

III.1. FABRICATION DES MOULES D'UNE FORME SIMPLE CYLINDRIQUE :

Pour élaborer un moule en plâtre, on doit disposer en premier lieu d'un modèle à reproduire. Comme première expérience on utilise une forme simple, qui nous facilitera le paramétrage du processus de moulage par la suite. Cette forme peut être un cylindre rigide (verre, bois, plâtre, fer, plastique...) pourvu qu'il ait une surface lisse (Figure III.1).



Figure III.1 : Forme cylindrique simple (verre).

Le moule d'un cylindre est simple à réaliser car cette forme régulière peut être reproduite à l'aide de deux parties creuses moulant chacune une moitié de l'objet.

Nous allons concevoir ce moule de façon à ce qu'il puisse être utilisé pour reproduire des cylindriques en céramique par la technique du coulage de barbotine.

III.1.1. Matériel nécessaire :

- un objet cylindrique lisse (de la taille d'une coupe en verre par exemple).
- de la terre molle ou de la pâte à modeler.
- 4 planchettes (longueur et largeur = diamètre de votre sphère + 10 cm).
- du plâtre à modeler fin.
- de l'eau.
- un jeu d'élastiques pour maintenir le coffrage.
- un seau en plastique pour gâcher le plâtre.
- une spatule.
- un crayon de papier
- du savon liquide.

- un pinceau.
- une éponge.
- une racle droite (lame d'acier fine et droite).
- un couteau.
- une balance.
- des billes en verre.
- un plan de travail horizontal bien plat.

III.1.2. Réalisation du moule :

Pour fabriqué le moule en doit suivre trois étapes :

1^{er} Étape :

- a. Tracer des repères pour positionner la pièce modèle au centre d'une planchette.
(Figure III.2).



Figure III.2 : Trace de positionner la pièce modèle (verre) d'une planchette.

- b. Prendre une boule de terre ou de pâte à modeler, poser au centre du plan de travail et y asseoir solidement (en pressant) le cylindre (verre) contre la planchette. En doit prendre soin à éliminer la matière excédentaire de manière à ce que le tracé de sa circonférence soit parfait. (Figure III.3).



Figure III.3 : Fixer la pièce modèle sur l'entourage tracé.

c. Savonnage :

Pour que le plâtre ne colle pas lors du moulage sur la tasse et éviter d'endommager l'empreinte ou le dispositif, il est nécessaire d'enduire les surfaces d'un agent de démoulage, ici nous emploierons une solution aqueuse de savon.

Le savon est gras, en séchant il laissera sur les objets une couche ayant l'aspect de la cire. Ce corps gras empêchera l'adhérence du plâtre et il neutralisera aussi la porosité des surfaces absorbantes.

d. Coffrage :

Utiliser 4 planchettes maintenues par des élastiques. La précision de la géométrie de ce dispositif doit être la meilleure possible. Les planchettes doivent être savonnées sur la face en contact avec le plâtre. L'étanchéité du dispositif sera assurée par des colombins de terre ou de pâte à modeler disposés à l'extérieur du coffrage si les planchettes ne joignent pas parfaitement (Figure III.4).



Figure III.4 : Les 4 planchettes utilisées.

e. Préparation du plâtre :

Prendre un récipient proportionné avec le volume à préparer. C'est important car si vous prenez un seau trop grand pour préparer un petit volume cela vous posera des problèmes pour remuer convenablement le mélange. Faire en sorte que le volume à préparer occupe au moins 50 à 75 % du volume du récipient.

Battre le plâtre et l'eau avec un fouet jusqu'à obtenir un mélange homogène et lisse. Remuer lentement par alternance avec la spatule pour faire remonter les bulles d'air en surface. Procéder ainsi quelques minutes jusqu'à noter une légère modification de la fluidité du mélange qui s'épaissit. C'est le moment de couler le plâtre.

Versez-le doucement pour qu'il chasse bien l'air dans tous les recoins ou il doit pénétrer. Lorsque le niveau (tracé du milieu de la pièce) de remplissage est atteint, cesser le remplissage et égaliser la surface du plâtre coulé en tapotant légèrement la surface avec le pinceau.

f. Prise du plâtre :

La prise du plâtre peut être variable, selon la température, l'âge du plâtre, sa qualité, la nature de l'eau, le temps de délayage, etc... La réaction de prise correspond à la cristallisation du plâtre en gypse sous l'effet de l'hydratation. Cette réaction qui correspond à un niveau d'énergie plus bas des matériaux libère de la chaleur et le plâtre en durcissant s'élève progressivement en température jusqu'à atteindre 34 ou 35°C. Cette transformation s'accomplit avec une variation dimensionnelle (gonflement) qui dilate légèrement l'empreinte réalisée, ce qui dans notre cas va favoriser le démoulage de notre cylindre puisque le plâtre qui l'enserme va devenir légèrement plus grand qu'elle. Lorsque la chauffe (cristallisation du gypse) est passée par son maximum la prise est finie.

2^{ème} Étape : LA Première Partie du Moule :

- Nettoyons la coupe de verre et les planchettes avec une éponge.
- Savonnons la coupe de verre et les planchettes.
- Refaire le coffrage (Figure III.5).



Figure III.5 : Nettoyage et savonnage le coup verre et les planchettes.

- préparer et couler le plâtre (remplir jusqu'a de l'axe horizontal du cylindre (la coupe de verre) (Figure III.6).



Figure III.6 : Couler le plâtre (remplir jusqu'a de l'axe horizontal du cylindre (la coupe de verre)).

- Avant que le plâtre ne sèche, on pose deux billes en verre sur la surface rectifiée dans deux angles opposés à mi-distance entre le verre et le bord de l'enterrage. Les billes ont pour rôle d'assurer un bon positionnement respectif des deux parties du moule. Les billes améliorent ce rôle en permettant une fermeture plus rigide. Ils sont rapidement mis en place et offrent un gain de temps appréciable. (Figure III.7).



Figure III.7 : Poser deux billes en verre.

- Après le séchage de la première partie du moule, on retire les billes. (Figure III.8).



Figure III.8 : La première partie du moule.

3^{ème} Étape : LA DEUXIÈME PARTIE DU MOULE :

- Nettoyer le haut du reste du moule, puis savonner le dispositif et la couche supérieur du premier moule.
- Préparer et couler le plâtre (remplir jusqu'à la limite) (Figure III.9).



Figure III.9 : Couler le plâtre (remplir jusqu'à la limite).

- Après la prise, on ôte le coffrage. Ouvrir les deux parties du moules avec la lame du couteau. Extraire le verre. Faire un chanfrein sur les arêtes du moule pour qu'elles soient moins fragiles (Figure III.10).



Figure III.10 : Le moule fabriqué.

III.1.3. Séchage :

Après réalisation de plusieurs moules, on procède au séchage. Pour pouvoir utiliser ces moules, il faut les mettre à sécher dans un endroit chaud et ventilé pendant quelques jours. (Par exemple posé les moules fabriqué dans un four réglable à 105°C). (Figure III.11).



Figure III.11 : Séchage des moules.

III.2. REALISER UNE BARBOTINE DE COULAGE :

Une barbotine de coulage permet de réaliser des pièces à partir des moules en plâtre ou en résine poreuse en plusieurs parties, ouverts ou fermés.

La prise de la barbotine sur les parois du moule nécessite que celui-ci absorbe l'eau contenue par cette pâte liquide. Un moule sera d'autant plus apte à assurer des coulées successives que la quantité d'eau absorbée sera moindre. L'épaisseur de la prise se fera en fonction du temps selon l'humidité du moule, la densité de la barbotine, les capacités filtrantes de la pâte déposée et ses propriétés rhéologiques.

La liquéfaction de la barbotine avec très peu d'eau s'obtient en utilisant des électrolytes (des défloculants) : le carbonate de sodium et le silicate de sodium. Ces produits doivent être utilisés en très petite quantité car ils contribuent à dégrader le plâtre des moules. L'augmentation de leur quantité agit également sur l'allongement du temps de prise.

Pour y parvenir, nous apportons deux mélanges de barbotine :

- 1^{er} mélange : une barbotine en argile pur.
- 2^{ème} mélange : une barbotine composé (argile, kaolin, sable, talc, silicate sodium, bicarbonate de sodium).

III.2.1. Barbotine en argile pur :

III.2.1.1. Matière première utilisé :

- Argile de la région de Mila avec des propriétés inconnue.
- L'eau (voir la Figure III.12).



Figure III.12 : La matière première argile (mila).

III.2.1.2. Préparation de mélange à couler :

Mélanger 1kg d'argile avec 1 litre d'eau, le mélange doit être homogène (Figure III.13).



Figure III.13 : Barbotine d'argile pure.

III.2.1.3. Le Coulage :

Le procédé de coulage utilisé dans ce travail est le coulage en ciel ouvert.

- **Etapes de coulage :**

- Monter les deux parties des moules l'un contre l'autre (10 moules) et les attacher avec des élastiques (Figure III.14).



Figure III.14 : les moules préparer.

- Couler le mélange dans les moules fabriqué (Figure III.15).



Figure III.15 : le coulage en ciel ouvert.

- Choisir un temps de couler d'un pas de 5 minutes (5min, 10min, 15min,.....50min) (voir Figure III.16).



Figure III.16 : le temps de couler.

- Chaque 5 minute on décharge un moule de la barbotine excédentaire, et on laisse sécher un peu (Figure III.17).



Figure III.17 : Décharge un moule chaque 5 minute.

- Démouler les moules et extraire les pièces (Figure III.18).



Figure III.18 : les pièces préparer.

III.2.1.4. Séchage :

Les pièces démoulé (biscuit) sont introduites dans une étuve a une température de 105°C pour faire disparaître l'eau de façonnage. (Figure III.19).



Figure III.19 : Séchage des biscuits.

III.2.1.5. Propriétés des biscuits avant le frittage (mélange 1^{er}) :

III.2.1.5.1. La densité apparente :

Pour calculer la densité apparente selon la relation : (Tableau III.1).

$$da = \frac{P}{V} \quad (III.1)$$

P : le poids sec de l'échantillon.

V : le volume de l'échantillon. (Un cône incomplet : $V = 1/3 \cdot \pi (R_1^2 + R_1 \cdot R_2 + R_2^2) \cdot h$).

III.2.1.5. Dimensions des biscuits :

1. (L'épaisseur, poids, diamètre, la hauteur). (Tableau.III.1).

Temps (min)	L'épaisseur (mm)	Poids (g)	Diamètre (mm)		La hauteur (mm)	Densité (kg/m ³)
			base	haut		
5	2.75	42.86	41.4	48	56.06	492.07
10	3.63	55.73	41.41	48.65	55.94	629.71
15	4.66	63.68	41.39	46.90	55.31	758.09
20	5.15	74.17	41.36	46.11	55.79	891.46
25	5.95	79.88	41.26	45.80	55.27	971.71
30	6.50	85.49	41.59	46.40	55.83	1011.71
35	7.14	87.84	41.15	46.09	55.82	1057.03
40	7.39	93.13	41.26	46.77	55.19	1115.32
45	7.89	96.60	41.31	45.44	55.37	1186.73
50	8.40	100.17	40.99	48.68	56.16	1189.66

Tableau.III.1 : Propriétés des biscuits (mélange 1^{er}).

III.2.2. Deuxième mélange : une barbotine composé :

III.2.2.1. Matière première utilisé :

La pâte à partir de laquelle on prépare la barbotine doit contenir suffisamment d'argileux (matières colloïdales telles qu'argiles et kaolins). De très bons résultats sont réalisables à partir de 40% d'argileux selon les matières les plus courantes.

- Argile.
- Kaolin.
- Sable.
- Talc.
- Silicate sodium.
- Bicarbonate sodium.
- L'eau.

Les Ingrédients : (voir la Figure.III.20) Les Ingrédients :

- Argile 450g.
- Kaolin 200g.
- Sable 280g.
- Talc 50g.
- Silicate de sodium 10g.
- Bicarbonate de sodium 10g.

- Le total des matières utiliser 1kg.



Figure.III.20 : Les ingrédients dès les matières premières utilisées.

Mélanger 1kg composants précédents avec 1litre de l'eau, Le mélange des ingrédients doit être homogène Jusqu'à ce qu'il devienne l'état de crème.

Kaolin : Le kaolin utilisé est extrait d'un gisement de Djebel Debbagh, situé à 35 Km au nord-ouest de la ville de GUELMA (Nord-Est de l'Algérie). Cette argile kaolin tique contient environ 38 % en masse d'alumine et près de 40% de silice et présente une perte au feu de l'ordre de 17%. Cette dernière est essentiellement causée par la présence de l'eau structurale et des impuretés organiques. Les roches utilisées sont d'une couleur grisâtre. Cette coloration est due à la présence, dans sa composition chimique, d'un certain nombre d'éléments colorateurs (Fe, Ti,).

Composition chimique (%)													
SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃	K ₂ O	Na ₂ O	TiO ₂	MnO	P ₂ O ₅	Cr ₂ O ₃	P.F	Total
39.87	38.36	1.14	0.78	0.24	0.45	0.20	0.48	0.02	0.46	0.02	0.01	17.27	99.69

Tableau.III.2 : Composition chimique de kaolin.

Le carbonate de sodium : se présente sous forme d'une poudre blanche, de poids moléculaire 105,99 g. Il est peu soluble dans l'eau froide. Pour l'introduire dans une composition de barbotine il faudra donc le dissoudre dans de l'eau chaude (50-60°C). Ce sel à une action défloculante très lente par contre il permet d'agir sur la thixotropie en donnant une certaine rigidité à la suspension au repos. Le carbonate sera donc utilisé en petites quantités (0,04 à 0,10 % de la masse sèche à défloculer) pour régler la thixotropie de la barbotine. On l'introduira entièrement dès le départ de la préparation en l'ajoutant dissout dans l'eau de délayage avant d'y mettre les matières.

Le silicate de sodium se présente à l'état liquide, il est translucide et incolore. La qualité la plus courante est la densité 37-38 °Baumé qui correspondent à une densité de 1.3448 à 1.3574 par rapport à l'eau. L'action du silicate est très rapide, elle fluidifie la barbotine et son effet persiste assez longtemps de sorte que la thixotropie se manifeste peu avec cet électrolyte utilisé seul. Les quantités utilisées sont inférieures à 1% de la masse sèche, plus généralement comprises vers 0,20 à 0,60 %. Lorsque l'on connaît approximativement la dose nécessaire pour défloculer une pâte, on introduit 50 à 75 % du silicate dans l'eau de délayage avec tout le carbonate. Le reste du silicate sera ajouté par petites doses entre les contrôles de densité et de viscosité au moment de la mise au point.

III.2.2.2. Le Coulage :

Même méthode de coulée et la même méthode utilisée précédemment.

III.2.2.3. Séchage : Même procédure.



Figure.III.21 : Séchage des biscuits.

III.2.2.4. Propriétés des biscuits avant le frittage (2^{ème} mélange) : (Tableau III.3).

Temps (min)	L'épaisseur (mm)	Poids (g)	Diamètre (mm)		La hauteur (mm)	Densité (kg/m ³)
			base	haut		
5	2.74	36.89	43.42	48.79	58.92	376.81
10	3.57	49.78	43.02	50.22	57.58	513.72
15	4.74	59.13	42.63	49.14	58.00	618.51
20	5.36	66.13	42.60	49.54	57.82	688.13
25	5.81	72.79	42.70	47.68	57.23	796.38

Tableau.III.3 : Propriétés des biscuits (mélange composé).

III.3. Frittage :

Le frittage des échantillons est réalisé dans un four électrique (voir la figure III.22). Une température réglable jusqu'à 980°C. Les échantillons ont été frittés sous air statique à différentes températures et dans les conditions suivantes :

- Vitesse de chauffe.
- Temps de maintien variable (différentes durées).
- Refroidissement « dans le four en arrêt » jusqu'à la température ambiante.



Figure.III.22 : frittage des échantillons.

III.3.1. Cycle de frittage :

- 20 - 250 °C : 3 heures.
- 250 - 560 °C : 3 heures.
- 560 - 760 °C : 1 heure.
- 760 - 980 °C : 1 heure 30 minutes.
- 980 - 980 °C : 15 minutes de palier.

III.3.2. Propriétés des biscuits après le frittage (1^{er} mélange) : (Tableau III.4).

Temps (min)	L'épaisseur (mm)	Poids (g)	Diamètre (mm)		La hauteur (mm)	Densité (kg/m ³)
			base	Haut		
5	2.63	35.94	41.10	46.89	55.46	428.36
10	3.38	46.57	41.05	48.20	55.55	536.52
15	4.18	53.42	39.92	45.63	54.63	646.73
20	4.90	62.24	41.00	46.08	54.60	767.44
25	5.45	67.07	40.76	44.42	54.64	866.53
30	5.66	71.80	40.70	44.90	55.14	910.01
35	6.86	73.86	40.54	43.77	53.87	991.40
40	7.00	78.30	40.72	45.63	54.81	978.75
45	7.55	81.23	40.90	44.01	54.16	1064.61
50	7.98	84.28	40.41	47.67	54.90	1008.13

Tableau III.4 : Propriétés des biscuits (1^{er} mélange).**2^{ème} mélange :**

Temps (min)	L'épaisseur (mm)	Poids (g)	Diamètre (mm)		La hauteur (mm)	Densité (kg/m ³)
			base	Haut		
5	2.37	32.67	43.39	48.43	58.53	338.90
10	3.53	44.02	42.80	49.75	57.23	458.54
15	4.15	52.38	42.60	48.91	57.88	551.94
20	5.12	58.56	42.45	47.98	57.06	642.81
25	5.39	64.46	42.49	46.95	57.17	724.26

Tableau III.5 : Propriétés des biscuits (2^{ème} mélange).

- **Retrait de l'épaisseur :** Courbe représentatif de l'épaisseur = f (temps) 1^{er} mélange (Figure.III.23).

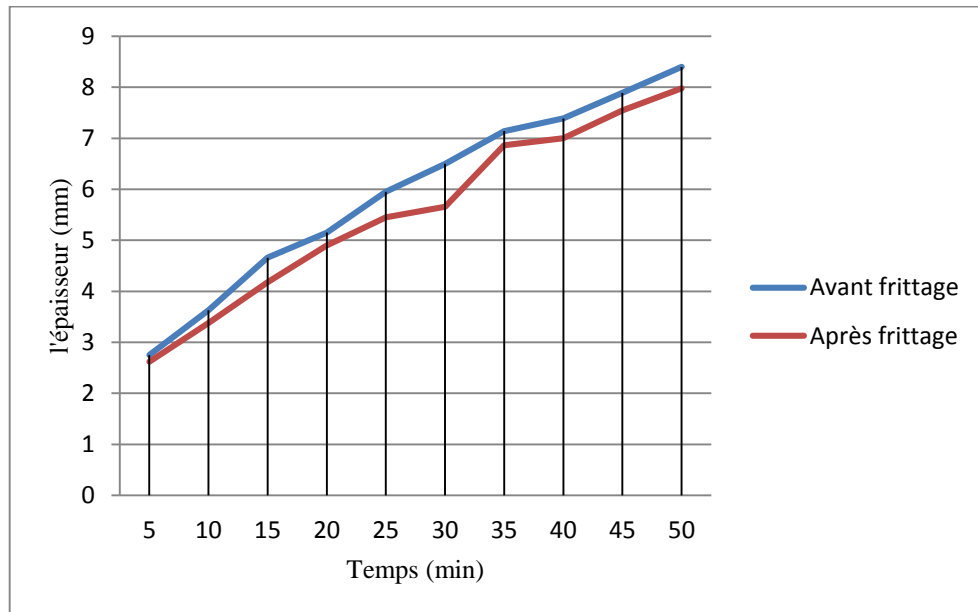


Figure.III.23 : Courbe de Retrait de l'épaisseur avant et après le frittage 1^{er} mélange.

- **Retrait de l'épaisseur :** courbe représentatif de l'épaisseur = f (temps) 2^{ème} mélange (Figure.III.24) :

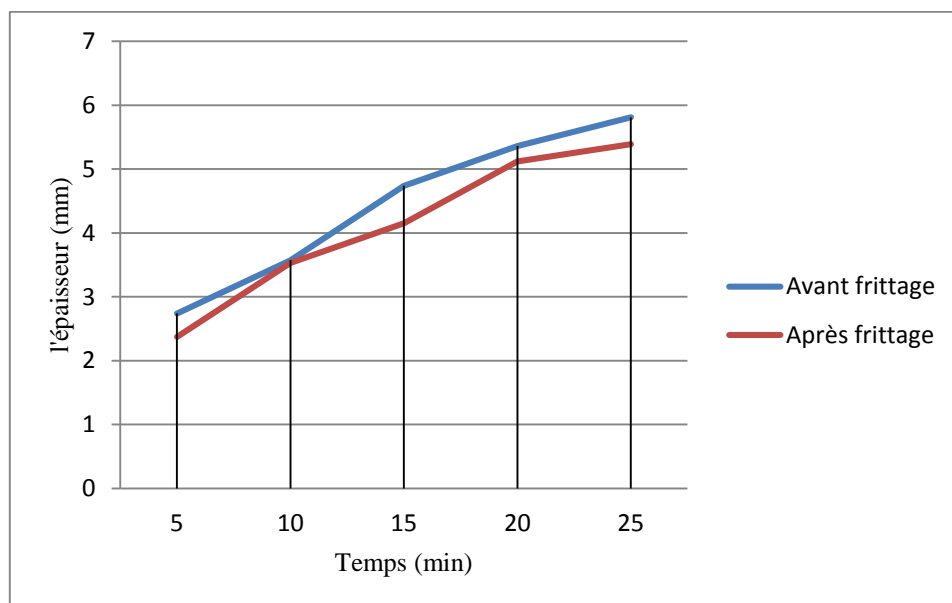


Figure.III.24 : Courbe de Retrait de l'épaisseur avant et après le frittage 2^{ème} mélange.

- **Retrait poids** : Courbe poids=f (temps) 1^{er} mélange (Figure.III.25).

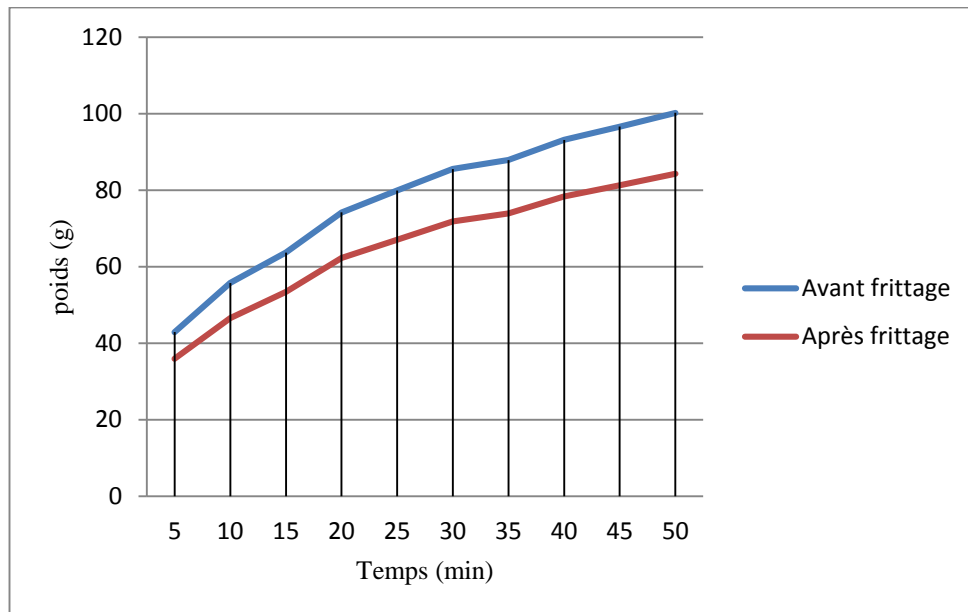


Figure.III.25 : Courbe de retrait de poids avant et après le frittage 1^{er} mélange.

- **Retrait poids** : Courbe poids=f (temps) 2^{ème} mélange (Figure.III.26).

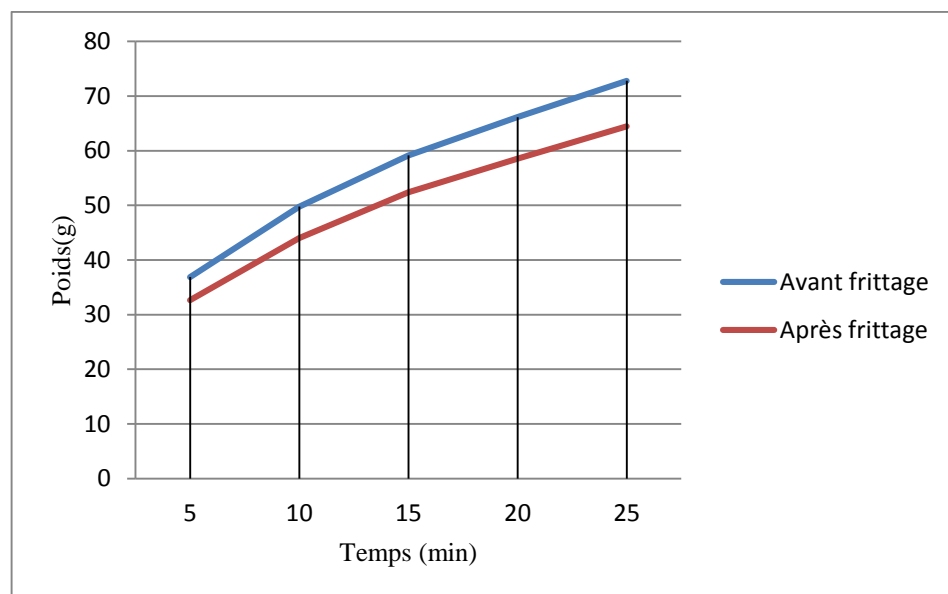


Figure.III.26 : Courbe de retrait de poids avant et après le frittage 2^{ème} mélange.

- **Retrait hauteur** : Courbe hauteur= f (temps) 1^{er} mélange (Figure.III.27).

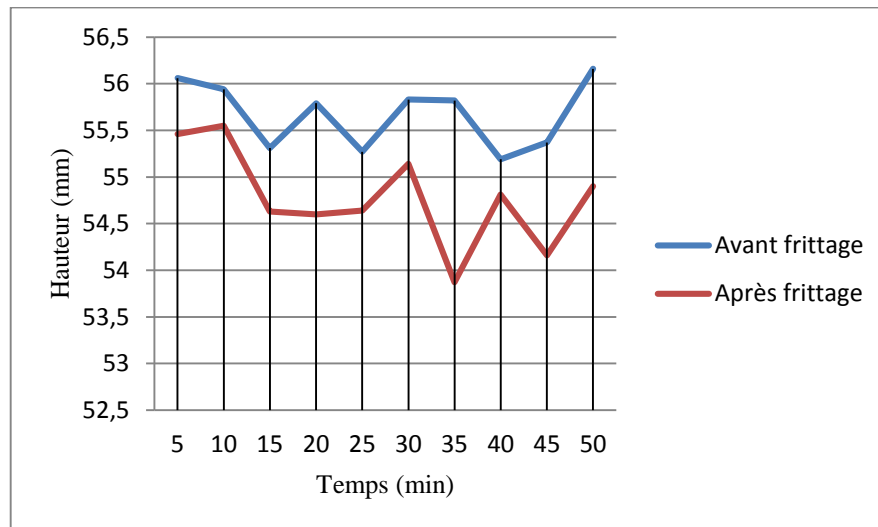


Figure.III.27 : Courbe de retrait de hauteur avant et après le frittage 1^{er} mélange.

- **Retrait hauteur** : Courbe hauteur= f(temps) 2^{ème} mélange (figure.III.28).

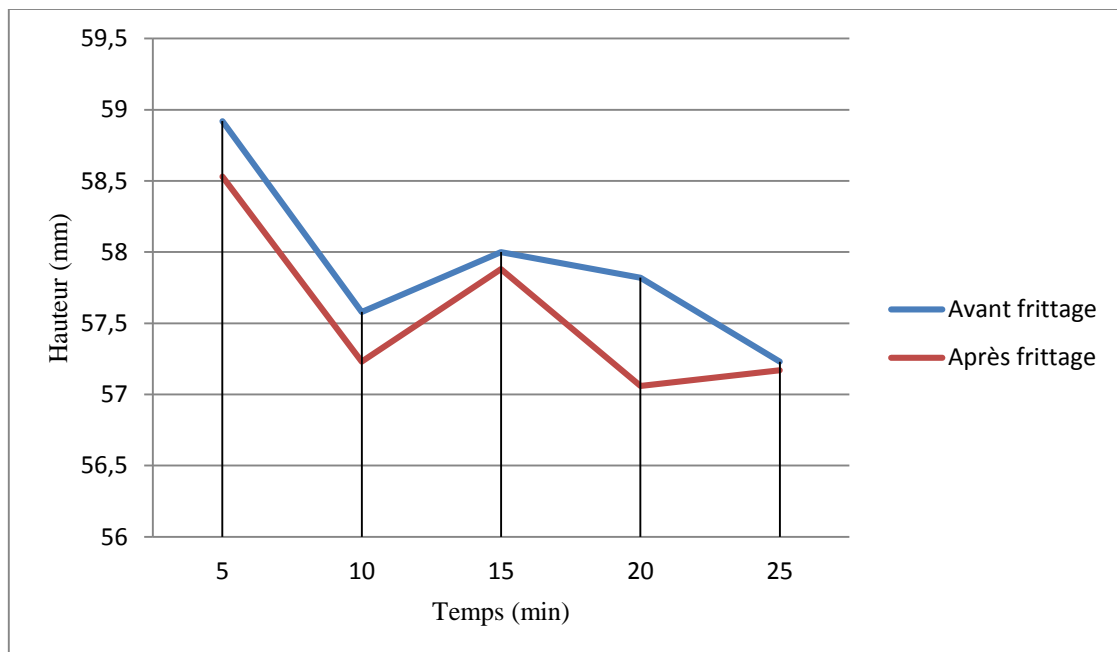


Figure.III.28 : Courbe de retrait de hauteur avant et après le frittage 2^{ème} mélange.

- **Retrait diamètre :** Courbe diamètre (base)= f(temps) 1^{er} mélange (figure.III.29).

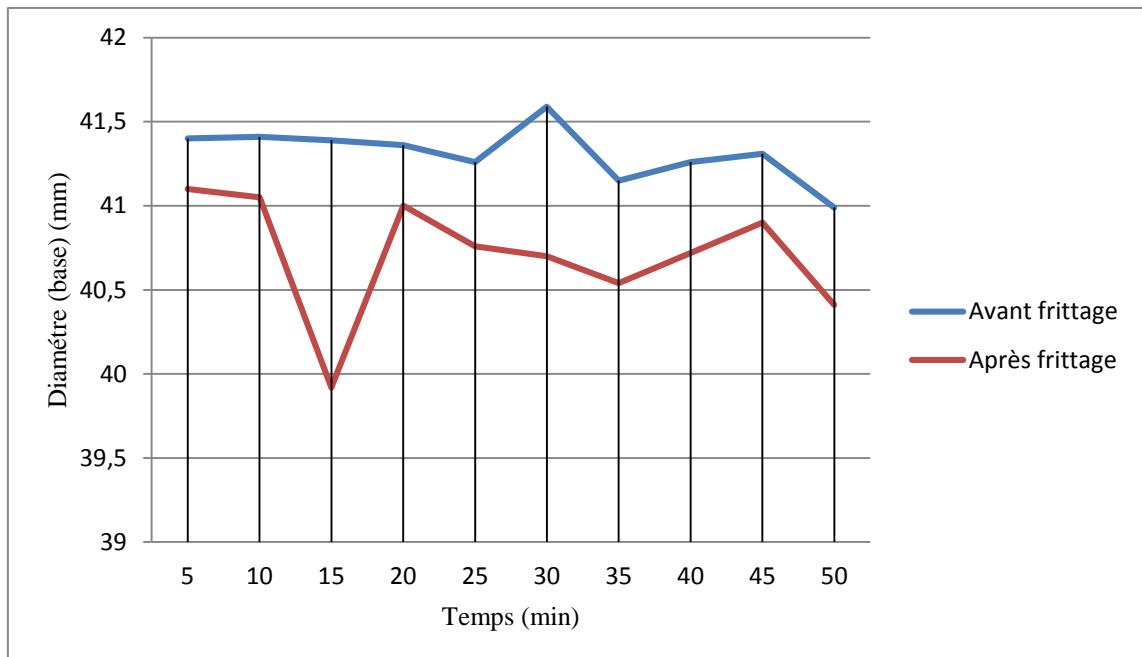


Figure.III.29 : Courbe de retrait de diamètre (base) avant et après le frittage 1^{er} mélange.

- **Retrait diamètre :** Courbe diamètre (haut)= f (temps) 1^{er} mélange (figure.III.30).

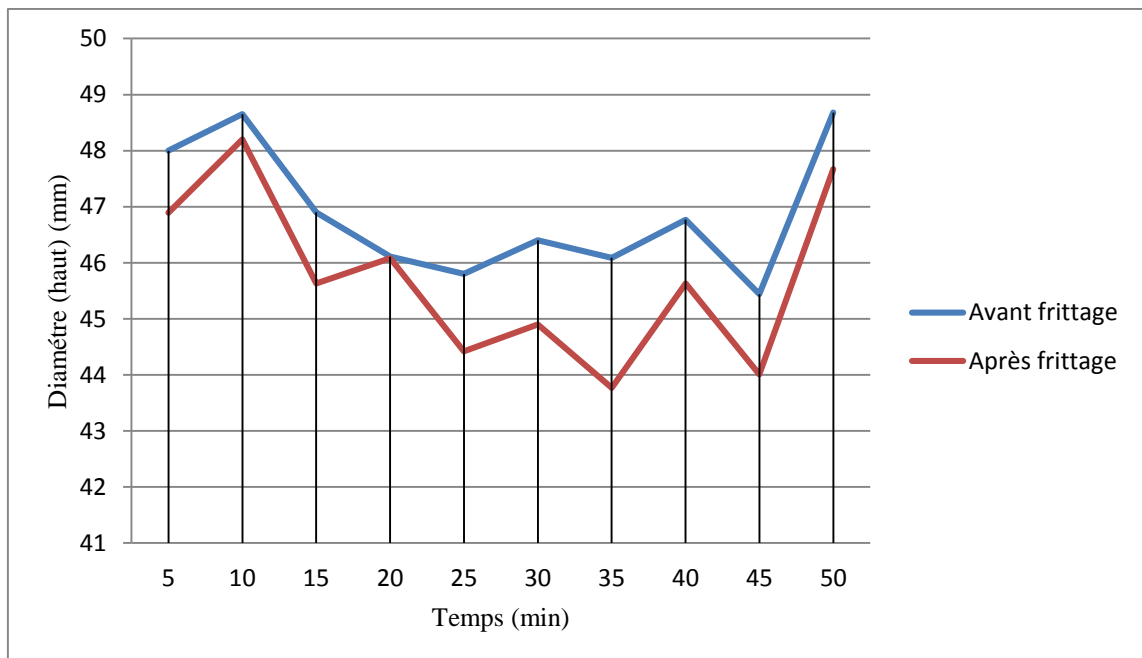


Figure.III.30 : Courbe de retrait de diamètre (haut) avant et après le frittage 1^{er} mélange.

- **Retrait diamètre :** Courbe diamètre (base)= f (temps) 2^{ème} mélange (figure.III.31).

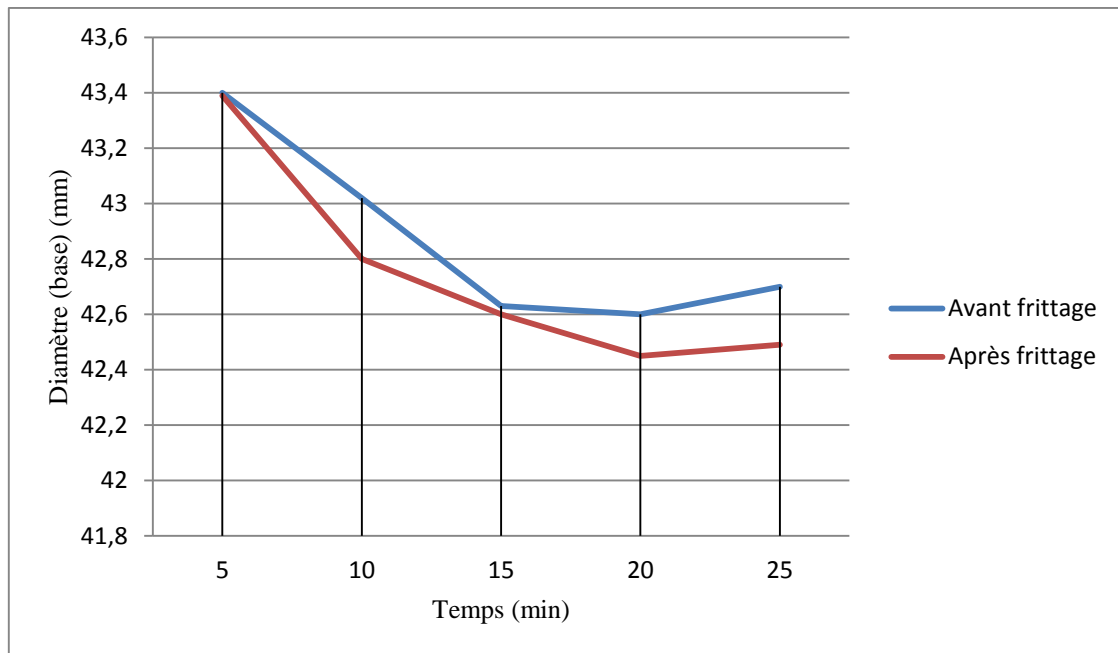


Figure.III.31 : Courbe de retrait de diamètre (base) avant et après le frittage 2^{ème} mélange.

- **Retrait diamètre :** Courbe diamètre (haut)=f (temps) 2^{ème} mélange (figure.III.32).

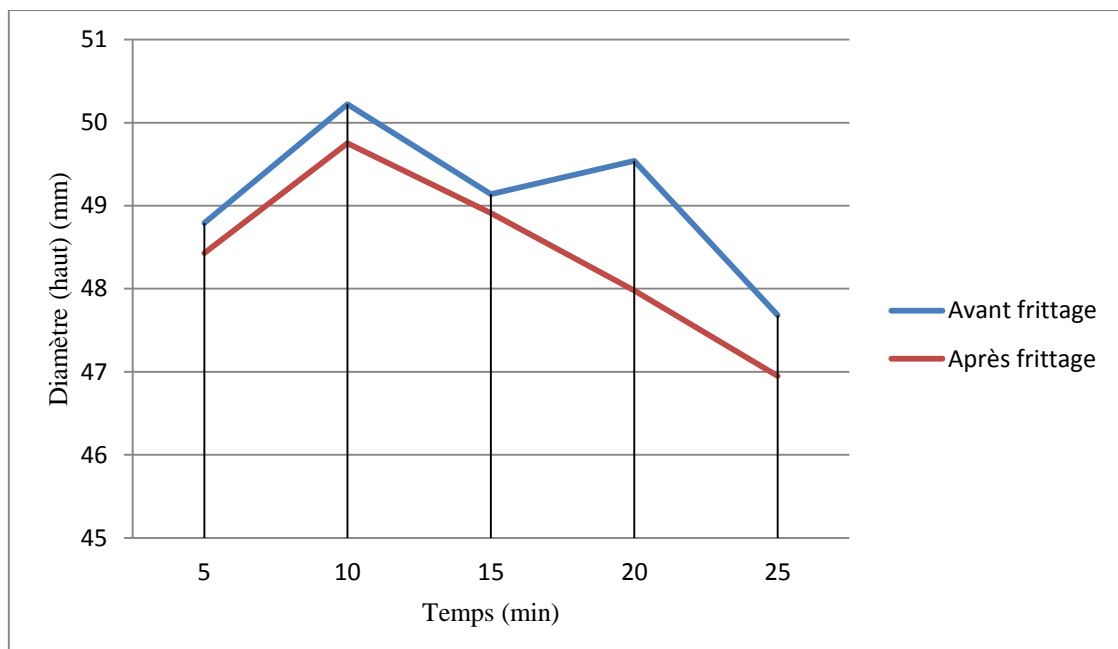


Figure.III.32 : Courbe de retrait de diamètre (haut) avant et après le frittage 2^{ème} mélange.

- **Retrait densité :** Courbe densité = $f(\text{temps})$ 1^{er} mélange (figure.III.33).

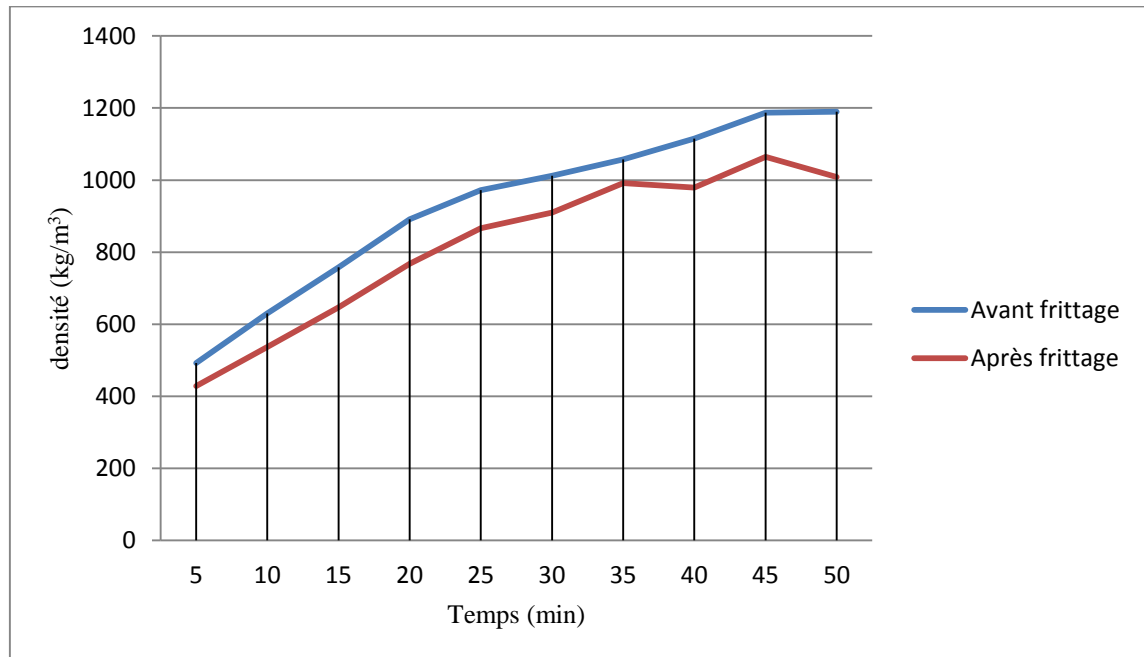


Figure.III.33 : Courbe de retrait de densité avant et après le frittage 1^{er} mélange.

- **Retrait densité :** Courbe densité = $f(\text{temps})$ 2^{ème} mélange (figure.III.34).

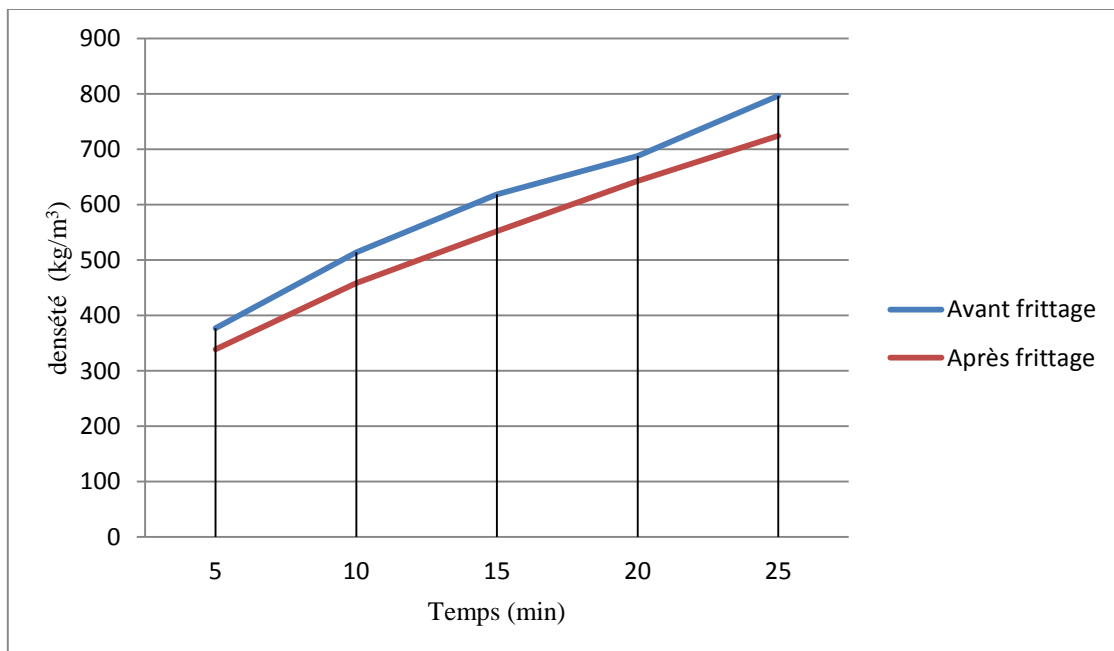


Figure.III.34 : Courbe de retrait de densité avant et après le frittage 2^{ème} mélange.

III.4. DISCUSSION DES RÉSULTATS :

1. L'influence du temps de coulage sur les paramètres des céramiques avant et après le frittage :

Comme vu précédemment dans les tableaux, le temps de coulage a un effet remarquable sur les paramètres des céramiques (le poids, l'épaisseur, le diamètre, longueur).avec les deux mélanges en proportions variables avant et après le frittage. La définition du temps de coulage nous permet de déterminer par exemple l'épaisseur d'une pièce finie.

2. Interprétation graphique des courbes de retrait avant et après le frittage :

Dans le cas où on utilise le procédé de coulage en barbotine pour produire des pièces, on ne doit pas oublié de prendre en compte le retrait de cuisson et de séchage de nos pièces dans les dimensions du modèle à mouler.

C'est important car le retrait total d'une pâte céramique travaillée par coulage de barbotine va de 4% (Faïence) à 14% (Porcelaine). Les objets dont on utilise comme modèle de moulage devront être agrandis pour compenser ce retrait et retrouver après cuisson la taille désirée.

Comme vu précédemment dans les courbes représentatives du retrait des deux mélanges, nous constatons une remarquable différence avant et après le frittage.

3. Optimisation de mélange :

Le meilleur des deux mélanges est le 2^{ème}, d'où nous constatant un faible retrait par rapport au premier. L'addition d'éléments dégraissant tels que le sable permet de diminuer le retrait et l'addition d'autres éléments permet d'améliorer les propriétés des céramiques.