
SOMMAIRE

REMERCIEMENTS

LISTE DES ABREVIATIONS

LISTE DES NOTATIONS

INTRODUCTION

PARTIE I : ETUDES BIBLIOGRAPHIQUES

PARTIE II : ETUDE DE CONCEPTION ET REALISATION

PARTIE III : ETUDE FINANCIERE ET ENVIRONNEMENTALE

CONCLUSION

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

RESUME

ABSTRACT

LISTE DES ABREVIATIONS

PVC: polyvinylchloride

DCO: Demande Chimique en Oxygène

MEC : Madagascar Energie Compagnie

WWF: world Wildlife fund

CHDI: Centre Hospitalier du District niveau 1

CPT: Cahier de Prescription Technique

ESPA : Ecole Supérieure Polytechnique d'Antananarivo

FED : Fond Européen de Développement

JIRAMA : Jiro sy RAno MAlagasy

TTC : Toute Taxe Comprise

UE: Union Européenne

LISTE DES NOTATIONS

MW : Méga Watt

Pa/m : viscosité

mCE/m : perte de charge linéique

MO : Manœuvre

MO : Maitre d'œuvre

MS : Matériaux Solutionnés

PV : Prix unitaire de Vente

RN : Route Nationale

Wp : Limite de plasticité

Unités

Ar : Ariary

Cm : Centimètre

Cm² : Centimètre Carré

Fmg : Franc Malagasy

Kg : Kilogramme

Km : Kilomètre

Kg/m² : Kilogramme par Mètre Carré

Km² : Kilomètre Carré

Km/m : Kilomètre par mètre

m : Mètre

m/m : Mètre par Mètre

m/s : Mètre par Seconde

m² : Mètre Carré

m³ : Mètre Cube

ml : Mili Litre

mn : Minute

INTRODUCTION

Dans son acception moderne, la chaudière 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). Les chaudières sont les plus utilisées quotidiennement dans plusieurs domaines d'applications. La chaudière est un appareil qui sert à obtenir soit de l'eau chaude ou vapeur qui peut tourner une turbine pour produire l'électricité. Le prix d'une chaudière est très élevé dans le marché local. Des recherches ont été mises en place, pour avoir des solutions pour réduire le prix d'une chaudière. Ce pour cela qu'on a mené une étude sur la conception d'une chaudière en bouteille de gaz. La fabrication d'une chaudière nécessite le choix rigoureux des matières premières pour que le prix soit compétitif en tenant compte des paramètres environnementaux.

Notre étude est orientée vers l'obtention d'eau chaude par l'utilisation des matières premières qui se trouvent localement. Le plan se divise en trois grandes parties:

Primo, nous parlons de l'étude bibliographique, secundo, nous abordons sur l'étude de conception et la réalisation et tertio, nous présentons l'étude financière et l'impact environnemental.

PARTIE I : ETUDE BIBLIOGRAPHIQUE

CHAPITRE I : Chaudière

Au début de l'ère industrielle, le mot chaudière désignait un foyer et son échangeur dans de grosses installations de cuisine et de chauffage.

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).

Définition scientifique : « Système permettant d'augmenter la température d'un fluide caloporteur afin de déplacer de l'énergie thermique ».

1. Type

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

a. 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.

Classification par installation (chaudières 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
- Chaudières murales : Les chaudières murales conviennent aux habitations de petite taille (appartements). Elles offrent une puissance moindre que les chaudières au sol.

b. Classification par application

- Chauffage collectif
- Applications industrielles (agro-alimentaire, chimie, papeterie, cimenterie, etc.)
- Centrales thermiques

c. Classification par type de fluide caloporteur



Photo1 : Une chaudière à vapeur pour moteur stationnaire.

d. Une chaudière à vapeur pour moteur stationnaire

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

- i. 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.

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.

e. 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,
 - 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 nucléaire.

CHAPITRE II : Classification par source de chaleur

1- Chaudières à combustion

a- Chaudières à combustibles liquides 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 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.

b- Chaudières à combustibles solides

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.

b-1 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 « spreader 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.

b-2 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 utilisées 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.

Le charbon pulvérisé est introduit dans la

b-3 Les foyers à charbon pulvérisé

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.

a- Chaudières de récupération

L'énergie thermique est récupérée d'un fluide chaud (gaz d'échappement d'une turbine à gaz ou gaz processus 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.

b- Chaudières électriques

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 %.

CHAPITRE III : Classification par construction

- Chaudières à tubes de fumées



Photo2 : Chaudière tubulaire neuve destinée à la locomotive 030T n° 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.

- Chaudières à tubes 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.

1- Classement par type de circulation

a- à circulation naturelle

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.

b- à circulation assistée

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 bars, la différence de masse volumique entre eau liquide et 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.

c- à 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 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 "mono tubulaires" 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.

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.

2- Classification par architecture

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), où les échanges thermiques se font essentielle par rayonnement ;
- la zone de convection, dans lesquels divers échangeurs de chaleur (économiseurs, surchauffeurs...) sont installés et les échanges de chaleur sont par convection.
-

a- Chaudière à deux passes

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.

b- Chaudière tour]

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

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.



Photo3 : Chaudière individuelle murale pour le chauffage des logements



Photo4 : Maquette de chaudière à vapeur pour navire, en cuivre et fonte. Musée de la Marine, Paris.

- Une chaudière de chauffage central, permet de distribuer de la chaleur dans différents locaux. La restitution de chaleur s'effectue à l'aide de radiateurs ou d'un plancher chauffant. Le fluide employé est généralement de l'eau. Un second circuit peut assurer la production d'eau chaude sanitaire (douche, etc.). Les fumées des chaudières standards contiennent de l'eau à l'état de vapeur produite lors de la réaction de combustion.
- Les chaudières à condensation, un peu plus onéreuses, sont équipées d'un échangeur supplémentaire au niveau du rejet des fumées où circule l'eau de chauffage avant son introduction dans la chaudière. Ceci permet de condenser l'eau contenue dans les produits de combustion et donc de récupérer l'énergie latente de condensation donnant l'illusion d'un « rendement » supérieur à 1 quand celui-ci est exprimé en pouvoir calorifique inférieur. Ces chaudières sont intéressantes seulement lorsque la température d'introduction dans la chaudière est basse (environ 40 °C au lieu des 60 °C habituels). La durée de vie d'une chaudière de bonne marque et soigneusement entretenue chaque année peut dépasser 35 ans. Les chaudières de faible puissance (chaudière individuelle) ont une durée de vie de 15 à 20 ans.
- Les chaudières pulsatives qui obtiennent un rendement proche des 111 % PCI et reposent sur un principe de combustion différent des chaudières classiques.
- Une chaudière de locomotive à vapeur chauffe de l'eau jusqu'au stade de la vapeur en surpression, cette vapeur en se détendant pousse des pistons pour délivrer une force mécanique qui est utilisée pour déplacer la locomotive.
- Les systèmes de nettoyage vapeur en vogue dans les années 1990-2000 comportent une chaudière à circuit non fermé produisant la vapeur d'eau.
- Une chaudière utilisée pour fournir à un procédé industriel, chaleur et/ou force.
- Une centrale nucléaire utilise le principe de la chaudière. La réaction nucléaire chauffe un liquide, jusqu'à ce qu'il se transforme en vapeur pour entraîner un alternateur.
- La chaudière à granulés utilise des granulés de bois (appelés également pellets) comme combustible, ceux-ci prenant la forme de cylindres compacts de résidus de bois. Ces pellets sont introduits automatiquement via une vis sans fin dans le foyer. Le compactage et le faible taux d'humidité des pellets leur procurent un pouvoir calorifique important et un rendement relativement élevé

1- Le principe

La puissance de la production de chaleur est déterminée en fonction des besoins de chaleur du bâtiment. Sur base du besoin de chaleur, l'objectif du dimensionnement de la ou des chaudières est de lui/leur permettre de travailler à charge partielle un maximum de temps pendant la période de chauffe. En effet, le fonctionnement à charge partielle permet aux chaudières à gaz ou au fuel de produire de la chaleur avec un meilleur rendement de combustion.

2- La puissance pour les chaudières

Avec les chaudières modernes dont le coefficient de perte à l'arrêt est extrêmement réduit (... 0,2 % ... de la puissance chaudière), en adaptant la puissance du brûleur aux besoins réels, le rendement s'améliore. En effet, dans ce cas, la surface d'échange de la chaudière augmentant par rapport à la puissance de la flamme, la température de fumée à la sortie de la chaudière sera plus basse et le rendement de combustion plus élevé. Cette augmentation de rendement sera plus élevée que la légère augmentation des pertes à l'arrêt. Il faut cependant faire attention à ne pas abaisser exagérément la puissance du brûleur par rapport à la puissance de la chaudière sous peine de voir apparaître des condensations dans celle-ci. Il faut rester dans les limites préconisées par chaque constructeur. Il faut également tenir compte du surinvestissement éventuel pour la chaudière. La PEB (Performance Énergétique des bâtiments) demande de préciser quel est le rendement à un taux de charge de 30 % ; c'est la valeur à laquelle l'ensemble brûleur/chaudière donne en général son meilleur rendement. De ce point de vue, le choix d'une puissance de chaudière plus élevée que la puissance de dimensionnement ne permettra pas à celle-ci de travailler à charge partielle pendant un maximum de temps.

En effet, comme le montre le schéma ci-dessous, le rendement de combustion s'améliore à charge partielle. Les brûleurs gaz à pré-mélange avec contrôle de la combustion permettent d'améliorer le rendement de 4 à 5 % entre la charge nominale (100 %) et la limite basse de charge partielle (10 %). La plupart des constructeurs ne vont pas plus bas que les 10 %. Pour beaucoup de modèles de chaudière à air pulsé, l'optimum de rendement se situe autour des 30-40 % de taux de charge.

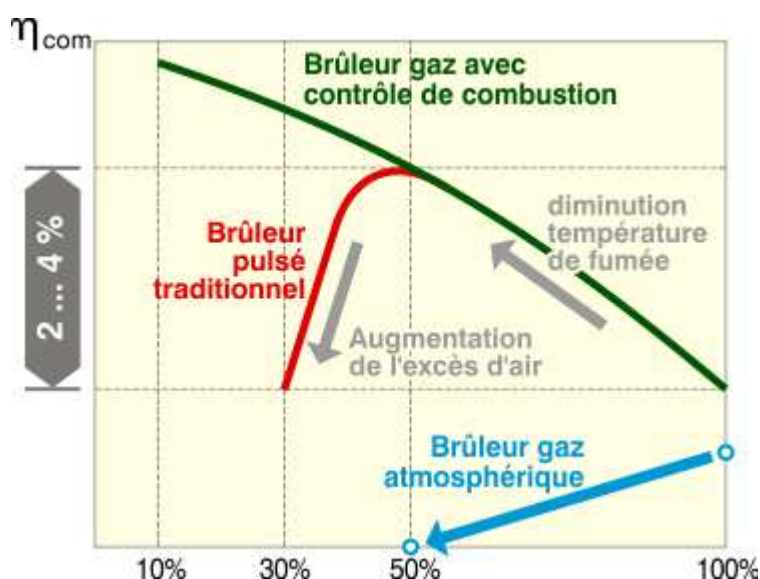


Figure1 : Rendement de combustion.

La monotone de chaleur donne des renseignements sur le taux de charge de la chaudière auquel on doit s'attendre sur une saison de chauffe, et ce pendant un nombre d'heures déterminé.

- **Dimensionnement des chaudières bois**

Les chaudières au bois, pellets ou plaquettes, possèdent des spécificités par rapport aux chaudières gaz ou fioul si bien qu'elles sont dimensionnées différemment, du moins dans le domaine tertiaire. Voici les éléments qui vont modifier le raisonnement :

- **Plage de modulation de puissance plus restreinte :**

Les chaudières au bois fournissent leur meilleur rendement près de la puissance nominale, c'est-à-dire proche de la puissance maximale. Quand on réduit la puissance, le rendement diminue légèrement. Néanmoins, comme toute chaudière, la plage de modulation des chaudières au bois sont limitées. Cette plage est plus restreinte que pour le gaz ou certains brûleurs au mazout. En dessous d'un certain seuil de puissance, le rendement de la chaudière et la qualité de la combustion deviennent nettement dégradés. Pour les chaudières de puissances élevées, on peut donner un ordre de grandeur pour la puissance minimale qui est de 25-30 % de la puissance nominale. En dessous de cette valeur de puissance minimale instantanée, il n'est pas souhaitable de faire fonctionner la chaudière au bois.

- **Besoin de cycles longs de production :**

Les chaudières au bois ont besoin de fonctionner sur base de cycles de production longs pour atteindre les meilleurs rendements et une qualité de combustion efficace, ce qui limite l'émission de gaz et particules nocifs. Pour un besoin de puissance thermique faible du bâtiment, c'est-à-dire à température extérieure modérée, la puissance minimale de la chaudière ne peut descendre à ce niveau (à cause des limites de modulation citées ci-dessus). On pourrait imaginer de travailler avec une puissance à la chaudière qui appartient à sa plage de modulation (par exemple, à puissance minimale) et arrêter/redémarrer la production de la chaudière de manière régulière pour atteindre le niveau de demande du bâtiment. En d'autres termes, puisqu'on n'est pas arrivé à réduire suffisamment la puissance instantanée de la chaudière pour rencontrer le niveau de besoin du bâtiment, on diminue son temps de fonctionnement. Par définition, cela raccourcit la durée de cycles de production ce qui n'est pas compatible avec de bons rendements et une faible émission de gaz nocifs. Cette notion de "cyclage", c'est-à-dire d'arrêter et redémarrer la combustion pour les faibles besoins, est aussi rencontrée pour les chaudières gaz et mazout possédant un niveau de modulation de puissance relativement faible. Pour les techniques gaz et mazout, idéalement, il faut aussi éviter ces cyclages. Néanmoins, la longueur des cycles de production est moins critique pour ces vecteurs énergétiques que pour le bois-énergie.

- **Dimensionnement de la puissance maximale des besoins**

On part de la puissance maximale demandée au système de chauffage. Celle-ci est estimée en sommant les pertes par transmission, ventilation, infiltration avec une température externe égale à la température de base. Ensuite, on complète éventuellement par une certaine marge de puissance afin d'assurer la relance (si on travaille en régime intermittent).

- **Dimensionnement de la chaudière bois : aspects techniques**

Si on dimensionne la puissance nominale de la chaudière principale au bois sur la puissance maximale demandée au chauffage, elle ne pourra pas répondre à tous les appels de puissance du bâtiment. En effet, à température externe modérée, la modulation de la chaudière principale au

bois ne pourra pas toujours descendre au niveau de puissance requis sans dégrader fortement son rendement voire la qualité de la combustion. Pour les faibles puissances, celles-ci devront être produites par une autre chaudière capable de travailler efficacement dans cette plage. Dans le diagramme ci-dessous, l'énergie produite par la chaudière principale au bois peut être comparée à l'énergie produite par l'appoint : il s'agit des aires sous la courbe.

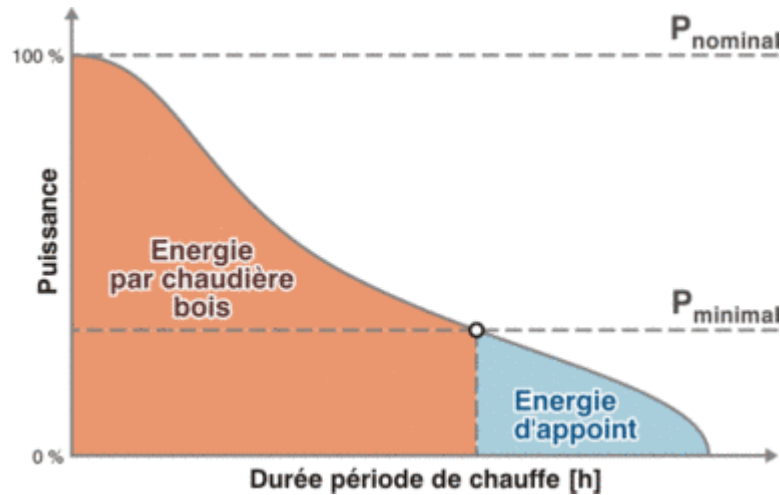


Figure2 : Illustration sur la monotone de charge du taux de couverture d'une chaudière bois dimensionnée sur la puissance maximale.

La fraction de la demande annuelle produite par la chaudière principale au bois s'appelle le taux de couverture. Pour optimiser la chaudière principale au bois, il faut maximiser ce taux de couverture. La manière de procéder consiste à ne pas dimensionner la puissance nominale de la chaudière sur la puissance maximale demandée au système de chauffage. Cela abaisse la puissance minimale qui peut être produite par la chaudière et on est donc à même de produire pour des températures extérieures plus modérées correspondant à des besoins relativement faibles. En fait, dans la monotone de charge, on sacrifie les pics de puissance qui n'ont lieu que pendant peu de temps pour intégrer les faibles puissances qui sont atteintes pendant une plus grande partie de l'année : le niveau de puissance que l'on retrouve pendant la majeure partie de la saison de chauffe s'appelle aussi charge de base. On peut se convaincre de l'intérêt de dimensionner à une puissance inférieure à la puissance maximale des déperditions avec la monotone de charge suivante où la production annuelle de la chaudière principale bois est supérieure au cas précédent (c'est-à-dire quand la chaudière a une puissance nominale égale à la puissance maximale de besoin de chauffage).

On peut réaliser le même raisonnement pour différents niveaux de puissance nominale de chaudière principale au bois. Typiquement, on obtient un taux de couverture optimal avec une puissance de chaudière principale bois inférieure à la puissance maximale de besoin de chauffage : une puissance nominale trop faible donne des taux de couverture trop faibles et, au-delà de l'optimum, une puissance nominale trop proche de la puissance maximale réduit le taux de couverture. En fait, cet optimum dépend de la forme de la monotone de charge et donc varie d'un bâtiment, d'une institution, à l'autre.

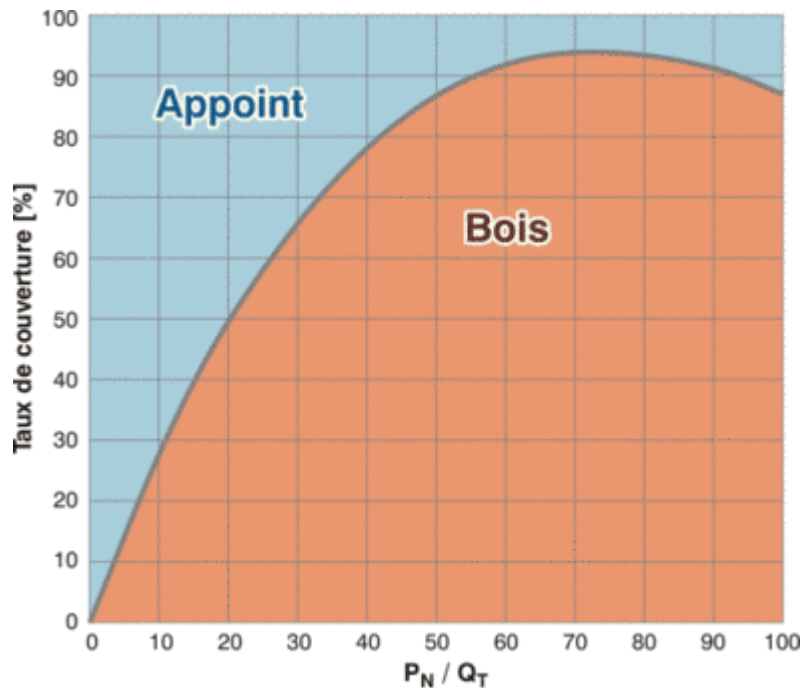


Figure 3 : Exemple d'évolution du taux de couverture en fonction du rapport entre la puissance de la chaudière (PN) et la puissance maximale des déperditions (QT).

Il faudra réaliser un appoint de puissance pour couvrir les besoins de puissance du bâtiment supérieurs à la puissance nominale de la chaudière bois. Cela s'opère par une chaudière d'appoint. Si cette chaudière d'appoint travaille sur base d'un vecteur énergétique autre que le bois, on dira que l'on travaille en mode bivalent. Dans certains cas, la chaudière d'appoint pourrait elle-même fonctionner au bois-énergie. Dans ce cas, on dira plutôt que l'on travaille avec des chaudières en cascade si le conditionnement est le même pour les deux chaudières.

- **Dimensionnement de la chaudière bois : aspects économiques**

Les chaudières bois sont caractérisées par des coûts d'achat supérieurs aux chaudières traditionnelles gaz ou mazout. Du coup, il peut être intéressant de ne pas dimensionner la chaudière bois sur la puissance maximale de chauffage comme les puissances élevées sont appelées très peu souvent. On calibre la chaudière bois sur la charge de base pour qu'elle fonctionne un maximum de temps et que le surinvestissement pour la chaudière bois puisse s'amortir plus rapidement. C'est une seconde raison qui justifie un fonctionnement en mode bivalent.

Dans le point précédent, nous avons annoncé que la chaudière d'appoint pouvait fonctionner au bois. Pourtant, sur base de considérations économiques, l'intérêt de placer une chaudière traditionnelle gaz ou mazout est plus évident étant donné qu'elle est amenée à fonctionner pour des courtes périodes de la saison de chauffe. Néanmoins, dans certains cas, une chaudière d'appoint fonctionnant au bois-énergie semble pouvoir se justifier économiquement. Tout dépend de la consommation annuelle que devra assurer cette chaudière, du coût et de la disponibilité du combustible pour l'institution qui utilisera cette chaudière.

Sécurité d'approvisionnement de chaleur : chaudière de soutien

Dans les considérations précédentes, on pourrait penser que la chaudière d'appoint a une puissance relativement faible, c'est-à-dire juste le complément de puissance nécessaire pour assurer, avec la chaudière principale au bois, le besoin maximal de chauffage. En fait, dans

certain cas, la puissance de la chaudière d'appoint est supérieure à la puissance de la chaudière bois. En effet, on veut, pour certaines applications, garantir l'alimentation en chaleur du bâtiment même si la chaudière bois ne peut plus fonctionner (pour cause de panne, entretien, manque de combustible dans le silo). Ce problème de sécurité d'approvisionnement se pose pour tous les vecteurs énergétiques (gaz et mazout compris). La chaudière d'appoint aura un rôle de soutien ("backup") pour pouvoir maintenir la température du bâtiment à un niveau acceptable même si la chaudière principale au bois ne peut plus fonctionner temporairement, niveau qui n'est pas nécessairement égal à la température de consigne : on peut dans certains cas juste maintenir la température à une valeur modérée inférieure à la consigne, le temps de remettre la chaudière principale au bois en fonctionnement.

A titre d'exemple, on peut citer le cas de la chaufferie de Libin¹ qui alimente un réseau de chauffage urbain. La chaudière principale est une chaudière à plaquettes de 550kW qui est dimensionnée pour répondre à 95% du besoin annuel de chaleur. Par conséquent, la chaudière d'appoint ne doit répondre qu'à 5% du besoin annuel. Néanmoins, cette chaudière travaillant au mazout présente une puissance nominale de 600kW afin de pouvoir servir de soutien en cas de panne de la chaudière principale.

- **Dimensionnement des circuits de distribution**

Le débit que doit véhiculer un circuit de distribution dépend de la puissance à fournir et du régime de dimensionnement des corps de chauffe.

La section des conduites se déduit de la relation :

$$\text{Section} = \text{débit} / \text{vitesse}$$

Plus les conduites de distribution sont étroites, pour assurer ce débit, plus la vitesse de l'eau est élevée, avec pour conséquences :

- l'augmentation du bruit,
- l'augmentation des pertes de charge et de la consommation électrique du circulateur,
- la difficulté de réglage de l'installation.

En contrepartie, le coût des conduites est moindre.

Deux techniques sont possibles pour dimensionner le diamètre des conduites :

- se fixer une vitesse maximale constante (par exemple 0,5 m/s) dans tout le réseau,
- ou se fixer une perte de charge constante pour chaque tronçon (par exemple, 120 Pa/m).

La première méthode donne généralement d'importants diamètres (investissement élevé, mais consommation des circulateurs moindres). La deuxième méthode peut donner des vitesses de circulation élevées et des problèmes acoustiques.

CSTC conseille de combiner les deux méthodes :

- pour les diamètres réduits (DN10-20), limiter la vitesse de l'eau à 0,4 m/s pour des

¹une commune francophone de Belgique située en Région wallonne dans la province de Luxembourg, ainsi qu'une localité où siège son administration.

raisons acoustiques,

- augmenter cette vitesse à 0,8 à 1,2 m/s dans les grands diamètres (> DN50) si les conduites parcourent des locaux inoccupés, pour des raisons économiques,
- ne pas dépasser une perte de charge de 120 Pa/m pour les tronçons intermédiaires pour limiter les pertes de charge.

Ce n'est évidemment pas au responsable technique à dimensionner les conduites. Il peut cependant s'interroger sur les grandeurs de référence maximale utilisées par le bureau d'études lors de la conception. Par exemple, si on dimensionne les conduites pour une perte de charge linéaire de 50 Pa/m au lieu de 120 Pa/m, la puissance absorbée par le circulateur diminuera de 30 à 40 %. Le prix des conduites augmentera de 4 à 8 %.

- **Dimensionnement des circulateurs**

Le dimensionnement correct des circulateurs est un poste important qui va conditionner non seulement la consommation électrique de l'installation, mais aussi son confort.

Malheureusement, on ne calcule pas toujours précisément l'installation parce que cela prend du temps et que cela coûte plus cher que de mettre un circulateur trop gros.

On peut se faire une idée du dimensionnement correct des circulateurs en comparant la puissance électrique de ces derniers à la puissance des chaudières. Attention cependant, cette méthode ne peut convenir que pour vérifier le dimensionnement. Elle ne peut en aucun cas servir au dimensionnement d'un nouveau circulateur qui doit se faire en calculant les pertes de charge du réseau.

Simulation du rapport entre puissance électrique du circulateur P_e en [W] et la puissance des chaudières P_{th} [kW] en fonction du volume du bâtiment, pour plusieurs circulateurs présents sur le marché. Hypothèses de calcul : régime de température avec $DT = 20\text{ °C}$ (ex : $90\text{°}/70\text{ °C}$), pertes de charge linéiques de 0,01 [mCE/m] et pertes de charge de la chaudière et des organes de régulation de 1 [mCE/m] (valeurs réalistes et représentatives de la pratique).

- a. pour le circulateur avec rendement moyen,
- b. pour les circulateurs avec rendement élevé,
- c. pour les circulateurs avec rendement faible. Le rapport P_e/P_{th} ne dépasse 2 que pour des circulateurs ayant un rendement faible

Les Suisses (programme d'impulsion RAVEL) considèrent qu'une installation équipée de radiateurs normalement dimensionnée doit vérifier la relation :

$$\text{puissance électrique d'un circulateur } P_e \text{ en [W]} = \text{puissance thermique du réseau qu'il alimente } P_{th} \text{ [kW]}$$

En tout cas si :

$$\text{puissance électrique d'un circulateur } P_e \text{ en [W]} = 2 \times \text{puissances thermique du réseau qu'il alimente } P_{th} \text{ [kW]}$$

Il est fort probable que le circulateur choisi soit surdimensionné ou que son rendement soit mauvais.

La puissance thermique de chaque réseau a dû être calculée par le bureau d'études, car elle est nécessaire pour établir le débit d'eau à fournir. On peut également la vérifier par une méthode approximative, circuit par circuit. Par extrapolation, on peut également dire que les circulateurs sont globalement bien dimensionnés si :

$$\text{puissance électrique de tous les circulateurs PE en [W]} = \text{puissance thermique des chaudières } P_{th} \text{ [kW]}$$

Comme pour les circulateurs de moins de 1 kW, les constructeurs ne fournissent pas la puissance électrique absorbée des circulateurs pour chaque point de fonctionnement, on se basera pour établir la puissance électrique du circulateur choisi sur la relation :

$$\text{puissance électrique du circulateur [W]} = 90 \% \text{ de la puissance lue sur la plaque signalétique [W]}$$

• Dimensionnement des corps de chauffe

Comme mentionné dans "Le choix des corps de chauffe", dimensionner les corps de chauffe pour un régime de température de 70°/50° au lieu du 90°/70° traditionnel augmente les performances des chaudières à condensation. Cependant, le surcoût de ce surdimensionnement ne sera pas vite rentabilisé. Si ce temps de retour est considéré comme excessif, un bon compromis est alors de choisir le régime 80°/60°.

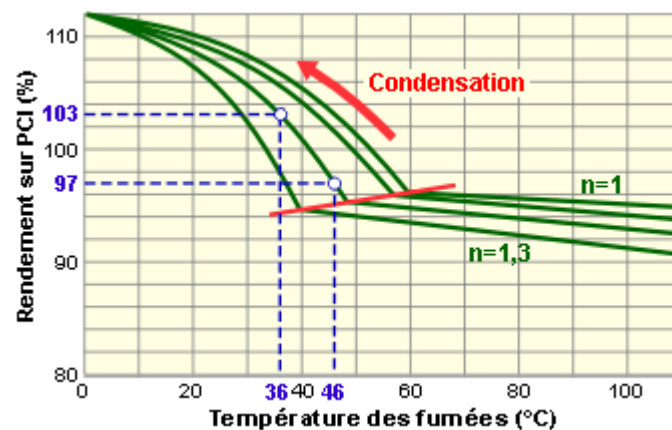


Figure4 : dimensionnement

Rendement utile d'une chaudière gaz en fonction de la température des fumées et de l'excès d'air (n = 1,3 équivaut à un excès d'air de 30 %). Pour un excès d'air de 20 %, une température de retour 43° C (équivalent à une température de fumée de 46 °C) équivaut à un rendement utile de 97 %, une température de retour de 33 °C (équivalent à une température de fumée de 36 °C), à un rendement utile de 103 %.

CHAPITRE V : Chauffe-eau

Le chauffe-eau est un équipement domestique ou industriel servant à faire chauffer de l'eau à l'aide d'une source d'énergie, qui peut être de l'électricité, du gaz, du fioul, la thermodynamique, une pompe à chaleur, ou l'énergie solaire, qui est de plus en plus utilisée.

On distingue deux grandes familles de chauffe-eau :

- ceux qui ont une réserve d'eau chaude importante, on les appelle aussi ballons d'eau chaude. S'ils sont électriques, ils présentent l'avantage de pouvoir chauffer l'eau la nuit, lorsque l'électricité coûte moins cher (dans certains pays, et en fonction de l'abonnement). Les chaudières de chauffage central peuvent aussi chauffer l'eau domestique.
- ceux qui chauffent l'eau uniquement à la demande, au moment du soutirage (chauffe-eau instantané).



Photo5 : Série de chauffe-eau au propane.

L'eau chaude sanitaire

Tableau 1 : Avantages et inconvénients des systèmes de chauffe-eau

Comparatif entre ballon d'eau chaude et chauffe-eau instantané:		
	Chauffe-eau instantanés	Ballon d'eau chaude
Pratique	<ul style="list-style-type: none">• La quantité d'eau fournie est illimitée ;	<ul style="list-style-type: none">• Le ballon se vide plus rapidement (parce que l'échangeur est petit et

	<ul style="list-style-type: none"> • Il faut toujours laisser couler l'eau un certain temps avant qu'elle ne soit chaude. Certains fabricants résolvent ce problème par un système de préchauffage (eau chaude en 3 secondes). • Il peut provoquer des désagréments (inconstance de la température) si plusieurs robinets débitent l'eau simultanément. Un appareil muni d'un brûleur modulable ou l'usage d'un mitigeur thermostatique peut résoudre le désagrément des températures variables mais pas celui du débit lors du puisage d'eau en deux points (température constante indépendamment du débit) ; • Lorsque le robinet est faiblement ouvert on ne dispose pas toujours d'eau chaude. 	<p>ne fait pas obstacle au débit) et donc la baignoire peut se remplir plus rapidement si les robinets et tuyauteries le permettent ;</p> <ul style="list-style-type: none"> • L'eau chaude est toujours disponible même lorsque le robinet est faiblement ouvert ; • Il faut du temps pour amener l'eau chaude à température choisie et les ballons d'eau chaude électriques ont besoin de plus de temps que ceux au gaz naturel ou au fioul ; • Réglez de préférence la température sur 60° : en dessous, le risque de prolifération des bactéries dans le réservoir augmente; en revanche, une température supérieure à 60 °C accroît l'entartrage, le risque de brûlures et les pertes de chaleur puisque le ballon d'eau chaude doit compenser le refroidissement de la réserve d'eau.
Énergie	<ul style="list-style-type: none"> • Il n'y a aucun gaspillage d'énergie : la consommation est nulle en l'absence d'utilisation d'eau chaude, excepté la veilleuse (anciens systèmes à gaz). 	<ul style="list-style-type: none"> • Consomme plus d'énergie. De plus, l'eau est chauffée même lorsqu'on n'en a pas besoin.
Rendement	<ul style="list-style-type: none"> • Moins bon 	<ul style="list-style-type: none"> • Le ballon d'eau chaude a un meilleur rendement que le chauffe-eau instantané.
Prix	<ul style="list-style-type: none"> • Les chauffe-eau instantanés sont meilleur marché à l'achat mais ils ne peuvent pas bénéficier du tarif "heures-creuses" lorsqu'il existe. 	<ul style="list-style-type: none"> • Plus cher à l'achat mais mieux isolé.

A/ Le chauffe-eau

1- Débit

Lors du choix d'un chauffe-eau, il faut être attentif à sa capacité de débit (capacité et vitesse d'écoulement) :

Tableau2 : capacité et vitesse d'écoulement

Utilisation/débit	5L/min.	10L/min.	13L/min.	16L/min.	20L/min.
Évier	X	X	X		
Évier + douche		X	X	X	X
Évier + bain			X	X	X
Évier + douche + bidet				X	X

Le temps d'attente pour l'obtention d'eau chaude est dépendant :

- du débit du robinet,
- de la section de la tuyauterie,
- de la distance entre le chauffe-eau et le robinet (au plus court, au mieux),
- de l'isolation des tuyauteries (pour limiter les pertes de chaleur).

2- Source d'énergie

a- Le gaz naturel

Le gaz naturel est le combustible le meilleur marché, mais il exige quelques adaptations :

- une cheminée avec ventilation supérieure et inférieure,
- un dispositif de sécurité qui coupe le chauffe-eau lors d'un retour d'air dans la cheminée.

b- L'électricité

L'électricité est souvent utilisée pour les petits besoins d'eau (par ex. pour un évier de cuisine). Les gros appareils peuvent nécessiter une adaptation de l'alimentation électrique.

c- Le propane

Le propane est utilisé pour les habitations qui ne disposent pas d'un raccordement au gaz naturel.

B/ Le ballon d'eau chaude

1- La capacité du réservoir

Le réservoir doit être dimensionné en fonction des besoins du ménage.

- Il ne doit pas être trop petit car on risque de se trouver souvent sans eau chaude.
- Il ne doit pas être trop grand car le coût d'achat et la consommation en énergie sont plus élevés.

Le dimensionnement conseillé est de :

- 100 l pour une habitation avec douche,
- 130 l pour une habitation avec une baignoire,
- 160 l pour une habitation avec 2 baignoires pouvant fonctionner simultanément.

Il faut également s'assurer du bon rendement du ballon d'eau chaude afin qu'il assure un confort optimal et une consommation moindre.

2- Le réglage de la température de l'eau stockée

La température de l'eau qui est stockée dans le ballon doit être réglée.

- Elle ne peut pas être trop froide : cela crée de l'inconfort et un déficit d'hygiène.
- Elle ne doit pas être trop chaude: le rendement décroît, la consommation d'énergie augmente, on risque de se brûler et on augmente le risque de dépôt de calcaire.
- La température conseillée est de 60 à 65 °C.

• Entretien et durabilité

Les ballons d'eau chaude ont une durée de vie plus ou moins longue en fonction des mécanismes mis en place pour garantir leur durabilité et de l'entretien. De manière générale les ballons d'eau chaude durent plus longtemps que la garantie du constructeur. L'entretien de ce matériel étant souvent négligé, une fois la panne ou la fuite déclarée, l'appareil est souvent remplacé.

• Cuve

Les cuves des ballons d'eau chaude sont réalisées en métal, qui, même protégé par un revêtement comme de l'émail, peut être corrodé par l'eau chlorée.

Les chauffe-eau possèdent donc des mécanismes de protection de la cuve :

- L'anode sacrificielle, par exemple une anode en magnésium, protège la cuve mais doit être remplacée une fois consommée.

- **Résistance**

On distingue 2 types de résistances, blindée et stéatite. Dans le premier cas, la résistance est plongée dans la cuve. Étant directement au contact de l'eau, elle est vulnérable à l'entartrage qui peut à terme empêcher son fonctionnement. Ces résistances sont donc à proscrire si l'eau est très calcaire. Dans le deuxième cas, la résistance est placée dans un fourreau sans contact avec l'eau. Il n'y a donc plus d'entartrage. Autre avantage de ce système, il n'est pas nécessaire de vidanger l'appareil pour changer la résistance, le fourreau maintenant l'étanchéité.

C / Les types de chaudières

1- Les ballons d'eau chaude électriques

Le premier chauffe-eau électrique à accumulation est inventé en 1915 par Frédéric Sauter.

Une résistance électrique dans le réservoir amène l'eau à la température souhaitée.

- Les ballons d'eau chaude économiques sont branchés sur le tarif bi-horaire, un interrupteur permettant un réchauffement supplémentaire durant la journée.
- Le ballon d'eau chaude de confort est proche du ballon d'eau chaude économique, mais il chauffe l'eau automatiquement si la réserve descend sous la température de référence.
- Les chauffe-eau instantanés sont meilleur marché, et ont une durée de vie plus longue que les ballons d'eau chaude électriques ordinaires, mais on ne peut les utiliser que pour de petites quantités (lavabos, cuisines, etc.).
- Les bouilloires (seulement pour les cuisines) ne chauffent l'eau que lorsqu'elles sont remplies et si on les met en marche. Elles ont une longue durée de vie mais conviennent uniquement pour de petites quantités.

2- Les chauffe-eau au gaz naturel et au mazout

Ils sont plus économiques et généralement plus rapides que les chauffe-eau électriques.

3- Les chauffe-eau à chauffage direct

Les chauffe-eau à chauffage direct fonctionnent indépendamment du chauffage central et disposent de leur propre brûleur. L'eau traverse un tuyau en spirale placé dans les gaz chauds. Ce système est le plus avantageux : le temps de chauffage est court et le débit d'eau élevé.

4- Les chauffe-eau à chauffage indirect

Les chauffe-eau à chauffage indirect fonctionnent à l'aide de la chaudière du chauffage central. L'eau du chauffage est envoyée dans un échangeur à plaques de très grande surface d'échange. La chaleur est transférée instantanément à l'eau froide sanitaire. Pendant la période de puisage d'eau chaude sanitaire, le circuit de chauffage est raccourci par une dérivation qui fait retourner

l'eau de chauffage sous la flamme avant qu'elle ne parte vers les radiateurs. Avantage : réchauffement presque instantané.

D'autres modèles fonctionnent selon le même principe que le bain-marie : un réservoir dans un autre. L'eau chaude de la chaudière qui remplit le réservoir extérieur (eau du circuit de chauffage) réchauffe l'eau contenue dans le réservoir intérieur (eau chaude sanitaire).

Avantage : le réchauffage est plus doux, il y a moins de danger de dépôts calcaires. Le réservoir intérieur contient de l'eau chaude immédiatement disponible, mais le transfert de chaleur est plus lent ; si le puisage est très grand, la température peut baisser.

5- Les chauffe-eau combinés

Les chauffe-eau combinés fonctionnent avec la chaudière pendant la période de chauffage de l'habitation et par alimentation électrique en été. Ce choix est retenu quand la source principale est manuelle ou aléatoire (bois-bûches, éolien, solaire)

6- Les chauffe-eau solaires



Photo6 :Chauffe-eau solaire de type monobloc : capteurs et ballon de stockage placés sur le même châssis.

Ce type de chauffage permet habituellement de compléter les types de chauffage de l'eau exploitant d'autres sources énergétiques (électricité, énergies fossiles, biomasse, ...), certains chauffe-eau solaires à tubes sous vide permettent de les remplacer totalement.

L'énergie solaire étant parfaitement renouvelable, ce remplacement permet de limiter efficacement les émissions de gaz à effet de serre ou la production de déchets nucléaires, raison pour laquelle l'installation de tels dispositifs est fortement encouragée par de nombreux États et collectivités via la fiscalité, des primes et/ou une obligation d'installation sur les nouvelles constructions.

7- Les chauffe-eau thermodynamiques



Photo 7 :Chauffe-eau thermodynamique

Un ballon d'eau chaude thermodynamique intègre une pompe à chaleur qui prélève des calories dans l'air pour les restituer à l'eau.

Son rendement (CoP) dépend de la qualité de la machine (compresseur, pièces, carte électronique...), de la technologie et du gaz frigorigère utilisé (R410A, CO2...). Contrairement à ce que l'on pourrait penser les ballons sur air intérieur ne présentent pas forcément des CoP plus performants (et surtout ils ont tendance à refroidir la pièce dans laquelle ils sont installés, ce qui peut être contre-productif).

Un ballon d'ECS (eau chaude sanitaire) thermodynamique est en général caractérisé par un CoP nominal de l'ordre de 3 à 4, mais son efficacité globale sur l'année est en pratique inférieure. Le rapport moyen global sur une année est de l'ordre de 2,6 si l'on compare un ECS thermodynamique (1 280 kWh) avec un ECS à résistance électrique (3 325 kWh), donc un tel équipement peut consommer 2,5 à 3 fois moins d'énergie à l'utilisation que les modèles à résistance électrique s'il est bien réglé.

De plus, les chauffe-eau thermodynamiques peuvent exploiter le tarif heures pleines/heures creuses car rien n'empêche le fonctionnement exclusif dans les moments les plus favorables économiquement. Certains sont même dotés de fonctionnalités (fil pilote de signal, mode boost,...) permettant une gestion plus intelligente en regard de son utilisation.

D / Utilisation rationnelle du charbon de bois

Qualité du charbon de bois
Efficacité de la combustion

L'utilisation du charbon de bois sera d'autant plus profitable qu'il sera brûlé plus efficacement, et que sa qualité sera optimale pour l'usage auquel on le destine. La qualité du charbon de bois peut être définie et mesurée de diverses manières, qui découlent en général des exigences de telle ou telle utilisation. L'efficacité de l'utilisation signifie normalement le transfert d'une proportion maximale du pouvoir calorifique du charbon de bois à la matière à chauffer, qu'il s'agisse d'eau pour la cuisson des aliments, de l'air d'une pièce d'habitation, ou de la charge d'un haut-fourneau. Elle est conditionnée par l'emploi d'appareils de combustion appropriés.

1- Qualité du charbon de bois

Le marché le moins exigeant à l'égard de la qualité du charbon de bois est celui des combustibles ménagers. Les raisons en sont que le rendement de la combustion est difficile à mesurer, que le pouvoir des consommateurs individuels de définir et obtenir une bonne qualité de charbon de bois est très réduit, et enfin qu'il y a une certaine possibilité de compromis entre qualité et prix, dont le consommateur use pour satisfaire au mieux ses besoins. Cela ne veut pas dire, toutefois, qu'il ne vaille pas la peine d'effectuer un contrôle de qualité. A la condition qu'il ne perde pas son efficacité dans les méandres de la bureaucratie, un système de contrôle de qualité du charbon de bois peut permettre de tirer un rendement maximum des ressources ligneuses, tout en garantissant au consommateur ménager des résultats satisfaisants.

Les gros utilisateurs tels que « l'industrie sidérurgique » en revanche, savent par expérience et par les résultats de leurs recherches quelles sont les caractéristiques qu'ils doivent rechercher dans le charbon de bois, et ont les moyens, par leurs possibilités d'achats concentrés et par leur maîtrise d'une partie au moins de leur propre production de charbon, de s'assurer que le charbon de bois qu'ils utilisent est bien conforme à leurs spécifications, et leur permet de produire de la fonte à un prix de revient minimum.

La plupart des spécifications qui interviennent dans le contrôle de qualité du charbon de bois proviennent de l'industrie sidérurgique ou de l'industrie chimique. Lorsque le charbon de bois est exporté, les acheteurs ont tendance à faire usage de ces normes de qualité industrielles, quand bien même le principal débouché de ce charbon serait le combustible à usage domestique ou le charbon pour barbecue. Ce fait ne doit pas être perdu de vue, en effet les exigences ne sont pas toujours identiques pour un usage industriel ou un usage domestique, et une appréciation judicieuse des exigences de qualité du marché réel peut permettre de fournir un charbon convenable à plus bas prix ou en plus grandes quantités, au bénéfice tant de l'acheteur que du vendeur.

La qualité du charbon de bois se définit par diverses caractéristiques, qui, bien que liées entre elles dans une certaine mesure, sont mesurées et évaluées séparément. Ces divers facteurs de qualité sont détaillés ci-dessous.

2- Teneur en humidité

Le charbon de bois fraîchement défourné renferme très peu d'humidité, en général moins de 1%. L'absorption d'humidité provenant de l'atmosphère est rapide, et il se produit un gain qui même en l'absence de pluie peut au bout d'un certain temps porter la teneur en humidité à 5 ou 10%, même avec un charbon bien carbonisé. Lorsque la carbonisation est moins poussée, ou que des acides pyroligneux et des goudrons solubles lessivés par la pluie ont imprégné le charbon, comme cela peut se produire dans les charbonnières en meule ou en fosse, son hygroscopicité se trouve accrue, et la teneur en humidité d'équilibre peut s'élever jusqu'à 15% ou même davantage. L'humidité altère la qualité du charbon de bois, faisant baisser son pouvoir calorifique. Lorsque le charbon est vendu au poids, les commerçants malhonnêtes le mouillent souvent, ce qui augmente son poids sans guère affecter son volume et son aspect. C'est pourquoi les acheteurs en gros préfèrent acheter le charbon de bois soit au volume brut, soit au poids en déterminant la teneur en humidité par des essais de laboratoire et en ajustant le prix en conséquence. Dans le petit marché de détail, la vente se fait souvent par morceaux.

Il est pratiquement impossible d'éviter que le charbon ne soit mouillé accidentellement par la pluie au cours du transport, mais il est bon de le conserver sous abri même si on l'a acheté au poids, parce que l'eau qu'il contient doit être évaporée lors de la combustion, et représente une perte directe de pouvoir calorifique. En effet la vapeur d'eau produite s'échappe par le conduit de tirage, et il est rare qu'elle se condense en restituant sa chaleur de manière utile.

Les spécifications de qualité pour le charbon de bois fixent généralement une limite de teneur en humidité, de l'ordre de 5 à 15% du poids brut. On détermine la teneur en humidité en séchant à l'étuve un échantillon de poids connu; on l'exprime en pourcentage du poids humide initial.

Un charbon de bois à forte teneur en humidité (10% ou plus) montre une tendance à se fragmenter et à former du poussier lorsqu'on le chauffe dans un haut-fourneau, et ne convient pas pour la production de fonte.

3- Matières volatiles autres que l'eau

En dehors de l'eau, les matières volatiles contenues dans le charbon de bois comprennent tous les résidus liquides et goudronneux qui ne sont pas totalement éliminés lors de la carbonisation. Si celle-ci est prolongée et se fait à haute température, la teneur en matières volatiles est faible. Lorsque la température de carbonisation est peu élevée et que le temps de séjour dans le four est bref, cette teneur augmente.

Ces effets se traduisent dans le rendement en charbon à partir d'un poids donné de bois. A basse température (300° C) un rendement en charbon de bois proche de 50% est possible. A une température de carbonisation de 500° - 600° C la teneur en matière volatiles est plus faible et un rendement de 30% avec un four-cornue est normal. A très haute température (de l'ordre de 1.000° C), enfin, la teneur en matières volatiles est voisine de zéro, et le rendement tombe à près de 25%. Comme on l'a indiqué plus haut, le charbon de bois peut réabsorber les goudrons et l'acide pyroligneux lessivés par la pluie dans les charbonnières en fosse ou analogues; un charbon peut par conséquent avoir été bien carbonisé, mais avoir une teneur élevée en matières volatiles en raison de ce facteur. Il en résulte une variation supplémentaire de la qualité du charbon de bois fait en fosse sous un climat pluvieux. Les acides réabsorbés rendent le charbon corrosif et entraînent une pourriture des sacs en jute - fâcheuse lors du transport. En outre ce charbon ne brûle pas avec une flamme claire.

La teneur en matières volatiles du charbon de bois peut varier entre un maximum de 40% ou plus et un minimum de 5% ou moins. On la mesure en chauffant à l'abri de l'air un échantillon de poids connu de charbon sec à 900° C jusqu'à constance du poids. La perte de poids correspond aux matières volatiles. La teneur en matières volatiles est généralement spécifiée sans humidité.

Un charbon de bois à teneur élevée en matières volatiles s'enflamme facilement, mais brûle avec une flamme fumeuse, tandis qu'un charbon à faible teneur en matières volatiles sera difficile à allumer, mais brûlera avec une flamme claire. Un bon charbon de bois commercial doit avoir une teneur nette en matières volatiles (c'est-à-dire sans humidité) de l'ordre de 30%. Une teneur élevée en matières volatiles donne un charbon moins friable que le charbon

ordinaire à carbonisation poussée et faible teneur en matières volatiles, et produisant par conséquent moins de poussier lors du transport et des manipulations. Il est également plus hygroscopique, et a donc une teneur en humidité d'équilibre plus élevée.

4- Teneur en carbone pur

La teneur du charbon de bois en carbone pur varie entre un minimum de l'ordre de 50% et un maximum de l'ordre de 95%. Le charbon de bois est par conséquent composé principalement de carbone. La teneur en carbone est généralement estimée par différence, autrement dit on retranche de 100 les pourcentages de tous les autres constituants, et on admet que le reste est le pourcentage de carbone pur. La teneur en carbone pur est l'élément le plus important en métallurgie, étant donné que c'est lui qui est responsable de la réduction des oxydes de fer du minéral. Mais l'industriel doit faire un compromis entre la friabilité du charbon à haute teneur en carbone pur et la plus grande résistance du charbon à teneur plus faible en carbone pur, plus élevée en matières volatiles, de façon à obtenir la meilleure marche du haut-fourneau.

5- Teneur en cendres

On détermine la teneur en cendres en chauffant au rouge un échantillon de poids connu, avec accès d'air de façon à brûler toutes les matières combustibles. Le résidu représente les cendres, qui se composent de matières minérales telles qu'argile, silice, oxydes de calcium et de magnésium, etc. présentes à l'origine dans le bois ou constituant des impuretés apportées par la terre au cours de la carbonisation.

La teneur en cendres du charbon de bois varie entre 0,5% environ et plus de 5%, selon l'essence, la proportion d'écorce introduite avec le bois dans le four ou la charbonnière, et l'importance des impuretés, terre et sable. Un charbon de bois en morceaux de bonne qualité aura normalement une teneur en cendres de l'ordre de 3%. Un charbon à l'état de poussier peut avoir une teneur en cendres très élevée, mais si on sépare par criblage les morceaux de plus de 4 mm on pourra trouver une teneur en cendres de 5-10%. Les acheteurs se méfient naturellement du charbon trop fin, qui est difficile à vendre - et aussi à utiliser, malheureusement.

E/ Quelques compositions caractéristiques de charbon de bois

Tableau 3 : Caractéristiques de charbons de bois destinés à la sidérurgie

Composition physique et chimique du charbon (par rapport au poids sec)	Extrêmes		Moyenne annuelle	Charbon de bois considéré comme "bon à excellent"
	Max.	Min.		
Carbone	80%	60%	70%	75 - 80 %
Cendres	10%	3%	5%	3 - 4 %
Matières volatiles	26%	15%	25%	20 - 25 %
Densité apparente à la réception (kg/m ³)	330	200	260	250 - 300
Densité apparente (charbon sec)	270	180	235	230 - 270

Taille moyenne (mm) à la réception	60	10	35	20 - 50
Teneur en poussier (- 6,35 mm) à la réception	22%	10%	15%	10 % max.
Teneur en humidité a la réception	25%	5%	10%	10 max.

1- Propriétés physiques

Les caractéristiques décrites jusqu'ici se rapportent aux propriétés chimiques, mais les caractéristiques physiques, notamment pour le charbon de bois industriel, ne sont pas moins importantes. C'est surtout dans la sidérurgie au charbon de bois qu'elles ont une grande importance. Le charbon de bois est la plus coûteuse des matières premières qui entrent dans la charge des hauts-fourneaux. Ses propriétés physiques influent le rendement du haut-fourneau, tandis que la composition chimique est plus en relation avec la quantité de charbon nécessaire pour produire une tonne de fer ("mise au mille"), et avec la composition de la fonte ou de l'acier obtenus.

Le charbon de bois sidérurgique doit avoir une bonne résistance à la compression pour résister à l'effort d'écrasement dans la charge du haut-fourneau. Cette résistance à la compression, qui est toujours moindre pour le charbon de bois que pour son rival, le coke métallurgique produit à partir de la houille, détermine la hauteur pratique et par suite la capacité de production et le rendement du haut-fourneau. La résistance à la fragmentation au cours des manipulations est importante pour maintenir une perméabilité constante de la charge au "vent chaud", indispensable pour garantir le rendement et la régularité de marche du haut-fourneau.

Différents essais ont été mis au point pour mesurer la résistance à la fragmentation, propriété malaisée à définir de manière objective. Ces essais reposent sur la mesure de la résistance du charbon de bois à la rupture ou à la fragmentation, en laissant tomber un échantillon d'une certaine hauteur sur une plaque métallique, ou en le secouant dans un tambour pour déterminer la diminution de taille des morceaux après un temps donné. Le résultat est exprimé en pourcentage de morceaux passant ou non à travers des tamis de différentes mailles. Un charbon peu résistant à la fragmentation donnera aux essais un plus fort pourcentage de poussier. Celui-ci est indésirable dans les hauts-fourneaux, du fait qu'il contrarie le courant d'air ascendant. Un charbon fragile peut aussi s'écraser sous le poids de la charge, et provoquer des obstructions.

• Pouvoir absorbant

Le charbon de bois est une matière première importante pour la fabrication de charbon activé. Ce produit sort du cadre du présent manuel, mais il peut être utile de donner à son sujet quelques indications, à l'intention des producteurs de charbon de bois qui le vendent à des usines spécialisées pour y être transformé en charbon activé.

Tel qu'il est normalement produit, le charbon de bois n'est pas une matière absorbante très active vis-à-vis des liquides ou des vapeurs, parce que sa structure fine est obstruée par des résidus goudronneux. Pour le convertir en charbon "actif", il faut ouvrir cette structure en éliminant les goudrons. La méthode la plus employée à l'heure actuelle consiste à chauffer le charbon brut pulvérisé au rouge sombre dans un four, dans une atmosphère de vapeur d'eau surchauffée. Celle-ci empêche le charbon de brûler en excluant l'oxygène. En même temps les goudrons volatils se distillent et sont entraînés par la vapeur, laissant une structure poreuse

ouverte. Le charbon traité est transféré dans des récipients étanches, où on le laisse refroidir. Les fours à charbon activé fonctionnent généralement en continu, c'est-à-dire que le charbon pulvérisé tombe en cascade ininterrompue à travers le four dans l'atmosphère de vapeur.

Après activation le charbon est soumis à des tests de qualité pour déterminer son pouvoir de décolorer par absorption des solutions aqueuses telles que jus de sucre brut, rhum, etc., des huiles végétales, et d'adsorber des solvants tels qu'acétate d'éthyle en vapeur dans l'atmosphère. Le pouvoir adsorbant tend à être spécifique; certaines qualités de charbon activé conviennent pour les solutions aqueuses, d'autres pour les huiles, ou pour les vapeurs. Les tests permettent de mesurer ce pouvoir adsorbant. On constate de légères différences dans le charbon activé produit à partir de charbons bruts de différentes origines, mais en règle générale tous peuvent être utilisés s'ils sont convenablement traités. Un bon charbon de bois pour l'obtention de charbon activé est celui fait à partir d'Eucalyptus grandis dans des fours en briques.

Le charbon activé destiné à l'absorption des gaz et vapeurs est en général fait à partir de charbon de coques de noix de coco. Ce charbon a un pouvoir absorbant élevé, et il n'a pas tendance à se pulvériser dans les appareils d'absorption, ce qui est un facteur très important.

- **Efficacité de la combustion**

Comment le charbon de bois brûle

Ayant un charbon de bois de bonne qualité, il faut encore le brûler efficacement pour en obtenir les meilleurs résultats. Cela est particulièrement vrai en usage domestique, où passe la plus grande partie du charbon de bois. Les fours industriels qui brûlent du charbon de bois, tels que hauts-fourneaux, cubilots, fours de frittage, etc. sont en général bien conçus, et fonctionnent efficacement; nous n'en parlerons pas ici. Le principal usage domestique du charbon de bois dans le tiers monde est le chauffage de l'eau, soit pour la cuisson des aliments soit pour avoir de l'eau chaude. Certains aliments sont cuits par chauffage direct et non bouillis dans l'eau, tels que maïs grillé, viande rôtie, etc. Un système de cuisson aurait un rendement de 100% si toute la chaleur produite par la combustion était absorbée par l'aliment à cuire. En pratique c'est loin d'être le cas. Un rendement normal pour un appareil de cuisson bien conçu et bien utilisé serait de l'ordre de 30%, c'est-à-dire que 70% de la chaleur s'échappe en pure perte. Dans un climat froid une partie de cette chaleur perdue peut être récupérée pour chauffer l'air de la pièce, remplissant ainsi une fonction utile qui accroît l'efficacité globale.

En théorie, il est possible d'améliorer le rendement du transfert de chaleur du charbon de bois en combustion aux aliments à cuire, en accroissant le coût et la complexité de l'appareil de cuisson, mais c'est rarement réalisable en pratique. Ceux qui pourraient se le permettre ne brûlent généralement pas du charbon de bois, mais utilisent des combustibles plus commodes d'emploi, ou socialement plus prestigieux. Il faut réaliser un compromis qui procure le meilleur rendement possible, compatible avec un matériel de cuisson suffisamment simple et bon marché pour pouvoir être utilisé par la masse des usagers. Le charbon de bois, à la différence du bois, transmet une bonne part de sa chaleur de combustion au récipient de cuisson par radiation des braises incandescentes. Un feu de bois, dans lequel les gaz chauds sont produits par de longues flammes paresseuses, doit transmettre une grande partie de sa chaleur par convection. Pour cela, les gaz chauds doivent être en contact direct avec la marmite, tandis que la chaleur radiante est transmise par les radiations infrarouges émises directement par le foyer et absorbées par la surface de la marmite ou autre ustensile. La marmite doit par conséquent être en "vue directe" du foyer pour pouvoir recevoir et absorber l'énergie calorifique radiante.

Sa surface joue un rôle important; elle doit de préférence être noir mat. La marmite elle-même doit également être bonne conductrice de la chaleur.

L'aluminium mince, noirci par le feu est probablement l'idéal, la terre cuite épaisse, de faible densité, le moins bon. Une marmite noircie par le feu ne doit pas être polie extérieurement; on doit seulement enlever les couches de suie peu adhérente et de goudron pâteux qui se déposent à sa surface.

- **Comment le charbon de bois brûle**

Le charbon de bois réagit avec l'oxygène de l'air à la température du rouge incandescent pour former du monoxyde de carbone incolore, qui brûle alors avec une flamme bleue en se combinant avec une quantité supplémentaire d'oxygène de l'air pour former du dioxyde de carbone ou gaz carbonique. Par suite de la chaleur libérée par ces deux réactions, le charbon devient rouge incandescent et rayonne de l'énergie thermique, et le gaz chaud de dioxyde de carbone sort de la zone de combustion, en cédant par convention une partie, que l'on souhaite la plus grande possible, de sa chaleur par contact direct avec le récipient de cuisson. La température des gaz s'abaisse lors de ce transfert de chaleur, et ils se dissipent dans la pièce. On n'emploie généralement pas de cheminée avec le charbon de bois, du fait que sa combustion est relativement inodore et sans fumée par comparaison avec le bois ou avec le charbon minéral. Le charbon de bois en brûlant peut dégager du monoxyde de carbone non brûlé; c'est un gaz très toxique, et il est indispensable de ventiler les pièces dans lesquelles on brûle du charbon de bois.

Le fait que le charbon de bois peut être brûlé dans un fourneau portable compact, n'exigeant pas de cheminée, est l'un de ses principaux atouts, et explique sa popularité universelle, notamment dans les zones urbaines. Bien qu'il soit préférable pour un pays, d'un point de vue de rendement énergétique global, de chercher à utiliser de la façon la plus efficace possible du bois pour la cuisson des aliments plutôt que de le convertir auparavant en charbon, c'est une politique qui est difficile à appliquer. Pour la plupart des gens qui utilisent à l'heure actuelle du charbon de bois, il est difficile de se convertir au bois. Un fourneau à bois avec une cheminée coûte cher; le corps du fourneau peut être fait en terre glaise et ne rien coûter, mais un tuyau de cheminée en métal peut coûter 10 dollars ou plus. Pour des gens qui vivent à l'étroit dans des immeubles urbains, l'installation de cheminées peut être impossible, et l'absence de pollution du charbon de bois l'impose dans ce cas comme combustible.

Les caractéristiques importantes que l'on note sur les appareils de combustion à charbon de bois domestiques bien conçus et efficaces peuvent être résumées comme suit:

(i) Le charbon de bois doit être en "vue directe" du récipient qu'il chauffe, et en être le plus près possible. Les parois du foyer ne doivent pas être au contact direct du charbon enflammé. Cela suppose un espace de combustion plus ou moins en forme de cône inversé faisant un angle intérieur de 80-90, le foyer étant situé au sommet du cône.

(ii) Le corps du fourneau doit être fait en matériel réfractaire, non métallique, insensible à des températures de l'ordre de 1000°C, et constituer un bon isolant thermique afin de ne pas dissiper la chaleur du foyer. Un bon matériel est une terre cuite poreuse blanche, de façon à mieux réfléchir la chaleur sur la marmite. Le corps du fourneau doit pouvoir être remplacé sur son bâti, de façon à diminuer les coûts d'entretien. Un corps de fourneau moins coûteux et plus ou moins satisfaisant peut être confectionné en tassant dans un moule en bois un mélange

plastique composé de 60% d'argile, 20% de sable et 20% de poussier de charbon de bois, et en le laissant sécher; bien que moins durable que la terre cuite, il est peu coûteux.

(iii) Le foyer conique doit comporter sur sa surface quatre rainures d'environ 30 mm de large et 4 mm de profondeur, qui servent de conduits pour permettre aux gaz chauds de s'échapper même au cas où la marmite s'ajusterait hermétiquement sur le cône.

(iv) La grille doit être en tôle d'acier, avec des trous de clou de 3 mm espacés de 1x1 cm environ.

(v) Le bâti du fourneau, qui peut être fait avec de la tôle de récupération, doit avoir des pieds qui laissent un espace de 4-5 cm entre le fond du corps en terre et le sol. Un bac en tôle de récupération est placé en dessous pour recevoir les cendres chaudes, de sorte que le fourneau puisse être posé sur n'importe quelle surface sans créer de risque d'incendi

Cuivre

Tableau 4 : caractéristiques chimique du cuivre

Cuivre	
<p style="text-align: center;">Nickel ← Cuivre → Zinc</p> <p style="text-align: center;">—</p> <p style="text-align: center;">↑</p> <p style="text-align: center;">Cu</p> <p style="text-align: center;">↓</p> <p style="text-align: center;">Ag</p>	
Informations générales	
<u>numéro</u>	Cuivre, Cu, 29
<u>Série chimique</u>	<u>Métaux de transition</u>
<u>Groupe, période, bloc</u>	11, 4, d
<u>Masse volumique</u>	8,96 g·cm ⁻³ (20 °C)
<u>Dureté</u>	3
<u>Couleur</u>	Rouge brun
Propriétés atomiques	
<u>Masse atomique</u>	63,546 ± 0,003 u

<u>Rayon atomique (calc)</u>	135 pm (145 pm)
<u>Rayon de covalence</u>	132 ± 4 pm
<u>Rayon de van der Waals</u>	140 pm
<u>Configuration électronique</u>	[Ar] 3d ¹⁰ 4s ¹
<u>Electrons par niveau d'énergie</u>	2, 8, 18, 1
<u>Etat(s) d'oxydation</u>	2, 1
<u>Oxyde</u>	Faiblement basique
<u>Structure cristalline</u>	<u>Cubique à faces centrées</u>
Propriétés physiques	
<u>Etat ordinaire</u>	Solide
<u>Point de fusion</u>	1 084,62 °C (congélation)
<u>Point d'ébullition</u>	2 562 °C
<u>Energie de fusion</u>	13,05 kJ·mol ⁻¹
<u>Energie de vaporisation</u>	300,3 kJ·mol ⁻¹
<u>Volume molaire</u>	7,11×10 ⁻⁶ m ³ ·mol ⁻¹
<u>Pression de vapeur</u>	0,0505 Pa à 1 084,45 °C
<u>Vitesse du son</u>	3 570 m·s ⁻¹ à 20 °C
Divers	
<u>Electronégativité (Pauling)</u>	1,9
<u>Chaleur massique</u>	380 J·kg ⁻¹ ·K ⁻¹
<u>Conductivité électrique</u>	59,6×10 ⁶ S·m ⁻¹
<u>Conductivité thermique</u>	401 W·m ⁻¹ ·K ⁻¹ sol. dans <u>HNO₃</u> ,
<u>Solubilité</u>	<u>HCl</u> + <u>H₂O₂</u> , <u>H₂SO₄</u> dilué + ions <u>Hg(II)</u> , <u>NH₄OH</u> + <u>H₂O₂</u>
Energies d'ionisation	
1 ^{re} : 7,72638 eV	2 ^e : 20,2924 eV
3 ^e : 36,841 eV	4 ^e : 57,38 eV
5 ^e : 79,8 eV	6 ^e : 103 eV
7 ^e : 139 eV	8 ^e : 166 eV
9 ^e : 199 eV	10 ^e : 232 eV
11 ^e : 265,3 eV	12 ^e : 369 eV

13° : 401 eV	14° : 435 eV								
15° : 484 eV	16° : 520 eV								
17° : 557 eV	18° : 633 eV								
19° : 670,588 eV	20° : 1 697 eV								
21° : 1 804 eV	22° : 1 916 eV								
23° : 2 060 eV	24° : 2 182 eV								
25° : 2 308 eV	26° : 2 478 eV								
27° : 2 587,5 eV	28° : 11 062,38 eV								
29° : 11 567,617 eV									
Isotopes les plus stables									
<u>Iso</u>	<u>AN</u>	<u>Période</u>	<u>MD</u>	<u>Ed</u>	<u>PD</u>				
				<u>MeV</u>					
⁶³ Cu	69,17 %	<u>stable</u> avec 34 <u>neutrons</u>							
⁶⁴ Cu	<u>{syn.}</u>	12,70 h	~42,7% <u>ε</u>	1,675	⁶⁴ <u>Ni</u>				
			~38,9% <u>β⁻</u>	0,578	⁶⁴ <u>Zn</u>				
			~17,9% <u>β⁺</u>	0,653	⁶⁴ <u>Ni</u>				
			~0,5% <u>γ/CI</u>	1,354	⁶⁴ Cu				
⁶⁵ Cu	30,83 %	<u>stable</u> avec 36 <u>neutrons</u>							
⁶⁷ Cu	<u>{syn.}</u>	2,58 h	<u>β⁻</u>	0,6	⁶⁷ <u>Zn</u>				
<i>Unités du <u>SI</u> & <u>CNTP</u>,</i>									

Le cuivre est un élément chimique de symbole **Cu** et de numéro atomique 29. Naturellement présent dans la croûte terrestre.

Il est majoritairement utilisé par l'homme sous forme de métal. Le cuivre pur est un des seuls métaux colorés. Il présente sur ses surfaces fraîches une teinte rose saumon et est aussi appelé le « métal rouge ». On le désigne parfois sous le nom de cuivre rouge par opposition aux laitons (alliages de cuivre et de zinc) improprement nommés « cuivre jaune ». Métal ductile, il possède des conductivités électrique et thermique particulièrement élevées qui lui confèrent des usages variés. Il intervient également comme matériau de construction et entre dans la composition de nombreux alliages, les cupro-alliages.

- **Caractéristiques**

Métal de couleur rougeâtre ou rouge, le cuivre possède une exceptionnelle conductivité thermique et électrique. Le métal très pur est très résistant à la corrosion, mais aussi très malléable.

L'ion cuivrique Cu^{2+} est soluble dans l'eau, et à faible concentration, il a un effet bactériostatique et fongicide. Dans certaines applications, cette propriété sert à prévenir le développement des germes et champignons (canalisations d'eau sanitaire, culture de la vigne, coques de bateaux et boiseries...).

Identification

- Dureté (Mohs) : 3,5-4,5
- Densité : 8,93
- Clivage : absent
- Fracture : écailleuse
- Rupture : ductile (peu d'impuretés ou impuretés insolubles) ou cassante (impuretés solubles comme le phosphore)
- Couleur : rouge métallisé
- Éclat : métallique
- Système cristallin : cubique
- Réseau de Bravais : cubique à face centrée
- macle : macle très fréquente sur {111} par accolement ou pénétration
- Solubilité : acide nitrique, ammoniacale

Propriétés optiques

- Transparence : opaque
- Éclat : métallique
- Trait : rouge métallisé, rouge pâle
- Fluorescence : aucun

c- Propriétés physiques

Le cuivre, juste au-dessus de son point de fusion, conserve sa couleur rose éclatante lorsqu'une lumière suffisante éclipse la couleur orange due à l'incandescence.

d- Propriétés électriques

La similitude de leur structure électronique fait que le cuivre, l'argent et l'or sont analogues sur de nombreux points : tous les trois ont une conductivité thermique et électrique élevée, et tous trois sont malléables. Parmi les métaux purs et à température ambiante, le cuivre présente la seconde conductivité la plus élevée ($59,6 \times 10^6 \text{ S/m}$), juste après l'argent. Cette valeur élevée s'explique par le fait que, virtuellement, tous les électrons de valence (un par atome) prennent part à la conduction. Les électrons libres en résultant donnent au cuivre une densité de charges énorme de $13,6 \times 10^9 \text{ C/m}^3$. Cette forte densité de charges est responsable de la faible vitesse de glissement des courants dans un câble de cuivre (la vitesse de glissement se calcule comme étant le rapport de la densité de courant à la densité de charges).

e- Propriétés chimiques

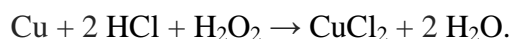
Le cuivre ne réagit pas avec l'eau, mais réagit lentement avec l'oxygène de l'air en formant une couche d'oxyde de cuivre brun-noir. Contrairement à l'oxydation du fer par une atmosphère humide, cette couche d'oxyde empêche toute corrosion en masse. Une couche verte de carbonate de cuivre, appelée vert-de-gris, se remarque souvent sur les constructions anciennes en cuivre, telles que la statue de la Liberté. La Liberté éclairant le monde¹ (Liberty Enlightening The World), plus connue sous le nom de Statue de la Liberté (Statue Of Liberty), est l'un des monuments les plus célèbres des États-Unis. Cette statue monumentale est située à New York, sur l'île de Liberty Island au sud de Manhattan, à l'embouchure de l'Hudson et à proximité d'Island.

La toxicité alimentaire des oxydes formés a justifié l'étamage (ajout d'une couche protectrice d'étain) traditionnel des instruments et récipients culinaire en cuivre.

Le cuivre réagit avec le sulfure d'hydrogène et toutes les solutions contenant des sulfures, formant divers sulfures de cuivre à sa surface. Dans des solutions contenant des sulfures, le cuivre, présentant un avilissement de potentiel par rapport à l'hydrogène, se corrodera. On peut observer ceci dans la vie de tous les jours, où les surfaces des objets en cuivre se ternissent après exposition à l'air contenant des sulfures.

Le cuivre se dissout lentement dans les solutions aqueuses d'ammoniaque contenant de l'oxygène, parce que l'ammoniac forme avec le cuivre des composés hydrosolubles. Le cuivre réagit en présence d'une association d'oxygène et d'acide chlorhydrique pour former toute une série de chlorures de cuivre. Le chlorure de cuivre(II) bleu/vert, lorsqu'il est porté à ébullition en présence de cuivre métallique, subit une réaction de rétrodismutation produisant un chlorure de cuivre(I) blanc.

Le cuivre réagit avec une solution acide de peroxyde d'hydrogène qui produit le sel correspondant :



Lorsque le cuivre est en contact avec des métaux présentant un potentiel électrochimique différent (par exemple le fer), en particulier en présence d'humidité, la fermeture d'un circuit électrique fera que la jonction se comportera comme une pile électrochimique. Dans le cas par exemple d'une canalisation en cuivre raccordée à une canalisation en fer, la réaction électrochimique entraîne la transformation du fer en d'autres composés et peut éventuellement endommager le raccord.

Les fondeurs ne placent jamais à proximité les stocks d'aluminium et de cuivre. Même s'il existe des alliages cupro-aluminium spécifiques, les traces d'aluminium dans un alliage cuivreux provoquent de graves inconvénients techniques. Connaissant par contre les propriétés du cuivre pur, les hommes de l'art ont développé des cuivres alliés, par exemple des cuivres à environ 1 % de Chrome, le Cr permettant de durcir le métal obtenu.

PARTIE II : ETUDE EXPERIMENTALE ET REALISATION

Après avoir abordé les différents types de chauffe-eau et de chaudières ainsi que leurs particularités, nous allons procéder à présent à l'étude expérimentale et à la réalisation d'une chaudière en bouteille de gaz.

Chapitre I : caractéristique

1- Caractéristique chimique d'éthanol

L'éthanol, ou alcool éthylique, est un alcool de formule semi-développée $\text{CH}_3\text{-CH}_2\text{-OH}$. C'est un liquide incolore, volatil, inflammable et miscible à l'eau en toutes proportions.

Formule : $\text{C}_2\text{H}_6\text{O}$

Densité : 789 kg/m^3

Masse molaire : $46,06844 \text{ g/mol}$

Pression de vapeur : $5,95 \text{ kPa}$

Nom : éthanol

Classification : Alcool

2- Caractéristique chimique du pétrole

- n-alcane à chaîne droite ($\text{C}_n\text{H}_{2n+2}$) avec masses moléculaires comprises entre 16 et 300 g/mol
- alcane à chaîne ramifiée (iso-alcane)
- cyclo-alcane
- hydrocarbures aromatiques
- composés soufrés
- résines polycycliques et hétérocycliques ainsi que le bitume avec des masses moléculaires typiques de 1000 g/mol.

3- Caractéristique d'une bouteille à gaz

a- La bouteille de gaz 5 kg :

- Quantité de gaz : 5 kg pour le propane, 6 kg pour le butane
- Quantité d'énergie disponible : 70 kW pour le propane, 82 kW pour le butane
- Dimensions du produit (HxL) : 35,5 x 28,2 cm
- une fois le détendeur Clip butane ou propane connecté, la hauteur totale est de 38 cm
- Poids vide moyen : 5,5 et 8,5 kg (selon l'année de fabrication du produit)
- Poids plein moyen : 11,5 et 14,5 kg (selon l'année de fabrication du produit)

b- La bouteille de gaz 10 kg :

- Quantité de gaz : 10 kg
- Quantité d'énergie disponible : 137 kW
- Dimensions du produit (HxL) : 50,2x30,6 cm
- une fois le détendeur Clip butane connecté, la hauteur totale est de 53 cm
- Poids vide moyen : 6,5 kg
- Poids plein moyen : 16,5 kg

c- La bouteille de gaz 13 kg :

- Quantité de gaz : 13 kg pour le butane et propane
- Quantité d'énergie disponible : 178 kW pour le butane, 180 kW pour le propane
- Dimensions du produit (HxL) : 57x30 cm pour le butane, 60x31 cm pour le propane
- Poids vide moyen : 10 kg pour le butane, le 13 kg pour le propane
- Poids plein moyen : 23 kg pour le butane, 26 kg pour le propane



Photo8 : bouteille de gaz

Pour obtenir le poids de la bouteille à vide, il faut soustraire le poids de la charge de gaz à celui indiqué sur la pastille.

Dans notre réalisation on choisit une bouteille de 13kg (VITOGAZ).

4- Calcul du débit d'un tuyau de cuivre

a- Les vitesses dites « silencieuses »

La plupart des débits calculés pour satisfaire les besoins d'une installation sanitaire est compris entre 50 et 250l/h.

Ces valeurs pour les diamètres considérés correspondent à des régimes d'écoulement turbulent. Plus la vitesse d'écoulement est grande et plus les turbulences sont grandes et génèrent inévitablement du bruit dans les installations.

b- La formule empirique de Croque lois :

Définit une « vitesse silencieuse » en fonction du diamètre utilisé :

$$V = \sqrt{d/50}$$

Où v est la vitesse exprimée en m/s

-d : diamètre intérieur exprimée en mm

Ainsi, la vitesse silencieuse d'un fluide circulant dans un tube de 14x1 (le diamètre intérieur est 12 mm) et la vitesse est de 0.5m/s ce qui correspond à un débit de 200l/h

Il existe aussi une autre formule empirique qui donne le diamètre intérieur diamètre en fonction du débit

$$d=22.9D^{0.4}$$

Ou d est le diamètre intérieur exprimée en mm et D le débit en m^3/h . On voit que, pour 200l/h, on trouve un diamètre de 12mm.

c- Les limites de vitesses

D'une façon générale, la vitesse de l'eau dans les tubes doit être comprise entre 0.3m/s et 1.5m/s.

-0.3m/s est la vitesse considérée comme minimale pour éviter d'éventuels dépôts sur les parties inférieures des tubes susceptibles d'entraîner des phénomènes d'aération différentielle

-1.5m/s est la limite haute pour ce qui concerne essentiellement le facteur de corrosion –érosion qui dépend directement de la vitesse.

Tableau 5 : limite de vitesse et débit de l'eau

Désignation (mm)	Diamètre intérieur (mm)	Vitesse maximale (m /s)	Débit maximal (m^3/h)
12×1	10	0.45	0.127
14×1	12	0.50	0.204
15×1	14	0.53	0.294
18×1	16	0.57	0.412
22×1	20	0.63	0.713
25×1	23	0.68	1.020
28×1	26	0.72	1.377
35×1	33	0.81	2.772
40×1	38	0.87	3.458
42×1	40	0.89	4.025
52×1	52	1.02	7.797

Pour notre étude on choisit le tube de cuivre 12×1 et de diamètre intérieur de 10 mm et vitesse maximale 0.45 m/s et débit maximal 0.127 m^3/h .

Pour des raisons pratiques, on utilise des matériels venant des différents ateliers (ateliers de soudure électrique et autogène dans la ville d'Antsirabe) et on achète les installations sanitaires dans les quincailleries comme les vannes d'entrée et vanne de sortie, le robinet, les tuyauteries.....

1- Description des outils utilisés lors de la réalisation de la chaudière

a- Ruban à mesurer

Pour mesurer et relever des dimensions. Chaque étudiant devrait posséder son ruban à mesurer de 30 pieds (16 m.)



Photo9

- **Burin**

Cet outil muni d'une pointe qui oscille très rapidement et percute la surface sur laquelle on l'applique sert à buriner ou graver et se manipule comme un crayon.

- **Cisaille à métal**

Cet outil sert à tailler le métal en feuilles. Il est muni d'un ciseau à l'embouchure qui découpe une rainure d'environ 1/8 pouce de largeur dans le métal en feuille (jusqu'à calibre 20).

- **Clé à rochet**

Cet ensemble permet de tenir et faire tourner facilement des boulons ou des écrous hexagonaux de dimensions métriques (SI) ou impériales.



Photo10

- **Coupe-tuyau**

Pour couper les tuyaux métalliques non-ferreux (particulièrement les tuyaux de cuivre pour l'eau et les tubes en aluminium). Il est très facile à utiliser.



Photo11

- **Grattoir à peinture**

Sert à gratter la peinture ou le vernis qu'on veut enlever.



Photo12

- **Marteau et maillet**

Pour percuter et enfoncer. Attention de ne pas endommager la surface autour de la tête du clou par votre dernier coup. S'il faut enfoncer la tête, utiliser un chasse-clou.



Photo13

Cet outil sert à percer la maçonnerie et le béton. L'action percussive permet d'avancer rapidement dans la matière dure.



Photo14

Cette cintrreuse permet d'obtenir une courbe régulière avec un tube métallique de petit diamètre et éviter qu'il ne s'écrase pendant le processus.

- **Lame de scie**

Cette lame est une recharge lors de l'usure des autres lames de scie



Photo15

- **Scie circulaire**

Sert à pratiquer des coupes droites ou moyennement courbées dans les feuilles métalliques



Photo16

- **Rectifieuse à métal (RM)**

Muni d'une meule rotative, cet outil sert à poncer ou couper le métal



Photo17

- **Pied à coulisse**

Pour mesurer précisément des longueurs, diamètres intérieurs et extérieurs, épaisseurs, etc.

- **Pinces**

Idéal pour maintenir en place des matériaux rigides pendant qu'on les travaille.



Photo18

- **Pinces à ressorts**

Pour maintenir en place un matériau pendant un temps. Ces pinces ne sont pas très fortes. Elles sont bien appropriées pour pincer pendant que la colle sèche ou pendant qu'on marque un profil ou une ligne.



Photo19

- **Clé à molette, clé, tourne vis**

Cet outil sert à tenir des boulons ou des écrous



Photo20

- **Scies à métaux**

La lame à dents fines permet une usure lente des métaux. Contrairement aux scies à bois qui coupent dans les deux sens (va-et-vient), la lame des scies à métaux coupe lorsque la scie est tirée vers soi.



Photo21

- **Transformateur**

Qui sert à transformer la tension d'un poste soudure



Photo22

- **Poste soudure électrique**

Pour réaliser les différentes soudures lors de la réalisation



Photo23

- **Vanne, robinet...**

Des matériels de raccord



Photo24

- **Colle forte**



Photo25

2- Approvisionnement

L'abondance des bouteilles des gaz est un atout pour la réalisation du projet.

Les bouteilles de 9kg et 13 kg soit très répandues et leur emploi augmente de plus en plus dans différentes réalisations artisanale.

1- Généralité

L'appellation de soudage s'applique dès lors que deux pièces sont réunies de façon à ce que la continuité de la matière entre les deux éléments soit telle qu'au niveau atomique ces deux pièces n'en forment qu'une seule.

Pour cela, le soudage requiert une dilution du métal d'apport dans les matériaux à souder.

Le métal d'apport est identique à celui des pièces à souder. Lorsque le métal d'apport est différent des pièces à souder ou que ces deux pièces sont de métaux différents. C'est pourquoi, à la différence de la brasure, le soudage nécessite d'abord une fusion des extrémités des pièces à réunir avant de les assembler en un seul ensemble cohérent.

Cette fusion de la matière nécessite une élévation plus ou moins importante de la température selon les matériaux à souder.

Le soudage rend donc obligatoire la présence :

- des matériaux à souder,
- d'un appareil de soudage,
- d'une alimentation en énergie.

2- Usinage

Il est à la fois tendre et résistant et il a risque d'explosion car le reste du gaz à l'intérieur est encore présent et sous pression,

Les outils doivent être parfaitement affûtés avec la coupe et le perçage.

Le travail de formage d'une bouteille de gaz d'une épaisseur environ 4mm est une opération un peu délicate qu'il vaut mieux prendre des mesures adéquates.

Une bonne disqueuse et une bonne scie à métaux sont encore à notre niveau les meilleurs outils pour travailler la bouteille.

3- Soudage

Dans ce domaine on utilise des baguettes classiques. Il n'est pas indispensable de disposer d'un poste de soudures hyper sophistiqué et puissant. On peut parfaitement faire un bon travail avec un poste ordinaire délivrant au moins une dizaine d'ampères (10 A ou 15 A) avec des baguettes de 2.5 mm ou 3.15mm.

Le réglage de l'intensité est primordial pour un bon travail à plat. Il faut prendre le temps de le faire.

4- Etanchéité des soudures

c'est une des questions primordiales pour une chaudière. Contrairement à la soudure sous argon qui peut présenter le risque de faire des porosités, l'exécution à la baguette met pratiquement à l'abri de cet inconvénient.

5- Meulage des soudures

Cette opération est dans la mesure du possible à éviter, car il y a des cordons qui sont réguliers et ils doivent rester en état. Toutefois pour des raisons esthétiques on a l'obligation d'amener à meuler des excédents de soudures.

Pour le meulage il faut faire bien manier le disque et systématiquement effectuer une vérification derrière.

6- Constitution générale d'une soudure

On a rendu compte que les plans proposés pour la chaudière étaient adaptés à une réalisation d'une bouteille à gaz. On a bien vu précédemment que le travail en bouteille de gaz est difficile et nécessite une précaution.

Il est toujours préférable d'assembler des formes simples pour obtenir une forme complexe que de s'évertuer à obtenir par pliage.

7- Processus de fabrication d'une chaudière à partir d'une bouteille à gaz

a- Tuyau en cuivre

Une bonne conception « tuyau de cuivre » d'une chaudière conditionne une grande partie le bon fonctionnement ultérieur.

Le jeu consiste à longer à l'intérieur de la bouteille, un tuyau de cuivre pour la bonne circulation de l'eau, qui est fixé à l'aide des deux (2) tubes.

b- Etape de mise en place de tuyau de cuivre à l'intérieur de bouteille de gaz

Il existe plusieurs façons de construire une chaudière suivant l'ordre des opérations adoptées mais il faut suivre des ordres vu la spécificité et danger provoqués par le gaz à l'intérieur de la bouteille.

- Perçage du trou,
- Découpage de la bouteille en deux parties : partie inférieure et partie supérieure,
- Perçage du trou d'entrée d'eau froide et sortie d'eau chaude,
- Coupe et mise à longueur des tubes de fumée,
- Mise en place « fatana » en éthanol ou pétrole
- Soudage du « fatana » en éthanol ou pétrole
- Mise en place des tubes de fixation des tuyaux en cuivre,

- Soudure des tubes de fumée et vérification des soudures
- Soudure du trou d'entrée d'eau froide
- Soudure du trou de sortie d'eau chaude
- Préparation des vannes d'entrée et vanne de sortie

8- Finition

a- Passivée

Secteur de la soudure chimiquement passive et nettoyé, sans finition additionnelle,

Structure de la soudure visible

b- Rectifiée à bande

Structure de la soudure visible partiellement

Secteur de la soudure partiellement aplani avec la surface de la tôle

La rugosité de la soudure n'est pas contrôlée

c- Polie sans brossage

Secteur de la soudure chimiquement passive, nettoyé et poli mécaniquement

Structure de la soudure visible

La rugosité de la soudure n'est pas contrôlée

d- Brossée

Secteur de la soudure brosse

Structure de la soudure invisible

Secteur de la soudure aplani avec la surface de la tôle

La rugosité de la soudure est contrôlée et certifiée

- **Brosse et poli**
 - secteur de la soudure brossé et poli à l'aide de cirage pour éclat intense
 - la rugosité de la soudure: $Ra < 0,4\mu m$ a $Ra < 1,2\mu m$
 - structure de la soudure invisible
 - secteur de la soudure aplani avec la surface de la tôle

La finition consiste à la vérification et la rectification des soudages et la mise en place des différents outils et les laques pour que la forme extérieure soit parfaite.

9- Conclusion partielle

La réalisation et le choix des outils utilisés a besoin des notions sur les soudures électrique et autogène qui est un atout pour des étudiants en matériaux car durant les études on a pratiqué pendant les études pratiques en froid.

CHAPITRE IV : Expérience pour obtention d'eau chaude

1- Les différents combustibles utilisés

Dans notre réalisation, on utilise ces trois combustibles qui sont très répandus dans le marché local avec l'arrivée de l'éthanol à Madagascar et la baisse du prix du baril de pétrole dans la bourse de valeur et dans le marché intérieur du pays.

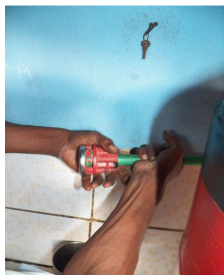
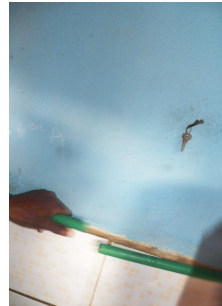
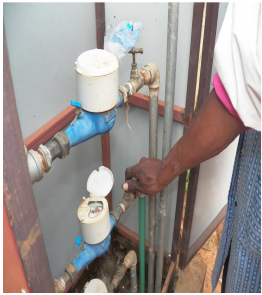
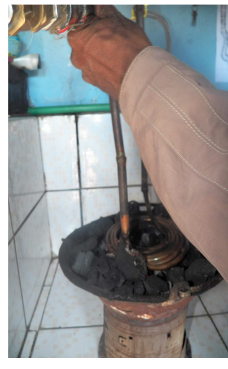
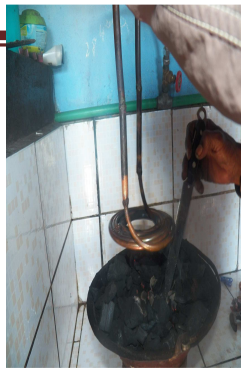


Photo27 : Procédé de mise en obtention d'eau chaude par l'utilisation de charbon



- **Méthodes**

Ouvrons la vanne d'entrée d'eau froide et mettons de l'eau à l'intérieur du tuyau à l'aide de conduite d'eau d'installation de « JI.RA.MA ». Il faut préparer le chauffage et choisir le combustible.

Pour le cas de l'éthanol on introduit l'éthanol dans le fameux « fatana » et on allume l'éthanol ou le pétrole. Pour les autres combustibles, on allume tout de suite le combustible et après on ouvre la vanne d'entrée d'eau chaude.

- **Conclusion partielle**

Pendant la réalisation, on a fait d'abord une tuyauterie en forme verticale et quand on fait les essais on obtient que quelques litres d'eau chaudes. C'est pour cela qu'on change la forme des tuyauteries en forme des spires pour que toutes les spires soient chauffées par les combustibles.

Chapitre V : Caractéristiques du combustible

Il est évident qu'une chaudière ne peut pas brûler indifféremment avec n'importe quel type de combustible et cela d'autant moins que, dans les constructions, la combustion se passe dans un foyer. Suivant le combustible employé (charbon, bois, pétrole et éthanol) ces combustibles ont une influence sur la conception de la chaudière, principalement sur celle des brûleurs, du foyer et des trémies du cendrier, mais également sur les échangeurs installés sur le trajet des fumées.

1- Raison des choix du combustible

Nous savons que la ville d'eau est riche en combustible en biomasse (charbon écologique, bois, charbon ordinaire) dans cette optique que nous offrons aux utilisateurs le choix des combustibles mais pour des raisons pratiques, nous proposons la deuxième variantes de combustibles comme le pétrole et l'éthanol, pour le cas d'éthanol c'est un combustible d'une nouvelle génération vu le basculement énergétique et l'épuisement du stock du pétrole dans le monde et les conflits dans leurs zones producteurs de pétroles par exemple l'Irak, l'Iran.

2- Taux d'humidité pour les combustibles (bois, charbon écologique et charbon ordinaire)

Pour obtenir le taux d'humidité minimale on a besoin de séchages des différentes combustibles avant d'utiliser. On utilise pas des séchoirs mais on profite le rayon solaire pour sécher les combustibles et pour connaître les taux d'humidité, on utilise un appareil qui mesure le taux d'humidité.

a- Premier cas combustible : bois

Tableau 6 : Essai 1

Essai 1	volume d'eau obtenu eau (l)	Combustible (bois) en kg	Température (°C)	Temps de chauffage (mn)	Taux d'humidité	Pression en bar
Essai 1-1	5	2	20	14	12	1.2
Essai 1-2	10	2.5	27	12	10	1.2
Essai 1-3	15	3	34	11	13	1.5
Essai 1-4	20	3.5	40	10	10	1.6

b- Deuxième cas combustible charbon

Tableau 7 : Essai 2

Essai 2	Volume d'eau obtenu (l)	Combustible (charbon) en kg	Température (°c)	Temps de chauffage (mn)	Taux d'humidité	Pression en (bar)
Essai 2-1	5	2	20	14	13	1.2
Essai 2-2	10	2.5	27	11	12	1.3
Essai 2-3	15	3	40	12	8	1.6
Essai 2-4	20	3.5	34	12	10	1.5

- **Troisième cas combustible en éthanol**

Tout le monde est actuellement unanime sur le fait que le pays doit s'engager petit à petit vers une transition énergétique, en privilégiant l'utilisation de l'énergie renouvelable. C'est dans ce contexte que l'idée de production d'éthanol à usage domestique est plus qu'important.

C'est dans cet optique que nous allons faire un essai sur l'utilisation du combustible car il n'y a pas de risque d'épuisement de stock, le cas le plus connu actuellement est l'unité de fabrication d'éthanol de Madagascar Energy Company(M.E.C), une entreprise 100% malgache qui s'installe dans la commune rurale de Ranomafana est, avec une capacité de production moyenne de 1500 à 2000 litres par jours. L'éthanol produit est mélangé avec un peu de colorant pour le rendre inconsommable.



Mise en bouteille de l'éthanol



Photo 28 : l'éthanol

Tableau 8: Essai 3

Essai 1	Volume d'eau obtenu (l)	Combustible (éthanol) en ml	Température (°c)	Temps de chauffage (mn)	Pression en (bar)
Essai 3-1	5	25	27	14	1.2
Essai 3-2	10	25	30	10	1.4
Essai 3-3	15	50	38	12	1.5
Essai 3-4	20	100	40	12	1.6

- **Quatrième cas combustible pétrole**

Tableau 9 :Essai 4

Essai 1	Volume d'eau obtenu (l)	Combustible (pétrole) en ml	Température (°c)	Temps de chauffage (mn)	Pression en (bar)
Essai 4-1	5	25	26	12	1.2
Essai 4-2	10	25	35	10	1.5
Essai 4-3	15	50	40	13	1.6
Essai 4-4	20	100	40	13	1.6

Chapitre VI : Analyse et interprétation des résultats

1- Essai n°1 :

Nous savons tous que pour provoquer l'ébullition de l'eau. Il suffit de la chauffer, et qu'à la pression atmosphérique, l'eau « bout » à 100°C.

Soit une bouteille contenant de l'eau est raccordée à l'appareil de mesure de température. On mesure la température avec le thermomètre et on obtient la température.

a- Essai 1-1

Dans cet essai on varie le volume d'eau. Prenons entre 5l et 20l d'eau et le poids du combustible est entre 2kg et 3.5kg

On ouvre la vanne d'entrée et on entre un volume d'eau de 5l puis on ferme la vanne d'entrée, allumons le combustible et on chauffe pendant 14 mn. Après chauffage on obtient une eau chaude de température de 20°C avec l'indication de manomètre de 1.2 bar. Essai 1-2

On ouvre la vanne d'entrée et on introduit de l'eau froide et après on ferme la vanne d'entrée ensuite procédons à l'allumage de combustible et on chauffe pendant 10mn après chauffage on obtient de l'eau chaude de 40°C et de pression 1.6 bar. .

- Essai 1-3

Même procédé que l'essai 1-2 mais la température à la sortie de vanne est 34°C et la pression est de 1.5bar.

- Essai 1-4

On fait la même procédure, mais la température, le volume d'eau à l'entrée du vanne et la pression qui varient.

- **Essai n°2 :**

Essai 2-1, 2-2, 2-3 et 2-4

On prépare le charbon et on allume après on ouvre la vanne d'entrée pour introduire l'eau froide et on chauffe et après on obtient de l'eau chaude

- **Essai n°3 :**

On varie le volume d'eau entre 5l et 20l et le volume du combustible entre 20ml et 100ml.

a- Essai 3-1

Tirons la vanne d'entrée, on ouvre le robinet d'entrée après on met d'éthanol dans le « fantana » puis on allume pendant 14 mn et après on obtient la température de 27°C et de la pression de 1.2bar.

Essai 3-2, 3-3 et 3-4

Même procédure mais pour le cas de l'essai 3-4 on obtient la température de 40°C à la sortie du vanne avec l'utilisation de 10ml de combustible éthanol.

b- Conclusion partielle

On peut dire que l'éthanol est un bon combustible vu le résultat par rapport à d'autres combustibles comme le bois et le charbon.

• Essai n°4 :

Dans le cadre de cet essai, nous rappelons que c'est le volume d'eau qui varie avec les combustibles.

a- Essai 4-1

On ouvre la vanne d'entrée puis après l'obtention d'eau convenable, on ferme la vanne et on met du pétrole dans le « fantana » puis on allume et on chauffe pendant 12 mn et on obtient 26°C de température et la pression est de 1.2 bar.

Essai 4-2,4-3 et 4-4

Même procédure mais on obtient la température de 40°C pendant 13 mn de chauffage et la pression est 1.6 bar.

• Conclusion partielle

Nous pouvons dire que les valeurs des températures obtenues lors des essais sont à peu près les mêmes pour les différents combustibles donc on peut orienter les études dans les choix financiers et les études des impacts environnementaux pour voir les avantages et les inconvénients qui peuvent se produire durant les utilisations.



Chap.VI : réalisation de chaudière pour l'obtention d'un vapeur d'eau

I. 1ere cas combustible : bois

Tableau10 :Essai1

Essai 1	Volume d'eau verse	Volume d'eau obtenu	Température (°c)	Temps de chauffage (mn)	Combustible kg	Taux d'humidité	Pression en bar
Essai 1-1	20	10	40	10	4	2	2.5
Essai 1-2	20	12	45	10	4	4	2.6
Essai 1-3	20	14	45	11	5	4	2.6
Essai 1-4	20	16	50	10	5	4	2.7

Tableau11 :Essai2

Essai 1	Volume d'eau verse	Volume d'eau obtenu	Température (°c)	Temps de chauffage (mn)	Combustible kg	Taux d'humidité	Pression en bar
Essai 1-1	20	5	60	10	4	2	3
Essai 1-2	20	5	65	10	4	4	3.2
Essai 1-3	20	6	65	11	5	4	3.2
Essai 1-4	20	6	65	10	5	4	3.2

II. 1ere cas combustible : charbon écologique

Tableau12 :Essai1

Essai 1	Volume d'eau verse	Volume d'eau obtenu	Température (°c)	Temps de chauffage (mn)	Combustible kg	Taux d'humidité	Pression en bar
Essai 1-1	20	10	40	10	3	0	2.5
Essai 1-2	20	12	45	10	3	0	2.6
Essai 1-3	20	14	45	11	3	0	2.6
Essai 1-4	20	16	50	10	3	0	2.7

Tableau13 :Essai2

Essai 1	Volume d'eau verse	Volume d'eau obtenu	Température (°c)	Temps de chauffage (mn)	Combustible kg	Taux d'humidité	Pression en bar
Essai 1-1	20	5	60	10	4	0	3
Essai 1-2	20	5	65	10	4	0	3.2
Essai 1-3	20	6	65	11	4	0	3.2
Essai 1-4	20	6	70	8	4	0	3.4

I. Cas de combustible bois

Essai n°1 :

Techniquement, l'obtention de vapeur est obtenue quand on augmente la température et la nature du combustible

Essai 1-1

Dans cet essai on fixe le volume d'eau verse et le poids du combustible .Prenons 20l d'eau et le poids du combustible est 3kg

On ouvre la vanne d'entrée et on entre un volume d'eau de 5l puis on ferme la vanne d'entrée, allumons le combustible et on chauffe pendant 10mn .Après chauffage on obtient une eau chaude de température de 40°C avec l'indication de manomètre de 2.5 bar.

Essai 1-2

On ouvre la vanne d'entrée et on introduit de l'eau froide et après on ferme la vanne de sortie procédons à l'ajout de combustible et on chauffe pendant 10mn après chauffage on obtient de l'eau chaude de 45°C et de pression 2.6bar.

Essai 1-3

Même procédé que l'essai 1-2 mais la température à la sortie de vanne est 45°C et la pression est de 2.5bar.

Essai 1-4

On fait la même procédure, mais la température, le volume d'eau à l'entrée de la vanne et la pression qui varient.

Essai n°2:

On ferme la vanne de sortie d'eau chaude pendant 5mn pour l'obtention de vapeur d'eau

Essai 1-1

Dans cet essai on fixe le volume d'eau verse et on ferme la vanne de sortie d'eau chaude. Prenons 20l d'eau et on augmente le poids du combustible de 1kg

On ouvre la vanne d'entrée, allumons le combustible et on chauffe pendant 10mn .Après chauffage on obtient une eau chaude de température de 60°C avec l'indication de manomètre de 3 bar.

Essai 1-2

On ouvre la vanne d'entrée et on introduit de l'eau froide et après on ferme la vanne d'entrée ensuite procédons à l'allumage de combustible et on chauffe pendant 10mn après chauffage on obtient de l'eau chaude de 65°C et de pression 3.2bar.

Essai 1-3

Même procédé que l'essai 1-2 mais la température à la sortie de vanne est 65°C et la pression est de 3.2bar.

Essai 1-4

On fait la même procédure, mais la température, le volume d'eau à l'entrée de la vanne et la pression qui varient.

II. Cas de combustible charbon écologique

Essai n°1 :

L'émission de gaz carbonique est moins polluante et la température est 350°C et 450°C

Essai 1-1

Dans cet essai on fixe le volume d'eau verse .Prenons 20l d'eau et le poids du combustible est entre 3kg

On ouvre la vanne d'entrée et on entre un volume d'eau de 5l puis on ferme la vanne d'entrée, allumons le combustible et on chauffe pendant 10mn .Après chauffage on obtient une eau chaude de température de 40°C avec l'indication de manomètre de 2.5 bar.

Essai 1-2

On ouvre la vanne d'entrée et on introduit de l'eau froide et après on ferme la vanne de sortie procédons à l'ajout de combustible et on chauffe pendant 10mn après chauffage on obtient de l'eau chaude de 45°C et de pression 2.6bar.

Essai 1-3

Même procédé que l'essai 1-2 mais la température à la sortie de vanne est 45°C et la pression est de 2.5bar.

Essai 1-4

On fait la même procédure, mais la température, le volume d'eau à l'entrée de la vanne et la pression qui varient.

Essai n°2:

On ferme la vanne de sortie d'eau chaude pendant 5mn pour l'obtention de vapeur d'eau

Essai 1-1

Dans cet essai on fixe le volume d'eau verse et on ferme la vanne de sortie d'eau chaude. Prenons 20l d'eau et on augmente le poids du combustible de 1kg

On ouvre la vanne d'entrée, allumons le combustible et on chauffe pendant 10mn .Après chauffage on obtient une eau chaude de température de 60°C avec l'indication de manomètre de 3 bar.

Essai 1-2

On ouvre la vanne d'entrée et on introduit de l'eau froide et après on ferme la vanne d'entrée ensuite procédons à l'allumage de combustible et on chauffe pendant 10mn après chauffage on obtient de l'eau chaude de 65°C et de pression 3.2bar.

Essai 1-3

Même procédé que l'essai 1-2 mais la température à la sortie de vanne est 65°C et la pression est de 3.2bar.

Essai 1-4

On fait la même procédure, mais la température, le volume d'eau à l'entrée de la vanne et la pression qui varient

III- Mise en œuvre d'obtention d'eau chaude



IV- Mise en œuvre d'obtention de vapeur d'eau



Obtention de vapeur d'eau

PARTIE III : ETUDE FINANCIERE ET ENVIRONNEMENTALE

Chapitre I : Concept environnemental

Le paramètre environnemental concerne les études surtout lors de prise en compte des études de la conception car le paramètre environnemental est un standard international.

- Cette différence de perception évolue dans le temps et dans l'espace. Elle évolue en fonction du contexte socio-économique dans lequel l'acteur se trouve.
- Cette perception de l'environnement a donc son histoire (comme les autres sciences).
- Par exemple, si l'émission de gaz à effet de serre n'avait tellement pas de eu d'importance au début des années 1900, elle devient cruciale et fait partie intégrante de la problématique environnementale en ce début du 3^{ème} millénaire.
- Cette perception va de pair avec le développement de l'industrie de l'automobile.
- A ce égard, il s'avère que la problématique (dont la solution, le résultat sont douteux) environnementale a son histoire évolutive, laquelle évolue avec les connaissances humaines, les ressources disponibles, les problèmes économiques et écologiques vécus par les acteurs.
- Le concept environnemental est donc fonction des représentations du milieu ainsi que de l'évolution des discours économiques dominants (économie de subsistance, économie de marché, gestion des stocks, libéralisation, exportation des produits des rentes.)
- Au sens strict du terme, l'environnement est constitué de l'ensemble des parties du (des) milieu(x) physiques et biologiques) qui sont en corrélation directe avec le milieu humain.

Chapitre II : L'impact négatif du charbon et du bois

Les cultures itinérantes sur brûlis et les feux de brousse sont les premières causes de pertes des forêts malgaches. Ces activités accélèrent en même temps le phénomène d'érosion d'autant plus que les initiatives de reboisement sont très limitées, n'arrivant pas à compenser la dégradation des forêts, vu la faiblesse des moyens humains, matériels et financiers déployés.

Parallèlement, l'utilisation de bois comme énergie de cuisson (bois de chauffe et charbon de bois) par pratiquement plus de 90% des ménages malgaches constitue un autre facteur explicatif de cette grande déperdition forestière. En ce qui concerne le charbon de bois dont la consommation est particulièrement très élevée pour les ménages en milieu urbain, il provient de trois sources principales, à savoir : l'exploitation des formations naturelles, les plantations forestières paysannes. La consommation totale de charbon de bois est estimée à 402.000 Tonnes en 2012 selon le WWF dans le document intitulé « diagnostic du secteur énergie à Madagascar ».



Ramassage et mise en sac des charbons

Rapport-gratuit.com 
LE NUMERO 1 MONDIAL DU MÉMOIRES

Photo 29 : fabrication du charbon

La production d'éthanol combinée à la diffusion de foyer à éthanol pour usage domestique constitue une alternative très intéressante à cette utilisation de bois énergie. D'autant plus que la croissance démographique et corollairement des besoins énergétiques exigent de nouvelles sources d'énergie pour éviter la disparition totale des ressources forestières à Madagascar. Le développement du combustible éthanol domestique entraînera non seulement la réduction de l'utilisation de charbon de bois et du bois de chauffe mais en même temps atténuera les émissions de gaz à effet de serre par le maintien du couvert forestier existant.

Ainsi, sur le plan environnemental au niveau national, une baisse progressive de l'exploitation forestière à des fins énergétiques peut être attendue. Cela va impacter dans une certaine voire large mesure sur la déforestation. De ce fait, la forêt malgache continuera à stocker le carbone dont la vente auprès des bailleurs de fonds et/ou des grands organismes internationaux constitue également un autre enjeu non négligeable pour le développement socio-économique local.

Malgré ces avantages qui ne sont pas du tout négligeables aussi bien sur le plan environnemental que socio-économique, il est notoire que les risques et impacts négatifs éventuels d'un tel projet sont nombreux et à prendre en compte. Ces risques peuvent se présenter à différentes échelles allant de la plantation des matières premières jusqu'au niveau des ménages utilisateurs finaux en passant par les unités de fabrication de l'éthanol.

En ce qui concerne les micro-distilleries, la vinasse, qui est le résidu de la distillation a un fort pouvoir polluant. Compte tenu des produits utilisés lors de la phase de préparation du jus de canne avant la fermentation, sa principale composition est constituée d'éléments minéraux dont un élément indésirable dans l'eau destinée à la consommation, à savoir le nitrite. La pollution peut également reposer sur sa forte Demande Chimique en Oxygène (DCO). La production d'éthanol à travers l'utilisation des chaudières peut aussi avoir des répercussions sur la qualité de l'air sans oublier la quantité de bois nécessaire pour leur fonctionnement. Dans le cas de canne à sucre, la bagasse peut facilement substituer à l'emploi du bois pour les chaudières.



Photo30 : La préparation d'éthanol

Parmi les risques à craindre au niveau des plantations figurent l'augmentation des défrichements suite à la recherche de nouveaux champs de culture de canne à sucre et le risque de pollution des eaux et des sols suite à d'éventuels usages abusifs de pesticides ou d'autres produits chimiques auxquels les paysans pourraient avoir recours pour l'augmentation de leur rendement.

Au niveau des ménages utilisateurs, les risques de brûlures, d'incendie domestique et d'intoxication sont les plus à craindre. Le risque de consommation de l'éthanol est faible au niveau des utilisateurs finaux étant donné que le produit est déjà soit coloré, soit gélifié comme indiqué précédemment.

b- **Le coût des chaudières au bois :**

Les chaudières au bois sont intrinsèquement plus chères que leurs homologues au gaz. Il n'y a rien d'alarmant à voir dans ce constat. En effet, avec le bois-énergie, on peut bénéficier d'un coût du combustible inférieur aux autres vecteurs énergétiques classiques. Du coup, le surinvestissement pour la chaudière au bois peut-être amorti. Après ce délai, on peut même engendrer des gains. Par contre, il peut être intéressant de ne pas choisir une chaudière au bois trop puissante pour limiter le coût et de réaliser les appoints de puissance par une chaudière traditionnelle, ces appoints étant relativement peu fréquents.

2. **Etude comparative de prix**

TableauN°14 : Etude comparative de prix

Type	Chauffe-eau	Chaudière à bois, charbon et éthanol	Chauffe-eau à gaz
Volume (ℓ)	58	20	180
Prix (Ar)	1 200 000	300 000	4 000 000

Chaudière au gaz naturel

La chaudière au gaz reste la solution idéale si vous êtes raccordé au réseau de gaz de ville. Ces chaudières présentent d'**excellentes performances** pour les modèles récents. L'investissement initial est **abordable**, elle est moins chère à la consommation que le fioul ou l'électricité, même si le prix du gaz augmente. De plus, vous n'aurez aucun souci d'approvisionnement du combustible.

Chaudière à bois

En très fort développement, car économiques, écologiques et éventuellement automatiques, les chaudières au bois bénéficient encore d'un crédit d'impôt intéressant. Les rendements les plus hauts sont atteints avec les chaudières à granulés.

Chaudière électrique

Gourmandes en énergie, les chaudières électriques sont conseillées en **chauffage d'appoint**, bien qu'elles soient compatibles avec tous les types de chauffage central (radiateurs à eau ou plancher chauffant). Elles n'ont besoin d'**aucune évacuation**

Chaudière mixte

Les chaudières mixtes utilisent et combinent deux sources différentes d'énergie. Les principales sont :

- les chaudières **fuel et bois**, qui associent deux foyers distincts dans la même chaudière, et permettent ainsi de diversifier les sources d'approvisionnement du combustible ;
- les chaudières **gaz et énergie solaire**, où le gaz est prévu pour prendre le relais sur le solaire (la nuit et l'hiver) ;
- les chaudières **bois et énergie solaire**, ce système de chauffage fonctionne à 100 % avec de l'énergie renouvelable. Efficaces, elles réclament un fort investissement de départ.

Chaudière à condensation

De performances élevées, les chaudières à condensation sont des chaudières à combustion qui récupèrent puis utilisent la chaleur contenue dans les fumées et les vapeurs d'eau issues des produits de combustion (fuel ou gaz). Leur fonctionnement est optimal lorsqu'elles sont couplées à des radiateurs ou planchers chauffants conçus pour basse température. Elles sont éligibles au crédit d'impôts.

Chaudière à basse température

Dans une chaudière à basse température, l'eau est chauffée à une température moins élevée que dans les systèmes standards (55 contre 90 °C). Elles sont donc plus économes en combustible (fuel ou gaz) parfois jusqu'à 15 %, mais pour les exploiter au mieux, elles ont besoin de radiateurs et de planchers chauffants conçus pour basse température.

TABLERAU 15 : Comparaison des prix de différentes chaudières

		SYSTÈME À COMBUSTION (CHAUDIÈRE)				
		Gaz de ville	Gaz naturel	Fuel	Bois	Électrique
Coût estimé pour une habitation de 100 m²*	Investissement initial (chaudière seule standard)	3000000 à 8000000 Ar	4000 000 à 12000000 Ar	5000000 à 1200000 0 Ar + 2000000 Ar de cuve	4000000 à 1000000 selon le type de chaudière (bûches, granulés...)	2000000 à 1000000 Ar
	Facture consommation annuelle	16000000à 2000000 A r	2800000 à 3400000A r	3000000 à 3400000 Ar	1600000à 2000000 A r	4000000 à 5000000 Ar
	Abonnement annuel/ location cuve	300000Ar	50000Ar	0 Ar		
	Maintenance (contrat annuel)	200000 à 500000Ar				

CONCLUSION

En guise de conclusion, nous pouvons dire que la réalisation de chaudière en bouteille de gaz peut prendre du temps (quatre mois 4 mois) et le choix des matériaux est difficile dans la ville d'Antsirabe. Dans cette optique, il faut les trouver dans d'autres villes or le besoin de chaudière dans cette ville est primordial et la chaudière en bouteille de gaz est compétitive par rapport à la chaudière en gaz. La chaudière se définit comme un appareil qui sert à l'obtention d'eau chaude à basse température ou à haute température pour l'obtention de vapeur. C'est pour cela qu'à Madagascar, la plupart de la technologie dans l'industrie se tourne dans l'utilisation de chaudière comme la COTONA, la chocolaterie et même dans les hôpitaux. La réalisation de chaudière en bouteille de gaz a pour but de recycler les bouteilles de gaz et permet à l'utilisateur de la chaudière une meilleure accessibilité et un prix compétitif au niveau du marché. Pour des raisons techniques, il faut faire attention sur les bouteilles de gaz car le gaz à l'intérieur est sous pression. Cette réalisation a pour fin de connaître la réalité des études théoriques dans la formation d'Ingénieur en tant que « spécialiste en Matériaux » sortant de l'Ecole Supérieure Polytechnique d'Antananarivo. C'est une expérience pour la future. La chaudière est un système permettant d'augmenter la température d'un fluide caloporteur afin de transporter de l'énergie thermique. La construction de chaudière dépend de la nature du fluide caloporteur, des conditions de service, de la nature du combustible et des performances attendues. La chaudière en bouteille de gaz est très indispensable pour les ménages et en plus, elle est pratique. Son usage permet de réduire la déforestation qui est une grande menace pour l'environnement. L'utilisation d'un tel appareil est également un moyen d'économiser de l'électricité. Le rendement est également satisfaisant si on le compare avec celui des autres chaudières. Vu les multiples avantages qu'elle représente, l'Etat malgache doit envisager de mettre en œuvre un projet qui consiste à vulgariser l'usage des chaudières en bouteille de gaz.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- Guide Pratique de Dimensionnement de la chaudière.
- Guide des alimentations électrique d'un groupe frigorifique
- Manuel d'identification des dégradations de la chaudière.
- Principaux procédés de soudage par résistance décrits sur le site de MCI (Magazine Circuit Industriel).
- Document INRS Guide de ventilation n°7 Opérations de soudage à l'arc et de coupage
- Document INRS Fiche d'aide au repérage de cancérrogène. Soudage et brasage des métaux
- Marcelo B. Antunes et coll., *San Francisco/Oakland Bay Bridge Welder Study - Olfactory Function*, vol. 69 n°12, Neurology, 2007, p. 1278-1284
- Normes de conception et calcul
 - NF P22-470 « Assemblages soudés » (1989) ; remplacée par la suivante
 - EN 1993-1-1 « Eurocode 3 — Calcul des structures en acier » (octobre 2005)
- Normes de mise en œuvre
 - NF P22-47X ; remplacée par la suivante
 - EN 1090-2 « Exécution des structures en acier et des structures en aluminium — Partie 2 : exigences techniques pour les structures en acier » (octobre 2011)
- Claude Hazard, Frédy Lelong et Bruno Quinzain, *Mémotech — Structures métalliques*, Paris, Casteilla, 1997 ([ISBN 2-7135-1751-6](#)), p. 249-292
- André Chevalier, *Guide du dessinateur industriel*, Paris, Hachette, 2004 ([ISBN 978-2-01-168831-6](#)), p. 172-179
- Jean-Louis Fanchon, *Guide des sciences et technologies industrielles*, Paris, Nathan/Afnor, 2011 ([ISBN 978-2-09-161590-5](#)), p. 223-244

RESUME

En tant qu'élève ingénieur en Matériaux nous choisissons la bouteille de gaz comme matériaux de base .La conception de chaudière en bouteille de gaz nécessite une précaution pour des raisons de sécurité causé par des risques d'explosion d'un gaz sous pression à l'intérieur de la bouteille .Le procédé d'obtention d'eau chaude est la préparation des vannes d'entrée et l'allumages des combustibles comme le bois , charbon , le pétrole et l'éthanol, cette obtention est conditionnée par un temps de chauffage qui varie de 12 mn à 14 mn et la température d'eau chaude qui sort dans la vanne de sortie varie entre 20°C et 40° C et de pression de 1.2 bar à 1.6 bar.

Le résultat n'est pas satisfaisant car du point de vue technique la température nécessaire pour la chaudière d'usage domestique est 65°C qui n'est pas le cas pour cette étude. Mais le résultat est en cours de recherche ce qui nous offre une autre perspective et on pourra améliorer ces résultats par la création d'aération qui pousse à augmenter la température d'eau de chaude.

ABSTRACT

As a material engineering student we choose gas cotenant as basic materials. The concept of boiler needs attention for safety reasons caused by under pressing gas explosion inside the metal bottle. The step of having hot water are the preparation entering water and the lighting of the combustible such as wood, charcoal, gas and ethanol, this gain is obtained by warming time, the change from 12mn to 14mn and the temperature of the hot water, that come out of the dispositive from 35°C to 40°C temperature. The result is not sufficient because from a technical point of view, we need 65°C that is not the case for this memory but the result is being in search. That offer us a new innovation, we could improve these results by create an aeration dispositive that help to rise the temperature hot water.

SOMMAIRE	5
LISTE DES ABREVIATIONS	6
LISTE DES NOTATIONS	7
INTRODUCTION	8
PARTIE I : ETUDE BIBLIOGRAPHIQUE	9
CHAPITRE I : Chaudière	10
1. Type	10
a. Classification par gamme de puissance	10
Classification par installation (chaudières à usage domestique)	10
b. Classification par application	10
c. Classification par type de fluide caloporteur	11
Photo1 : Une chaudière à vapeur pour moteur stationnaire	11
d. Une chaudière à vapeur pour moteur stationnaire	11
e. Les principaux fluides caloporteurs utilisés sont :	11
CHAPITRE II : Classification par source de chaleur	13
1- Chaudières à combustion	13
a- Chaudières à combustibles liquides ou gazeux	13
b- Chaudières à combustibles solides	13
b-1 Les foyers à grilles	13
b-2 Les foyers à lit fluidisés	13
b-3 Les foyers à charbon pulvérisé	14
a- Chaudières de récupération	14
b- Chaudières électriques	14
CHAPITRE III : Classification par construction	15
- Chaudières à tubes de fumées	15
Photo2 : Chaudière tubulaire neuve destinée à la locomotive 030T n° 101 Pinguely du CFBS	15
- Chaudières à tubes d'eau	15
1- Classement par type de circulation	16
a- à circulation naturelle	16
b- à circulation assistée	16
c- à circulation forcée	16
2- Classification par architecture	17
a- Chaudière à deux passes	17
b- Chaudière tour]	17

Photo3 : Chaudière individuelle murale pour le chauffage des logements	17
Photo4 : Maquette de chaudière à vapeur pour navire, en cuivre et fonte. Musée de la Marine, Paris.	18
CHAPITRE IV : Dimensionnement des chaudières à condensation	19
1- Le principe	19
2- La puissance pour les chaudières	19
Figure1 : <i>Rendement de combustion</i>	20
• Dimensionnement des chaudières bois	20
• Dimensionnement de la puissance maximale des besoins	20
• Dimensionnement de la chaudière bois : aspects techniques	20
Figure2 : <i>Illustration sur la monotone de charge du taux de couverture d'une chaudière bois dimensionnée sur la puissance maximale.</i>	21
Figure 3 : <i>Exemple d'évolution du taux de couverture en fonction du rapport entre la puissance de la chaudière (PN) et la puissance maximale des déperditions (QT).</i>	22
• Dimensionnement de la chaudière bois : aspects économiques	22
Sécurité d'approvisionnement de chaleur : chaudière de soutien	22
• Dimensionnement des circuits de distribution	23
• Dimensionnement des circulateurs	24
• Dimensionnement des corps de chauffe	25
CHAPITRE V : Chauffe-eau	26
Photo5 : Série de chauffe-eau au propane.	26
L'eau chaude sanitaire	26
Tableau 1 : Avantages et inconvénients des systèmes de chauffe-eau	26
A/ Le chauffe-eau	27
1- Débit	27
Tableau2 : capacité et vitesse d'écoulement	28
2- Source d'énergie	28
a- Le gaz naturel	28
b- L'électricité	28
c- Le propane	28
B/ Le ballon d'eau chaude	29
1- La capacité du réservoir	29
2- Le réglage de la température de l'eau stockée	29
• Entretien et durabilité	29
• Cuve	29

• Résistance.....	30
C / Les types de chaudières.....	30
1- Les ballons d'eau chaude électriques.....	30
2- Les chauffe-eau au gaz naturel et au mazout	30
3- Les chauffe-eau à chauffage direct	30
4- Les chauffe-eau à chauffage indirect	30
5- Les chauffe-eau combinés	31
6- Les chauffe-eau solaires	31
Photo6 :Chauffe-eau solaire de type monobloc : capteurs et ballon de stockage placés sur le même châssis.....	31
7- Les chauffe-eau thermodynamiques	31
Photo 7 :Chauffe-eau thermodynamique	32
D / Utilisation rationnelle du charbon de bois	32
1- Qualité du charbon de bois.....	33
2- Teneur en humidité	33
3- Matières volatiles autres que l'eau.....	34
4- Teneur en carbone pur.....	35
5- Teneur en cendres	35
E/ Quelques compositions caractéristiques de charbon de bois	35
Tableau 3 : Caractéristiques de charbons de bois destinés à la sidérurgie.....	35
1- Propriétés physiques	36
• Pouvoir absorbant	36
• Efficacité de la combustion	37
• Comment le charbon de bois brûle	38
Cuivre.....	39
Tableau 4 : caractéristiques chimique du cuivre.....	39
• Caractéristiques.....	41
c- Propriétés physiques	42
d- Propriétés électriques.....	42
e- Propriétés chimiques	43
PARTIE II : ETUDE EXPERIMENTALE ET REALISATION	44
Chapitre I : caractéristique	45
1- Caractéristique chimique d'éthanol	45
2- Caractéristique chimique du pétrole	45

3- Caractéristique d'une bouteille à gaz	45
Photo8 : bouteille de gaz.....	46
a- Les vitesses dites « silencieuses »	46
b- La formule empirique de Croque lois :	46
c- Les limites de vitesses	47
Tableau 5 : limite de vitesse et débit de l'eau.....	47
Chapitre II : Matériels utilisés.....	48
1- Description des outils utilisés lors de la réalisation de la chaudière	48
a- Ruban à mesurer	48
Photo9	48
• Burin	48
• Cisaille à métal.....	48
• Clé à rochet	48
Photo10.....	48
• Coupe-tuyau.....	49
Photo11	49
• Grattoir à peinture	49
Photo12	49
• Marteau et maillet	49
Photo13	50
Photo14	50
• Lame de scie	50
Photo15	51
• Scie circulaire.....	51
Photo16.....	51
• Rectifieuse à métal (RM).....	51
Photo17	52
• Pied à coulisse	52
• Pinces	52
Photo18	52
• Pinces à ressorts.....	52
Photo19	52
• Clé à molette, clé, tourne vis	53
Photo20	53

• Scies à métaux	53
Photo21	53
• Transformateur	54
Photo22	54
• Poste soudure électrique	54
Photo23	54
• Vanne, robinet...	54
Photo24	55
• Colle forte	55
Photo25	55
2- Approvisionnement	55
Chapitre III : Le principe du soudage	56
1- Généralité	56
2- Usinage	56
3- Soudage.....	56
4- Etanchéité des soudures.....	56
5- Meulage des soudures	57
6- Constitution générale d'une soudure.....	57
7- Processus de fabrication d'une chaudière à partir d'une bouteille à gaz.....	57
a- Tuyau en cuivre	57
b- Etape de mise en place de tuyau de cuivre à l'intérieur de bouteille de gaz	57
8- Finition	58
a- Passivée	58
b- Rectifiée à bande.....	58
c- Polie sans brossage	58
d- Brossée.....	58
• Brosse et poli.....	58
9- Conclusion partielle.....	58
CHAPITRE IV : Expérience pour obtention d'eau chaude.....	59
1- Les différents combustibles utilisés.....	59
Photo27 : Procédé de mise en obtention d'eau chaude par l'utilisation de charbon	61
• Méthodes	62
• Conclusion partielle.....	62
Chapitre V : Caractéristiques du combustible	63

1- Raison des choix du combustible.....	63
2- Taux d'humidité pour les combustibles (bois, charbon écologique et charbon ordinaire) ..	63
Tableau6 : Essai1	63
b- Deuxième cas combustible charbon	63
• Troisième cas combustible en éthanol.....	64
Tableau 8: Essai 3	66
• Quatrième cas combustible pétrole	66
Tableau 9 :Essai 4	66
Chapitre VI : Analyse et interprétation des résultats.....	67
1- Essai n°1 :	67
a- Essai 1-1	67
Chap.VI : réalisation de chaudière pour l'obtention d'un vapeur d'eau	68
I. 1ere cas combustible : bois.....	68
Tableau10 :Essai1	68
II. 1ere cas combustible : charbon écologique	69
Tableau12 :Essai1	69
Tableau13 :Essai2.....	69
Chapitre VII : analyse et interprétation des résultats	70
I. Cas de combustible bois	70
II. Cas de combustible charbon écologique	71
III- Mise en œuvre d'obtention d'eau chaude.....	73
IV- Mise en œuvre d'obtention de vapeur d'eau.....	74
PARTIE III : ETUDE FINANCIERE ET ENVIRONNEMENTALE	75
Chapitre I : Concept environnemental	76
Chapitre II : L'impact négatif du charbon et du bois	77
Chapitre III : L'impact positif d'éthanol.....	79
Chapitre IV : L'impact négatif d'éthanol.....	80
Photo30 : La préparation d'éthanol	80
Chapitre V : Etude financière	81
b- Le coût des chaudières au bois :	81
2. Etude comparative de prix	81
TableauN°14 : Etude comparative de prix.....	81
Chaudière au gaz naturel.....	81
Chaudière à bois	81

Chaudière électrique	81
Chaudière mixte	81
Chaudière à condensation.....	82
Chaudière à basse température	82
TABLEAU 15 : Comparaison des prix de différentes chaudières	82
CONCLUSION.....	83
REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES	84
RESUME.....	85
ABSTRACT	86