

République algérienne démocratique et populaire  
وزارة التعليم العالي والبحث العلمي  
Ministère de l'enseignement supérieur et de la recherche scientifique  
المركز الجامعي لعين تموشنت  
Centre Universitaire Belhadj Bouchaib d'Ain-Temouchent  
Institut de Technologie  
Département de Génie Mécanique



Projet de fin d'études  
Pour l'obtention du diplôme de Master en :  
Domaine : Technologie  
Filière : Génie Mécanique  
Spécialité : Mécanique et Energétique  
Thème

*Analyse thermo-mécanique par éléments finis d'une  
chaudière à tube de fumées*

**Présenté Par :**

- 1) BAHOUS Azzeddine
- 2) SMAHI Ismail

**Devant les jurys composés de :**

Mr. AMIRAT	MCB	C.U.B.B (Ain Temouchent)	Président
Mr. OUDAD	MCB	C.U.B.B (Ain Temouchent)	Examineur
BELOUFA AMINE	MCB	C.U.B.B (Ain Temouchent)	Encadrant

*Année universitaire 2016/2017*

## **REMERCIEMENTS**

Avant de commencer la présentation de ce travail, je profite de l'occasion pour remercier toutes les personnes qui ont contribué de près ou de loin à la réalisation de ce projet de fin d'études. Je tiens à exprimer mes vifs remerciements pour mon grand et respectueux professeur, M. BELOUFA AMINE, d'avoir accepté de m'encadrer pour mon projet de fin d'études, ainsi que pour son soutien, ses remarques pertinentes et son encouragement.

Je tiens à exprimer ma profonde reconnaissance et toutes mes pensées de gratitude, pour sa disponibilité, pour la confiance qu'il a su m'accorder et les conseils précieux qu'il m'a prodigués tout au long de la réalisation de ce projet. et parce qu'il m'a accompagné de près durant tout ce travail Veuillez trouver ici le témoignage de notre respect le plus profond. Mes remerciements vont aussi à tous mes professeurs, enseignants et toutes les personnes qui m'ont soutenus jusqu'au bout, et qui n'ont pas cessé de me donner des conseils très importants en signe de reconnaissance.

## ❖ Résumé

Le dessoudage des cordons de soudure à cause des sollicitations thermomécaniques que subissent les chaudières à tubes de fumée est un défi pour les constructeurs de ces chaudières. L'objectif principal de notre travail est de déterminer les contraintes thermomécaniques dans ces cordons de soudure afin de les analyser et d'essayer de minimiser leur impact sur le fonctionnement de notre chaudière. L'analyse thermomécanique de notre chaudière à l'aide d'un logiciel éléments finis Ansys-Worckbench nous a permis de localiser la zone de dessoudage des cordons de soudure, celle-ci se trouve entre la plaque de renversement et le cylindre extérieur, notre analyse nous a permis aussi de minimiser les contraintes thermomécaniques en jouant sur la température du brûleur.

## ❖ Summary

The desoldering of the weld seams due to the thermo mechanical stresses experienced by the flue-gas boilers is a challenge for the manufacturers of these boilers. The main objective of our work is to determine the thermo mechanical stresses in these welding beads in order to analyze them and to try to minimize their impact on the operation of our boiler. The thermo mechanical analysis of our boiler using Ansys-Worckbench finite element software has allowed us to locate the welding seam desoldering zone, which is located between the tilting plate and the outer cylinder, our Analysis has also allowed us to minimize thermo mechanical stresses by playing on the temperature of the burner.

## ملخص:

تكسر طبقات اللحام بسبب الضغوط الميكانيكية الحرارية التي تواجهها المراجل الحرارية هو التحدي الأكبر بالنسبة للشركات المصنعة لهذه المراجل. والهدف الرئيسي لعملنا هو تحديد الضغوط الميكانيكية الحرارية في هذه طبقات , من أجل تحليلها ومحاولة التقليل من تأثيرها على تشغيل المرجل لدينا. التحليل الميكانيكي الحراري من المرجل لدينا باستخدام أنسيس-ووركبينش برنامج العناصر المحدودة , سمح لنا لتحديد موقع منطقة التماس، والذي يقع بين لوحة إمالة والاسطوانة الخارجية، وقد سمحت لنا تحليل لدينا أيضا للحد من الضغوط الميكانيكية الحرارية عن طريق التحكم بدرجة حرارة الموقد.

## Sommaire :

Introduction générale :

Problématique :

## Chapitre I : description de la chaudière

I.1 Introduction :	1
I.2 La vapeur :	1
2.1 Définition :	1
2.2 Utilisation industrielle	1
I.3 La chaudière	2
3.1 Définition :	2
3.2 Définition scientifique :	2
3.3 Générateur de vapeur	2
3.4 Description procès de la chaudière	3
3.5 Ballons de la chaudière	3
3.6 Chambre de combustion chaudière	3
3.7 Surchauffeur	3
3.8 Economiseur	4
3.9 Brûleurs	4
3.10 Ventilateur d'air de combustion	4
3.11 Station de dosage	4
I.4 Principe de fonctionnement de la chaudière :	5
4.1 Circuit Eau Vapeur :	5
4.2 Circuit d'air / fumées :	6
I.5 La Combustion	6
5.1 Le rapport air/gaz	7
I.6 Les Différents Instruments De La Chaudière :	8
6.1 Le capteur :	8
6.1.1 Définition :	9
6.2 Corps d'épreuve et Capteurs composites	9
6.3 Les capteurs de température	9
6.3.1 Thermomètre à résistance : PT 100	10
6.4 Les Thermocouples :	10
6.5 Thermomètre manométrique :	11

6.6 Les capteurs de pression :	11
6.6.1 Le manomètre à tube de Bourdon.....	11
Utilisation :	12
6.6.2 Manomètre à membrane .....	12
6.7 Les capteurs de débit :	14
6.7.1 Tube de Venturi :	15
6.7.2 Débitmètre à cible.....	15
6.8 Les Capteurs de Niveau :	16
6.8.1 Le capteur de pression. ....	16
6.8.2 Indicateur de niveau à glace (LG) :	16
6.9 Les Transmetteurs :	17
6.10 Les vannes de régulation :	17
6.10.1 éléments constituant la vanne de réglage :	18
6.11 Les types de vannes utilisées:	19
6.11.1 Vanne à papillon :	19
6.11.2 Les Registres :	20
6.11.3 Les Vannes à Clapets :	20
6.11.4 Les électrovannes :	20
6.11.5 Électrovannes tout ou rien .....	20
6.11.6 Électrovannes proportionnelles :	21
6.11.7 Les Soupapes de Sécurité :	21

## Chapitre II : déferente types des chaudières

II.1 Classification par gamme de puissance.....	23
II.2 Classification par installation (chaudière à usage domestique) .....	23
II.3 Classification par application .....	23
II.4 Classification par type du fluide caloporteur .....	23
II.5 Classification par source de chaleur.....	26
5.1 Chaudière à combustion .....	26
5.2 Chaudière à combustible liquide ou gazeux.....	26
5.3 Chaudière à combustible solide.....	26
5.4 Les inconvénients de la chaudière a combustions.....	28
5.4 Chaudière de récupération.....	29

5.5 Chaudière électrique.....	30
II.6 Classification par construction .....	32
6.1 Chaudière a tube de fumée .....	32
6.2 Chaudière à tube d'eau .....	34
II.7 Classification par type de circulation .....	35
7.1 A circulation naturel.....	35
7.2 A circulation assisté .....	35
7.3 A circulation forcée.....	36
7.4 Chaudière central (urbain).....	37
7.5 Chaudière à tour .....	37

### Chapitre III : dimensionnement et conception d'une chaudière

III.1- Vue d'assemblage.....	41
1-1 Notre chaudière se compose de trois pièces .....	41
III.2-Dimensions de la chaudière .....	42
III.3-Matériau.....	44
3-1 Caractéristiques thermiques :.....	45
3-1-1 La dilatation thermique :.....	45
3-1-2 Conductivité thermique.....	46
3-2 Caractéristiques mécaniques .....	47
III.4-Maillage Elément finis.....	48
III.5-Conditions de contact .....	48
5-1 Contact entre cylindre extérieur et tube de gaz.....	49
5-2Contact entre tube de gaz et plaques de renversement .....	51
5-3Contact entre cylindre ext et plaques de renversement.....	50
III.6-Condition aux limites thermiques.....	50
III.7-Condition aux limites Mécaniques .....	51

### Chapitre IV : Résultat de l'analyse

IV.1 Résultats :.....	544
1.1 Température : .....	544
1.2 Flux de chaleur total.....	555

1.3 Déformation thermique .....	566
1.4 Déformation total équivalente.....	567
1.5 Contrainte équivalente.....	578
1.6 Contrainte (Von-Mises) de la plaque de renversement et les tubes de fumée .....	60
1.7 Contrainte équivalente dans le cordon de la soudure.....	60
Conclusion.....	62

## **LISTE DES FIGURES**

### **Chapitre I :**

Figure I.1 : schéma descriptif de la chaudière.....	7
Figure I.2 : triangle du feu.....	9
Figure I.3: localisation du capteur.....	10
Figure I.4: PT100.....	11
Figure I.5: Thermocouple.....	13
Figure I.6: Thermomètre manométrique.....	13
Figure I.7: manomètre TB.....	14
Figure I.8: manomètre a membrane.....	15
Figure I.9: Diaphragme.....	16
Figure I.10: venturie.....	17
Figure I.11 Débitmètre à cible.....	17
Figure I.12 capteur de niveau (mesure de pression).....	18
Figure I.13 Indicateur de niveau à glace (LG).....	18
Figure I.14: Capteur et transmetteur en situation.....	19
Figure I.15: Vue en coupe d'une vanne de régulation pneumatique.....	20
Figure I.16 : Une vanne à papillon .....	21
Figure I-17 : des Registres.....	22
Figure II-19 positionnement des clapets.....	23
Figure II-20 Une électrovanne.....	23

## Chapitre II :

Figure II.1: Une chaudière à vapeur pour moteur stationnaire.....	24
Figure II.2 du foyer d'une chaudière à charbon à tubes d'eau.....	25
Figure II.3 chaudière de récupération de chaleur (circuit primaire).....	29
Figure II.4 Chaudière électrique (photovoltaïques).....	30
Figure II.5 Chaudières à tubes de fumées.....	33
Figure II.6 Chaudière tubulaire neuve destinée à la locomotive 030T no 101 Pinguely du CFBS.....	33
Figure II.7 Chaudières à tubes de l'eau.....	34
Figure 8 Chaudières central <sup>[11]</sup> .....	37

## Chapitre III :

Figure III-1 : Vue complète d'un Model CAO d'une chaudière a tube de fumée.....	40
Figure III-2 : 1 <sup>ère</sup> pièce : cylindre extérieur.....	40
Figure III-3 : 2 <sup>ème</sup> pièce : plaque de renversement plus les tubes de fumées .....	41
Figure III-4 : 3 <sup>ème</sup> pièce : tube de gaz (bruleur).....	41
Figure III-6 : Coefficient de dilatation thermique en fonction de la température[1].....	44
Figure III-7 : Conductivité thermique en fonction de la température [1].....	45
Figure III-8 : Module de Young en fonction de la température.....	46
Figure III-9 : Maillage de la chaudière.....	47
Figure III-13 : Température a l'intérieur des tubes de fumée 800 °C.....	50
Figure III-14 : Température a l'intérieur de tube de gaz (bruleur) : 1480°C.....	50
Figure III-15 : la force de la gravité appliqué sur la chaudière .....	50
Figure III-16 : Support fixe.....	51
Figure III-17 : la pression d'eau appliqué sur le bruleur .....	51
Figure III-18 : la pression d'eau appliqué sur les tubes de fumée.....	51
Figure III-19 Les conditions de symétrie par rapport au plan YZ.....	52



## Chapitre IV :

Figure IV.1 distribution de la température dans la chaudière .....	53
Figure IV. 2 le flux de chaleur.....	54
Figure IV.3 Déformation thermique .....	55
Figure IV.4 déformation totale équivalente .....	55
Figure IV.5 contrainte équivalente .....	56
Figure IV.6 contrainte équivalente de la plaque de renversement.....	57
Figure IV.7 contrainte équivalente entre la plaque de renversement et le cylindre extérieur.....	57
Figure IV.8 Contrainte de soudure en fonction de la longueur du cordon de la soudure (la température du brûleur 1480°C).....	58
Figure IV.9 Contrainte de soudure en fonction de la longueur du cordon de la soudure (la température du brûleur 1000°C).....	59
Figure IV.10 Contrainte de soudure en fonction de la longueur du cordon de la soudure (la température du brûleur 900°C).....	59
Figure IV.11 Comparaison des résultats précédents.....	60
Figure IV.12 Les axes de la chaudière.....	60
Figure IV.13 Comparaison des résultats de la contrainte thermomécanique au niveau du cordon de la soudure .....	61

## Introduction générale

Le mot chaudière est parmi les mots qu'on entend parler en 1<sup>er</sup> dans une installation industrielle désignait un foyer et son échangeur dans de grosses installations de cuisine et de chauffage.

Dans son acception moderne, il s'agit d'un appareil (voire une installation industrielle, selon sa puissance) permettant de transférer en continu de l'énergie thermique à un fluide caloporteur (le plus généralement de l'eau). L'énergie thermique transférée (source de chaleur) peut être soit la chaleur dégagée par la combustion (de charbon, de fioul, de gaz, de bois, de déchets, etc.), soit la chaleur contenue dans un autre fluide (chaudière de récupération du gaz de combustion ou gaz de procédés chimiques, chaudière « nucléaire » recevant la chaleur du circuit primaire, etc.), soit encore d'autres sources de chaleur (chaudières électriques, par exemple). Les chaudières sont aussi bien des systèmes industriels que domestiques.

À l'intérieur de la chaudière ce fluide caloporteur peut être soit uniquement chauffé (c'est-à-dire qu'il reste en phase liquide), soit chauffé et vaporisé, soit chauffé, vaporisé puis surchauffé (donc avec passage de phase liquide à phase gazeuse).

L'objectif principal de notre projet est de modéliser par éléments finis le comportement thermo-mécanique d'une chaudière à tubes de fumée.

Dans le CHAPITRE I on donne un aperçu général sur les chaudières et leurs composantes (bruleur, thermocouples, les capteurs de pression, les soupapes de sécurité,...).

Le CHAPITRE II s'intéresse aux différents types des chaudières (chaudière à tubes d'eau, chaudière à tubes de fumée, chaudière à combustion, chaudière électrique, ...).

Le CHAPITRE III divulgue une description détaillée d'une chaudière à tube de fumée que nous avons modélisé par un code éléments finis (ANSYS), celle-ci a été conçue par CATIA V.5, dans ce chapitre, nous présentons également tout le détail de la modélisation (Matériaux, géométrie, maillage, conditions aux limites, paramètres de solution).

Dans le CHAPITRE IV nous avons présenté les résultats des contraintes thermo-mécaniques générées dans la chaudière, la valeur des contraintes localisées au niveau des cordons de soudure est très intéressante pour les concepteurs afin de limiter les risques de dessoudage de ces cordons et les problèmes des fuites d'eau qui s'en poursuivent. Nos calculs nous permettent d'améliorer le rendement et la durée de vie de notre chaudière.

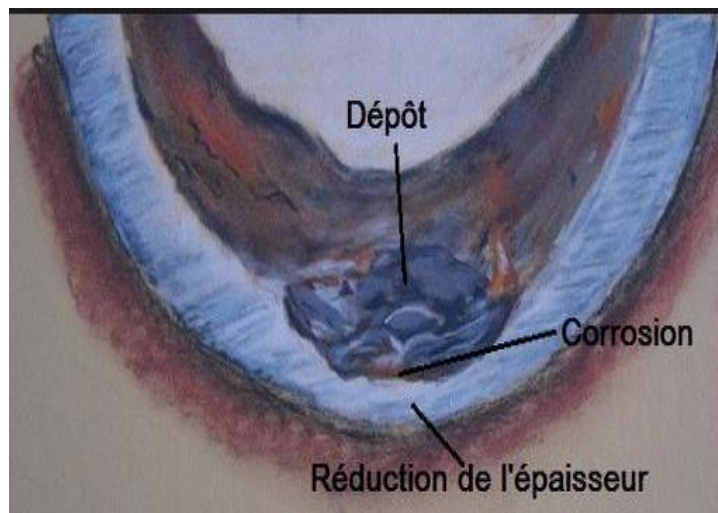
### ❖ **Problématique**

Les chaudières à eau chaude représentent des installations à énergie thermique fortement tendues. On rencontre plusieurs pertes d'énergie lors du fonctionnement d'une chaudière comme par exemple (les pertes dues à une combustion incomplète, pertes de chaleur surfacique, pertes par gaz de combustion).

Un autre problème qu'on peut rencontrer est le dessoudage des cordons de soudure dans une chaudière à cause de la présence d'une contrainte thermo-mécanique élevée, ce problème peut causer par la suite une fuite d'eau dans la conduite de gaz de la chaudière, provoquant l'arrêt de la chaudière.

La contamination des surfaces intérieures des éléments de la chaudière par des couches de tartre (calcaire  $\text{CaSO}_4$ ) à cause de l'utilisation d'une eau non déminéralisée, diminue le transfert de chaleur entre le tube de gaz et l'eau, et baisse les performances de la chaudière.

La corrosion des tubes est l'une des phénomènes importants qui peuvent causer des fissures et réduction de l'épaisseur des tubes dans la chaudière.



## **I.1 Introduction :**

La vapeur d'eau est l'état gazeux de l'eau. C'est un gaz inodore et incolore. Le langage familier et quotidien tend à identifier la vapeur d'eau à un brouillard ou à une fumée, ce qui est faux.

De manière plus générale, la vapeur humide ou vapeur saturante désigne la vapeur en équilibre avec le liquide dans une coexistence de phase.

## **I.2 La vapeur :**

### **2.1 Définition :**

La vapeur est l'état gazeux de l'eau, l'évaporation de l'eau est le changement de phase et d'état de l'eau du liquide à l'état gazeux qui peut être utilisé dans plusieurs domaines domestique et industrielle.

La vapeur est produite dans des chaudières chauffées par un combustible fossile, parfois électriques, ou bien plus généralement par ébullition de l'eau mise au contact d'une source chaude

### **2.2 Utilisation industrielle**

L'industrie a fait de nombreux usages de la vapeur d'eau ; principalement comme fluide caloporteur ou pour le fonctionnement de machines à vapeur (voir en particulier la turbine à vapeur, la locomotive à vapeur). Accessoirement, sa détente est utilisée dans des éjecteurs à vapeur servant à pomper des fluides (pour faire le vide, par exemple), ou dans des sirènes ou sifflets. On utilise aussi ses propriétés de transfert de chaleur pour les procédés de stérilisation.

## **I.3 La chaudière**

### **3.1 Définition :**

Il désigne un appareil (voire une installation industrielle, selon sa puissance) permettant de transférer en continu de l'énergie thermique à un fluide caloporteur (le plus généralement de l'eau). L'énergie thermique transférée (source de chaleur) peut être soit la chaleur dégagée par la combustion (de charbon, de fioul, de gaz, de bois, de déchets, etc.), soit la chaleur contenue dans un autre fluide (chaudière de récupération sur gaz de combustion ou gaz de procédés

chimiques, chaudière « nucléaire » recevant la chaleur du circuit primaire, etc.), soit encore d'autres sources de chaleur (chaudières électriques, par exemple). Les chaudières sont aussi bien des systèmes industriels que domestiques.

À l'intérieur de la chaudière ce fluide caloporteur peut être soit uniquement chauffé (c'est-à-dire qu'il reste en phase liquide), soit chauffé et vaporisé, soit chauffé, vaporisé puis surchauffé (donc avec passage de phase liquide à phase gazeuse).

### **3.2 Définition scientifique :**

Système permettant d'augmenter la température d'un fluide caloporteur afin de déplacer de l'énergie thermique.

### **3.3 Générateur de vapeur**

L'objectif principal de l'équipement est de produire de la vapeur surchauffée pour l'alimentation des turbines à vapeur.

❖ La chaudière se compose principalement de :

### **3.5 Ballons de la chaudière**

Le ballon d'eau et le ballon de vapeur (respectivement ballon inférieur et supérieur) sont positionnés symétriquement à gauche de la chaudière, regardant comme d'habitude la chaudière depuis la façade du brûleur.

Ils sont fournis avec des accès à chaque extrémité permettant au personnel de procéder à leur inspection complète et d'accéder aux tubes pour les opérations d'entretien.

Du ballon d'eau supérieur, tous les tubes d'eau convergent vers le ballon inférieur de vapeur permettant d'assurer la circulation naturelle.

Le ballon de vapeur est équipé avec séparateurs et d'écrans de séchage permettant de garantir la pureté de la vapeur indiquée dans la spécification, ainsi que de piquages pour la sortie de purge continue, aussi que d'une entrée d'eau d'alimentation, deux sorties de vapeur saturée

vers le surchauffeur, d'injection de produits chimiques, d'une entrée d'azote pour la conservation et deux connexions de réserve. <sup>[1]</sup>

Le ballon d'eau inférieure est équipé d'une vanne pour la purge intermittente de chaudière et des vannes pour la vidange à l'arrêt (à ouvrir lorsque l'eau à l'intérieur de la chaudière est à température ambiante).

### **3.6 Chambre de combustion chaudière**

Toutes les parois de la chambre de combustion sont constituées de tubes à membrane remplis d'eau refroidie. Ces tubes sont sans soudure.

L'utilisation des membranes soudées aux tubes assure une très haute étanchéité aux fumées et une circulation équilibrée de l'eau bouillante.

Les tubes constituant la forme en "D" sont directement reliés aux ballons par expansion mécanique. Les tubes des parois frontale et arrière sont soudés aux collecteurs inférieurs et supérieurs relatifs.

La plupart des tubes de la paroi avant sont courbés pour créer le gorge de brûleur, tandis que quelques tubes de la paroi arrière sont courbés pour permettre l'insertion d'une porte d'accès pour l'inspection.

Les collecteurs inférieurs et supérieurs des tubes des parois frontale et arrière sont reliés aux deux ballons par des tubes d'alimentation et de retour externes.

Les dimensions de la chambre de combustion sont conçues de façon à assurer l'approprié refroidissement des gaz de combustion.

### **3.7 Surchauffeur**

La section du surchauffeur (SH) est située en entrée de la section de convection, à la fin de la chambre de combustion. Elle est traversée par la vapeur saturée sortant du ballon de vapeur.

Le circuit SH est constitué de deux sections en série, surchauffeur primaire (SH1) et secondaire (SH2), avec un désurchauffeur à injection d'eau intermédiaire pour le contrôle de la température vapeur finale.

La quantité d'eau injectée est contrôlée par une vanne de régulation. L'eau est injecté au désurchauffeur qui introduit un débit d'eau dans la tuyauterie de vapeur qui relie le surchauffeur primaire au surchauffeur secondaire.

### 3.8 Economiseur

En sortie du générateur de vapeur, un économiseur (ECO) externe a été installé, constitué par deux sections de tubes à ailettes sans soudure, alimentées en série par l'eau, avec les fumées qui chauffe les tubes par écoulements croisés.

Les tubes sont horizontaux, soudés à des collecteurs horizontaux (entrée – intermédiaire – sortie). Pour assurer la vitesse propre à l'eau en circulation, des séparateurs ont été installés à l'intérieur des collecteurs d'entrée et de sortie de chaque section. [2]

L'ECO est équipé de soupapes de drainage et de vannes d'évent.

### 3.9 Brûleurs

Le générateur de vapeur est équipé avec un brûleur (B-601) adaptés à la combustion du gaz naturel.

La charge maximale continuée de la chaudière est 30 t/h; le minimum technique de la chaudière est 14 t/h

### 3.10 Ventilateur d'air de combustion

Le générateur de vapeur est équipé d'un ventilateur d'air de combustion F-801, couplé à son moteur électrique une turbine à vapeur.

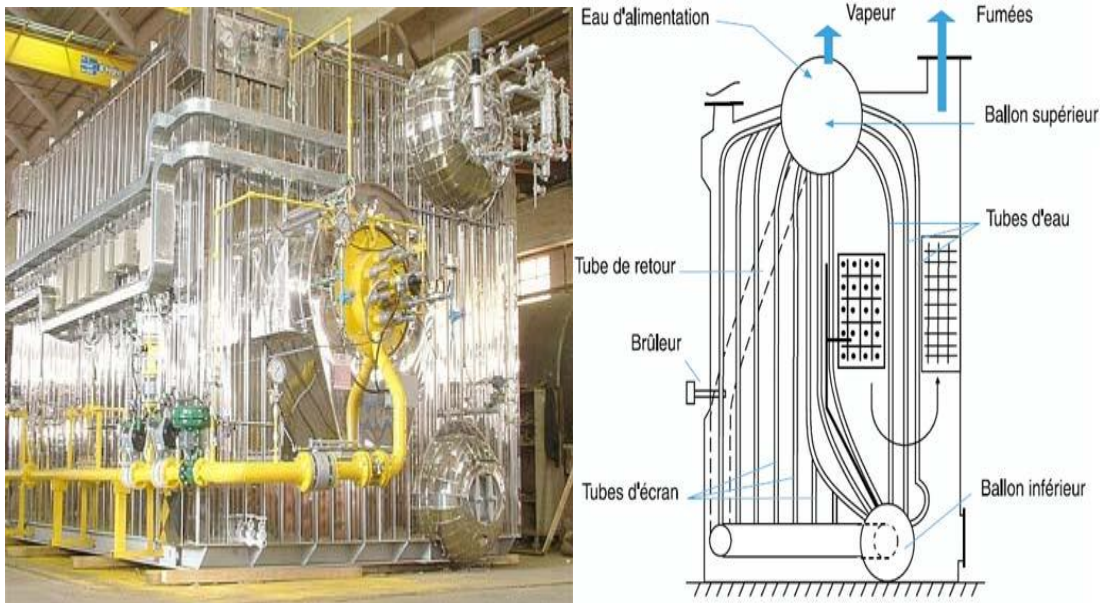
### 3.11 Station de dosage

Le générateur de vapeur est équipé d'un système de dosage pour l'injection de produit correctif (phosphate) dans le ballon vapeur.

Le système de dosage inclus principalement:

- une pompe de dosage, ainsi que les relatifs moteurs, raccordement, vannes et appareillages Assemblés ;
- un réservoir de collecte en plastique.





**Figure I-1 : schéma descriptif de la chaudière**

## **I.4 Principe de fonctionnement de la chaudière :**

### **4.1 Circuit Eau Vapeur :**

Le circuit d'eau/vapeur du générateur de vapeur fonctionne comme suit :

- ❖ l'eau d'alimentation de la chaudière en provenance des pompes alimentaires entre dans l'économiseur (ECO), qui est un échangeur de chaleur (eau/fumées) externe à la chaudière, constitué de tubes à ailettes. Dans cette section, la température de l'eau d'alimentation augmente par absorption de la chaleur thermique des fumées,
- ❖ En sortie de l'ECO, l'eau d'alimentation entre dans le ballon supérieur de la chaudière (appelé "ballonne vapeur"), le fonctionnement de la chaudière dépend de la "circulation naturelle vapeur/eau", avec circuits d'évaporation formés par l'intégralité des tubes de la chambre de combustion et par les tubes les plus chauds du circuit d'évaporation convectif de la chaudière.
- ❖ le mélange d'eau et de vapeur saturées a lieu à l'intérieur des tubes d'évaporation de la chaudière, en quantité et qualité nominales. Puis, à travers les séparateurs internes du ballon supérieur, vapeur saturée est séparée des gouttelettes d'eau saturée,

- ❖ une tuyauterie de raccordement externe guide la vapeur saturée “séchée”, en sortie du ballon vapeur de la chaudière, vers le circuit du surchauffeur interne (SH) où la vapeur est chauffée à température nominale,
- ❖ le surchauffeur est constitué par deux sections en série (surchauffeur primaire et secondaire), d'un désurchauffeur intermédiaire placé au milieu des deux sections par une vanne de régulation (pour contrôler le débit eau qui entre dans le désurchauffeur) et des tuyauteries de connexion.
- ❖ une tuyauterie de connexion externe guide le flux de vapeur surchauffée, à la température et à la pression contrôlée, vers le réseau de vapeur du Client.

#### **4.2 Circuit d'air / fumées :**

Le circuit d'air/fumées du générateur de vapeur fonctionne comme suit :

- l'air de combustion est puisé dans l'air ambiant par un ventilateur centrifuge entraîné par un moteur électrique ou par une turbine à vapeur. Plus particulièrement, en entrée, l'air de combustion passe à travers une grille, un silencieux d'admission, un débitmètre à venturi et un registre de régulation modulante.
- après le ventilateur centrifuge, l'air passe dans une gaine reliant en arrivant à une boîte à vent où un brûleur à gaz naturel est installé,
- lorsque la combustion a lieu dans le brûleur, les fumées à haute température traversent le foyer de la chaudière, qui est entouré des tubes d'eau refroidie capables de garantir une parfaite étanchéité grâce à une construction de type “à membrane”,
- les fumées, à l'extrémité de la chambre de combustion, tournent leur parcours à 180° lorsqu'elles entrent dans le circuit du surchauffeur, puis passent dans la section de convection d'évaporation,
- en sortie de la chaudière, les fumées traversent l'ECO externe, où la température des fumées diminue une première fois grâce à un transfert de chaleur avec l'eau d'alimentation de la chaudière,
- en aval de l'ECO, les fumées traversent une gaine reliant le ECO à la cheminée, et sont déchargées dans l'atmosphère,
- la cheminée en acier au carbone est autoportante avec un hauteur de 25 mètres. [3]

## I.5 La Combustion

La combustion est une réaction exothermique d'oxydoréduction. Lorsque la combustion est vive, elle se traduit par une flamme dans le cas d'une combustion ou par une explosion, si le front de flamme dépasse la vitesse du son.

La réaction chimique de combustion ne peut se produire que si l'on réunit trois éléments : un combustible, un comburant, une énergie d'activation en quantités suffisantes.



Figure I-3 : triangle du feu

C'est pourquoi on parle du « triangle du feu ».

### 5.1 Le rapport air/gaz

Pour réduire le volume des fumées et donc augmenter le rendement de combustion d'un four, il faut, avant toute autre chose, s'inquiéter sur le rapport air/gaz.

Deux configurations typiques impliquent des approches différentes :

- régulation proportionnelle avec vannes modulantes;
- régulation on/off par brûleur.

Nous nous limitons ici au cas d'une régulation proportionnelle pour laquelle ce sont les vannes de gaz et d'air qui modulent et assurent le maintien du rapport air/gaz adéquat pour une "zone de chauffe" comportant un ou plusieurs brûleurs. En général c'est l'air qui pilote le gaz de manière à garantir qu'il n'y ait de gaz au brûleur que s'il y a de l'air (donc pas d'air => pas de gaz). Pour cela, il y a éventuellement une liaison physique (mécanique ou pneumatique par exemple) entre les deux vannes et, lorsque la température chute sous la consigne, la régulation ouvre la vanne d'air qui ouvre la vanne de gaz. Sur les installations industrielles d'une certaine importance, la liaison entre la vanne d'air et la vanne de gaz est entièrement réalisée par une électronique de mesures et de régulation.

Lorsque la température chute sous la consigne, la régulation commande l'ouverture de la vanne d'air et une mesure du débit d'air (souvent au moyen d'un diaphragme) permet le calcul du débit de gaz requis. Ce calcul consiste à diviser le débit d'air mesuré par le rapport air/gaz demandé (la consigne de rapport air/gaz) :

Consigne de débit de gaz = (débit de gaz mesurer / consigne rapport air/gaz).

La régulation adapte alors l'ouverture de la vanne de gaz de manière à obtenir une mesure de débit de gaz (diaphragme) aussi proche que possible de la consigne calculée.

On notera au passage que si le plus souvent c'est l'air qui pilote le gaz. En effet, lorsque la régulation de température demande une eau de gestion rapide de la puissance thermique au brûleur, la vanne de gaz s'ouvre en principe en retard par rapport à la vanne d'air et le mélange air/gaz passera par une période de manque de gaz (ou d'excès d'air) qui n'occasionne pas de risque. Par contre, lorsque la régulation de température provoque une diminution rapide de la puissance, la vanne de gaz se ferme en retard sur celle d'air et le mélange peut être trop riche (manque d'air) pendant la période de transition. Dans ce cas, il y a formation de CO avec des risques de postcombustion (éventuellement explosive) dans le four, le carneau ou la cheminée avec altération des réfractaires par l'atmosphère réductrice. C'est pourquoi les installations les plus "soignées" sont configurées pour fonctionner en "régulation croisée" « c'est-à-dire que lors d'une augmentation de la puissance c'est l'air qui pilote le gaz et lors d'une diminution, c'est le gaz qui pilote l'air.

Nous voyons donc que, dans le cas d'une régulation proportionnelle électronique, pour maîtriser le rapport air/gaz et, par-là, le volume des fumées, il faut :

- maîtriser la valeur de consigne de rapport air/gaz;
- disposer de bonnes mesures de débits d'air et de gaz;
- idéalement, connaître l'état actuel de l'air atmosphérique ( $t^\circ$  et humidité).

## I.6 Les Différents Instruments De La Chaudière :

### 6.1 Le capteur :

#### 6.1.1 Définition :

Un capteur est un organe de prélèvement d'information qui élabore à partir d'une grandeur physique, une autre grandeur physique de nature différente (très souvent électrique). Cette grandeur représentative de la grandeur prélevée est utilisable à des fins de mesure ou de commande.



Figure I.3 : schéma descriptif de la chaudière

## 6.2 Corps d'épreuve et Capteurs composites

Pour des raisons de coût ou de facilité d'exploitation on peut être amené à utiliser un capteur, non pas sensible à la grandeur physique à mesurer, mais à l'un de ses effets. Le corps d'épreuve est le dispositif qui, soumis à la grandeur physique à mesurer produit une grandeur directement mesurable par le capteur.

**Etendue de mesure:** Elle définit la plage des valeurs possibles du mesurande (valeur max- min) pour laquelle le capteur répond aux spécifications du constructeur.

**Caractéristique de transfert:** c'est la courbe représentant l'évolution du paramètre électrique de sortie par rapport au mesurande (entrée) dont il est l'image. En un point de fonctionnement du capteur, la pente de cette courbe donne localement la SENSIBILITE du capteur. Un capteur est LINEAIRE s'il présente la même sensibilité sur toute l'étendue de mesure (la caractéristique est donc une droite...). On parle aussi de « FONCTION DE TRANSFERT » pour préciser la relation qui existe entre entrée et sortie

**La Résolution :** caractérise la capacité du capteur à détecter la plus petite variation possible du mesurande.

**Le Temps de Réponse** correspond à l'attente minimale nécessaire après variation du mesurande pour la prise en compte d'un résultat avec une précision donnée. Le temps de réaction d'un capteur dépend de *l'inertie* mécanique, thermique ou électrique du corps d'épreuve, mais aussi des composants électriques éventuels qui pré-conditionnent le signal délivré par le capteur.

**L'Environnement de Mesure :** est l'ensemble des grandeurs physiques autres que le MESURANDE susceptibles d'agir sur capteur et d'en modifier les performances: perturbations électromagnétiques, température, vibrations, humidité..... Ces différentes influences sur le résultat du capteur sont généralement quantifiées et données dans la documentation technique (coefficients, courbes....) que ne manquera pas de consulter le technicien lors du choix de son capteur. <sup>[4]</sup>

## 6.3 Les capteurs de température

### 6.3.1 Thermomètre à résistance : PT 100

La mesure de la température se fait en utilisant un thermomètre ou précisément une sonde thermométrique voire figure.

Thermomètre à résistance de platine est un dispositif permettant de mesurer la température par l'intermédiaire de la variation de la résistance de son matériau qui compose par une sonde de température.

Ce dernier est un dispositif permettant de transformer



Figure I-4 : PT100

l'effet du réchauffement ou du refroidissement sur leurs composants en signal électrique. Le type le plus courant appelé PT100, à une résistance de 100 Ohms à 0 °C et 138,5 ohms à 100 °C.

En injectant un courant constant et continu, il suffit alors de mesurer la tension, qui étant proportionnelle à la résistance donne une image de la température mesurée. Pour faire un étalonnage au point-fixe, on relève la valeur de la résistance électrique de l'élément sensible pour un courant (normal) de 1 mA, puis à 1,414 mA. De ces deux points de mesure une extrapolation de la résistance électrique du platine à courant nul, synonyme d'une mesure idéale sans auto-échauffement, peut être déterminée. Ces capteurs sont plus linéaires que les thermocouples.

### 6.4 Les Thermocouples :

Le système est constitué de deux(02) fils métallique de nature différentes, soudés dans leurs extrémité et à l'autre extrémité deux (02), bornes de raccordement. Lorsque la température varie dans l'extrémité soudé il y a création d'une force électro motrice (fem) proportionnelle à la variation de température donc  $F(T) = F(\text{ddp})$



**Figure I-5: Thermocouple**

### **6.5 Thermomètre manométrique :**

Ces thermomètres sont constitués d'un manomètre ; un tube capillaire et un petit réservoir.

Le réservoir est rempli d'un certain liquide (mercure, toluène ....) .Si le liquide subit une variation de température la volume du liquide varie aussi (dilatation volumique) de même pour la pression a l'intérieur du système change de valeur.



**Figure I-6 : Thermomètre manométrique**

La pression indiquée est fonction linéaire de la température alors on mesure la  $T_e$  en mesurant la pression du système.

### **6.6 Les capteurs de pression :**

#### **6.6.1 Le manomètre à tube de Bourdon**

Le tube de Bourdon est brasé, soudé ou vissé avec le support de tube qui forme généralement une pièce complète avec le raccord. Par l'intermédiaire d'un trou dans le raccord, le fluide à mesurer passe à l'intérieur du tube. La partie mobile finale du tube se déplace lors de changement de pression (effet Bourdon). Ce déplacement qui est proportionnel à la pression à mesurer, est transmis par l'intermédiaire du mouvement à l'aiguille et affiché sur le cadran en tant que valeur de pression. Le système de mesure, le cadran et l'aiguille sont montés dans un boîtier. <sup>[5]</sup>



1. Organe moteur, tube de Bourdon
2. Support de tube
3. Capuchon du tube
4. Secteur denté
5. Bielle
6. Engrenage
7. Aiguille
8. Cadran

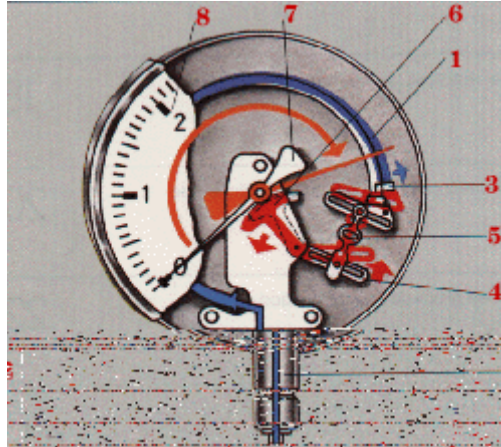


Figure I-7 : manomètre TB

Utilisation :

Les manomètres à tube de Bourdon sont utilisés pour la mesure de pressions positives ou négatives de fluides gazeux ou liquides, à condition que ceux-ci ne soient ni hautement visqueux ni cristallisant. Les étendues de mesure s'étalent sur toutes les plages selon DIN de 0... 0,6 bar à 0... 4000 bars. La forme du tube dépend de l'étendue de mesure. Pour les étendues jusqu'à 0... 40 bars inclus on utilise normalement la forme en arc et à partir de 0... 60 bars la forme hélicoïdale. Les appareils sont fabriqués avec le raccordement vertical ou arrière. Il est conseillé de ne les utiliser qu'entre le premier quart et le dernier quart de l'échelle à cause de l'hystérésis. Il convient également de les protéger contre les risques de surpression ou de dépassement d'échelle. Le tube de Bourdon ne permet pas de mesurer les phénomènes rapides et évolutifs de pression. L'incertitude de mesure varie de 0,02 à 0,2 % pour le domaine de mesure de 0 à  $3 \cdot 10^8$  Pa. <sup>[6]</sup>

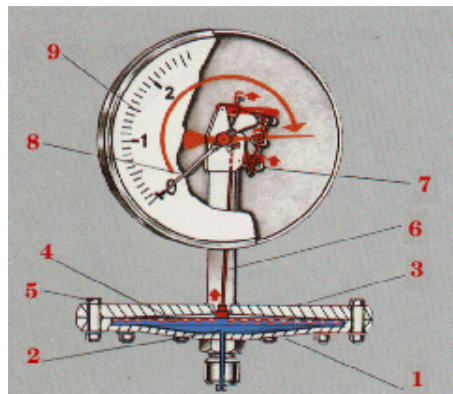
### 6.6.2 Manomètre à membrane

La membrane est tendue entre deux brides. Par un trou dans le raccord, le fluide à mesurer arrive dans la chambre de pression en dessous de la membrane. La membrane se déplace sous l'effet de la pression. Le déplacement de la membrane est proportionnel à la pression mesurée et est transmis par l'intermédiaire du mouvement à l'aiguille et affiché sur le cadran en tant que



valeur de pression. Afin d'être protégés contre des détériorations, le système de mesure, le cadran et l'aiguille sont montés dans un boîtier. En cas de risque de corrosion due à des fluides agressifs, on peut protéger toutes les parties en contact avec le fluide par enduction de plastique ou par un film de protection.

1. Bride inférieure 2. Chambre de pression 3. Bride supérieure 4. Organe moteur, la membrane 5. Vis 6. Bielle 7. Engrenage 8. Aiguille 9. Cadran.



**Figure I-8 : manomètre a membrane**

Utilisation :

Les manomètres à membrane sont utilisés principalement pour la mesure de faibles pressions positives ou négatives de fluides gazeux ou liquides. Les étendues de mesure possibles s'étalent sur toutes les plages selon DIN de 0...16 mbar à 0... 40 bars. Les membranes de ces manomètres sont très minces et ondulées. De par leur forme, ils sont moins sensibles aux vibrations que les manomètres à tube et sont plus faciles à protéger contre les surcharges et les fluides agressifs. Pour l'utilisation avec des fluides hautement visqueux ou cristallisant il est possible de les équiper de brides ouvertes. Les appareils sont fabriqués avec un montage de membrane horizontal (à angle droit par rapport au cadran) ou vertical (parallèle par rapport au cadran). Étant donné qu'il n'y a pas de différence fondamentale de fonctionnement, la description suivante concerne l'exécution la plus courante, avec la membrane horizontale.

### 6.7 Les capteurs de débit :

Par mesure de pression différentielle à l'aide d'organe déprimogènes

Ces débitmètres de type manométrique sont les plus utilisés pour la mesure des débits de fluide. Ils exploitent la loi de BERNOULLI qui indique la relation existant entre le débit et la perte de charge résultant d'un changement de section de la conduite. Ces dispositifs sont utilisables que lorsque l'écoulement est turbulent. En partant de la relation  $Q_v = S \times V$  et en supposant une masse volumique constante (fluide incompressible), on peut écrire l'équation de continuité :

$$Q_v = S_1 \times V_1 = S_2 \times V_2 \quad (1)$$

Celle ci montre qu'avec un écoulement régulier et uniforme, une réduction de diamètre de la canalisation entraîne une augmentation de la vitesse du fluide, donc de l'énergie potentielle ou de la pression de la canalisation. <sup>[7]</sup>

La pression différentielle est convertie en débit volumique, à l'aide de coefficients de conversion, selon le type de débitmètre manométrique utilisé et le diamètre de la conduite.

#### ➤ Diaphragme.

Il s'agit d'un disque percé en son centre, réalisé dans le matériau compatible avec le liquide utilisé. Le diaphragme concentrique comprime l'écoulement du fluide, ce qui engendre une pression différentielle de part et d'autre de celui-ci. Il en résulte une haute pression en amont et une basse pression en aval, proportionnelle au carré de la vitesse d'écoulement. C'est le dispositif le plus simple, le moins encombrant et le moins coûteux. <sup>[8]</sup>

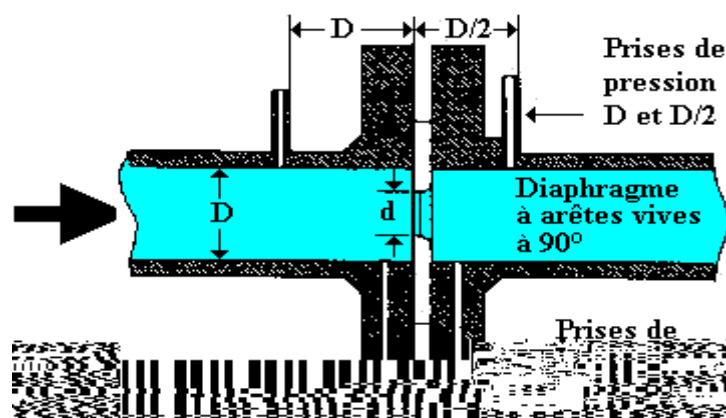


Figure I-9 : Diaphragme

### 6.7.1 Tube de Venturi :

Il est constitué d'un tronc de cône convergent, d'un col cylindrique et d'un tronc de cône divergent. Le dispositif offre une bonne précision, mais reste coûteux et encombrant. Il dispose d'un bon comportement du point de vue perte de charge, usure et encrassement. Comme avec le diaphragme, les mesures de pression différentielle sont converties en débit.

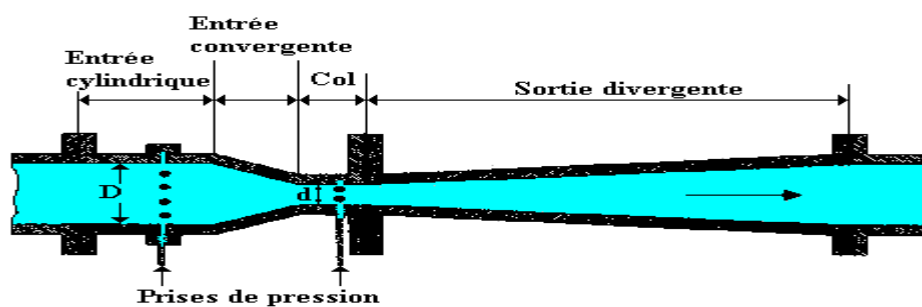


Figure I-10: venturie

### 6.7.2 Débitmètre à cible.

Il comprend un disque (cible), centré dans une conduite. La surface de la cible est placée à 90° par rapport à l'écoulement du fluide. La force exercée par le fluide sur la cible permet une mesure directe du débit de fluide.

Comme précédemment, le signal de sortie est une pression différentielle, un calculateur est nécessaire pour l'obtention d'un signal proportionnel au débit.

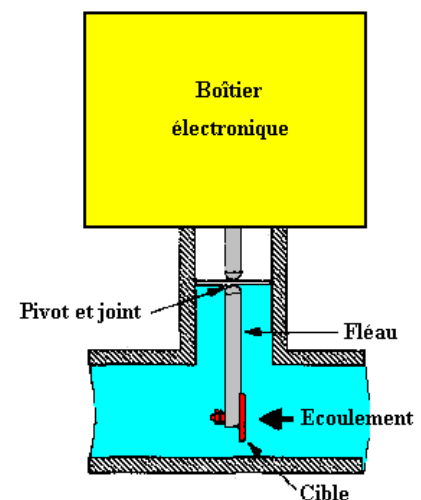


Figure I-11 Débitmètre à cible

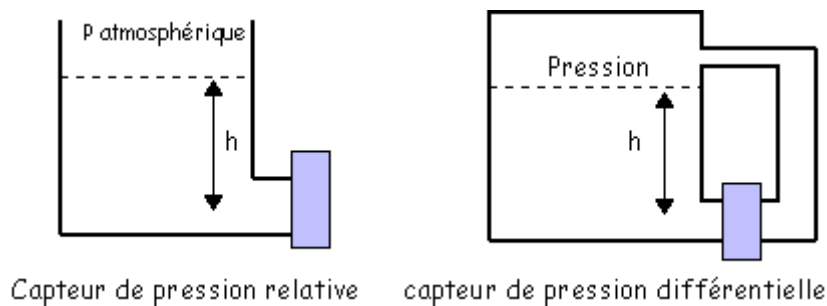
**6.8 Les Capteurs de Niveau :**

6.8.1 Le capteur de pression.

Il mesure la pression relative au fond du réservoir quand celui-ci est ouvert à l'air libre, cette pression est l'image du niveau h du liquide .

$$P = \rho \cdot g \cdot h \tag{2}$$

La pression différentielle quand le réservoir est fermé et sous pression.



**Figure I-12 capteur de niveau (mesure de pression)**

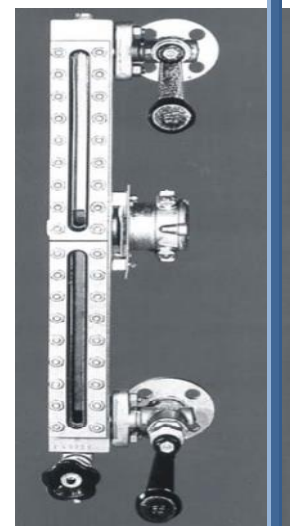
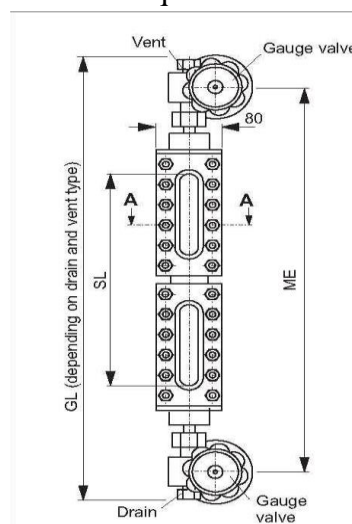
**6.8.2 Indicateur de niveau à glace (LG) :**

C'est un appareil de mesure direct est utilisé pour les fluides liquides.

Son principe de fonctionnement est basé sur la communication directe du tube d'où le niveau est transféré directement depuis le ballon.

L'opération est sécurisée par des vannes de gardes.

Il possède aussi une vanne pour la vidange appelé vanne de drainage.



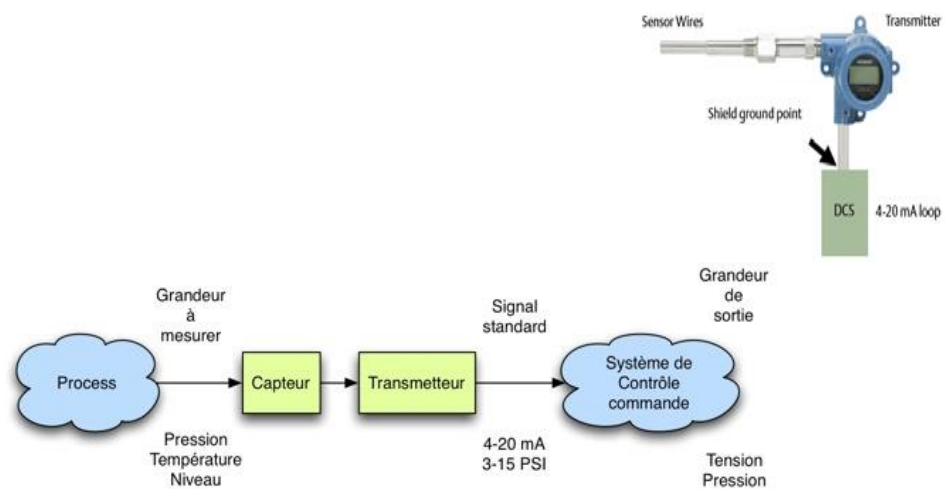
**Figure I-13 : Level Glass**

### 6.9 Les Transmetteurs :

C'est un dispositif qui converti le signal de sortie du capteur en un signal de mesure standard. Il fait le lien entre le capteur et le système de contrôle commande.

Le couple capteur+transmetteur réalise la relation linéaire suivante entre la grandeur mesurée et le signal de sortie

On peut l'utiliser aussi comme étant un afficheur numérique



**Figure I-14 : Capteur et transmetteur en situation**

- Transmetteur polyvalent offrant une fiabilité et une précision comparables pour répondre aux besoins de procédés exigeants
- Optimisez le rendement de votre site et renforcez la fiabilité des mesures grâce à des Caractéristiques et spécifications éprouvées
- Styles de transmetteurs à montage en tête DIN A ou à montage sur rail disponibles
- Communique au moyen des protocoles de communication 4-20mA/HART, bus de terrain FOUNDATION ou Profibus PA.

### 6.10 Les vannes de régulation :

Une vanne de régulation représentée par la figure est un actionneur qui associe un corps de vanne avec une motorisation électrique, voire pneumatique dans des applications industrielles. La vanne de régulation est souvent modulante et plus rarement TOR (Tout ou Rien). Il existe des vannes 2 voies et des vannes 3 voies en fonction du système hydraulique de l'installation.

Pour placer la vanne sur la tuyauterie il faut bien respecter le sens d'écoulement précisé par la flèche figurant sur l'extérieur du corps de vanne et même utiliser les joints conformes au type de raccordement prévu. Avant le montage de la vanne il est impératif de procéder au nettoyage de la tuyauterie de tous les corps étrangers. <sup>[9]</sup>

### 6.10.1 éléments constituant la vanne de réglage :

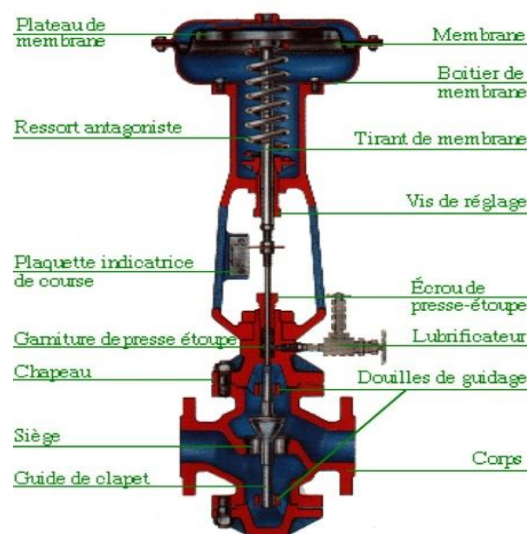
La vanne comporte deux parties principales représentées dans la figure :

**a) Servomoteur :**

C'est l'élément qui reçoit le signal de commande et le transforme en un déplacement il est en général composé d'une membrane souple et d'un ressort hélicoïdal.

**b) Corps de vanne :**

Il comporte un ou plusieurs clapets qui déterminent un orifice de section variable au travers duquel la circulation du fluide est contrôlée.



**Figure I-15 : Vue en coupe d'une vanne de régulation pneumatique**

On peut distinguer certain nombre d'éléments auxiliaires de la vanne :

- Un contacteur de début et de fin de course
- Un filtre détendeur

- Un positionneur qui sert à régler l'ouverture de la vanne en accord avec le signal de commande.

## 6.11 Les types de vannes utilisées:

### 6.11.1 Vanne à papillon :

Parmi les différentes vannes les plus utilisées dans la chaudière, c'est la vanne papillon illustrée dans la figure (II-17) qui est constituée d'une plaque circulaire (fonte, bronze, acier, etc. ...) pivotant sur un axe. Cet axe est monté sur un roulement à billes pour que la commande soit aisée et sans jeu exagéré.

Ces vannes sont surtout employées pour régler le débit des gaz à basse pression. Pour des raisons d'équilibrage leur emploi est beaucoup plus délicat avec des gaz à haute pression, le papillon doit être parfaitement équilibré dynamiquement. Pour cette raison elles ne sont jamais employées avec des grandes pertes de charge. Le servomoteur est de type classique à membrane et à ressort antagoniste. Les vannes papillon sont des vannes à faible encombrement, caractérisées par la simplicité (peu de pièces constitutives) avec un prix de revient faible, surtout pour les grands orifices, une absence de poche de rétention de fluide, comportement satisfaisant avec les pulvérulents et les fluides, très bonne étanchéité, surtout avec joints élastomères avec une faible perte de charge et même adapté à des manœuvres fréquentes. <sup>[10]</sup>



Figure I-16 : Une vanne à papillon

### 6.11.2 Les Registres :

les registres sont composés d'un ou plusieurs volets ou lames pivotantes prévues de telle sorte qu'elles occupent plusieurs positions pour régler le débit d'air utilisé pour les foyers de combustion ou bien une canalisation d'air de conditionnement .

### 6.11.3 Les Vannes à Clapets :

Elles utilisent un ou plusieurs clapets pour obturer le passage du fluide, ces vannes sont les plus utilisées en régulation. Elles peuvent être à simple ou à double sièges.



Figure I-17 : des Registres

### 6.11.4 Les électrovannes :

Une électrovanne ou électrovalve est une vanne commandée électriquement. Grâce à cet organe il est possible d'agir sur le débit d'un fluide dans un circuit par un signal électrique.

Il existe deux types d'électrovannes : tout ou rien et proportionnelle.

### 6.11.5 Électrovannes tout ou rien

L'état change suivant qu'elles sont alimentées électriquement ou non. Il existe deux sortes d'électrovannes tout ou rien :

- Les électrovannes dites normalement ouvertes, qui sont entièrement ouvertes en l'absence d'alimentation électrique et qui se ferment lorsqu'elles sont alimentées.
- Les électrovannes dites normalement fermées, qui sont entièrement fermées en l'absence d'alimentation électrique et qui s'ouvrent lorsqu'elles sont alimentées.



### 6.11.6 Électrovannes proportionnelles :

Les électrovannes proportionnelles peuvent être ouvertes avec plus ou moins d'amplitude. Selon les types de vannes l'ouverture peut être proportionnelle au courant électrique de l'alimentation, ou à la tension électrique de l'alimentation. Ce type d'électrovanne est généralement piloté par l'intermédiaire d'une commande.



Figure II-18 positionnement des clapets

### 6.11.7 Les Soupapes de Sécurité :

La soupape de sécurité contrôle et limite la température et la pression d'un fluide contenue dans le ballon ou un collecteur. Elle évite que la température /pression ne dépasse pas le seuil de tarage qui empêche l'explosion et la déstabilisation du système.

Lorsque la valeur de tarage est atteinte, la soupape évacue une quantité d'eau suffisante pour que la température et la pression reviennent aux conditions normales de fonctionnement de l'installation.

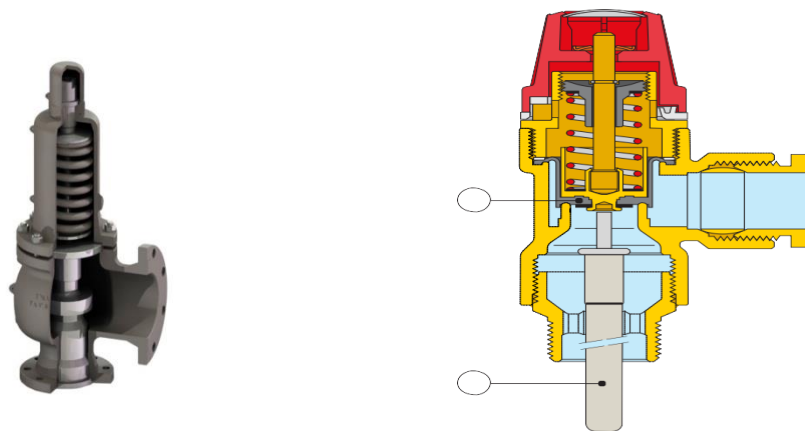


Figure II-20 Une électrovanne

❖ **NOTE ET REFEREBNCE**

[1] : Manuel d'instruction FBM Algérie.( Automation& instrument)

[2] :**H. OGATA** instrument engineering Instrumentation CIRA

[3] : Patrick PROUVOST automatique contrôle et régulation – Edition DUNOD, 2002

[4] : **AUTOMATE SIEMENSABDALLA BSATA**, ingénieure, professeur au collège

[5] : **Expérience de l'ingénieur** ; Saint-Laurent, Instrumentation et automation, deuxième édition, 15 mars 2008

[6] : **BMS** Burner management système (fireye)

[7] : Megan STAYBORG - Lessons in industrial instrumentation .version 2012

[8] : Megan STAYBORG - Lessons in industrial instrumentation .version 2013

- ❖ Il existe une grande variété de chaudières. On peut classifier les chaudières suivant différents critères :

## **II.1 Classification par gamme de puissance**

Les réglementations classifient les chaudières par gammes de puissance :

- Puissance inférieure à 70 kW : chaudières individuelles ;
- Puissance supérieure à 70 kW : chaudières de type industriel.

## **II.2 Classification par installation (chaudière à usage domestique)**

Il existe deux types d'installation de chaudières domestiques :

- Chaudières au sol : Les chaudières au sol sont en général utilisées pour des habitations disposant d'un sous-sol ou d'un garage. Elles occupent une place importante<sup>3</sup> :
- Chaudières murales : Les chaudières murales conviennent aux habitations de petite taille (appartements). Elles offrent une puissance moindre que les chaudières au sol.

## **II.3 Classification par application**

- Utilisation domestique (chauffage central) ;
- Chauffage collectif ;
- Applications industrielles (agro-alimentaire, chimie, papeterie, cimenterie, etc.) ;
- Centrales thermiques.

## **II.4 Classification par type du fluide caloporteur**

Une chaudière échange de l'énergie thermique par l'intermédiaire de fluides caloporteurs qui ensuite la véhiculent jusqu'au point d'utilisation.



**Figure II.1: Une chaudière à vapeur pour moteur stationnaire** <sup>[14]</sup>

1. Si le fluide caloporteur utilise la chaleur massique pour déplacer cette énergie le circuit est dit monophasique. Une pompe met en mouvement cette masse fluide chauffée, c'est le circulateur.
2. Pour les fortes puissances sont utilisés des circuits diphasiques. Ils utilisent le cumul de la chaleur massique et de la chaleur latente de vaporisation. Ils ont une énergie spécifique plus élevée.

❖ Les principaux fluides caloporteurs utilisés sont :

- l'eau (son traitement pour cet usage est important):
  - l'eau chaude est principalement utilisée dans les systèmes de chauffage de locaux d'habitation, commerciaux ou industriels. Dans le domaine du chauffage central domestique, c'est quasiment le seul fluide utilisé,
  - l'eau surchauffée est principalement utilisée dans le chauffage urbain. On peut aussi la trouver dans l'industrie. Pression et température courantes d'usage tournent autour de 20 bars à 180 °C avec retour à 90 °C.

- la vapeur d'eau :
  - la vapeur saturée est principalement utilisée dans les procédés industriels. La vapeur produite par la chaudière sert alors à chauffer des fluides au travers d'échangeurs. Des machines spécifiques comme les machines à papier peuvent également avoir besoin d'une alimentation en vapeur,



**Figure II.2 Foyer d'une chaudière à charbon à tubes d'eau**

- la vapeur surchauffée sert principalement à être turbinée, généralement dans le but d'entraîner un alternateur pour produire de l'électricité. Ce principe est utilisé dans les centrales thermiques. Certaines industries ont des déchets à éliminer, ces déchets utilisés comme combustibles leur permettent de produire de l'énergie électrique et tout ou partie de l'énergie thermique nécessaire à l'usine. On parle alors de cogénération ;
- des fluides thermiques, généralement des huiles, permettant d'atteindre de hautes températures sans nécessiter des pressions élevées. Ils sont utilisés comme énergie thermique par exemple dans l'industrie des panneaux de bois aggloméré. L'utilisation de fluide thermique permet également de meilleures précisions dans la régulation de température. Cependant, l'utilisation de fluide thermique génère de nombreuses contraintes d'exploitation pour les industriels, ils sont de plus en plus remplacés par de la vapeur ;
- des sels fondus. Il s'agit alors de chaudières très spéciales qui n'ont pas ou peu d'exemples d'utilisation industrielle. Le sodium dans quelques usages nucléaires. <sup>[3]</sup>

## II.5 Classification par source de chaleur

### 5.1 Chaudière à combustion

### 5.2 Chaudière à combustible liquide ou gazeux

Les chaudières à combustibles liquides et gazeux sont par construction très proches. Dans ce type de chaudière, l'élément assurant la combustion s'appelle le brûleur. Les combustibles utilisés sont principalement :

- le gaz naturel,
- le gaz de pétrole liquéfié
- le fioul domestique
- le fioul lourd

Une chaudière à combustible liquide ou gazeux peut comporter un ou plusieurs brûleurs.

### 5.3 Chaudière à combustible solide

Il existe de nombreux procédés de combustion pour les chaudières à combustibles solides. On peut séparer les foyers à combustibles solides en trois grandes familles :

- les foyers à grille ;
- les foyers à lit fluidisé ;
- les foyers à charbon pulvérisé.

#### Les foyers à grilles

- Les grilles à gradins constituent un plan incliné mouvant sur lequel le combustible brûle en couche. La couche de combustible est insérée en haut de la grille, souvent à l'aide d'un poussoir, et le mouvement de la grille fait avancer le combustible en ignition. En bas de la grille, il ne reste plus que les cendres qui sont évacuées dans une fosse. Les grilles à gradins sont plutôt utilisées pour les petites chaudières (jusqu'à 2 ou 3 MW environ) ou pour les ordures ménagères.
- Les grilles mécaniques sont constituées d'un tapis roulant métallique perméable à l'air. Ces grilles utilisent le principe de combustion en couche. Elles sont utilisées presque

exclusivement pour le charbon sur une très vaste gamme de puissance de quelques mégawatts à plus de 100 MW).

- Le speeder stoker utilise le principe de projection du combustible dans tout l'espace de la chambre de combustion. Il est utilisé pour les charbons et combustibles végétaux pour des puissances allant de quelques MW à plus de 100 MW.
- Les foyers « volcans » aussi appelés « understoker ». Le combustible est introduit par le dessous de la grille. Ce principe est utilisé pour des puissances n'excédant pas quelques MW.

### Les foyers à lit fluidisés

---

Il existe plusieurs types de foyers à lit fluidisé :

- lit fluidisé dense ;
- lit fluidisé circulant (souvent appelés LFC).

Les chaudières à lit fluidisé circulant sont utilisés pour des puissances généralement supérieures à 100 MW. Le lit fluidisé est généralement composé de sable, des cendres du combustible et parfois de calcaire, à haute température, brassées avec l'air primaire. Ces foyers peuvent fonctionner indifféremment avec du charbon, des schistes bitumineux ou des combustibles végétaux. Ils ont l'avantage de fonctionner à des températures de combustion à la fois relativement faibles de l'ordre de 850 °C et très homogènes, ce qui est favorable à de faibles rejets en NOx. L'injection de calcaire permet également une capture des oxydes de soufre. Le concassage nécessaire avant injection dans le foyer est moins important que le broyage fin du combustible pour les chaudières à charbon pulvérisé. La complexité de ce type de technologie fait qu'elle est réservée aux chaudières relativement puissantes. La plus importante chaudière à lit fluidisé circulant mise en service à ce jour délivre une puissance de 460 MW, à Lagisza, en Pologne, mais une unité de 600 MW est actuellement en cours de construction à Baima, en Chine. Mais des modèles de basse puissance font leur apparition pour le chauffage de bâtisse.



### ✚ Les foyers à charbon pulvérisé

Le charbon pulvérisé est introduit dans la chaudière via un ou plusieurs brûleurs. Cette technologie est principalement utilisée dans les centrales électriques au charbon dont les chaudières ont des puissances de plusieurs centaines de MW<sup>6</sup>.

## 5.4 Les inconvénients de la chaudière a combustions

### ✚ Inconvénients du chauffage gaz

- Dans le cas du propane, il faut obligatoirement une bombonne située à l'extérieur du bâtiment à recharger 1 à 2 fois par an. Le propane est par ailleurs l'énergie la plus chère, avec un prix supérieur à celui du fioul ou de l'électricité
- La dépendance envers le prix du baril de pétrole reste forte (mais pas autant qu'avec du fioul)
- La combustion du gaz rejette moins de CO<sub>2</sub> qu'une chaudière fioul, ce n'est cependant pas une solution écologique.

### ✚ Inconvénients du chauffage a fuel

- Le premier inconvénient est la nécessité d'avoir une cuve, généralement de 1000L ou 1500L qui prend beaucoup de place et qu'il faut recharger régulièrement, une à deux fois par an. La chaudière prend également plus de place qu'une chaudière gaz ou qu'une pompe à chaleur.
- L'autre inconvénient est l'impact environnemental de cette solution. En effet, la combustion du fioul rejette beaucoup de CO<sub>2</sub> qui participe à l'effet de serre ainsi que du SO<sub>2</sub> qui provoque des pluies acides.
- On peut enfin noter que la dépendance envers le prix du baril de pétrole est très importante. Si celui-ci venait à augmenter (ce qui est quasiment inéluctable), les utilisateurs du fioul seraient piégés et verraient donc leurs factures de chauffage grimper en flèche.

### ❖ Conclusion

Les chaudières gaz constituent une très bonne solution de chauffage et de production d'eau chaude sanitaire, que ce soit en rénovation en remplacement du fioul, ou dans le neuf, où elles sont en concurrence avec les poêles à granulés. Dans l'idéal, optez pour une chaudière gaz à condensation, bien plus performante.



### 5.4 Chaudière de récupération

L'énergie thermique est récupérée d'un fluide chaud (gaz d'échappement d'une turbine à gaz ou gaz process dans l'industrie chimique, par exemple). Ces chaudières s'apparentent donc aux échangeurs de chaleur, mais doivent leur dénomination de chaudière au fait que le fluide caloporteur chauffé (généralement l'eau) y est vaporisé (au contraire des échangeurs de chaleur).

Rentrent également dans cette catégorie les générateurs de vapeur des centrales nucléaires qui échangent la chaleur entre le circuit primaire et le circuit secondaire. <sup>[5]</sup>



**Figure II.3 Chaudière de récupération de chaleur (circuit primaire)**

### 5.5 Chaudière électrique

L'électricité n'est pas à proprement parler un combustible. C'est cependant une source d'énergie qui est parfois convertie en chaleur dans des chaudières électriques. Il existe plusieurs principes de chauffe. Les chaudières à résistances chauffent l'eau à l'aide d'une résistance électrique immergée dans l'eau. Les chaudières à effet joule chauffent l'eau à l'aide d'électrodes immergées dans l'eau. C'est alors l'effet joule de l'eau qui permet le chauffage de l'eau ou la vaporisation. Les chaudières ioniques projettent des ions à grande vitesse (280 km/s) à l'aide d'un champ électrique, provoquant l'échauffement du liquide caloporteur.

La rareté des chaudières électriques s'explique par le prix de l'électricité qui est une énergie plus coûteuse que la plupart des autres énergies. On trouve des chaudières électriques dans le domaine du chauffage central domestique, dans l'humidification de locaux équipés d'air conditionné (petites chaudières vapeur utilisées pour l'humidification), mais aussi dans l'industrie pour des puissances allant jusque quelques dizaines de MW. Du fait de l'absence de pertes d'énergie par la chaleur sensible des fumées, le rendement des chaudières électriques est souvent proche de 100 %.<sup>[6]</sup>

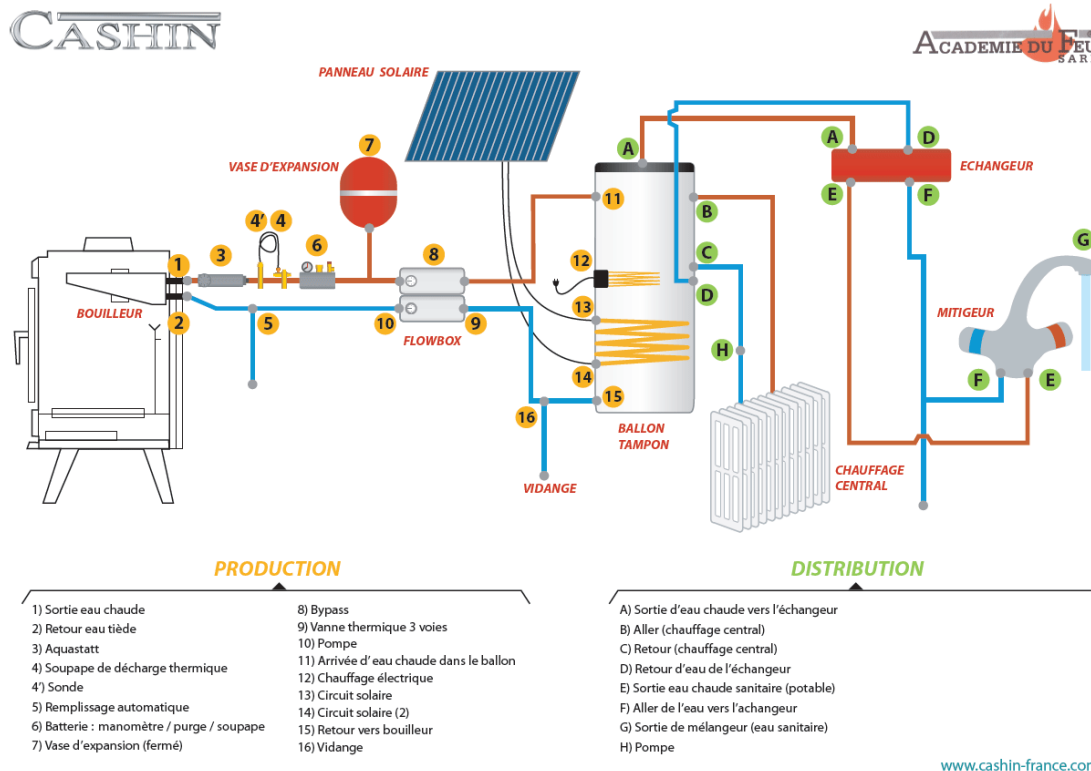


Figure II.4 Chaudière électrique (photovoltaïques)

### Inconvénients du chauffage électrique

- N'est pas éligible aux aides financières en vigueur
- L'électricité est plus chère que la plupart des autres énergies, le chauffage électrique est donc peu rentable à moyen ou long terme.
- L'électricité n'est pas une énergie verte
- Le confort n'est pas forcément assuré notamment avec les convecteurs
- L'électricité est très pénalisée lors des calculs de la RT 2012, à cause du facteur d'énergie primaire. De ce fait, moins de 1% des constructions neuves (BBC / RT 2012) sont en chauffage électrique.

### **Chauffage électrique intégré : idéal pour les constructions neuves**

On commencera par mettre à part le chauffage électrique intégré, qui est incontestablement le mode de chauffage idéal quant à l'agrément d'exploitation : absence de maintenance, souplesse de réglage, entretien presque nul, installation simple et peu coûteuse.

Mais, comme on l'a dit, il ne peut être envisagé que pour une construction neuve, conçue avec l'isolation appropriée, c'est une disposition à rejeter pour une construction ancienne.

### **Chauffage central à fluide véhiculaire : le plus répandu**

Les chauffages centraux à fluides véhiculaires sont actuellement très répandus. Quoique plus coûteux que les chauffages divisés, à la fois pour l'installation et pour l'exploitation, ils présentent sur ces derniers de nombreux avantages : ils permettent de réduire le nombre des foyers et des conduits de fumée ainsi que les manipulations de combustible et de cendres, mais surtout son rendement calorifique est nettement supérieur.

L'eau chaude basse pression à circulation accélérée est le fluide le plus utilisé : elle permet une chaleur douce et agréable, facile à régler, l'installation est sûre et de conduite aisée. En revanche, elle est tributaire du courant électrique. On la préfère néanmoins à l'installation à circulation naturelle, plus difficile à réaliser et dont l'inertie est plus grande.

La vapeur basse pression est surtout utilisée dans les bâtiments industriels, quand la vapeur est un sous-produit de l'activité de l'entreprise. Elle peut être alors prélevée directement sur les chaudières ou recueillie sur l'échappement d'une machine thermique. En revanche, elle subit une désaffection pour les installations privées en raison des difficultés de réglage et de l'oxydation rapide qu'elle provoque.

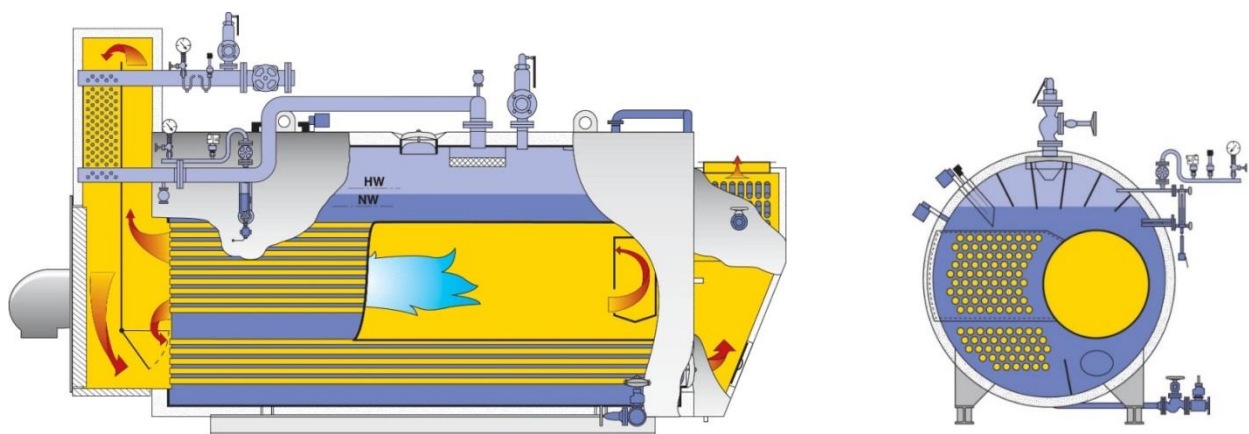
## II.6 Classification par construction

### 6.1 Chaudière à tube de fumée

Dans une chaudière à tubes de fumée, les gaz de combustion circulent à l'intérieur des tubes tandis que l'eau entoure ceux-ci. L'ensemble est confiné dans une grande virole qui constitue le corps cylindrique de la chaudière. Ces générateurs sont aussi appelés "chaudières à foyer intérieur" ou "chaudière" tout court.

Les coupes ci-dessous permettent de mieux comprendre les principes constructifs d'une chaudière à vapeur :

Tandis que la photo ci-dessous montre l'aspect extérieur d'une chaudière :



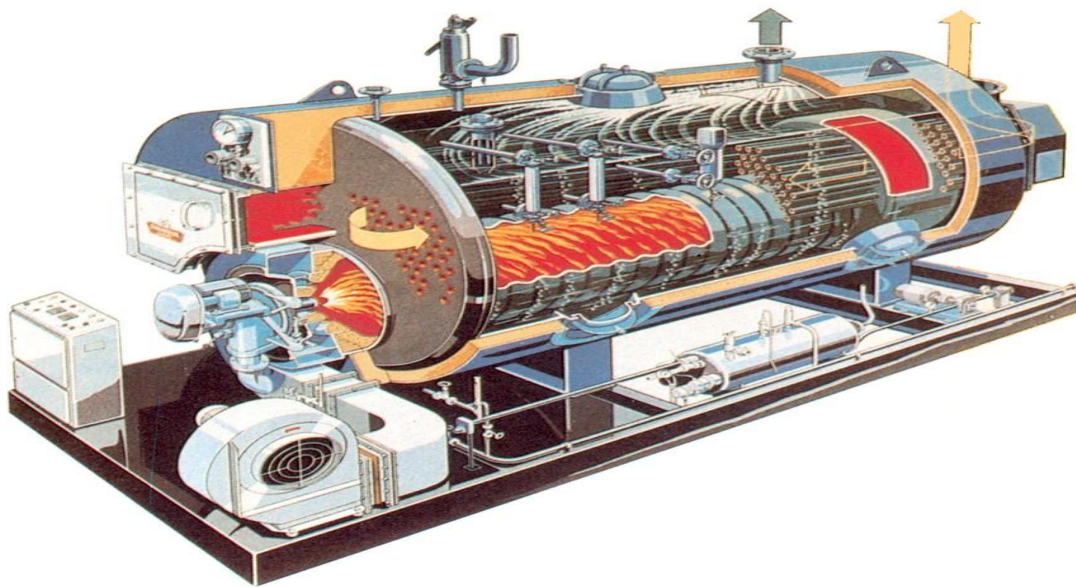


**Figure II.5 Chaudières à tubes de fumées**

La principale caractéristique des chaudières de ce type est donc de comporter un grand volume d'eau sous pression (la même que celle de la vapeur produite) avec pour conséquences premières :

- de présenter une grande inertie thermique (démarrage lent);
- d'être très destructive en cas d'explosion (un gros volume d'eau se transforme instantanément en vapeur).

Comme on le voit ci-dessous, la plupart des avantages et inconvénients des deux familles de générateurs sont précisément liés à cette caractéristique. <sup>[7]</sup>



**Figure II.6 Chaudière tubulaire neuve destinée à la locomotive 030T no 101 Pinguely du CFBS**

C'est historiquement le premier type de construction. Les premiers modèles utilisaient une circulation verticale, plus facile à réaliser, du fait de la convection des gaz, mais par la suite, on réalisa des chaudières avec un arrangement horizontal, plus adaptées, à l'utilisation pour le chemin de fer ou la navigation.

Une chaudière à tubes de fumées est constituée d'un grand réservoir d'eau traversé par des tubes dans lesquels circulent les fumées. Le premier tube du parcours de fumées est un tube de plus gros diamètre qui constituent le foyer. Ce type de construction est aujourd'hui utilisé presque exclusivement pour les combustibles gazeux et liquides. En effet, la forme du foyer des

chaudières à tubes de fumées rend difficile l'extraction des cendres. Lorsqu'elles sont utilisées avec des combustibles solides le foyer est placé à l'extérieur de la chaudière proprement dite. Dans ce cas, le foyer est un avant foyer à tubes d'eau ou en réfractaire.

Ce type de construction est généralement réservé à des puissances n'excédant pas 20 ou 30 MW.

## 6.2 Chaudière à tube d'eau

Dans cette construction, c'est le fluide caloporteur qui circule dans des tubes, les gaz chauds circulant à l'extérieur de ceux-ci. L'avantage de cette formule est surtout la sécurité de ne pas avoir de grandes quantités d'eau dans la chaudière même, qui pourraient en cas de rupture mécanique, entraîner une création explosive de vapeur. Elles ont également l'avantage d'avoir une plus faible inertie. Dans ce type de chaudière, le foyer a toujours un volume très important. De plus, le foyer a la possibilité d'être ouvert dans sa partie inférieure. Ce sont ces deux caractéristiques qui font qu'elles sont souvent utilisées avec des combustibles solides même pour des puissances de quelques MW seulement. <sup>[8]</sup>



Figure II.7 Chaudières à tubes de l'eau

### ❖ Les inconvénients

- inertie, démarrage lent depuis situation froide
- pertes liées aux extinctions-rallumages; pénalisant en fonctionnement intermittent
- poids et masse d'eau élevés, encombrement
- risque théorique d'explosion côté vapeur (grand volume)
- absence de surveillance durant 72 h au maximum, sous conditions.

## **II.7 Classification par type de circulation**

### **7.1 A circulation naturel**

La circulation de l'eau dans une chaudière est très importante pour éviter la formation des zones sèches où le métal est susceptible de fondre se déformer ou s'oxyder prématurément sous l'effet de la chaleur.

Les chaudières à tubes d'eau à circulation naturelle comportent un réservoir supérieur (appelé ballon de chaudière), dont partent de gros tubes placés hors du feu (appelés "tubes de chutes" ou "descentes d'eau"). Ces tubes convoient par gravité l'eau soit dans un ballon inférieur, soit dans des "collecteurs". Les tubes du foyer sont raccordés à ce ballon inférieur ou à ces collecteurs. L'eau remonte vers le ballon (supérieur) par ces tubes en recevant donc la chaleur du feu. Cette eau commence alors à se vaporiser. Comme la masse volumique de la vapeur est inférieure à celle de l'eau liquide, la différence de pression entre la colonne d'eau des descentes d'eau et la colonne d'eau et de vapeur des tubes de foyer met naturellement en circulation l'eau dans le circuit. L'eau parcourt plusieurs fois cette boucle (ballon, tubes de descente, tubes de foyer, retour au ballon) avant d'être évacuée du ballon sous forme de vapeur saturée.

### **7.2 A circulation assisté**

Progressivement la pression de fonctionnement des chaudières s'est élevée, notamment pour obtenir de meilleurs rendements dans les centrales thermiques. Lorsque la pression dans le ballon atteint des valeurs de l'ordre de 180 bar, la différence de masse volumique entre eau liquide et la vapeur devient insuffisante pour assurer la circulation naturelle dans le circuit évaporatoire. On installe alors une pompe dans le circuit pour assurer la bonne circulation de l'eau.

### 7.3 A circulation forcée

Dans cette catégorie, on distingue les petites chaudières de chauffage central, des chaudières industrielles ou de centrales thermiques à haute pression.

Pour les premières, la circulation de l'eau dans les tuyauteries est assurée à l'aide d'une pompe appelée aussi circulateur dans le cas du chauffage central. Cette configuration facilite la conception des chaudières : il n'est pas nécessaire de s'assurer que les pertes de charges permettent une circulation naturelle par convection.

Pour les chaudières industrielles et les chaudières de centrales thermiques, ont été développées des technologies de chaudières à circulation forcée, sans ballon. En effet, l'accroissement des pressions de fonctionnement s'est heurté à la barrière technologique de la résistance mécanique des ballons de chaudière. En outre le rôle de séparation des phases liquide et vapeur du ballon, n'a plus de sens quand on atteint des pressions supercritiques. Dans les chaudières à circulation forcée (de type Benson ou Sulzer) l'eau ne circule pas plusieurs fois en boucle avant d'être vaporisée, mais rentre dans les tubes évaporateurs du foyer sous forme liquide et en ressort sous forme de vapeur saturée, d'où les appellations de chaudières "monotubulaires" ou de chaudières "once through". La circulation de l'eau dans l'évaporateur est assurée par des pompes à très haute pression qui "poussent" l'eau, puis la vapeur successivement dans les tubes de l'économiseur, de l'évaporateur, puis des surchauffeurs. <sup>[9]</sup>

Toutes les chaudières « supercritiques » sont nécessairement de ce type. Mais on en rencontre également dans des cycles sous-critiques, en concurrence avec les chaudières à circulation assistée. Leur avantage principal est alors leur plus faible durée de démarrage, avantage notable dans les centrales thermiques de pointe. Par contre, l'absence de ballon les rend plus exigeantes quant à la qualité de l'eau déminéralisée à utiliser.

#### ❖ Remarque

À l'intérieur d'une même chaudière on peut rencontrer ces différents types de circulations. Par exemple dans une chaudière à vapeur surchauffée, la circulation peut être naturelle dans les tubes du foyer, assistée dans les épingles du parcours de fumée, forcée dans l'économiseur et dans le surchauffeur.



Cette classification ne concerne que les chaudières industrielles et de centrales thermiques. Dans ces chaudières, on distingue deux zones principales d'échange thermique :

- le foyer, où se développe(nt) la(les) flamme(s) et où les échanges thermiques se font essentiellement par rayonnement ;
- la zone de convection, dans laquelle divers échangeurs de chaleur (économiseurs, surchauffeurs...) sont installés et les échanges de chaleur sont par convection. <sup>[10]</sup>

#### 7.4 Chaudière central (urbain)

C'est l'arrangement le plus répandu. Le foyer est surmonté d'un ou deux échangeurs et un carneau vertical arrière reçoit les autres échangeurs convectifs. Les gaz de combustion quittent le foyer par le haut puis redescendent dans le carneau arrière.



Figure II.8 Chaudières central <sup>[11]</sup>

#### 7.5 Chaudière à tour

Cet arrangement se rencontre surtout en Allemagne, mais des exemples existent en Italie, France, Inde, Chine, Afrique du Sud etc.

Dans cette architecture de chaudière, le foyer est surmonté de tous les échangeurs de la zone convective. Il s'ensuit une hauteur pouvant atteindre plus de 100 m. Parmi, les avantages d'une

telle configuration, on citera la diminution des risques d'érosion et d'encrassement dans le cas de combustion de charbons très cendreaux. <sup>[12]</sup>

### **Chauffage urbain : coûteux et générateur de pertes**

Le chauffage urbain est générateur de pertes relativement importantes en cours de transport. De plus, les installations sont coûteuses et longues à amortir. Jusqu'à ces dernières années, les tarifs de distribution étaient assez chers et concurrençaient difficilement les chauffages individuels. Cette situation est appelée à se renverser, en raison du renchérissement des combustibles nobles, c'est moins évident pour le chauffage des grands ensembles qui ne bénéficient pas de l'utilisation des combustibles bon marché.

En tout état de cause, il ne faut pas oublier les économies de main-d'œuvre et d'entretien que cette solution apporte aux usagers, ainsi que la commodité d'utilisation. <sup>[14]</sup>

#### **❖ Conclusion**

Le chauffage électrique ne peut quasiment plus être posé en neuf. En rénovation, il peut être intéressant pour son faible investissement, mais le coût de l'électricité rend cette solution peu rentable à moyen ou long terme. Il faut également garder à l'esprit que l'électricité n'est absolument pas une énergie propre. Pour ce qui est du choix du système à proprement parler, les radiants électriques semblent la meilleure solution puisqu'ils procurent un confort thermique supérieur aux convecteurs en ayant un coût largement inférieur aux autres systèmes. A noter que le meilleur pour faire des économies avec le chauffage électrique est de bien réguler sa consommation: un confort identique, mais des dépenses moindres.

**❖ NOTE ET REFFERENCE**

[1 ] Chaudière " : l'ensemble corps de chaudière et brûleur s'il existe, produisant de l'eau chaude, de la vapeur d'eau, de l'eau surchauffée, ou modifiant la température d'un fluide thermique ... [archive], sur [legifrance.gouv.fr](http://legifrance.gouv.fr), consulté le 6 novembre 2016.

[2 ] Décret n° 2009-649 du 9 juin 2009 relatif à l'entretien annuel des chaudières dont la puissance nominale est comprise entre 4 et 400 kilowatts [archive], sur [legifrance.gouv.fr](http://legifrance.gouv.fr), consulté le 6 novembre 2016.

[3 ] Non trouvé le 6 novembre 2016 [archive], sur [chaudiere-gaz.org](http://chaudiere-gaz.org)

[4 ] Chaudières traditionnelles [archive], sur [energieplus-lesite.be](http://energieplus-lesite.be)

[5] Les centrales thermiques [archive], sur [perso.id-net.fr](http://perso.id-net.fr)

[6 ] Devroe Sébastien, Étude de la combustion du charbon pulvérisé ...) [archive], sur [inist.fr](http://inist.fr).

[7] Cours de chaudières à tubes d'eau [archive], sur [azprocede.fr](http://azprocede.fr)

[8] <https://www.nano-sense.com/> Analyse combustion

[9 ] chaudière pulsatoire , sur [ademe.fr](http://ademe.fr)

[10 ] La Construction des locomotives à vapeur en Belgique [archive], sur [.tassignon.be](http://.tassignon.be)

[11 ] Comment fonctionne une centrale nucléaire , sur [sfen.org](http://sfen.org)

[12 ] La chaudière à granulés de bois [archive], L'énergietoutcompris, le 22 avril 2014

[13] Directive 2002/91/CE .

[14] <http://www.energyland.info/analitic-show-25018>

- ❖ Pour la partie simulation de notre mémoire on va faire une petite conception prototype d'une chaudière puisqu'on a une symétrie de chargement, du matériau et de la géométrie, Nous avons modélisé que la moitié de la chaudière.
- ❖ L'objectif est de déterminer quel sera le matériau a utilisé pour l'appareil afin qu'il résiste aux contraintes thermomécaniques.
- ❖ On a utilisé le code éléments finis Ansys pour faire le calcul thermomécanique d'une chaudière à tubes de fumée.

### III.1- Vue d'assemblage

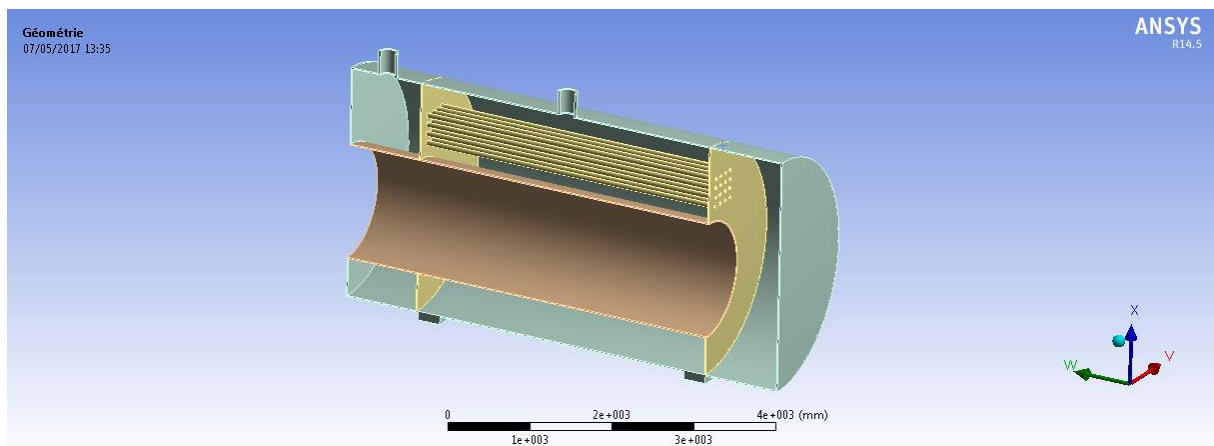


Figure III-1 : Vue complète d'un Model CAO d'une chaudière a tube de fumée

1-1 Notre chaudière se compose de trois pièces

- Les différentes pièces qui composent le prototype :
  - a) 1<sup>ère</sup> pièce : cylindre extérieur

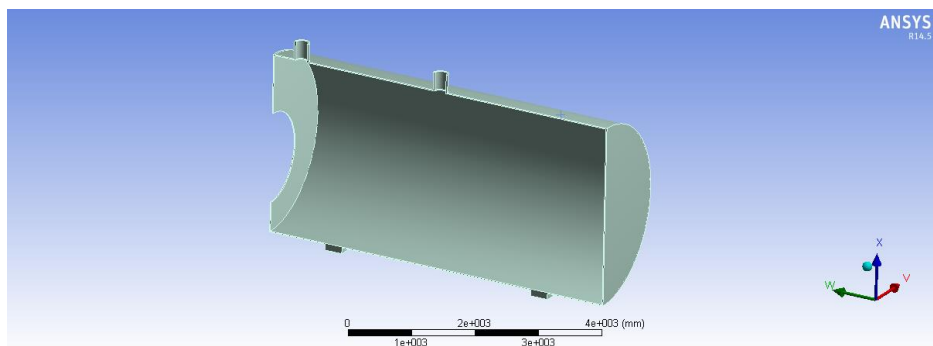
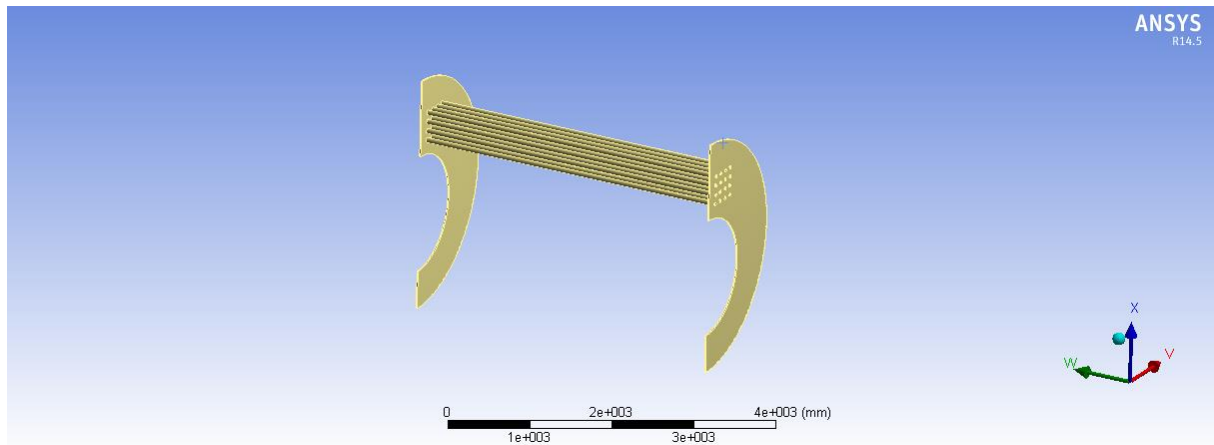


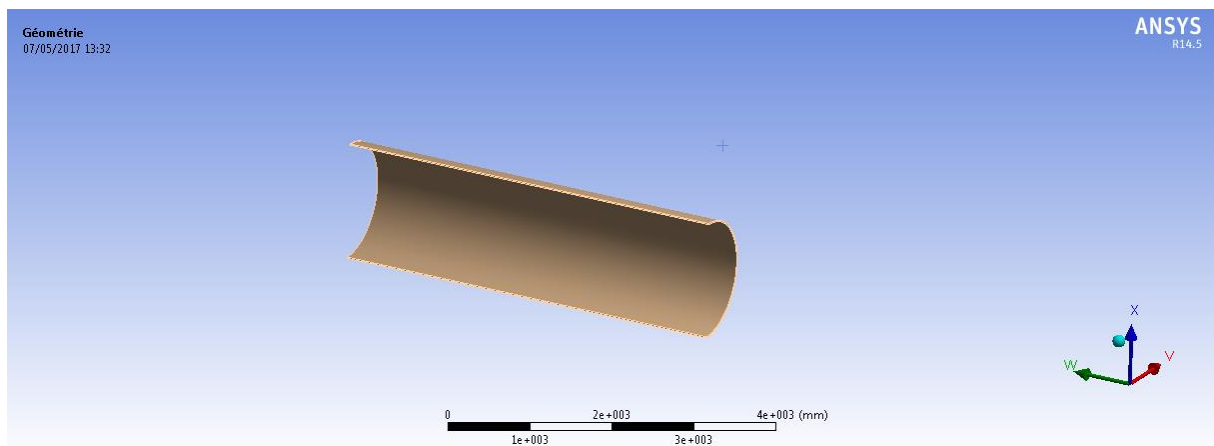
Figure III-2 : cylindre extérieur

b) 2eme pièce : plaque de renversement plus les tubes de fumées



**Figure III-3 : plaque de renversement plus les tubes de fumées**

c) 3eme peice : tube de gaz (bruleur)



**Figure III-4 : tube de gaz (bruleur)**

## III.2-Dimensions de la chaudière

Dans notre cas on a fait un dimensionnement de prototype tiré d'un document du chercheur .....

[1]

a) Géométrie :

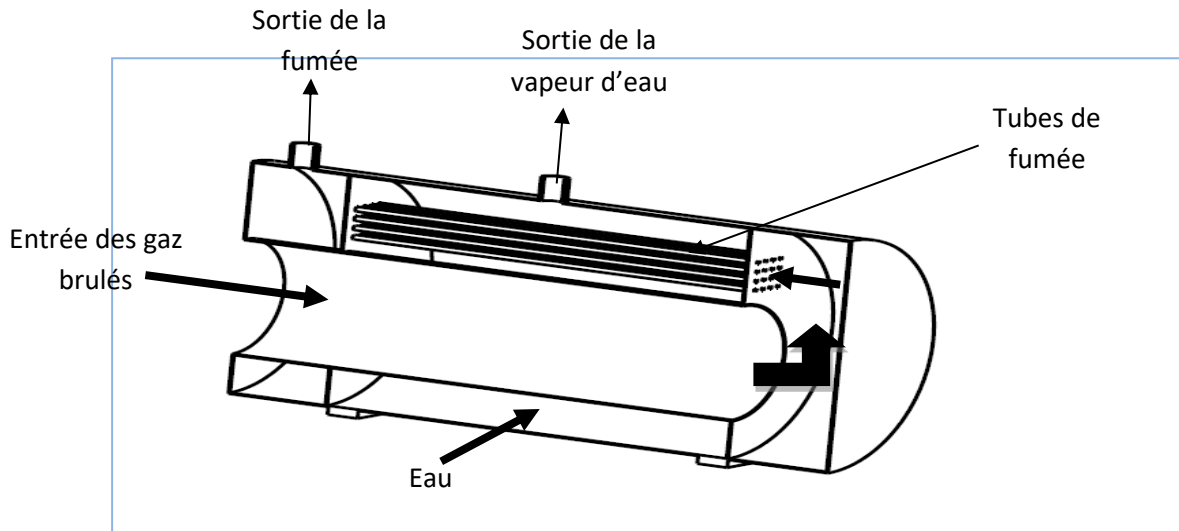
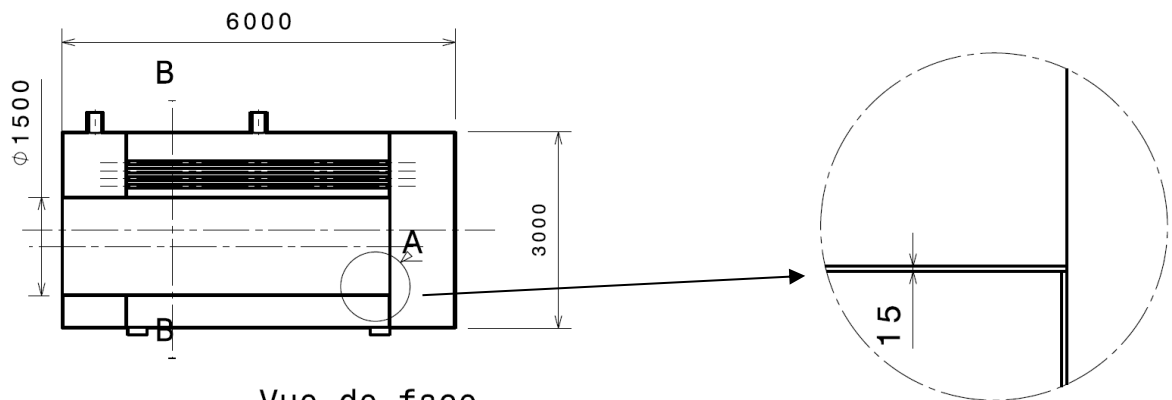


Figure III.5 : vue isométrique de notre chaudière (chaudière a yube de fumée)

b) Dimensions :

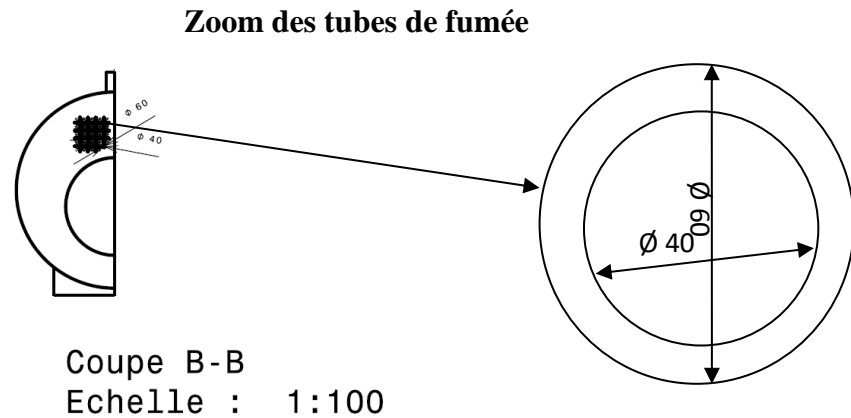
b.1) Vue de face :



Vue de face  
Echelle : 1:100

L'épaisseur de toute tole de la chaudière est de 15 mm.

b.2) Vue de gauche :



- Longueur Total de la chaudière: 6 mètres.
- Diamètre du cylindre int : 1.5 mètres .
- Diamètre du Tube : 40° et 60°.
- volume : 7800 kg/m<sup>3</sup>.
- Poids Total de la chaudière: 15.4 tonnes.

### III.3-Matériau

Le matériau de toutes les pièces de la chaudière est l'acier avec les caractéristiques illustrées dans les figures ci-dessous. Ces caractéristiques thermiques et mécaniques dépendent de la température.

Le poids de notre chaudière est de 15.4 tonnes, la masse volumique de l'acier est de 7800 kg/m<sup>3</sup>.

On a utilisé pour notre prototype le matériau de type "Acier" avec un module de Young

$E = 210$  GPa et un coefficient de Poisson = 0.33.



### 3-1 Caractéristiques thermiques :

#### 3-1-1 La dilatation thermique :

La dilatation thermique est utilisée pour calculer la déformation thermique selon la formule suivante :  $\Delta L = \alpha \cdot L \cdot \Delta T$  (2)

Avec :

- $\Delta L$  (mm) = Dilatation due à une variation de température
- $\alpha$  (1/K) = Coefficient de dilatation thermique
- L (mm) = Longueur caractéristique
- $\Delta T$  (K ou °C) = Différence de température entre la température initiale du matériau et la température finale

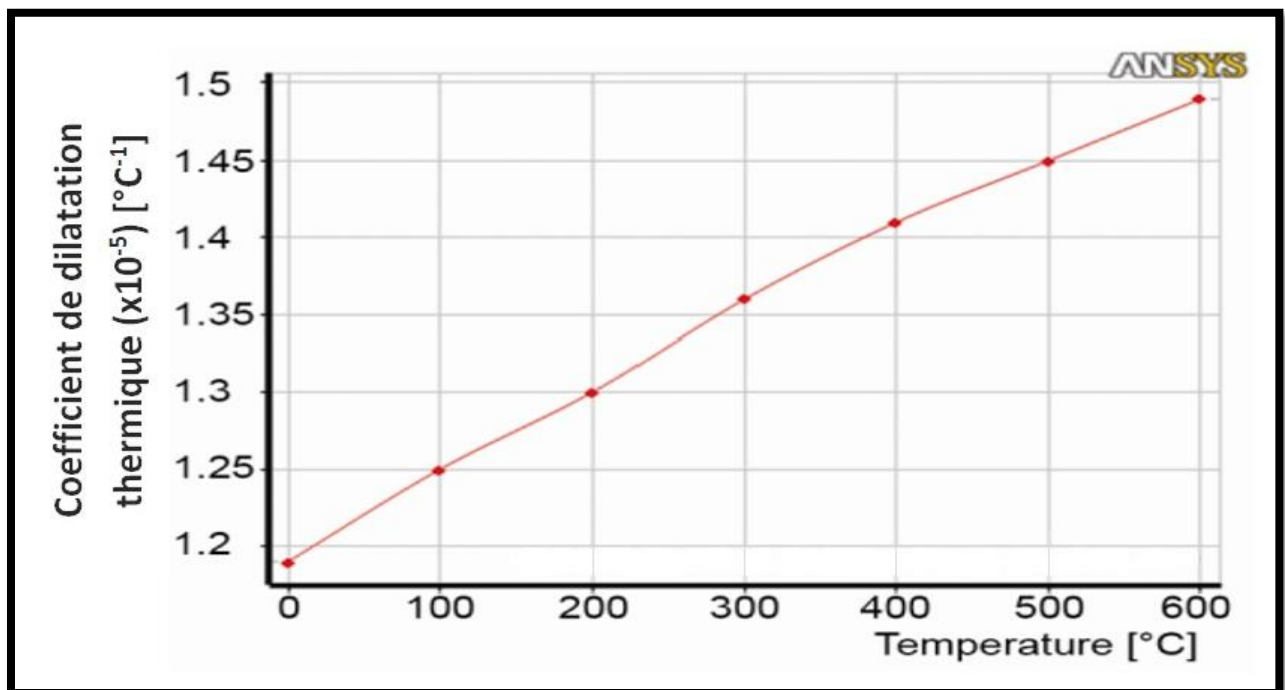


Figure III-6 : Coefficient de dilatation thermique en fonction de la température [1]

### 3-1-2 Conductivité thermique

La conductivité thermique intervient dans le calcul spatial de la température.

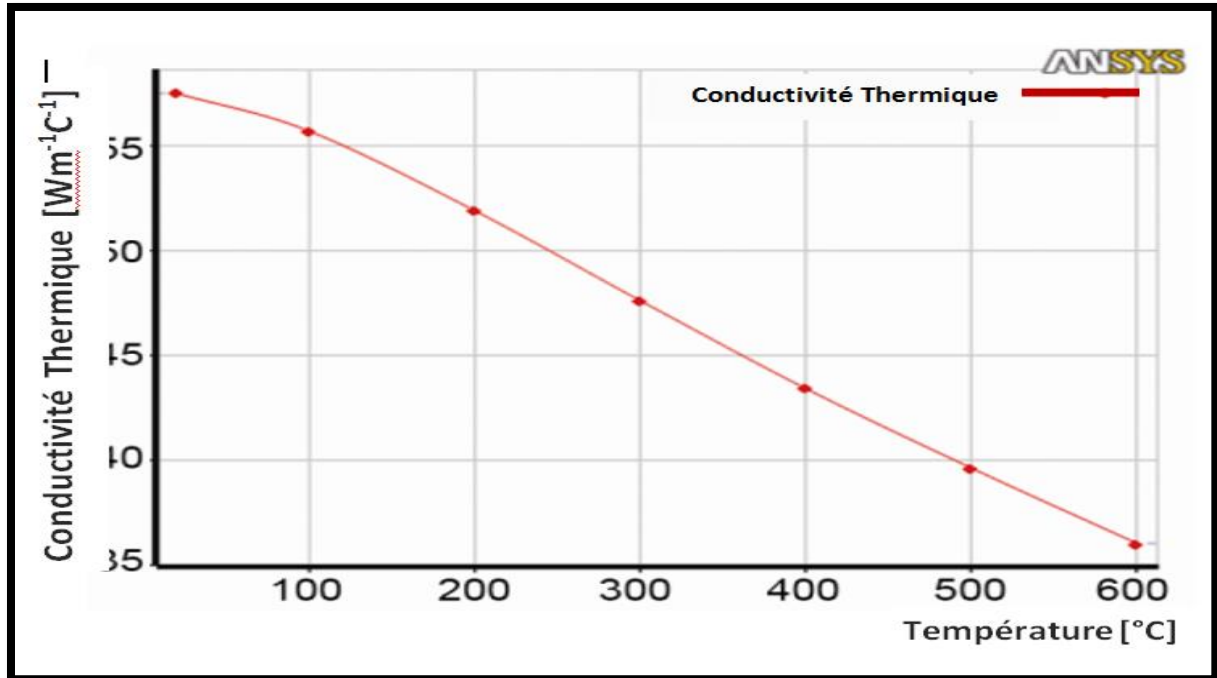


Figure III-7 : Conductivité thermique en fonction de la température [1]

Equation de la chaleur :

Dans le cas stationnaire l'équation de la chaleur s'écrit comme suit :

$$\Phi = \lambda \cdot \Delta T \quad (3)$$

Dans le cas transitoire l'équation de la chaleur s'écrit :

$$\rho c_p \frac{\partial T}{\partial t} = \text{div}(\lambda \cdot \text{grad} T) + q \quad (4)$$

Avec :

- $\Phi$  flux de chaleur W/m
- $C_p$  est la capacité thermique massique a pression constante. J/kg.K
- $\rho$  est la masse volumique du matériau considéré. kg/m<sup>3</sup>
- $\lambda$  est la conductivité thermique du matériau. W/m<sup>2</sup>K
- $q$  est le rapport de chaleur interne. W/m<sup>3</sup>

### 3-2 Caractéristiques mécaniques

- ❖ Le module de Young  $E = 200$  GPa
- ❖ Dans le domaine élastique la contrainte mécanique  $\sigma$  est donnée par :

$$\sigma = E \cdot \varepsilon_{\text{élas}} \quad (5)$$

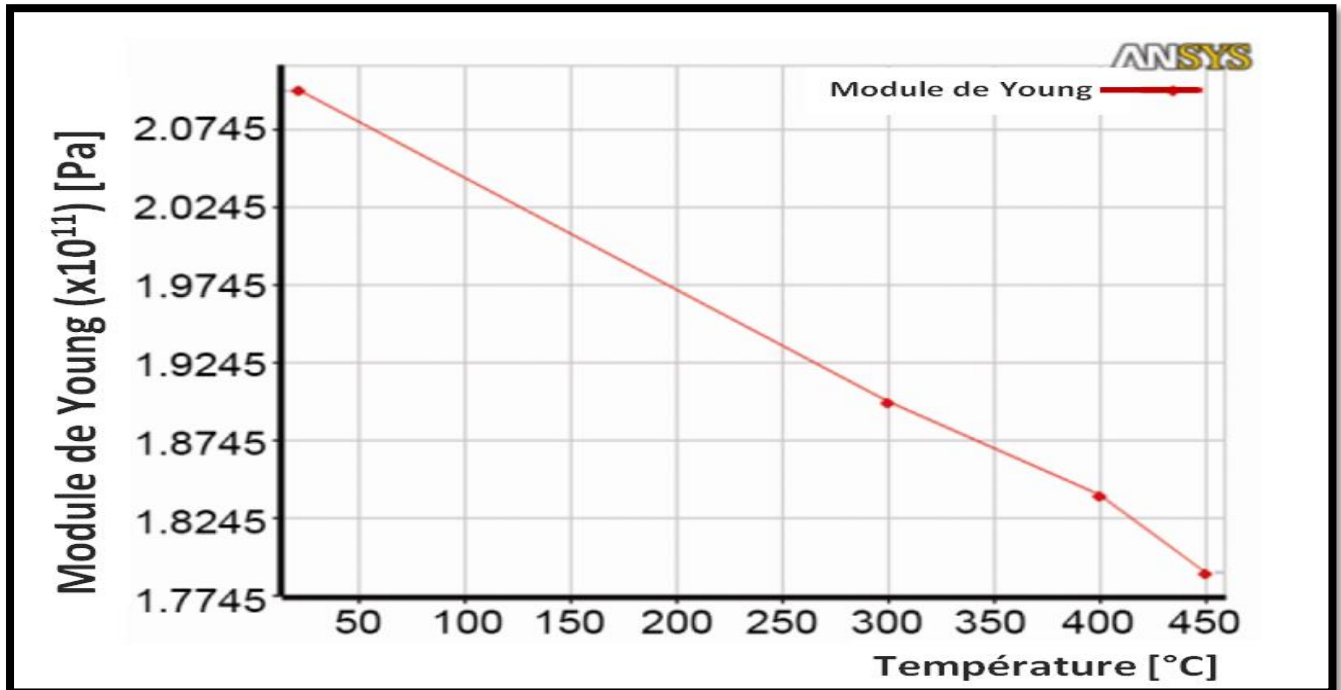


Figure III-8 : Module de Young en fonction de la température

- ❖ Le coefficient du Poisson  $\nu=0.33$  il ne change pas en fonction de la température
- ❖ La déformation thermomécanique est donnée par :  $\varepsilon_{\text{thermméc}} = \varepsilon_{\text{therm}} + \varepsilon_{\text{élas}}$

III.4-Maillage Elément finis

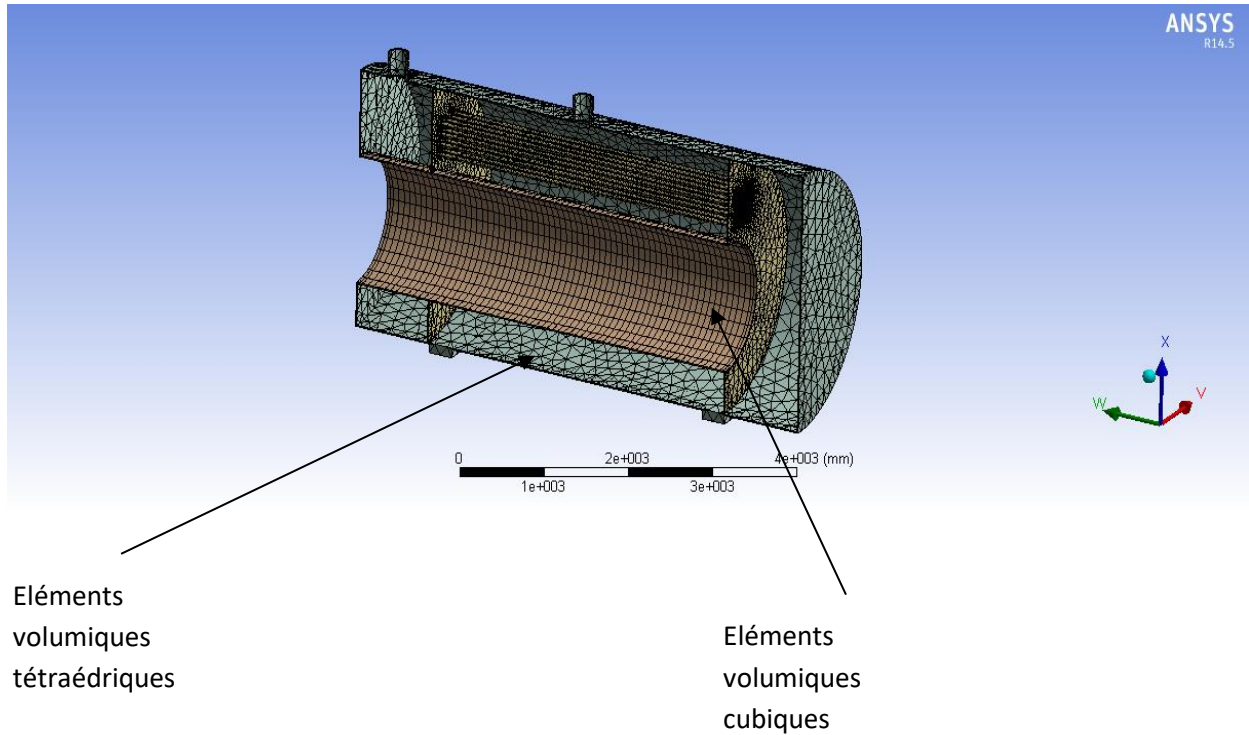
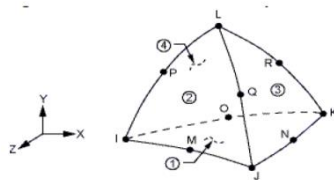


Figure III-9 : Maillage de la chaudière

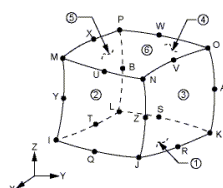
Nous avons utilisé une taille des éléments de type moyen par défaut pour mailler notre chaudière. Pour cela, nous avons à la fin obtenu : Nombre des éléments : 45778 ; nombre des nœuds : 98472

Voici les types des éléments utilisés

Eléments volumiques tétraédriques quadratiques avec 10 nœuds



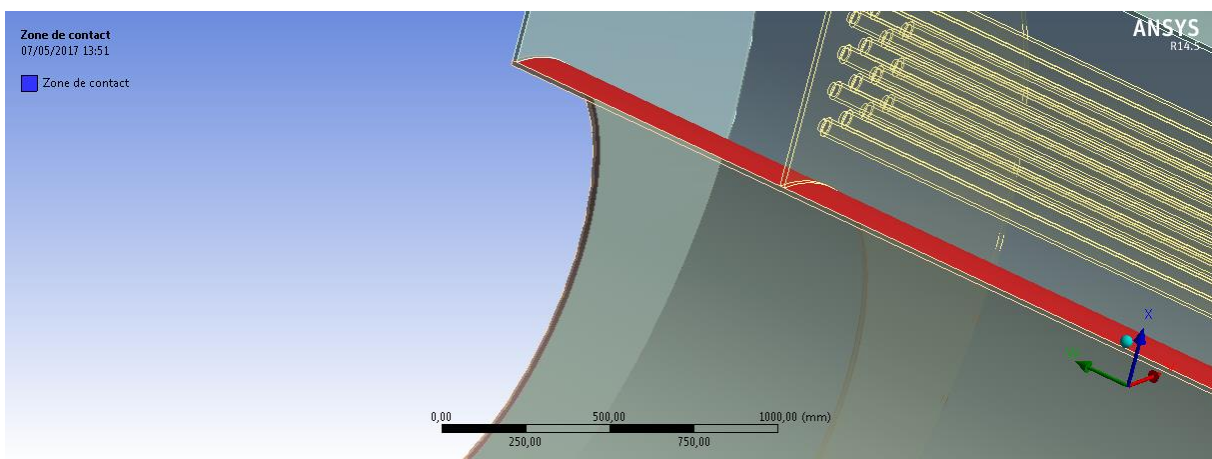
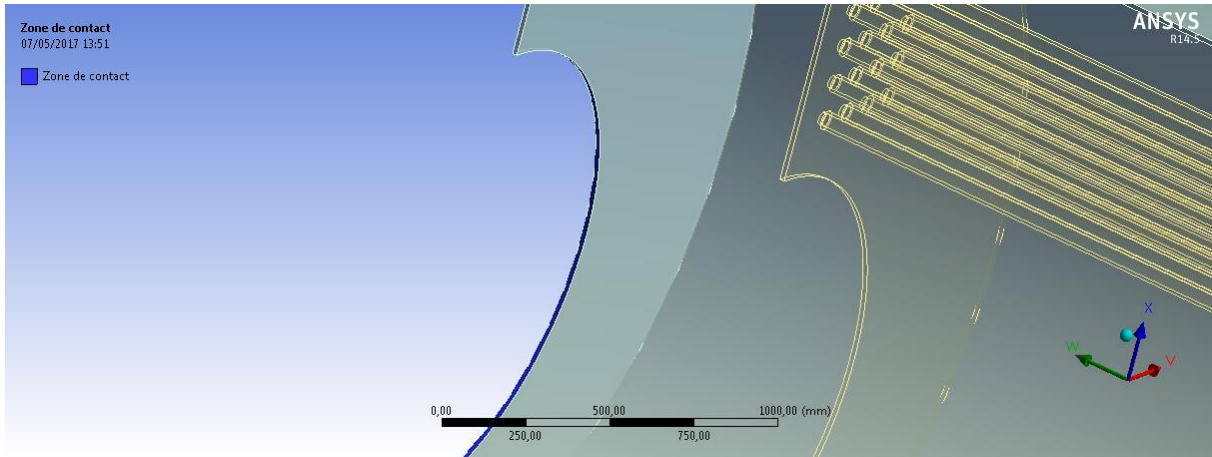
Eléments volumiques cubiques quadratiques avec 20 nœuds



### III.5-Conditions de contact

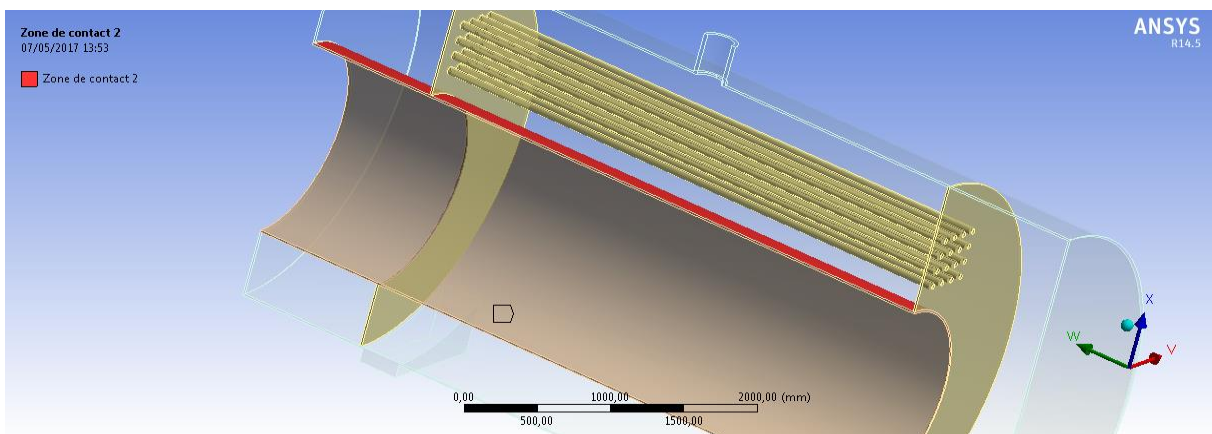
#### 5-1 Contact entre cylindre extérieur et tube de gaz

Le contact est lié totalement car la liaison entre cylindre extérieur et tube de gaz est soudée.



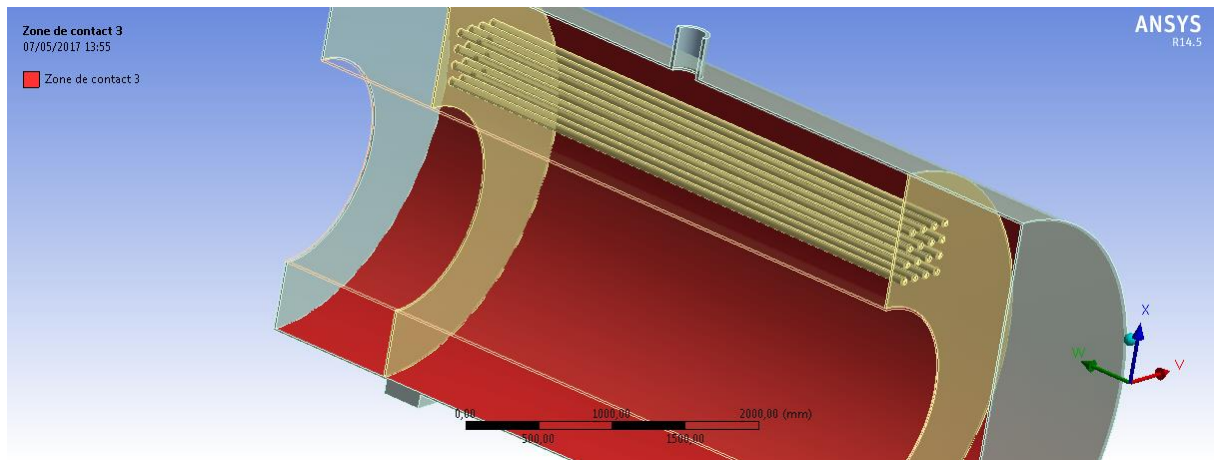
#### 5-2 Contact entre tube de gaz et plaques de renversement

Le contact est lié totalement car la liaison entre tube de gaz et plaques de renversement est soudée.



### 5-3 Contact entre cylindre extérieur et plaques de renversement

Le contact est lié totalement car la liaison entre cylindre ext et plaques de renversement est soudée.



### Procédure de calcul thermomécanique

On a fait un calcul thermique stationnaire au début pour déterminer la distribution de la température dans toute la chaudière puis on a fait par la suite un calcul statique structural et on a importé les résultats de la température (calculés précédemment sur le model thermique) pour pouvoir faire un calcul thermomécanique.

### III.6-Condition aux limites thermiques

La température initiale est de 22°C.

La température de la fumée à l'intérieur des tubes est égale à 800 °C.

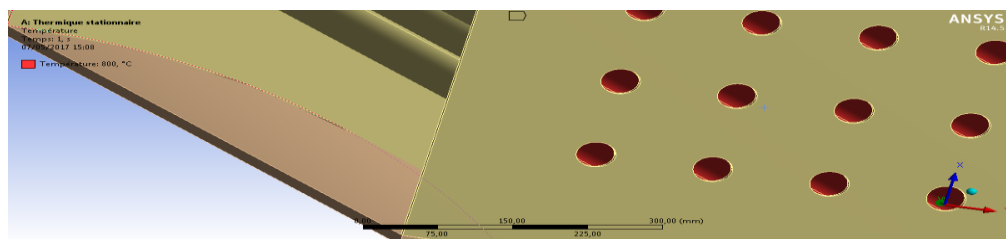


Figure III-13 : Température a l'intérieur des tubes de fumée : 800 °C.

La température à l'intérieur du tube de gaz (bruleur) est égale à 1480°C

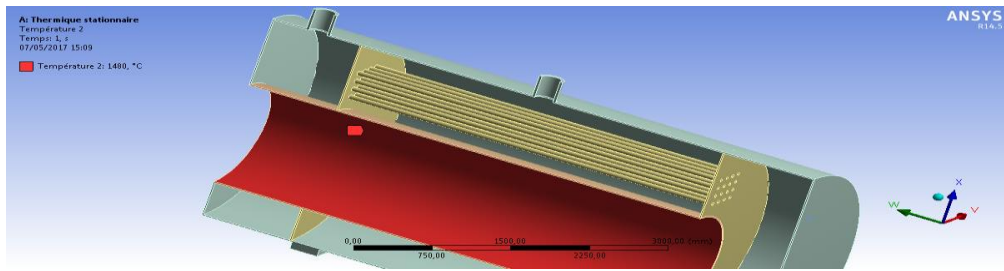


Figure III-14 : Température à l'intérieur de tube de gaz (bruleur) : 1480°C

### III.7-Condition aux limites Mécaniques

a) Gravité terrestre :

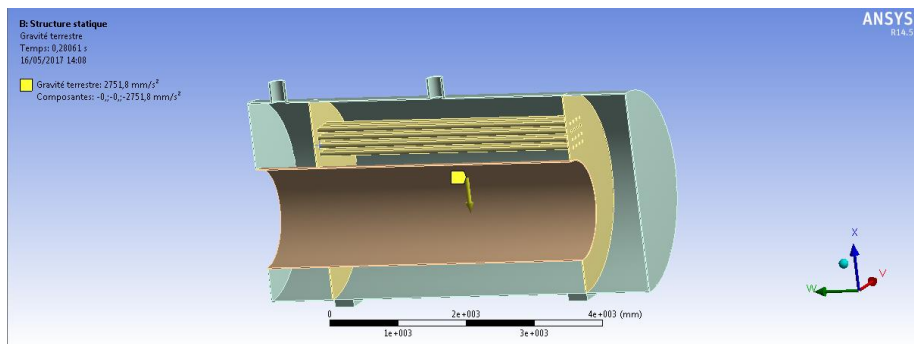


Figure III-15 : La gravité appliquée sur la chaudière

b) Support fixe :

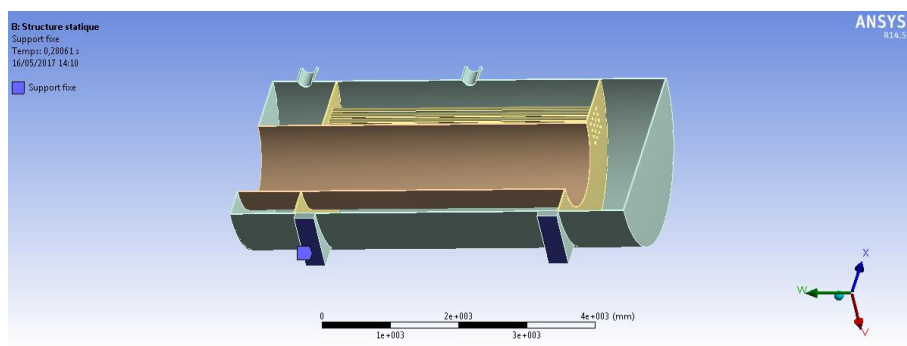


Figure III-16 : Support fixe



c) Pression d'eau appliquée sur le tube de gaz

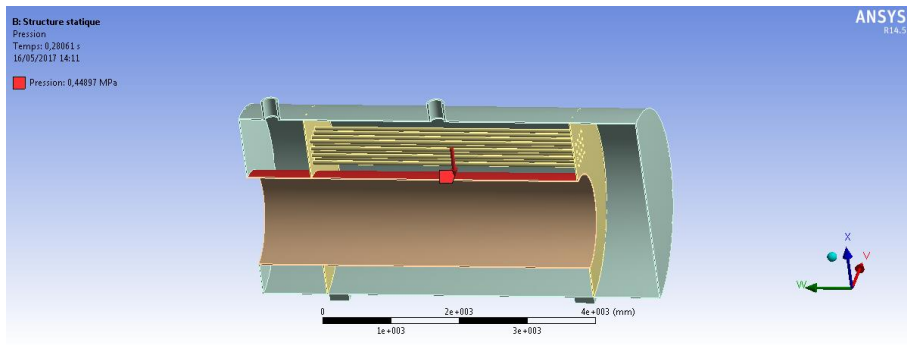


Figure III-17 : La pression d'eau appliquée sur le tube de gaz

d) Pression d'eau appliquée sur les tubes de fumée

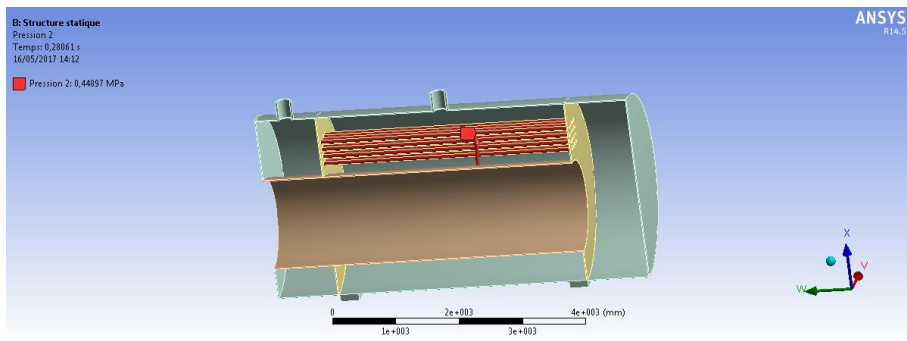


Figure III-18 : Pression d'eau appliquée sur les tubes de fumée

e) Les conditions de symétrie ( $u_x=0$ )

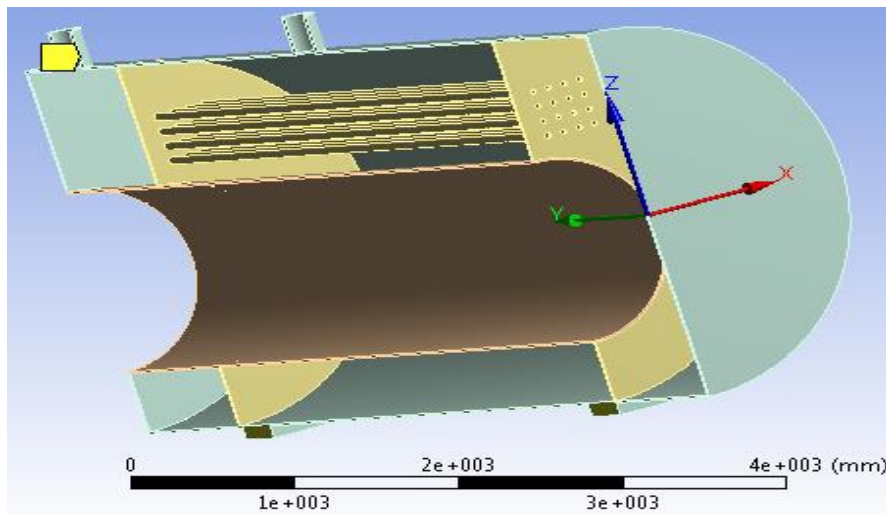


Figure III-19 : Les conditions de symétrie par rapport au plan YZ



**❖ NOTE ET REFERENCE:**

[1] Zivkovic, D. S., *et al*: Thermomechanical Finite Element Analysis of Hot Water Boiler Structure THERMAL SCIENCE, Year 2012, Vol. 16, Suppl. 2, pp. 387-398.

## IV.1 Résultats :

L'analyse structurelle de la chaudière à eau chaude a été effectuée dans une analyse thermomécanique.

Au début, l'analyse thermique statique a été réalisée pour obtenir la répartition de la température dans les éléments structurels de la chaudière (figure IV-1). L'échange de chaleur de la chaudière avec une convection et un rayonnement environnants a également été pris en compte.

Après le lancement de la solution à partir du Logiciel ANSYS, on peut regrouper les résultats sous formes de figures si dessus :

### 1.1 Température :

- Unité : C°.
- Valeur Minimal : 797.41 C°
- Valeur Maximal : 1489 C°

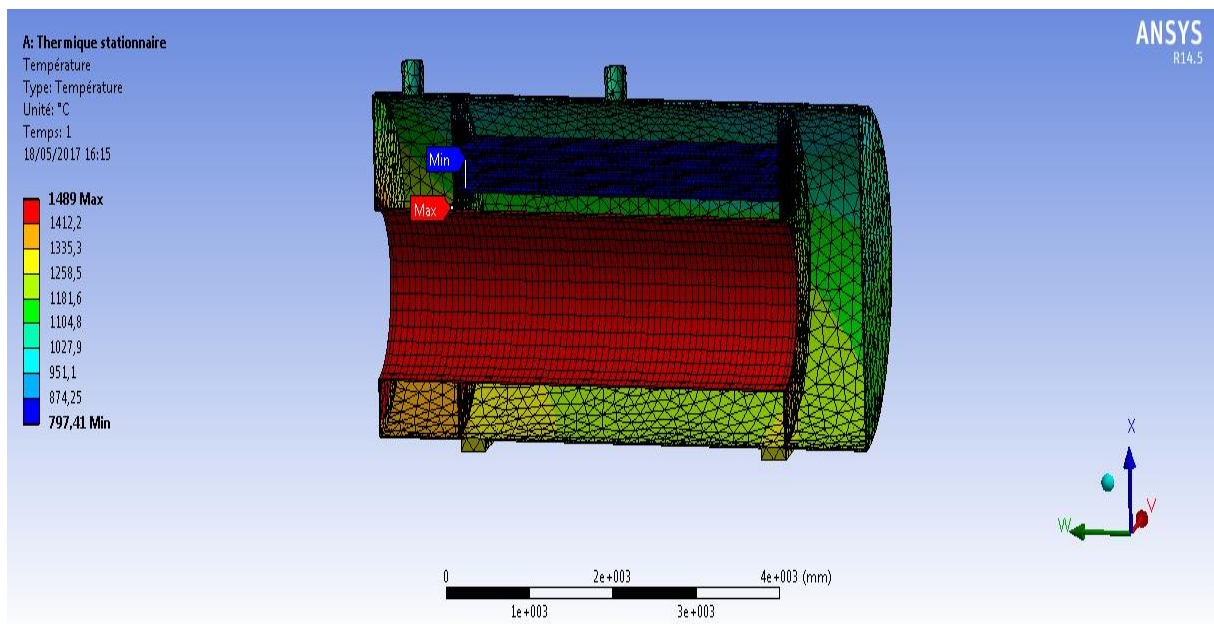


Figure IV.1 Distribution de la température dans la chaudière

## 1.2 Flux de chaleur total

- Unité : W/mm<sup>2</sup>
- Valeur Minimal : 7.070e-16 W/mm<sup>2</sup>
- Valeur Maximal : 0.1194 W/mm<sup>2</sup>

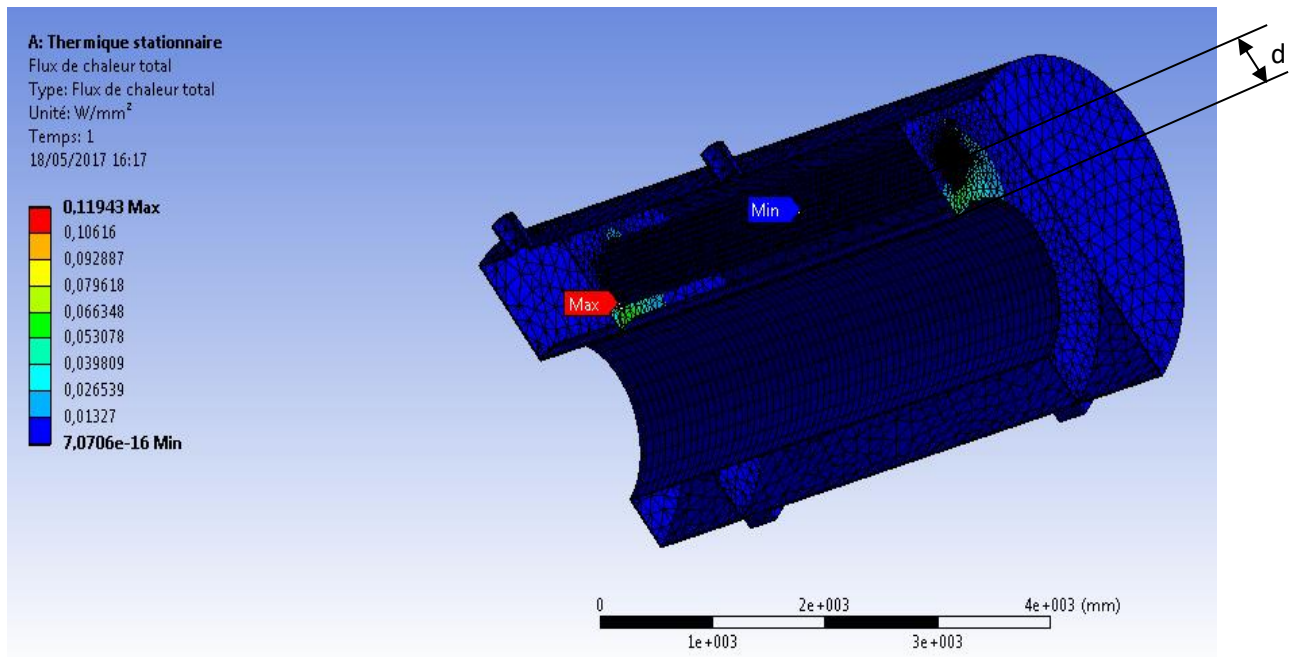


Figure IV.2 Flux de chaleur

On remarque que le flux de chaleur  $\Phi$  (W/mm<sup>2</sup>) est élevé entre le brûleur et les tubes de fumée parce que la distance  $d$  (voir la figure ci-dessus) entre ces deux parois est très faible et la différence entre les deux températures  $\Delta T=1580-900$  est élevée et d'après la formule ci-dessous le flux de chaleur augmentera.

$$\Phi = \lambda * \Delta T / d \quad (6)$$

### 1.3 Déformation thermique

- Valeur maximal : 0.017628 mm/mm=1.7%

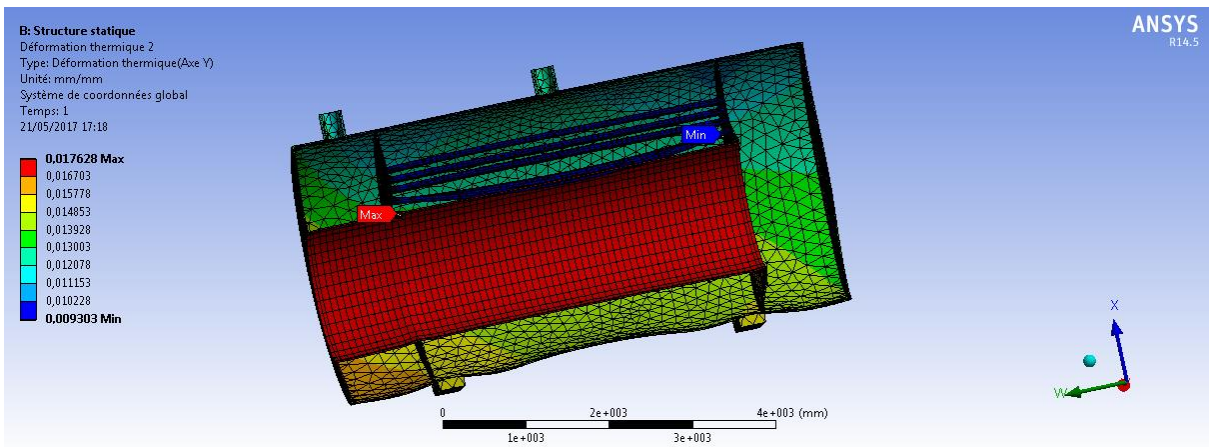


Figure IV. 3 Déformation thermique

### 1.4 Déformation total équivalente

La distribution de la température résultante a ensuite été transférée à l'analyse de structure statique afin d'obtenir des contraintes thermomécaniques dans la chaudière.

Les résultats de l'analyse présentée montrent que les contraintes et les déformations maximales se produisent au niveau de la zone de soudage de la plaque d'entrée avec le cylindre extérieur, la plaque d'entrée est parallèle avec la plaque de renversement.

- Unité : mm/mm
- Valeur Minimal : 1.449E-5mm/mm
- Valeur Maximal : 0.0515 mm/mm

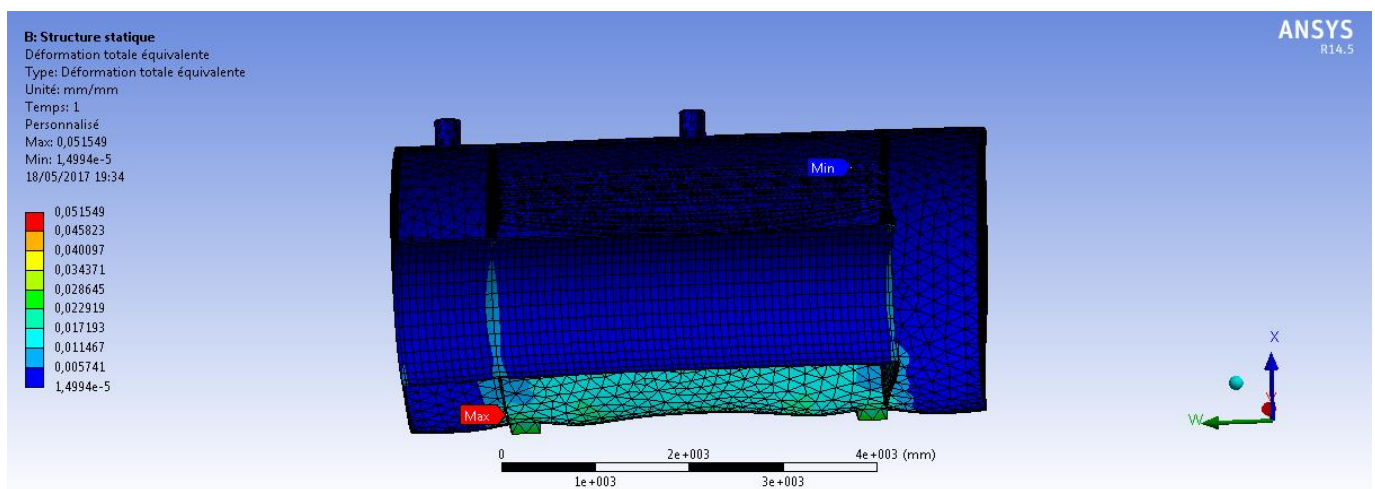


Figure IV.4 déformation totale équivalente

## 1.5 Contrainte équivalente

- Valeur Maximal : 10310 Mpa

La figure ci-dessous montre que le contact entre la plaque d'entrée et le cylindre extérieur est l'une des parties thermo-mécaniquement la plus chargée dans la chaudière.

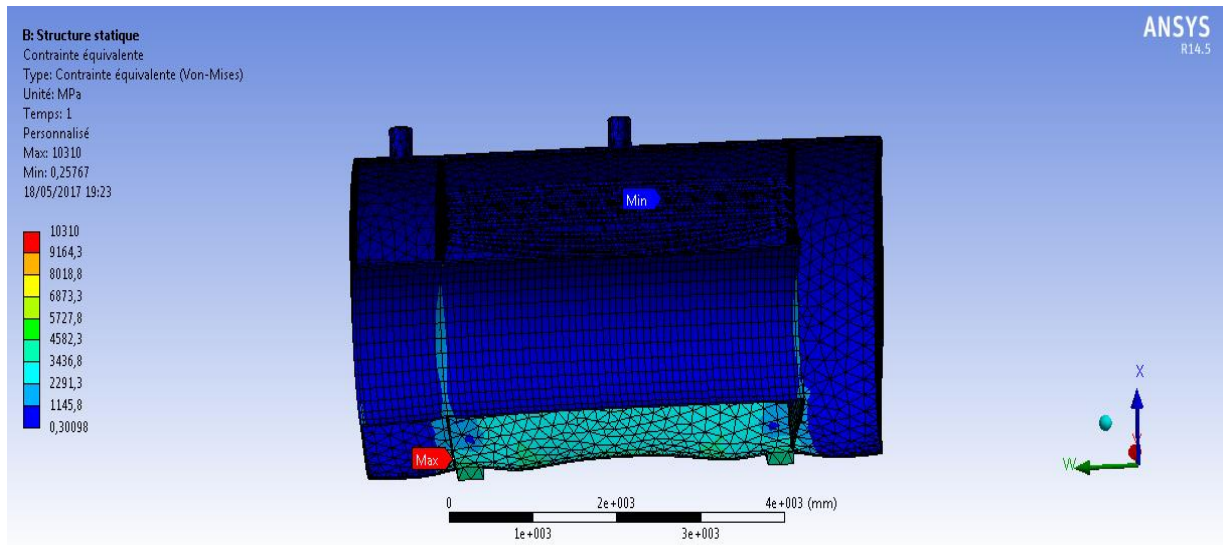


Figure IV.5 contrainte équivalente

## 1.6 Contrainte équivalente (Von-Mises) de la plaque de renversement et les tubes de fumée

La figure IV.6 montre les contraintes équivalentes dans la plaque de renversement, tandis que la figure IV.7 montre l'évolution de la contrainte dans le cordon de la soudure de la plaque de renversement avec le cylindre extérieur. En effet, la contrainte maximale se situe au niveau de la zone de soudage de la plaque de renversement avec le cylindre extérieur. Ceci nous indique que cette plaque doit être bien soudée. La valeur maximale obtenue est très élevée, ceci nous oblige soit d'utiliser un matériau avec une limite d'élasticité supérieure à 3812 MPa (ce qui est rare de trouver un tel matériau), nous nous sommes penchés sur une autre solution alternative pour diminuer cette contrainte, celle-ci sera présentée par la suite.

- Valeur Maximal : 3812 Mpa

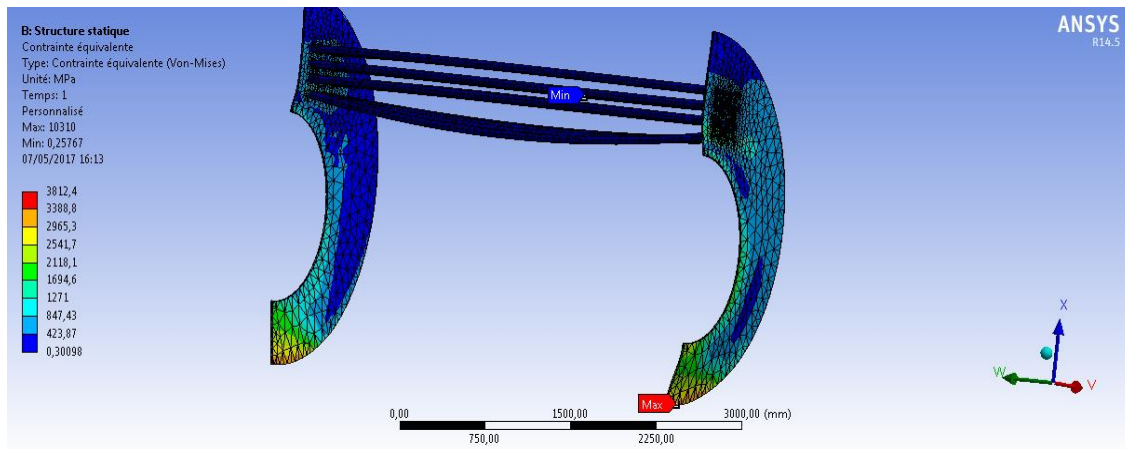


Figure IV.6 contrainte équivalente de la plaque de renversement

### 1.7 Contrainte équivalente dans le cordon de la soudure

- Unité : Mpa
- Valeur Minimal 3812.4 Mpa
- Valeur Maximal : 236.34 Mpa

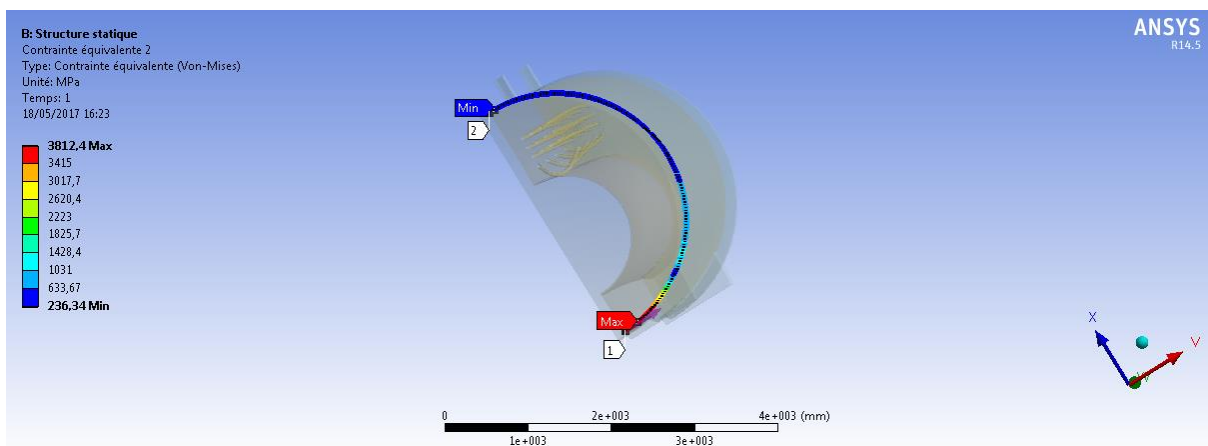
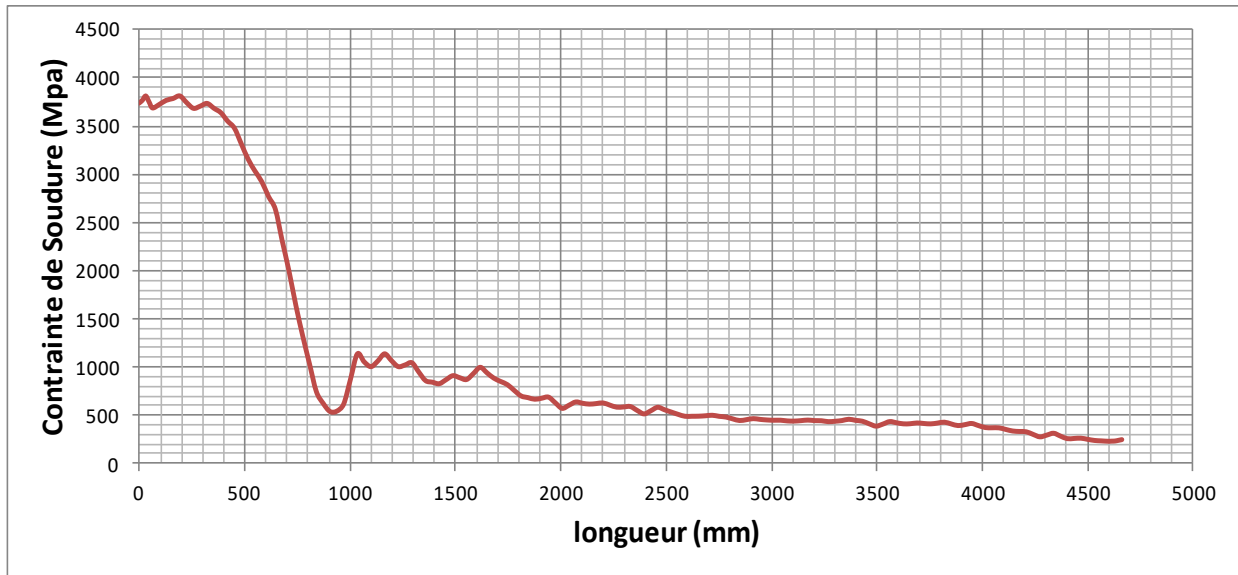


Figure IV.7 contrainte équivalente entre la plaque de renversement et le cylindre extérieur.

La figure IV.8 montre l'évolution de la contrainte équivalente de Von Mises dans le cordon de la soudure de la plaque de renversement avec le cylindre extérieur.



**Figure IV.8** Contrainte de soudure en fonction de la longueur du cordon de la soudure (la température du bruleur 1480°C)

On remarque que la contrainte est très élevée au niveau de la zone proche du support fixe donc si la connexion soudée dans la plaque de renversement (plus proche du support fixe) n'est pas correctement établie, une fuite d'eau serait très probable.

Les accidents qui se sont produits jusqu'à présent dans les chaudières avec un design similaire se manifestent par un dessoudage des joints qui se trouvent entre la plaque de renversement et le cylindre extérieur.



La solution que nous proposons est d'essayer de réduire la température du bruleur pour voir son influence sur la contrainte :

- a) Température dans le bruleur 1000°C et la température dans les tubes de fumée est de 500°C

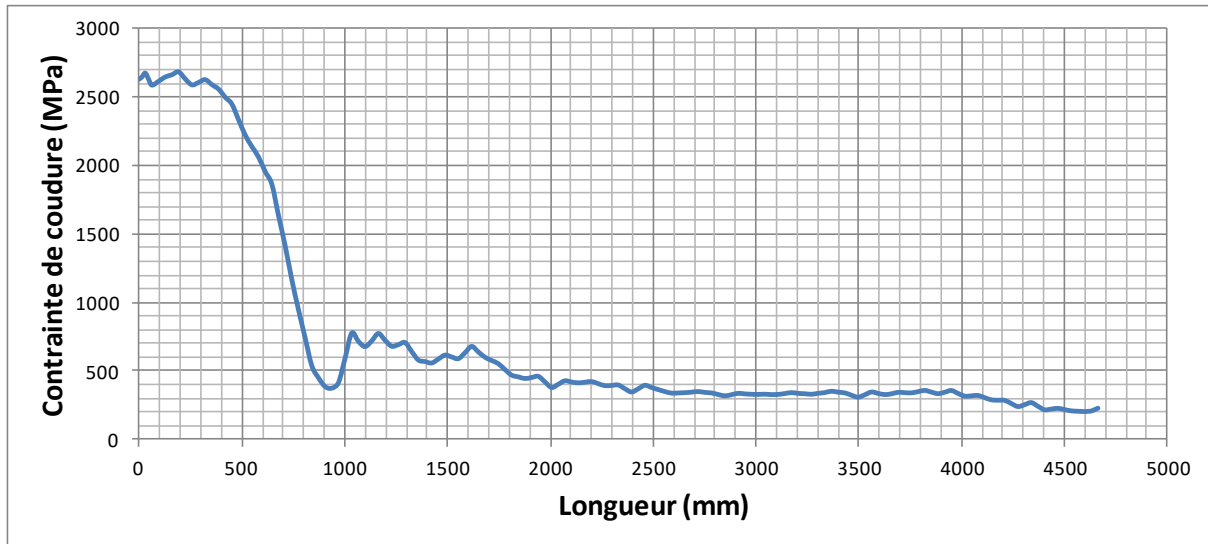


Figure IV.9 Contrainte de soudure en fonction de la longueur du cordon de la soudure (la température du bruleur 1000°C)

- b) Température dans le bruleur 900°C et la température dans les tube de fumée 400°C

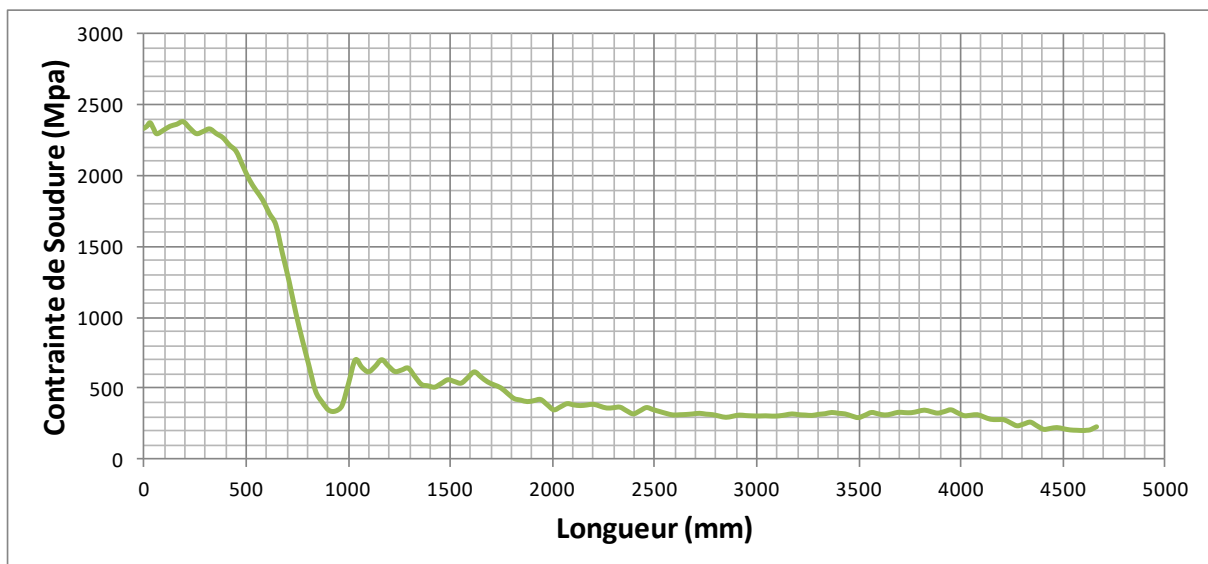


Figure IV.10 Contrainte de soudure en fonction de la longueur du cordon de la soudure (la température du bruleur 900°C)



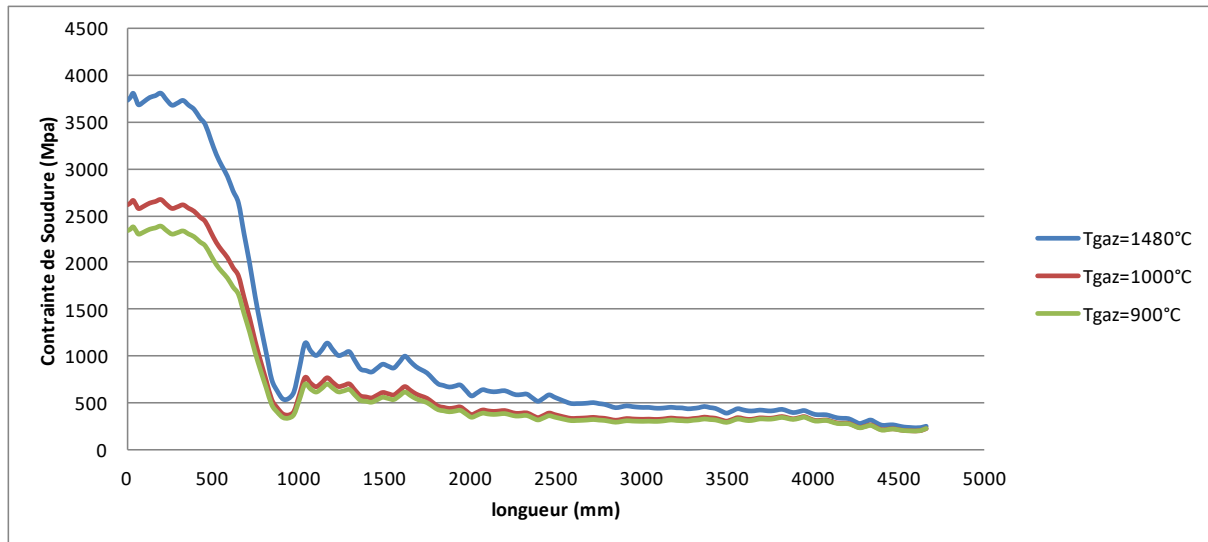


Figure IV.11 Comparaison des résultats précédents

Les résultats obtenus montrent que plus on baisse la température du bruleur plus la contrainte diminuera. Donc l'ouvrier qui manipule la chaudière devrait fixer un point de température à ne pas dépasser.

On a libéré le support fixe suivant x et y comme est montré dans la figure ci-dessus

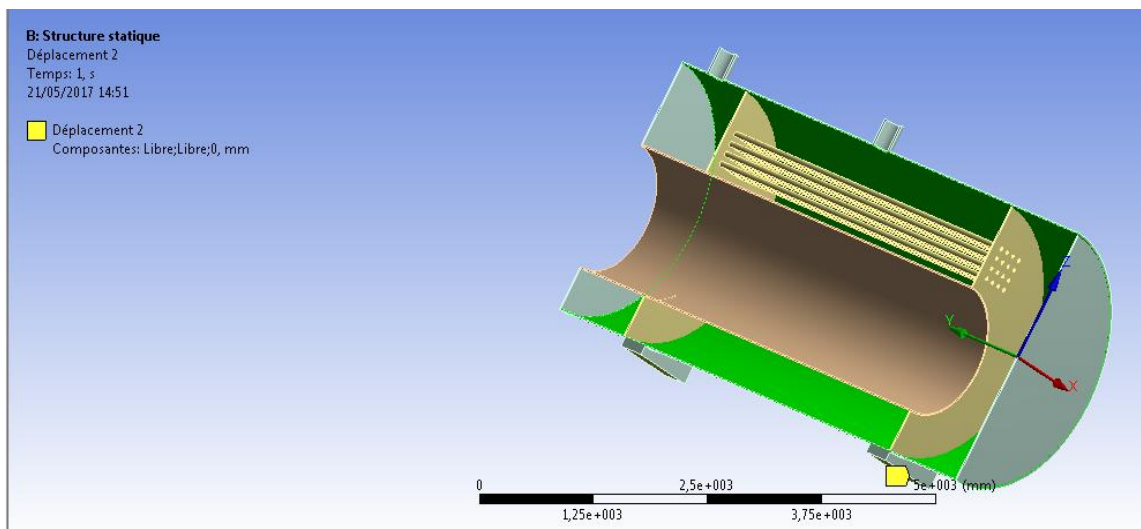


Figure IV.12 Les axes de la chaudière

On remarque que la contrainte a baissée par rapport au model avec un support fixe (voire figure IV.13), mais l'inconvénient c'est que la chaudière a déplacé avec 600mm suivant l'axe y.

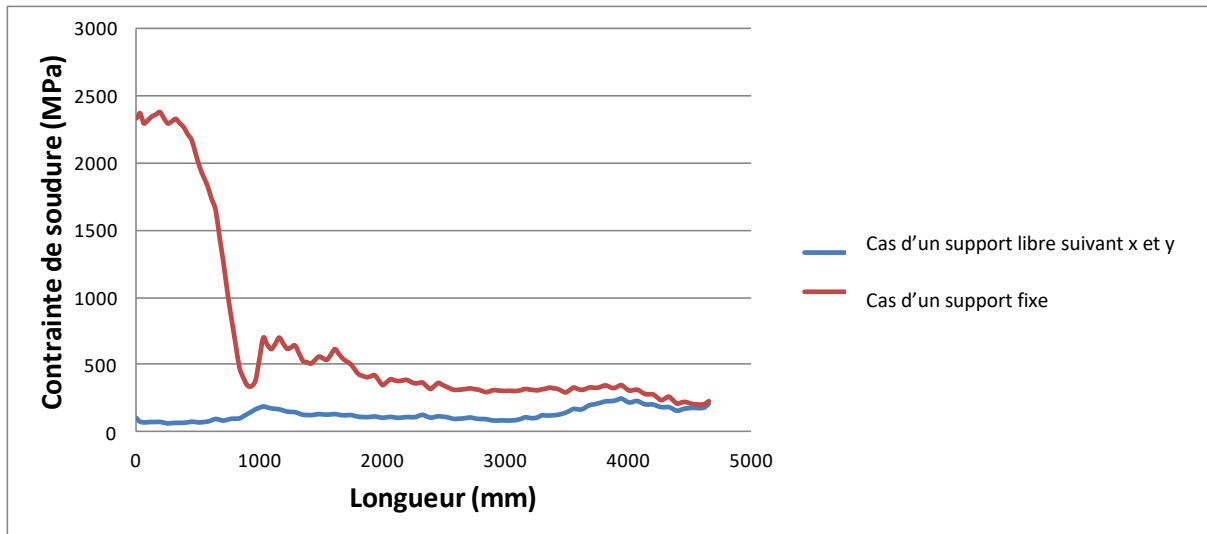


Figure IV.13 Comparaison des résultats de la contrainte thermomécanique au niveau du cordon de la soudure

## **Conclusion general**

L'objectif principal du document était d'étudier l'influence des sollicitations thermomécaniques sur la variation des contraintes thermomécaniques dans la structure de notre chaudière à tubes de fumée. Les résultats de la simulation indiquent que la partie de la chaudière qui est la plus sollicitée est la zone de la plaque de renversement, précisément l'extrémité en dessus des supports fixes, reliée par soudage avec le cylindre extérieur.

Les joints soudés dans cette zone sont les plus exposés au danger et peuvent entraîner une fuite d'eau dans la chaudière et donc son arrêt s'ils ne sont pas bien dimensionnés. Pour diminuer ces contraintes, on a diminué la température du bruleur, les résultats montrent que effectivement la contrainte équivalente maximale dans le cordon de la soudure de la plaque de renversement avec le cylindre extérieur à diminuer par environ 37%. Dans la perspective, pour diminuer encore d'avantage cette contrainte, on suggère d'utiliser une épaisseur des tôles de la chaudière supérieure à 15 mm.