

SOMMAIRE

REMERCIEMENTS

SOMMAIRE

LISTE DES ABREVIATIONS

LISTE DES FIGURES

LISTE DES TABLEAUX

LISTE DES ANNEXES

INTRODUCTION

Partie 1 : GENERALITE ET METHODE BIBLIOGRAPHIQUE

Chapitre 1 GENERALITE SUR LES FOURS

Chapitre 2 LES MATERIAUX REFRACTAIRES

Partie 2 : METHODES

Chapitre 1 : REPRESENTATION ET DIMENSIONNEMENT DU FOUR

Chapitre 2 : PRINCIPE DE FONCTIONNEMENT

Chapitre 3 : BILAN THERMIQUE

Chapitre 4 : RECHERCHE SUR LES ISOLANTS THERMIQUE

Partie 3 : LES RESULTATS

Partie 4 : DISCUSSIONS

CONCLUSION GENERALE

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

ANNEXES

TABLE DES MATIERES

RESUME

LISTE DES NOTATIONS

H_r est l'énergie de cristallisation d'une mole de charge	[J/mole]
M_{charge} : Masse molaire de la charge	[Kg/mole]
$m_{charge\ sec}$: Masse de la charge sèche	[Kg]
C : Chaleur massique	[J/(kg K)]
m_e : Masse d'eau	[Kg]
L_v : Chaleur latente de vaporisation de l'eau	[J/kg]
T_{max} : Température maximum	[K]
T_a : Température de l'air ambiant	[K]
P_n : Puissance nominale des brûleurs	[kW]
PCI : Pouvoir calorifique	[KWh/m ³]
Q_r : Energie totale de cristallisation de la charge	[J]
T_{ch} : Température initiale de la charge	[K]
Φ : flux de chaleur	[W]
τ : temps	[s]
ΔT : différence de température	[K]
S : surface d'échange	[m ²]
R_{th} : résistance thermique	[W ⁻¹ .K]
e : épaisseur	[m]
λ : conductivité thermique	[W.m ⁻¹ . K ⁻¹]
h : coefficient d'échange de chaleur par convection	[W.m ⁻² . K ⁻¹]
h_e : coefficient de transfert thermique à l'extérieur du four	[W.m ⁻² . K ⁻¹]
V_v : vitesse du vent	[m/s]

Ψ : un Coefficient dépendante de la température	[K ³]
σ : Constante de Stefan Boltzmann	4.91 10 ⁻⁸ [kcal/m ² .h.K ⁴]
ρ : masse volumique de la paroi interne	[Kg/m ³]
R_m : module silice-soude	
P : puissance	[KW]
m_j^i : masse de substance gazeuse j à l'effet de serre émise par le système i	[Kg]
P_j : taux annuel de renouvellement de la matière j	[Kg.an ⁻¹]
$V_{c_{a_j^i}}$: volume critique de la substance j, émise dans l'air par le système i	[m ³]:
C_j : concentration de référence de la substance j émise dans l'air.	[Kg.m ⁻³]



Rapport-gratuit.com

 LE NUMERO 1 MONDIAL DU MÉMOIRES

LISTE DES ABREVIATIONS

EN	Européenne Norme
CNRIT	Centre Nationale de Recherche Industriel et Technologique
GPL	Gaz de Pétrole Liquéfié
AFNOR	Association Française de Normalisation
NF	Normes Français
CE	Certificat Européenne
ISO	International Organization for Standardization
G	grand débit
K	petit débit
Z	débit d'allumage
AGP	Air Gaz Proportionnel
EV	Electrovanne
Ph	Phase
N	Neutre
T	Terre
UV	Ultraviolet
DC	Courant continue
THT	transformateur haute tension
PROCHIMAD	Produit Chimique de Madagascar
ACV	Analyse de Cycle de Vie

LISTE DES FORMULES CHIMIQUES

ZrSiO₄	Silicate de Zircon
ZrO₂	Dioxyde de Zircon
SO₂	Dioxyde de Soufre
NO_x	Oxydes d'azote
CO₂	Dioxyde de carbone
CaCO₃,MgCO₃	la dolomie
MgO ou MgCO₃	la magnésie
RO-R₂O₃	la chromite
2MgO-SiO₂	la fosterite
Al₂Si₂O₅(OH)₄	Kaolinite
SiO₂	Dioxyde de silicium
Al₂O₃	Alumine
Fe₂O₃	Oxyde de fer
Na₂O	Oxyde de sodium
K₂O	Oxyde de dipotassium
CaO	Oxyde de calcium
MgO	Oxyde de magnésium
Na₂(H₃SiO₄)₂	Le silicate de soude
H₂O	Eau

LISTE DES FIGURES

Figure 1° : Principe de fonctionnement d'un brûleur gaz atmosphérique.

Figure 2° : Brûleur gaz à air pulsé

Figure 3° : comparaison des pollutions due aux différents combustibles

Figure 4° : principe de vaporisation du propane

Figure 5° composition macroscopique des matériaux réfractaires

Figure 6° Diagramme de phase du système silice-alumine

Figure 7° Courbe de séchage de Sherwood

Figure 8° Squelette du four

Figure 9° Structure métallique du foyer

Figure 10° Support de pose

Figure 11° Le caisson du four

Figure 12° Circuit d'alimentation en gaz combustible

Figure 13° Variation du débit de gaz

Figure 14° Alimentation en Propane

Figure 15° Régulateur de pression

Figure 16° Filtre à gaz

Figure 17° Electrovanne de sécurité

Figure 18° Electrovanne progressive

Figure 19° Bloc gaz

Figure 20° Schéma de représentation d'un bloc gaz

Figure 21° Bloc gaz Théobald BC 90

Figure 22° Installation d'un contrôleur de pression

Figure 23° Contrôle d'étanchéité de la vanne de sécurité

Figure 24° Vérification d'étanchéité de la rampe gaz

Figure 25° Ventilateur

Figure 26° Rampe gaz à deux allures avec clapet gaz asservi au volet d'air

Figure 27° Ventilateur avec deux clapets d'ouvertures indépendantes

Figure 28° Installation du système AGP

Figure 29° Circuit de commande et de puissance

Figure 30° Sonde d'ionisation

Figure 31° Cellule UV ou tube de décharge

Figure 32° Circuit de branchement des électrodes de démarrage

Figure 33° Moteur asynchrone monophasé

Figure 34° Servomoteur

Figure 35° Sens de rotation du servomoteur

Figure 36° représentation schématique des résistances thermique

Figure 37° variations de température à travers deux parois

Figure 38 : Les deux éprouvettes isolantes

Figure 39 : Evolution des résistances mécaniques en fonction du rapport $n_{\text{silice}}/n_{\text{soude}}$

Figure 40 : Evolution de la densité apparente en fonction $n_{\text{silice}}/n_{\text{soude}}$

Figure 41 : Evolution de la conductivité thermique en fonction du $n_{\text{silice}}/n_{\text{soude}}$

Figure 42 : Evolution de la porosité et la perte au feu en fonction du $n_{\text{silice}}/n_{\text{soude}}$

Figure 43 : Les deux éprouvettes réfractaires

Figure 44 : Evolution des résistances à la compression des éprouvettes isolantes et réfractaires en fonction du $n_{\text{silice}}/n_{\text{soude}}$

Figure 45 : Evolution des densités apparentes en fonction du $n_{\text{silice}}/n_{\text{soude}}$

Figure 46 : Evolution des conductivités thermiques en fonction du $n_{\text{silice}}/n_{\text{soude}}$

Figure 47 : Fissuration de l'éprouvette à cause du défaut de séchage

Figure 48 : Eprouvettes présentant des affaissements très considérables dus aux modules basiques

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1 : Principes de modulations des brûleurs

Tableau 2 : pouvoirs calorifiques et émission de CO₂ des différents combustibles

Tableau 3 : caractéristique physiques des combustibles

Tableau 4° Dimensionnements et caractéristiques du four

Tableau 5° Coefficient de transfert de chaleur par convection

Tableau 6° Composition chimique de la cendre des balles de riz

Tableau 7° Proportions de silice et de soude utilisés pour chaque essai

Tableau 8° Recherche de quantités d'eau employé pour chaque module

Tableau 9° Proportion des mélanges pour les fabrications d'isolants

Tableau 10° Composition minéralogique du kaolin de la société PROCHIMAD

Tableau 11° Dosage en cendre et métakaolin pour chaque essai

Tableau 12° Résultats sur les essais mécaniques des isolants

Tableau 13° résultats sur les essais physiques des isolants

Tableau 14 Résultats sur les essais mécaniques des éprouvettes réfractaires

Tableau 15 résultats des essais physiques des éprouvettes réfractaires

Tableau 16° Facteurs d'émission des combustibles fossiles, combustion seule

Tableau 17° Prix élémentaire de chaque composante du four :

Tableau 18° Coût élémentaire de fabrication

LISTE DES ANNEXES

ANNEXE °1 : Calcule de la température de la charge pour un temps de chauffage donne

ANNEXE °2 : Techniques utilises lors de la détermination des résultats

ANNEXE °3 : Différentes types de bruleurs et utilisation

ANNEXE °4 : Conductivités thermique de quelque matériau

ANNEXE °5 : Armoires de sécurité en 14470-1 - en 14470-2 pour produits inflammables, explosifs et bouteilles de gaz

ANNEXE °6 : Dessin du Four

INTRODUCTION

A Madagascar, la création d'industrie céramique est encore réalisable et présente beaucoup d'opportunité au développement du pays. Ici, le marché des produits céramiques est encore libre. Selon les recherches que nous avons menée, presque la plus part de tous les produits vendus sur les marchés Malagasy sont venus de la Chine et de l'inde. Réaliser un projet de production locale présente donc un meilleur avantage. De plus, les matières premières sont abondantes Chez nous. On peut citer : la mine de kaolin dans le gisement : d'Andilana qui se trouve à l'extrémité Nord du lac Alaotra, le bassin Lacustre de Mangoro, d'Analabe Ibity, d'Ampanihy, de Beomby – Ejeda etc. [1]

Actuellement, notre pays dispose une grande quantité de ressource humaine pour la main d'œuvre. Selon l'INSTAT, le 40 % de la population malagasy sont des jeunes actifs, et la plus part d'entre eux n'ont pas encore trouvées une travaille permanent pour gagner sa vie. D'après leur recherche aussi, le salaire minimum à Madagascar est au voisinage de 1\$/jr. Le recrutement de ces employés Malagasy est donc plus bénéfique pour toutes les sociétés à Madagascar, et ça permet aussi de participer au travail de développement du pays. [2]

« Le terme «céramique» (produit en céramique) désigne en règle générale des matériaux inorganiques (pouvant avoir un certain contenu organique), transformés de façon permanente par cuisson. Outre les matériaux à base d'argile, les céramiques englobent aujourd'hui une multitude de produits renfermant une faible proportion d'argile ou totalement exempts d'argile. » [3]. La fabrication de ces matériaux fait appel à des différents types de fours et à des diverses matières premières afin d'obtenir des produits qui pourraient porter tout une variété de forme, tailles et couleurs. Durant la cuisson, il est nécessaire d'avoir un gradient de température très précis pour que le traitement thermique des produits soit homogène. Il faut ensuite contrôler aussi leur refroidissement afin qu'ils libèrent leur chaleur progressivement en préservant leur structure céramique.

Dans notre pays, le problème qui se pose pendant la réalisation d'un projet n'est seulement sur la côté budgétaire, mais aussi sur la côté du savoir-faire des employés. Désormais, ici à Madagascar, nous disposons une filière de formation qui étudie les

technologies de fabrication des matériaux céramiques dans le département Science et Ingénierie des Matériaux à l'Ecole Supérieure Polytechnique d'Antananarivo, mais, le problème c'est que dans notre laboratoire, nous n'avons pas assez d'équipement pour approfondir les recherches. Nous savons très bien que, l'élaboration et la production des matériaux frités nécessitent une mise en œuvre utilisant des fours à haute température pouvant atteindre des températures allant jusqu'à 1600°C, alors que, l'Ecole n'a que des fours fonctionnant à des températures inférieure à 1000°C.

Au bloc Technique de l'Université d'Antananarivo, l'utilisation des fours électriques n'est pas très fiable à cause du défaut de puissance électrique. Afin d'atteindre la marge de température nécessaire pour la cuisson des céramiques, il faut donc utiliser une autre source d'énergie convenable. L'utilisation des combustibles gazeux constitue une meilleure solution face à ce problème. Cette manière rend le four indépendant de l'électricité, et ça lui permet aussi de dépasser la limite sur les températures.

C'est ainsi que notre étude entre en jeu car le thème de ce Mémoire est : « Conception d'un four à gaz pour la cuisson des céramiques dans des laboratoires ». Ici on va essayer de faire l'étude de faisabilité de ce projet en utilisant des matières premières locales pour s'en servir des matériaux de revêtement. Pour se faire, le travail suivra les méthodes comportant en premier lieu la partie théorique où l'on discutera sur les généralités des différents types de four suivi de celle des matériaux réfractaires ; en deuxième lieu, la partie pratique où l'on démontrera les calculs thermique avec les essais de fabrications des revêtements du four, et pour finir, on va donner tous les résultats des calculs et des essais ainsi que tous les impacts socio-économique et environnementale du projet.

Généralités et Méthodes Bibliographiques

Chapitre 1 GENERALITES SUR LES FOURS

Selon Larousse 2004, un four est un appareil servant à la cuisson de diverses substances ou à la production de température élevée.

I. Classification des fours [4] [5]

Actuellement, on peut rencontrer plusieurs types de four à destinations variées : élaboration des matériaux métallique, cuisson des produits céramiques, production des liants minéraux (ciment, chaux, plâtre), utilisation domestique, etc...

Leur classement peut s'effectuer de plusieurs façons :

1. Selon le principe de production

Il est divisé en deux catégories :

- ⊗ Les fours continus : haut fourneau, four tunnel, four hoffman, etc...
- ⊗ Les fours intermités : four martin et bessemer, incinérateur, etc...

2. Selon son domaine d'utilisation

Chaque four peut être classé à partir de son domaine d'utilisation. Nous pouvons citer alors les :

- ★ Four métallurgique
- ★ Four à céramique
- ★ Four de traitement thermique
- ★ Four à verre
- ★ Four servant à la cuisson des liants minéraux
- ★ Etc...

3. Selon le type d'énergie utilisé

Comme toute source de chaleur, on peut trouver quelque type d'énergie qu'on utilise pour faire fonctionner les fours:

- ⊕ Four électrique : à arc, à résistance, à induction, etc...
- ⊕ Four à gaz : propane, gaz naturel, hydrogène, etc...
- ⊕ Four à bois : bois, charbon, etc...
- ⊕ Four à combustible liquide
- ⊕ Four solaire

4. Selon sa nature chimique du milieu de chauffage (atmosphère)

Au point de vue atmosphère de cuisson, on peut classer deux types de four :

- ♣ Four basique
- ♣ Four acide

5. Selon sa température d'utilisation

Chaque four ont ses caractéristiques principal ce qui le différencie aux autres. Donc on peut les classés par ces caractéristiques, l'un le plus connue de ces caractéristiques est la température d'utilisation. On peut citer alors :

- ♣ Les fours ordinaires : fonctionnant à des températures au-dessous de 1000°C
- ♣ Les fours à haute température : pouvant atteindre des températures supérieures à 1000°C

II. Les fours à céramique [6] [7] [8] [9]

Le four à céramique, comme son appellation l'indique clairement, est un four destiné à la cuisson de la céramique. Les premiers modèles utilisés fonctionnaient déjà au bois. Aujourd'hui, il en existe différents types. Ces derniers répondent à des besoins et des exigences bien précis.

1. L'évolution du four à céramique

Le four céramique a beaucoup évolué depuis sa création. Les changements apportés aux différents modèles qui se sont succédé ont surtout servi à améliorer le mode de

fonctionnement et l'efficacité de ces appareils. Aujourd'hui, on peut trouver des fours céramiques avec une température assez haute, pour procéder à la vitrification de pièces en porcelaine. Les appareils affichent par ailleurs une performance accrue et proposent un temps de cuisson réduit. Il existe désormais des modèles que l'on peut utiliser pour cuire plusieurs objets en une seule fois.

2. Les modes de cuisson proposés par un four à céramique

Il existe trois différents modes de cuisson de la céramique. D'abord, il y a les modèles proposant une cuisson directe. Les flammes traversent les objets à traiter avant d'être évacuées par le biais d'une cheminée. Viennent ensuite ceux qui fonctionnent avec une flamme renversée. Ces fours à céramique proposent une cuisson uniforme en faisant en sorte que les flammes soient réparties d'une manière homogène, de part et d'autre de l'appareil. Enfin, il y a les modèles proposant une chaleur radiante. Le principe est le même que pour la cuisson directe. La différence se trouve dans le fait que les flammes ne sont pas directement orientées vers l'objet à traiter. C'est la chaleur dégagée par celles-ci qui cuit la céramique.

3. Les différents types de fours à céramique

En plus du mode de cuisson, les types de fours se distinguent aussi par leur forme. Il en existe trois sortes. Le modèle semi-enterré est doté d'un compartiment de cuisson et d'un foyer. Ces deux éléments sont séparés par une sole maintenue par un support central. Le tout est surmonté d'un dôme lequel peut être en brique crue ou en argile et qui est recouvert de pierres. Ce four à céramique atteint une température maximale de 800° C. Le modèle couché propose un dispositif de tirage pouvant être en diagonale ou horizontal. Très ancien, ce type de four était installé sur une colline ou autre surface pentue. Il est constitué d'un ou de plusieurs cellules de cuisson. Enfin, il y a le four vertical dont le foyer se trouve dans la partie intérieure de l'appareil. Il propose un ou plusieurs niveaux pour la cuisson des céramiques. La présence de plusieurs étages s'avère utile pour traiter des objets de différents types.

III. Les fours à gaz [6] [10] [11] [12]

Les fours à gaz sont des fours qui utilisent des combustibles gazeux comme source d'énergie. Selon la préférence de l'utilisateur, il existe des différents types des gaz qu'on peut utiliser dans le four. On peut citer : le propane, le butane, gaz naturel, le dihydrogène, etc...

Le principe de chauffage couramment utilisé dans ces fours est le chauffage direct. Le combustible et le comburant (l'air) sont acheminés vers le brûleur pour produire de la flamme. On dit que la cuisson est directe si la chambre de combustion et la chambre de chauffage reste le même.

1. Les brûleurs

a) Classement des brûleurs

Les différentes technologies de brûleurs gaz sont revues selon un ordre chronologique. Au départ, on trouve les **brûleurs atmosphériques** associés aux chaudières atmosphériques. A l'heure actuelle, on ne conçoit plus de nouvelles installations au départ de cette technologie. En effet, les autres types de brûleurs présentent des avantages majeurs par rapport aux brûleurs atmosphériques. Néanmoins, ceux-ci se rencontrent encore dans des installations existantes.

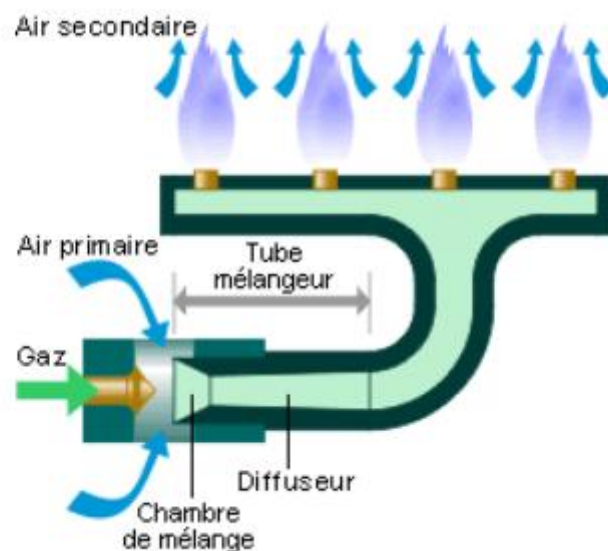


Figure 1 : Principe de fonctionnement d'un brûleur gaz atmosphérique.

Plus tard, les **brûleurs à air pulsé** ont fait leur apparition permettant d'obtenir de meilleures performances énergétiques, essentiellement grâce à un plus grand potentiel de modulation en puissance et un meilleur contrôle de l'excès d'air.

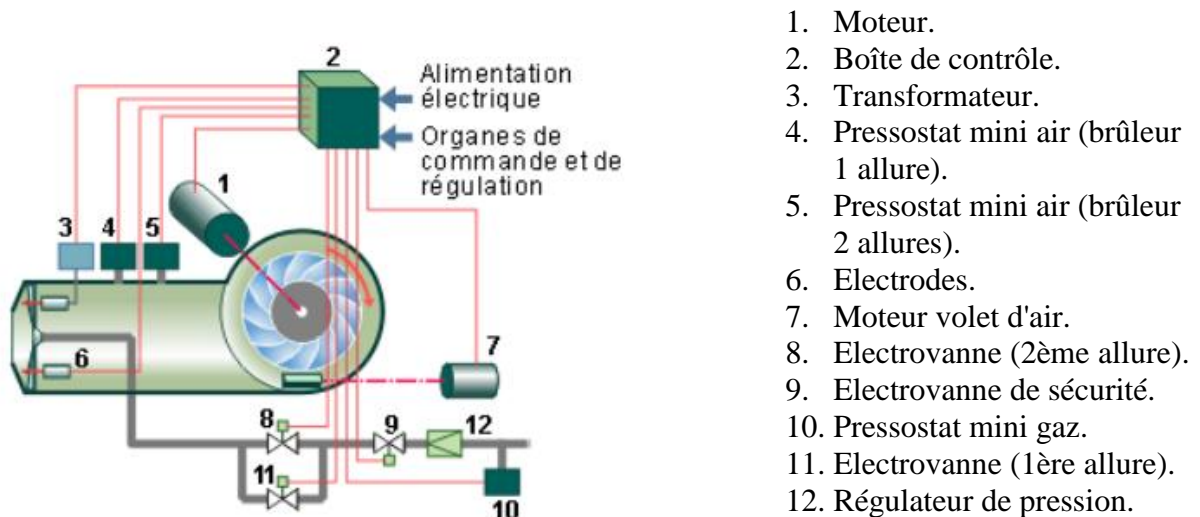


Figure 2 : Brûleur gaz à air pulsé

Ultérieurement, les **brûleurs à pré-mélange avec ventilateur** se sont développés. Ils permettent d'atteindre une plage de modulation plus large que les brûleurs à air pulsé, et ceci, dès les faibles puissances installées. En outre, ils sont moins chers que les brûleurs pulsés.

Néanmoins, pour les niveaux de puissance plus importants ($P_n > 1-3 \text{ MW}$), il sera inévitablement nécessaire de travailler avec ces brûleurs à air pulsé (technologiquement, il est difficile d'atteindre ces niveaux de puissance par des chaudières gaz à pré-mélange).

De manière générale, il faut aussi mentionner que le brûleur pulsé et la chaudière sont deux éléments qui peuvent être achetés indépendamment (à partir du moment où l'on respecte les règles de compatibilité entre les deux parties). Par contre, les chaudières atmosphériques et à pré-mélange sont essentiellement des chaudières de type "**unit**", c'est-à-dire un ensemble indissociable. Par conséquent, les brûleurs pulsés permettent de changer de combustible (gaz/mazout) tout en gardant la même chaudière : seul le brûleur doit être modifié.

b) Synthèse sur la modulation en puissance pour les brûleurs gaz

Le tableau suivant montre les principes de modulations de chaque type de brûleurs selon leurs puissances d'utilisation.

Tableau 1 : Principes de modulations des brûleurs

Puissance nominale	Brûleur gaz atmosphérique	Brûleur gaz à air pulsé	Brûleur gaz à prémélange avec ventilateur
Pn < 100 - 150 kW	Tout ou rien, voire deux allures	Tout ou rien	Modulant (10 - 20 à 100 %)
Pn < 150 - 250 kW		Deux allures	
Pn > 150 - 250 kW		Modulant (30 - 100 %)	
Pn > ~ 1 MW	Chaudières en cascade		Chaudières en cascade
Pn > ~ 3 MW	Techniquement trop complexe		Techniquement trop complexe

2. Le propane

Le gaz propane est une énergie propre, respecte l'environnement. Sa combustion est d'excellente qualité : pas de composé sulfureux, peu d'oxydes de carbone et peu d'oxydes d'azote, aucun résidu, pas d'imbrûlé, pas de poussière ni de cendre.

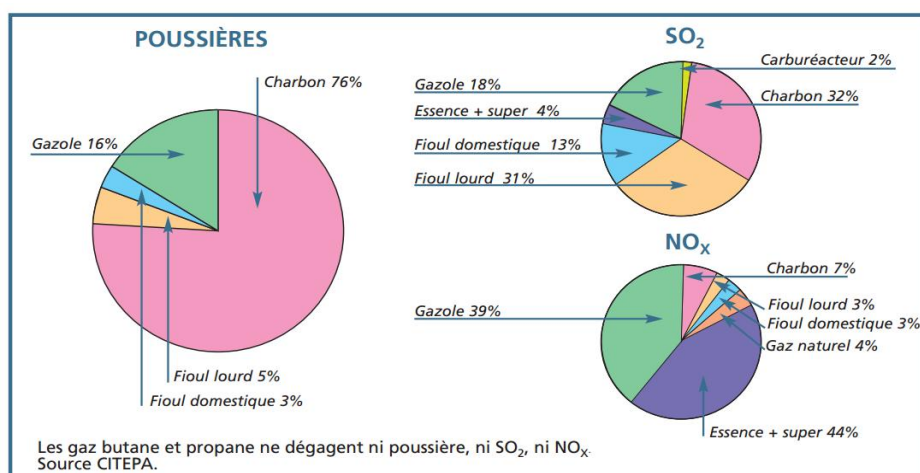


Figure 3 : comparaison des pollutions due aux différents combustibles

Grâce à la combustion propre du gaz propane, il n'est pas polluant. L'utilisation du gaz propane est recommandé dans les milieux sensibles aux effets de la pollution, comme l'élevage, l'aviculture, l'horticulture et dans les processus de fabrication de l'industrie agro-alimentaire.

a- Pouvoir calorifique du propane

Une garantie pour l'optimisation des performances énergétiques : le gaz propane offre un pouvoir énergétique nettement supérieur aux autres énergies.

Tableau 2 : pouvoirs calorifiques et émission de CO₂ des différents combustibles

COMPARATIF DES POUVOIRS CALORIFIQUES DES ÉNERGIES						
Propane	Butane	Gaz naturel	Fioul domestique	Charbon	Bois	Fioul lourd
1 kg 13,8 kWh	1 kg 13,7 kWh	1 m ³ 10,4 kWh	1 litre 10,4 kWh	1 kg 8,9 kWh	1 kg 5,5 kWh	1 litre 10 kWh
ÉMISSION DE CO ₂						
230g/kWh	230g/kWh	200g/kWh	270g/kWh	400g/kWh	400g/kWh	280g/kWh

b- Principe de vaporisation

Le propane contenu dans le réservoir se transforme en gaz au fur et à mesure des besoins de l'utilisateur, grâce à un apport de chaleur du milieu ambiant (vaporisation) et à la décompression du ciel gazeux par le soutirage. A l'intérieur d'un réservoir, les GPL se présentent sous deux phases en équilibre :

- ♥ en partie supérieure, la phase gazeuse (vapeur saturante),
- ♥ en partie inférieure, la phase liquide.

A l'utilisation, on soutire la partie gazeuse. Au fur et à mesure de la consommation, la partie liquide se vaporise et remplace le gaz utilisé. La chaleur de vaporisation est prise sur la capacité calorifique du liquide qui lui-même récupère de la chaleur par conduction (parois du réservoir en contact avec l'air ambiant). En fonction des besoins de l'installation (pression et débit), il peut être nécessaire d'avoir recours à un système de vaporisation artificielle.

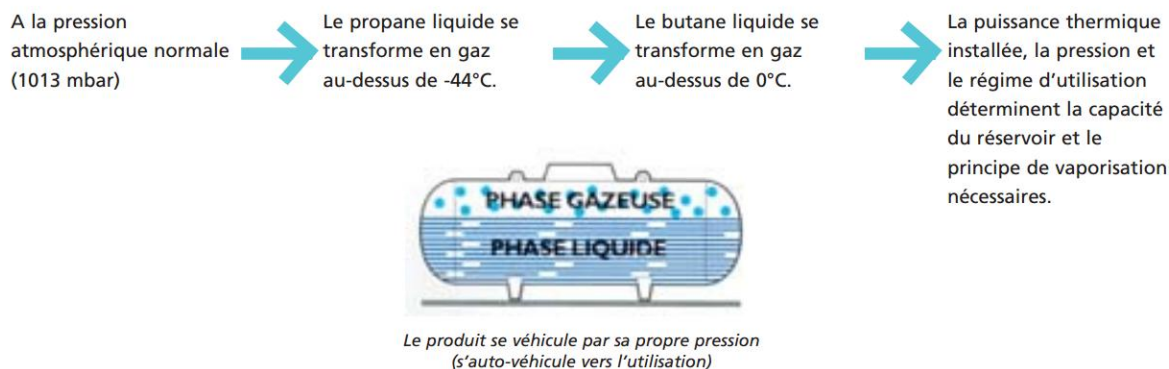


Figure 4 : principe de vaporisation du propane

c- Pression de vapeur

La pression de vapeur est la pression qu'atteint le gaz lorsqu'il y a une présence simultanée d'une phase gazeuse et d'une phase liquide (pression d'équilibre). Elle est fonction de la température. La courbe représentant la variation de la température d'ébullition en fonction de la pression supportée par la surface de séparation du liquide est appelée courbe de vapeur saturante ou courbe de pression de vapeur.

d- Caractéristiques de combustion des différents gaz

Voici un tableau qui montre des caractéristiques des différents gaz d'après Weishaupt.

Tableau 3 : caractéristique physiques des combustibles

Type de gaz		Gaz nat. Ei	Gaz nat. Es	Propane	Butane	Propane/ Butane 70/30	Biogaz	Fioul domestique
P.C.I.	kWh/m ³	8,83	10,35	25,89	34,29	27,96	6,38	11,90
Air nécessaire	m ³ /m ³	8,45	9,91	24,37	32,37	26,32	6,12	11,22 m ³ /kg
Air nécessaire	m ³ /kWh	0,957	0,957	0,941	0,941	0,941	0,959	0,943 kg/kWh
Volume des fumées								
Humides	m ³ /m ³	9,37	10,82	26,16	34,66	28,23	7,05	11,86 m ³ /kg
Sèches	m ³ /m ³	7,72	8,90	22,81	29,74	24,12	5,84	10,46 m ³ /kg
Volume des fumées								
Humides	m ³ /kWh	1,06	1,05	1,01	1,01	1,01	1,10	1,00 kg/kWh
Sèches	m ³ /kWh	0,87	0,86	0,88	0,87	0,86	0,91	0,879 kg/kWh
CO ₂ -maxi	Vol. %	11,65	11,92	13,70	14,00	13,74	16,85	15,31

Chapitre 2 LES MATERIAUX REFRACTAIRES

I- Généralités [3] [7] [13]

1- Historique

A la fin du XIXème siècle (vers 1883), on constate un véritable développement de l'industrie des produits réfractaires. Ceci est dû par l'essor considérable de la métallurgie grâce aux procédés BESSEMER et MARTIN. A cette époque, la définition de la haute température s'applique au matériau réfractaire qui résiste à 1 000°C. En 1900, cette valeur de température augmentée vers 1200°C pour les céramistes. Ainsi, les moyens de mesure et la puissance des fours ne cessent de progresser. Mais les laboratoires scientifiques prennent la relève. En 1897, le four à arc d'Henri Moissan atteint 2 000°C. Herman Nernst, en plaçant en 1903 un élément chauffant en matière réfractaire dans un four électrique, pulvérise le record. En 1905, Moissan volatilise du graphite à 3 000°C. En conséquence, la limite dépasse 1400°C en 1920. Vers 1950, la haute température débute vers 1 500°C. En 1980, le monde de la physico-chimie des hautes températures s'accorde à minima à 1 800°C, voire aujourd'hui plus de 2 000°C, température au-delà de laquelle les échanges par rayonnement deviennent prépondérants.

2- Définitions

Selon la norme AFNOR B 40 001, un matériau est dit réfractaire quand sa résistance pyroscopique est supérieure à 1520°C. Cette définition est toujours valable quelle que soit la nature du produit (métal, céramique, carbone, ...). Dans le cas où cette valeur dépasse le 1800°C, on dit qu'il est hautement.

3- Composition macroscopique

En général, la composition d'un matériau réfractaire est formée par trois phases macroscopiques distinctes : les grains ou agrégats, la phase liante et la porosité. Pour les applications en isolation thermique, la porosité est importante (> 50 %), ces sont des réfractaires isolants. Par contre, si on veut améliorer ses propriétés mécaniques ainsi que sa

résistance à la corrosion, cette porosité doit être réduite vers 10 à 20 %. On parle donc des réfractaires dits denses.

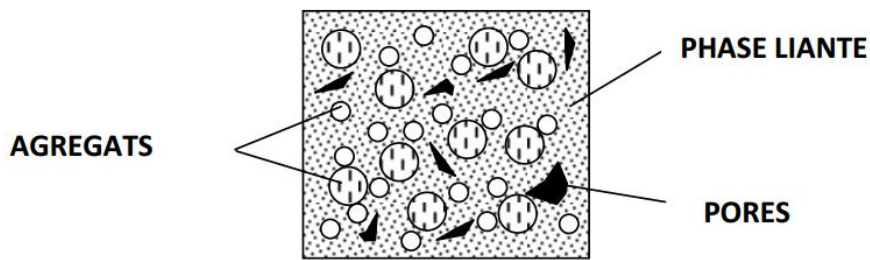


Figure 5 composition macroscopique des matériaux réfractaires

La plus grande partie des caractéristiques d'un matériau hétérogène sont obtenus par ces agrégats. Les propriétés thermomécaniques et chimiques sont fonctions de la proportion et de la nature de ces grains. Ces squelettes granulaires sont maintenus en cohésion dans la phase liante dont la composition chimique diffère peu de la leur. La seule différence entre eux est la classe granulométrique des grains. C'est-à-dire, la phase liante est constituée par des particules très fines par rapport à la taille de l'agrégat. Lorsqu'on se trouve en face d'un problème d'altération de matériau réfractaire, on doit considérer ces trois phases individuellement. En effet, ces trois constituants (la phase liante, les agrégats, la porosité) participent tous à l'élaboration de chaque propriété physique ou chimique du matériau. Dans ces propriétés, on distingue : les phénomènes de corrosion par les liquides ou les gaz, la résistance mécanique (fluage, affaissement sous charge, flexion ou compression à chaud,...), la résistance aux chocs thermiques, résistance à l'abrasion, la conductivité thermique. A chaque condition d'utilisation du matériau impose donc un dosage exact pour chaque composante.

4- Classification

Pour produire des produits réfractaires capables de travailler dans l'atmosphère de fours, les minéraux d'origine naturelle dans la famille des oxydes sont employés en tant que matières premières.

a- Classification suivant leur composition

A partir de leur composition chimique, on peut classer les matériaux réfractaires en trois grandes familles :

- **Le système silice-alumine**, formé par des matériaux qui sont caractérisés par leurs teneurs en silice et en alumine. Ils sont représentés par un diagramme qui les classe suivant leurs teneurs en ces deux éléments.
- **Le réfractaires de type basiques** : ils sont fabriqués à partir des oxydes basiques simples ou combinés (magnésie, chaux, oxyde de chrome).
- **Les réfractaires spéciaux** : comme son nom l'indique, ils sont utilisés à des emplois particuliers. Dans ce type de réfractaire, on utilise des matières premières comme les : Zircon (ZrSiO_4) - Zircone (ZrO_2) - Oxydes purs - carbone - carbures - nitrures – borures, ...

i. Système silice/alumine

Pour les réfractaires classé dans le système silice/alumine, on peut utiliser beaucoup des composés naturels pour se servir de matière première.

Dans le diagramme de phase suivant, nous pouvons voir les différentes matières premières du système, ainsi que toutes leurs phases représentés en fonction de la température et de la teneur en silice et alumine.

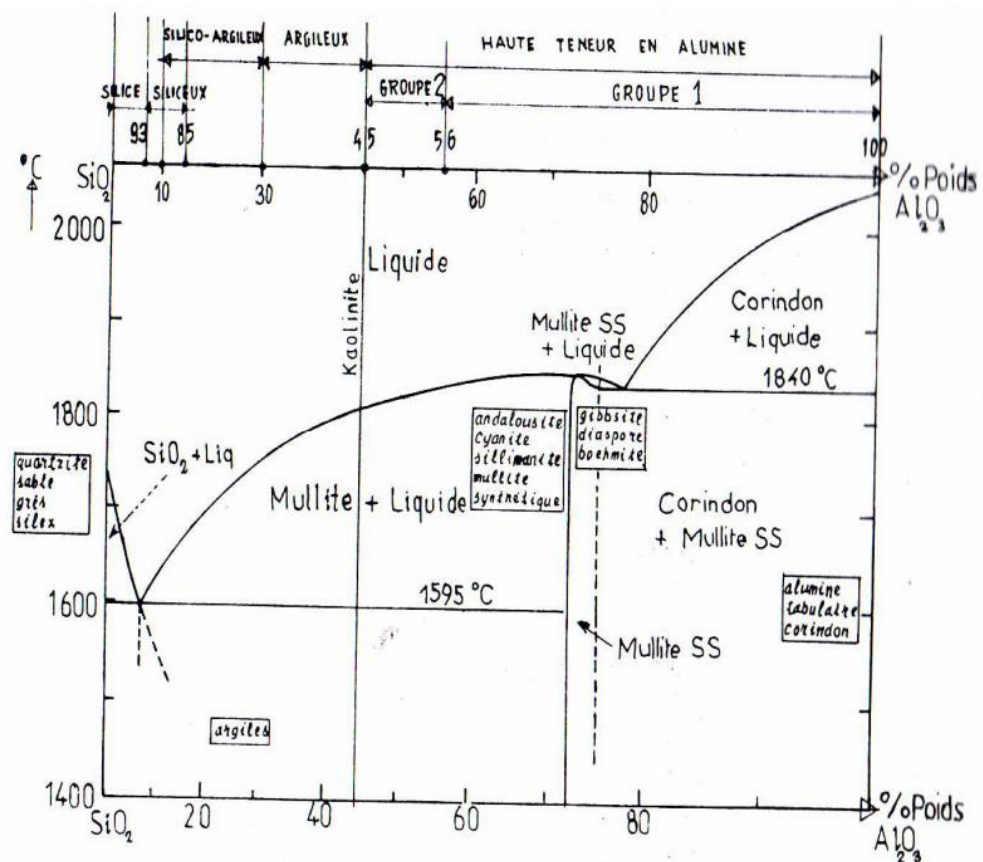


Figure 6 Diagramme de phase du système silice-alumine

ii. Les réfractaires basiques

En général, ils sont à base de MgO, CaO, SiO₂, Cr₂O₃.

On distingue :

- ❖ la dolomie : CaCO₃, MgCO₃
- ❖ la magnésie : MgO ou MgCO₃ sous forme naturelle
- ❖ la chromite : RO-R₂O₃ avec R= Mg²⁺, Fe²⁺ et R₂= Fe³⁺, Al³⁺, Cr³⁺
- ❖ la fosterite : 2MgO-SiO₂.

iii. Les réfractaires spéciaux

Au paravent, la technologie de fabrication des matériaux réfractaires est concentré sur l'utilisation des matières premières d'origine naturelles du groupe silice-alumine, mais maintenant, la technologie s'est élargi vers des matières premières synthétiques de plus en plus pures (mullite, alumine tabulaire, magnésie d'eau de mer, ...), d'autres silicates (zircon, cordiérite) et d'autres oxydes (zircone, oxyde de chrome), les carbures et les nitrures, les borures, les carbones ...

b- Classification suivant leur mise en forme

On peut classer les matériaux réfractaires suivant leur mise en forme. Nous pouvons citer alors les :

➤ Produits isolants façonnés :

C'est le type le plus utilisé. Leurs mise en formes sont souvent présenté par des briques, pièces de formes, blocs, ...etc. Les procédés de fabrication de ces matériaux sont généralement une production en grande série.

➤ Matériaux non façonnés préparés :

De nos jours, on utilise de plus en plus des matériaux non façonnés appelés les monolithiques dans les applications industrielles. Le terme monolithique réunis tous les matériaux qui ne sont pas mis en forme avant leur application ou utilisation. Ces sont les bétons réfractaires. Ces matériaux sont souvent des :

- Produits fibreux
- Matériaux réfractaires composites
- Produits réfractaires crus ou étuvés

i. Les matériaux réfractaires façonnés

Selon la norme AFNOR, le classement des matériaux réfractaires façonnés se fait de la façon suivant :

- ❖ Les produits façonnés isolants (NF B 40 004) : Les produits réfractaires isolants façonnés possèdent une porosité totale supérieure à 45 % et une masse volumique apparente s'étalant de 400 à 1600 kg/m³. Ils possèdent des conductivités thermiques relativement faibles allant de 0.19 à 0.53 W/mK à 1000°C.
- ❖ Les produits façonnés denses (NF B 40 002) : Les produits réfractaires façonnés denses possèdent une porosité totale nettement inférieure à 45 %.

ii. Les matériaux réfractaires non-façonnés

Pendant la préparation des matériaux réfractaires non façonnés, on utilise un ou plusieurs constituants réfractaires. Afin d'assurer la cohésion de chaque particule, un liant doit être mélangé à ces matières premières avec une addition préalable d'un liquide approprié.

Pour classer les matériaux réfractaires non façonnés, nous pouvons utiliser :

- La classification, en fonction de la nature chimique et minéralogique du ou des constituants essentiels du mélange et celui du liant;
- La classification selon le type d'emploi et le mode de mise en œuvre.

II- Elaboration des matériaux réfractaires [1] [3] [7] [13] [14] [15]

En générale, les matériaux réfractaires sont des produits ayant des liaisons iono-covalentes. A cause de ces liaisons, ils ont une réfractarité élevée, une grande dureté et une absence de ductilité avec une faible ténacité (aux basses températures).

1- Matières premières

Les matières premières principales les plus utilisés pour la fabrication des matériaux céramiques et réfractaires sont en générale : la silice, l'alumine, l'argile et le kaolin.

a) La silice

C'est le composant le plus abondant dans la constitution de l'écorce terrestre. La silice est une matière polymorphe. On le trouve souvent dans la nature à l'état amorphe (opale, galets de mer,...) ou cristallisée (quartz, cristobalite et tridymite). Pour la fabrication des réfractaires de silice, les matières premières les plus utilisées sont les quartzites. Ils renferment en générale plus de 93% de silice dans sa composition minéralogique.

b) Alumine

Après la silice, L'alumine est le minéral le plus abondante dans la nature. Sa formation est due par la dégradation des roches de bauxite. Le premier consommateur d'alumine est l'industrie des réfractaires, puis les industries des abrasifs et des porcelaines techniques.

c) Argile

Parmi les minéraux qui se trouvent dans le sol, les argiles sont classés les plus importants minéraux exploités industriellement. Leurs applications renferment presque toutes les secteurs d'activités (agriculture, construction, ingénierie, médecineetc.).

Les minéraux argileux appartiennent au groupe des phyllosilicates (du grec « phullon » qui signifie « feuille »). Les minéraux argileux sont constitués par des différentes superpositions des feuillets tétraédriques et octaédriques.

d) Kaolin

Le terme kaolin provient du nom du village « Kauling » en Chine dans lequel les hommes ont fait extraits de l'argile blanche autrefois. De nos jours, la définition exacte du kaolin est l'argile ayant une composition minéralogique contenant du kaolinite ($\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4$) supérieure à 50%.

Le kaolin a en générale une teinte blanchâtre. Les autres colorations sont particulièrement dues à la présence d'impuretés.

2- Préparation des Matières premières

a) Broyage

Afin d'obtenir une meilleure qualité de produit réfractaire, chaque matière première doit passer par le processus de broyage. Cette préparation doit être faite avant de procéder au mélange des différents constituants d'une composition. Elle permet d'obtenir des poudres à granularité fine bien déterminée (forme, taille).

b) Granulométrie des grains

Dans l'industrie des réfractaires, l'étude de la granulométrie des poudres est très importante. Les recherches sur l'ajustement de la taille des grains sont en général faites pour obtenir un entreposage à haute densité. Le principe est basé sur le choix de particules avec des tailles et des fractions de sorte que les vides laissés entre les grosses particules seront occupés par les particules successivement les moins grosses. Cela minimise les changements dimensionnels durant le séchage et la cuisson et améliore ainsi les propriétés des produits élaborés.

3- Façonnage

a- Malaxage :

Avant d'obtenir le matériau réfractaire, on commence à partir des matières premières ayant diverses formes, tailles et densités dans lesquelles on applique plusieurs opérations jusqu'à la finition du produit. C'est ainsi que le processus de malaxage intervient afin d'améliorer l'homogénéité chimique et physique du mélange. À la fin de l'opération, il doit y avoir une uniformité de propriété à travers tout le corps du matériau et chaque réaction qui se déroule à l'intérieur du produit doit être la même en tout point. Pour éviter tout changement des caractéristiques des particules de départ (forme, taille, dureté...), ce qui peut avoir une mauvaise influence sur les propriétés du produit final, ainsi le procédé de mise en forme, l'opération de malaxage doit être effectuée sous des conditions contrôlées (durée, température, milieu, ...).

b- Mise en forme :

Pour procéder la mise en forme d'un matériau réfractaire, il existe plusieurs méthodes différentes.

- ❖ **Pressage uniaxial :** On exerce sur la poudre entreposée dans la matrice entre les poinçons une pression selon leur unique axe.
- ❖ **Pressage isostatique :** Le principe est basé sur la loi de Pascal: Une pression appliquée sur un liquide (ou un gaz) statique se propage également et exerce sur les surfaces atteintes des forces directement proportionnelles aux surfaces. Les produits très longs, à forme complexe, ou à grand volume (tubes, bougies d'allumage, buses réfractaires de coulée) ne sont pas facilement exécutables par pressage uniaxial et sont le plus souvent fabriqués par pressage isostatique.
- ❖ **Pressage en moule humide:** Le moule déformable (caoutchouc synthétique, silicone, polyuréthane) est rempli de la poudre puis il est fermé pour assurer l'étanchéité. Ensuite, il est désaéré puis immergé dans le liquide contenu dans la chambre pour être comprimé. Ce procédé est utilisé dans la fabrication des pièces volumineuses et /ou de formes complexes.
- ❖ **Pressage en moule sec :** Dans ce procédé la pression est appliquée radialement par le fluide qui se situe entre une coquille rigide et le moule déformable. Ce procédé s'applique pour de petites pièces allongées et dans la production est en cadence très élevée (bougies de voitures).
- ❖ **Pressage à chaud :** Quelquefois, les matériaux pressés puis frittés n'auront pas de densités satisfaisantes. Par exemple, certains réfractaires (borures, nitrures, etc.) même s'ils sont portés à des températures proches des températures de fusion ne se densifient pas ou bien se dissocient (décomposent) en d'autres composés. Dans ce cas, l'application de la pression à haute température peut être utile. Cette technique, outre la densification qu'elle autorise, offre l'avantage de limiter la croissance des grains. Elle est réservée aux produits spéciaux (technologies avancées) en employant des matrices en graphite, des températures de 2200°C et des pressions de 700 kg/cm² peuvent être atteintes.
- ❖ **Extrusion et injection des pâtes plastiques :** L'opération d'extrusion consiste à forcer, à l'aide d'un piston ou d'une vis, le mélange plastique à travers une filière qui matérialise la section transversale du produit. La longueur désirée est obtenue par

coupage en sortie de l'extrudeuse. Cette technique est utilisée dans la production des briques, des tubes protecteurs, des parois des fours tubulaires....

4- Traitement thermique

Sans traitement thermique, la plus part des produits réfractaires n'ont pas assez des bonnes propriétés mécaniques. Pour augmenter ces performances, des divers processus sont indispensables. On peut classer ces processus en trois opérations distinctes : le séchage, le déliantage et la cuisson.

a- Le séchage

Le séchage a pour but de diminuer l'humidité du produit façonné par dégagement et évaporation du liquide contenu dans son corps. Pour avoir un bon séchage, nous devons donc considérer deux facteurs très importants tels que la vitesse de diffusion à travers la masse à sécher et la vitesse d'évaporation vers le milieu environnant. Une mauvaise exécution de cette opération pourrait nous conduire à la génération des contraintes par rétrécissement non uniforme ou par pression des vapeurs à l'intérieur du produit.

Les eaux qui sont à l'intérieur des produits façonnés peuvent être classées sous trois types: l'eau interstitielle ou libre, l'eau zéolithique et l'eau de constitution.

Selon G. ALIPRANDI dans « *Matériaux réfractaires et céramique technique*, Ed. Septima Paris en 1979», au cours d'une opération de séchage trois phases peuvent être distinguées. Dans les deux premières phases s'évapore surtout l'eau qui se trouvait au début en surface de la pièce. Dans la troisième phase s'évapore l'eau contenue à l'intérieur.

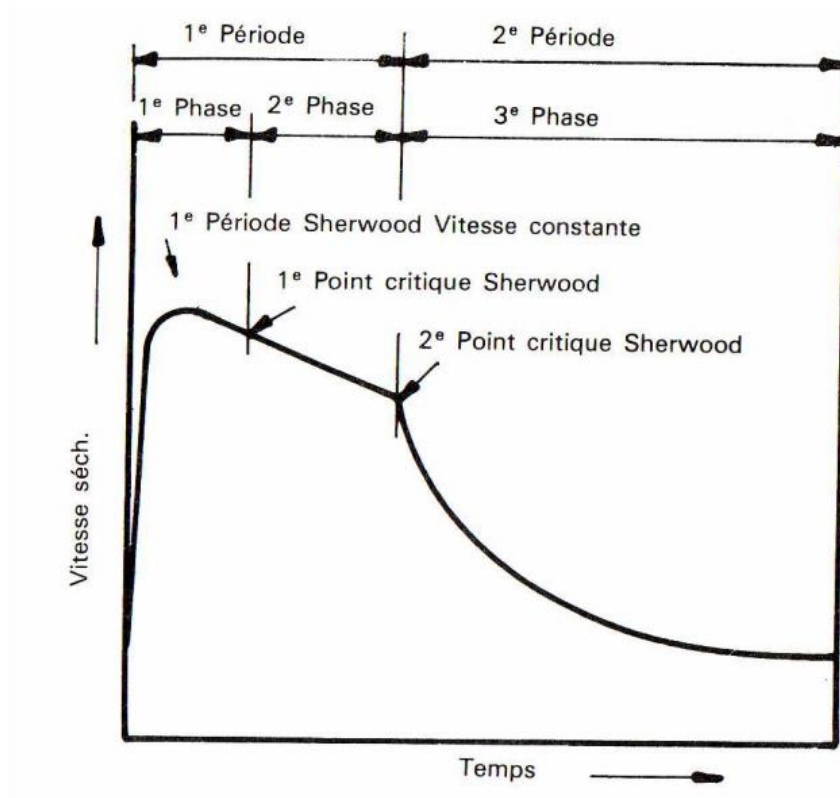


Figure 7 Courbe de séchage de Sherwood

b- Extraction des auxiliaires organiques de mise en forme (déliantage):

L'opération de déliantage permet d'éliminer tous les substances organiques qui se trouvent à l'intérieur du produit quel que soit leur type ou leur fonction. En générale, l'extraction se fait par décomposition thermique de ces substances.

c- La cuisson

Pour les produits réfractaires façonnés, la cuisson est l'étape finale pour leur fabrication. Elle a pour but de donner au produit final une consolidation parfaite qui lui confère tous les propriétés qui lui faut. On appelle cette opération : le frittage.

Le processus de frittage peut être influencé par la nature du matériau fritté et les conditions de frittage (température, temps, atmosphère, pression etc.)

Méthode et
Conception de notre
Four à Gaz

Chapitre 1 PRESENTATION ET DIMENSIONNEMENT

Les éléments principaux qui constituent le corps de notre four sont composés des cinq partis différents.

- ★ La couche intérieure composée par des matériaux réfractaire,
- ★ La partie isolante constituée par des calorifuges,
- ★ L'armature qui maintient le tous ensemble,
- ★ La tôle en acier qui forme l'interface extérieur,
- ★ Le support dans lequel le four se pose.

Tableau 4° Dimensionnements et caractéristiques du four

DIMENSIONNEMENT DU FOUR		
Longueur extérieur		1200 [mm]
Largeur extérieur		1000 [mm]
Hauteur extérieur		1200 [mm]
Nombre de brûleur		2
Puissance des brûleurs		100 [Kw]
Dimension porte d'introduction		500 x 500 [mm]
Epaisseurs des revêtements	Réfractaire	100 [mm]
	Isolant thermique	150 [mm]
	Tôle en acier	0,5 [mm]
Excès d'air		7 %
Capacité de la citerne à gaz		500[Kg]
Capacité maximal de chargement		95 [Kg]

Le tableau ci-dessus résume les caractéristiques principales du four. On rappelle qu'il s'agit d'un four à gaz fonctionnant avec du propane.

1- Le squelette du four

C'est une construction métallique soudée faite à partir de l'assemblage des fers en v renforcé par plusieurs nervures. Il constitue le squelette du four dans lequel tout l'assemblage est fixé. Par conséquent, cette partie doit être solide et forte pour qu'il puisse supporter tout l'installation ainsi que le chargement inclus à l'intérieur du four.

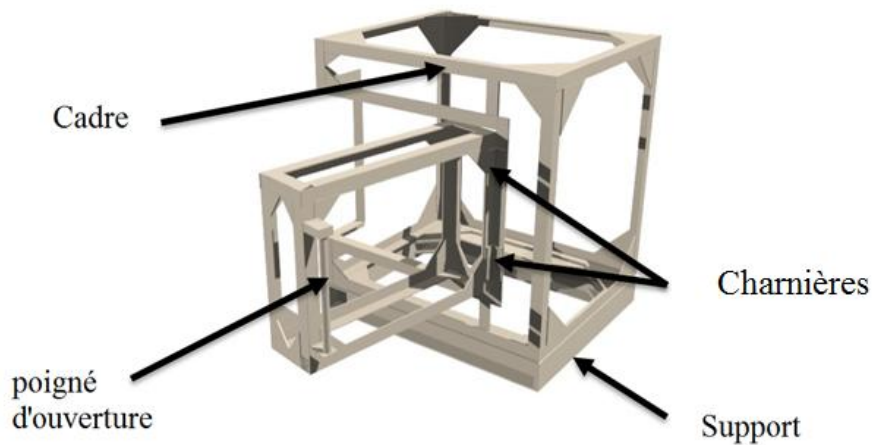


Figure 8° Squelette du four

2- L'interface extérieur

Cette partie assure l'emboîtement de l'équipement constituant le four. Elle constitue aussi son apparence extérieure. Il a donc aussi une fonction sur la qualité esthétique du four. La tôle a pour épaisseur 2 mm et doit être laquée afin d'éviter la corrosion. Voici un dessin en vue ombrée de ce coffre assemblé avec l'armature du four le tout monté sur son support de pose.

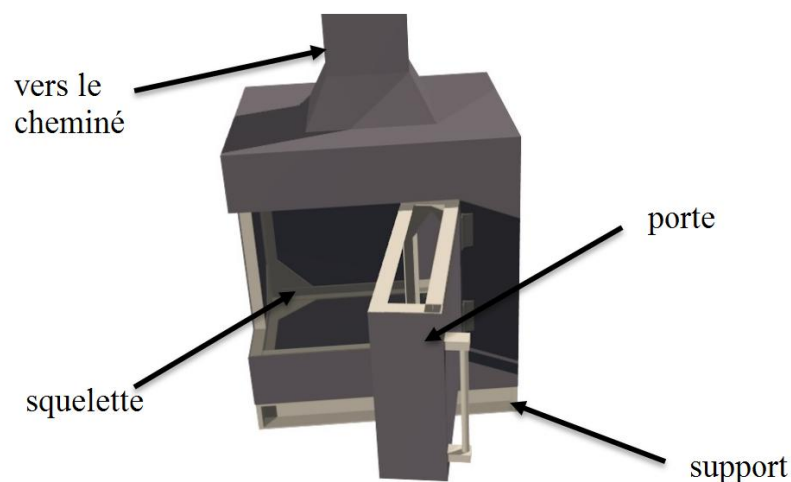


Figure 9° Structure métallique du foyer

3- Le support de pose

Il est formé par deux poutres en I reliées entre eux à chaque extrémité par deux barres d'acier d'épaisseur 5 mm. La stabilité de l'assemblage est fortifiée par deux nervures soudées à chaque côté. La masse du four est fixé sur le support à l'aide des boulons de fixation.

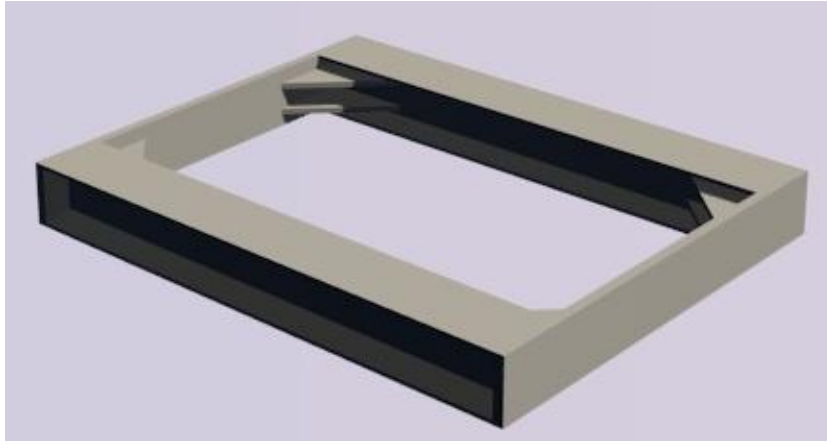


Figure 10° Support de pose

4- La couche de réfractaire

Les réfractaires sont des matériaux résistant au feu et à des températures extrême. C'est grâce à cette propriété que ce type de matériau est choisi pour faire le garnissage intérieur du four. Ici l'épaisseur que nous avons choisie pour ce garnissage intérieur est de 10cm. Dans l'image ci-dessous, la couche de réfractaire et l'isolant sont représentés avec couleurs différentes afin que nous puissions les faire distinguer l'une de l'autre.

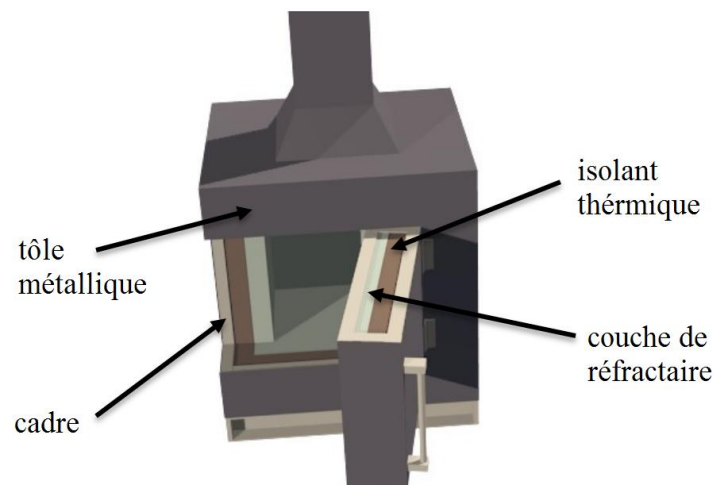


Figure 11° Le caisson du four

5- La couche d'isolant

Comme cette appellation l'indique, cet empilement de matériaux sert à assurer l'isolation thermique du four. Il est placé entre le garnissage réfractaire et le squelette du four. Dans tout l'assemblage, cette partie forme la couche de matériaux la plus épaisse du four. Son épaisseur mesure 15cm.

Chapitre 2 PRINCIPE DE FONCTIONNEMENT

Le fonctionnement d'un four dépend généralement de sa destination d'usage et le type de combustible utilisé. Dans notre cas, le combustible utilisé est le gaz propane. Ce four est destiné à la fabrication des matériaux céramique. C'est-à-dire, fabrication des produits à base d'argile et de silice. En effet, le four fonctionne à des températures supérieures à 500°C.

I. Circuit fluide [10] [11] [16]

Le circuit fluide du four comprend généralement l'alimentation en combustible-comburant et l'évacuation des fumées. L'énergie nécessaire pour la mise en marche du four est transportée vers les brûleurs à l'aide des deux conduites d'alimentation. Après la réaction de combustion, les restes des gaz sont évacués vers l'extérieur par le collecteur d'évacuation et le cheminé. Le circuit fluide est donc divisé en trois grandes parties :

- L'alimentation en combustible
- Le circuit aéraulique
- La conduite d'évacuation des fumées

1. Le circuit gaz

Le rôle du circuit gaz est d'amener le gaz à la pression et au débit de fonctionnement jusqu'à la tête de combustion. L'alimentation en gaz est réalisée conformément à la réglementation en vigueur. (DTU 61 .1, arrêté du 2 août 1 977) jusqu'à proximité du brûleur. Voici le circuit d'alimentation en combustible du four.

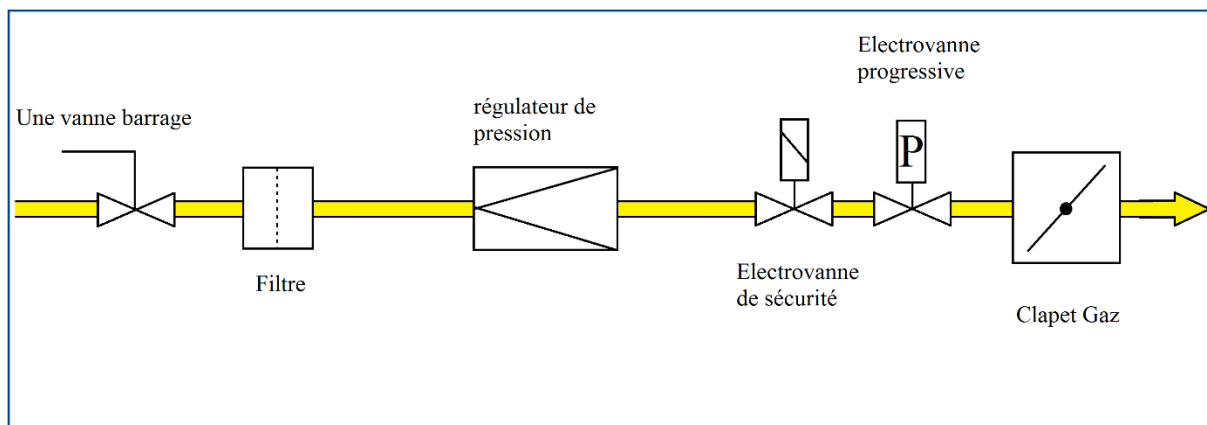


Figure 12° Circuit d'alimentation en gaz combustible

a. Les organes constitutifs du circuit ou panoplie Gaz

La panoplie gaz est sélectionnée suivant la nature et le débit de gaz nécessaire au fonctionnement du brûleur. Prévue pour une pression d'alimentation de 148[mbar] en entrée de rampe gaz sur le standard de base.

Conformément aux normes CE en vigueur pour application de la Directive Machine Européenne, elle se compose en standard de base des éléments principaux suivants :

- Une vanne manuelle d'isolement RTS ¼ de tour,
- Un filtre gaz 50µ,
- Un détendeur / régulateur de pression gaz à sécurités incorporées,
- Une électrovanne de sécurité,
- Une électrovanne progressive,
- Un clapet d'ouverture.

b. Fonctionnement

La Modes de réglage et d'alimentation du Gaz se fait par deux (2) allures progressives (Z) :

- Pendant la période d'allumage, le gaz est libéré par l'ouverture de l'électrovanne de sécurité et de l'électrovanne progressive. Son débit est limité par la position du clapet gaz.
- Le petit et le grand débit de gaz sont libérés par l'ouverture du clapet gaz par le servomoteur. Ici, on prend $Z = 8$ secondes.

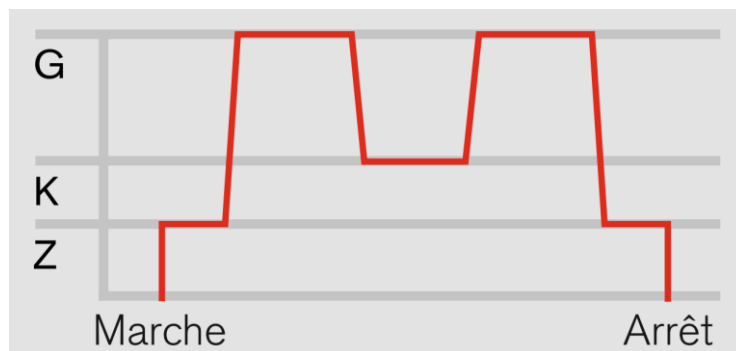


Figure 13° Variation du débit de gaz

G = grand débit

, K = petit débit

Z = débit d'allumage

c. Système d'alimentation en gaz

Dans la conception de notre four, le combustible utilisé est un gaz de pétrole liquéfié : le propane. Pour assurer la sécurité de l'installation, la mise en place de la bouteille stockage du propane doit être à l'extérieur d'appartement. A la sortie de la bouteille, le gaz subit une détente de 1,5 [bar] par un pré détendeur, puis, il traverse un limiteur de pression 1,75 [bar]. Avant de joindre l'installation, le gaz passe par un détendeur final qui transforme sa pression à 148 [mbar].

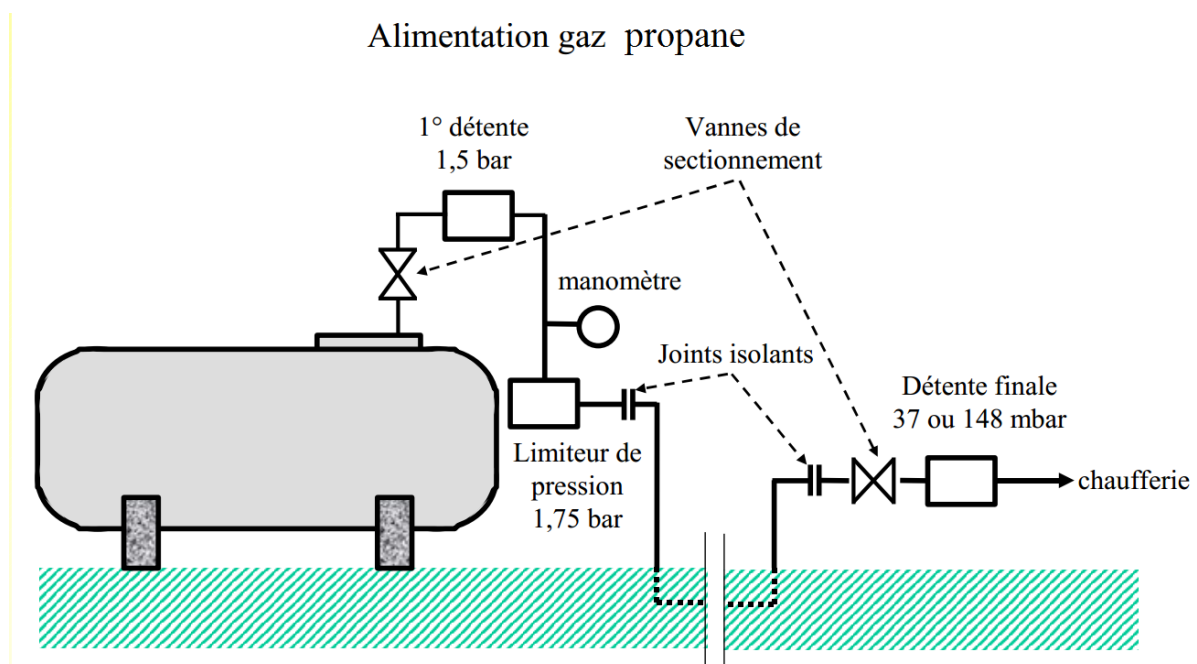


Figure 14° Alimentation en Propane

Avant chaque détendeur, des vannes barrages sont mise en place pour assurer le sectionnement de l'installation. Entre la deuxième vanne et le deuxième détendeur, un filtre à gaz 50 μ est installé afin de purifier le combustible.

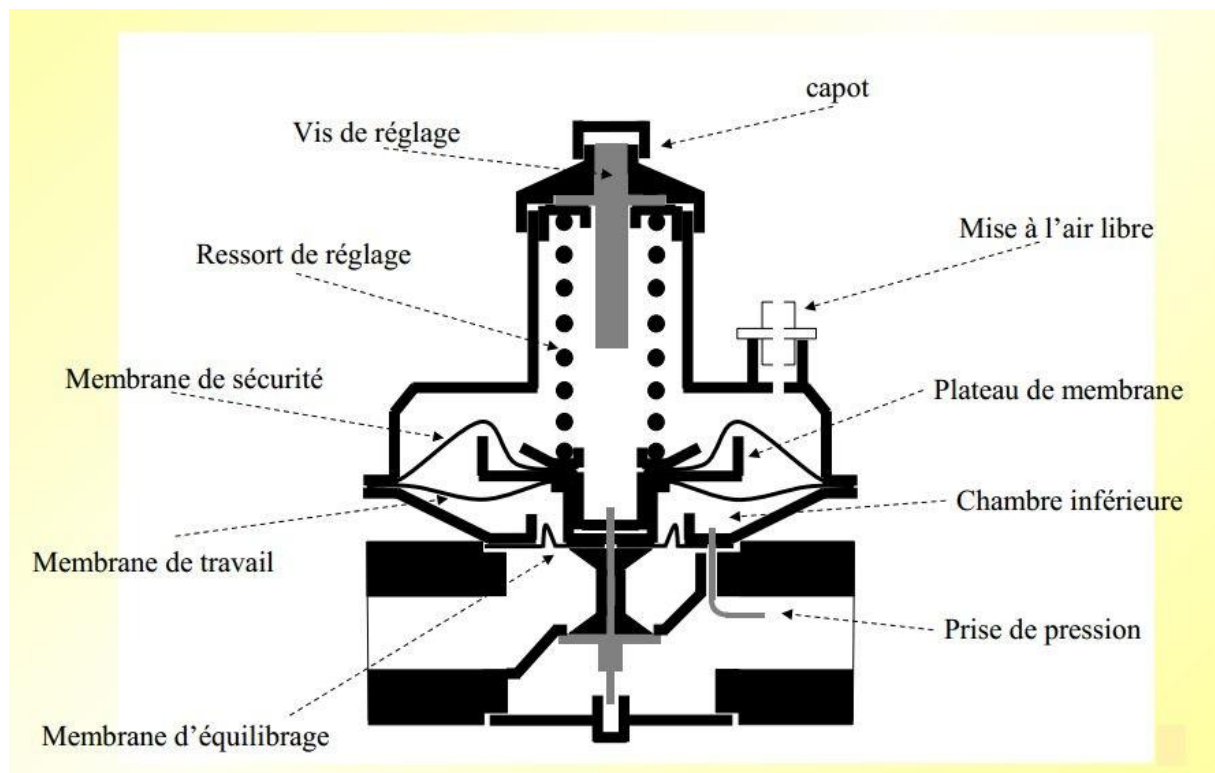


Figure 15° Régulateur de pression

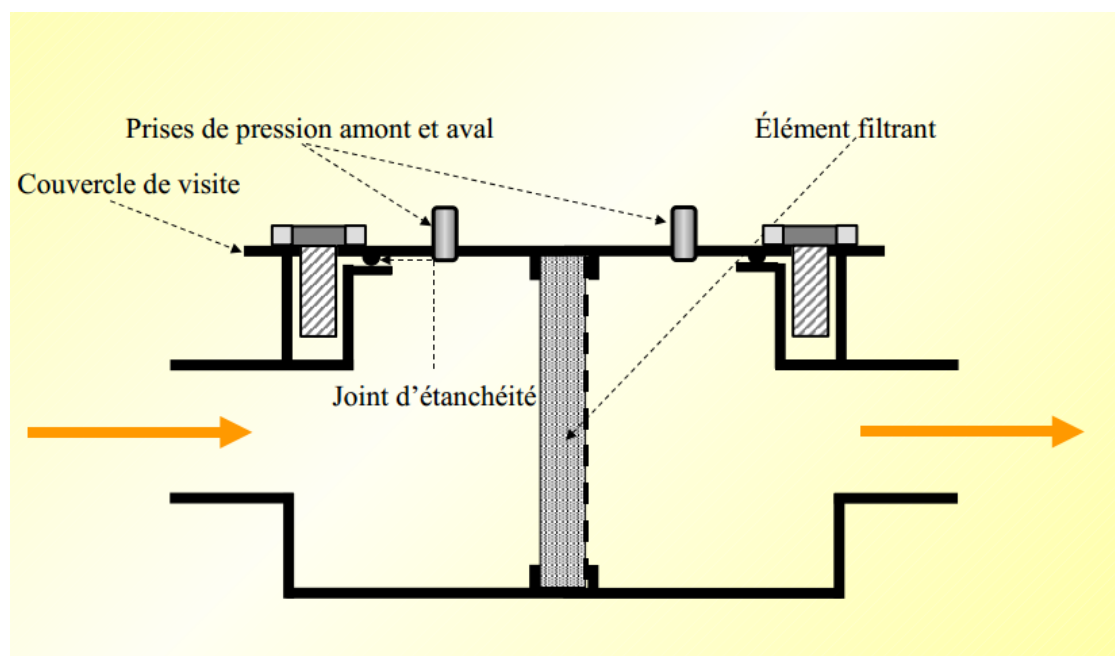


Figure 16° Filtre à gaz

L'électrovanne de sécurité doit être mise en place après détention finale. Il assure l'interruption du combustible pendant la période marche/arrêt de brûleur. Selon EN 676, les brûleurs doivent être équipés de deux vannes magnétiques pour de raison de sécurité. Ainsi, un contrôleur d'étanchéité doit être mise en place aussi. Pour notre cas, la deuxième électrovanne est une électrovanne progressive. Cela est fait de telle sorte que le développement et l'extinction de la flamme se fait progressivement.

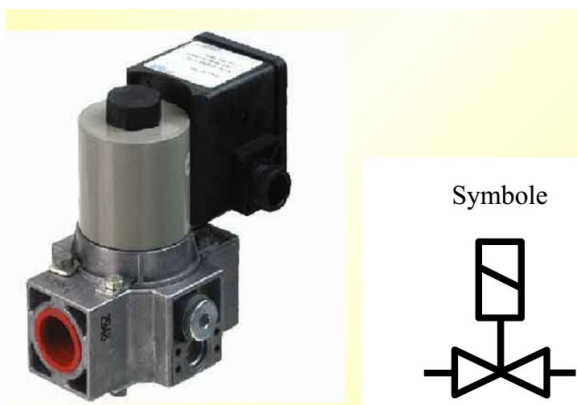


Figure 17° Electrovanne de sécurité

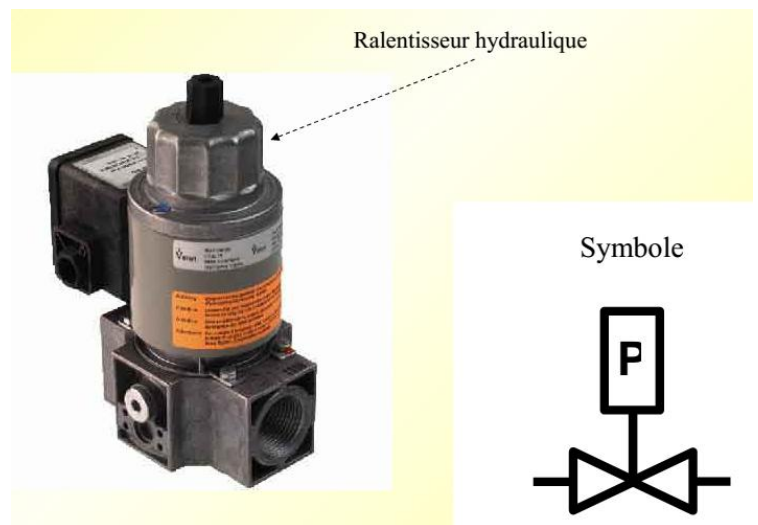


Figure 18° Electrovanne progressive

d. Rampe et bloc gaz

Si le circuit d'alimentation en gaz avant le brûleur est constitué d'appareils indépendants, l'ensemble des éléments qui composent le circuit d'alimentation en gaz du brûleur est appelé «rampe gaz ». Par contre, Lorsque tous les éléments sont rassemblés en un seul appareil on parlera de « bloc gaz ».

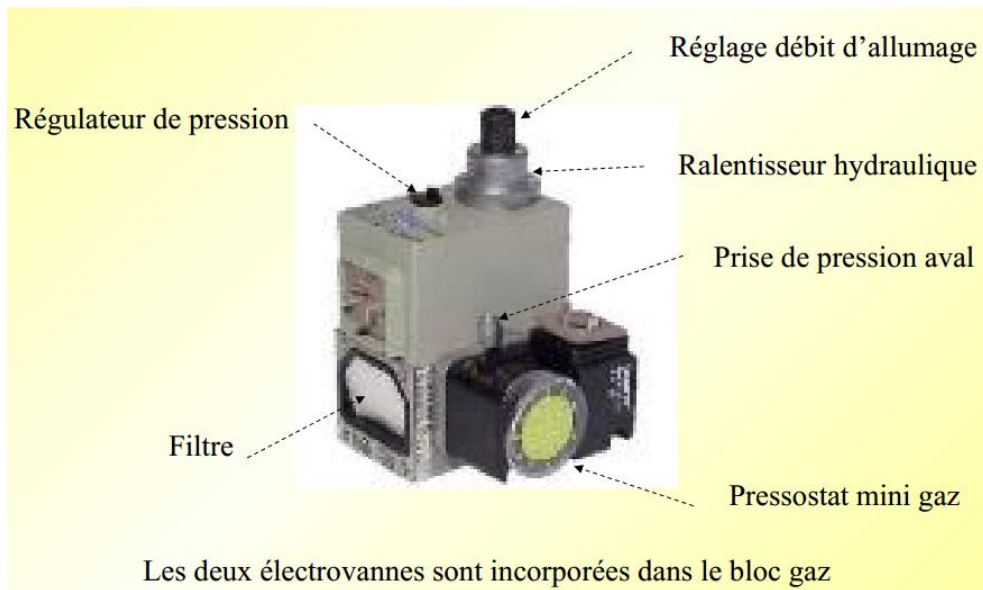


Figure 19° Bloc gaz

Lorsqu'il s'agit d'un bloc gaz, on le représente sur le schéma comme s'il était constitué d'éléments séparés.

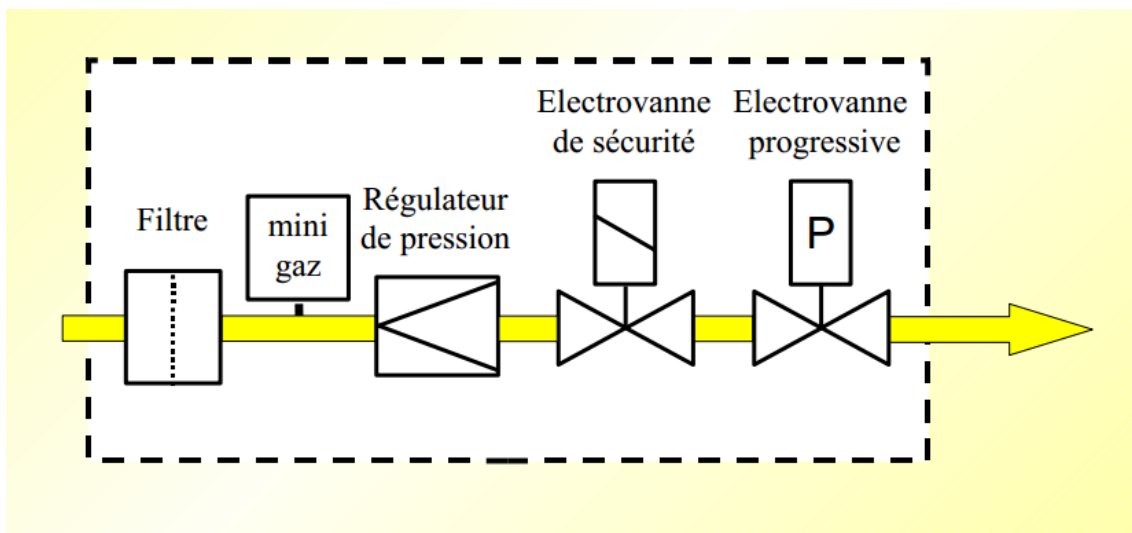


Figure 20° Schéma de représentation d'un bloc gaz

Voici un schéma coupe d'exemple de bloc gaz

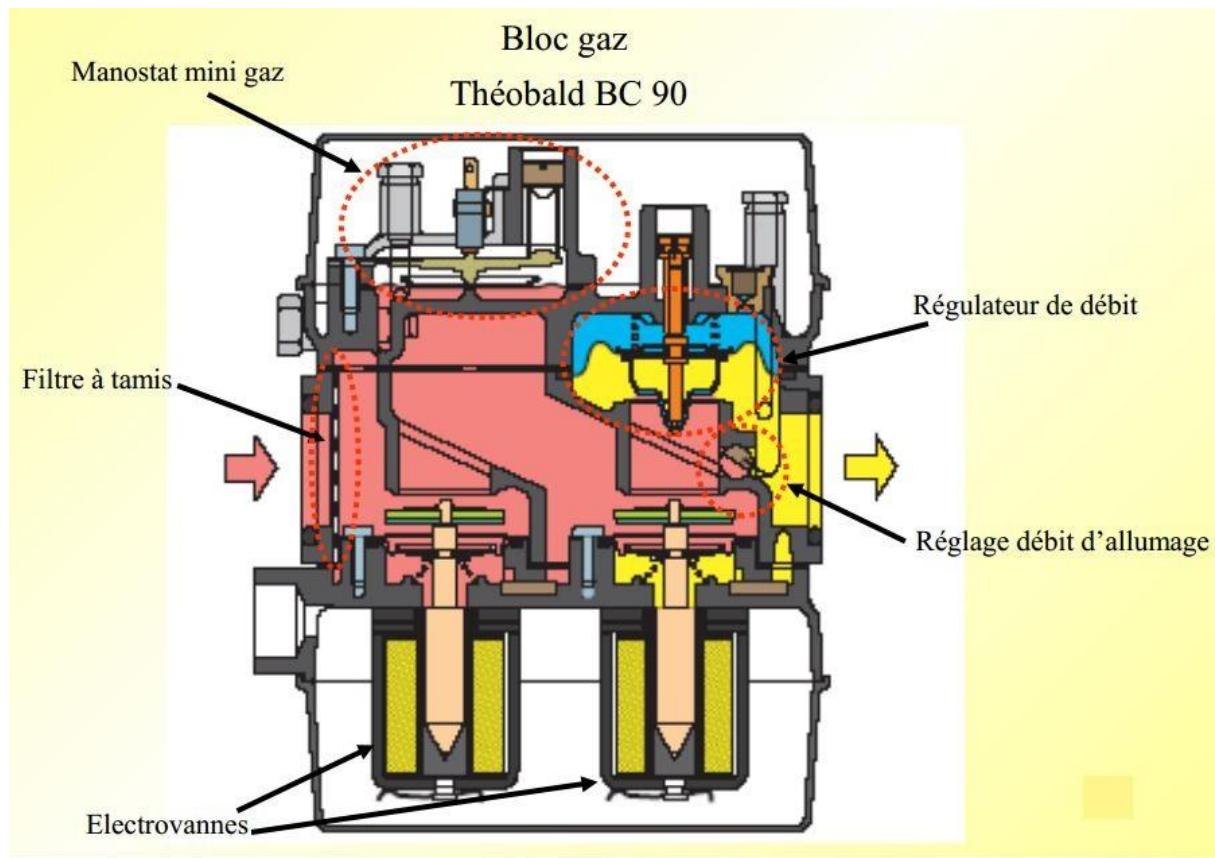


Figure 21° Bloc gaz Théobald BC 90

Pour le cas de la conception de notre four, nous avons choisis d'utiliser la rampe de gaz par rapport au bloc gaz.

e. Contrôle et sécurité de la rampe de gaz

A chaque vanne d'ouverture, que ce soit manuel ou électromagnétique, il est impératif de contrôler son étanchéité afin d'assurer la sécurité de l'installation.

i. Contrôle d'étanchéité des vannes par mise en surpression de la chambre intermédiaire

Cette technique utilise une pompe surpresseuse et un pressostat pour tester le bon fonctionnement des vannes.

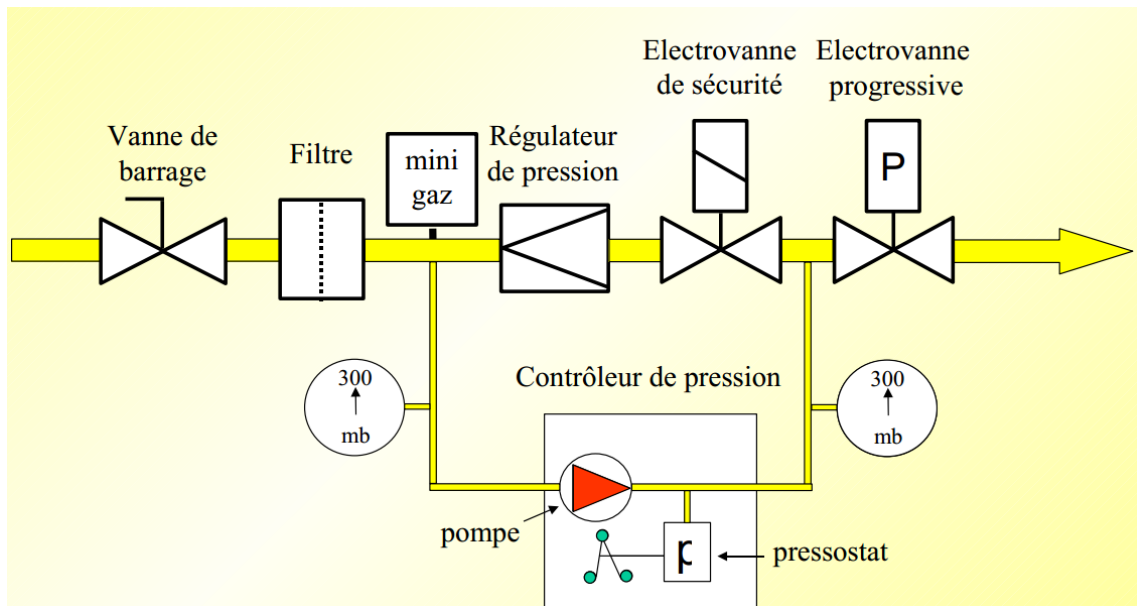


Figure 22° Installation d'un contrôleur de pression

ii. Contrôle de la vanne de sécurité

Le contrôle d'étanchéité de la vanne de sécurité se fait par mise à l'air libre de la chambre intermédiaire lors de l'arrêt du brûleur. Dans cette technique, on fait raccorder la conduite entre l'électrovanne progressive et l'électrovanne de sécurité, avant de la mettre à l'air libre (pression atmosphérique). L'évent extérieur traverse une vanne ouverte hors tension avec contact de contrôle de fermeture et un récipient contenant de glycérine. Ainsi, On peut visualiser par des bulles de gaz à l'intérieur du récipient.

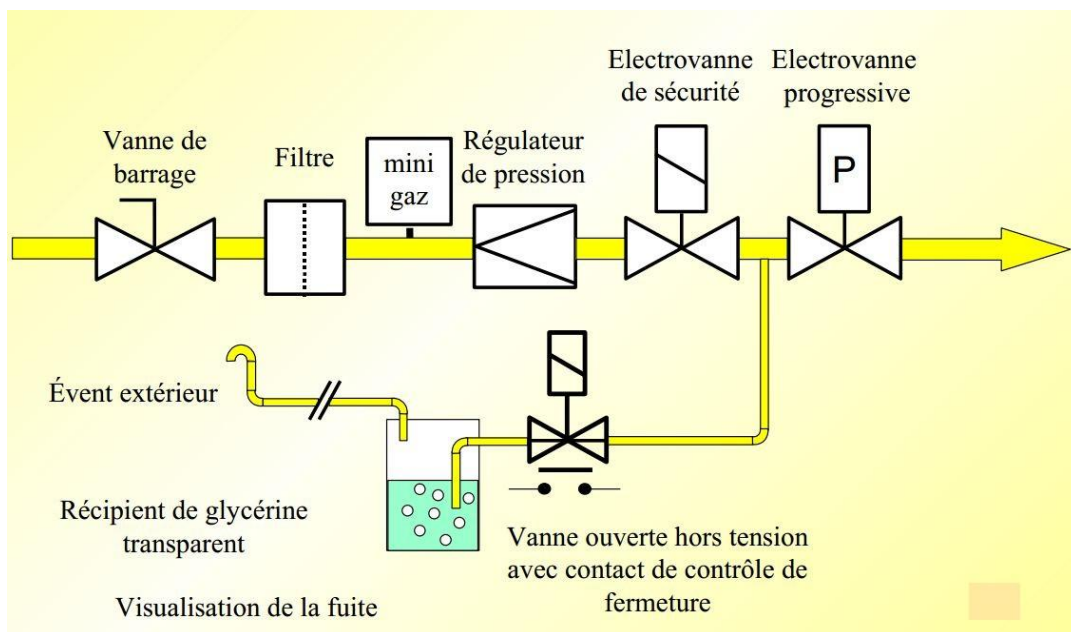


Figure 23° Contrôle d'étanchéité de la vanne de sécurité

iii. Contrôle de la rampe gaz

Le contrôle de l'étanchéité de la rampe gaz de la vanne de barrage à la vanne progressive se fait lors de la mise en service d'un brûleur gaz. De ce fait, les deux extrémités qui surveille la pression d'entrée et d'alimentation en gaz du dispositif de vérification sont connectées respectivement entre la filtre-détendeur et au milieu des deux électrovannes.

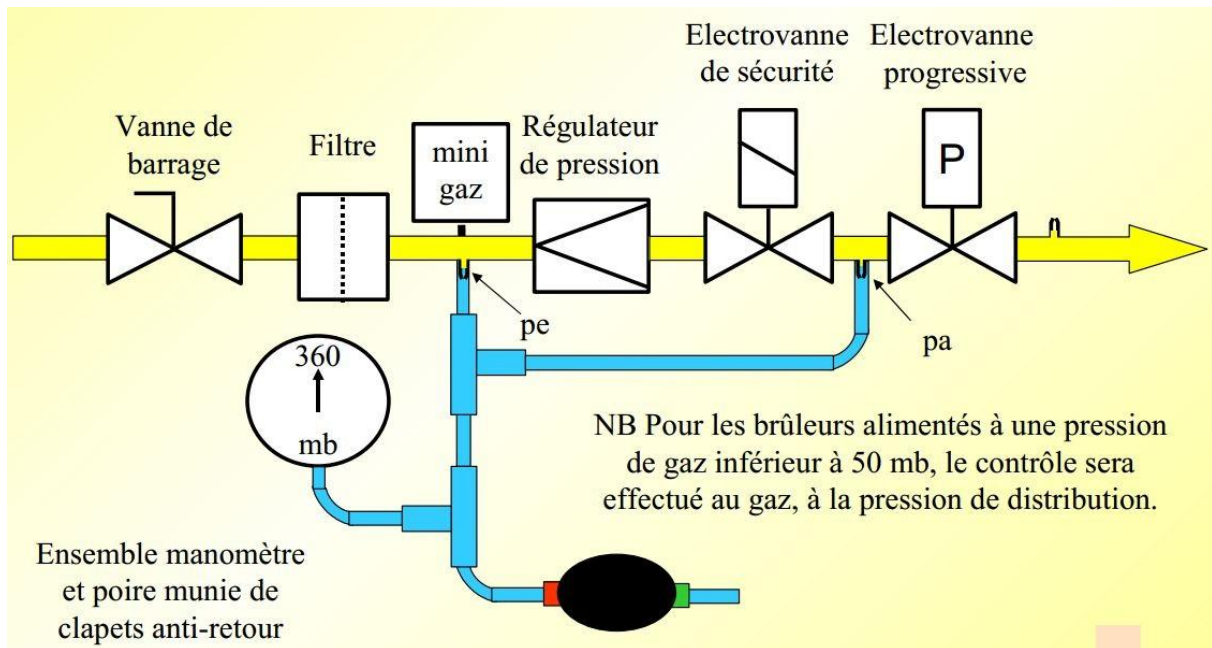


Figure 24° Vérification d'étanchéité de la rampe gaz

2. Circuit aéraulique

Le rôle du circuit aéraulique est d'acheminer l'air nécessaire à la combustion et d'en régler le débit. L'alimentation en comburant est assurée par une turbine entraînée par un moteur électrique. C'est le ventilateur, Il aspire l'air de combustion et l'envoie au brûleur. Le débit d'air est régulé à l'aide d'un pressostat et d'un clapet d'ouverture mécanisé par un servomoteur.

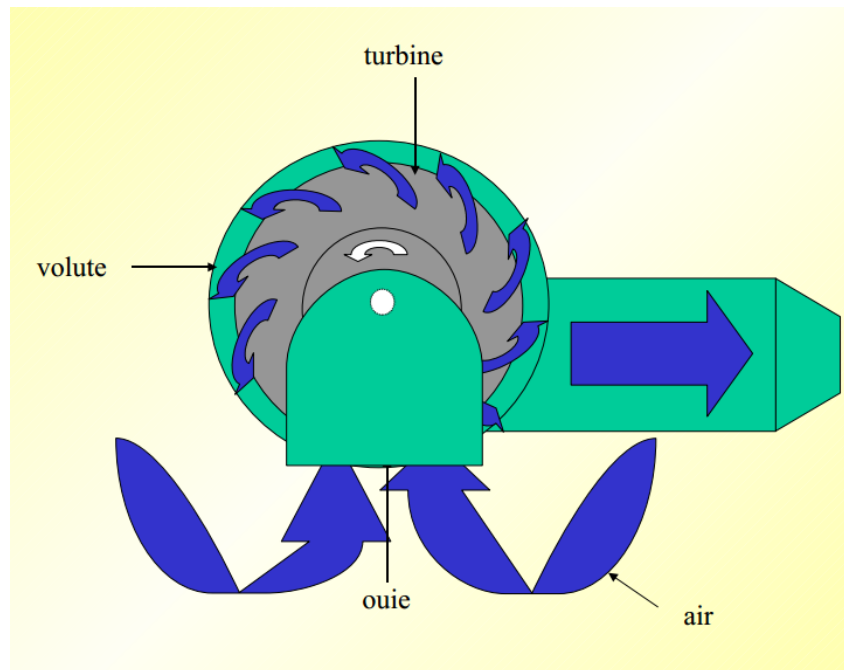


Figure 25° Ventilateur

L'ouverture du clapet gaz et du clapet du volet d'air sont synchronisés. Si le débit de combustible augmente, celui du comburant augmentera aussi. Ces deux clapets sont entraînés par un servomoteur et commandés par le régulateur de température.

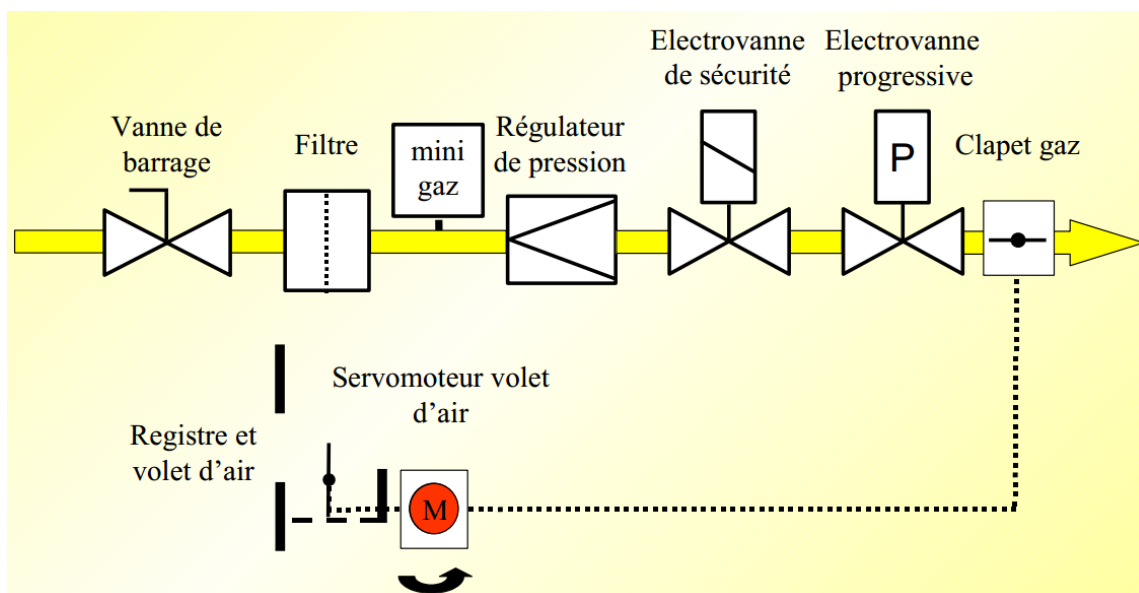


Figure 26° Rampe gaz à deux allures avec clapet gaz asservi au volet d'air.

A l'arrêt du brûleur (fin de la cuisson), le ventilateur tourne encore pendant un laps de temps afin d'évacuer les fumées qui est encore dans le chambre de combustion. Cette évacuation est assurée par une autre conduite d'air muni d'un second clapet d'ouverture.

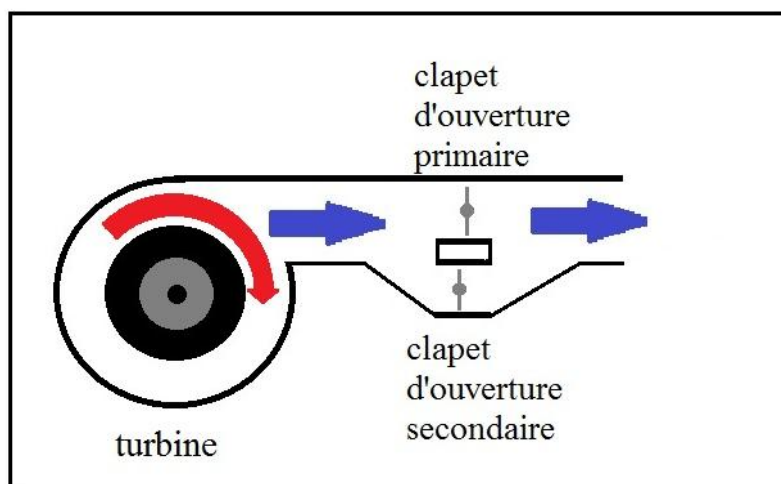


Figure 27° Ventilateur avec deux clapets d'ouvertures indépendantes

Remarque :

Avec un système Air Gaz Proportionnel, on peut synchroniser le débit d'air et celui du combustible. Cet appareil règle le débit du combustible de façon proportionnel à l'air de combustion. Ainsi, pour régler la température, il suffit tous simplement de jouer sur le clapet d'ouverture du volet d'air. A l'arrêt du brûleur, l'alimentation en combustible serait stoppé par l'électrovanne de sécurité.

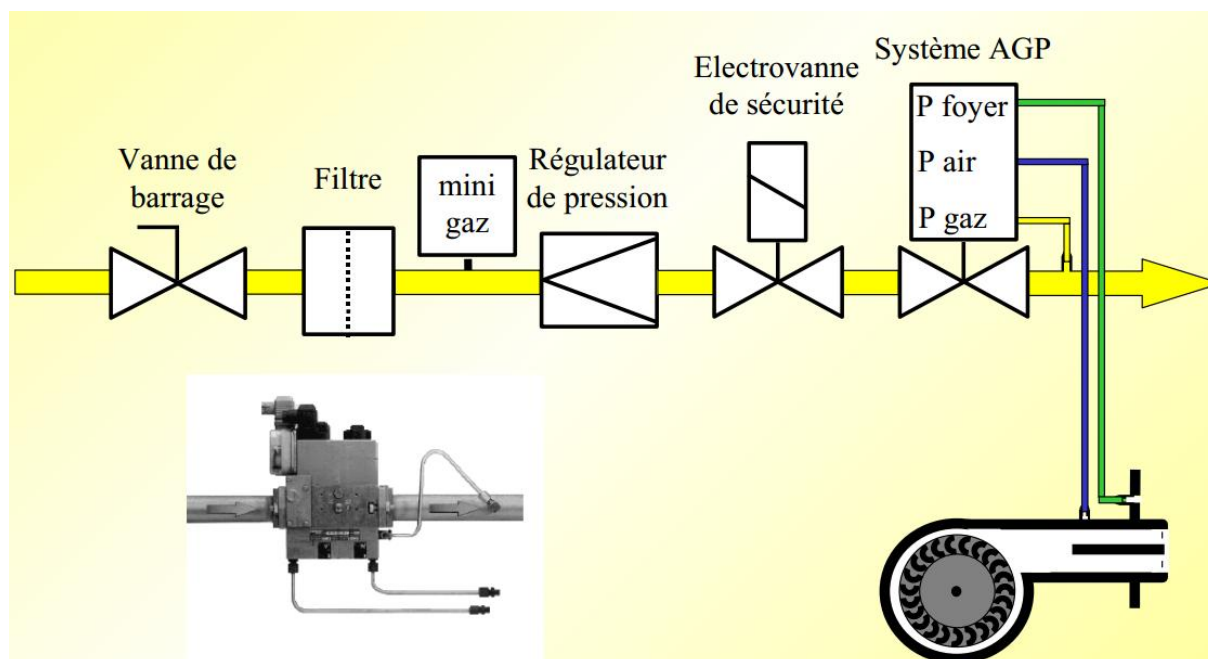


Figure 28° Installation du système AGP

II. Circuit électrique [10] [11] [17] [18]

Le circuit électrique comprend une partie très importante dans la mise en marche du four. Ici, presque tous les matériels nécessaires au fonctionnement du brûleur et du système de sécurité fonctionnent sous l'alimentation électrique. Dans cette partie, on va étudier le fonctionnement des différents circuits qui se trouvent dans l'installation.

1. Le coffret de sécurité

Dans le coffret de sécurité se trouve un automate qui sert à régulariser la température à l'intérieur du four en traitant les informations envoyées par les capteurs puis donnant des signaux de commande vers les actionneurs.

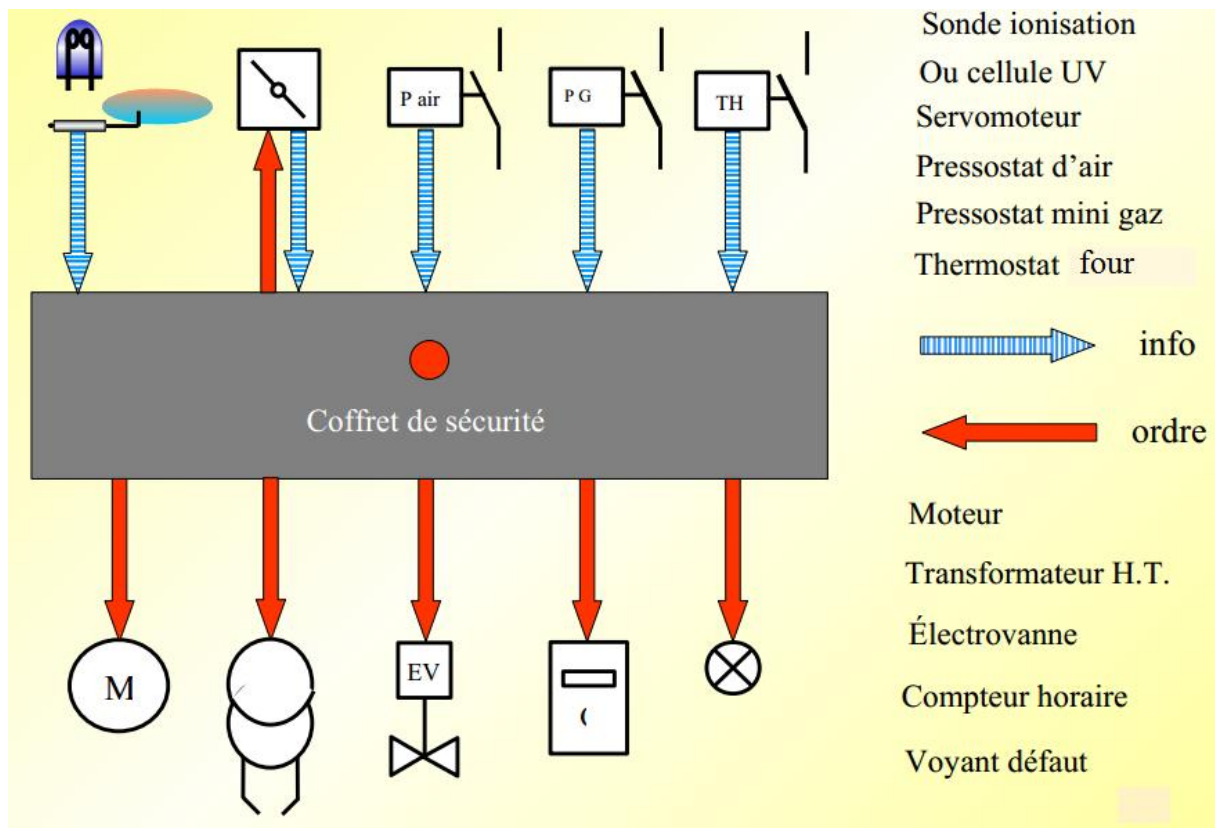


Figure 29° Coffret de sécurité du four

2. Circuits spécifiques de quelques équipements essentiel dans le four

Un bon fonctionnement nécessite une bonne installation. Chaque équipement électrique possède son branchement spécifique. Cette spécificité est fonction de son utilisation, du type de l'appareil, raison de sécurité etc. Voici quelques circuits de branchement utilisés dans notre four.

a) Sonde d'ionisation

La sonde d'ionisation est employée comme un détecteur de flamme. Dans une flamme, on y a présence des électrons libres. Si on met les deux électrodes dans une flamme sans aucun contact, on peut constater qu'il est possible de conduire du courant électrique avec. La flamme est donc un conducteur électrique. Avec cette propriété physique, on peut créer un petit capteur qui va signaler l'automate de la présence de flamme.

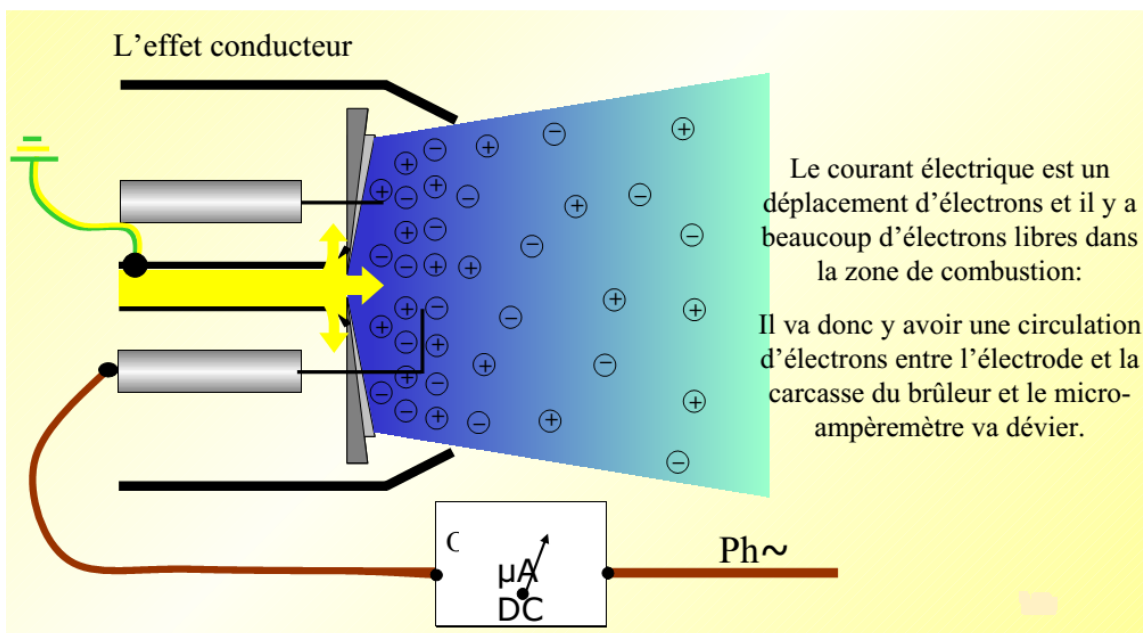


Figure 30° Sonde d'ionisation

Remarque :

Sur les brûleurs mixtes ou flamme bleue, la luminosité étant plus faible, on utilise la cellule UV ou tube de décharge pour détecter la présence de la flamme.

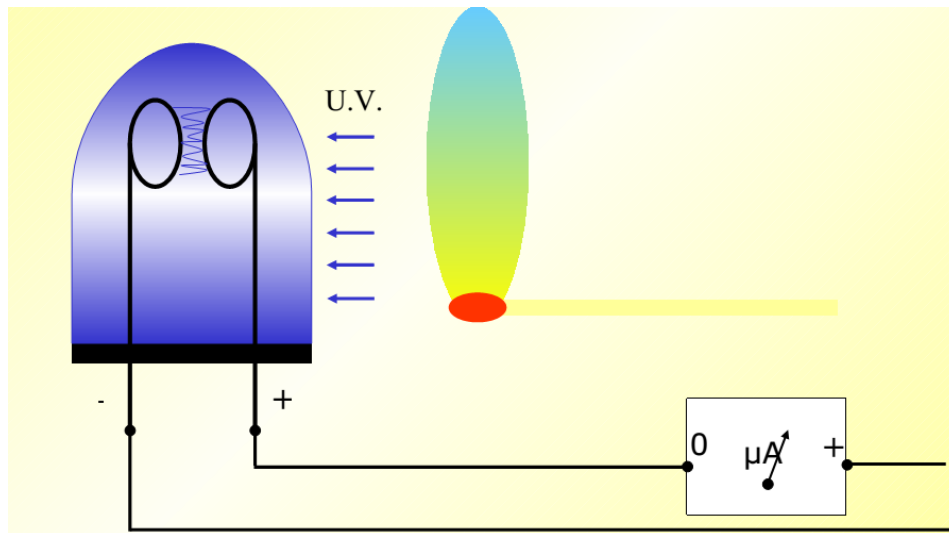


Figure 31° Cellule UV ou tube de décharge

b) Les électrodes de démarrage

Pour démarrer une flamme, il doit y avoir du combustible, du comburant et de la flamme ou étincelle. Pour un brûleur à gaz automatique, la production des étincelles est assurée par deux électrodes qui créent un arc électrique. En général, la formation des arcs électrique nécessite des tensions très élevés. Il nous faut donc une transformateur haute tension (THT) pour élever la tension ordinaire 220V. A la place des électrodes, on peut aussi employer une bougie d'allumage mais le principe reste toujours la même.

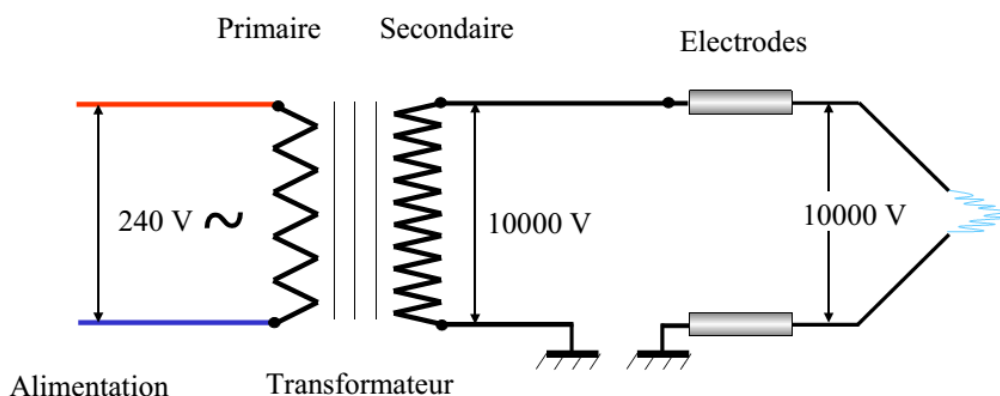


Figure 32° Circuit de branchement des électrodes de démarrage

c) Moteur électrique

Dans la conception de notre four, nous avons fait le choix d'utiliser un moteur asynchrone monophasé. Selon les principes courant utilisés en électricité, le branchement d'un moteur électrique monophasé se fait comme suit :

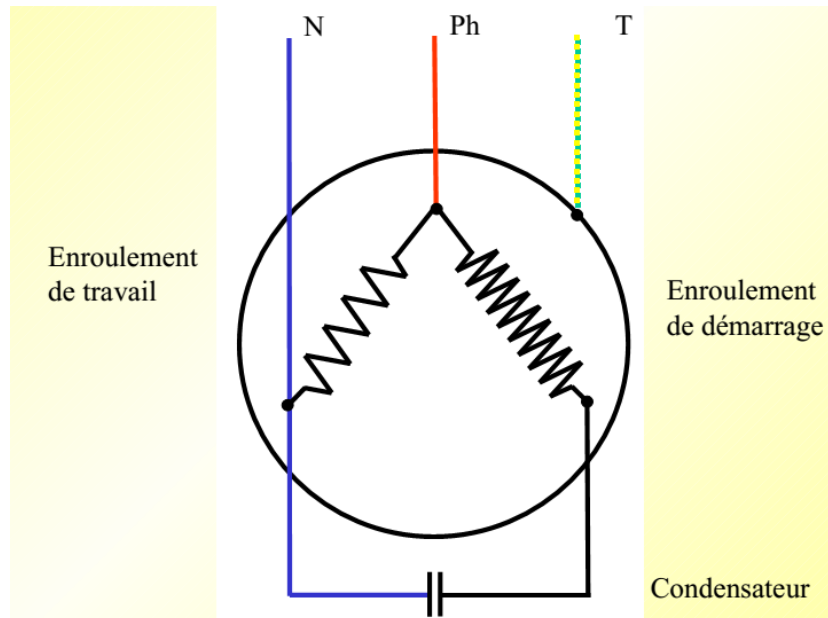


Figure 33° Moteur asynchrone monophasé

Remarque :

Un servomoteur est un moteur électrique qui peut marcher en va et vient. Sa principale caractéristique est sa rotation avec précision. Dans notre étude, on utilise un servomoteur pour régler la position d'ouverture du clapet gaz.



Figure 34° Servomoteur

Son branchement se fait alors comme suit :

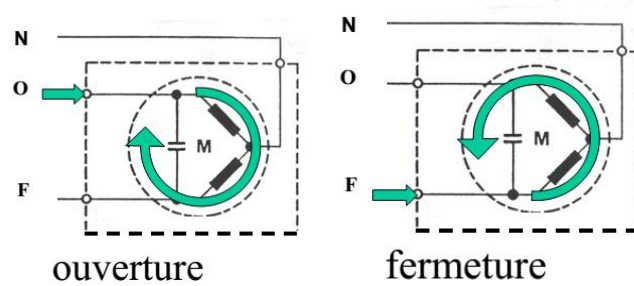


Figure 35° Sens de rotation du servomoteur

Chapitre 3 BILAN THERMIQUE [4] [19] [20] [21]

Dans toutes les applications, la chaleur des fours, des sécheurs et des fours de cuisson sont produite par la combustion ou par l'électricité. Cette chaleur est ensuite transmise au produit pour qu'il réponde aux exigences préalablement spécifiés. Il peut s'agir du chauffage du métal à une température précise, de la fusion complète du métal sans surchauffage, de l'évaporation de l'eau pour obtenir un séchage à pourcentage spécifié, ou du frittage complet des céramiques. Dans cette partie, on va faire des études analytiques des phénomènes de transfère de chaleur dans le four.

I. Débit calorifique produite par le combustible

Dans un four à gaz, l'énergétique calorifique utile pour la cuisson est engendrée par la réaction de combustion. La quantité de combustible requise pour générer une quantité précise de chaleur est fonction directe du pouvoir calorifique du combustible. La valeur calorifique est égale à la quantité de chaleur émise lorsqu'une quantité fixe de combustible est complètement brûlé. Ainsi, nous avons

$$\text{débit calorifique}_{total} = \text{consommation}_{en\ combustible} \times \text{valeur calorifique}_{combustible}$$

C'est-à-dire

$$Q_1 = m_{combustible} \times PCI \quad (1)$$

II. Energie utile pour la cuisson de la charge

L'énergie utile correspond à celle réellement absorbée par la charge. Ainsi,

$$Q_2 = m_{charge\ sec} C_{psec} (T_{max} - T_a) + m_e \times Lv + Q_r \quad (2)$$

Dans cette expression, le premier terme représente la chaleur sensible reçue par le matériau sec, le deuxième correspond à la chaleur latente de l'eau contenue dans le matériau tandis que le troisième est l'énergie totale de cristallisation.

$$Q_r = \frac{Hr \times m_{charge\ sec}}{M_{charge}} \quad (3)$$

Où

Hr est l'énergie de cristallisation d'une mole de charge [J/mole]

M_{charge} : Masse molaire de la charge [Kg/mole]

$m_{charge\ sec}$: Masse de la charge sèche [Kg]

$C_{p_{sec}}$: Chaleur massique moyenne du matériau sec [J/(kg K)]

m_e : Masse d'eau [Kg]

Lv : Chaleur latente de vaporisation de l'eau [J/kg]

T_{max} : Température maximum [K]

T_{ch} : Température initiale de la charge [K]

$$Q_2 = m_{charge\ sec} C_{p_{sec}} (T_{max} - T_{ch}) + m_e \times Lv + \frac{Hr \times m_{charge\ sec}}{M_{charge}} \quad (4)$$

III. Calcul de la charge thermique perdue par les parois

Par définition, l'énergie calorifique perdue par les parois est

$$Q_3 = S \times \tau \times \Phi \quad (5)$$

Φ désigne le flux de chaleur qui traverse les parois

τ : temps

S : surface d'échange, c'est-à-dire la moyenne géométrique entre la surface intérieure et extérieure.

$$S = \sqrt{S_{int} \times S_{ext}} \quad (6)$$

1. Loi de FOURIER

Selon FOURIER, si on a un transfert de chaleur monodirectionnel en régime permanent,

$$\Delta T = (T_2 - T_1) = R_{th} \times \Phi \quad (7)$$

$$Q_3 = S \times \tau \frac{(T_2 - T_1)}{R_{th}} \quad (8)$$

2. Résistance thermique des parois

Pour un système formé par l'association des murs accolés échangeant de température avec deux fluides, on a :

$$R_T = \sum_{i=1}^N \frac{e_i}{\lambda_i S} + \frac{1}{h_i S} + \frac{1}{h_e S} = \sum_{i=1}^N R_i \quad (9)$$

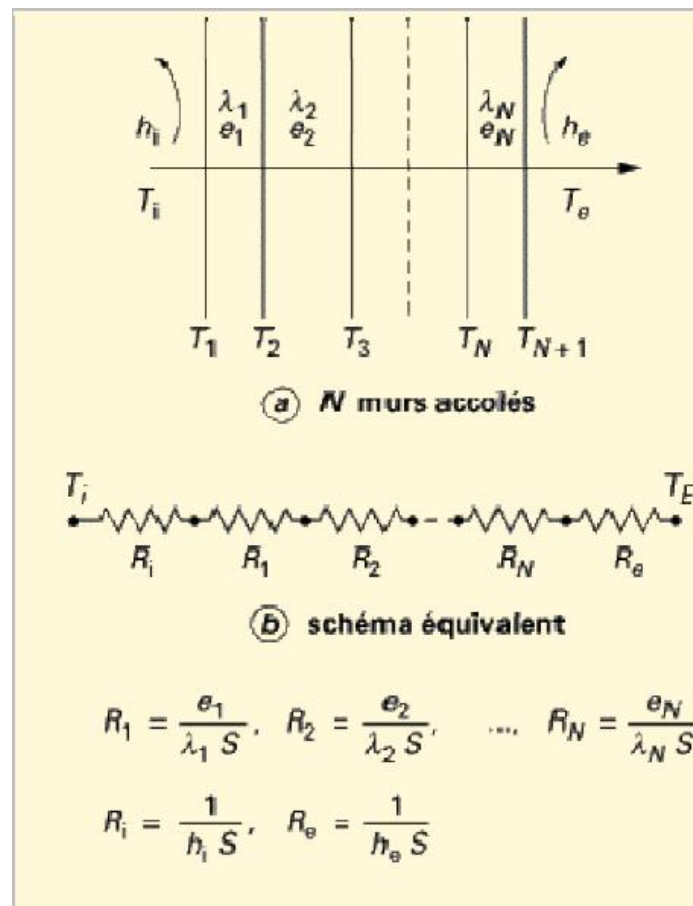


Figure 36° représentation schématique des résistances thermique

Pour l'isolation thermique de notre four, il existe trois couches d'isolant, mais le dernier est une tôle métallique d'épaisseur faible et de conductivité thermique élevée. On peut écrire donc

$$R_{th} = \frac{e_1}{S \times \lambda_1} + \frac{e_2}{S \times \lambda_2} + \frac{1}{S \times h_i} + \frac{1}{S \times h_e} \quad (10)$$

Avec

R_{th} : Résistance thermique [W⁻¹.K]

e : épaisseur [m]

h : coefficient d'échange de chaleur par convection [W.m⁻². K⁻¹]

S : surface d'échange de chaleur [m²]

λ : conductivité thermique [W.m⁻¹. K⁻¹]

Φ : flux de chaleur [W]

3. Calcul du coefficient de transfert thermique

a) A l'extérieur du four

Pour le calcul du coefficient de transfert de chaleur à l'extérieur du four, où il y a présence de la convection et de rayonnement, on peut calculer le coefficient de transmission thermique par la formule de Hottel et Woertz :

$$h_e = 5.67 + 3.86V_v \quad (11)$$

Avec

h_e : coefficient de transfert thermique à l'extérieur du four [W.m⁻². K⁻¹]

V_v : vitesse du vent [m/s]

b) A l'intérieur du four

A l'intérieur d'un four, les trois modes de transmissions de chaleur interviennent simultanément. Le coefficient de transfert thermique à l'intérieur du four qui est désigné par h_i est alors obtenu par la somme :

$$h_i = h_{conv} + h_r + h_{cond} \quad (12)$$

h_{conv} : coefficient d'échange de chaleur par convection

h_r : coefficient d'échange de chaleur par rayonnement

h_{cond} : coefficient d'échange de chaleur par conduction

i. Coefficient d'échange de chaleur par convection

Le problème majeur à résoudre avant le calcul du flux de chaleur consiste à déterminer le coefficient h qui dépend d'un nombre important de paramètres : caractéristiques du fluide, de l'écoulement, de la température, de la forme de la surface d'échange,...

On trouvera dans le tableau ci-après l'ordre de grandeur du coefficient de transfert de chaleur par convection pour différentes configurations.

Tableau 5° Coefficient de transfert de chaleur par convection

Configuration	h ($\text{Wm}^{-2} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$)
Convection naturelle	4,5
• Plaque verticale de hauteur 0,3 m dans l'air	6,5
• Cylindre horizontal de diamètre 5 cm dans l'air	890
• Cylindre horizontal de diamètre 2 cm dans l'eau	
Convection forcée	12
• Courant d'air à 2 m/s sur une plaque carrée de 2 m de côté	75
• Courant d'air à 35 m/s sur une plaque carrée de 0,75 m de côté	3500
• Eau à 0,5 kg/s dans un tube de diamètre 2,5 cm	

Courant d'air à 50 m/s perpendiculaire à un tube de diamètre 5 cm	180
Ebullition de l'eau • Dans un récipient • En écoulement dans un tube	2500-35000 5000-100000
Condensation de l'eau sous 1 atm • Sur une surface verticale • A l'extérieur de tubes horizontaux	1000-11000 10000-25000

ii. Coefficient d'échange de chaleur par rayonnement

Le coefficient de transmission thermique par rayonnement est obtenu par la relation suivante :

$$h_r = \pi \sigma \times \Psi \times 10^8 \quad (13)$$

Ici, σ représente la Constante de Stefan Boltzmann qui est égale à $4.91 \cdot 10^{-8}$ [kcal/m².h.K⁴],
 Ψ un Coefficient dépendante de la température. Ce coefficient est défini comme suit :

$$\Psi = \frac{(T_1 + 274)^4 + (T_2 + 273)^4}{(T_1 - T_2)} \times 10^{-8} \quad (14)$$

T_1 : Température intérieur du four

T_2 : Température de la paroi intérieure du four

iii. Coefficient d'échange de chaleur par conduction

Dans le calcul du coefficient de transfert thermique par conduction est obtenu par la formule :

$$h_{cond} = \frac{e}{\lambda} \quad (15)$$

4. La chaleur totale perdue par les parois

Au début, on a déjà donné par hypothèse la valeur de la température de la surface interne de la paroi du four. Pour calculer la charge calorifique due aux parois, il nous reste donc qu'à appliquer la formule :

$$Q_3 = \frac{\tau \times S^2 (T_{int} - T_a)}{\left(\frac{e_1}{\lambda_1} + \frac{e_2}{\lambda_2} + \frac{1}{(5.67 + 3.86V_v)}\right)} \quad (16)$$

IV. Energie emmagasinée dans la masse du four

Cette quantité de chaleur est celle qui est restituée par le four à l'arrêt du chauffage. Dans la conception de notre four, nous avons utilisé trois couches de matériaux différents pour servir d'isolant thermique. Pour la dernière couche, il s'agit d'une tôle métallique dont la diffusivité thermique est très élevée et d'épaisseur très faible. Ainsi, la chaleur emmagasinée dans ce matériau est donc très faible. Il nous reste donc qu'à déterminer celles qui sont accumulées par les deux autres couches.

1. Energie stocké dans la paroi intérieure

Dans un matériau homogène en régime permanent, la courbe de variation de température est linéaire. Nous pouvons dire donc que cette distribution de température suit une droite d'équation :

$$T = ax + b \quad (17)$$

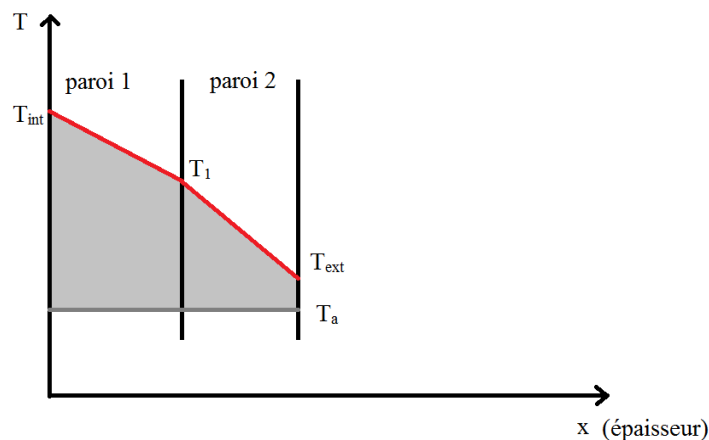


Figure 37° variations de température à travers deux parois

On peut déterminer les valeurs a et b par les conditions aux limites :

- A l'intérieur du four, c'est-à-dire $x=0$, la température est égale à T_{int} ;
- Pour $x=e_1$, $T=T_1$.

Ainsi, nous pouvons en déduire les deux valeurs :

$$b = T_{int} \quad (18)$$

$$a = \frac{T_1 + T_{int}}{e_1} \quad (19)$$

D'où l'équation :

$$T = \frac{T_1 + T_{int}}{e_1} x + T_{int} \quad (20)$$

Cette équation nous donne les valeurs maximales de la température à l'intérieur de la paroi interne.

Par définition, la quantité chaleur emmagasinée dans un matériau est donnée par la relation :

$$Q = C \int dm \int dT \quad (21)$$

Pour le cas de la paroi interne du four, la quantité de chaleur maximale absorbée par cette paroi est :

$$Q_1 = \rho_1 S C_1 \int_0^{e_1} dx \int_{T_a}^{\frac{T_1 - T_{int}}{e_1} x + T_{int}} dT \quad (22)$$

$$Q_{int} = \rho_1 S C_1 e_1 \left(\frac{T_{int}}{2} + \frac{T_1}{2} - T_a \right) \quad (23)$$

ρ_1 : masse volumique de la paroi interne

T_{int} : température de la surface interne de la paroi

S : surface d'échange

T_a : température initiale (avant la cuisson)

C_1 : capacité calorifique du matériau

T_1 : température de la surface de contact entre la paroi interne et la deuxième

e_1 : épaisseur de la paroi

La valeur de la température T_1 est déterminée par la formule de conduction de Fourier en régime permanent :

$$T_2 - T_1 = R_{th} \phi \quad (24)$$

Nous avons alors

$$T_{int} - T_1 = \frac{e_1}{s\lambda_1} \phi \text{ pour la paroi interne et} \quad (25)$$

$$T_1 - T_{ext} = \frac{e_2}{s\lambda_2} \phi \text{ pour la deuxième couche} \quad (26)$$

$$T_{ext} - T_a = \frac{1}{sh_e} \phi \text{ pour la surface extérieure} \quad (27)$$

D'où

$$T_{ext} = \frac{T_{int} + T_a h_e \times (\frac{e_1}{\lambda_1} + \frac{e_2}{\lambda_2})}{1 + h_e \times (\frac{e_1}{\lambda_1} + \frac{e_2}{\lambda_2})} \quad (28)$$

$$T_1 = \frac{T_{int} + T_{ext} \times \frac{e_1 \lambda_2}{\lambda_1 e_2}}{1 + \frac{e_1 \lambda_2}{\lambda_1 e_2}} \quad (29)$$

2. Energie stocké dans la deuxième paroi

Pour trouver la quantité de chaleur restitué par la deuxième paroi, on effectue le même raisonnement qu'avant :

$$Q_{2nd} = \rho_2 S C_2 e_2 \left(\frac{T_1}{2} + \frac{T_{ext}}{2} - T_a \right) \quad (30)$$

3. Energie total stocké dans tous les parois du four

Cette valeur est égale à la somme de tous les quantités de chaleurs emmagasinées dans toutes les isolations thermiques du four.

$$Q_4 = Q_{int} + Q_{2nd} \quad (31)$$

Soit :

$$Q_4 = \rho_1 S C_1 e_1 \left(\frac{T_{int}}{2} + \frac{T_{int} + T_{ext} \times \frac{e_1 \lambda_2}{\lambda_1 e_2}}{2 \times (1 + \frac{e_1 \lambda_2}{\lambda_1 e_2})} - T_a \right) + \rho_2 S C_2 e_2 \left(\frac{T_{int} + T_{ext} \times \frac{e_1 \lambda_2}{\lambda_1 e_2}}{2 \times (1 + \frac{e_1 \lambda_2}{\lambda_1 e_2})} + \frac{T_{ext}}{2} - T_a \right) \quad (32)$$

V. Perte de chaleur par les fumés et l'excès d'air

La plus grande source de perte de chaleur dans un four à combustible est habituellement la chaleur de gaz de combustion s'échappant du four. En générale, la quantité de chaleur perdue lors de l'évacuation des gaz vers la cheminé est :

$$Q = C \times m_{gaz} \times (T_{sorti} - T_{entré}) \quad (33)$$

Cette perte de chaleur comprend deux éléments principaux : la chaleur dans le gaz produit de combustion et celle contenue dans l'excès d'air. Nous avons alors :

$$Q_5 = Q_{fumé} + Q_{excès d'air} \quad (34)$$

Quand on brule dans l'air de l'hydrocarbure insaturé, et que si la combustion est complète, les produits de combustion sont seulement formé par du CO₂, N₂ et de la vapeur d'eau. Dans la conception de notre four, nous avons utilisé le propane comme combustible, alors on peut écrire :

$$Q_{fumé} = Q_{CO_2} + Q_{H_2O} + Q_{N_2} \quad (35)$$

Pour déterminer chacun de ses composants, nous avons :

$$Q_{CO_2} = C_{CO_2} \times 3 \times m_{comb} \times (T_{sorti} - T_a) \quad (36)$$

$$Q_{N_2} = C_{N_2} \times 13,65 \times m_{comb} \times (T_{sorti} - T_a) \quad (37)$$

$$Q_{H_2O} = C_{H_2O} \times 1,63 \times m_{comb} \times (T_{sorti} - T_a) \quad (38)$$

Si on considère que l'air de combustion est sec, alors Q_{H_2O} devient :

$$Q_{H_2O} = C_{H_2O} \times (1,63 \times m_{comb}) \times (T_{sorti} - T_a) \quad (39)$$

La détermination de la chaleur perdue par excès d'air se fait comme suit :

- On détermine tout d'abord la masse d'air stœchiométrique utile pour assurer la combustion total du combustible. Cette quantité est calculée à partir de cette équation :

$$m_{air\ stoechiométrique} = 17,29 \times m_{comb} \quad (40)$$

- Puis, on calcule la quantité totale d'air avec l'équation :

$$m_{air\ total} = m_{air\ stoechiométrique} \times \left(1 + \frac{excès\ d'air}{100}\right) \quad (41)$$

- Et en fin, on applique la formule qui est déjà donné auparavant :

$$Q_{excès\ d'air} = C_{air} \times m_{air\ total} \times (T_{sorti} - T_a) \quad (42)$$

Finalement, la quantité totale d'énergie perdue lors de l'évacuation des fumés est :

$$Q_5 = [3C_{CO_2} + 13,65C_{N_2} + 1,63C_{H_2O} + 17,29C_{air}\left(1 + \frac{excès\ d'air}{100}\right)]m_{comb}(T_{sorti} - T_a) \quad (43)$$

VI. Bilan calorifique et détermination du débit de combustible

La chaleur transmise par le combustible se transforme en chaleur utile au produit et pertes de chaleur dans l'environnement.

Chaleur transmise par le combustible = chaleur utile au produit + perte de chaleur

$$Q_1 = Q_2 + Q_3 + Q_4 + Q_5 \quad (44)$$

Nous pouvons en déduire alors la consommation d'énergie quantité de combustible à injecté dans les brûleurs pendant un période de chauffage τ :

$$m_{comb} = \frac{Q_2 + Q_3 + Q_4}{PCI - [3C_{CO_2} + 13,65C_{N_2} + 1,63C_{H_2O} + 17,29C_{air}\left(1 + \frac{excès\ d'air}{100}\right)](T_{sorti} - T_a)} \quad (45)$$

Chapitre 4 ESSAI DE FABRICATION DES MATERIAUX DE REVETEMENT DE NOTRE FOUR

I. Essai de fabrication de l'isolant thermique à base de cendre des balles de riz

La base de ce travail est de faire des recherches afin de trouver un matériau convenable aux critères de notre four pour lui servir d'isolant thermique. Les critères de sélection de ces matériaux sont :

- ✿ Sa résistance thermique,
- ✿ Sa résistance pyroscopique,
- ✿ Sa résistance mécanique,
- ✿ Sa disponibilité à Madagascar,
- ✿ Son coût.

Après avoir lu des études réalisées par d'autres chercheurs sur les caractéristiques de la cendre des balles de riz, nous sommes convaincues de l'utiliser pour fabriquer l'isolant thermique de notre four. Afin de lui donner de la résistance mécanique, nous avons décidé d'employer le silicate de soude comme liant minéral. Durant la préparation du liant, nous avons pris aussi cette cendre comme source de silice. Ces cendres sont tous broyées et tamisées à un tamis de 0,4mm avant d'être employées.

1- Cendre des balles de riz

Selon les estimations bibliographiques, pour une tonne de riz produit, la combustion complète des balles de paddy donne environ 40 Kg de cendres. Dans le contexte malgache nous produisons par an environ 4.000.000 de tonnes de paddy, donc théoriquement on peut obtenir 160.000 tonnes de cendres de balle de riz. Nous tenons à signaler que les balles de riz sont des déchets agricoles qui se trouvent en grande quantité à Madagascar et en particulier à Ambatondrazaka et à Marovoay Mahajanga. Par calcination des balles de riz, on obtient une cendre grisâtre qui est un produit particulièrement riche en silice de l'ordre de 85 % et on

constate que c'est une excellente pouzzolane. Le tableau suivant montre la composition chimique de la cendre des balles de riz :

Tableau 6° Composition chimique de la cendre des balles de riz

Elément	Pourcentage en masse dans la cendre
SiO ₂	84 %
Al ₂ O ₃	0,56 %
Fe ₂ O ₃	0,36 %
Na ₂ O	4.10 ⁻⁴ %
K ₂ O	34. 10 ⁻⁴ %
CaO et MgO	-

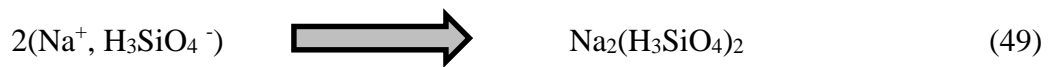
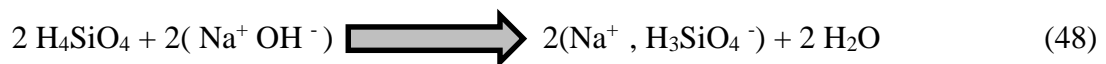
Pour conclure, on peut dire que les cendres de balles de riz sont disponibles localement, riches en silice, et presque gratuit.

2- Préparation du silicate de soude

La synthèse du silicate de soude se fait par la réaction de la soude avec de la silice amorphe, ou plus précisément on fait rendre soluble la silice amorphe en milieu basique à basse température (de l'ordre de 100°C), voire même à température ambiante. Les matières premières pour la fabrication du silicate de soude sont : la soude, les cendres de balle de riz et l'eau. On définit le module silice-oxyde de diazote noté R_m par le rapport entre le nombre de mole de SiO₂ et Na₂O.

$$R_m = \frac{nSiO_2}{nNa_2O} \quad (46)$$

Pour, $R_m > 1$, nous avons un module acide, et pour $R_m \leq 1$, on a un module basique. La réaction chimique de la synthèse du silicate de soude est la suivante :



Le silicate de soude dont sa formule chimique est de : $\text{Na}_2(\text{H}_3\text{SiO}_4)_2$. Pour avoir une mole de Na_2O il faut utiliser deux moles de NaOH .

a) Dosage en silice et en soude

Pendant notre étude, nous avons effectué des essais préliminaires en utilisant les deux modules de silicate de soude (l'un module acide $R_m > 1$ et l'autre module basique $R_m \leq 1$).

Les éprouvettes fabriquées à partir du module basique ne sont pas concluantes, car elles sont très corrosives, molles, et difficile à sécher. A ce titre nous avons effectué deux essais dont les modules sont respectivement : 4 et 2,5. Pour un poids total de 60 g de matières premières à chaque essai, les proportions de silice et de soude utilisés sont données dans le tableau suivant :

Tableau 7° Proportions de silice et de soude utilisés pour la fabrication du silicate de soude

Essai	1	2
Module R_m	2,5	4
n_{silice} [mole]	0,67	0,77
n_{NaOH} [mole]	0,47	0,325
masse total sec [g]	60	60

Avec n_{Cendre} = nombre de mole de silice

n_{NaOH} = nombre de mole de soude

b) Quantités d'eaux utilisées

D'après l'équation billant ci-dessus, on utilise de l'eau pour transformer le SiO_2 en H_4SiO_4 . En pratique aussi, il faut ajouter de l'eau dans la soude pour la mettre en solution et faciliter la mise en œuvre. Pendant la réalisation, nous avons effectué quelques essais afin de déterminer la quantité d'eau optimum pour chaque dosage (dosage en silice-soude) en fonction de la quantité de silice. Cette recherche se traduit par l'emploi de la masse d'eau théorique pour la transformation du SiO_2 , puis en augmentant progressivement cette valeur jusqu'à l'obtention du meilleur résultat.

Tableau 8° Recherche de quantités d'eau employé pour chaque module

module	quantité d'eau théorique	1 ^{ère} essai	2 ^{ème} essai	3 ^{ème} essai	4 ^{ème} essai
2,5	41	51,25	61,5	82	102,5
4	47	58,75	70,5	94	117,5
coef	1	1,25	1,5	2	2,125

Après quatre essais de changement du coefficient multiplicateur des quantités théorique d'eau, nous avons parvenu à déterminer par expérience les volumes d'eau nécessaire pour chaque module. Ces valeurs sont données sur le tableau ci-dessus dans les dernières colonnes à droite. Au-delà de ce coefficient, la mise en œuvre des silicates de soude deviennent difficile.

3- Dosage en cendre et en silicate de soude

Pendant la fabrication de l'isolant thermique, nous avons ajouté du sable et de la cendre des balles de riz dans le silicate de soude étant préalablement préparé. Le mélangeage se fait par ajout progressive de ces deux matières premières en faisant le malaxage jusqu'à l'obtention d'une uniformité de couleur.

Le tableau suivant résume les quantités de cendre des balles de riz et de sable utilisé pendant toutes les essais que nous avons effectué.

Tableau 9° Proportion massique des mélanges pour les fabrications d'isolants

essai	Rm	silicate de soude	cendre des balles de riz	sable
N°1	2,5	25	55	20
N°2	4	25	55	20

II. Assai de fabrication du matériau réfractaire

Dans ce paragraphe, on va vous montrer les processus des essais de fabrication de matériau réfractaire que nous avons faits. On rappelle qu'un matériau réfractaire est matériau capable de garder ses résistances physiques même à des températures très élevé.

1- Choix des matériaux

Cette partie de l'opération est une étape délicate parce qu'il faut utiliser des matériaux qui respecte les conditions nécessaires pour la fabrication des réfractaires mais il faut aussi tenir compte son coût. Les critères de sélection de ces matériaux sont donc pareils à celui dans la partie précédente. Dans la partie bibliographique, nous avons vu que pour fabriquer un matériau résistant à haute température, il nous faut des matières premières riche en alumine et en silice. Pour se faire nous avons fait le choix d'utilisé le cendre des balles de riz et le métakaolin. Ces deux matières ont respectivement une haute teneur en silice et en alumine. De plus, ils sont disponible localement et ont des faibles coûts.

2- Préparation des matières premières

Avant d'entamé la mise en œuvre, chaque matières premières doivent passer par des prétraitements spécifiques. Ces prétraitements ont pour but d'obtenir un meilleur résultat et de facilité la mise en œuvre du matériau.

a) Cendre des balles de riz

Après avoir calciné à une température inférieure à 600°C, les balles de riz passent ensuite à une opération de broyage afin d'avoir une granularité très fine. A la fin du broyage, les cendres de balles de riz ne sont pas encore prêtent mais ils doivent encore passés au processus de tamisage pour enlever les impuretés et les surcuits. Pendant la réalisation de notre travail, nous avons décidé d'utilisé un tamis de 0,4mm.

b) Le métakaolin

Le kaolin que nous avons utilisé durant notre étude a été acheté au près d'un fournisseur appelé PROCHIMAD. Là, nous avons décidé de prendre le matériau de classement granulométrique 40µm.

Avant de procéder au malaxage des matières premières, il est nécessaire de transformer l'argile kaolinitique en métakaolin ($\text{Si}_2\text{O}_5\text{Al}_2\text{O}_2$) par cuisson dans un four à 750°C pendant 1h30 puis on le laisse refroidir.

La composition minéralogique du kaolin de la société PROCHIMAD est donnée par le tableau qui suit :

Tableau 10° Composition minéralogique du kaolin du PROCHIMAD

SiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	TiO_2	CaO	MgO	Na_2O	K_2O	MrO	SO_2	P_2O_2	Cr_2O_2	PF
50,62	32,30	1,95	0,72	0,44	0,03	0,14	0,15	0,05	0,03	0,02	0,05	12,50

3- Mise en œuvre

Après avoir passé par des prétraitements préliminaires, les matières premières passent ensuite dans l'opération de mise en œuvre du réfractaire. Dans cette partie-là, ils sont mélangés avec de l'eau et malaxé jusqu'à l'obtention d'une pâte homogène. Puis, on fait le moulage et on les laisse sécher à l'air libre pendant une durée de 7 jours environs. Durant tous les essais, nous avons fait des moulages à compression à 3150Kg/cm^2 . Après des périodes de séchage de 7 jours à l'air libre et 24h dans l'étuve, les futurs réfractaires passent ensuite dans un four pour être chauffé à 1000°C pendant 6h.

Afin de trouver le meilleur résultat, nous avons effectués deux essais comportant les modules en silice-alumine précédentes : 2,5 et 4.

Tableau 11° Dosage en cendre de balle de riz et métakaolin pour chaque essai

essai	Rm	silicate de soude	cendre des balles de riz	Kaolin
N°1	2,5	20%	40%	40%
N°2	4	20%	40%	40%

LES RESULTATS

I. BILAN CALORIFIQUE

1- Energie utile

Dans la pratique, la quantité d'eau contenue dans la charge doit être minimale. Si la charge n'est pas suffisamment sèche avant de rentrer dans la cuisson, ce dernier finira par s'exploser dans le four. Dans la suite du calcul, on va alors négliger l'humidité de la charge.

$$Q_2 = m_{charge\ sec} C_{p_{sec}} (T_{max} - T_a) + m_e \times Lv + \frac{Hr \times m_{charge\ sec}}{M_{charge}} \quad (4)$$

Cette équation devient alors,

$$Q_2 = m_{charge\ sec} C_{p_{sec}} (T_{max} - T_a) + \frac{Hr \times m_{charge\ sec}}{M_{charge}} \quad (50)$$

Pour une charge de masse $m_{charge\ sec} = 95\text{Kg}$, de température initiale $T_a = 20^\circ\text{C}$, de chaleur massique $C_{p_{sec}} = 922\text{ J/(kg K)}$, d'énergie de cristallisation $Hr = 520 \times 10^3\text{ J/mole}$ et de masse molaire $M_{charge} = 300\text{ g}$ (produit à base d'argile) chauffé jusqu'à 1400°C , l'énergie utile sera :

$$Q_2 = 285[\text{MJ}]$$

2- Chaleur total perdue au niveau des parois

$$Q_3 = \frac{\tau \times S^2 (T_{int} - T_a)}{\left(\frac{e_1}{\lambda_1} + \frac{e_2}{\lambda_2} + \frac{1}{(5.67 + 3.86V_v)}\right)} \quad (16)$$

Pendant une durée $\tau = 12\text{h}$ donnée, la chaleur totale perdue au niveau des parois de surface total $S = 6,06\text{m}^2$, qui sont composés par deux murs accolés d'épaisseurs respectives $e_1 = 10\text{cm}$ et $e_2 = 15\text{cm}$ et de conductivités thermique respectives $\lambda_1 = 0,13$ et $\lambda_2 = 0,07$, ayant des différences de températures à l'intérieur (température de la face) et à l'extérieur (température du milieu : c'est-à-dire température de l'air) $T_{int} = 1400^\circ\text{C}$ et $T_a = 20^\circ\text{C}$, dans un endroit où règne un vent de vitesse $V_v = 0,5\text{m/s}$ est :

$$Q_3 = 700[\text{MJ}]$$

3- Energie stocké dans les parois du four

Il est calculé à partir de l'équation (32) :

$$Q_4 = \rho_1 S C_1 e_1 \left(\frac{T_{int}}{2} + \frac{T_{int} + T_{ext} \times \frac{e_1 \lambda_2}{\lambda_1 e_2}}{2 \times (1 + \frac{e_1 \lambda_2}{\lambda_1 e_2})} - T_a \right) + \rho_2 S C_2 e_2 \left(\frac{T_{int} + T_{ext} \times \frac{e_1 \lambda_2}{\lambda_1 e_2}}{2 \times (1 + \frac{e_1 \lambda_2}{\lambda_1 e_2})} + \frac{T_{ext}}{2} - T_a \right) \quad (32)$$

Si on a donc des parois accolés ayant des capacités calorifiques $C_1=845[\text{J}/(\text{kg.K})]$ et $C_2= 832 [\text{J}/(\text{kg.K})]$, des conductivités thermiques $\lambda_1= 0,5 [\text{W}/(\text{m.K})]$ et $\lambda_2=0,05 [\text{W}/(\text{m.K})]$, des masses volumiques $\rho_1= 750\text{Kg}/\text{m}^3$ et $\rho_2= 749\text{Kg}/\text{m}^3$, et des faces intérieure et extérieure portés à des températures $T_{int}=1400^\circ\text{C}$ et $T_{ext}= 20^\circ\text{C}$, le tous ayant aussi une température initiale $T_a= 20^\circ\text{C}=293 \text{ K}$ avant la mise en marche du four, l'Energie stocké serai :

$$Q_4 = 4568 [\text{MJ}]$$

4- Energie perdu par l'évacuation des fumées

$$Q_5 = [3C_{CO_2} + 13,65C_{N_2} + 1,63C_{H_2O} + 17,29C_{air}(1 + \frac{\text{excès d'air}}{100})]m_{comb}(T_{sorti} - T_a) \quad (43)$$

En appliquant cette formule avec les données que nous avons sues pendant l'étude bibliographique concernant les capacités calorifiques des gaz ($C_{CO_2}=841[\text{J.K}^{-1}.\text{Kg}^{-1}]$, $C_{H_2O}=2017[\text{J.K}^{-1}.\text{Kg}^{-1}]$, $C_{air}=780[\text{J.K}^{-1}.\text{Kg}^{-1}]$ et $C_{N_2} = 710[\text{J.K}^{-1}.\text{Kg}^{-1}]$), dans une combustion de propane avec excès d'air 7% où l'air entre à la température $T_a=293[^\circ\text{K}]$ et les fumés sortent à la température $T_{sorti}=873[^\circ\text{K}]$, on trouve :

$$Q_5=17[\text{MJ/Kg de combustible}]$$

5- Détermination de la masse de combustible

En utilisant la formule (1) :

$$Q_1 = m_{combustible} \times PCI \quad (1)$$

$$Q_1 = 50300000 \times m_{comb} \quad (51)$$

Par contre, on sait que la somme de toutes les énergies dépensées est égale à la chaleur fourni par le bruleur, c'est-à-dire :

$$Q_1 = Q_2 + Q_3 + Q_4 + Q_5 \quad (44)$$

Nous pouvons en déduire alors la masse de combustible utilisé :

$$m_{comb} = 167 [\text{Kg}]$$

6- Puissance des brûleurs

$$P = \frac{Q_1}{\tau \times nbr_{br\hat{u}l}} \quad (52)$$

Avec $nbr_{br\hat{u}l}$ (nombre de brûleur) égale à deux (2), on peut utiliser un brûleur de puissance nominale

$$P = 100 [\text{Kw}]$$

7- Quantité d'air nécessaire à la combustion

Selon l'équation bilant suivant, la quantité d'oxygène nécessaire à la combustion de 167Kg de propane est de 607,38Kg.



Pour une proportion en masse de 21% d'oxygène dans l'air, l'air théorique nécessaire à la combustion est donc 2892,28Kg.

Avec un excès d'air de 7%, la quantité d'air utilisé dans le four pendant 12h de marche est donc de 3094,74Kg. Soit un débit de 258 Kg/h.

8- Choix de la bouteille à gaz

Selon les calculs précédents, nous avons besoin de 167Kg de gaz pour une durée de 12h. Par contre, la cuisson des céramiques peut être allant jusqu'à 24 de marche. De plus, dans un laboratoire des matériaux, le four pourrait être utilisé pendant 2 fois par semaine, c'est-à-dire 48h par semaine.

Pour cette raison, nous avons décidé d'employer une citerne à gaz de capacité 500Kg.

Interprétations :

Presque la plus part de l'énergie consommé lors de mise en marche du four sont perdue aux niveaux des parois.

Si les matériaux de revêtement sont à faible masse volumique, l'énergie stockée dans les parois est minimisée. Donc, on aura une faible consommation d'énergie pendant le démarrage du four, ce qui entraîne l'augmentation de la vitesse de chauffage à l'intérieur du four. Cela diminue aussi les chaleurs perdues à travers les parois car l'air est un excellent isolant thermique.

L'énergie perdue par évacuation des fumées est minimisé quand l'air de combustion est préalablement chauffé.

II. RESULTATS SUR LA REALISATION DES MATERIAUX DE REVETEMENT

Tous les principes de détermination des résultats sur les essais de revêtement sont donnés à l'annexe 2. Pour mieux comprendre et interpréter les résultats, nous choisissons l'histogramme pour les présenter. Avant les essais, les échantillons des matériaux de revêtement ont subi une cuisson à 1000°C pendant 6h

1- Essais sur les isolants :

Voici les deux éprouvettes expérimentales que nous avons effectuées lors des essais de fabrication des isolants.

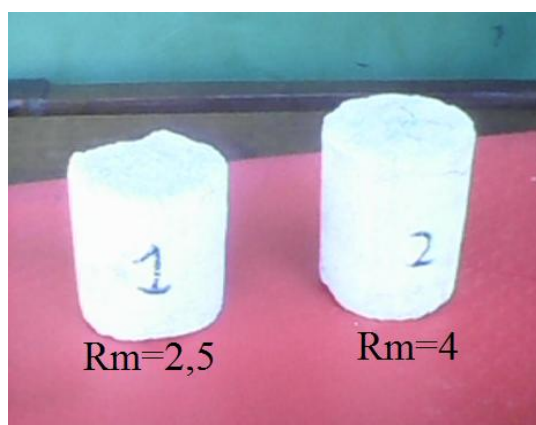


Figure 38 : Les deux éprouvettes isolantes

Les tableaux suivants résument les résultats des recherches sur les essais mécaniques des échantillons.

a) Essais mécaniques

Tableau 12 : résultats sur les essais mécaniques des isolants

Essai N°	1	2
Rm	2,5	4
Résistance à la compression [Kg.f/cm ²]	46,95	70,42
Contrainte de rupture à la traction [Kg.f/cm ²]	469,5	704,23
Contrainte de rupture au cisaillement [Kg.f/cm ²]	156,5	234,74

A partir de ce tableau ci-dessus, nous avons la figure suivante :

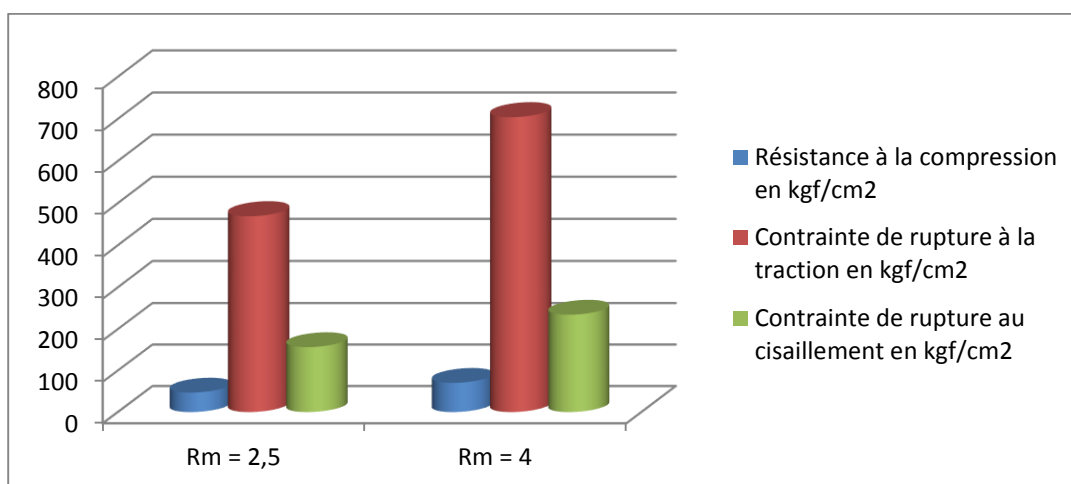


Figure 39 : Evolution des résistances mécaniques en fonction du rapport $n_{\text{silice}}/n_{\text{soude}}$

La figure 39, nous met en évidence qu'au fur et à mesure que le rapport R_m augmente, c'est-à-dire la quantité de silice augmente, les résistances mécaniques des éprouvettes augmentent également. Par exemple pour $R_m = 2,5$ la résistance est de 46,95 kgf/cm², par contre si $R_m = 4$, la résistance à la compression atteint 70,42 MPa, et ce gain de résistance est de l'ordre de 50%.

b) Essais physiques

Tableau 13° résultats sur les essais physiques des isolants

Essai N°	1	2
R_m	2,5	4
Densité apparente	0,71	0,82
Conductivité thermique à 200°C [W/m.°C]	0,11	0,07
Porosité %	67,2	70
Perte au feu %	20	23 ,2
Chaleur massique [J/(Kg.K)]	832	831
Résistance pyroscopique à 1000°C (comportement à 1000°C)	Assez bien	Assez bien

Ce tableau, nous permis d'avoir les figures ci-après

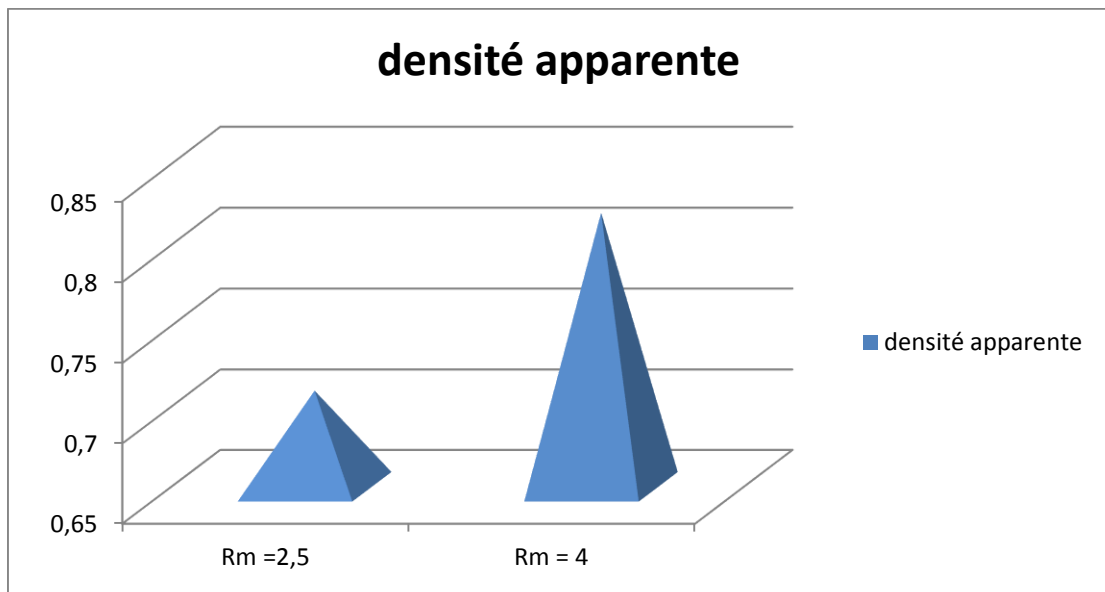


Figure 40 : Evolution de la densité apparente en fonction $n_{\text{silice}}/n_{\text{soude}}$

Cette figure nous montre que la densité apparente croît, si $n_{\text{silice}}/n_{\text{soude}}$ croît, c'est-à-dire que les masses des échantillons aux mêmes volumes augmentent si le taux de silice augmente.

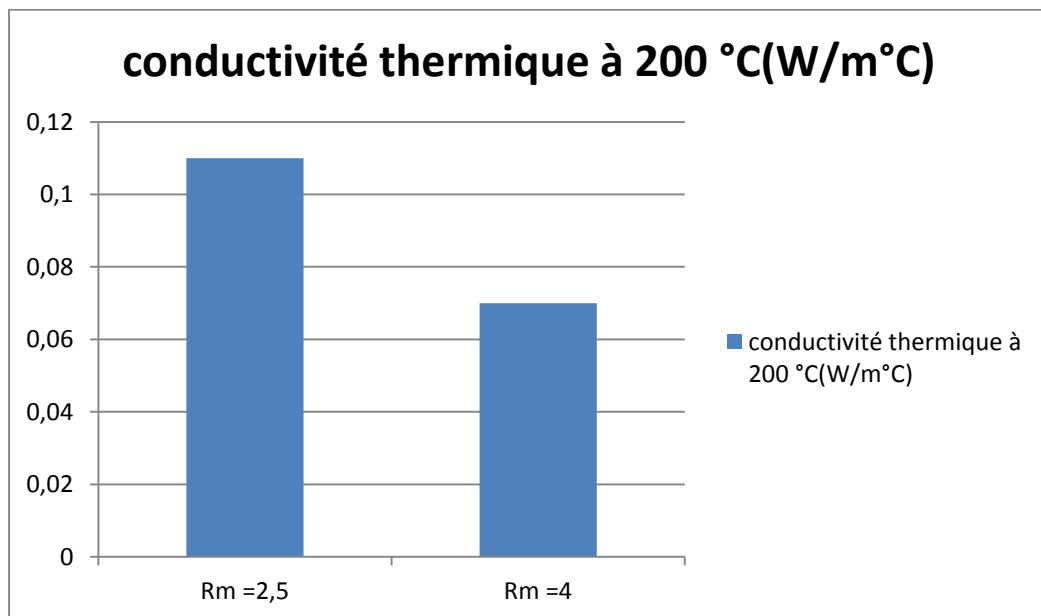


Figure 41 : Evolution de la conductivité thermique en fonction du $n_{\text{silice}}/n_{\text{soude}}$

Contraire aux résultats précédents, la conductivité thermique diminue largement si on augmente le taux de silice, cela veut dire que les éprouvettes sont devenues de plus en plus isolantes si le taux de silice croît.

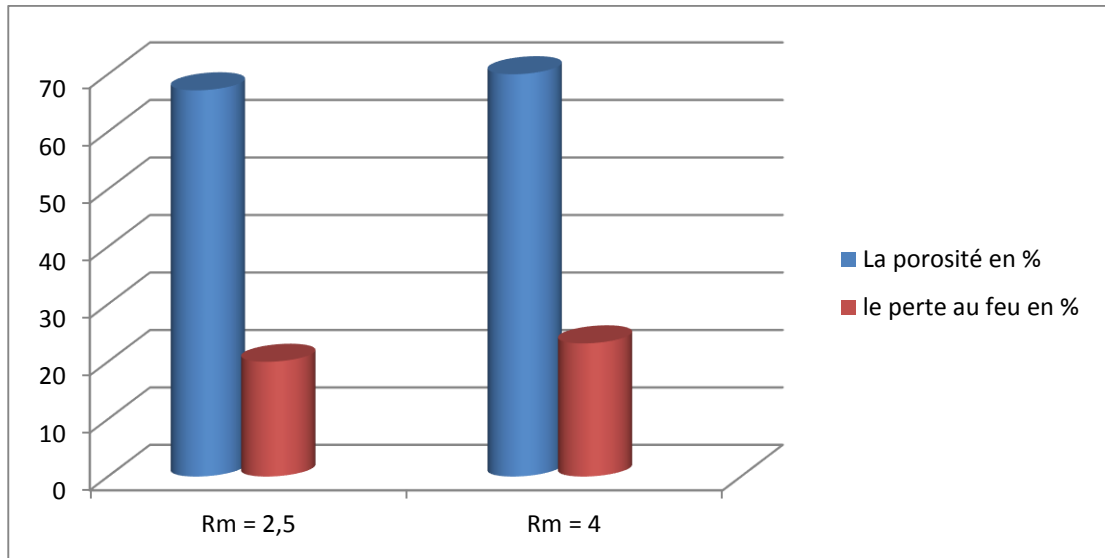


Figure 42 : Evolution de la porosité et la perte au feu en fonction du $n_{\text{silice}}/n_{\text{soude}}$

Cette figure X4 nous montre que si le taux de silice augmente, la porosité et la perte au feu augmente aussi mais faiblement. Concernant la perte au feu, c'est à cause de la combustion de la balle de riz qui est incomplète que la perte au feu augmente en fonction du taux de silice. Concernant la chaleur massique, elle est invariable si on varie le taux de silice.

2- Essais sur les éprouvettes réfractaires

Comme pour les essais des isolants, nous avons utilisés aussi le rapport $Rm = n_{\text{silice}}/n_{\text{soude}}$ qui est de 2,5 et 4, mais nous avons remplacé la moitié de la quantité de silice par du métakaolin. Voici les deux éprouvettes expérimentales des deux modules :

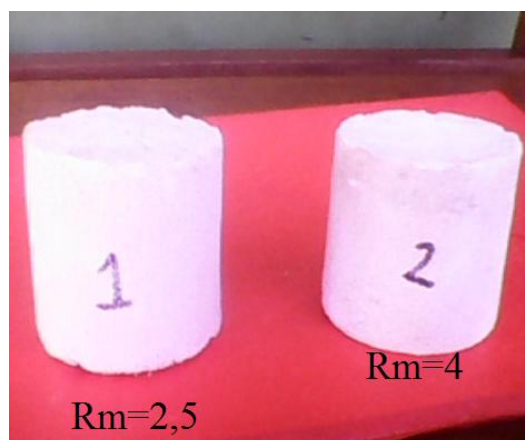


Figure 43 : Les deux éprouvettes réfractaires

Les tableaux suivants nous indiquent les résultats obtenus pendant les essais

a) Essais mécaniques

Tableau 14 : Résultats sur les essais mécaniques des éprouvettes réfractaires

Essai N°	1	2
Rm	2,5	4
Résistance à la compression [Kg.f/cm ²]	82,15	98,59
Contrainte de rupture à la traction [Kg.f/cm ²]	821,59	985,91
Contrainte de rupture au cisaillement [Kg.f/cm ²]	273,86	328,64

Un des objectifs de notre mémoire c'est de maîtriser la fabrication des isolants et réfractaires de notre four. Evidemment ce sont deux produits distincts, avec des matières premières différentes, donc des éprouvettes à caractéristiques différents, ce qui implique à des usages spécifiques.

Pour mieux comprendre nos résultats, nous comparons, les résistances mécaniques notamment les résistances à la compression des éprouvettes isolantes et les éprouvettes réfractaires dans une même figure qui est la suivante

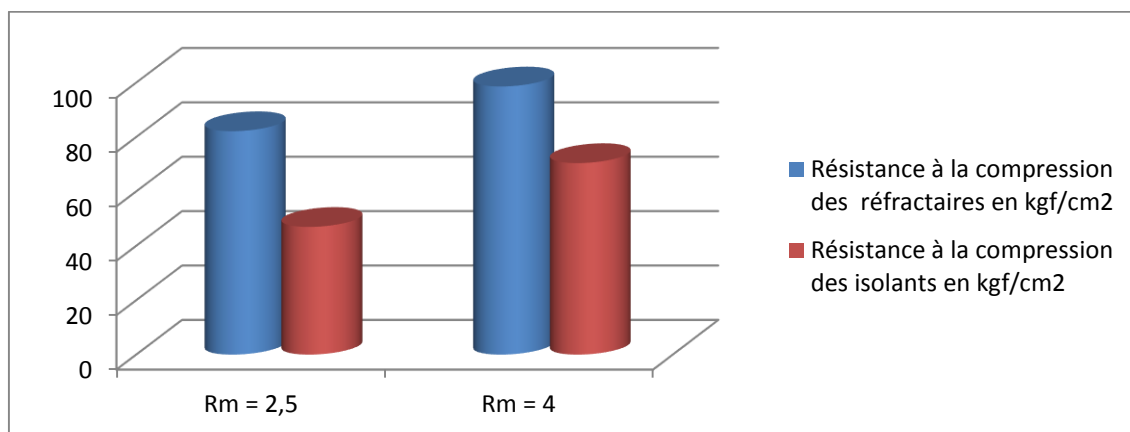


Figure 44 : Evolution des résistances à la compression des éprouvettes isolantes et réfractaires en fonction du $n_{\text{silice}}/n_{\text{soude}}$

Cette figure nous montre que la résistance à la compression des éprouvettes réfractaires augmentent en fonction du $n_{\text{silice}}/n_{\text{soude}}$. Cette figure met aussi en évidence que la résistance à la compression des éprouvettes réfractaires ($92,59 \text{ kgf/cm}^2$ pour $R_m = 4$) est largement supérieure à celui des éprouvettes isolantes ($70,42 \text{ kgf/cm}^2$ pour $R_m = 4$), donc elles résistent bien à une température de 1000°C pendant 6 heures. Ceci est dû à la géopolymérisation de silice provenant de la cendre de balle de riz et de l'alumine du métakaolin.

b) Essais physiques

Tableau 15 : résultats des essais physiques des éprouvettes réfractaires

Essai N°	1	2
Rm	2,5	4
Densité apparente	0,76	0,82
Conductivité thermique à 200°C [$\text{W/m.}^\circ\text{C}$]	0,34	0,29
Porosité %	63,4	67
Perte au feu %	11,5	12
Chaleur massique [$\text{J}/(\text{Kg.K})$]	841	839
Résistance pyroscopique à 1000°C	Très bien	Très bien

De même que les essais mécaniques, on va aussi comparer les résultats physiques des éprouvettes isolantes et réfractaires.

D'après le tableau ci-dessus, on peut avoir les figures suivantes

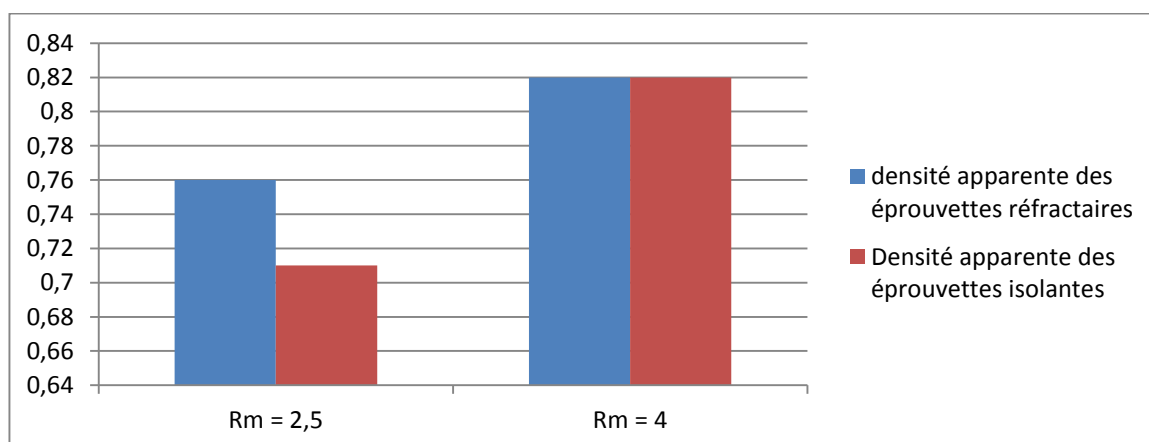


Figure 45 : Evolution des densités apparentes en fonction du $n_{\text{silice}}/n_{\text{soude}}$

Cette courbe signale que les densités apparentes des éprouvettes isolantes sont presque les mêmes à celui des éprouvettes réfractaires, c'est-à-dire que les masses des éprouvettes à volumes égaux fabriquées à partir des cendres de balle de riz seulement sont les mêmes que les éprouvettes fabriquées à moitiés cendre de balle de riz, et à moitiés métakaolin.

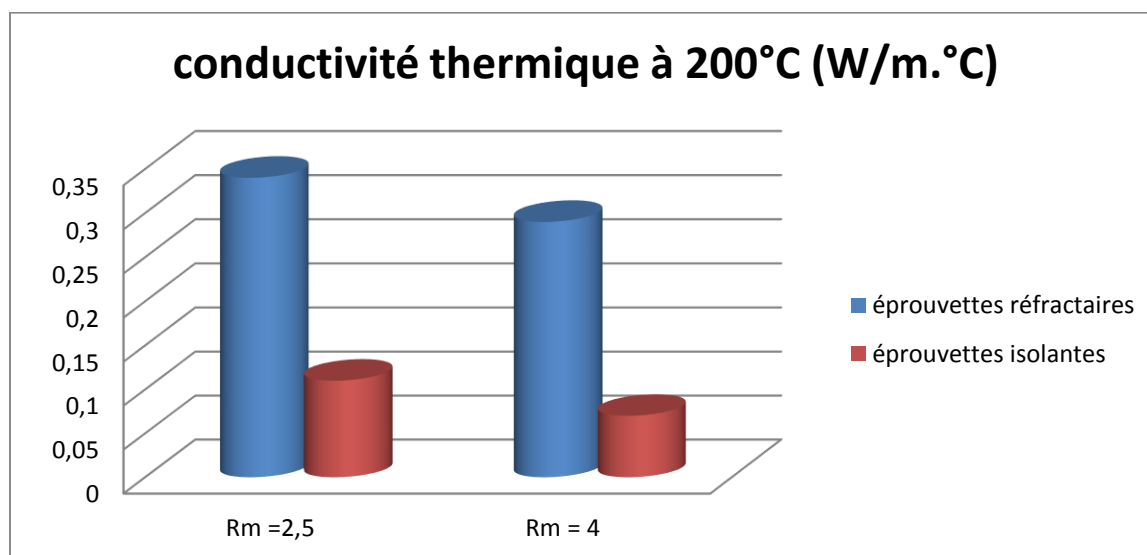


Figure 46 : Evolution des conductivités thermiques en fonction du $n_{\text{silice}}/n_{\text{soude}}$

Cette figure nous montre que pour $Rm = 4$, les conductivités thermiques des éprouvettes isolantes (0,07 W/m.°C) est largement inférieure à celui des éprouvettes réfractaires (0,29W/m.°C), donc les éprouvettes fabriquées à partir des cendres de balle de riz seuls , sont plus isolantes.

III. ETUDE D'IMPACT ENVIRONNEMENTAL ET ANALYSE DE CYCLE DE VIE [4] [22] [23]

1- Analyse de cycle de vie

Selon [ISO 14040 \(1997\)](#), l'Analyse de Cycle de Vie (ACV) est « une technique d'évaluation des aspects environnementaux et des impacts environnementaux potentiels associés à un système de produits, par :

- ★ compilation d'un inventaire des flux élémentaires entrants et sortants pertinents d'un système de produits ;
- ★ évaluation des impacts environnementaux potentiels associés à ces flux entrants et sortants ;
- ★ interprétation des résultats des phases d'analyse de l'inventaire et d'évaluation d'impact par rapport aux objectifs de l'étude ».

2- Facteurs d'émission de CO₂

L'équilibre radiatif naturel de la terre est déterminé par une part importante par la présence de gaz qui ont la propriété d'intercepter les rayonnements émis par la terre, puis de les renvoyer vers l'univers.

Les contributions à l'effet de serre des substances gazeuses émises par la combustion des combustibles d'origine fossile sont données par le tableau suivant :

Tableau 16 : Facteurs d'émission des combustibles fossiles, combustion seule

Source d'énergie	Kg équivalent carbone par tonne	Kg équivalent carbone par kWh	Kg équivalent carbone par litre
GPL	803	0,063	0,432
Supercarburant	876	0,072	0,661
Gazole	859	0,074	0,726
Fuel domestique	859	0,074	0,726
Fuel lourd	851	0,077	0,851
Pétrole brut	836	0,072	0,726

En utilisant ce tableau, le rejet de carbone dans l'atmosphère par notre four pendant une durée d'utilisation de 12h serait de 529,3Kg.

IV. EVALUATION ECONOMIQUE ET COUT DU PROJET

Dans le contexte économique, acheter un four à haute température pose beaucoup de difficultés pour une école dans un pays en voie de développement. Dans le cas de Madagascar, il est souvent nécessaire d'avoir un soutien économique extérieur si on veut réaliser un tel projet. Vis-à-vis de ce problème de financement, nous espérons encore un remède grâce à ce projet de conception. On rappelle que presque tous les matériaux qui constituent notre four sont tous d'origine locale et chaque équipement spécifique est facile à trouver dans notre marché local.

Tableau 17 : Prix approximatif de chaque composante du four en Ariary :

Isolant thermique	réfractaire	Tôleries et aciers	Ventilateur	Citerne à gaz et Tuyauterie	Brûleur et rampe gaz	Equipements électrique	total
200 000	250 000	500 000	1 850 000	4 200 000	3 500 000	2 000 000	12 500 000

Apport ces dépenses ci-dessus, il existe encore des coûts supplémentaires que nous devons tenir en compte sur l'évaluation économique. La mise en place, le coût de fabrication et les outils de sécurité constituent cette dépense supplémentaire.

Tableau 18 : Coût Supplémentaire

Opération	Prix totale
Mise en place de l'installation	1 200 000 [Ar]
Dispositifs de sécurité	1 500 000 [Ar]
Soudure et assemblage	400 000 [Ar]
Total	3 100 000 [Ar]

DISCUSSIONS

I. Paramètres de qualité de la production des matériaux à base de Silicate de Soude

Afin d'obtenir le meilleur résultat, plusieurs paramètres devraient être respectés pendant l'élaboration de ce type de matériau. À chaque phase correspond à un ou plusieurs règles qui consistent à améliorer les résultats.

1- Approvisionnement

C'est le premier pas à faire quand on veut réaliser un projet. Cette étape influe donc à la qualité et au coût du produit obtenu. À ce stade, la chose la plus délicate à faire c'est le choix des matériaux. Tous les résultats obtenus dépendent de la décision prise lors de la phase d'approvisionnement. Il se fait par achat ou par extraction et dépend du fond et du lieu de travail pour chaque cas.

Pour un matériau à base de Silicate de Soude, la plus difficile c'est le choix de silice. Précédemment, nous avons vu qu'il existe plusieurs variétés de silice, mais dans cette étude, nous avons pris le choix d'utiliser la Cendre des balles de riz comme source de silice à cause de sa faible coût, sa facilité de préparation, sa résistance thermique élevée et sa disponibilité à Madagascar.

Selon le projet à faire, le choix des autres constituants sont aussi très indispensables. Leur nature, leur granularité et leur prix doivent être vérifiés avant d'y procéder à l'achat ou l'extraction. Pendant notre réalisation, nous avons utilisés du sable de rivière à cause de sa faible conductivité thermique et sa meilleure résistance mécanique pour le cas de l'isolant thermique, et du métakaolin pour la réfractaire grâce à sa résistance à haute température remarquable.

Le sable est l'un des constituants principaux de notre isolant thermique. La nature et la pureté du sable peut modifier la qualité du produit fini. Sa nature et son origine peut être sable de dune ou sable de rivière ou sable de carrière. Il est important et nécessaire l'absence des matières organiques, des argiles, des micas, de sel, de sulfate dans le sable. Sa granulométrie étalée est de 0/5mm. Pour une production de ce matériau, la disponibilité et l'accessibilité (position du gisement) peut être un problème. Si la quantité est limitée, alors la production aussi est limitée. Si le gisement est loin, le coût de la production s'élève. Mais chacun a son choix parce qu'on peut acheter le sable au lieu de faire une extraction.

Pour le cas de la réfractaire, la nature du métakaolin aussi peut modifier les caractéristiques du produit obtenu. Dans la partie bibliographique, nous avons vu que la définition exacte du kaolin est l'argile ayant une composition minéralogique contenant du kaolinite ($\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4$) supérieure à 50%. La variation plus ou moins de cette composition influe donc à la qualité du produit obtenu. Comme le sable, il existe deux possibilité à choisir quand on a besoin du kaolin : soit par achat et soit par extraction directe dans un gisement.

2- Stockage des matières premières

Pendant l'attente des procédés de mise en œuvre, le stockage des matières premières doit être vérifié et exécuté avec beaucoup de précaution. Comme tous les autres facteurs, l'environnement de stockage peut changer les caractéristiques principales des matières premières et entraîne le changement de la qualité du produit fini. Puisque que nous utilisons aussi du soude caustique, l'entreposage et le transport de ce produit doit être sécurisé car il absorbe beaucoup d'humidité et aussi provoque des sensations de brûlure au contact avec la peau. Il faut donc le mettre à l'abri et hors de la portée des enfants.

3- Préparation des matières premières

Avant de passer à la mise en œuvre, certaines matières premières nécessitent quelques préparations. Cette phase a pour but de mettre les ingrédients dans un état bien déterminé (classe granulométrique, dosage, précuisson) avant de procéder au mélangeage.

Si le sable et/ou le Kaolin n'était pas encore classifié granulométriquement avant l'approvisionnement, on doit passer alors au tamisage afin de les fournir une classification précise.

Pendant le dosage et mélangeage, il faut mettre les matières premières dans un gabarit mesurable (poids ou volume) à fin de respecter la proportion du dosage. Durant la préparation du silicate de soude, il est conseillé de mettre la soude dans l'eau mais pas l'inverse pour assurer une bonne sécurité, et il faut aussi utiliser des outils de protection comme des gans, lunette et cache bouche afin d'éviter les poussières et protéger les mains et les yeux.

L'opération de mélangeage ne doit pas être stoppé jusqu'à l'obtention d'une uniformité de couleur, pour obtenir un mélange parfaitement uniforme.

4- Le malaxage et moulage

Dès que les matières premières sont prêtes, la mise en œuvre du matériau commence. Cette phase comprend le gâchage d'eau et le malaxage du mélange puis le moulage.

Pour le gâchage, il faut respecter la quantité d'eau à ajouter et l'uniformité de l'humidité. Pour notre cas, on a constaté qu'une petite quantité d'eau supplémentaire suffit de modifier la consistance du silicate de soude et entraîne une difficulté de mise en œuvre.

Le malaxage est fait pour obtenir une homogénéité du mélange et il dure de 5 à 10mn environ pour le silicate de soude. Afin de parvenir à obtenir des caractéristiques mécaniques plus performantes, il est nécessaire d'utiliser une presse hydraulique pour faire un moulage par compression.

5- Séchage et cuisson

Le séchage de ces deux produits (réfractaire et isolant) doit être régularisé afin d'éliminer uniformément tous les humidités contenus dans les matériaux. Il peut être exécuté à l'air libre seulement ou à l'air libre puis à l'étuve mais cela dépend du temps de mise en œuvre prévu et du coût de la production.

Avant de procéder à la cuisson, les produits doivent être suffisamment séchés pour éviter la fissuration (voir figure 17). Pendant la cuisson, la montée du gradient de température se fait progressivement afin d'éviter que les matériaux s'explorent.



Figure 47 : Fissuration de l'éprouvette à cause du défaut de séchage

II. Remarques et constatations

1- Sur le fonctionnement du four

- ♦ La hausse des chaleurs massique des revêtements du four augmente le temps nécessaire pour atteindre la température voulue dans le four.
- ♦ Les caractéristiques d'isolant et réfractaires influent à la puissance énergétique consommée par le four.
- ♦ La puissance électrique utilisée pour le ventilateur dépend du débit d'air nécessaire pour la combustion du gaz.
- ♦ L'empilement des charges dans le four ne doit pas perturber la mise en marche du brûleur et doit permettre aussi une uniformité de température à l'intérieur.

2- Sur la mise en œuvre des calorifuges

- ♦ Le séchage du produit est difficile quand on a un mélange à forte teneur en soude.

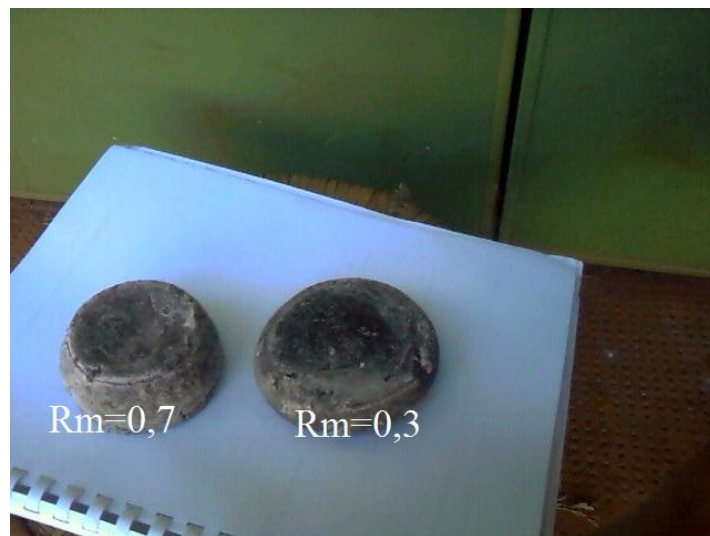


Figure 48 : Epruvettes présentant des affaissements très considérables dus aux modules basiques

- ♦ La forte teneur en cendre des balles de riz diminue la masse volumique du produit.
- ♦ L'ajout du métakaolin augmente la résistance à haute température et augmente aussi la conductivité thermique du matériau.
- ♦ L'ajout du sable de rivière augmente les performances mécaniques et diminue la conductivité thermique.

Conclusion générale

L'objectif de ce travail est d'identifier les paramètres qui influent sur les propriétés techniques, ainsi que de faire l'étude de faisabilité d'un projet de conception d'un four à gaz pour céramique pour le laboratoire des matériaux à Vontovorona en utilisant des matières premières locales pour des matériaux de revêtement.

Nous avons déterminés les paramètres plus importants pour augmenter le rendement d'un four, ces paramètres sont :

- ✧ La qualité d'isolation : sa chaleur massique, sa conductivité thermique, son épaisseur, etc.
- ✧ L'excès d'air (combustion complète et minimisation des chaleurs perdus au fumé)

Nous avons identifiés aussi les paramètres de qualité de fabrication des isolants thermique et réfractaires à base de silicate de soude. Le dosage en eau, le dosage en soude, ces sont les deux éléments qui influe directement sur la qualité du produit obtenue. Pour obtenir un réfractaire ayant des propriétés plus performant aussi, le dosage en silice doit être plus élevé.

Avec tous ces principes que nous avons déterminés au cours des essais, nous avons parvenu à obtenir des matériaux qui ont les propriétés suivantes après un traitement thermique de 1000°C pendant 6 heures :

- ✧ Une résistance à la compression élevée de l'ordre de 98,59 kgf/cm² pour l'éprouvette réfractaire, composée de cendre de balle de riz, de métakaolin, et de silicate de soude de $n_{\text{silice}}/n_{\text{soude}}=4$: ce qui veut dire que l'éprouvette résiste bien à haute température
- ✧ Un faible conductivité thermique à 200°C environ 0,07 W/m.°C (excellent isolant thermique) , pour l'éprouvette isolante qui est composée uniquement par des cendres de balle de riz, de sable et de silicate de soude de $n_{\text{silice}}/n_{\text{soude}}=4$.

En utilisant les matériaux d'origine locale, nous avons trouvés les résultats suivants sur les caractéristiques du four :

- ✪ Puissance du brûleur environ 100KW
- ✪ Coût total du projet de l'ordre de 15.600.000 Ar

Pour conclure, le projet de réalisation d'un four à gaz pour céramique au laboratoire des matériaux à Vontovorona est réalisable et présente un coût admissible par rapport à l'état économique des universités à Madagascar. Pourtant, nous pouvons encore diminuer ses consommations en faisant encore des recherches sur l'emploi des économiseurs thermiques et modélisation de la combustion à l'intérieur du four.

Références

Bibliographiques

- [1] RATSIMBAZAFY Hery Mikaela. Contribution à la production d'un ciment geopolymerique a base de métakaolin. Thèse de doctorat en Matériaux de l'Université d'Antananarivo
- [2] Taratra FM alliance 92. Reflet - Pauvreté à Madagascar : tous les critères en témoignent. 03/06/2016
- [3] Kolli Mostafa, Elaboration et caractérisation thermomécanique de réfractaire à base de kaolin DD3, Thèse de Doctorat en Sciences, Université Ferhat Abbas-Sétif UFAS (Algérie) 2008, 157 pages
- [4] KOERA Rasoloniaina Antoine. Méthodologie de calcul des systèmes d'isolation des fours avec conception d'un logiciel de calcul « kajy 1.0 ». Mémoire d'Ingénieur en Science et Ingénierie des Matériaux 2007, 114 pages
- [5] Cyriac RAZAFINIME. Etude et réalisation d'un four à creusets. Mémoire d'Ingénieur en Génie Chimique 1987
- [6] Fours, sécheurs et fours de cuisson. Ministère de l'Energie, des Mines et des Ressources, Canada, 36 pages
- [7] Fabrication des céramiques, COMMISSION EUROPÉENNE, MB/FS/EIPPCB/CER_Final Draft Version septembre 2006, 236 pages
- [8] G Monnet. Combustion dans les fours et les chaudières (bibliothèque de l'ESPA)
- [9] RALIBERA Andriamifidy G- RAMADAVOLOLONA. Etude et réalisation d'un four à bois pour céramique. Mémoire d'Ingénieur en Génie Chimique 1985
- [10] AFPA Département BTP 2006. Brûleurs gaz à air soufflé, 222 pages

- [11] Jean Pierre Marsuis. Brûleur et vanne pour l'industrie. Edition MAXON (bibliothèque de l'ESPA)
- [12] PRIMAGAZ. Butane et Propane, une énergie performante et compétitive.
www.primagaz.fr
- [13] Contribution à l'élaboration d'un support isolant thermique et électrique en céramique à base de kaolin et de silice de cendre des balles de riz : cas d'un réchaud électrique. Mémoire d'Ingénieur en Génie Chimique 2007, 95 pages
- [14] G. Aliprandi, Matériaux réfractaires et céramiques techniques, Editions Septima, Paris, 1979, 612p.
- [15] RAKOTONANTOANINA Herimalala. Contribution à l'étude de quelques matières premières. Mémoire d'Ingénieur en Mine 1988
- [16] Zo Alain RANARIJAONA. Modélisation d'un brûleur à combustible liquide. Mémoire d'Ingénieur en Génie Industriel 2006, 72 pages
- [17] Victorine RASOALALAO. Les régulateurs industriels. Mémoire d'Ingénieur en Génie industriel 2005, 78 pages
- [18] SAMAR Benthani, Modélisation numérique d'un four électrique à convection forcée. Mémoire Génie Electrique à l'Université du Québec à Trois-Rivières, 116 pages
- [19] RAOLIARISOA Charlotte, Contribution aux études et réalisations de la mise en fonctionnement du four du département génie chimique. Mémoire d'Ingénieur en Génie Chimique 2003, 85 pages
- [20] Издательство « Энергия » 1980, Traduite du Russe par Valentin Polonski en 1985. Problèmes de Transfer de chaleur, Edition MIR Moscou (bibliothèque de l'ESPA)
- [21] Abdoulaye Ouédraogo*, Florent P. Kiéno, Tizane Daho, Joseph D. Bathiébo Raguilnaba Ouédraogo. Bilan thermique quasi-statique d'un four artisanal en argile. Unité de Formation et de Recherche en Sciences Exactes et Appliquées, Université de Ouagadougou, 03 BP 7021, Burkina Faso, 72 pages
- [22] Ministère de l'aménagement du territoire et de l'environnement Français, Direction de la prévention des pollutions et des risques, Service de l'Environnement Industriel / Bureau de

la pollution atmosphérique, des Equipements Energétiques et des transports : Guide Méthodologique relatif au contrôle des déclarations des émissions de gaz à effet de serre, Avril 2002, 24 pages.

[23] Agence de l'Environnement et de la Maitrise de l'Energie (ADEME), Base Carbone : Documentation des facteurs d'émissions de la Base Carbone. Version 11.0.0 - mardi 18 novembre 2014, 280 pages.

[24] Energie plus, La conductivité thermique des matériaux. www.energieplus-lesite.be

[25] TRIONYX, Armoires de Sécurité selon les normes 14470 - 1 - EN 14470-2 pour produits inflammables, explosifs et bouteilles de gaz. Edition 12/2013.

ANNEXE

ANNEXE°01 : CALCULE DE LA TEMPERATURE DE LA CHARGE POUR UN TEMPS DE CHAUFFAGE DONNE [20]

Pendant la cuisson, la température de la surface et à l'intérieur du charge varie. On peut calculer en fonction du temps cette valeur en utilisant la méthode de Biot-Fourier. Voici quelques étapes à suivre pour dans ce calcul :

- Il faut tout d'abord calculer le nombre de Biot avec la formule :

$$Bi = \frac{h \times \delta}{\lambda}$$

Avec :

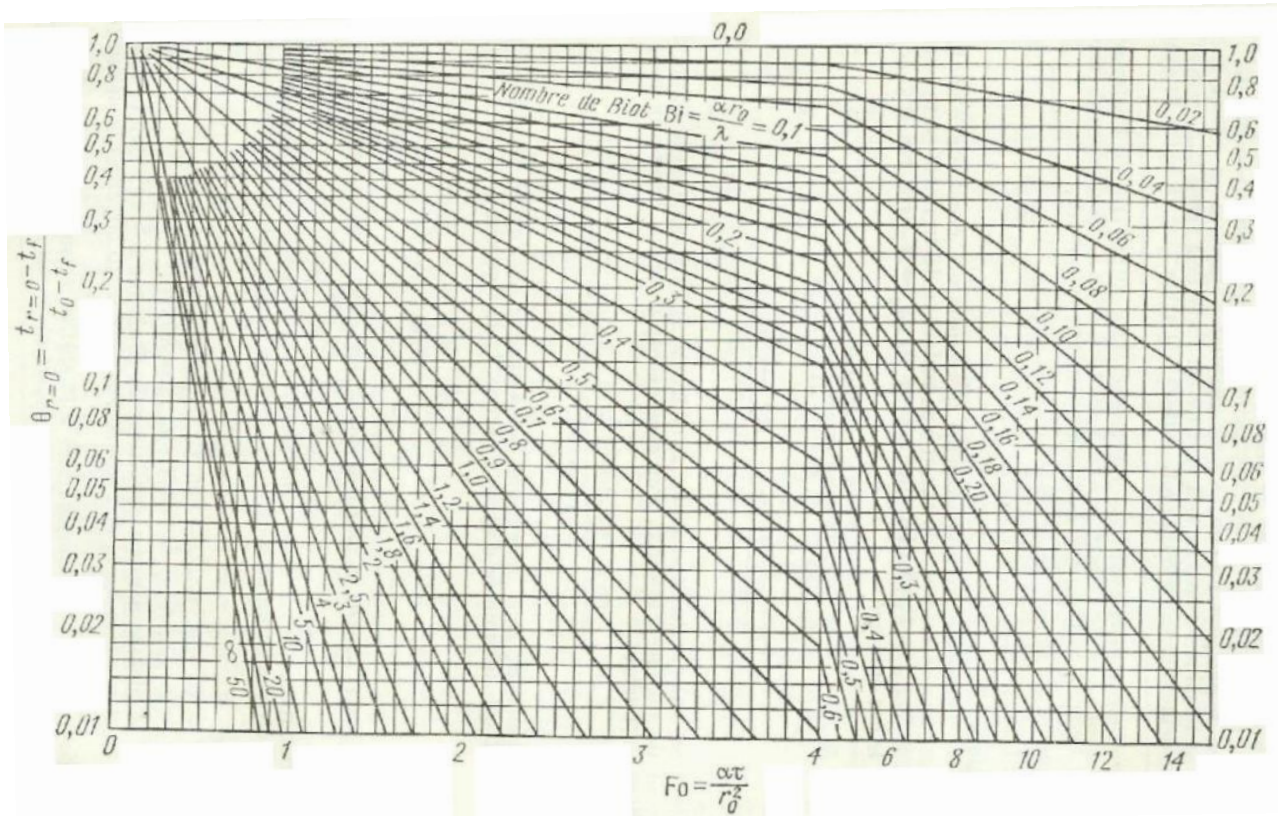
h : coefficient de transmission de chaleur de $2 \times \delta$: épaisseur de la charge λ : conductivité thermique du matériau (diamètre pour le cas d'un cylindre)

- Puis, celui de Fourier :

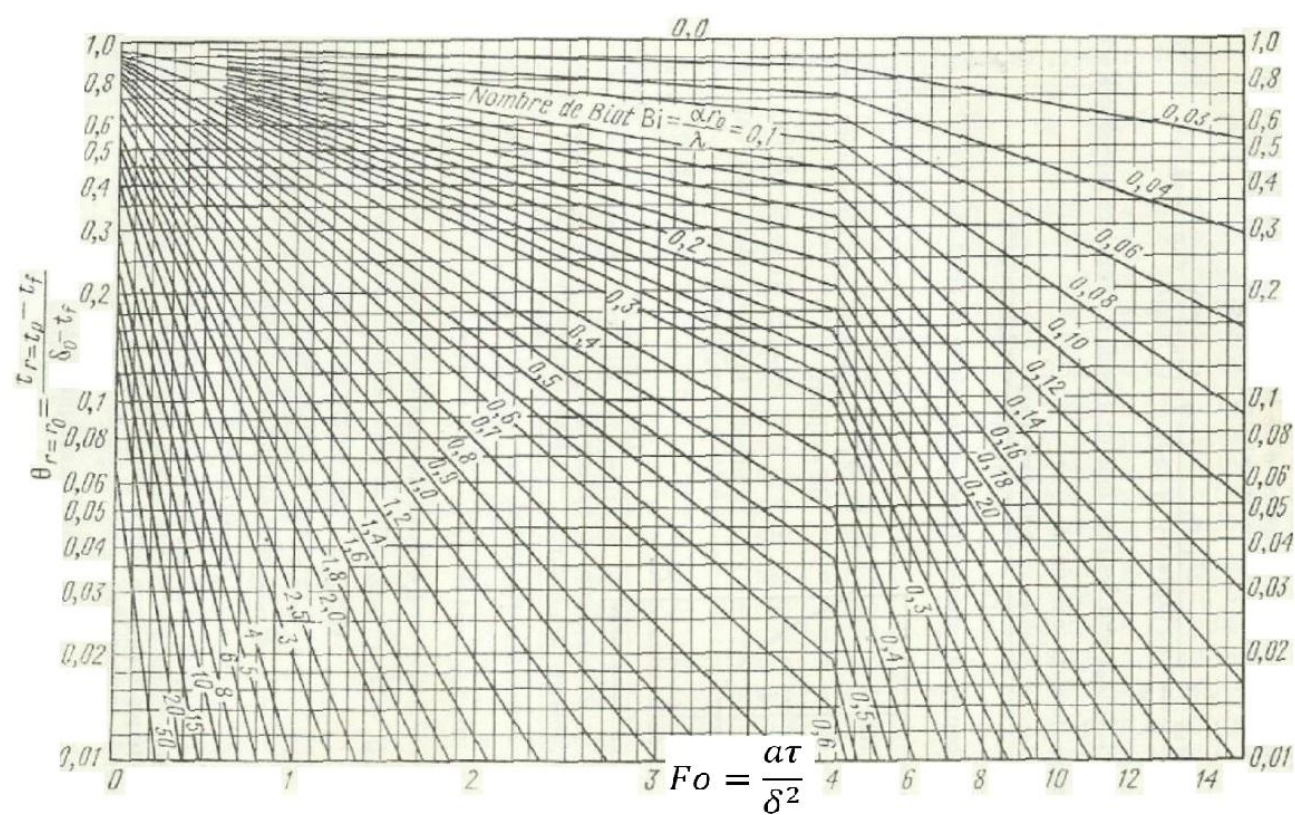
$$Fo = \frac{a\tau}{\delta^2}$$

- Déterminer la température sans dimension θ
 - ❖ Pour un cylindre

Lors du chauffage à température constante d'un cylindre les températures sur son axe et à sa surface se déterminent en recourant aux abaques $\theta_{r=0} = F_1(Bi, Fo)$ et $\theta_{r=r_0} = F_2(Bi, Fo)$



Relation $\theta_{r=0} = F_1(Bi, Fo)$ pour l'axe d'un cylindre

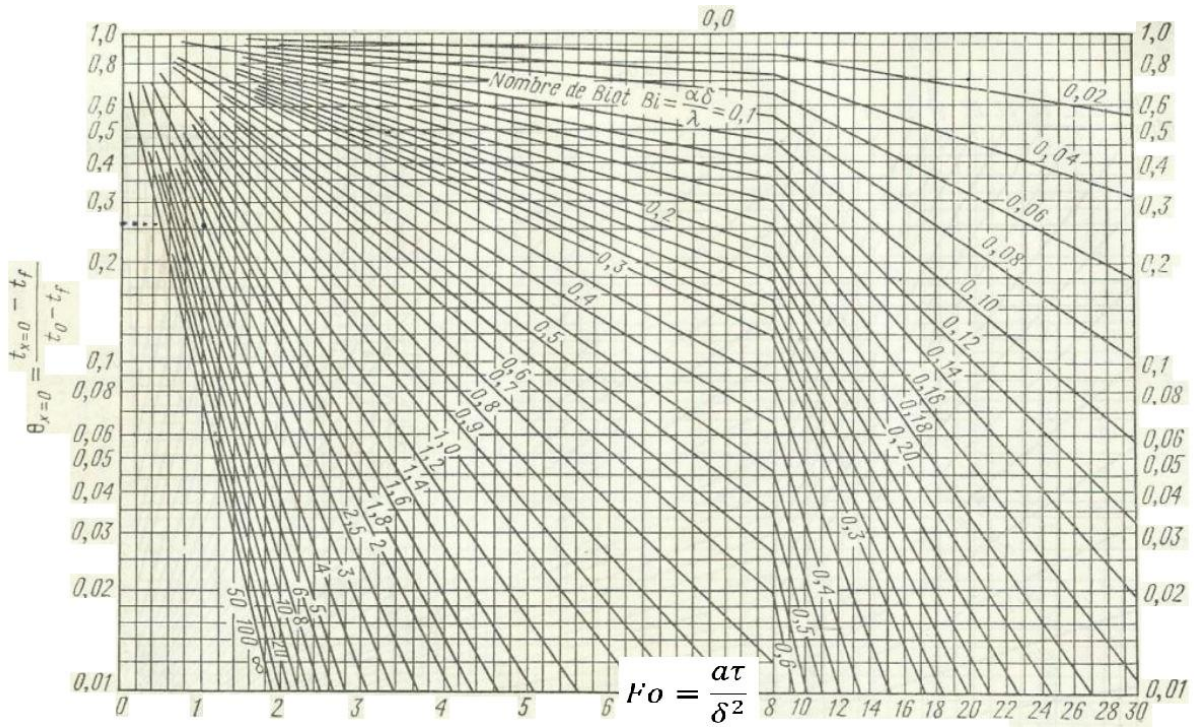


Relation $\theta_{r=r_0} = F_2(Bi, Fo)$ pour la surface d'un cylindre

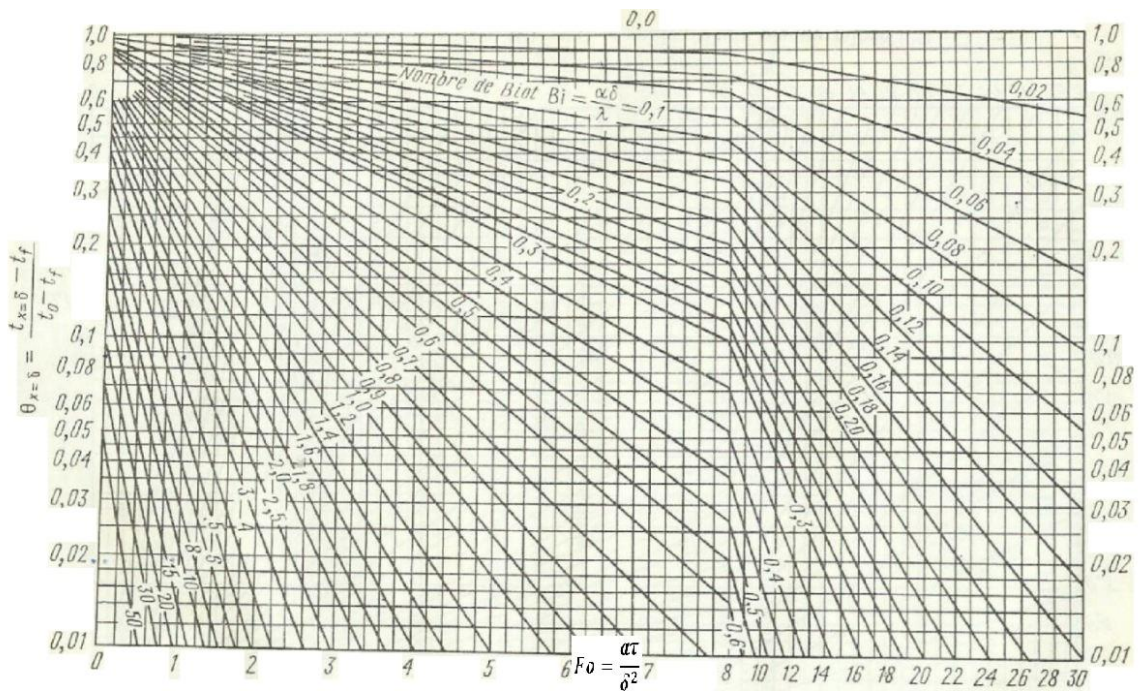
❖ Pour une plaque mince

La température au centre ou à la surface d'une plaque mince au chauffage dans un milieu à température constante se détermine à l'aide des abaques $\theta_{r=0} = F_1(Bi, Fo)$ et

$$\theta_{r=r_0} = F_2(Bi, Fo).$$



Relation $\theta_{r=0} = F_1(Bi, Fo)$ pour le milieu d'une plaque mince



Relation $\theta_{r=r_0} = F_2(Bi, Fo)$ pour la surface d'une plaque mince

➤ Détermination de la température

En utilisant la température sans dimension θ , on en déduit la valeur de la température à l'aide de la relation :

$$\theta = \frac{T_f + T_x}{T_f + T_i}$$

T_f : température à l'intérieur du four T_x : température de la surface ou du milieu de la charge T_i : température initiale de la charge

Remarque :

La température sans dimension d'un point quelconque de parallélépipède est égale au produit des températures sans dimension des trois plaques minces, dont l'intersection forme un parallélépipède. Par conséquent, la température sans dimension du parallélépipède est donnée par l'équation :

$$\theta = \frac{T_f + T_c}{T_f + T_i} = \frac{T_f + T_x}{T_f + T_i} \times \frac{T_f + T_y}{T_f + T_i} \times \frac{T_f + T_z}{T_f + T_i}$$

ANNEXE°02 : TECHNIQUES UTILISES LORS DE LA DETERMINATION DES RESULTATS [3]

1- Détermination des contraintes mécaniques

Pendant les essais mécaniques, nous avons utilisés des éprouvettes parallélépipédiques 60×60×120 millimètres.

a) Contrainte de rupture à la compression

Elle est déterminée par la formule suivant :

$$R_c = \frac{F}{S}$$

F : Effort de pression

S : Somme des deux surfaces soumise à l'effort

b) Contrainte de rupture à la traction

A partir de la valeur du contrainte de rupture à la compression, on peut l'en déduire par la relation :

$$R_t = 10 \times R_c$$

c) Contrainte de rupture au cisaillement

De même façon que la traction, elle est déterminée par :

$$R_{cs} = \frac{10}{3} \times R_c$$

2- Détermination de la densité apparente

La densité apparente est déterminée par le rapport de la masse volumique de l'échantillon avec celle de l'eau.

$$D_i = \frac{\rho_{ech}}{\rho_{eau}}$$

3- Calcul de la porosité

La porosité d'un matériau est exprimée en pourcentage. Elle est déterminée à partir de la formule :

$$p = \frac{m_{humide} - m_{sec}}{m_{sec}} \times 100$$

4- Capacité calorifique

La détermination de la capacité calorifique d'un matériau se fait à l'aide d'un calorimètre et d'un thermomètre. Il est en déduit en appliquant la formule suivant avec les résultats pendant les travaux pratiques :

$$Q = m \times C(T_f - T_i)$$

Principe expérimentale :

- ★ On met une quantité M1 d'eau froide dans le calorimètre, puis, on mesure sa température T1 à l'aide du thermomètre.
- ★ On chauffe l'éprouvette dans une étuve, pendant environ 24 heures, avec une température T2.
- ★ Après ça, on le met tout de suite à l'intérieur du calorimètre pour éviter tout perte de chaleur.
- ★ Enfin, on prélève les températures des substances à l'intérieure du calorimètre à chaque minute qui passe après pendant environ 20 mn.

Principe de Calcul :

- ★ On calcul tous d'abord la capacité calorifique du calorimètre :
 - ⊗ En faisant la même procédure que ci-dessus mais en remplaçant l'éprouvette par une quantité d'eau chaude de masse M'2 et de température T'2.
 - ⊗ On calcule ensuite la capacité calorifique du calorimètre par la formule suivante :

$$C_{cal} = \frac{C_e[M'_2(T'_3 - T'_1) - M'_1(T'_2 - T'_3)]}{T'_3 - T'_1}$$

Où C_e est la chaleur massique de l'eau, qui est égale à $4,18 \text{ kJ.kg}^{-1}.\text{K}^{-1}$

- ★ On calcule enfin la chaleur massique de l'éprouvette à l'aide de la formule :

$$C = \frac{(T_3 - T_1)(C_{cal} + M_1 \times C_e)}{M_2(T_2 - T_3)}$$

5- La conductivité thermique

De nos jours, plusieurs méthodes peuvent être utilisées pour déterminer la conductivité thermique d'un matériau. On peut citer :

- ♥ **La méthode indirecte**, qui est en déduit à partir de la connaissance de la chaleur massique, de la diffusivité thermique et de la masse volumique.
- ♥ **La méthode de la plaque chaude gardée**, qui est certifié en ISO 8302.
- ♥ **La méthode du fil chaud**.
- ♥ **La méthode du hot disc**, certifié en ISO 22007-2 :2008

La méthode que nous avons utilisée lors de la détermination de la conductivité thermique de nos échantillons est la méthode de la plaque chaude gardée. Le principe est simple : Une plaque chaude fournit de l'énergie aux deux éprouvettes qu'elle sépare. La dissipation du flux se fait par deux plaques froides situées de part et d'autre des éprouvettes. Les températures sur chaque face des échantillons sont mesurées à l'aide de 4 feuillets de thermocouples. Les mesures du flux d'énergie fourni (ϕ), des écarts de température et de l'épaisseur moyenne des éprouvettes permettent de déterminer la conductivité thermique après stabilisation de l'ensemble, c'est-à-dire en régime permanent.

6- La perte au feu

Pour déterminer la perte au feu d'une substance, il faut tout d'abord pesé son poids sec (c'est-à-dire sa masse après une durée de séchage 24h dans une étuve). On le met ensuite dans un four de chauffage à environ 800°C pendant 6h, puis, on détermine à nouveau son poids après refroidissement. Enfin, la perte au feu est en déduit à l'aide de la formule suivante.

$$p = \frac{m_{sec} - m_{après\ cuisson}}{m_{sec}} \times 100$$

7- La densité apparente







La densité apparente est le rapport de la masse volumique de l'échantillon avec celle de l'eau.

$$d = \frac{\rho_{échantillon}}{\rho_{eau}}$$

ANNEXE°03 : DIFFERENTES TYPES DE BRULEURS ET UTILISATION [16]

Le tableau suivant résume les types des brûleurs les plus utilisés dans les industries.

Dénominations	Types et caractéristiques	Utilisations
Brûleurs AIRFLO	<u>Brûleurs à veine d'air</u> Pour des vitesses d'air allant de 30 à 20m/s, ce type de brûleurs peut produire une quantité de chaleur de 15.000 à 1.000.000 Kcal/h	<ul style="list-style-type: none"> Chauffage des locaux par ventilation tempéré Conditionnement des cabinets de peintures, séchage des graines...
Brûleurs LINOFLAME	<u>Brûleurs rampe</u> L'air de combustion utilisé étant pré mélangé, ils peuvent produire une quantité de chaleur allant de 400.000 à 1.000.000Kcal/h	<ul style="list-style-type: none"> Chauffage de boîtes à conserves Chauffage des tubes en fonte, séchoir à papier, séchoir d'aggloméré de bois, filière de verre, de produit chimique...
Brûleurs COMBUSTIFUME	<u>Brûleurs à veine d'air pour l'incinération des fumés</u> Les variations d'affluent ne doivent pas être trop grandes avec au moins 16% d'oxygène. 8 unité de ce type disposé en module peuvent produire jusqu'à 2.000.000Kcal.	<ul style="list-style-type: none"> L'émail de cuivre L'étuve de cuisson de peinture La ligne d'induction de peinture sur tôle Sécheur d'imprimerie Traitement de fibre de verre Garnitures de frein
Brûleurs INFRAWAVE	<u>Brûleurs pour traitement par infrarouge</u> Fonctionnant avec du prémélange d'air et de gaz. Leur puissance maximale est de voisine de 1000Kcal/h	<ul style="list-style-type: none"> Normalisation de l'état de surface de fibre de textile Préchauffage, poste chauffage et séchage Traitement de papier, matière plastique, de revêtement céramique et de textile.
Brûleurs OVENPAK	<u>Brûleurs pour étuve et séchoir</u> Permette l'obtention rapide et avec précision d'une température donné. Leurs puissances varient selon les modèles de 80.000 à 4.000.000Kcal/h.	<ul style="list-style-type: none"> L'étuve de cuisson de peinture Séchage des tuiles et des briques, de tapis et des carpettes. Sécheur d'imprimerie Séchoir à papier et à plâtre Séchoir des produits chimiques

Brûleurs WIDE RANGE	<u>Brûleurs pour chauffage par tube immergé</u> Rendement : 70 à 75% Leur puissance varie de 180.000 à 1.250.000Kcal/h	 Le bain de dégraissage de traitement de surface.  Réservoir d'asphalte et réservoir de peinture.  Tunnel de rinçage.  Chauffage indirecte de l'air.
Brûleurs TUBE-O-FLAME	<u>Brûleurs pour les applications à haute température</u> Grande stabilité de flamme pour des générateurs d'air chaud même à plus basse température. Usage d'une vanne de proportion air gaz en plus du ventilateur. Quantité de chaleur : 30.000 à 3.000.000Kcal/h	 Chauffage d'air pour séchoir, étuve et four.  Four de briqueterie de cuisson et de fusion, de traitement thermique.

ANNEXE°04 : CONDUCTIVITES THERMIQUE DE QUELQUE MATERIAU [24]

Les tableaux suivants représentent les caractéristiques thermiques de quelque matériau. Les valeurs de conductivité thermique reprises ici sont des valeurs par défaut, issues de la réglementation (*Extrait de l'AGW du 17 avril 2008*).

L'emploi des valeurs $\lambda_{U,e}$ ou $\lambda_{U,i}$ dépend des conditions d'utilisation du matériau :

- $\lambda_{U,i}$: Conductivité thermique utilisée pour un matériau dans une paroi intérieure ou dans une paroi extérieure, à condition que ce matériau soit protégé contre l'humidité due à la pluie ou à la condensation.
- $\lambda_{U,e}$: Conductivité thermique utilisée pour un matériau dans une paroi extérieure qui n'est pas protégé contre l'humidité due à la pluie ou à la condensation.

Matériaux d'isolation thermique			
Matériau d'isolation	$\lambda_{U,i}$ W/(m.K)	$\lambda_{U,e}$ W/(m.K)	Chaleur massique J/(kg.K)
Liège (ICB)	0.050	⁽¹⁾	1 560
Laine minérale (MW)	0.045	⁽¹⁾	1 030
Polystyrène expansé (EPS)	0.045	⁽¹⁾	1 450
Polyéthylène extrudé (PEF)	0.045	⁽¹⁾	1 450
Mousse phénolique – revêtu (PF)	0.045 ⁽²⁾	⁽¹⁾	1 400
Polyuréthane – revêtu (PUR/PIR)	0.035	⁽¹⁾	1 400
Polystyrène extrudé (XPS)	0.040	⁽¹⁾	1 450
Verre cellulaire (CG)	0.055	⁽¹⁾	1 000
Perlite (EPB)	0.060	⁽¹⁾	900
Vermiculite	0.065	⁽¹⁾	1 080
Vermiculite expansée (panneaux)	0.090	⁽¹⁾	900
⁽¹⁾ L'exposition directe de ces matériaux aux conditions climatiques extérieures n'est en règle générale pas recommandée.			
⁽²⁾ Pour les panneaux d'isolation revêtus en mousse de phénol à cellules fermées, cette valeur est ramenée à 0.030 W/(m.K)			

Briques en terre cuite		
<i>La chaleur massique c vaut 1 000 J/(kg.K)</i>		
Masse volumique ρ (kg.m ³)	λ_{Ui} W/(m.K)	λ_{Ue} W/(m.K)
$\rho \leq 700$	0.22	0.43
$700 < \rho \leq 800$	0.25	0.49
$800 < \rho \leq 900$	0.28	0.56
$900 < \rho \leq 1000$	0.32	0.63
$1000 < \rho \leq 1100$	0.35	0.70
$1100 < \rho \leq 1200$	0.39	0.77
$1200 < \rho \leq 1300$	0.42	0.84
$1300 < \rho \leq 1400$	0.47	0.93
$1400 < \rho \leq 1500$	0.51	1.00
$1500 < \rho \leq 1600$	0.55	1.09
$1600 < \rho \leq 1700$	0.60	1.19
$1700 < \rho \leq 1800$	0.65	1.28
$1800 < \rho \leq 1900$	0.71	1.40
$1900 < \rho \leq 2000$	0.76	1.49
$2000 < \rho \leq 2100$	0.81	1.61

Briques/blocs silico-calcaires		
<i>La chaleur massique c vaut 1 000 J/(kg.K)</i>		
Masse volumique ρ (kg.m ³)	λ_{Ui} W/(m.K)	λ_{Ue} W/(m.K)
$\rho \leq 900$	0.36	0.78
$900 < \rho \leq 1000$	0.37	0.81
$1000 < \rho \leq 1100$	0.40	0.87
$1100 < \rho \leq 1200$	0.45	0.97
$1200 < \rho \leq 1300$	0.51	1.11
$1300 < \rho \leq 1400$	0.57	1.24
$1400 < \rho \leq 1500$	0.66	1.43
$1500 < \rho \leq 1600$	0.76	1.65
$1600 < \rho \leq 1700$	0.87	1.89
$1700 < \rho \leq 1800$	1.00	2.19
$1800 < \rho \leq 1900$	1.14	2.49
$1900 < \rho \leq 2000$	1.30	2.84
$2000 < \rho \leq 2100$	1.49	3.25
$2100 < \rho \leq 2200$	1.70	3.71

ANNEXE°05 : ARMOIRES DE SÉCURITE EN 14470-1 - EN 14470-2 POUR PRODUITS INFLAMMABLES, EXPLOSIFS ET BOUTEILLES DE GAZ [25]

Pour des raisons de sécurité évidentes, il y a lieu de stocker les produits inflammables et/ou explosifs, ou les bouteilles de gaz dans des armoires de sécurité. Peu importe le domaine d'activité, qu'on entrepose des produits peu inflammables ou extrêmement inflammables, des gaz peu inflammables ou extrêmement inflammables, ces derniers doivent-être stockés en sécurité afin de retarder les risques d'explosions dus à l'incendie.

NORMALISATION

NORMES EUROPÉENNES EN 14470-1 et EN 14470-2 :

Champs d'application

EN 14470-1 : Entrée en vigueur en octobre 2004, cette norme concerne le stockage des produits inflammables en laboratoire. Elle s'applique sur les armoires dont le volume interne est inférieur ou égal à 1 m³. EN 14470-2 : Entrée en vigueur en avril 2006, cette norme concerne le stockage des bouteilles de gaz comprimé en laboratoire. Elle s'applique sur les armoires dont le volume interne total permet d'entreposer des bouteilles de gaz d'une capacité totale inférieure à 220 litres.

Principaux impératifs

1. Protection contre l'incendie :

En cas d'incendie, l'armoire doit garantir que, pendant au moins 15 minutes, son contenu ne contribuera pas à accroître les risques ou la propagation du feu. 4 classes ont été définies par la norme pour permettre à l'utilisateur de choisir l'armoire la plus adaptée à ses besoins et au niveau du risque évalué :

EN 14470-1 Stockage de liquides inflammables	EN 14470-2 Stockage de bouteilles de gaz comprimé	Résistance au feu
Type 15	Type G15	15 minutes au feu
Type 30	Type G30	30 minutes au feu
Type 60	Type G60	60 minutes au feu
Type 90	Type G90	90 minutes au feu

2. Tests au feu :

Les armoires présentées dans cette partie catalogue ont subies un test de destruction au feu selon la norme EN 14470-1 (2004) ou la norme EN 14470-2 (2006). Ces essais ont été menés par un laboratoire extérieur accrédité par le COFRAC.

3. Volume de rétention (EN 14470-1 uniquement) :

Le volume du bac de rétention doit pouvoir contenir au moins 110 % du volume du plus gros récipient stocké dans l'armoire ou 10 % du volume total stocké.

4. Construction :

Les portes de l'armoire doivent être à fermeture automatique en toute position (EN 14470-1 uniquement). Les différentes parois de l'armoire doivent être de construction identique et de même épaisseur. D'autre part, les exigences de la norme portent sur la construction de l'armoire en elle-même et de sa capacité à résister à des conditions de feu externe (tests au feu réalisés selon les normes ISO 834-1 et EN 1363-1).

5. Signalisation :

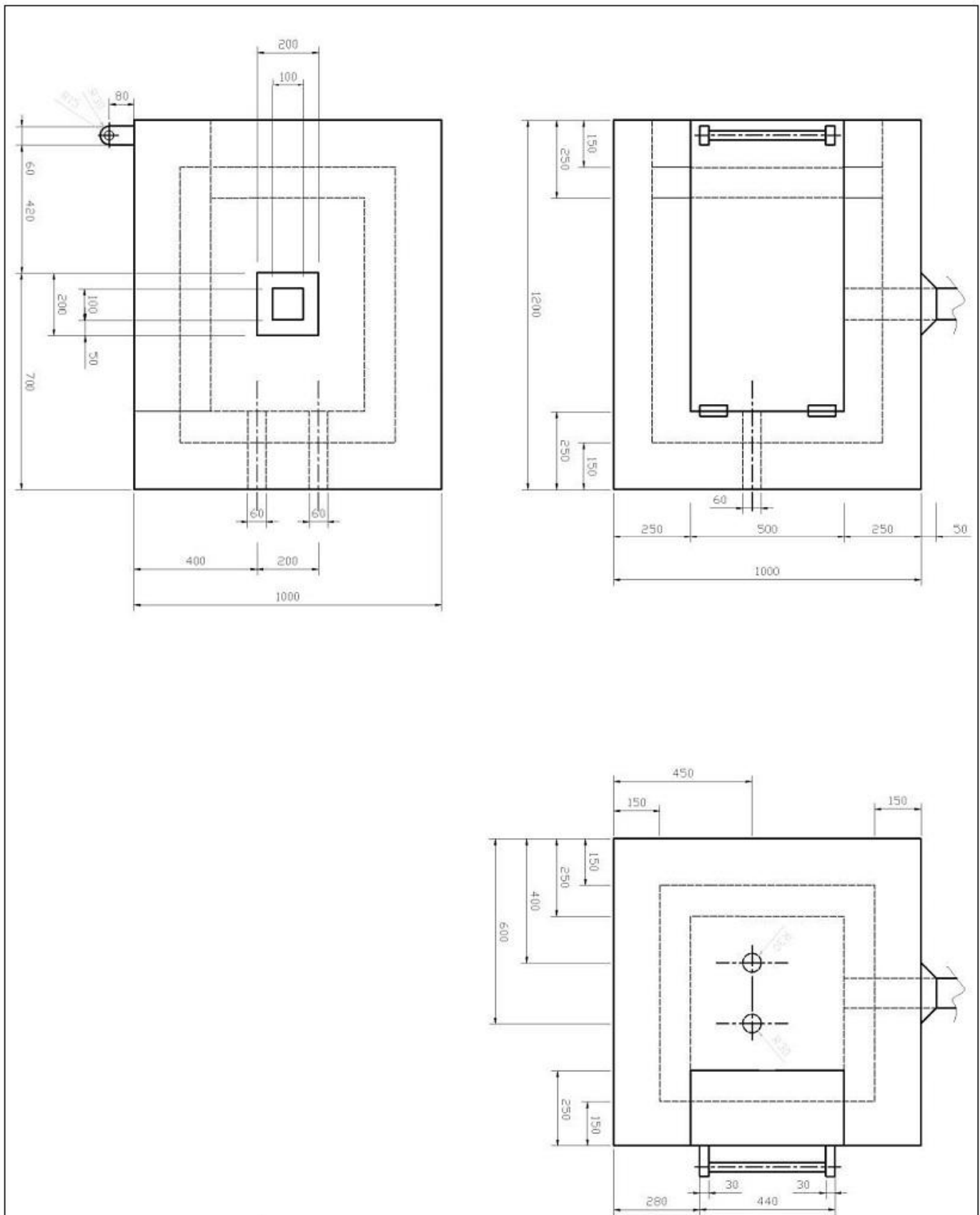
Les armoires doivent être munies d'une signalétique adaptée : pictogrammes normalisés conformes à la norme ISO 3864 :

☸ EN 14470-1 : matières inflammables, flamme nue interdite et défense de fumer, charge maximale admissible par étagère, capacité du plus grand récipient pouvant être introduit dans l'armoire, résistance au feu du modèle (15, 30, 60 ou 90 minutes), maintien des portes fermées lorsque l'armoire n'est pas utilisée...

☸ EN 14470-2 : présence de bouteilles de gaz comprimé, résistance au feu du modèle (15, 30, 60 ou 90 minutes), maintien des portes fermées lorsque l'armoire n'est pas utilisée.

6. Ventilation :

Les armoires doivent être munies d'orifice d'entrée et de sortie d'air à fermeture automatique en cas d'incendie, permettant de la raccorder à un système de ventilation forcée. Pour une armoire ventilée, le renouvellement d'air doit être au moins égale à 10 fois le volume de l'armoire par heure (120 fois dans le cas de stockage de bouteilles de gaz toxiques), porte(s) fermée(s).




Echelle : 1:1	Four à gaz pour céramique	Dessiné par: Manda
	ESPA	
A4	Dessin n� 01	Promotion 2016

TABLE DES MATIERES

REMERCIEMENTS

SOMMAIRE

LISTE DES ABREVIATIONS

LISTE DES FIGURES

LISTE DES TABLEAUX

LISTE DES ANNEXES

INTRODUCTION

GENERALITE ET METHODES BIBLIOGRAPHIQUE

Chapitre 1 GENERALITES SUR LES FOURS.....	- 3 -
I. Classification des fours.....	- 3 -
1. Selon le principe de production	- 3 -
2. Selon son domaine d'utilisation.....	- 3 -
3. Selon sa le type d'énergie utilisé	- 3 -
4. Selon sa nature chimique du milieu de chauffage (atmosphère)	- 4 -
5. Selon sa température d'utilisation.....	- 4 -
II. Les fours à céramique.....	- 4 -
1. L'évolution du four à céramique	- 4 -
2. Les modes de cuisson proposés par un four à céramique	- 5 -
3. Les différents types de fours à céramique.....	- 5 -
III. Les fours à gaz.....	- 6 -
1. Les brûleurs.....	- 6 -
a) Classement des brûleurs.....	- 6 -
b) Synthèse sur la modulation en puissance pour les brûleurs gaz	- 8 -
2. Le propane	- 8 -
a- Pouvoir calorifique du propane.....	- 9 -
b- Principe de vaporisation.....	- 9 -
c- Pression de vapeur	- 10 -
d- Caractéristiques de combustion des différents gaz	- 10 -

Chapitre 2 LES MATERIAUX REFRACTAIRES	- 11 -
I- Généralités	- 11 -
1- Historique.....	- 11 -
2- Définitions.....	- 11 -
3- Composition macroscopique.....	- 11 -
4- Classification.....	- 12 -
a- Classification suivant leur composition	- 12 -
i. Système silice/alumine	- 13 -
ii. Les réfractaires basiques	- 14 -
iii. Les réfractaires spéciaux	- 14 -
b- Classification suivant leur mise en forme	- 14 -
i. Les matériaux réfractaires façonnés	- 15 -
ii. Les matériaux réfractaires non-façonnés	- 15 -
II- Elaboration des matériaux réfractaires	- 15 -
1- Matières premières.....	- 15 -
a) La silice	- 16 -
b) Alumine.....	- 16 -
c) Argile	- 16 -
d) Kaolin.....	- 16 -
2- Préparation des Matières premières	- 17 -
a) Broyage	- 17 -
b) Granulométrie des grains	- 17 -
3- Façonnage	- 17 -
a- Malaxage :.....	- 17 -
b- Mise en forme :	- 18 -
4- Traitement thermique.....	- 19 -
a- Le séchage.....	- 19 -
b- Extraction des auxiliaires organiques de mise en forme (déliantage):.....	- 20 -
c- La cuisson	- 20 -

METHODES ET CONCEPTION DE NOTRE FOUR

Chapitre 1 PRESENTATION ET DIMENSIONNEMENT..... - 21 -

- 1- Le squelette du four - 22 -
- 2- L'interface extérieur..... - 22 -
- 3- Le support de pose - 23 -
- 4- La couche de réfractaire - 23 -
- 5- La couche d'isolant - 24 -

Chapitre 2 PRINCIPE DE FONCTIONNEMENT..... - 25 -

- I. Circuit fluidique - 25 -
 - 1. Le circuit gaz..... - 25 -
 - a. Les organes constitutifs du circuit ou panoplie Gaz - 26 -
 - b. Fonctionnement..... - 26 -
 - c. Système d'alimentation en gaz - 27 -
 - d. Rampe et bloc gaz - 29 -
 - e. Contrôle et sécurité de la rampe de gaz - 31 -
 - i. Contrôle d'étanchéité des vannes par mise en surpression de la chambre intermédiaire - 31 -
 - ii. Contrôle de la vanne de sécurité - 32 -
 - iii. Contrôle de la rampe gaz..... - 33 -
 - 2. Circuit aéraulique..... - 33 -
- II. Circuit électrique - 36 -
 - 1. Le coffret de sécurité..... - 36 -
 - 2. Circuits spécifiques de quelques équipements essentiel dans le four - 37 -
 - a) Sonde d'ionisation - 37 -
 - b) Les électrodes de démarrage - 38 -
 - c) Moteur électrique - 39 -

Chapitre 3 BILAN THERMIQUE.....	- 41 -
I. Débit calorifique produite par le combustible	- 41 -
II. Energie utile pour la cuisson de la charge	- 41 -
III. Calcul de la charge thermique perdue par les parois	- 42 -
1. Loi de FOURIER	- 43 -
2. Résistance thermique des parois	- 43 -
3. Calcul du coefficient de transfert thermique.....	- 44 -
a) A l'extérieur du four	- 44 -
b) A l'intérieur du four	- 45 -
i. Coefficient d'échange de chaleur par convection.....	- 45 -
ii. Coefficient d'échange de chaleur par rayonnement	- 46 -
iii. Coefficient d'échange de chaleur par conduction.....	- 46 -
4. La chaleur totale perdue par les parois.....	- 47 -
IV. Energie emmagasinée dans la masse du four	- 47 -
1. Energie stocké dans la paroi intérieure	- 47 -
2. Energie stocké dans la deuxième paroi	- 49 -
3. Energie total stocké dans tous les parois du four	- 50 -
V. Perte de chaleur par les fumés et l'excès d'air	- 50 -
VI. Bilan calorifique et détermination du débit de combustible.....	- 51 -

Chapitre 4- 52 -Essai de fabrication des materiaux de revetement de notre four.....	- 52 -
I. Essai de fabrication de l'isolant thermique à base de cendre des balles de riz.....	- 52 -
1- Cendre des balles de riz	- 52 -
2- Préparation du silicate de soude.....	- 53 -
a) Dosage en silice et en soude	- 54 -
b) Quantités d'eaux utilisées	- 55 -
3- Dosage en cendre et en silicate de soude	- 55 -

II.	Assai de fabrication du matériau réfractaire	- 57 -
1-	Choix des matériaux	- 57 -
2-	Préparation des matières premières.....	- 57 -
a)	Cendre des balles de riz	- 57 -
b)	Le métakaolin.....	- 57 -
3-	Mise en œuvre.....	- 58 -

RESULTATS

I.	BILAN CALORIFIQUE	- 59 -
1-	Energie utile	- 59 -
2-	Chaleur total perdue au niveau des parois	- 59 -
3-	Energie stocké dans les parois du four.....	- 60 -
4-	Energie perdu par l'évacuation des fumées	- 60 -
5-	Détermination de la masse de combustible.....	- 61 -
6-	Puissance des brûleurs	- 61 -
7-	Quantité d'air nécessaire à la combustion.....	- 61 -
8-	Choix de la bouteille à gaz	- 62 -
II.	Resultats sur la realisation des materiaux de revetement	- 63 -
1-	Essais sur les isolants :	- 63 -
a)	Essais mécaniques.....	- 63 -
b)	Essais physiques.....	- 64 -
2-	Essais sur les éprouvettes réfractaires	- 66 -
a)	Essais mécaniques.....	- 67 -
b)	Essais physiques.....	- 68 -
III.	Etude d'impact environnemental et analyse de cycle de vie	- 70 -
1-	Analyse de cycle de vie.....	- 70 -
2-	Facteurs d'émission de CO ₂	- 70 -

IV.	EVALUATION ECONOMIQUE ET COUT DU PROJET.....	- 71 -
1-	Approvisionnement	- 72 -
2-	Stockage des matières premières	- 73 -
3-	Préparation des matières premières.....	- 73 -
4-	Le malaxage et moulage	- 74 -
5-	Séchage et cuisson	- 74 -
II.	Remarques et constatations	- 75 -
1-	Sur le fonctionnement du four	- 75 -
2-	Sur la mise en œuvre des calorifuges.....	- 75 -

CONCLUSION GENERALE

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

ANNEXES

TABLE DES MATIERES

RESUME

Titre: “Conception d’un four à gaz pour la cuisson des céramiques dans des laboratoires”

Présenté et soutenu par : ANDRIAMASIRIMANANA
Mandahery Tsiky Jean Berthin

Rapporteurs : ♦ Docteur RANDRIANARIVELO Frédéric
♦ Docteur RATSIMBAZAFY Hery Mikaela

Adresse de l’auteur : Avaratsena Mandiavato Miarinarivo Itasy

Tél : +26132 97 711 30, +26133 87 209 82

Email : mandahery001@gmail.com

Nombre de pages:80

Nombre de figures:48

Nombre de tableaux: 18



RESUME

Les fours à céramiques sont des fours à haute température pouvant atteindre des températures près de 1600°C. Son pouvoir d'accès à cette marge de température est indispensable pour la fabrication de l'émail, par contre, il doit être capable aussi de travailler à des températures en dessous de 1000°C pour assurer la cuisson parfaite des biscuits.

Les équipements nécessaires à la fabrication du four se divisent en trois parties différentes : il y a les équipements fluidiques et la rampe gaz, puis les dispositifs électriques et de commande, et enfin les éléments d'isolation thermique et de structure du four.

L'étude bibliographique résume l'état des connaissances relatives sur les différents types des fours et les généralités sur les matériaux réfractaires. La partie méthodologie rassemble tous les éléments nécessaires à la conception du four, suivis des résultats expérimentaux obtenus lors de la réalisation des différents essais de mise en œuvre des matériaux de revêtements. La connaissance pratique a mis en évidence les avantages et inconvénients de l'utilisation de ces essais expérimentaux. Le paramètre de qualité, apporte un éclairage sur la faisabilité de notre conception en montrant l'existence d'une fenêtre d'opportunité à saisir.

Mots clés : four, brûleur, température, silicate de soude, réfractaire, isolant thermique.

ABSTRACT

Ceramic ovens are high temperature furnaces with temperatures up to 1600 ° C. Its power of access to this temperature margin is essential for the manufacture of enamel, however, it must also be able to work at temperatures below 1000 ° C to ensure the perfect cooking of cookies.

The equipment needed to manufacture the furnace is divided into three different parts: there are the fluidic equipment and the gas ramp, then the electrical and control devices, and finally the elements of thermal insulation and furnace structure

The bibliographical study summarizes the state of the relative knowledge on the different types of the furnaces and the generalities on the refractory materials. The methodology section brings together all the elements necessary for the design of the furnace, followed by the experimental results obtained during the realization of the various tests for the implementation of insulation materials. Practical knowledge has highlighted the advantages and disadvantages of using these experimental tests. The quality parameter sheds light on the feasibility of our design by showing the existence of a window of opportunity to grasp.

Key words: furnace, burner, temperature, sodium silicate, refractory, thermal insulator.