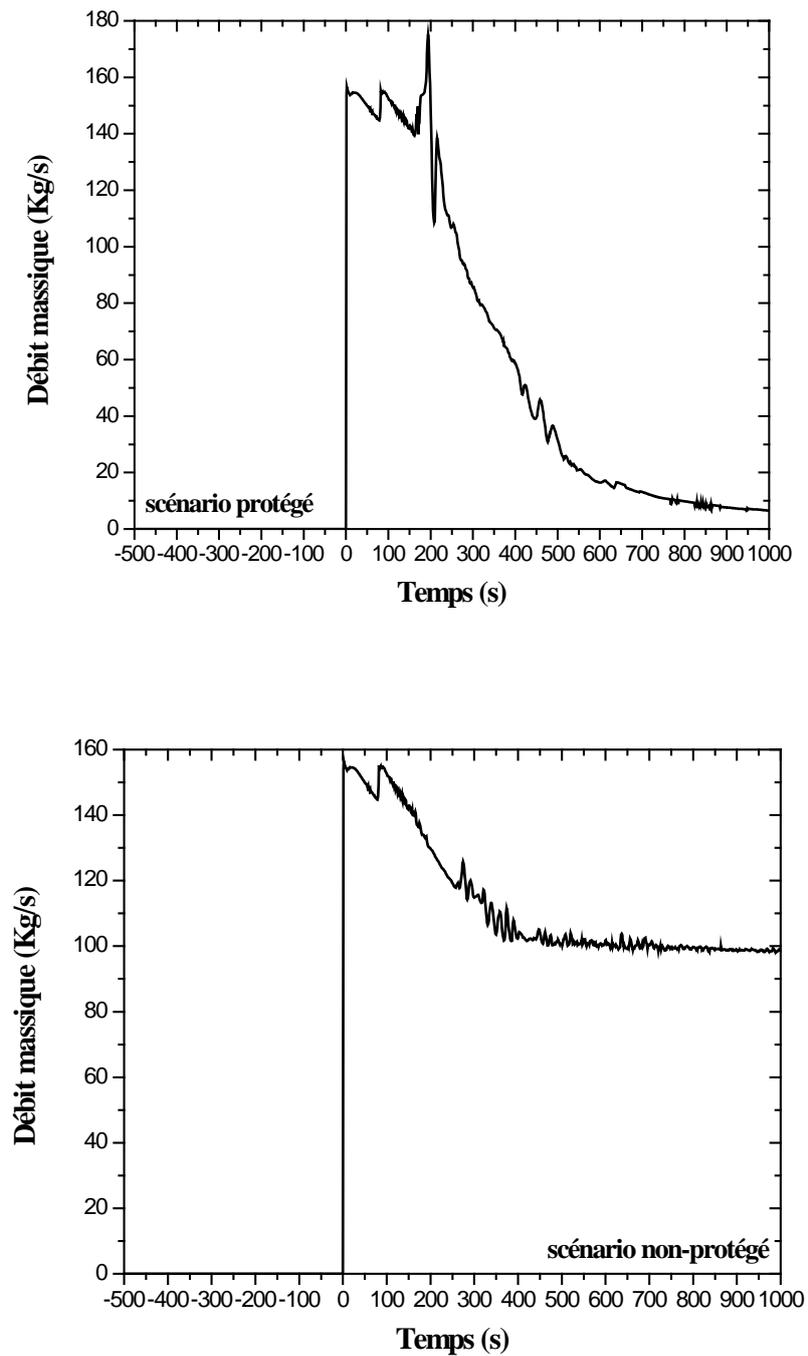


Figure V.11 : Variation temporelle du débit de la fuite dans la brèche.

V.3.2. Simulation de perte d'eau d'alimentation

Les résultats de ce transitoire sont présentés sous forme de graphes représentant l'évolution temporelle de certains paramètres thermohydrauliques de la chaudière ABB ALSTOM lors du transitoire d'arrêt de la pompe alimentaire, et nous donne une idée sur le comportement et la réponse thermohydraulique de la chaudière durant le temps du transitoire accidentel. Les graphes des figures V.12 à V.18 concernent le scénario avec les opérations de protection et de sûreté (protégé), et le scénario où les systèmes de sûreté tombent en panne (non-protégé).

La variation temporelle du débit d'eau d'alimentation et de la vapeur surchauffé est illustrée par la figure V.12. Avant l'accident, les deux débits ont la même valeur de 374 t/h. Après l'arrêt de la pompe alimentaire, le débit d'eau chute brusquement pour les deux cas. Le débit de la vapeur surchauffée s'annule progressivement pendant 90 secondes après l'arrêt des brûleurs, à cause de l'arrêt de génération de vapeur à l'intérieur des tubes vaporisateurs (scénario protégé). Dans le deuxième scénario, on observe une augmentation du débit de la vapeur surchauffée jusqu'à la valeur 513.78 t/h, ce qui est dû à la continuation de la vaporisation d'eau dans les tubes vaporisateurs. À l'instant t égal 318 secondes, le débit commence à chuter jusqu'il ya plus dans les tubes d'eau à vaporiser.

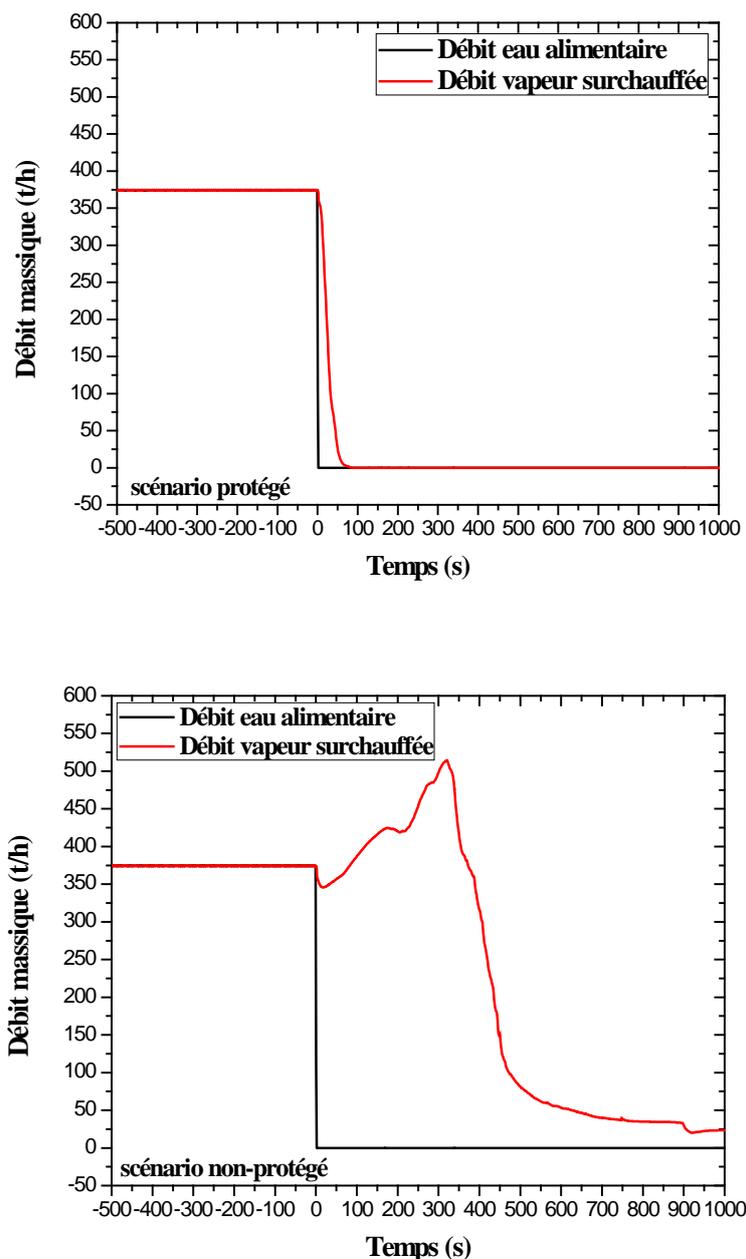


Figure V.12 : Variation temporelle des débits de l'eau alimentaire et de la vapeur.

La figure V.13 montre la variation temporelle de la pression dans le ballon. Dans le premier scénario, après l'accident et l'arrêt des brûleurs, la pression chute brutalement et atteint 72.44 bars à $t = 58$ secondes, à partir de cet instant, elle continue à décroître mais plus lentement jusqu'à la fin du transitoire, ceci est dû au refroidissement de la chaudière par l'air de ventilation. Dans le second cas (scénario non-protégé), il se produit après l'accident un accroissement de pression jusqu'à une valeur de 81.58 bars résultant de la vaporisation. Puis à l'instant t égal à 313 secondes, la pression commence à chuter jusqu'à 72.69 bars et se stabilise à cette valeur jusqu'à la fin du transitoire.

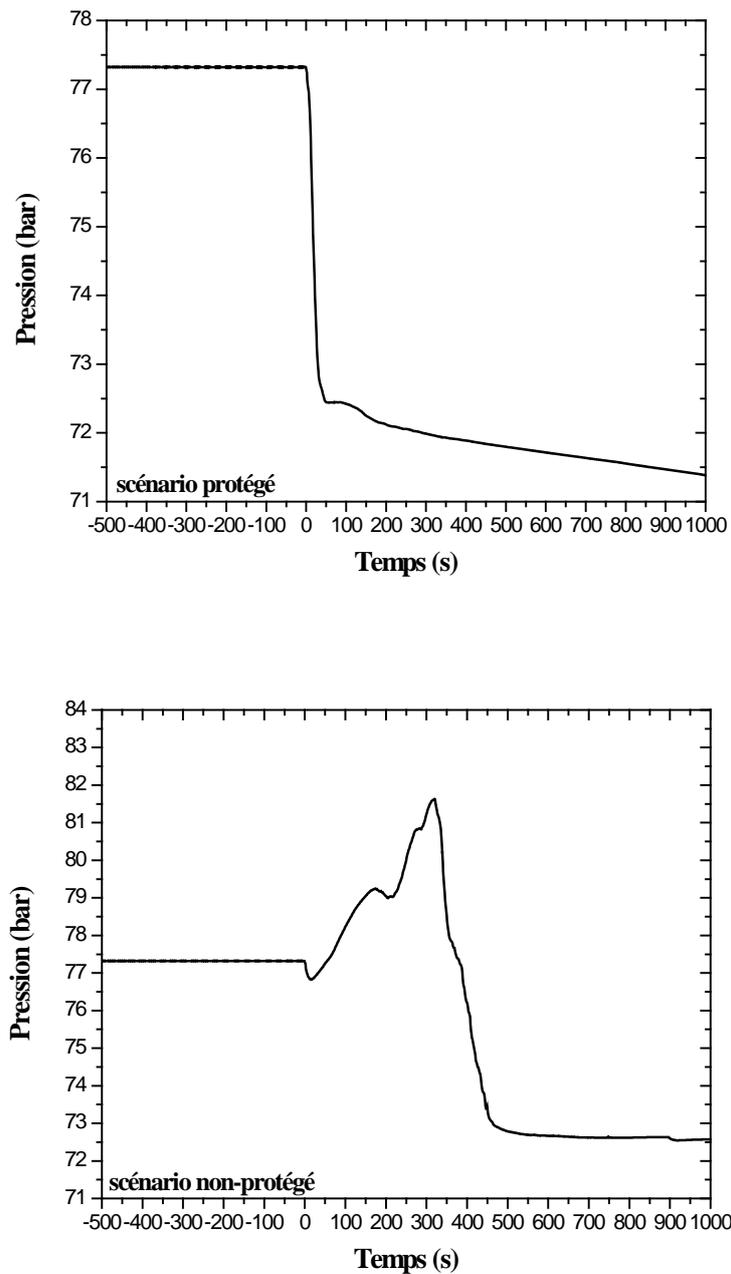


Figure V.13 : Variation temporelle de la pression dans ballon.

Concernant le niveau d'eau (figure V.14), ce dernier est maintenu avant l'accident à la valeur de 860 mm (milieu du réservoir). Pour le cas du scénario protégé, et juste après l'arrêt de la pompe, le niveau chute brutalement jusqu'à la valeur de 359 mm à cause de la diminution de la pression qui engendre une vaporisation intense d'eau dans le ballon, puis continue à décroître mais plus lentement jusqu'à atteindre la valeur de 206 mm à la fin du transitoire. Dans le cas non-protégé, la figure V.14 permet d'observer que le niveau diminue lentement et de manière quasi linéaire contrairement au premier cas, du fait de la présence des bulles de la vapeur dans le ballon.

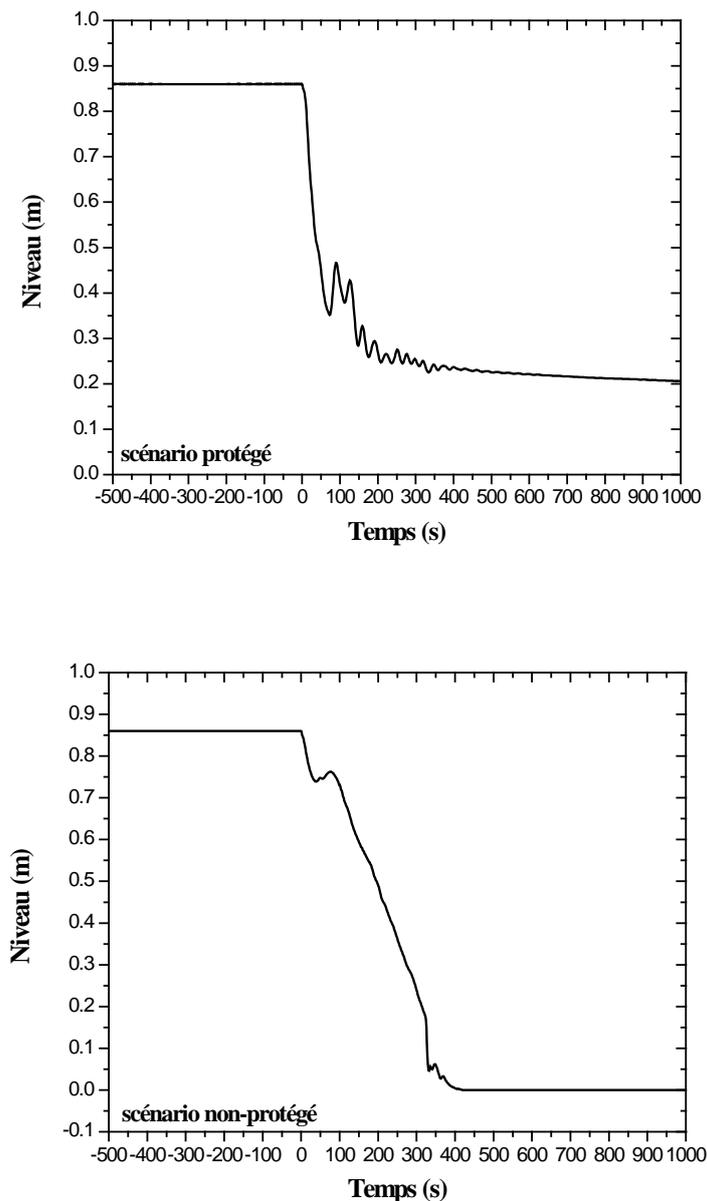


Figure V.14 : Variation temporelle du niveau d'eau dans le ballon.

La variation temporelle des températures d'entrée et de sortie de la vapeur surchauffée dans les surchauffeurs à haute température (SHT) et à basse température (SBT) est présentée par la figure V.15. Pour le scénario protégé, à l'état stationnaire, les valeurs des températures au niveau de l'entrée et de la sortie des deux surchauffeurs sont respectivement 292.6 °C, 370.8 °C (SBT) et 321.2 °C, 487.3 °C (SHT). Après l'arrêt de la pompe, les températures diminuent après l'arrêt des brûleurs. Le scénario protégé montre que la température d'entrée de SHT augmente jusqu'à la valeur de 370.4 °C du fait de l'annulation du débit de désurchauffe consécutif à l'arrêt de la pompe alimentaire, puis, diminue jusqu'à la valeur de 359 °C.

Les températures augmentent à nouveau à cause de la chaleur d'inertie des fumées de combustion puis recommencent à diminuer de manière quasi linéaire. Cette décroissance est provoquée par le refroidissement des surchauffeurs par le débit d'air de ventilation.

Pour le cas non-protégé, nous constatons qu'après l'arrêt de la pompe, les températures restent au début quasi stables puis augmentent rapidement atteignant des valeurs très élevées de l'ordre de 1720 °C. Cette croissance est due au non-stop des brûleurs et la décroissance du débit de la vapeur.

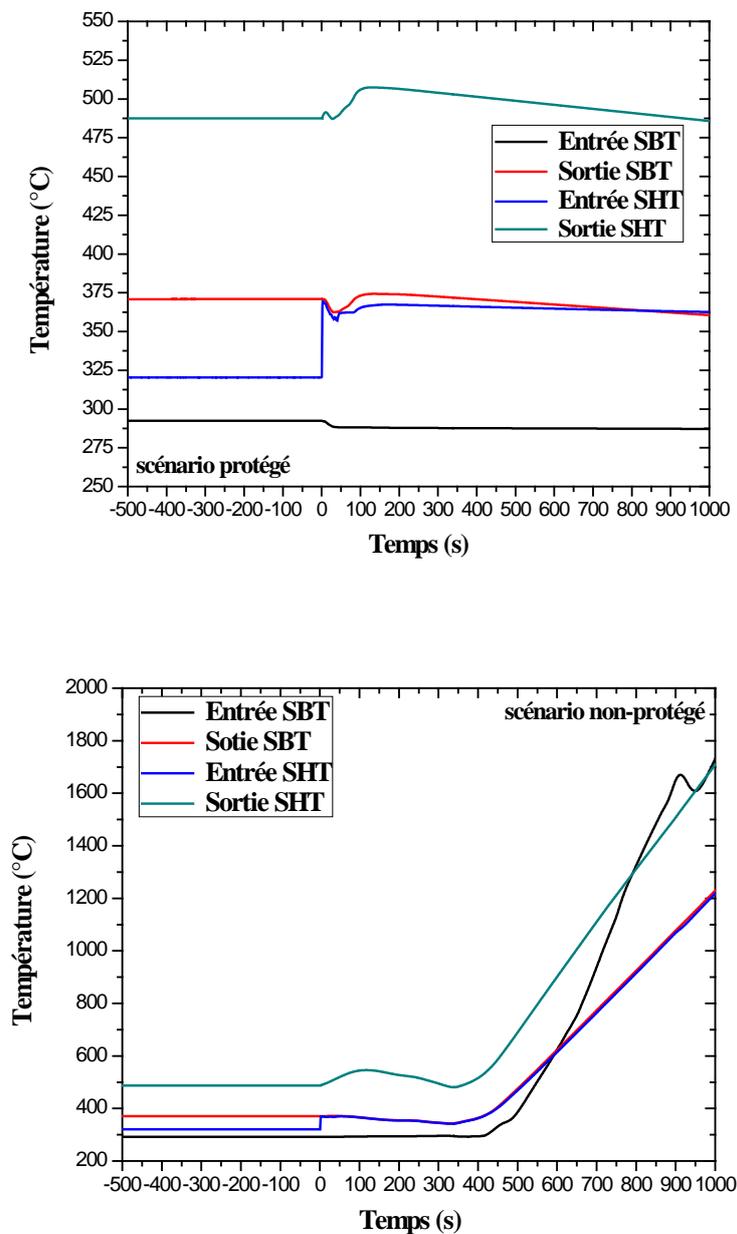


Figure V.15 : Variation temporelle de la température de la vapeur surchauffée entrée/sortie des surchauffeurs.

L'évolution temporelle de la température de la paroi interne et du coefficient de transfert de chaleur dans l'écran avant de la chambre de combustion lors du transitoire d'arrêt de la pompe pour les scénarios protégé et non-protégé est représentée respectivement par les figures V.16 et V.17. Avant que l'accident ne se produise, le transfert de chaleur à l'intérieur des tubes est assuré par le régime d'ébullition nucléée, qui se caractérise par une température de la paroi interne modérée, de l'ordre de 303 °C, et un bon coefficient de transfert thermique égal à 20.25 KW/m²K. Juste après l'arrêt de la pompe, la température de la paroi chute de sa valeur initiale à la valeur 289.38 °C et le coefficient de transfert de chaleur baisse de 20 à 5 KW/m²K dans un intervalle de temps égal à 66 secondes, cette chute est causée par l'arrêt des brûleurs, l'ébullition nucléée s'est donc s'arrêtée. Par la suite, la température de la paroi décroît d'une manière linéaire jusqu'à la fin du transitoire, et le transfert thermique s'effectue par convection simple (liquide au voisinage de la paroi).

Pour le cas du non-stop des brûleurs, et à l'instant 410 secondes, la température de la paroi interne augmente rapidement vers des valeurs très élevées (3500 °C), à cause de l'apparition de la crise d'ébullition. Dans l'intervalle du temps compris entre l'instant où l'accident se produit et celui de l'apparition de la crise d'ébullition, on observe des instabilités dans le coefficient du transfert de chaleur, ce qui suppose qu'il y a un mauvais transfert de chaleur à l'intérieur des tubes vaporisateurs. À partir de l'instant 410 secondes, le coefficient de transfert thermique chute brutalement vers la valeur 45.5 W/m²k.

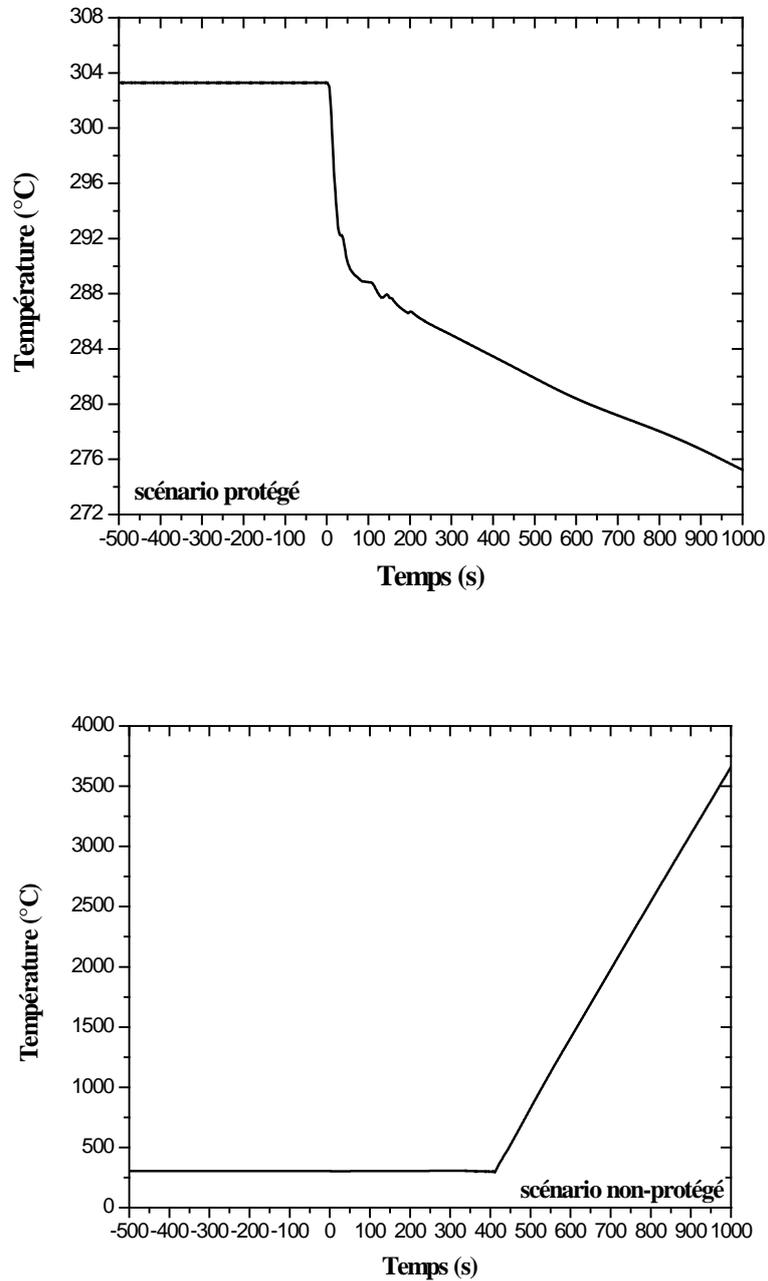


Figure V.16 : Variation temporelle de la température de la paroi interne des tubes vaporisateurs.

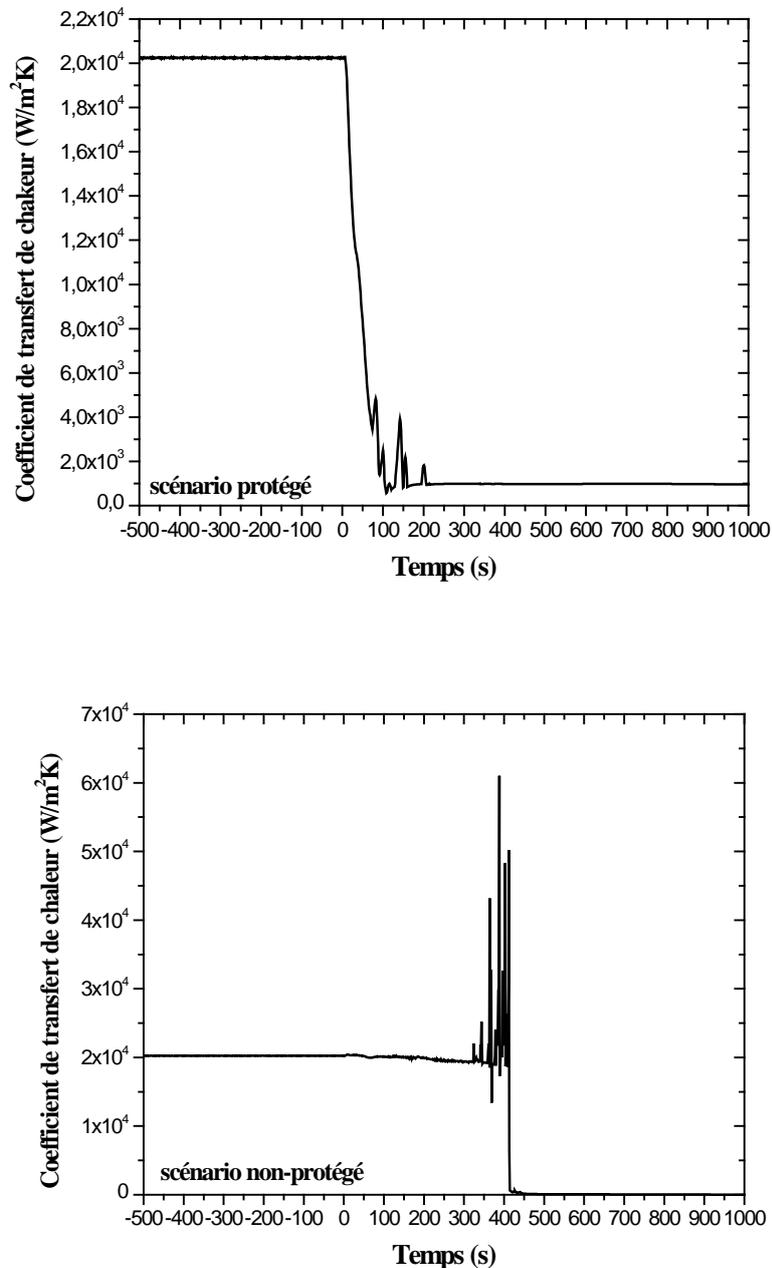


Figure V.17 : Variation temporelle du coefficient de transfert de chaleur dans les tubes vaporisateurs.

La figure V.18 met en évidence la variation temporelle du taux de vapeur dans les tubes vaporisateurs. Pour le scénario protégé, on peut constater qu'avant l'accident, le taux de vapeur se maintient à la valeur 0.4837. Après l'accident une augmentation instantanée du taux de vapeur jusqu'à la valeur 0.4988 résultant du manque d'eau d'alimentation est observée. Après

l'arrêt des brûleurs, le taux de vapeur devient quasi nul et le régime d'écoulement est caractérisé par la convection phase liquide.

Pour le cas non-protégé, le taux de vapeur augmente jusqu'à l'unité, entre le moment de l'accident et l'instant de l'apparition de la crise d'ébullition. On outre il est aisé d'observer les instabilités du taux de vapeur au cours de son augmentation. Ces dernières sont probablement engendrées par la mauvaise circulation à l'intérieur des tubes vaporisateurs.

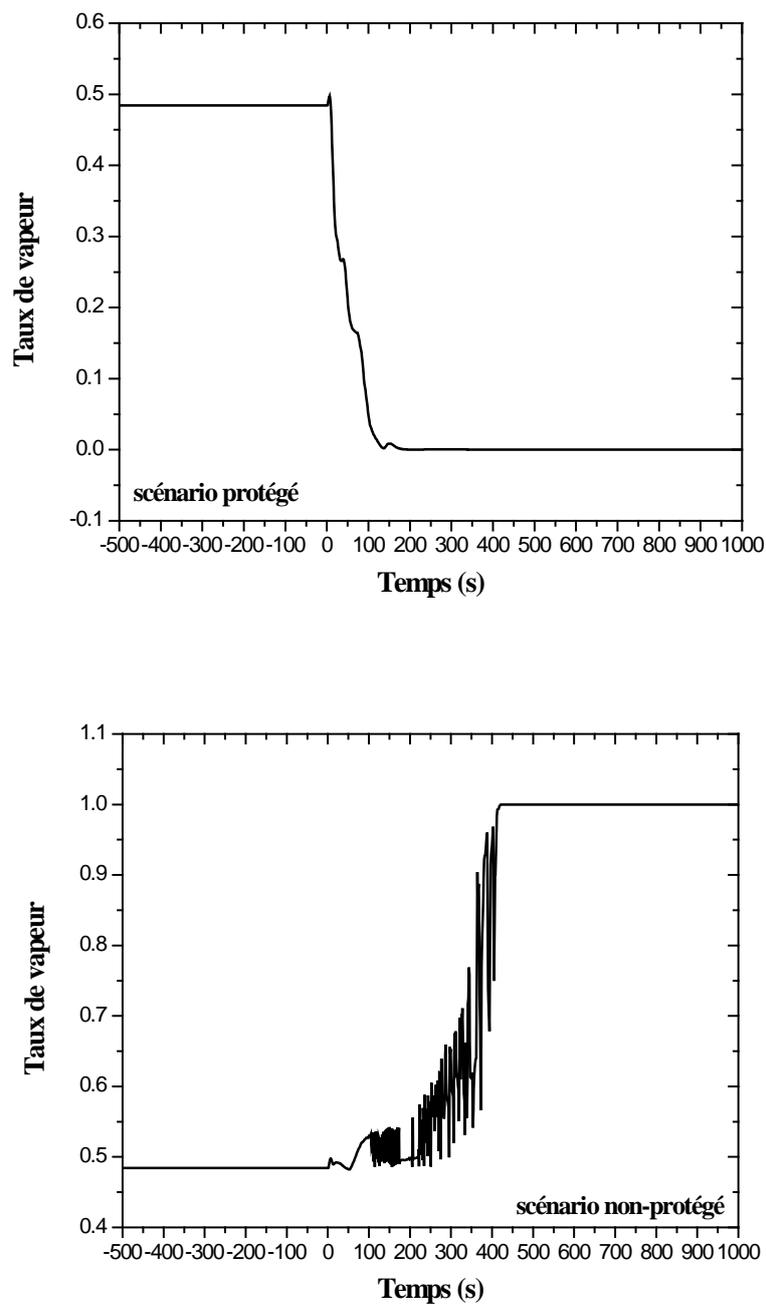


Figure V.18 : Variation temporelle du taux de vapeur dans les tubes vaporisateurs.

V.4. CONCLUSION

La modélisation, la simulation du comportement et la réponse de la chaudière ABB ALSTOM lors du transitoire accidentel en utilisant le code RELAP5/Mod3.2 ont été présentés dans ce chapitre.

Les transitoires traités sont la perte d'eau d'alimentation suite à l'arrêt de la pompe alimentaire et une fuite au niveau des tubes vaporisateurs. Chaque transitoire est fait en deux étapes, la première concerne la simulation du scénario protégé où les systèmes de protection sont opérationnels, et la seconde est la simulation du scénario non-protégé.

Les résultats obtenus permettent d'analyser et de mieux comprendre le comportement et la réponse de l'installation aux transitoires accidentels par l'évolution des paramètres thermohydrauliques de la chaudière. Par ailleurs l'étude de l'évolution temporelle démontre clairement le rôle des systèmes de protection dans la préservation de l'intégrité structurale de la chaudière.

Il apparaît sans ambiguïté que dans le cas où les systèmes de sûreté et de protection tombent en panne, le phénomène de la crise d'ébullition s'établit dans la chambre de combustion du générateur de vapeur, et que le fluage est à l'origine de l'explosion fréquente des tubes de la chaudière.

Conclusion générale

CONCLUSION GENERALE

La simulation numérique permet une meilleure compréhension des phénomènes thermohydrauliques qui peuvent avoir lieu dans les installations thermiques. Elle est d'un apport capital, particulièrement dans les situations accidentelles. Le code RELAP5/Mod3.2 permet de prévoir le comportement thermohydraulique de ces installations lors des fonctionnements normal et accidentel.

La présente étude porte sur la modélisation et la simulation d'une chaudière industrielle, de marque ABB ALSTOM du complexe de liquéfaction du gaz naturel GNL de Skikda en régime transitoire accidentel par le code RELAP5/Mod3.2. Cette chaudière est de type radiant, de grande puissance, à circulation naturelle, et à un seul ballon. Elle fonctionne à haute densité de flux thermique et produit 374 t/h de vapeur surchauffée à une température de 487 °C et sous une pression de 73 bars.

Le modèle de la chaudière adopté par le code RELAP5/Mod3.2 englobe toute l'installation (le générateur de vapeur, la ligne principale d'eau d'alimentation, et la ligne principale de la vapeur surchauffée). Les chaînes de régulation du niveau d'eau dans le ballon ainsi que la température de la vapeur surchauffée sont également modélisées par le code. Afin d'élaborer un modèle qui reflète le fonctionnement de l'installation, la connaissance approfondie du fonctionnement de tous les composants de l'installation, ainsi que des phénomènes physiques ayant lieu dans la chaudière, sont nécessaires

La qualification du modèle de la chaudière ABB ALSTOM élaboré par le code RELAP5/Mod3.2, est basée sur les données d'exploitation en marche stable (état stationnaire) de la chaudière. L'étude comparative montre que les résultats théoriques du code RELAP5/Mod3.2 sont en bon accord avec les données d'exploitation de l'installation, et que le régime stationnaire est bien établi. En outre, les valeurs de consignes sont atteintes, d'où l'établissement de l'état stationnaire dans différents points de l'installation, ce qui est indispensable avant d'entamer l'analyse des transitoires accidentels.

Afin d'évaluer le comportement et la réponse de la chaudière en situations accidentelles, deux scénarios accidentels, une fuite au niveau des tubes vaporisateurs, et un manque d'eau d'alimentation suite à l'arrêt de la pompe alimentaire, avec et sans les opérations de protection ont été simulés.

La réponse de la chaudière est analysée à travers l'évolution temporelle de paramètres thermohydrauliques de la chaudière tels que :

- ❖ Les débits d'eau d'alimentation et de la vapeur surchauffée
- ❖ La pression dans le ballon
- ❖ Le niveau d'eau dans le ballon
- ❖ Les températures de la vapeur et de la paroi externe au niveau des surchauffeurs (à haute et basse températures)
- ❖ Le débit massique, les températures du fluide et des parois interne et externe des tubes vaporisateurs
- ❖ Le coefficient de transfert de chaleur
- ❖ Le taux de vapeur

Dans les applications industrielles, l'ébullition est nécessaire, car elle favorise les processus d'échange de chaleur, afin d'atteindre des coefficients de transfert thermique très élevés et un fonctionnement idéal de la chaudière. Néanmoins, des phénomènes critiques tels que la crise d'ébullition qui limitent le fonctionnement sûr de ces installations peuvent se produire.

L'examen des résultats obtenus montre que ces accidents provoquent des répercussions directes sur les conditions de fonctionnement de l'installation. Par contre, il apparaît clairement que si les opérations de protection et de contrôle sont appliquées, ces accidents n'ont aucune incidence sur la sûreté de la chaudière et l'intégrité de cette dernière est conservée.

Le rôle et l'intérêt des actions de protection et du système de contrôle dans la protection de l'installation sont nettement mis en évidence. Il apparaît clairement à travers cette étude que dans le cas où les actions de sécurité sont défailtantes, la crise d'ébullition (l'un des phénomènes critiques), s'établit dans le générateur de vapeur, et pourrait conduire à la rupture des autres tubes et entraîner une dégradation de l'échange de chaleur entre la paroi chauffante et le fluide provoquant une montée en température de la paroi avec, des conséquences néfastes sur son intégrité. Cette dégradation est due à un changement de régime de transfert thermique consécutif

à l'apparition d'un film de vapeur sur la paroi chauffante, le fluage pourrait être à l'origine de l'explosion fréquente des tubes de la chaudière.

Par ailleurs, cette étude a permis de montrer que les modèles de base du code RELAP5 donnent la possibilité de reproduire les principaux phénomènes thermohydrauliques pouvant avoir lieu dans l'installation, tels que le changement de phase par ébullition, la séparation des deux phases dans le ballon (eau et vapeur), l'évaporation, la condensation, et la circulation naturelle. La capacité et la fiabilité du code RELAP5/Mod3.2 pour l'analyse thermohydraulique des installations thermiques conventionnelles comme les chaudières industrielles ont été démontrés. En outre ce code peut aider à la conception de nouveaux systèmes ou circuit, et à l'étude de sûreté d'une installation.

Ce travail nous a permis d'élaborer un modèle de base pouvant simuler non seulement le fonctionnement de la chaudière mais également certains types d'accidents qui pourraient avoir lieu lors du fonctionnement. Il est d'une importance capitale pour l'exploitant de cette chaudière, dans la mesure où il pourrait servir en cas de modification au niveau de la conception ou des modes d'exploitation et permettre on outre de tester la réponse et la fiabilité des systèmes de contrôle et de protection lors des transitoires accidentels.

Références

REFERENCES

- [1] A.M.I.Husaunndé, « Modélisation des installations de génie climatique en environnement de simulation graphique », Thèse de Doctorat, Ecole Nationale des Mines, 2002.
- [2] D.R.Tucakov, V.D.Stevanov, T.Zivanovovic, A.Jovov et V.B.Ivanovic, « Thermal-hydraulic analysis of a steam boiler with rifled evaporating tubes », Applied Thermal Engineering, Vol.27, pp.509-519, 2007.
- [3] D.Luis, C.Cortés, A.Campo, « Modelling of pulverized coal boilers: review and validation of on-line simulation techniques », Applied Thermal Engineering, Vol.25, Issue.10, pp.1516-1533, 2005.
- [4] T.M.I.Mahlia, M.Z.Abdumuin, I.Almasyah, D.Mukhlishien, « Dynamic modelling and simulation of a palm wastes boiler », Renewable Energy, Vol.28, pp. 1235-1256, 2002.
- [5] A.K.Reddy, « Modelling and simulation of high pressure steam boiler », Indian Journal of Chemical Technology, ISSN 0971-457x, Vol.3, N°.2, pp.61-66, 1996.
- [6] G.Deltin, M.Malandrone, G.Pedrelli et B.Panella, « A model for predicting the steady-state thermal hydraulics in the once-through power boilers », Heat Exchangers: Theory and Practice, McGraw-Hill Book Company, 1983.
- [7] A.E.Berles & al, « Two phase and heat transfer in the power and process industries », Mc.Graw-Hill, New York, 1981.
- [8] D.H.Hulse, « The Early Development of the Steam Engine »; TEE Publishing, Leamington Spa, UK, 1999.
- [9] Burstall, Aubrey.F, « A History of Mechanical Engineering », the MIT Press, 1965.
- [10] C.D.Shields, « Boiler type, characteristics and functions », Mc.Graw-Hill, New York, 1961.
- [11] Water tube boiler, Module3.3, SG-GCM-23 CM Issue1, 2005.
- [12] J.S.Truelove, « Furnaces and combustion chamber », Hemisphere publishing corporation 1983.
- [13] M.T.Amrouni, « Modélisation de l'écoulement lors de l'ébullition dans un générateur de vapeur », Thèse de Magister, Université d'Annaba, 1998.
- [14] Thermal Energy Equipment: Boiler and thermal fluid heaters, United Nations Environment Program, 2006.

- [15] S.Teir., « Modern Boiler Types and application », Energy Engineering and Environment protection Publication, Steam Boiler Technology eBook, 2002.
- [16] M.M.El-Wakil, « Power plant Technology », Mc.Graw-Hill, New York, 1985.
- [17] P.J.Potter, « Power plant theory and design », JOHN WILEY & SONS, New York, 1976.
- [18] L.Maret, « Régulation automatique, presse polytechnique commandes », 1987.
- [19] Technique de l'ingénieur, B 1461, B 1462, B124, B1480, 1993.
- [20] V.V.Ghia, « Récupérateurs et régénérateurs de chaleur », Edition Eyrolles, Paris, 1970.
- [21] G.Monnot, « La combustion dans les fours et les chaudières », Edition Technip, Paris, 1978.
- [22] ABB ALSTOM POWER Combustion, Formation Chaudière, Complexe GNL Skikda, 2000.
- [23] R.Leung, « Dynamic Simulation of un Utility Boiler's Natural Circulation Circuit », Ph.D Thesis, University of Alberta, 1997.
- [24] N.S.Govinda Rao, « Fluid Flow Machines », Tata Mc-Graw-Hill, New Delhi, 1983.
- [25] A.L.Lydersen, « Fluid Flow and Heat Transfer », John Wiley & Sons Ltd, 1981.
- [26] M.M.El-Wakil, « Power plant Technology », McGraw-Hill, New York, 1985.
- [27] A.Rahmani, & al, « D-Type Steam Boiler Simulation Using Relap5/Mod3.2 Computer Code », International Journal of Heat and Technology, Vol.25, N°2, 2006.
- [28] L.S.Tong, J.Weisman, « Thermal Analysis of Pressurized Water Reactors, Heat Transfer in Steam Generator », American Nuclear Society, 3rd Edition 1996.
- [29] J.P.Ylén, M.Paljakka, T.Karhela, J.Savolainen & K.Juslin, « Experiences on Utilizing Plant Scale Dynamic Simulation in Process Industry », Proceedings 19th European Conference on Modeling and Simulation, 2005.
- [30] A.Rahmani, « Modélisation et simulation thermohydraulique d'un générateur de vapeur en régime transitoire par le code RELAP5/Mod3.2 », Thèse de Doctorat, Université de Annaba, 2007.
- [31] Boiler Design, « Maintenance and Safety Study Guide, Boiler Design and Construction », American Trainco Inc., SGB0001 306, 2006.
- [32] M.F.Asahby, « Matériaux-Microstructure et mise en œuvre ». Vol.2, Edition Dunod, 1991.

- [33] Choix des alliages métalliques réfractaires pour four de traitement thermique, Centre des Industries mécaniques (CETIM199), 1998.
- [34] F.Armanet, J.H.Davidson, « Résistance à la corrosion à haute température des aciers inoxydables et alliages réfractaires », Thèse de Doctorat, Université de Paris, 2001.
- [35] G.F.Hewitt, G.L.Shires, T.R.Bott, « Process heat transfer », CRC press, USA, 1994.
- [36] V.M.M.Hinjbregts, J.H.N.Jelgesma, and A.Smel, « Influence of heat transfer, deposits and condenser leakages upon corrosion in steam generator », *Verbkräftwerkstechnik* 55, 1, pp.26-39, 1975.
- [37] RELAP5/Mod3.2 code manual volume: code structure, system models, and solution methods, 1998.
- [38] RELAP5/Mod3.2 code manual volume: User's guidelines, 1998.
- [39] A.BAHA, « Modélisation d'une boucle stimulant un accident de perte de réfrigérant à l'aide du code Relap5/Mod1 », Thèse de Magister en Génie nucléaire, Centre de développement des systèmes énergétiques, Alger, 1991.
- [40] H.Kumamaru & al, « RELAP5/Mod3.2 code analyses of LSTF experiments on international primary side depressurization following SBLOCAS with totally failed HPI », *Nuclear Technology*, Vol.126, 1999.
- [41] IAEA-TECDOC-1395, « Inter comparison and validation of computer codes for thermohydraulic safety analysis of heavy water reactors », August 2004.
- [42] V.J.P.Roux, « Evaluation of RELAP5 reactor code modeling capability », Master Thesis, University of Florida, 2001.
- [43] G.Livois, « Régulation des générateur de vapeur et des centrales thermique », Dunod Technique, Paris 1979.
- [44] The RELAP5 Development Team, RELAP5/Mod3.2 code Manuals, NUREG/CR-5535 Report, Vol.1-5, Idaho National Engineering Laboratory, 1998.
- [45] Technique de l'ingénieur, « Conception et calcul des chaudières : généralité et bilan », ref. B 1460, 1993.
- [46] A.L.Deghal.Cheridi, A.Dadda, A.Rahmani, M.H.Boulheouchat, « Etude numérique de la défaillance du système de refroidissement du circuit secondaire du réacteur Es-Salam par le code Relap5/Mod3.2 ». Premières Journées sur la Physique, la sûreté et la Technologie des Réacteurs Nucléaire, Draria, Alger, 2008.
- [47] F.D'auria, A.Bousbia, A.Petruzzi, A.Del Nevo, « State of art in using best estimate calculation tools in nuclear technology », *Nuclear Engineering and technology*, Vol.38, N.1, pp.11-32, 2006.
- [48] G.E.Paredes, A.N.Carrera, « SBWR model for steady-state and transient analysis », *Science and Technology of Nuclear Installation*, Vol.5, Article ID 428168, p.18, 2008.

- [49] S.Kakac, « Boiler, Evaporator and condensers », ISBN 0-471-62170-6, John Wiley & Sons, Inc, New York, 1991.
- [50] N.E.Rafidi, « Thermodynamic aspects and heat transfer characteristics of HiTAC furnaces with regenerators », Thèse de Doctorat, Université de Stockholm, 2005.
- [51] M.Ferrouk, « Contribution à l'étude de la crise d'ébullition à faible titre: caléfaction », Thèse de Doctorat, Université de Boumerdès, 2009.
- [52] M.Pavlov & al, « Relap5/Mod3.2 analysis of natural circulation test at Kozloduy NNP UNIT 6 », Fifth International Informational Exchange Forum, Russia, 2000.
- [53] K.Juslin, « A Companion Model Approach to Modeling and Simulation of Industrial Processes », Ph.D Thesis, Helsinki University of Technology, Finland, 2005.
- [54] H.Kim, S,Choi, « A model on water level dynamics in natural circulation drum type Boiler », International Communication in Heat and Mass transfer, Vol.32, pp. 786-796, 2005.
- [55] S.Cicero, R.Lacalle, R.Cicero, J.García, « Failure analysis of a steam generator superheater drain tube used in a dump », Engineering Failure Analysis, Vol.17, pp.301–312, 2010.
- [56] K.Astrom, J. Bell, « Drum boiler dynamics », Automatica, Vol.36, pp. 363-378, 2000.
- [57] D.R.H.Jones, « Creep failures of overheated boiler, superheater and reformer tubes », Engineering Failure Analysis, Vol.11, pp-873-893, 2004.
- [58] L.A.Payan, & al, « Critical heat flux prediction for water boiling in vertical tubes of a steam generator », International Journal of Thermal Sciences, Vol.44, pp.179-188, 2005.
- [59] M.R.Golriz, « Temperature distribution at the membrane wall of a 165-MWth CFB boiler», Experimental Heat Transfer, Vol.14, pp.299-313, 2001.
- [60] H.E.Emara-Shabaik, & al, « Prediction of riser's tubes temperature in water tube boiler », Applied Mathematical Modeling, Vol.33, pp.1323-1336, 2009.
- [61] E.J.Adam, J.L.Marchetti, « Dynamic simulation of large boilers with natural recirculation», Computers and Chemical Engineering, Vol.23, pp.1031-1040, 1999.
- [62] C.Hales, & al, « Boiler feedwater pipe failure by flow-assisted chelant corrosion », Engineering Failure Analysis, Vol.9, pp.235-243, 2002.
- [63] S.P.Diaz, « Modeling and simulation of an industrial steam boiler with ECOSIMPRO », 1st Meeting of ECOSIMPRO Users, UNED, Madrid, may 2001.
- [64] P.Groudev, A.Stefanova, « Validation of Relap5/Mod3.2 model of VVER 440 on reactor scram transient », Progress in Nuclear Energy, Vol.48, pp.146-154, 2006.
- [65] A.Hainoun, A.Schaffrath, «Simulation of subcooled instability of high flux research reactor using the extended code ATHLET», Nuclear Engineering and Design, Vol.207, pp 163-180, 2001.

- [66] J.C.Micaelli, F.Barre, D.Bestion, « CATHARE Code Development and Assessment Methodologies », Trans. of the ANS, Winter Meeting San Francisco, Vol.73, pp.509–510, 1995.
- [67] J.Tuunanen, J.Vihavainen, F.D’auria, M.Frogheri, G.M.Galassi, G.Kimber, J.Lillington, E.Alien, T.G.Wilams, « Analysis of PACTEL passive safety injection experiments with APROS, CATHARE and RELAP5 codes », Nuclear Engineering and Design, Vol.198, pp.261-286, 2000.
- [68] I.H.Bokhari, « Steady-state thermal hydraulic and safety analysis of a proposed mixed fuel (HEU&LEU) core for Pakistan research reactor», Annals of Nuclear Energy, Vol.31, pp.1265-1273, 2004.
- [69] A.L.Deghal.Cheridi, A.Rahmani, « Simulation des conditions de la crise d’ébullition dans un canal vertical par le code Relap5/mod3.2 », 7ème Congrès National de la Physique et des Applications, Bechar, Décembre 2006.
- [70] M.Montout, « Contribution au développement d'une Approche Prédictive Locale de la crise d’ébullition », Thèse de doctorat, Université de Toulouse, 2009.
- [71] A.L.Deghal.Cheridi, A.Chaker, « Radiant steam generator simulation using Relap5/Mod3.2 computer code », 11th International Conference on the Multiphase Flow in Industrial Plant à Palerme, ITALIE, September 2008.
- [72] A.L.Deghal.Cheridi, A Chaker, « Modélisation numérique d’une Chaudière industrielle de grande puissance par le code Relap5/Mod3.2 », International Conference for Renewable Energies and Sustainable Development – ICRESO_07, Tlemcen, May 2007.
- [73] E.Hahne, U.Grigull, « Heat transfer in boiling », Hemisphere Publishing Corporation, London, 1977.
- [74] K.Stephan, « Heat transfer in Condensation and boiling », Springer Verlag Berlin Heidelberg, 1992.
- [75] R.Ferri, A.Cammi, D.Mazzei, « Molten salt mixture properties in RELAP5 code for thermodynamic solar applications », International Journal of Thermal Sciences, Vol.47, pp. 1676–1687, 2008.
- [76] A.L.Deghal.Cheridi, A.Chaker, « Numerical study of subcooled boiling in vertical tubes using Relap5/Mod3.2 », International Journal of Electron Devices, Vol 7, pp 241-244, 2010.
- [77] A.L.Deghal.Cheridi, A.Chaker, « Thermal-hydraulic Modeling of a Radiant Steam Generator Using Relap5/Mod3.2 code », International Review on Modeling and Simulations (*I.RE.MO.S.*), Vol.4, n.4 2011.
- [78] A.L.Deghal.Cheridi, A.Chaker, A.Loubar, « Simulation of loss of flow transient in a radiant steam boiler with Relap5/Mod3.2 », I.J. World Academy of Science, Engineering and Technology, Vol.55, pp.42-46, 2011.
- [79] A.L.Deghal.Cheridi, A.Chaker, A.Loubar, « Thermal-hydraulic simulation of a radiant steam boiler using Relap5 computer code », Computer & Chemical Engineering, Vol.52, pp.168-176, 2013.

NUMERICAL STUDY OF ACCIDENTAL TRANSIENT OF AN INDUSTRIAL STEAM BOILER WITH RELAP5/MOD3.2

Abstract

The main objective of this work involves the simulation of the overall behavior of an industrial radiant steam boiler ABB ALSTOM (GNL Complex, SKIKDA) at the accidental transient using the RELAP5/MOD3.2 computer code. The RELAP5/Mod3.2 model qualification results at the steady-state are in good agreement with the steam boiler experimental data. Two types of transients are treated as part of this work since they are the most hazardous for this kind of facilities. They concern the loss of feedwater supply to the boiler (feedwater pump costs-down) and the leakage from the boiler when some pipes on the hot leg side are broken.

This study analyzed the thermal-hydraulic phenomena that may occur in the steam boiler steady-state and transient operation mode. For this, a detailed model of the all system is built from a strong qualification. This work shows the RELAP5/MOD3.2 large capabilities to simulate all the phenomena occurring in the steam boiler during the transients.

The results of this work may be of great importance for the steam boiler owner since the developed model could be used to help in performing some changes in design or operating procedures and to improve the response and reliability of control and protection systems during the accidentals transients.

Keywords:

Industrial steam boiler, Thermal-hydraulic simulation, System code RELAP5/MOD3.2, Two phase flow, Natural circulation, Steady-state, Accidental transient.

الدراسة العددية للنظام المتغير لمولد بخاري صناعي بواسطة RELAP5/Mod3.2

ملخص

الهدف الأساسي لهذا العمل هو المحاكاة الحقيقية للسلوك العام لمولد بخاري صناعي من النوع ABB ALSTOM (مركب تمييع الغاز الطبيعي بسكيدة) خلال النظام المستقر و المتغير بواسطة البرنامج الحسabi Relap5/Mod3.2. تقييم النموذج المقترح اعتمد على مقارنة النتائج النظرية المتحصل عليها مع معطيات التشغيل الخاصة بالمولد البخاري تحت الشروط المستقرة أين أظهرت تقريبات جيدة. أجرينا محاكيتين لحادثتين يعتبران الأخطر للمولد البخاري هما نقص ماء التغذية (توقف المضخة) ، و تسرب للماء والبخار في حالة ظهور ثقب في إحدى أنابيب التبخير.

هذه الدراسة أمكنت من تحليل الظواهر الهيدروحرارية التي تحدث في المولد البخاري خلال الأنظمة المستقرة و المتغيرة الأكثر أهمية. من اجل هذا، بني نموذج مفصل للمولد البخاري بلبرنامج الحسabi من اجل إظهار المقادير و الظواهر الأكثر أهمية. تحليل النتائج النظرية المتحصل عليها تظهر قدرة النموذج المقترح بلبرنامج الحسabi Relap5/Mod3.2 على تبين كل الظواهر.

نتائج النموذج المقترح للمولد البخاري في إطار هذه الأطروحة يسمح للمساعدة على بناء و استغلال أو إجراء تغييرات في المولد البخاري بلاضافة إلى تجريب استجابة و جودة أنظمة التحكم والحماية خلال النظام المتغير.

الكلمات المفتاحية :

مولد بخاري صناعي، محاكاة هيدروحرارية، البرنامج الحسabi RELAP5/Mod3.2، سيلان ثنائي الحالة، سيران طبيعي، نظام مستقر، نظام متغير.

ETUDE NUMERIQUE DU TRANSITOIRE ACCIDENTEL D'UNE CHAUDIERE INDUSTRIELLE PAR LE CODE RELAP5/MOD3.2

Résumé

L'analyse de sûreté des installations thermiques, en particulier celles travaillant sous haute pression, est principalement basée sur la simulation numérique. Ainsi, l'utilisation des codes de calcul pour la conception et l'évaluation de la sûreté de ces systèmes est devenue une voie incontournable.

L'objectif principal de ce travail consiste en la simulation du comportement global d'une chaudière industrielle de type radiant ABB ALSTOM (Complexe GNL, Skikda) lors du fonctionnement normal et transitoire en utilisant le code de calcul RELAP5/MOD3.2. Deux types de transitoires, considérés comme les plus dangereux pour les chaudières, sont traités dans le cadre de ce travail. Il s'agit de la perte d'eau d'alimentation de la chaudière (arrêt de la pompe d'alimentation) et de la fuite d'eau et de vapeur en cas d'apparition de brèches dans certains tubes vaporisateurs.

Pour réaliser cette étude un modèle détaillée de la chaudière est construit pour RELAP5/MOD3.2. Afin de reproduire les paramètres et les phénomènes les plus importants avec une précision et une fidélité acceptables, un travail immense de qualification de la modélisation élaborée est entrepris. Il consiste à faire une comparaison à l'état stationnaire des résultats du code aux données expérimentales disponibles de la chaudière. Ainsi, la simulation du comportement de la chaudière à l'état stationnaire a montré une très bonne concordance entre les résultats du code RELAP5 et les données d'exploitation de la chaudière.

Le comportement thermohydraulique des principaux paramètres de la chaudière lors de la simulation des conditions de fonctionnement transitoires sont représentées graphiquement et largement commentées et discutées. L'analyse des résultats obtenus montrent les capacités avérées des modèles du code RELAP5/MOD3.2 à reproduire correctement tous les phénomènes se produisant dans la chaudière durant les transitoires accidentels.

Enfin, le modèle de la chaudière élaboré dans le cadre de cette thèse pourrait dans une certaine mesure répondre aux besoins du propriétaire dans l'éventualité d'une modification dans la conception et dans les procédures d'exploitation de la chaudière et permettre on outre de tester la réponse et la fiabilité des systèmes de contrôle et de protection lors des transitoires accidentels.

Mots clés :

Chaudière industrielle, Simulation thermohydraulique, Code système RELAP5/Mod3.2, Ecoulement diphasique, Circulation naturelle, Etat stationnaire, Transitoire accidentel.