République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique
Université Yahia FARES de MÉDÉA
Faculté des Sciences et de la Technologie
Département de Génie mécanique

Mémoire de Master

En vue de l'obtention du diplôme de

Master en Génie mécanique

Option : Ingénierie Des Matériaux et des surfaces

Thème

Étude de comparaison des différents procédés de noyautage utilisé à l'unité fonderie de Berrouaghia

Présenté par :

Mr : BENZERGA Abderrahim & Mr : LOUZRI Yahia

Proposé et Dirigé par :

Dr : HABIRECHE Mohamed

Année Universitaire 2022-2023

Remerciements

Toute la gratitude et le merci à «Allah» le tout puissant pour nous avoir donné le courage et la force pour mener et terminer ce travail.

Nous remercions également nos parents pour les sacrifices qu'elles ont faits pour que nous terminions nos études.

En achevant ce modeste travail nous tenons à remercier notre encadreur : ***« Dr Habireche mohamed »*** *pour ses encouragements.*

Sans oublier notre enseignante, ***« Rabhi Salma »*** *pour tous ses conseilles.*

Nous tenons également à adresser nos plus vifs remerciements, à toute l'équipe d'unité de fonderie poval de berrouaghia, spécialement : ***« Mr Seghir Aissa Mahmoud »*** *et* ***« Mme Benchoucha »*** *qui nous ont accompagnées avec beaucoup de patience et de professionnalisme.*

Nous prions tous nos enseignants de génie mécanique qui ont assuré notre formation, de trouver ici l'expression de notre reconnaissance pour leur sérieux, la qualité de leurs cours et l'intérêt qu'ils nous témoignaient au cours de notre cursus universitaire à la faculté de technologie ***« YAHIA FARES »*** *de Médéa.*

Toute nos gratitude aux membres de jury qui nous ferons l'honneur de juger notre travail. A tous ceux et toutes celle qui ont contribué de près ou de loin à l'élaboration de ce projet.

DEDICACE

Avec l'aide de «Allah» tout puissant et tous les gens qui m'aiment et qui m'ont soutenue j'ai pu achever ce travail que je dédie à :

- *A mes chers parents qui tiennent une place immense dans mon cœur, Vous avez toujours été là pour moi, et à aucun moment, vous n'avez cessé de m'encourager.*

- *A Mon chères frères Mohammed et Hamza pour son soutien tout au long de mon parcours universitaire.*

- *A toute ma famille surtout ma chère tante Djamila.*

Que ce travail soit l'accomplissement de vos vœux tant allégués, et le fuit de votre soutien infaillible, Merci d'être toujours là pour moi.

- *A Nahla et tous mes amis et collègues, en particulier mes chers amis Hamza et Sofiane, à mon cher ami dans ce travail, Abderrahim, à tous ceux qui m'ont aidé de près ou de loin.*

Que «Allah» me les garde pour toujours (inchallah).

Yahia

DEDICACE

Avec l'aide de «Allah» tout puissant et tous les gens qui m'aiment et qui m'ont soutenue j'ai pu achever ce travail que je dédie à :

- *à mes chers parents qui tiennent une place immense dans mon cœur, Vous avez toujours été là pour moi, et à aucun moment, vous n'avez cessé de m'encourager.*

- *A mes cher sœurs pour son soutien tout au long de mon parcours universitaire.*

- *A Ma chère tante Karima.*

Que ce travail soit l'accomplissement de vos vœux tant allégués, et le fuit de votre soutien infaillible, Merci d'être toujours là pour moi.

- *A khouloud et tous mes amis marouane, hamza, souhaib, et mes collègues du classe Sofiane, hamza, lakhder, sabbah à mon cher ami dans ce travail, Yahia, à tous ceux qui m'ont aidé de près ou de loin.*

Que «Allah» me les garde pour toujours (inchallah).

Abderrahim

دراسة مقارنة لعمليات صنع اللب المختلفة المستخدمة في وحدة المسبك بالبرواقية

ملخص العمل:

تلخص هذه الأطروحة العمل الذي تم إنجازه في إطار مشروع نهاية الدراسة في شركة بوفال بالبرواقية، تمت المهمة في مختبر وحدة الصهر. كان الهدف الرئيسي للمشروع هو مقارنة عمليات صنع النوى المختلفة المستخدمة في وحدة الصهر بالبرواقية.

ركز البحث على عدة جوانب، بما في ذلك التوصيف الميكانيكي للنوى باستخدام ثلاثة عمليات موجودة باستخدام اختبار الانحناء، بالإضافة إلى ذلك تم تصنيع قطع باستخدام عمليات صنع النوى الثلاثة المستخدمة في الشركة المضيفة.

شملت الدراسة التجريبية عدة تحاليل، مثل تحليل الرمل الجديد، وقياس الكثافة لرمل كرونينغ وقياس معامل سيليكات الصوديوم. تم أيضًا تقييم قابلية إزالة النوى لكل عملية.

أخيرًا، تمت مقارنة النتائج المستخلصة من هذه التحاليل بين العمليات المختلفة لصنع النوى لتحديد المزايا والعيوب لكل منها.

تقدم هذه الدراسة تحليلاً شاملاً لعمليات صنع النوى المستخدمة في وحدة الصب بالبرواقية، مع التركيز على التوصيف الميكانيكي وأداء العمليات المختلفة.

الكلمات المفتاحية : صنع النوى، القولبة، السباكة، سيليكات الصوديوم، كرونينغ، فيرانيك، إزالة النوى.

Étude de comparaison des différents procédés de noyautage utilisé à l'unité fonderie de Berrouaghia

Résume :

Cette thèse présente le travail réalisé lors d'un projet de fin d'études au sein de la société POVAL située à Berrouaghia. Le stage s'est déroulé au laboratoire de l'unité de fonderie. L'objectif principal du projet était de comparer les différents procédés de noyautage utilisés dans l'unité de fonderie de Berrouaghia.

Le travail de recherche s'est concentré sur plusieurs aspects, notamment la caractérisation mécanique des noyaux par trois procédés existants en utilisant l'essai de flexion. De plus, des pièces ont été fabriquées en utilisant les trois procédés de noyautage utilisés dans l'entreprise d'accueil.

L'étude expérimentale comprenait plusieurs analyses, telles que l'analyse du sable neuf, la mesure de la densité en vrac du sable Croning et la mesure du module de silicate de soude. L'aptitude au débourrage des noyaux a également été évaluée pour chaque procédé.

Enfin, les résultats obtenus à partir de ces analyses ont été comparés entre les différents procédés de noyautage afin de déterminer les avantages et les inconvénients de chacun d'entre eux.

Cette étude offre donc une analyse complète des procédés de noyautage utilisés dans l'unité de fonderie de Berrouaghia, en mettant l'accent sur la caractérisation mécanique et les performances des différents procédés.

Mots-clés : Noyautage, Moulage, Fonderie, Silicate de soude, Croning, Furanique, Débourrage.

Comparison study of the different core making processes used at the Berrouaghia foundry unit

Abstract :

This thesis presents the work carried out during an end-of-studies project at the POVAL company located in Berrouaghia. The internship took place in the laboratory of the foundry unit. The main objective of the project was to compare the different core-making processes used in the Berrouaghia foundry unit.

The research work focused on several aspects, including the mechanical characterization of the cores using three existing processes using the bending test. Additionally, parts were manufactured using the three core-making processes used in the host company.

The experimental study included several analyses, such as analysis of new sand, measurement of the bulk density of Croning sand, and measurement of the sodium silicate module. The core shakeout ability was also evaluated for each process.

Finally, the results obtained from these analyses were compared among the different core-making processes to determine their advantages and disadvantages.

Therefore, this study provides a comprehensive analysis of the core-making processes used in Berrouaghia foundry unit, with a focus on mechanical characterization and performance of the different processes.

Keywords: Core-making, Casting, Foundry, Sodium silicate, Croning, Furan, Debonding.

TABLE DES MATIÈRES

Remerciement……..... I
Dédicace…….. II
Résumé……..... III
La liste des figures……..… VI
La liste des tableaux……... V
Introduction générale……..…… 01

Chapitre I : Recherche bibliographique

I. Recherche bibliographique …….. 02
I.1 Contexte de la recherche…… 02
I.2 Problématique de la mémoire……... 02
I.3 Les objectifs de la mémoire ……. 03
I.4 La Méthodologie de la mémoire ……. 04
I.5 Présentation de l'organisme d'accueil …….. 05
I.5.1 Historique et mission de l'entreprise……... 05
I.5.2 Objectifs de l'entreprise…….. 05
I.5.3 Organigramme de l'entreprise…… 06
I.5.3.1 Organigramme général de POVAL…….. 06
I.5.3.2 Organigramme générale de l'unité de fonderie……..... 06
I.5.4 Présentation de la Fonderie …… 06
I.6 Processus de fabrication……...…….. 07
I.6.1 Noyautage……...…… 07
I.6.2 parachèvement……...…….. 14
I.7 Conclusion…….. 15

Chapitre II : Les procédés de noyautage

II. Les procédés de noyautage…… 16
II.1 Introduction……... 16
II.2 Les différents procédés de noyautage……... 17
II.2.1 procédé silicate de soude-CO2…….. 17
II.2.1.2 Descriptif du procédé…….. 17

II.2.1.3 Les avantages et les inconvénients…… 23
II.2.2 Procédé Corning……... 23
II.2.2.2 Descriptif du procédé…… 23
II.2.2.3 Les avantages et les inconvénients…… 26
II.2.3 Procédé furanique (procédé No-back)……... 27
II.2.3.2 Descriptif du procédé…….. 27
II.2.3.3 Les avantages et les inconvénients……... 33
II.3 Préparation des mélanges…….. 33
II.4 Classification des procédés de noyautage…… 34
II.7 Conclusion…… 36

Chapitre III : Résultat et Interprétation

III. Résultat et Interprétation …… 37
III.1 Introduction……... 37
III.2 Analyse du sable neuf…….. 37
III.2.1 Déterminer de la teneur en eau d'un sable neuf……... 37
III.2.2 Détermination de la perte au feu…….. 38
III.2.3 Détermination de la répartition granulométrique de sable neuf……... 39
III.2.4 Détermination de la fraction basique…… 42
III.3. Résultats expérimentaux pour chaque procédé de noyautage…… 46
III.3.1 Procédé silicate de soude-CO2…… 46
III.3.3 Procédé croning…… 59
III.3.4 Procédé furanique (procédé No-back)…….. 69
III.4 Comparaison entre les procédés de noyautage utilisé à l'unité fonderie de Berrouaghia …… 78
III.5 Conclusion……..… 80
Conclusion générale……..……..…… 82
RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES…… VI

LA LISTE DES TABLEAUX

	Chapitre II : Les procédés de noyautage	
II.1	Changement du comportement des sables au silicate selon le module	19
II.2	Les facteurs fondamentaux et les facteurs fabrication qui influençant le durcissement des résines.	28
II.3	Qualité du résine dépend pourcentage d'alcool furfurylique, l'azote, et l'eau	32
II.4	Classement des principaux procédés de noyautage suivant le mode de prise	35
	Chapitre III : Résultat et Interprétation	
III.1	La répartition granulométrique de sable	41
III.2	Les groupes de sable	43
III.3	Composition de mélange	49
III.4	Résultats de la résistance à la flexion en fonction de temps de stockage	52
III.5	Résultats de la résistance à la flexion en fonction de temps de stockage	64
III.6	Composition de mélange	70
III.7	Résultats de la résistance à la flexion en fonction de temps de stockage	72
III.8	La comparaison entre les trois procédés de noyautage.	79

LA LISTE DES FIGURES

	Chapitre I : Recherche bibliographique	
Figure	**Titre**	**page**
I.1	Organigramme général L'entreprise POVAL SPA	06
I.2	Organigramme de l'unité de fonderie	06
	Chapitre II : Les procédés de noyautage	
II.1	Installation complète de gazage manuel au moyen d'une ventouse	20
II.2	Le noir minéral	21
II.3	Le Farine de bois	21
II.4	Sucre en poudre	22
II.5	Poudre de dextrine	22
II.6	Le cycle d'enrobage à chaud	26
	Chapitre III : Résultat et discussion	
III.1	Photographie du tamiseur utilisé au cours de notre étude	39
III.2	Photographie du balance utilisé au cours de notre étude	40
III.3	Histogramme de la répartition granulométrique	42
III.4	Histogramme représente la variation du diamètre relatif aux groupes de sable	43
III.5	Courbe granulométrique cumulative de refus	44
III.6	photographie d'un malaxeur utilisé au cours de la présente étude	46
III.7	photographie de chronomètre utilisé au cours de notre étude	47
III.8	Photographie de Moule d'éprouvette d'essai mécanique utilisé au cours de notre étude	48
III.9	Photographie de Machine universelle d'essai mécanique pour les sables utilisé au cours de notre étude	48
III.10	Remplissage et compactage du mélange au niveau du moule	50
III.11	Gazage du mélange	50
III.12	Photographie des éprouvettes après le démoulage pour les essais mécaniques	51
III.13	Photographie des éprouvette avant est après l'essai mécanique	51

III.14	La résistance à la flexion en fonction du temps du stockage	52
III.15	Photographie de la boite à noyau utilisé au cours de notre étude	54
III.16	Remplissage et gazage du mélange	55
III.17	Photographie de la noyau sorti de sa boîte	55
III.18	Photographie de model réalisé en bois utilisé au cours de notre étude	56
III.19	Le modèle fixée à l'intérieur du ½ châssis inférieur positionné.	56
III.20	Le positionnement du châssis supérieur sur le châssis inférieur (demi-premier modèle) se fait en ajoutant de la poudre de séparation entre les deux	56
III.21	Le remplissage du châssis supérieur avec du sable à vert se fait en ajoutant le système d'alimentation	56
III.22	Sépare les deux châssis et on enlève délicatement les deux ½ modèles	57
III.23	Placé le noyau dans l'empreinte du châssis inférieur	57
III.24	Assemblage des deux châssis	57
III.25	Coulée et remplissage du moule	57
III.26	Démoulage de la pièce en détruisant le moule	58
III.27	La pièce après enlever le système d'alimentation	58
III.28	détruire le noyau à l'aide d'un marteau-piqueur	58
III.29	Photographie représente la pièce après le débourrage	58
III.30	Photographie du balance et du mesure utilisé au cours de notre étude	60
III.31	Photographie de four de cuisson d'éprouvette de flexion utilisé au cours de notre étude	62
III.32	Tamisage du sable croning	63
III.33	Compactage du sable d'expérience dans le moule	63
III.34	Insérer le moule dans le four de cuisson	63
III.35	Débourrage des éprouvettes d'essai	64
III.36	Photographie des éprouvettes d'essai mécanique	64
III.37	Photographie des éprouvette avant est après l'essai mécanique	64
III.38	La résistance à la flexion en fonction du temps du stockage	65
III.39	La boite à noyau	66
III.40	Le noyau sorti de sa boîte	66
III.41	Photographie de model et de demi moule	67
III.42	Positionnement du noyau et Assemblage du moule	67

III.43	Photographie représente la coulée de la pièce	68
III.44	Photographie représente la pièce après le débourrage	68
III.45	Remplissage et compactage du mélange au niveau du moule	71
III.46	Photographie des éprouvettes après compactage	71
III.47	Photographie des éprouvettes après le démoulage pour les essais mécaniques	72
III.48	Photographie des éprouvette avant est après l'essai mécanique	72
III.49	La résistance à la flexion en fonction du temps du stockage	73
III.50	Photographie de la boite à noyau utilisé au cours de notre étude	74
III.51	Le modèle fixée à l'intérieur du ½ châssis inférieur positionné	75
III.52	Le positionnement du châssis supérieur sur le châssis inférieur (demi-premier modèle) se fait en ajoutant de la poudre de séparation entre les deux	75
III.53	Le remplissage du châssis supérieur avec du sable à vert se fait en ajoutantle système d'alimentation	75
III.54	Sépare les deux châssis et on enlève délicatement les deux ½ modèles.	76
III.55	Placé le noyau dans l'empreinte du châssis inférieur	76
III.56	Assemblage des deux châssis	76
III.57	Coulée et remplissage du moule	76
III.58	Démoulage de la pièce en détruisant le moule	77
III.59	La pièce après enlever le système d'alimentation	77
III.60	Détruire le noyau	77
III.61	Photographie représente la pièce après le débourrage et après dessablage	77

INTRODUCTION GÉNÉRALE

Introduction générale :

L'industrie de la fonderie est un secteur qui a connu une évolution considérable ces dernières années, notamment grâce à l'utilisation de nouvelles technologies et de nouveaux procédés de production. Parmi ces procédés, le noyautage est une étape importante pour la fabrication de pièces en matériaux métalliques. Le noyau est une pièce qui est insérée dans le moule de fonderie pour obtenir des cavités dans les pièces moulées.

Aujourd'hui, il existe plusieurs procédés de noyautage en fonderie, chacun ayant ses avantages et ses inconvénients. La comparaison entre ces différents procédés est donc essentielle pour déterminer le meilleur choix pour chaque application. En effet, le choix du procédé de noyautage peut influencer considérablement la qualité de la pièce produite, son coût et sa productivité.

C'est dans ce contexte que s'inscrit cette mémoire de master dont l'objectif est de comparer différents procédés de noyautage en fonderie. Cette étude permettra d'identifier les avantages et les inconvénients de chaque procédé, de déterminer les critères de choix les plus pertinents, et de proposer des pistes d'amélioration pour les futurs travaux de recherche.

La méthodologie de cette étude consistera à réaliser des expériences avec différents procédés de noyautage en utilisant des matériaux similaires et en suivant une procédure standardisée. Les résultats obtenus seront ensuite analysés et comparés pour déterminer le procédé de noyautage le plus adapté à chaque application.

Cette mémoire est donc d'une grande importance pour l'industrie de la fonderie, car elle permettra d'améliorer la qualité et la productivité des pièces produites, tout en réduisant les coûts de production. Elle contribuera également à l'avancement des connaissances dans le domaine de la fonderie et ouvrira la voie à de nouvelles recherches dans ce domaine.

Le plan de travail comporte les parties suivantes :

Le premier chapitre consiste à donner le contexte de la recherche, les objectifs et la méthodologie de la thèse, ainsi qu'une présentation de l'organisme d'accueil.

Le deuxième chapitre de la mémoire se concentre sur les différents procédés de noyautage utilisés dans le travail expérimental.

Le dernier chapitre traite des différentes techniques expérimentales utilisées dans ce travail, présente les résultats obtenus et propose des interprétations pour ces résultats.

CHAPITRE I

RECHERCHE BIBLIOGRAPHIQUE

I. Recherche bibliographique

I.1 Contexte de la recherche :

Le secteur de la fonderie est un secteur industriel important qui a connu de nombreux développements technologiques ces dernières années. Les pièces produites par les fonderies sont utilisées dans de nombreux domaines, tels que l'automobile, l'aéronautique, l'agriculture, la construction, etc. La qualité des pièces produites dépend de nombreux facteurs, tels que les matériaux utilisés, la conception du moule, le procédé de coulée, et le procédé de noyautage.

Le noyautage est une étape essentielle du processus de fonderie qui consiste à insérer un noyau dans le moule de fonderie pour obtenir des cavités dans la pièce moulée. Les cavités peuvent être des formes complexes telles que des conduits, des passages de fluides ou des trous borgnes. Le noyautage permet de produire des pièces plus légères, plus résistantes, plus précises et plus économiques.

Aujourd'hui, il existe de nombreux procédés de noyautage en fonderie, chacun ayant ses avantages et ses inconvénients. Ces procédés peuvent être classés en deux catégories : les procédés traditionnels et les procédés innovants. Les procédés traditionnels, tels que le noyautage à la cire perdue, le noyautage à la cire expansible et le noyautage à la coquille, sont largement utilisés depuis des décennies. Les procédés innovants, tels que le noyautage en moule sable à durcissement chimique, le noyautage en moule sable à prise au gaz, et le noyautage en moule sable à prise thermique, sont plus récents et offrent de nombreux avantages, tels que la réduction des coûts de production, l'amélioration de la qualité des pièces, et l'augmentation de la productivité.

Cependant, le choix du procédé de noyautage dépend de nombreux facteurs, tels que le type de pièce, les matériaux utilisés, la complexité de la forme, les coûts de production, etc. Il est donc important de comparer les différents procédés de noyautage afin de déterminer le procédé le plus adapté à chaque application.

Cette recherche sur la comparaison entre différents procédés de noyautage en fonderie est donc importante pour l'industrie de la fonderie car elle permettra d'améliorer la qualité des pièces produites, de réduire les coûts de production et d'augmenter la productivité. Elle contribuera également à l'avancement des connaissances dans le domaine de la fonderie et ouvrira la voie à de nouvelles recherches dans ce domaine.

I.2 Problématique de la mémoire :

La problématique de la mémoire sur la comparaison entre différents procédés de noyautage en fonderie pourrait être la suivante :

Quel est le procédé de noyautage le plus adapté pour produire des pièces de qualité supérieure tout en minimisant les coûts de production? Cette problématique implique l'analyse de différents procédés de noyautage disponibles sur le marché, ainsi que la comparaison de leurs performances en termes de qualité de pièce, de productivité, de coûts de production, d'environnement de travail, de gestion des déchets, etc.

Pour répondre à cette question, il faudra également prendre en compte les différents types de pièces à produire, les matériaux utilisés, les exigences de qualité et les spécifications du client. De plus, il est important de considérer les facteurs économiques tels que les coûts d'investissement et de maintenance des équipements nécessaires pour chaque procédé de noyautage.

Enfin, cette problématique doit également tenir compte de l'impact environnemental des différents procédés de noyautage et de leur capacité à répondre aux normes environnementales en vigueur.

Ainsi, la problématique de cette mémoire sera d'identifier le procédé de noyautage le plus adapté pour une application spécifique en fonction des critères de qualité, de productivité, de coût, d'environnement et des spécifications du client.

I.3 Les objectifs de la mémoire :

1. Analyser les différents procédés de noyautage disponibles sur le marché, ainsi que leurs avantages et leurs inconvénients en termes de qualité de pièce, de productivité, de coûts de production, d'environnement de travail, de gestion des déchets, etc.

2. Identifier les critères de sélection pertinents pour choisir le procédé de noyautage le plus adapté à chaque application spécifique, tels que les types de pièces à produire, les matériaux utilisés, les exigences de qualité et les spécifications du client.

3. Évaluer les performances des différents procédés de noyautage en termes de qualité de pièce, de productivité, de coûts de production, d'environnement de travail, de gestion des déchets, etc.

4. Comparer les performances des différents procédés de noyautage pour une application spécifique et recommander le procédé le plus adapté en fonction des critères de sélection établis.

5. Analyser l'impact environnemental de chaque procédé de noyautage et évaluer leur capacité à répondre aux normes environnementales en vigueur.

6. Proposer des pistes d'amélioration pour les différents procédés de noyautage afin d'optimiser leur performance en termes de qualité, de productivité, de coûts de production,

d'environnement de travail, de gestion des déchets, etc.

L'objectif final de cette mémoire est de fournir des informations précieuses pour les professionnels de la fonderie, les fabricants de machines de noyautage et les clients, afin de les aider à prendre des décisions éclairées sur le choix du procédé de noyautage le plus adapté pour une application spécifique.

I.4 La Méthodologie de la mémoire:

La méthodologie de la mémoire sur la comparaison entre différents procédés de noyautage en fonderie pourrait être la suivante :

Étude bibliographique : Cette étape consiste à recueillir des informations sur les différents procédés de noyautage en fonderie disponibles sur le marché, ainsi que sur leurs avantages et leurs inconvénients en termes de qualité de pièce, de productivité, de coûts de production, d'environnement de travail, de gestion des déchets, etc. Elle permet également d'identifier les critères de sélection pertinents pour chaque application spécifique.

Définition des critères de sélection : Cette étape consiste à définir les critères de sélection pertinents pour chaque application spécifique, tels que les types de pièces à produire, les matériaux utilisés, les exigences de qualité et les spécifications du client.

Évaluation des performances des différents procédés de noyautage : Cette étape consiste à évaluer les performances des différents procédés de noyautage en termes de qualité de pièce, de productivité, de coûts de production, d'environnement de travail, de gestion des déchets, etc. Cette évaluation peut être effectuée à l'aide de simulations informatiques, d'essais en laboratoire et sur le terrain, et d'autres méthodes d'analyse appropriées.

Comparaison des performances des différents procédés de noyautage : Cette étape consiste à comparer les performances des différents procédés de noyautage pour une application spécifique et à recommander le procédé le plus adapté en fonction des critères de sélection établis.

Analyse de l'impact environnemental : Cette étape consiste à analyser l'impact environnemental de chaque procédé de noyautage et à évaluer leur capacité à répondre aux normes environnementales en vigueur. Cette analyse peut être effectuée à l'aide de méthodes d'évaluation environnementale appropriées.

Propositions d'amélioration : Cette étape consiste à proposer des pistes d'amélioration pour les différents procédés de noyautage afin d'optimiser leur performance en termes de qualité, de productivité, de coûts de production, d'environnement de travail, de gestion des déchets, etc. Ces propositions peuvent être basées sur les résultats des évaluations de performance et de l'analyse environnementale.

Conclusion et recommandations : Cette étape consiste à présenter les conclusions de l'étude et à formuler des recommandations pour les professionnels de la fonderie, les fabricants de machines de noyautage et les clients, afin de les aider à prendre des décisions éclairées sur le choix du procédé de noyautage le plus adapté pour une application spécifique.

I.5 Présentation de l'organisme d'accueil :

I.5.1 Historique et mission de l'entreprise :

L'entreprise POVAL SPA est une société public économique, elle a été créé en date du 23 juillet 1997 suite à la transformation juridique de l'ex-entreprise de production de matériel hydraulique (EN-PMH).

Ses missions principales sont la recherche, le développement et la commercialisation des produits pompes, vannes, industrielle matériel de voirie, accessoires de tuyauterie et matériel anti incendier, POVAL dispose aussi d'autres activités : fabrication mécanique, pièces brutes de fonderie.

La société POVAL BERROUGHIA est composée par quatre unités de production sont l'unité de Maintenance, l'unité fonderie, l'unité pompes et vannes.

I.5.2 Objectifs de l'entreprise :

L'entreprise POVAL SPA contient plusieurs actions ont été engagées :

- Amélioration des relations avec les clients et les acheteurs,

Introduction d'un réseau informatique[1].

I.5.3 Organigramme de l'entreprise :

I.5.3.1 Organigramme général de POVAL :

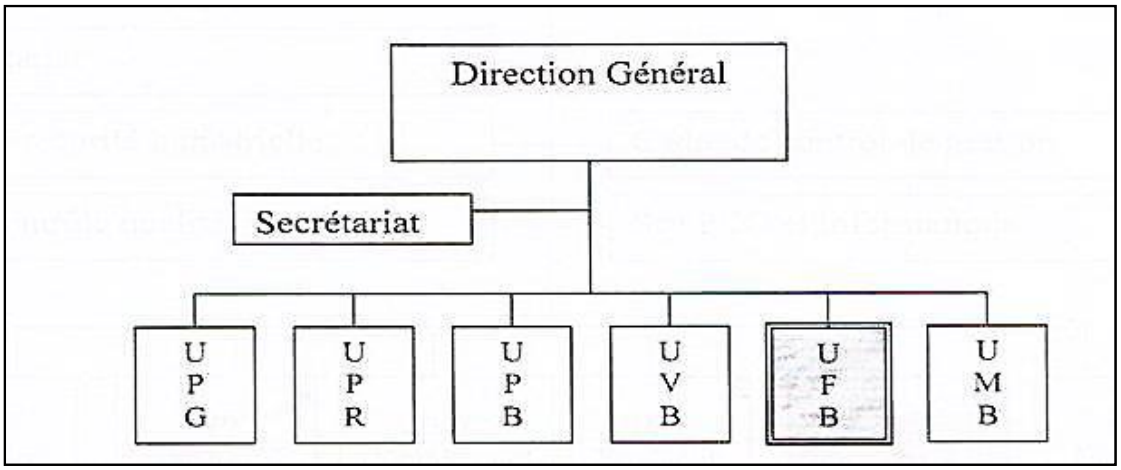


Figure I.1: Organigramme général L'entreprise POVAL SPA [1].

I.5.3.2 Organigramme générale de l'unité de fonderie :

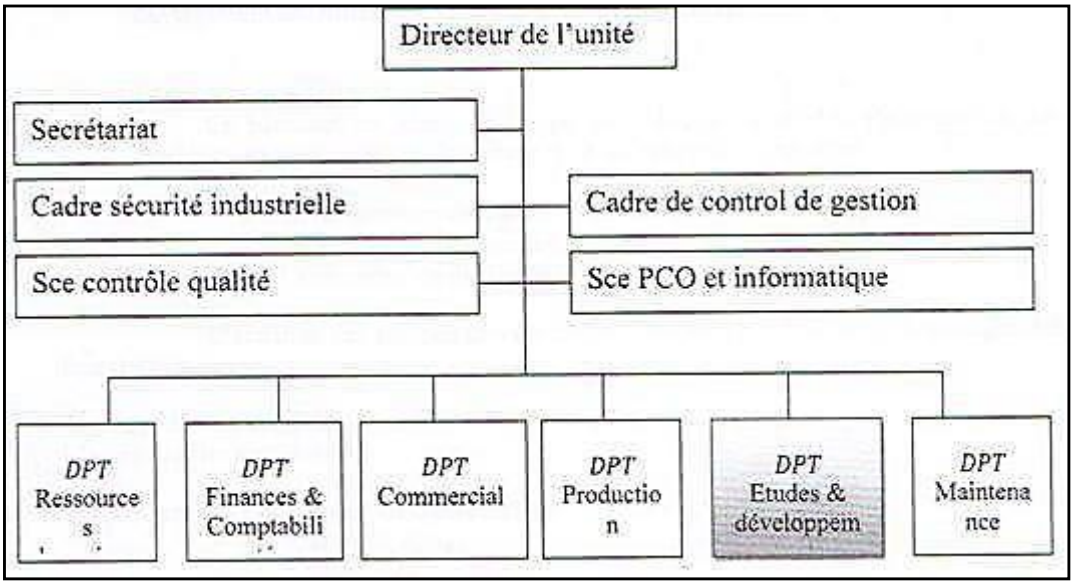


Figure I.2 : Organigramme de l'unité de fonderie [1].

I.5.4 Présentation de la Fonderie :

La fonderie est une technique de production de pièces métalliques à partir de matériaux fondus. Cette technique est utilisée dans de nombreuses industries, telles que l'automobile, l'aéronautique, l'énergie, la construction, etc.

Le processus de fonderie implique plusieurs étapes, dont la préparation des modèles ou des moules, la fusion des métaux, la coulée des métaux liquides dans les moules, le

refroidissement et la finition des pièces. Les moules peuvent être en sable, en coquille, en céramique ou en métal, selon les spécifications du produit final.

Le noyautage est une étape cruciale du processus de fonderie, car il permet de créer des cavités à l'intérieur des pièces moulées pour y loger des pièces ou des passages d'air, de liquide ou de gaz. Le noyau est généralement en sable, en céramique, en graphite ou en métal, et il est inséré dans le moule avant la coulée du métal.

Il existe plusieurs techniques de noyautage disponibles sur le marché, telles que le noyautage en sable à durcissement chimique, le noyautage en sable à durcissement thermique, le noyautage en coquille, le noyautage en mousse, le noyautage en cire perdue, le noyautage en métal, etc. Chaque technique a ses avantages et ses inconvénients en termes de qualité de pièce, de productivité, de coûts de production, d'environnement de travail, de gestion des déchets, etc.

- La thèse sur la comparaison entre différents procédés de noyautage en fonderie vise à évaluer les performances de ces différentes techniques et à recommander le procédé de noyautage le plus adapté pour une application spécifique, en fonction des critères de sélection établis. Cette thèse a pour objectif de contribuer à l'amélioration de la qualité, de la productivité et de l'efficacité environnementale de la fonderie, en proposant des solutions plus efficaces et plus durables pour la création de cavités dans les pièces moulées [2].

I.6 Processus de fabrication :

I.6.1 Noyautage :

Dans le domaine de la fonderie, le noyau fait partie du moule ,c'est un élément fabriqué en sable, que l'on emploie dans l'optique d'obtenir des formes creuses sur certaines pièces (ou des zones en contre-dépouille).

Le noyau est moulé dans ce que l'on appelle une « boîte à noyaux », à l'aide d'un moule en bois, en résine ou en métal, on procède à la main ou selon les cas on peut utiliser des machines qui projettent les différents sables et soufflent un gaz indispensable pour le durcissement de l'ensemble.

Si l'on adopte un procédé à prise à froid, le sable est placé dans un outillage à main ou sur une table vibrante, Sinon, quand d'autres procédés sont privilégiés on injecte le sable par air comprimé dans l'outillage.

Une fois réalisés, les noyaux doivent encore être ébavurés (ici encore, le recours à des techniques manuelles ou automatisées est possible), Pour finir, l'usage d'un enduit est

fréquent dans l'optique de former une couche protectrice entre le noyau et le métal.

Une fois que la pièce a été solidifiée intégralement, le noyau doit être éjecté. Plusieurs méthodes peuvent être employées dans l'optique de simplifier le débourrage : évider les noyaux tout en conservant suffisamment d'épaisseur pour avoir la solidité requise ou encore choisir les bons liants [3].

A. Les différents types de noyautage :

Il existe plusieurs types de noyautage en fonderie, chacun ayant ses propres avantages et inconvénients en termes de qualité de pièce, de productivité, de coûts de production, d'environnement de travail, de gestion des déchets, etc. Voici les principaux types de noyautage :

- Noyautage en sable à durcissement chimique : Le noyau est réalisé à partir de sable aggloméré avec une résine ou un liant chimique. Cette technique est rapide, facile et peu coûteuse, mais elle peut causer des émissions de gaz nocifs et nécessite une ventilation appropriée [4].

- Noyautage en sable à durcissement thermique : Le noyau est réalisé à partir de sable aggloméré avec un liant à base de ciment ou d'argile, puis cuit à une température élevée pour durcir le liant. Cette technique est plus résistante et plus stable que le noyautage en sable à durcissement chimique, mais elle nécessite plus de temps et d'énergie [4].

- Noyautage en coquille : Le noyau est réalisé en utilisant une coquille de sable ou de céramique qui est enduite de résine ou de liant. Cette technique est plus précise, plus lisse et plus homogène que le noyautage en sable, mais elle nécessite un équipement spécialisé et est plus coûteuse [5].

- Noyautage en mousse : Le noyau est réalisé en injectant une mousse de polystyrène expansé dans un moule de sable. Cette technique est rapide, facile et précise, mais elle nécessite un équipement spécialisé et peut causer des émissions de gaz nocifs.

- Noyautage en cire perdue : Le noyau est réalisé en utilisant une cire qui est coulée dans un moule de sable, puis retirée pour former une cavité. Cette technique est très précise et peut être utilisée pour des pièces complexes, mais elle est coûteuse et nécessite une finition manuelle [4].

- Noyautage en métal : Le noyau est réalisé en utilisant un alliage métallique, tel que

l'aluminium, le cuivre ou le fer, qui est coulé dans un moule de sable. Cette technique est très précise et résistante, mais elle est coûteuse et nécessite un équipement spécialisé [3].

A.1 Les avantages et les inconvénients de chaque type de noyautage :

Voici les avantages et les inconvénients de chaque type de noyautage en fonderie :

- Noyautage en sable :

Avantages : faible coût, adapté aux petites et moyennes séries, possibilité de réaliser des noyaux de forme simple à complexe.

Inconvénients : faible précision, risque de défauts lors du noyautage, temps de cycle long.

- Noyautage en coquille :

Avantages : haute précision, surface lisse et précise, possibilité de réaliser des noyaux de forme complexe, productivité élevée.

Inconvénients : coût élevé de l'équipement, nécessite une formation spécialisée pour l'utilisation des machines.

- Noyautage en mousse :

Avantages : haute précision, possibilité de réaliser des noyaux de forme complexe, surface lisse et précise, productivité élevée.

Inconvénients : coût élevé de l'équipement, nécessite une formation spécialisée pour l'utilisation des machines, risque de défauts liés à la formation de la mousse.

- Noyautage en cire perdue :

Avantages : précision élevée, surface lisse et précise, possibilité de réaliser des noyaux de forme complexe.

Inconvénients : coût élevé de l'équipement, nécessite une formation spécialisée pour l'utilisation des machines, risque de défauts liés à la formation des moules en céramique ou en plâtre, temps de cycle long [6].

Le choix du type de noyautage dépendra de plusieurs critères, tels que le volume de production, la complexité de la forme de la pièce, la précision requise, la nature de l'alliage à couler et les capacités techniques et financières de l'entreprise.

B. Les procédés de noyautage en fonderie :

Il existe plusieurs procédés de noyautage en fonderie qui sont utilisés pour réaliser des

pièces en métal moulé avec des cavités internes. Voici les principaux procédés de noyautage :

- Noyautage manuel : C'est la méthode la plus ancienne et la plus simple de noyautage. Le mouleur prépare manuellement le noyau en utilisant du sable aggloméré avec un liant à base d'eau et de résine, ou en utilisant de la cire perdue ou de la mousse. Cette technique est généralement utilisée pour des pièces de petite taille et de forme simple [7].

- Noyautage mécanique : Cette technique utilise des machines pour réaliser les noyaux. Les machines utilisent des matrices pour presser le sable et le liant afin de former le noyau. Cette technique est plus rapide que le noyautage manuel et permet de produire des noyaux de forme complexe.

- Noyautage en injection : Cette technique utilise une machine d'injection de noyaux pour injecter un mélange de sable et de liant dans un moule. Le moule est préalablement enduit d'un agent de libération pour faciliter le démoulage. Cette technique est rapide, précise et permet de produire des noyaux de forme complexe.

- Noyautage en coquille : Cette technique utilise une machine de noyautage en coquille pour former des noyaux en sable aggloméré avec un liant à base de résine. La machine projette le sable dans un moule en forme de coquille et le compresse pour former le noyau. Cette technique permet de produire des noyaux de haute qualité avec une surface lisse et précise. [11]

- Noyautage en mousse : Cette technique utilise une machine de noyautage en mousse pour former des noyaux en polystyrène expansé. Le polystyrène est injecté dans un moule de sable et est ensuite vaporisé avec un gaz pour le faire fondre et se vaporiser, laissant ainsi une cavité dans le moule. Cette technique permet de produire des noyaux de forme complexe avec une grande précision.

- Noyautage en cire perdue : Cette technique utilise des moules en céramique ou en plâtre pour réaliser des noyaux en cire. La cire est coulée dans le moule et est ensuite retirée pour former une cavité. Cette technique permet de produire des noyaux de forme complexe avec une surface lisse et précise [4].

Chaque procédé de noyautage a ses avantages et ses inconvénients en termes de coût, de qualité, de précision, de complexité de la pièce à réaliser, de productivité et de respect de l'environnement. Le choix du procédé de noyautage dépendra donc des spécifications de la

pièce et des exigences du client.

B.1 Les avantages et les inconvénients de chaque procédé :

Voici les avantages et les inconvénients de chaque procédé de noyautage en fonderie :

- **Noyautage manuel :**

Avantages : faible coût, adapté aux petites séries, permet de réaliser des noyaux de forme simple.

Inconvénients : faible précision, limitation dans la complexité de la forme de la pièce, faible productivité, risque de défauts lors du noyautage.

- **Noyautage mécanique :**

Avantages : productivité élevée, précision accrue, possibilité de réaliser des noyaux de forme complexe, amélioration de la qualité de la pièce.

Inconvénients : coût élevé de l'équipement, risque de défauts liés aux machines, nécessite une formation spécialisée pour l'utilisation des machines.

- **Noyautage en injection :**

Avantages : haute précision, rapidité, possibilité de réaliser des noyaux de forme complexe, faible risque de défauts, amélioration de la qualité de la pièce.

Inconvénients : coût élevé de l'équipement, nécessite une formation spécialisée pour l'utilisation des machines.

- **Noyautage en coquille :**

Avantages : précision élevée, surface lisse et précise, possibilité de réaliser des noyaux de forme complexe, productivité élevée.

Inconvénients : coût élevé de l'équipement, nécessite une formation spécialisée pour l'utilisation des machines.

- **Noyautage en mousse :**

Avantages : haute précision, possibilité de réaliser des noyaux de forme complexe, surface lisse et précise, productivité élevée.

Inconvénients : coût élevé de l'équipement, nécessite une formation spécialisée pour l'utilisation des machines, risque de défauts liés à la formation de la mousse.

- **Noyautage en cire perdue :**

Avantages : précision élevée, surface lisse et précise, possibilité de réaliser des noyaux

de forme complexe.

Inconvénients : coût élevé de l'équipement, nécessite une formation spécialisée pour l'utilisation des machines, risque de défauts liés à la formation des moules en céramique ou en plâtre, temps de cycle long.

Le choix du procédé de noyautage dépendra donc des spécifications de la pièce à réaliser, des exigences du client et de la capacité de l'entreprise à investir dans l'équipement et à former son personnel [6].

A. les différents types de noyautage en sable les plus courants :

Voici les différents types de noyautage en sable les plus courants :

- Noyautage en sable à silicate de soude : également appelé noyautage en sable durci au CO2, ce procédé utilise un mélange de sable de fonderie et de silicate de soude comme liant. Le gaz carbonique est ensuite utilisé pour durcir le noyau. Le noyautage en sable à silicate de soude est couramment utilisé pour la production de pièces en fonte et en acier [8].

- Noyautage en sable à résine furanique : ce procédé utilise un mélange de sable de fonderie et de résine furanique comme liant. Le noyau est ensuite durci à l'aide d'un catalyseur. Le noyautage en sable à résine furanique est couramment utilisé pour la production de pièces en aluminium, en magnésium et en alliages de cuivre [9].

- Noyautage en sable Croning : ce procédé utilise un mélange de sable de fonderie et de résine phénolique comme liant. Le noyau est ensuite durci à l'aide d'un gaz inerte. Le noyautage en sable Croning est couramment utilisé pour la production de pièces de grande taille et de grande précision [7].

- Noyautage en sable à l'huile : ce procédé utilise un mélange de sable de fonderie et d'huile comme liant. Le noyau est ensuite durci à l'aide de la chaleur. Le noyautage en sable à l'huile est couramment utilisé pour la production de pièces en fonte [8].

- Noyautage en Ashland : ce procédé utilise un mélange de sable de fonderie et de résine uréthane comme liant. Le noyau est ensuite durci à l'aide d'un catalyseur. Le noyautage en Ashland est couramment utilisé pour la production de pièces en aluminium et en alliages de cuivre [10].

- Noyautage en sable à l'eau :

Dans ce procédé, le noyau est fabriqué en mélangeant le sable avec de l'eau et en le

moulant dans une forme. Le noyau est ensuite séché à l'air ou dans un four pour durcir.

- **Noyautage en sable à la cire perdue** :

Dans ce procédé, un modèle en cire est fabriqué et recouvert d'une couche de sable. Le modèle en cire est ensuite fondu et le sable durci forme le noyau.

- Noyautage en sable à la soude :

Dans ce procédé, le sable est mélangé avec du silicate de soude pour former le noyau. Le noyau est ensuite séché et durci dans un four.

- **Noyautage en sable à la céramique :**

Dans ce procédé, le noyau est fabriqué en mélangeant du sable avec une solution céramique. Le noyau est ensuite séché et cuit à une température élevée pour le durcir [6].

C.1 Les avantages et les inconvénients des différents types de noyautage en sable :

Voici les avantages et les inconvénients des différents types de noyautage en sable :

- **Noyautage en sable à silicate de soude :**

Avantage :

- Processus rapide et facile,
- Faible coût des matières premières,
- Haute résistance thermique.

Inconvénients :

- Faible résistance mécanique,
- Faible précision dimensionnelle,
- La surface du noyau est rugueuse [8].

- **Noyautage en sable à résine furanique :**

Avantages :

- Haute résistance mécanique,
- Haute précision dimensionnelle,
- La surface du noyau est lisse.

Inconvénients :

- Coût élevé des matières premières,
- Processus plus long et plus complexe,
- Moins de résistance thermique que les autres types de noyautage en sable [9].

- Noyautage en sable Corning :

Avantages :

- Haute précision dimensionnelle,
- La surface du noyau est lisse,
- Haute résistance mécanique.

Inconvénients :

- Coût élevé des matières premières,
- Processus plus long et plus complexe,
- Moins de résistance thermique que les autres types de noyautage en sable [7].

- Noyautage en sable à l'huile :

Avantages :

- Haute résistance thermique,
- Faible coût des matières premières,
- Processus rapide et facile.

Inconvénients :

- Faible résistance mécanique,
- Faible précision dimensionnelle,
- La surface du noyau est rugueuse [8].

- Noyautage en Ashland :

Avantages :

- Haute résistance mécanique,
- Haute précision dimensionnelle,
- La surface du noyau est lisse.

Inconvénients :

- Coût élevé des matières premières,
- Processus plus long et plus complexe,
- Moins de résistance thermique que les autres types de noyautage en sable [10].

I.6.2 Parachèvement :

Le parachèvement est une opération de finition d'une pièce, quelle que soit sa méthode de fabrication, qui a lieu avant sa mise en fonction définitive ou avant de passer à l'étape suivante de production. En fonderie, le parachèvement consiste à éliminer les bavures de métal qui se sont solidifiées au niveau du joint entre les deux parties du moule. Ce processus

se déroule en quatre étapes, qui sont :

- **Le débourrage** : est l'opération qui permet d'extraire le sable contenu à l'intérieurd'une pièce, après coulée et solidification [11].
- **Dessablages** : est une opération qui consiste à enlever le sable [11].
- **Ebarbage** : est une opération qui consiste à enlever les appendices à l'intérieur et à l'extérieur d'une pièce [1 2] .
- **Peinture** : est une demande particulière du client qui a généralement pour objectif de protéger la pièce contre la corrosion, mais qui peut aussi répondre à un objectif décoratif ou d'aspect [13].

I.7 Conclusion :

Après avoir présenté le contexte de la recherche, la problématique de la mémoire, les objectifs de la mémoire, la méthodologie de la mémoire, l'organisme d'accueil, les domaines d'activités, les moyens de production, les ressources humaines ainsi que le cadre général du projet de fin d'étude.

Nous décrirons en détail, dans le chapitre suivant, les procédés de noyautage utilisés dans notre travail expérimental.

CHAPITRE II

LES PROCÉDÉS DE NOYAUTAGE

II. Les procédés de noyautage

II.1 Introduction :

L'étude bibliographique d'une thèse sur la comparaison des différents procédés de noyautage est une étape essentielle dans la recherche universitaire. Le noyautage est une opération clé dans le domaine de la fonderie, qui consiste à insérer des noyaux (éléments en sable ou en céramique) dans le moule pour former des cavités internes dans les pièces moulées.

Cette thèse vise à analyser et comparer les différentes techniques de noyautage utilisées dans l'industrie de la fonderie. L'étude bibliographique joue un rôle central dans ce processus, car elle permet de recueillir et d'analyser les connaissances existantes sur les procédés de noyautage, en mettant l'accent sur les avantages, les inconvénients et les performances de chaque méthode.

L'objectif principal de cette recherche est de fournir une évaluation complète et objective des procédés de noyautage les plus couramment utilisés. Cela aidera les professionnels de la fonderie à prendre des décisions éclairées lors du choix d'une méthode de noyautage pour leurs applications spécifiques.

L'étude bibliographique impliquera une recherche approfondie dans les bases de données scientifiques, les revues spécialisées, les livres et les articles de conférence pertinents. Des critères de sélection rigoureux seront appliqués pour identifier les publications les plus pertinentes et fiables. Les informations recueillies seront ensuite systématiquement analysées et synthétisées afin de fournir une vue d'ensemble complète des procédés de noyautage.

La comparaison des différents procédés de noyautage se concentrera sur des aspects tels que la précision du noyau, la complexité géométrique des pièces réalisables, la productivité, la qualité de surface, les coûts et l'impact environnemental. Cette étude aidera à évaluer les forces et les faiblesses de chaque technique, ainsi qu'à identifier les opportunités d'amélioration et les domaines de recherche futurs.

En résumé, cette thèse vise à approfondir la connaissance sur les procédés de noyautage en comparant les différentes méthodes existantes. L'étude bibliographique fournira une base solide pour les travaux de recherche ultérieurs et permettra de guider les praticiens de l'industrie de la fonderie dans le choix des meilleures pratiques de noyautage pour leurs applications spécifiques.

II.2 Les différents procédés de noyautage :

Les noyaux sont des éléments en sable que l'on a durcis de façon à pouvoir les manipuler, On les introduit dans le moule pour constituer les surfaces intérieures de la pièce moulée ou pour donner sa forme à une surface extérieure que l'on ne peut façonner à l'aide du modèle, Les noyaux peuvent être très simples, comme par exemple la forme cylindrique utilisée pour réaliser un trou de passage de boulon, ou au contraire très complexes, comme dans le cas de l'assemblage de noyaux que l'on utilise pour réaliser un tiroir hydraulique à tiges multiples.

La méthode de noyautage la plus simple consiste à tasser, dans une boîte à noyaux, du sable siliceux contenant un liant, Une fois la boîte à noyaux pleine, on la retourne avec soin sur une plaque plane et on la retire en la soulevant, Lorsqu'il s'agit de fabriquer des noyaux en série, on utilise des machines à noyauter, celles-ci peuvent être manœuvrées à la main ou, au contraire, être entièrement automatiques, Des machines, appelées machines à souffler les noyaux, utilisent de l'air comprimé pour remplir la boîte à noyaux de sable et pour serrer celui-ci, Les machines à noyauter sont conçues pour employer un liant particulier dont il existe plusieurs types [14].

II.2.1 Procédé silicate de soude-CO_2 :

Le procédé silicate de soude CO_2 a pris son essor dans l'industrie de la fonderie audébut des années 50.

Les principaux avantages de ce procédé sont un faible coût de revient, une facilité d'emploi. un liant inorganique réduisant les problèmes de mise en décharge, et un gaz (le dioxyde de carbone) peu coûteux et non-toxique dans les conditions normales d'utilisation.

Le procédé silicate de soude CO_2 peut être utilisé avec toutes les métallurgies.

Le mécanisme de prise repose sur la formation d’un gel de silice.

II.2.1.2 Descriptif du procédé:

A. Historique:

Au Royaume-Uni en 1898, Hargraves et Poulson décrivent un procédé d'agglomération des sables utilisant du silicate de soude gazé au dioxyde de carbone. Mais à la suite d'essais in fructueux en fonderie, le procédé est abandonné en 1920.

Il réapparait après la Seconde Guerre Mondiale en Tchécoslovaquie et est adopté en fonderie à partir des années 50.

Avec l'apparition des procédés organiques dans les années 60, l'utilisation en fonderie des sables au silicate de sodium a subi une baisse sensible, De nos jours, ce type d'agglomérant reste encore largement utilisé en raison non seulement du relatif faible coût des liants employés, mais aussi de son caractère inorganique facilitant les conditions de mise en décharge des sables usés.

B. Principe de base :

Le procédé met en œuvre les constituants suivants :

- Du sable,
- Un silicate de soude,
- Du dioxyde de carbone (CO_2),
- Des adjuvants éventuels.

Le sable est préalablement mélangé au silicate de soude et, le cas échéant, à divers adjuvants, Le mélange est ensuite serré dans un moule ou une boîte à noyau puis gazé au CO_2, La prise débute dès la mise en contact du sable au silicate avec le dioxyde de carbone.

Il convient de remarquer que le mélange sable-silicate peut prendre après une exposition à l'air ambiant, Ceci est dû non seulement à la présence de CO_2 dans l'atmosphère,mais aussi à une simple déshydratation du silicate.

C. Produits utilisés:

C.1 Sable :

On peut faire appel à différents types de sable habituellement utilisés en fonderie (silice, chromite, zircon), la silice étant le matériau le plus employé, il est indispensable que le sable soit employé sec et froid au moment de la préparation des mélanges.

En effet, une humidité trop importante du sable entrave la prise et entraîne une baisse des caractéristiques mécaniques du moule ou du noyau, De plus, un sable trop chaud favorise la dessiccation du silicate et donc accélère la prise.

La granulométrie est à adapter aux fabrications selon les règles de moulage/noyautage classiques, Il convient d'apporter une attention toute particulière au taux des particules inférieures à 20 µm présents dans le sable, En effet, lorsque cette teneur est très basse, les durées d'insufflation sont relativement longues et la consommation en CO_2 est accrue, A l'inverse, une présence de fines en quantité trop importante diminue les résistances mécaniques et rend le noyau sensible à l'effritement (pour pallier cet inconvénient, on peut augmenter la teneur en silicate mais le débourrage devient alors moins facile), Pratiquement,

les sables qui donnent généralement satisfaction ont une teneur en fines comprise entre 0,3 et 0,8%.

C.2 Choix du silicate:

Le comportement des sables au silicate est en majeure partie fonction du module de ce dernier, Sur un plan qualitatif, on peut donner les appréciations résumées dans le tableau II.1.

Des silicates de soude de module faible (2 à 2,2) peuvent être exceptionnellement utilisés.

Tableau II.1 : Changement du comportement des sables au silicate selon le module [15].

Module	Prise	Consommation De CO_2	Résistance	Stockage	débourrage
Elevé (2.8)	Rapide	Faible	Faible	Difficile	Aisé
Moyen (2.4)	Asser rapide	Asser faible	Moyenne	Moyen	Moyen
Bas (2.0)	Lente	Forte	Elevée	Possible	Difficile

Si l'on souhaite stocker longtemps les noyaux ou si l'on veut des noyaux très solides, Dans ce cas, il faut s'attendre à des consommations de dioxyde de carbone plus grandes et à des difficultés de débourrage, Un module faible convient par ailleurs bien pour les sables très fins (indice de finesse A.F.S. de l'ordre de 140), car la grande surface spécifique de ces sables favorise la réaction silicate-soude CO_2 et maintient la consommation de gaz à un niveau normal.

On peut avoir recours à des silicates de module élevé (2,6 à 2,8) dans le cas de fabrication de noyaux simples en grande série, exigeant une prise rapide, une faible consommation de CO_2 et un débourrage aisé, Dans ce cas, les noyaux restent fragiles et doivent être utilisés immédiatement, Dans la majeure partie des cas, les silicates de module moyen (2,4) représentent un compromis satisfaisant à toutes les conditions de fabrication, De ce fait, ces silicates sont les plus utilisés en fonderie.

Le taux d'incorporation se situe généralement entre 2 et 4 %, Plus ce taux augmente,plus les noyaux développent des caractéristiques mécaniques importantes et plus le débourrage devient difficile, La concentration en matières sèches du silicate a une influence primordiale sur la qualité des noyaux obtenus, Le choix de la concentration optimale doit être fait en fonction de nombreuxfacteurs, dont :

- Le module du silicate R,
- Le taux d'incorporation du silicate T,
- L'indice de finesse A.F.S. du sable i,
- La teneur en éléments fins du sable A (argile, noir ...),
- La nature et la quantité des adjuvants incorporés.

C.3 Gaz CO_2 :

Le dioxyde de carbone, communément appelé "gaz carbonique", est inoffensif dans les conditions d'emploi du procédé. Avec une mise en œuvre correcte, le procédé silicate de soude CO_2 ne doit pas en moyenne accuser des consommations de CO_2 supérieures à 1% en masse de noyaux préparés, Le dioxyde de carbone est le plus souvent livré en bouteilles à l'état liquide, Devant être utilisé à la fonderie à l'état de gaz, Le CO_2 doit subir une évaporationavant emploi, Cette opération demande l'apport d'une certaine quantité de chaleur.

La détente du gaz s'accompagnant d'un refroidissement d'autant plus intense que cette détente est grande, il peut arriver que le gaz givre à l'intérieur des détendeurs, colmatant ceux-ci de neige carbonique, Il faut donc prévoir dans une installation de distribution, des moyens de réchauffage directs ou indirects de certains de ses éléments [15].

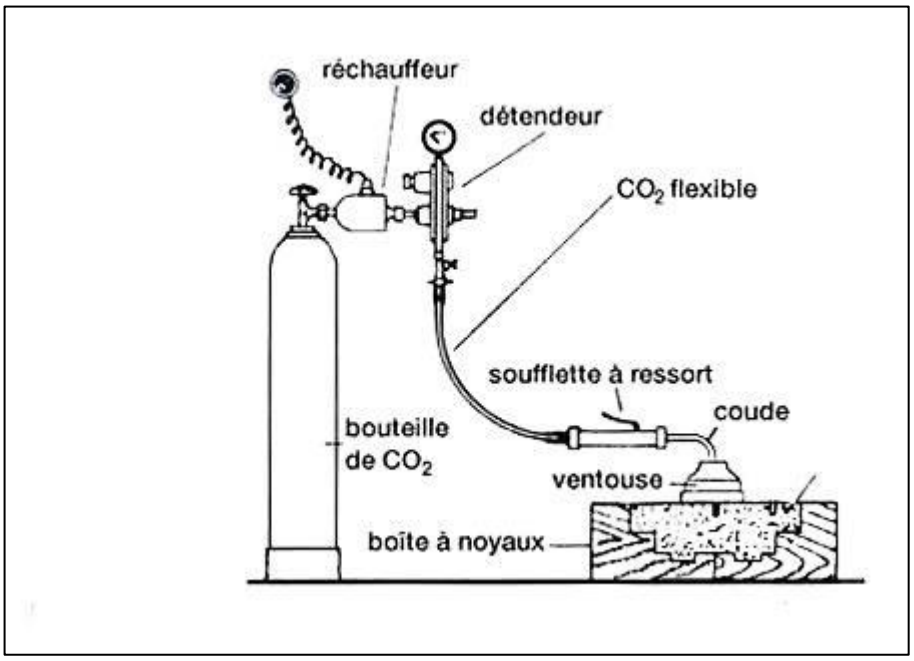


Figure II.1: Installation complète de gazage manuel au moyen d'une ventouse [16].

C.4 Adjuvants:

Divers produits peuvent être ajoutés à la composition des sables au silicate, D'une manière générale, ils ont pour but d'améliorer la conservation, les caractéristiques mécaniques et l'aspect de surface du noyau, ainsi que le débourrage qui est un des points faibles du procédé silicate de soude CO_2 [15].

C.4.1 Noir minéral:

Employé à des taux compris entre 0.5 et 2% le noir minéral constitue l'adjuvant de débourrage le plus classique.



Figure II.2 : Le noir minéral [17].

C.4.2 Farine de bois:

C'est un adjuvant de débourrage assez efficace pour les alliages à bas point de fusion (cuivreux et légers); il a malheureusement l'inconvénient d'abaisser les propriétés mécaniques des noyaux qui sont alors très sensibles à l'effritement.



Figure II.3 : Le Farine de bois [18].

C.4.3 Sucre:

Le sucre est à employer à des taux d'incorporation compris entre 0.3 et 1% , C'est un adjuvant améliorant la résistance des noyaux, leur conservation au cours du stockage, ainsi que leur débourrage, Le sucre améliore également l'aptitude au soufflage de certains sables.

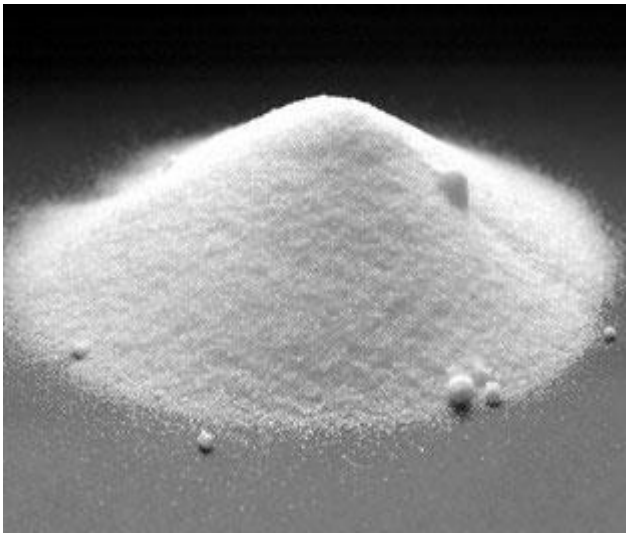


Figure II.4 : Sucre en poudre [18].

C.4.4 Dextrine:

La dextrine améliore la conservation des noyaux au stockage mais en contre partie, diminue les propriétés mécaniques, C'est de plus un adjuvant de débourrage médiocre.



Figure II.5 : Poudre de dextrine [18].

II.2.1.3 Les avantages et les inconvénients:

Le procédé silicate de soude CO_2 s'adresse à des fabrications de moules et noyaux de volumes limités (pour des raisons de facilité de gazage) en petite, moyenne et grande séries, Il convient à toutes les métallurgies.

Les avantages du procédé sont : un coût de revient relativement faible, une facilité de mise en œuvre, l'emploi de matières non toxiques dans les conditions normales d'utilisation, et un faible coût de mise en décharge.

Les principaux inconvénients du procédé silicate de soude-CO_2 sont : une mauvaise aptitude au débourrage, des problèmes de reprise d'humidité lors du stockage, ainsi qu'une sensibilité à l'effritement. En outre, dans le cas où un enduisage est nécessaire, l'utilisation exclusive de couches à l'alcool risque, à l'avenir.de pénaliser fortement ce procédé [15].

II.2.2 Procédé Corning :

Le procédé Croning ou moules carapaces (Shell process en anglais) est un procédé à prise thermique qui consiste à mettre en place par gravité ou par soufflage un sable préenrobé d'une résine solide thermoplastique sur un outillage chauffe, Cet état thermoplastique permet au système de liant de bien épouser les détails des modèles et boîtes à noyaux, Par décomposition d'un durcisseur, la résine passe ensuite dans un état thermodurcissable qui permet alors au moule ou au noyau de présenter des résistances suffisantes pour permettre la coulée d'alliages métalliques.

II.2.2.1 Descriptif du procédé :

A. Historique :

Dès 1936, Johannes Croning, l'inventeur, imagine pour la fonderie un procédé de moulage / noyautage de précision avec des enveloppes minces, basé sur l'utilisation de la barbotine, et inspiré de la fabrication de la porcelaine (correspondant au moulage céramique), et il dépose un brevet en Mai 1936.

Afin de développer ce procédé, il crée en Octobre 1937 la Croning & Co pour exploiter ses brevets et la Mikroforma Giesserei Gesellshaft Johannes Croning pour réaliser la mise au point.

Devant les difficultés rencontrées lors des essais, il finit par se diriger vers un procédé à sec utilisant de la silice avec des résines et durcisseurs à chaud, et dépose en Février 1944 un brevet définissant les bases techniques du "procédé carapace" ou procédé Croning.

Ce brevet sera suivi de 1945 à 1952 d'autres brevets concernant l'amélioration de ce procédé.

A la fin de la guerre mondiale, le procédé Croning fit partie des "prises de guerre" et intéressa fortement les alliés (publications par les américains dès 1947), ce qui contribuera à son développement rapide au niveau planétaire.

Johannes Croning étant un inventeur mais aussi un entrepreneur va organiser son développement.

En 1947 il cède sa 1ere licence à la fonderie Hottinger en Allemagne, et devient co-actionnaire de la société Polygram en Angleterre pour l'exploitation de son invention dans cette zone.

En 1948, il fonde à Boston la Crown Casting Associates pour gérer ses brevets au Etats Unis et au Canada, et s'y installe quelques mois pour en faire la promotion, Ford et Général Motors sont immédiatement intéressés.

En 1949, la fonderie Volkswagen acquiert la licence et l'ensemble des constructeurs automobiles s'y intéressent.

10 ans après la 1ere cession de brevet à Hottinger, en 1957, 1500 fonderies dans le monde exploitent le procédé "Croning", dont 500 aux Etats Unis, 300 en Allemagne et plus d'une centaine en france.

Le développement va se poursuivre jusqu'au milieu des années 80, moment où, en France, la totalité des fonderies travaillant pour l'automobile est équipée, ainsi que de très nombreuses autres fonderies et aciéries [6].

B. Principe de base :

Le procédé fait appel à un sable préenrobé par une résine synthétique à l'état solide qui mis en contact avec un outillage chaud, fait prise et permet la formation d'une carapace ou d'un noyau creux, Le sable qui n'a pas été sollicité thermiquement est récupéré pour réemploi par renversement d'outillage ou par gravité lorsqu'il a été soufflé par le bas.

C. Produits utilisés :

C.1 Réfractaires :

Comme pour tous les autres procédés, le sable utilise doit être aussi pur et sec que possible, L'indice de finesse est en général assez élevé afin de profiter des possibilités du procédé à épouser les détails, Les sables siliceux utilisés dans cette technique sont parfois issus de mélanges de deux sables de granulométrie nettement différentes, Cette pratique améliore l'aspect des pièces et la tenue à chaud des carapaces lors de la coulée, Les autres réfractaires (zircon, chromite, olivine…) peuvent être également utilisés.

C.2 Résine :

Le système de liant est constitué d'une résine phénolique (phénol-formaldéhyde) qui préparée en milieu acide et ayant un rapport phénol-formol inférieur à 1, est à l'état thermoplastique (novolaque B), Cet état lui permet par élévation de température de bien épouser les détails des modèles et boites à noyaux, L'hexaméthylène tétramine, ajoutée comme durcisseur lors de la fabrication de la résine, se décompose à 160 °C en ses constituants initiaux.

Le formaldéhyde (ou formol) et l'ammoniac, Le déficit en formol est alors comblé par cet apport et la résine passe à l'état thermodurcissable (novolaque C), L'ammoniac dégagé joue le rôle d'accélérateur de prise.

C.3 Additifs :

Divers additifs sont en général ajoutés lors de l'enrobage, Par exemple:

- Le stéarate de calcium en tant que lubrifiant et agent de démoulage,
- L'oxyde de fer contre la gerce, l'abreuvage, les piqûres,
- Des résines naturelles, Vinsol (plastifiant limitant l'apparition de perces),
- Le fluoroborate de potassium pour la coulée de magnésium,
- La kaolinite pour améliorer la résistance à chaud et éliminer le défaut de peau d'orange en coulée d'acier.

D'autres additifs peuvent encore être ajoutés pour obtenir des propriétés spécifiques.

D. Enrobage :

Le procédé principalement utilisé actuellement et le procédé d'enrobage à chaud, utilisant des résines novolaques sous forme d'écailles.

Il consiste à chauffer le sable à environ 150 °C, à le mélanger avec la résine en écaille contenant un agent lubrifiant, a le refroidir par introduction de l'hexaméthylène tétramine en phase aqueuse jusqu'à environ 70 °C et à le tamiser, Un refroidissement prolongé permet d'éliminer toute tendance l'agglomération du sable enrobé, La figure II.6 décrit le cycle d'enrobage chaud.

Aujourd'hui les sables enrobés peuvent être stockés pendant une période extrêmement longue à condition que le stockage soit effectué en atmosphère sèche et à une température pas trop élevée.

Pratiquement seuls les gros utilisateurs préparent eux-mêmes leurs sables Croning, les sables préenrobés étant dans les autres cas disponibles sur le marché des produits de moulage,

Les teneurs en résine, variables selon l'emploi du sable et l'alliage coulé, sont comprises entre 1.6 et 5%.

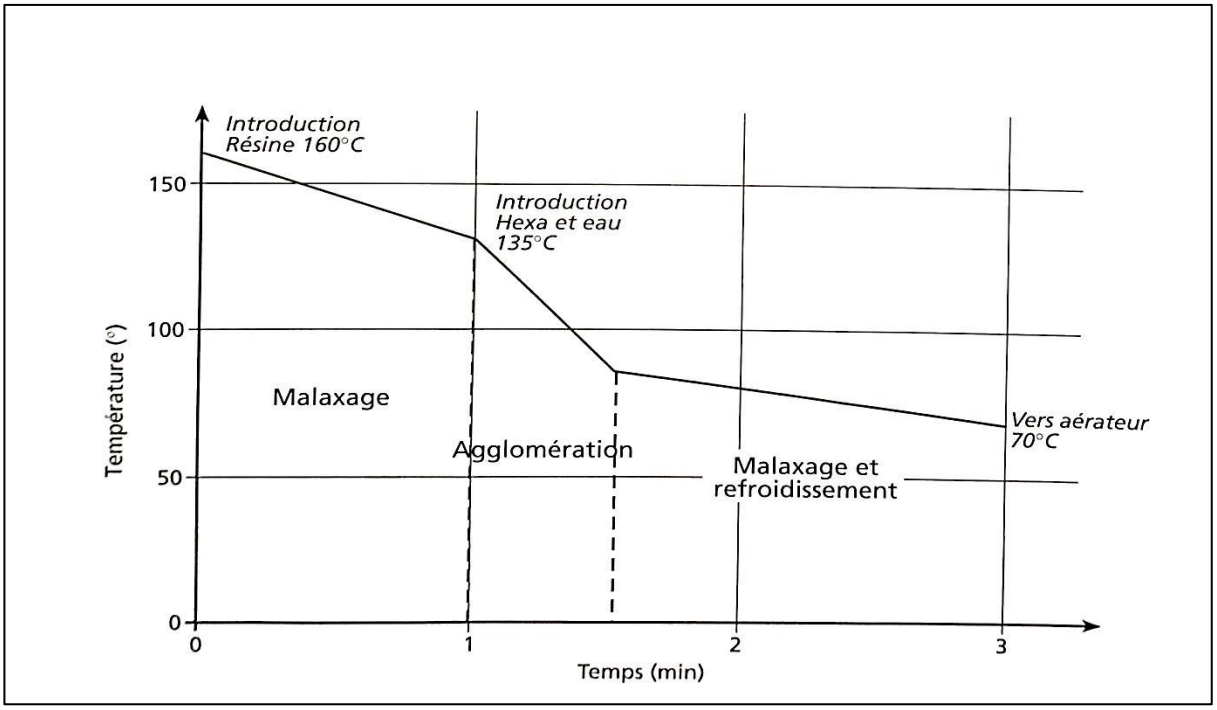


Figure II.6: Le cycle d'enrobage à chaud [15].

II.2.2.3 Les avantages et les inconvénients :

A. Avantages:

- Précision dimensionnelle élevée,
- Très bel état de surface,
- Usinage réduit (inexistant parfois),
- Décochage et nettoyage des pièces très facile,
- Ebarbage réduit,
- Possibilité de couler de faibles sections,
- Faible mise au mille,
- Conservation illimitée des moules et des noyaux,
- Pas de reprise d'humidité,
- Main d'œuvre non spécialisée. Automatisation poussée,
- Légèreté : manutention aisée : moins de fatigue physique.

B. Inconvénients:

- Résine chère,
- Prix de l'outillage (à amortir sur grandes séries),

- Mises au point délicates,
- Odeurs, fumées,
- Limite en poids,
- Contrôle poussé des temps, des matières, des températures [19].

II.2.3 Procédé furanique (procédé No-back):

Le procédé utilisant des résines furaniques autodurcissantes (dans la littérature anglo-saxonne on trouvera les termes Cold-setting furan binders, Cold-curing furan binders, furan No-baking binders) consiste à mélanger le sable avec un catalyseur acide et une résine furanique, la prise s'effectuant prise ambiante, La réaction consiste en la polycondensation d'oligomères, catalysée par un acide permettant l'obtention d'un film solide de résine, Cette réaction est exothermique, Le procédé a été introduit en fonderie en 1958.

II.2.3.1 Descriptif du procédé:

A. Historique:

Les liants furaniques, en tant que système autodurcissant catalysé par un acide, furent introduits en fonderie en 1958, Deux ans après, l'utilisation d'une résine modifiée en présence d'un seul d'acide fut utilisée dans le procédé boîte chaude, en particulier pour la production de noyaux en fonderie automobile, Les résines furaniques autodurcissantes prirent leur essor au milieu des années 60, en particulier du fait de l'addition de silanes permettant une moindre consommation de liant, C'est le procédé qui, en terme de tonnage de résine vendue, est le plus important aujourd'hui.

B. Principe de base:

Le phénomène de prise des sables autodurcissants aux résines furaniques, repose sur la propriété de ces résines thermodurcissables, de durcir assez rapidement à la température ambiante, en présence d'un catalyseur acide.

La transformation peut être représentée par le schéma ci-après:

$$\textbf{Résine liquide} \xrightarrow{\textbf{Milieu acide}} \textbf{Résine solide + chaleur + eau}$$

La chaleur produit par la transformation accélère celle-ci, avec certaines résines la vitesse de Prise double pour un accroissement de température de 10°C, L'augmentation de température renforce également les liaisons existantes dans les différents plans et entre les

plans de molécules tridimensionnelles de ces résines, ce qui accroit leur rigidité qu'elles conservent ensuite.

Les considérations précédentes permettent de préciser que les facteurs fondamentaux influençant le durcissement de ces résines sont :

- La nature et les propriétés de la résine utilisée,
- L'acidité du milieu (pH),
- Sa température,
- Sa teneur en eau.

On conçoit que si l'on entoure les grains d'un sable d'un film constitué de résine liquide et de catalyseur, on puisse réaliser plus ou moins rapidement l'agglomération de ce sable à la température ambiante.

Tableau II.2: Les facteurs fondamentaux et les facteurs de fabrication qui influençant le durcissement des résines [15].

Facteur fondamentaux	Facteur de fabrication
Nature et propriétés des résines	- Type de résines (sec constituants) - Conditions de fabrication de la résine (degré de condensation par exemple) - Teneur en eau - Taux de résine dans le sable
Acidité du milieu (pH)	- Nature de catalyseur - Sa concentration - Taux de catalyseur par rapport à la résine - Nature et impuretés du sable (sables neufs, sables récupérés)
Température	- Température ambiante - Température du sable - Conditions de malaxage (type de malaxeur, vitesse, durée de malaxage)
Teneur en eau	- Humidité de sable - Teneur en eau de la résine - Teneur en eau du catalyseur

C. Produits utilisés:

C.1 Réfractaires :

Compte tenu du caractère acide de la prise, le pH du sable est important, et des réfractaires trop basiques, tels que l'olivine, ne peuvent être employés.

D'un autre côté, des vitesses de prise élevées dues à l'acidité du sable ont un effet néfaste sur l'obtention de hautes résistances mécaniques.

La composition chimique du sable est également très importante, Dans le procédé, le catalyseur est en effet un acide fort qui peut réagir avec les alcalins et des particules métalliques, Ainsi la présence dans un sable d'oxydes métalliques ou de fragments de coquillages (présents dans les sables de mer) peuvent condamner son usage dans le procédé.

Un excès d'acide ne permet pas de résoudre ce problème, En effet, la réaction acide-oxyde prend un certain temps (qui peut être supérieur au temps de prise du liant) et peut avoir pour conséquence d'endommager la continuité du film qui a été forme, De même, le film durci peut être cassé par le dégagement de CO_2, lors que le sable contient des carbonates ou des bicarbonates.

D'autres sels métalliques peuvent agir en tant que "poison du catalyseur" et influencer la vitesse de prise et les résistances finales.

La présence d'argile est néfaste de par la consommation de liant qu'elle engendre et de par son aptitude à fixer l'humidité affectant ainsi la vitesse de prise et les résistances finales.

La granulométrie (finesse, répartition, forme de grains) a la même importance que dans les autres procédés à liants chimiques.

Pour conclure, un sable siliceux par, sec, à grains ronds et sans argile, donnera les meilleurs résultats.

C.2 Résines:

Les résines utilisées sont appelées communément résines furaniques, et vendues sous des désignations commerciales variées.

Ce sont des résines synthétiques dans la fabrication des quelles entrent de l'alcool furfurylique et le plus souvent une ou plusieurs autres substances telles que :

- Le formol,
- Les résines urée-formol,
- Les résines phénol-formol,
- Les agents de pontage (silanes).

La proportion d'alcool furfurylique dans ces résines est variable et le plus souvent supérieure à 50% afin d'obtenir, à la température ambiante, des vitesses de prises suffisantes.

Les principales raisons de l'emploi de l'alcool furfurylique dans les résines sont les suivantes:

- Très grande réactivité ce qui permet de grandes vitesses de prise,
- Excellent solvant de nombreuses résines (urée-formol, phénol-formol, etc…),
- Bonne propriétés mouillantes,
- Non toxique pendant la manipulation.

Condensé avec une urée-formol il donne une résine:

- Plus résistante à chaud,
- Dégageant moins de gaz à la coulée,
- Plus stable dans le temps,
- Augmentant la durée de vie du sable.

Le nombre de constituants possibles des résines furaniques et les proportions selon lesquelles ils entrent dans leur composition sont tels, que l'on peut rencontrer un nombre infini de variantes de ces résines.

Cependant, il semble que l'on puisse distinguer schématiquement les principales catégories suivantes:

- Résines constituées de polymères d'alcool furfurylique (résines AF),
- Résines formol-alcool furfurylique (résines-F-AF),
- Résines urée-formol-alcool furfurylique (résines UF/AF),
- Résines phénol-formol-alcool furfurylique (résines PF/AF),
- Résines urée-phénol-formol-alcool furfurylique (résines UF/PF/AF).

Initialement, les résines proposées aux fonderies étaient essentiellement de la famille UF/AF avec des taux variables en alcool furfurylique et en urée, Ces résines sont toujours sur le marché et certaines catégories ont de faibles proportions d'urée, Des résines sans urée sont également utilisées en fonderie et peuvent être rattachées soit à la famille des F-AF, soit à celle des PF/AF.

Très sommairement, les processus de préparation de ces résines reposent sur :

- Une copolycondensation plus ou moins poussée des principaux constituants sous l'effet d'un catalyseur (acide le plus souvent) et à une température voisine de 100°C,
- Une neutralisation à un pH de l'ordre de 6 à 8 dans le but de stopper la transformation,

- Une déshydratation sous vide.

Les résines sont livrées sous forme de sirops à basse viscosité dont la teneur en eau peut varier d'une résine à l'autre.

On conçoit donc, que deux résines d'une même famille, fabriquées à partir des mêmes proportions des constituants de base, peuvent présenter notamment :

- Des degrés de condensation différents, et par conséquent des teneurs différentes par exemple en:
  - Alcool furfurylique libre,
  - Formol libre,
  - Phenol libre,
- Des teneurs en eau différentes,
- Des pH différents,
- Des teneurs différentes en éléments introduits par les catalyseurs utilisés et les produits de neutralisation employés, ou par des réactions difficiles à maitriser.

D'une façon générale, plus la teneur en alcool furfurylique est élevée, meilleures sont les propriétés de la résine. Malheureusement, le coût de la résine est fonction de sa teneur en alcool furfurylique.

On peut classer les liants en fonction de leur teneur en azote (provenant de l'urée) et de leur teneur en eau.

Pour des teneurs croissantes dans le liant:

L'alcool furfurylique donne une bonne aptitude au stockage des résines très bon solvant de la plupart des composants des résines, il en abaisse la viscosité, améliore l'enrobage des grains de sable (c'est un très bon mouillant) et facilite le malaxage, il augmente la vitesse de prise, améliore la résistance à chaud et diminue le dégagement gazeux, par contre il augmente le prix matières.

- Le phénol accroît la tenue à chaud mais diminue l'aptitude au décochage et au débourrage (sa température de destruction est élevée),
- Le formol augmente la réactivité et diminue le prix matières,
- L'urée améliore le débourrage - décochage, atténue la tendance aux criques des pièces en acier (par sa faible température de destruction) et diminue le coût. Mais elle est source d'azote, ce qui limite l'emploi en fonderie d'acier et de fonte.

Un silane est pratiquement toujours ajouté, au taux de 0,1 à 0,2 %, pour améliorer la liaison résine-grain de sable et permettre la diminution du taux de liant [15].

Tableau II.3 :Qualité du résine dépend pourcentage d'alcool furfurylique, l'azote, et l'eau [15].

Qualité	Alcool furfurylique %	Azote %	Eau %
Faible	40 – 60	5 – 11	10 – 30
Moyenne	60 – 80	2 -8	5 – 15
Haute	≥ 80	0 – 5	1 – 17

C.3 Catalyseurs :

Les catalyseurs utilisés avec les résines furaniques sont des produits acides plus ou moins complexes, Parmi les principaux acides entrant dans leur composition, on trouve par ordre croissant de réactivité : l'acide phosphorique, des acides aryl-sulfoniques, tels que benzène-sulfonique, xylène-sulfonique ou toluène-sul-fonique en solution dans l'eau et/ou dans l'alcool, L'acide sulfurique est quelquefois ajouté en tant que dopant.

L'acide phosphorique a le premier été proposé comme catalyseur pour les résines U-F-AF à des concentrations de 75 ou 85 %, Son emploi peut entrainer certaines sujétions car il cristallise, notamment lorsqu'il est à 85%, à des températures voisines de celles de l'ambiance de travail.

Quand la proportion d'acide phosphorique, par rapport à la résine, est croissante, les résistances obtenues, après prise complète du sable, diminuent, Par exemple, en faisant passer le taux de catalyseur de 30 à 40 %, on peut enregistrer une baisse de résistance de l'ordre de 30 %.

D'autre part, l'acide phosphorique ne parait pas très bien convenir pour les résines ne contenant pas d'urée, les prises sont plus lentes et les résistances atteintes assez modérées.

Les acides aryl-sulfonique ne présentent pas ces inconvénients.

Avec les résines UF/AF, ils donnent des prises plus rapides que l'acide phosphorique et des résistances finales plus grandes, De plus, les résistances finales sont croissantes lorsque le taux de catalyseur par rapport à la résine augmente.

Avec les résines PF/AF ces différences sont encore plus marquées et les résistances obtenues peuvent être le double de celles constatées avec l'acide phosphorique.

Ces propriétés paraissent être dues à une meilleure solubilité de l'acide paratoluène-sulfonique dans les résines et à sa plus grande concentration en ions H+, Les résines sans urée tolèrent mieux l'eau formée pendant la prise avec ces acides qu'avec l'acide phosphorique.

II.2.3.3 les avantages et les inconvénients:

Les résines furaniques ont **pour avantage** une assez grande souplesse d'emploi et une vaste gamme de compositions.

Ce procédé permet la fabrication de moules et noyaux adaptés à chaque type de fabrication.

Cependant, ces résines sont d'autant plus onereuses qu'elles sont de meilleure qualité, c'est- à-dire à plus forte teneur en alcool furfurylique.

Leurs inconvénients, outre leur coût, résident dans la toxicité de certains de leurs composants (formol, phénol), l'agressivité de leurs catalyseurs (acides), et les risques de ruptures d'approvisionnement, pour des raisons, diverses, des matières qui les composent : alcool furfurylique, formol, phénol.

Le domaine d'emploi des résines furaniques autodurcissantes est celui du moulage et du noyautage en petite et moyenne séries de pièces moyennes à grosses en tous alliages [15].

II.3 Préparation des mélanges (Procédé furanique,Procédé silicate de soude-CO_2) :

A. Objet :

Cette procédure décrit une méthode pour la préparation des mélanges avec un malaxeur de laboratoire à pales, utilisable pour les procédés autodurcissants ou à prise par gazage.

B. Matériel :

- Balance au centigramme d'une portée supérieure à 4 kg.
- 4 béchers ou pots en verre adéquats.
- Agitateur.
- Malaxeur de laboratoire à pales.

C. Conditions opératoires :

- Matériel propre et sec sans acidité ou basicité résiduelle.
- Température du matériel et des constituants du mélange 23±1°C.
- Température ambiante: 23±1°C.

D. Mode opératoire :

1. Vérifier que le matériel est propre et sec.
2. Peser la charge de sable au gramme près et l'introduire dans le malaxeur.
3. Verser un peu de catalyseur dans un bécher et le vider dans un autre jusqu'à ce qu'il ne s'écoule plus (il reste du liquide sur les parois du premier bécher), Faire la tare de celui-ci.

4. Peser au centigramme la quantité de catalyseur à introduire, Verser lentement en la faisant couler le long d'un agitateur dans le bécher taré au point 3.
5. Mettre en marche le malaxeur.
6. Introduire rapidement en presque totalité le catalyseur, Vérifier ensuite sur la balance les quantités introduites après chaque petite adjonction pour arriver à la quantité voulue.
7. Malaxer pendant 2 minutes.
8. Répéter les opérations 3, 4, 5 et 6 pour la résine (employer bien entendu d'autres béchers).
9. Noter le temps total d'introduction de la résine.
10. Malaxer une minute et recueillir le sable.
11. Nettoyer les récipients à l'eau et la verrerie à l'acétone. Essuyer et sécher, Nettoyer le malaxeur et faire une malaxée de sable neuf pour le neutraliser.

NOTA : Selon les procédés, l'ordre d'introduction de la résine et du catalyseur peut être différent [15].

II.4 Classification des procédés de noyautage :

De nombreux modes de classement sont possibles et trouvent leur utilité en fonction du but poursuivi, Ce que l'on peut dire, d'ores et déjà, c'est qu'un procédé correspond très généralement à un liant ou à un type de liant déterminé, parfois à une modalité de mise en œuvre, En d'autres termes c'est le liant sa nature, son mode de prise... qui fait le procédé, Ce n'est pratiquement jamais le sable qui représente pourtant près de 100 % de la masse totale d'un moule ou d'un noyau - ni les produits d'addition s'ils n'entrent pas dans la formation du liant ou dans son processus de prise.

Il n'est pas inutile non plus de rappeler que la distinction entre procédés de moulage et procédés de noyautage a perdu beaucoup de son actualité, En effet, la plupart des liants utilisés peuvent être employés dans l'une et/ou l'autre des techniques même si certains peuvent recevoir des applications préférentielles.

Un classement des procédés de moulage noyautage peut s'appuyer sur l'un des critères suivants :

- **Apparence physique :** sables plastiques (argileux), ou non plastiques.
- **État :** à liant solide (argiles, ciment), pâteux : (émulsion siccatives) ou liquide (résines, silicate de soude).
- **Nature:** minérale (argiles, silicate de soude, ciment), ou organique (résines).

- **Origine :** naturelle (argiles), artificielle (silicate de soude, ciment), synthétique (résines).
- **Mode de prise:** chimique (résines, silicate de soude), thermique (huiles siccatives, congélation, Croning), hydraulique (ciment), physique (procédés V, polystyrène), ou sans prise (argiles).
- **Vitesse de prise:** instantanée (V. polystyrène) , très rapide (procédés faisant appel au gazage ou à des constituants très réactifs- comme le procédé ABC), semi-rapide (boites chaude et tiede, Croning, Pep-Set), lente (beaucoup d'autodurcissants) [15].

Tableau II.4 : Classement des principaux procédés de noyautage suivant le mode de prise [15].

Sans prise	**Thermique**	**Chimique et Hydrolique**		**Physique**
		Autodurcissants	**Gazés**	
Sables naturels	Huiles siccatives	Ciment	Silicates – CO_2	V
Sables synthétiques	Croning	Silicate – ester	Polyuréthannes	Polystyrène
Argiles organophiles	thermochoc	Résines alkydes	Hardox	Congélation
	Boite chaude	Furaniques	Isocet	
	Boite tiède	Phénoliques	Bétaset	
		Polyuréthannes		
		Phénolates alcalins		

- **Sans prise**: il s'agit exclusivement des liants argileux
- **Prise thermique:** soit par étuvage, soit par contact avec un outillage chauffé.
- **Prise chimique:** Dans ce cas la prise est effectuée selon l'un des mécanismes suivants :
  - Elimination de solvant ou diluant,
  - Prise hydraulique,
  - Polymérisation.

Du point de vue technologique ces mécanismes peuvent être mis en oeuvre par l'utilisation de deux familles de procédés :

- Les procédés autodurcissants,
- Les procédés par gazage.

- **Prise physique:** il s'agit, soit d'applications du vide - ou plus exactement, d'une dépression , soit d'une rigidification sous l'action d'un champ magnétique, soit d'un compactage par vibrations, soit enfin, d'une congélation [15].

II.5 Conclusion :

Comme on a dit précédemment, pour réaliser les pièces avec des videment interne, nous avons besoin des noyaux c'est ce que nous a pris dans le deuxième chapitre.

Nous parlerons sur les différents procédés du noyautage utilisés aux niveau de l'unité de fonderie berrouaghia (POVAL SPA) par précision pour estimer chaque procédé selon son rendement, ces avantages et ces inconvénients depuis la réalisation des noyaux Just que a son débourrage.

Pour répondre à tous ces question il faut comparer les résultats expérimentaux dans le troisième chapitre.

CHAPITRE III

RÉSULTAT ET INTERPRÉTATION

III. Résultat et Interprétation

III.1 Introduction :

Ce chapitre présente les résultats de l'étude comparative des différents procédés de noyautage utilisés en fonderie, ainsi que leur interprétation approfondie. L'objectif principal de cette recherche est d'évaluer les performances des procédés de noyautage en termes de qualité, afin de fournir des recommandations pour leur utilisation dans l'industrie de la fonderie. Pour cette raison plusieurs analyses et essais ont été utilisées.

III.2 Analyse du sable neuf :

III.2.1 Déterminer de la teneur en eau d'un sable neuf :

A. Principe :

Cette méthode consiste à sécher l'échantillon à l'aide d'un dessiccateur utilisant des lompes infrarouge dont l'intensité est régulée afin d'obtenir une température de 105°C minimum.

Ces dessiccateur disposent d'une balance incorporée qui permet de suivre la perte de masse au cours du temps et sont généralement équipés une fonction "auto stop" qui coupe de chauffage et affiche le résultat lorsque la masse est stable (0.001 g prés) pendant 30 secondes.

B. Matériels :

- Un dessiccateur à infrarouge équipé d'une balance capable d'effectuer des pesées au centigramme prés. Le dessiccateur sera vérifié par comparaison avec la méthode A (étuvage) sur au moins 5 points de mesure répartis entre 1 et 5**%**de teneur en eau.
- Coupelles en alliages d'aluminium

C. Mode Opératoire :

- Disposer une coupelle vide et propre sur la balance du dessiccateur infrarouge.
- Faire la tare.
- Régler la température du dessiccateur au minimum à 105°Cet au maximum à 120°C.
- Choisir la fonction d'arrêt automatique.
- Disposer dans la coupelle entre 10 et 15g de sable.
- Déclencher la mesure.
- Noter la valeur de la perte de masse H (**%**) (teneur en eau) affichée en pourcent par le dessiccateur.

D. Expression de calcul :

$$\% H_2O = [(M_0 - M_1) / E]*100$$

M_0 : masse en gramme du vase de prise d'essai avant séchage.

M_1: masse en gramme du vase et de prise d'essai après séchage.

E: masse en gramme de la prise d'essai.

- Application numérique :

Après séchage on trouve **M_1= 9.991 g**

$\% H_2O = [(10-9.991) /10]*100$

$$\% H_2O = 0.09$$

III.2.2 Détermination de la perte au feu :

A. Principe :

Déterminer la perte de masse après calcination à une température de 105°C

B. Mode Opératoire :

Pesé 20 g+5 ml tétrasoduim di phosphate + 100 ml H2O dans un bécher de 600ml mettre sur la plaque chauffante pendante 10min puis ajoute H2O jusqu' à 400ml mettre sur l'agitateur pendant 10min ensuite ajoute un peu et lasser reposer pendante 30min siphonner puis ajoute de l'eau et siphonner puis filtrer et mettre le creuset sur la plaque chauffante et mettre dans le four à 1050°C pendant 2heures.

C. Matériel :

- Balance au dixième de mg.
- Four à moufle.
- Capsules en porcelaine d'une capacité.
- D'environ 50 cm^3.
- Dessiccateur.

D. Expression de calcul :

La perte au feu à1050°C du sable se calcule de la manière suivante :

$\% PF = [(M1-M2) / E]*100$

Pert au feu PF=0.18 %

III.2.3 Détermination de la répartition granulométrique de sable neuf :

A. Principe :

Séparer la déférente tranche granulométrique d'un échantillon sable.

B. Domaine d'application :

Cette méthode prescrit une technique de séparation des tranches granulométrie d'un vibreur magnétique.

C. Appareillage :

- Balance,
- Série de tamis,
- Vibreur magnétique.



Figure III.1: Photographie du tamiseur utilisé au cours de notre étude.



Figure III.2: Photographie du balance utilisé au cours de notre étude.

D. Mode Opératoire :

L'analyse granulométrique est normalement fait sur un échantillon débarrassé de ses élément de moins de 20 micromètres et séché à 105°C jusqu'à masse constante.

S'assurer que la série de tamis soit complète que les toiles soient parfaitement propres et en bon état.

Emboiter les tamis les uns dans les autres dans l'ordre croissant des ouvertures de mailles, verser l'échantillon sur le tamis supérieur.

Fixer la série de tamis sur le secoueur.

Secouer pendant une tempe constante, choisi en fonction du type de secoueur (10min étant considéré comme un minimum). Une minuterie peut utilement êtreadjointe au secoueur.

L'opération terminée, recueillir séparément les refus, brosse la toile avec précaution au moyen de la brosse appropriée appliquée normalement à sa surface,afin de récupérer le grain retenus dans les mailles .Effectuer cette opération sur lesdeux faces de la toile.

Peser aux prés chaque refus. En noter la masse en regard du numéro du tamis correspondant.

La somme des refus doit correspondre à la masse de sable initiale, avec une tolérance de ±0.2%. L'écart conforme à cette tolérance est report sur tamis le plus chargé (ou par moitié sur chacun des tamis les plus charges si ceux-ci accusent desrefus égaux à 10 % prés).

Calcule chaque refus en pourcentage de la masse utilisée avant élimination des éléments de moins de 20 micromètres (chaque refus est automatiquement exprime en pourcent si

l'échantillon était de 20g).

Voici les résultat obtenue selon l'opération de tamisage.

Tableau III.1 : La répartition granulométrique de sable.

N° de tamis A.F.S	Ouverture des mailles (mm)	Refus (g)	Refus en (%)	Multiplicationselon DIN 4188	Produit (g)	Refus en cumulé (%)	Log10 (Ouvert-ure des mailles)
1	1	0.00	0.00	9	0.00	100	0.00
2	0.710	0.00	0.00	15	0.00	100	-0.15
3	0.500	0.07	0.35	25	8.75	99.65	-0.30
4	0.350	0.97	4.85	35	169.75	94.80	-0.45
5	0.250	8.20	41.00	45	1845	53.80	-0.60
6	0.200	6.00	30.00	52	1560	23.80	-0.70
7	0.180	2.42	12.10	60	726	11.70	-0.74
8	0.125	1.59	7.95	81	643.95	03.75	-0.90
9	0.090	0.24	1.20	118	141.6	02.55	-1.04
10	0.063	0.42	2.10	164	344.4	00.45	-1.20
Total	*	20	100	*	5439.45	*	*

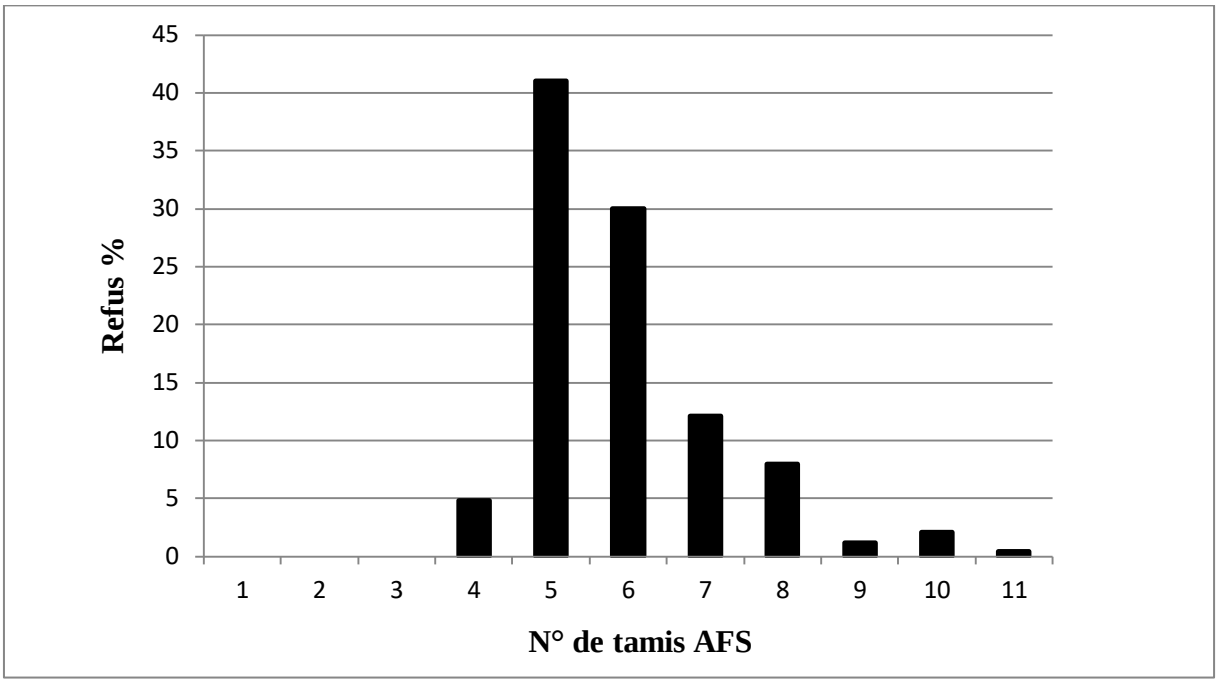


Figure III.3: Histogramme de la répartition granulométrique.

III.2.4 Détermination de la fraction basique :

La fraction basique du sable est la somme maximale des résidus dans trois tamis voisins :

41.00

30.00

12.10

FB = (41.00+30.00+12.10)

FB = 83.10%

A. Détermination de la catégorie :

Le sable est de la **catégorie b**, le résidu du sable dans le tamis inferieur extrême de la fraction basique est plus grand par rapport au résidu du sable dans le tamis supérieur extrême.

B. Détermination du groupe de sable :

Le groupe du sable est déterminé d'après le numéro du tamis moyen de la fraction basique. En fonction de la grosseur des grains de la fraction basique, les sables sont divisés en 08 groupes universels représentés dans le tableau III.2.

Tableau III.2: Les groupes de sable.

Numéro des tamis de la fraction basique	Indication du groupe	Dénomination du groupe du sable
0.710 - 0.5 – 0.335	0.5	Gros
0.5 – 0.355 – 0.250	0.335	Très grand
0.355 – 0.250 – 0.2	0.250	Grand
0.250 – 0.2 – 0.180	0.2	Moyen
0.2 – 0.180 – 0.125	0.180	Fin
0.180 – 0.125 – 0.09	0.125	Très fin
0.125 – 0.09 – 0.063	0.09	Mince
0.09 – 0.063 – fond	0.063	Poussiéreux

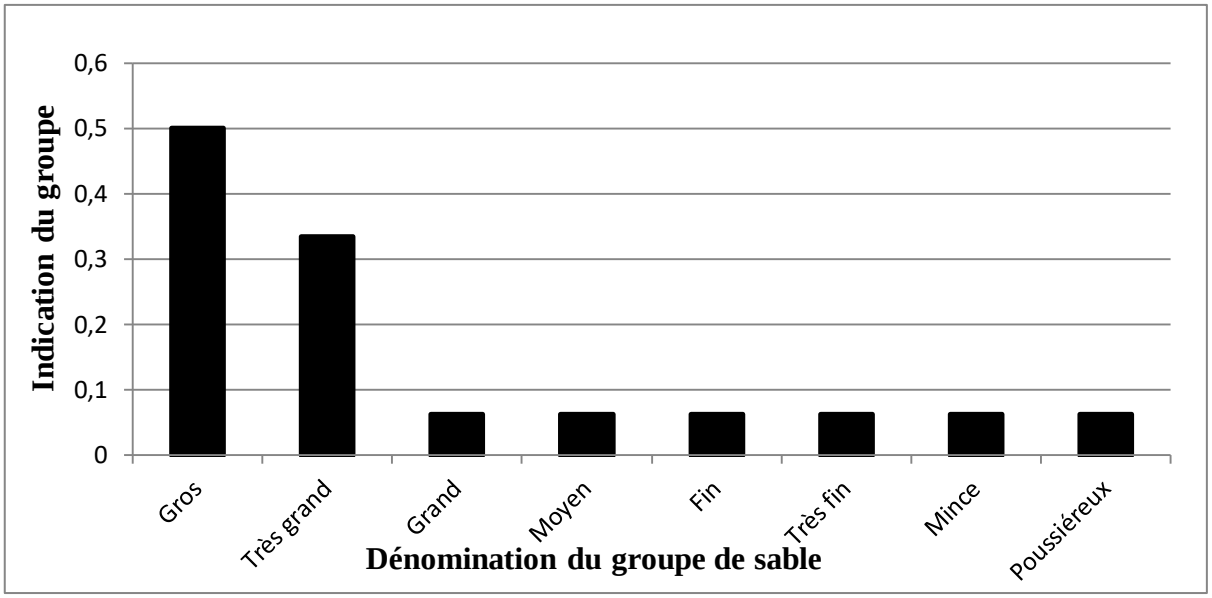


Figure III.4: Histogramme représente la variation du diamètre relatif aux groupes desable.

- D'après le tableau et l'histogramme, on s'agit du sable de groupe **Moyen.**

C. Détermination de la structure granulaire :

Si la quantité du sable se trouvant dans les 03 tamis voisins est supérieure à 70 %, on dit que le sable à une structure **granulaire concentrée,** si cette quantité est entre 60 % 70%, on dit que la structure est **étalée.** Si cette quantité est inférieure à 60%, on dit que le sable à une structure **très étalée** et **dispersée**.

La quantité du sable dans les 03 tamis voisins :

Σ (41.00+30.00+12.10) = 83.10 % > 70 %

D'après la quantité du sable se trouvant dans les 03 tamis voisins, il dit que le sable à une structure **granulaire concentrée**.

D. Détermination de l'indice de finesse (AFS) :

C'est un chiffre conventionnel qui a cependant l'avantage d'indique numériquement la prédominance des grains les plus nombreux d'un sable étudié , L'indice de chiffre conventionnel est calculé selon la formule suivante :

AFS = $\Sigma a_i + r_i / \Sigma r_i$

$\mathbf{r_i}$: le résidu du sable dans chaque tamis (**Tableau III.1**).

$\mathbf{a_i}$: le coefficient multiplicateur pour chaque tamis (**Tableau III.1**).

$$\text{Donc} \qquad AFS = \frac{5439.45}{100}$$

AFS = 54.39

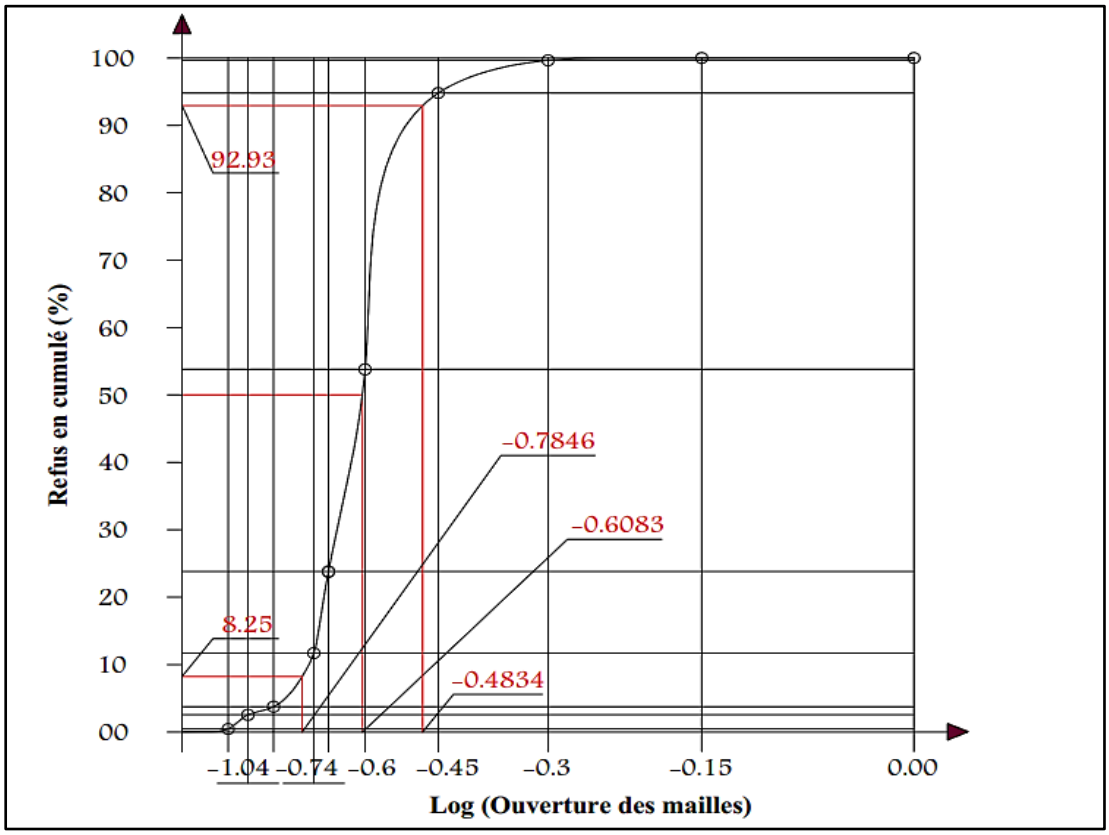


Figure III.5 : Courbe granulométrique cumulative de refus.

E. Calcul du diamètre moyen des grains et le degré d`uniformité :

Le diamètre moyen des grains de sable dm, et le degré d`uniformité ou régularité du sable C sont déterminés par la courbe granulométrique des valeurs cumulées, cette courbe est réalisée suivant les coordonnés :

- Axe des abscisses le logarithme décimal de l`ouverture des mailles des tamis.
- Axe des ordonnées le pourcentage de sable qui passe à travers le tamis considéré (c'est-à-dire se trouve dans les tamis inferieures du tamis considéré).

E.1 Déterminé le diamètre moyen :

Pour obtenir le diamètre moyen des grains de sable qui par définition est le tamis fictif retenant 50% de masse de sable.

On trace la ligne horizontale du pourcentage 50% sur l`axe d`ordonnées jusqu`à intersection avec la courbe (figure III-6), on baisse une ligne perpendiculaire jusqu'à l`axe des abscisses et on note le point dm correspondant au diamètre moyen.

Résultat :

$$10^{-0.6083} = \text{Diamètre moyen}$$

Donc le Diamètre moyen égale a **DM=0.2464 mm**

E.2 Degré d'Uniformité :

Pour la détermination du degré de régularité on calcule d'abord **2/3dm** et **4/3dm**. Puis on détermine **log 2/3dm** et **log 3/4dm** on établi ces point sure l'axe des abscisses, on rétablit deux perpendiculaires jusqu'à la courbe et puis on trace 2 lignes horizontale jusqu'a l'axe d'ordonnées, on obtient 2 points A et B et on calcule le degré de régularité DR%.

$$DR\% = A\% - B\%$$

$A\% = 4/3dm = 4/3 \times 0.2464 = 0.328$ donc 92.9 %

$B\% = 2/3dm = 2/3 \times 0.2464 = 0.164$ donc 8.25 %

$A\% - B\% = 92.9 - 8.25 = 84.65\%$

Donc degré d'uniformité égale à :

DU=84.65%

III.3 Résultats expérimentaux pour chaque procédé de noyautage :

III.3.1 Procédé silicate de soude-CO_2 :

A. Préparation de mélange :

Cette procédure décrit une méthode pour la préparation des mélanges avec un malaxeur de laboratoire à pales, utilisable pour le procédé de prise par gazage.

- Matériel :

- Balance.
- Malaxeur de laboratoire à pales de capacité 5kg.
- Chronomètre,



Figure III.6 : Photographie d'un malaxeur utilisé au cours de la présente étude.



Figure III.7 : Photographie de chronomètre utilisé au cours de notre étude.

- Conditions opératoires :

- Matériel propre et sec sans acidité résiduelle.
- Température du matériel et des constituants du mélange 23±1°C.

- Mode opératoire :

- Vérifier que le matériel est propre et sec.
- Peser la charge de sable au gramme prés et l'introduire dans le malaxeur.
- Peser au centigramme la quantité de catalyseur à introduire.
- Mettre en marche le malaxeur.
- Malaxer pendant 5 minutes.
- Noter le temps total d'introduction du silicate de soude.
- Nettoyer les récipients à l'eau et la verrerie à l'acétone.
- Essuyer et sécher Nettoyer le malaxeur et faire une malaxée de sable neuf pour le neutraliser.

B. Détermination des caractéristiques mécaniques (la résistance à la flexion) :

Une essais est effectué : Flexion

Détermination de des charges de ruptures d'éprouvettes conventionnelles soumise à la contrainte de flexion.

- Equipement:

- Moule d'éprouvette d'essai mécanique,
- Une source de gazage (CO_2),
- Machine universelle d'essai mécanique pour les sables,
- Chronomètre.



Figure III.8: Photographie de Moule d'éprouvette d'essai mécanique utilisé au cours de notre étude.



Figure III.9: Photographie de Machine universelle d'essai mécanique pour les sables utilisé au cours de notre étude.

- Mélange de base sans adjuvant de débourrage :

Tableau III.3 : Composition de mélange.

Matière	Pesé (g)	Pourcentage %	Temps de malaxage (min)	Temps de gazage (min)
Sable	1925	96.25	5 min	5 – 15 min
Silicate de soude	75	3.75		

- Peser 1925 g (96.25 %) de sable neuf,
- Peser 75 g (3.75 %)de silicate de soude,
- Introduire ensuite dans un malaxeur,
- Malaxer pendant 5 minutes,
- Gazage pendant 5 à 15 minutes.

- Détermination du module d'un silicate de sodium :

Le module d'un silicate de sodium est défini par le rapport moléculaire silice/oxyde de sodium :

$$R = \frac{SiO_2}{Na_2O}$$

On a **Na2O = 15.07 %**

SiO2 = 29.74 %

- **Résultat :**

$$R = \frac{29.74}{15.07}$$

Le module : R=1.97

La faible valeur du module de silicate de soude rend le débourrage difficile, il faut utiliser un marteau-piqueur.

B.1 Caractérisation mécanique (essai de flexion) :

- Mise en œuvre des éprouvettes :



Figure III.10: Remplissage et compactage du mélange au niveau du moule.

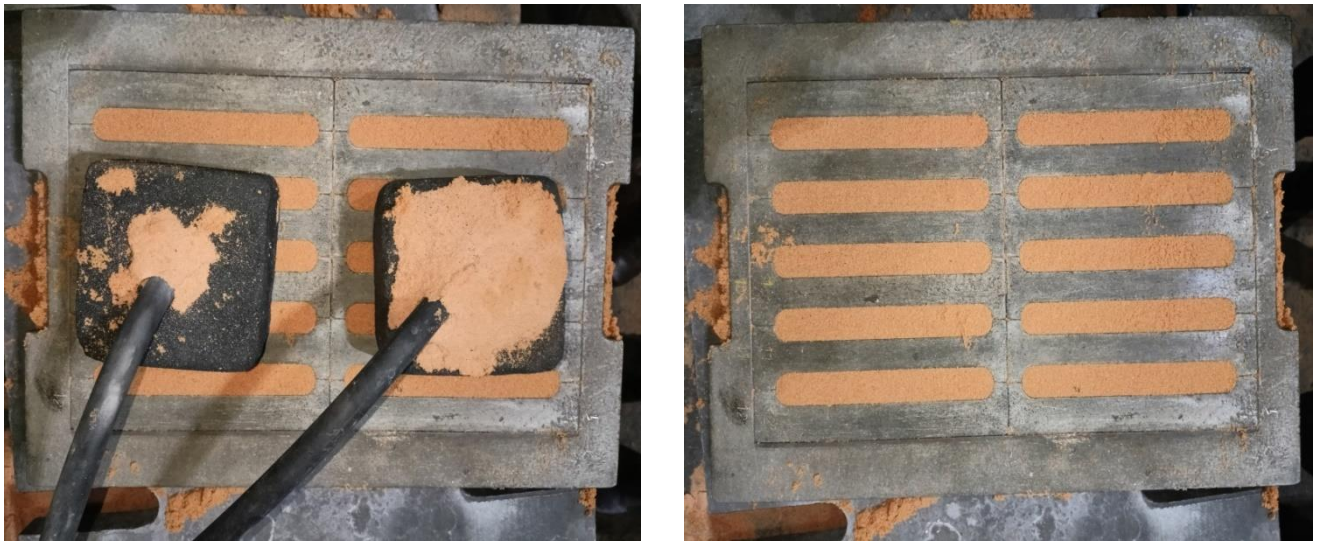


Figure III.11: Gazage du mélange.



Figure III.12: Photographie des éprouvettes après le démoulage pour les essais mécaniques.

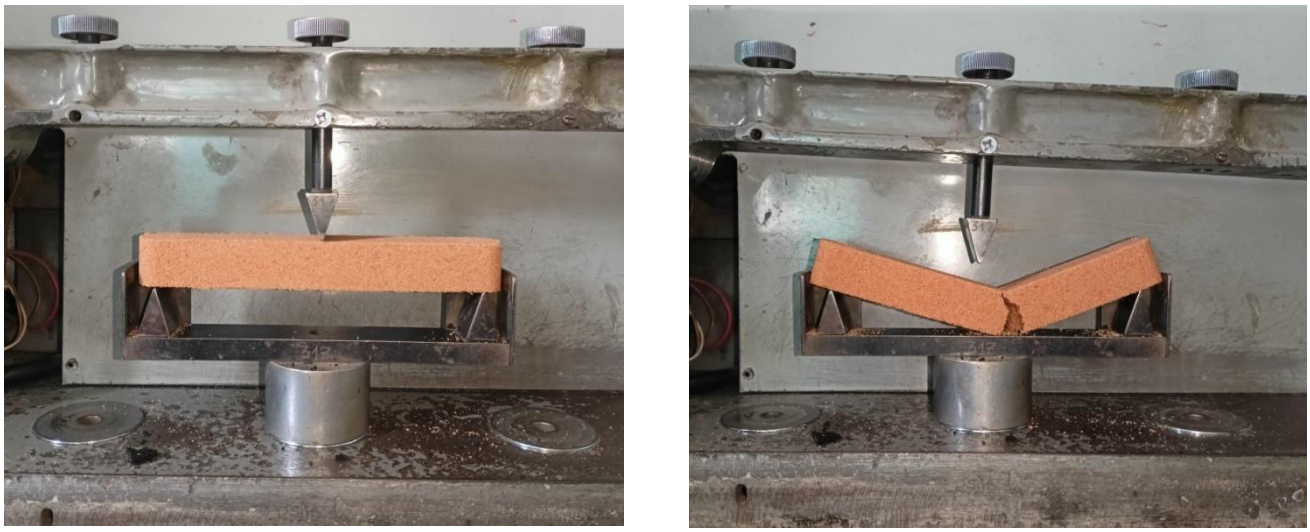


Figure III.13: Photographie des éprouvette avant est après l'essai mécanique.

C. Expression des résultats:

Les résultats sont exprimés en Kg F/cm^2.

Tableau III.4 : Résultats de la résistance à la flexion en fonction de temps de stockage.

N° D'essai	1	2	3	4	5
Temps de stockage (h)	½	1	2	4	24
La résistance à la flexion (Kg F / cm^2)	4 - 4	6 - 5	8 - 8	7 – 8	6 - 6

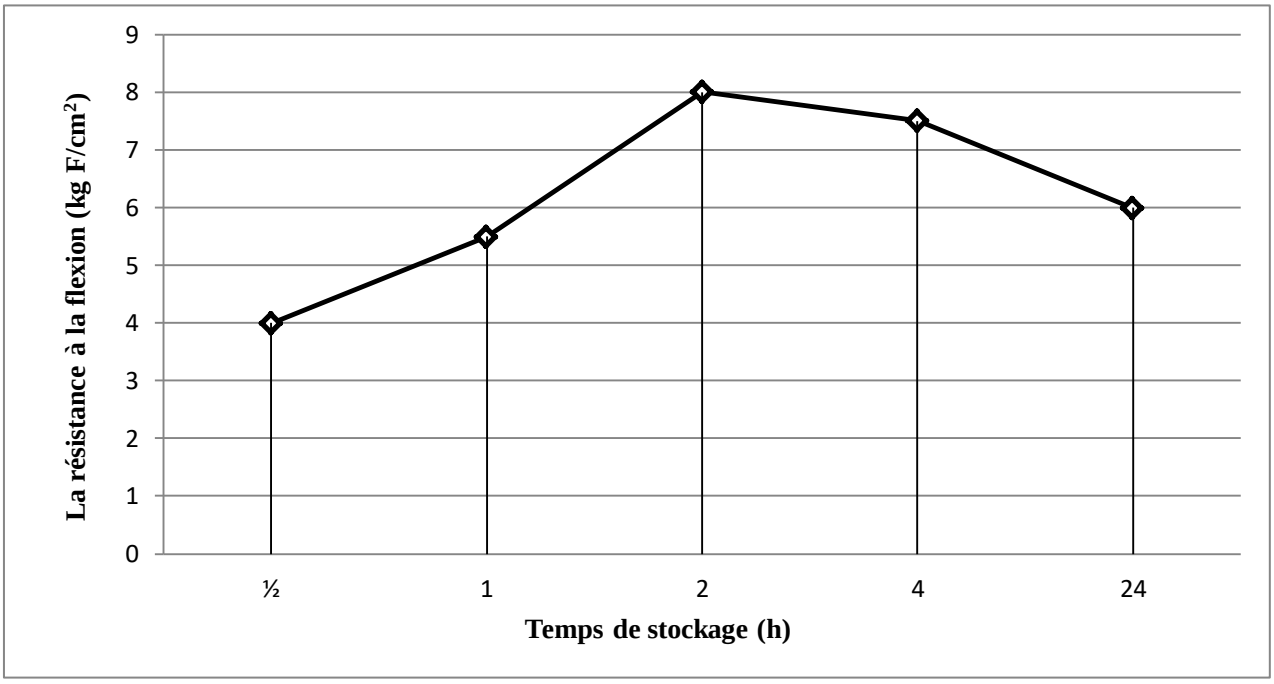


Figure III.14 : La résistance à la flexion en fonction du temps du stockage.

C.1 Interprétation de la figure III.14 :

L'interprétation des résultats concernant la résistance à la flexion des noyaux en fonction du temps de stockage est la suivante :

D'après les observations de la figure III.14, il est clair que la résistance à la flexion des noyaux augmente initialement pendant les premières heures de stockage, atteignant un pic à la deuxième heure avec une valeur de 8 kg F/cm2. Cela indique que les propriétés mécaniques

des noyaux se renforcent au début du processus de stockage.

Cependant, après 24 heures de stockage, la résistance à la flexion des noyaux montre une tendance à diminuer, atteignant une valeur de 6 kg F/cm2. Cette diminution suggère une détérioration progressive des propriétés mécaniques des noyaux au fil du temps de stockage

Ces observations soulèvent des questions concernant la durabilité et la stabilité à long terme des noyaux pendant le processus de stockage. Il est important d'analyser les facteurs qui pourraient contribuer à cette détérioration, tels que l'humidité, la température ou d'autres conditions environnementales, ainsi que les caractéristiques spécifiques des matériaux de noyau utilisés.

La résistance à la flexion diminuer à cause de :

- Les matériaux peuvent perdre leur résistance avec le temps en raison d'une exposition prolongée à des conditions environnementales telles que la chaleur, l'humidité.
- Les défauts structurels tels que les fissures, les porosités, les inclusions, les zones de faiblesse, etc. peuvent réduire la résistance à la flexion du noyau.
- La réaction entre le silicate de soude et gaz CO_2 n'est pas complète.
- Le temps de gazage n'est pas suffisant.

D. Essai de débourrage :

En vue d'effectuer une comparaison plus précise entre les différents procédés de noyautage, nous avons mené une expérimentation sur chantier (dans un atelier de moulage à la main). Cette démarche consiste à fabriquer un moule en sable, suivie par la mise en place du noyau en silicate de soude (par le biais d'une opération de remoulage). Une fois la coulée réalisée et la solidification achevée, nous avons procédé à un test d'enlèvement du noyau (débourrage). L'objectif était de déterminer si l'opération d'enlèvement du noyau est facile ou difficile.

- Débourrage de pièce contenant un noyau de silicate de soude – CO_2 :

Le débourrage est la libération ou le retrait du moule de la pièce coulée après le processus de coulée.

Cette opération est utilisée pour retirer la partie coulée du moule après sa solidification et sa prise dans le moule, à l'aide d'outils spéciaux tels que des marteaux, des outils pneumatiques, etc.

L'opération de Débourrage est utilisée dans les industries métallurgiques, plastiques et

autres industries qui utilisent des moules dans le processus de fabrication.

L'opération de "Débourrage" est considérée comme une partie importante du processus de fabrication, car elle aide à obtenir une pièce finie prête à l'emploi après sa fabrication et son coulage dans le moule.

D.1 Réalisation du noyau :

Le noyau, de forme simple pour cette pièce, est réalisé à l'aide une boite à noyau (Figure III.15) et avec procédé silicate de soude-CO_2 .

La boite à noyau remplie de mélange (silicate de soude, sable neuf), tassé de façon homogène, Lorsque noyau est durci, la boite est démontée, le noyau délicatement sorti (Figure III.17).

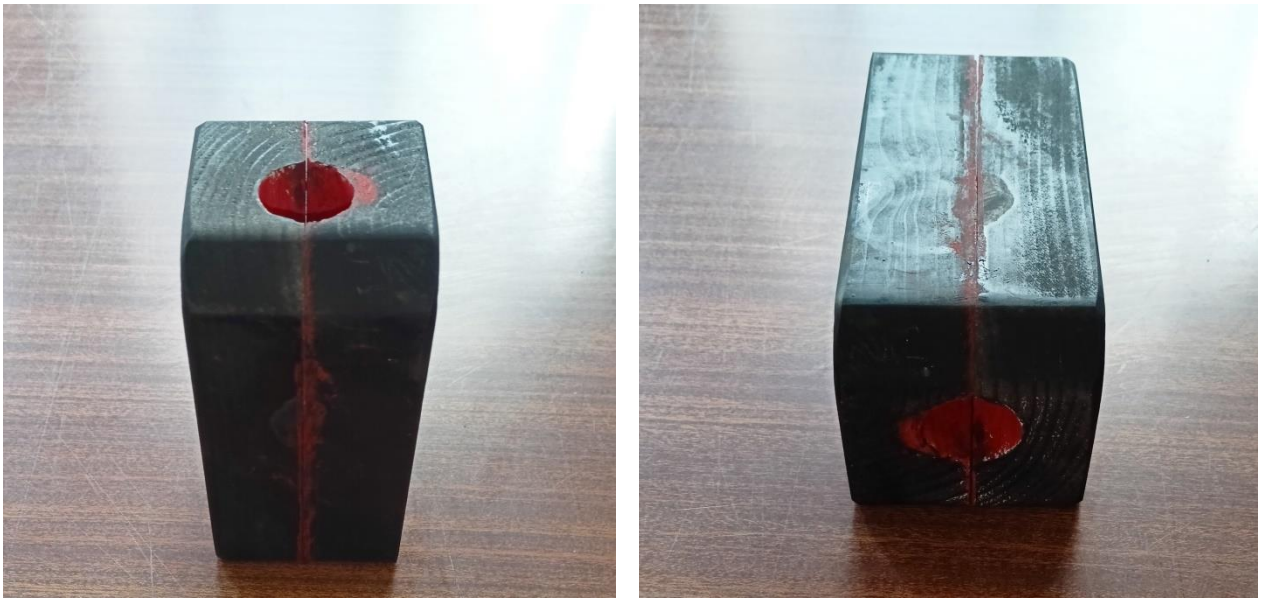


Figure III.15 : Photographie de la boite à noyau utilisé au cours de notre étude.

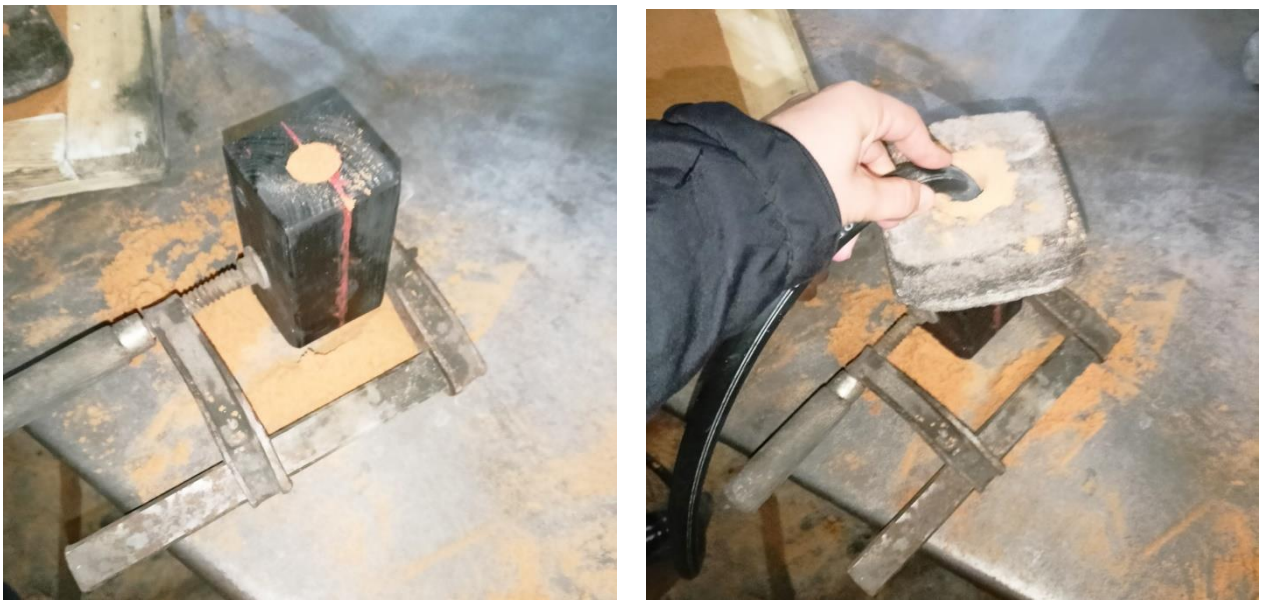


Figure III.16 : Remplissage et gazage du mélange



Figure III.17 : Photographie de la noyau sorti de sa boîte.

D.2 Réalisation du moule :

Nous avons réalisé un moule contenant un modèle de notre pièce, ce modèle a été fabriqué en bois selon les dimensions de notre noyau, comme présenté sur les figures suivantes :

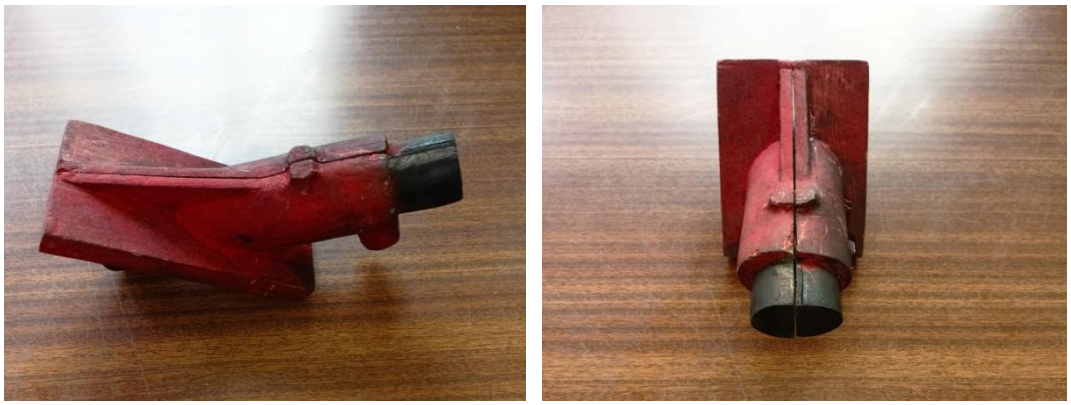


Figure III.18 : Photographie de model réalisé en bois utilisé au cours de notre étude.



Figure III.19 : Le modèle fixée à l'intérieur du ½ châssis inférieur positionné.

Apres remplissage du châssis inférieur avec le sable à vert, On racle alors la surface du châssis pour pouvoir retourner le tout.



Figure III.20 : Le positionnement du châssis supérieur sur le châssis inférieur (demi-premier modèle) se fait en ajoutant de la poudre de séparation entre les deux.



Figure III.21 : Le remplissage du châssis supérieur avec du sable à vert se fait en ajoutant le système d'alimentation.





Figure III.22: Sépare les deux châssis et on enlève délicatement les deux ½ modèles.



Figure III.23 : Placé le noyau dans l'empreinte du châssis inférieur.



Figure III.24 : Assemblage des deux châssis



Figure III.25 : Coulée et remplissage du moule.



Figure III.26 : Démoulage de la pièce en détruisant le moule.



Figure III.27 : La pièce après enlever le système d'alimentation.

D.3 Les étapes de débourrage (Enlèvement le noyau) :





Figure III.28 : Détruire le noyau à l'aide d'un marteau-piqueur.



Figure III.29 : Photographie représente la pièce après le débourrage.

D.4 Interprétation de résultat des figures précédemment :

Après avoir terminé les travaux expérimentaux sur ce procédé, nous avons pris des remarques suivantes :

- La préparation du mélange selon ce procédé est rapide et facile,
- Le noyau présente une faible résistance à la flexion (au maximum 8 kg F/cm^2),
- La durée de stockage des noyaux de silicate de soude - CO_2 est courte, au maximum 48 heures,
- La précision dimensionnelle des noyaux est faible,
- Le débourrage selon ce procédé est très difficile,
- En remarque d'après les figures III.26 et III.27 que la surface de la pièce est rugueuse.

Pour corriger les défauts mentionnés précédemment avec ce procédé de noyautage, voici les suggestions d'amélioration :

Pour améliorer le débourrage :

- Il est recommandé d'ajouter des adjuvants tels que le charbon, la farine de bois, le sucre ou la dextrine au mélange du noyau ;
- vérifier le taux de silicate incorporé dans le mélange ;
- vérifier périodiquement le module de silicate, il est recommandé d'éviter d'avoir un module bas afin de faciliter le débourrage.

Pour améliorer l'état de surface :

- Il est recommandé d'appliquer un vernis sur la surface du noyau pour obtenir une meilleure finition.

III.3.2 Procédé croning:

A. Analyse de sable croning :

C'est un sable utilisé dans le procédé de noyautage prise à chaud, se solidifiant sous l'effet de la chaleur.

L'action de durcissement est la résultante de l'enrobage des grains de sable par des pellicules de résine.

Ce sable est utilisé pour la fabrication des noyaux, et permet l'obtention des évidements à des parois minces, il doit répondre à des caractéristiques physico-chimiques bien déterminées pour son application en fonderie.

A.1 Détermination de la densité en vrac :

- Principe:

La densité en vrac est obtenue par posée d'un échantillon de sable non tassé de volume connu.

- Equipement:

- Mesure de 28.7785 g,
- balance.



Figure III.30 : Photographie du balance et du mesure utilisé au cours de notre étude.

- Mode opératoire :

- Remplir la mesure de sable préenrobé.
- Ajuster avec précaution le niveau de sable.
- Peser le sable utilisé.

- Expression des résultats :

La mesure ayant un volume de 28.7785g, le résultat est obtenu lors de la pesée est s'exprime en g/l.

La masse de l'eau = 28.7785g

La masse du sable = 44.6543g

28.7785 ⟶ **1000**

44.6543 ⟶ **X**

X : La valeur de la densité en vrac en g/l.

$$\frac{44.6543 \times 1000}{28.7785}$$

La densité en vrac = 1551.6548 g/l .

A.2 Détermination de la teneur en matières volatiles :

La teneur en matière volatile est le pourcentage de perte de masse supporté par un échantillon de sable préenrobé pendant un séjour de 1 heure dans une étuve chauffée à 160°C.

- **Equipement:**

- Etuve à 160°C±2°C
- Balance de précision.
- Dessicateur.
- Creusets réfractaires.
- Minuterie.

- Mode opératoire :

- Peser le creuset utilisé.
- Placer et peser dans ce creuset 10 g de sable (5g).
- Maintenir le creuset et le sable pendant 1heure à 160°C dans l'étuve préalablement mise à T°.
- Refroidir le creuset et le sable dans le dessicateur.
- Peser à nouveau le creuset et le sable simultanément.
- Peser séparément les refus recueillis sur chaque tamis au centigramme prés.

- Expression des résultats :

Le résultat est obtenu est exprimer en % .

M.V = 0. 35% Max

A.3 Calcul de l'indice de finesse :

On multiplie chaque refus exprimé en % par un nombre caractéristique du tamis correspondant, les résultats sont cumulés, la somme est divisée par le % de résidu granuleux.

En désignant par:

- R_1 R_2 ….. Ri les refus respectif sur chaque tamis.
- M_1 M_2 ….. Mi les multiplicateurs correspondant.

L'indice de finesse A.F.S, s'exprime par la relation suivante:

$R_1M_1+R_2M_2+$ ….. $/R_1+R_2+$….. R_i.

- Expression des résultats :

A F S 55 – 60

B. Détermination des caractéristiques mécaniques (la résistance à la flexion) :

Une essais est effectué : Flexion

Détermination de des charges de ruptures d'éprouvettes conventionnelles soumise à la contrainte de flexion.

- Equipement:

- Four de cuisson d'éprouvette de flexion,
- Machine universelle d'essai mécanique pour les sables,
- Chronomètre,
- Moule d'éprouvette d'essai mécanique,
- Balance.



Figure III.31 : Photographie de four de cuisson d'éprouvette de flexion utilisé au cours de notre étude.

- Mode opératoire:

- Confectionner les éprouvettes nécessaires dans les appareils de cuisson préalablement chauffées à 280°C en respectant le temps de cuisson.
- Laisser refroidir.
- Peser les éprouvettes de flexion.
- Procéder à l'essai de flexion.

B.1 Caractérisation mécanique (essai de flexion) :

- Mise en œuvre des éprouvettes :



Figure III.32 : Tamisage du sable croning.

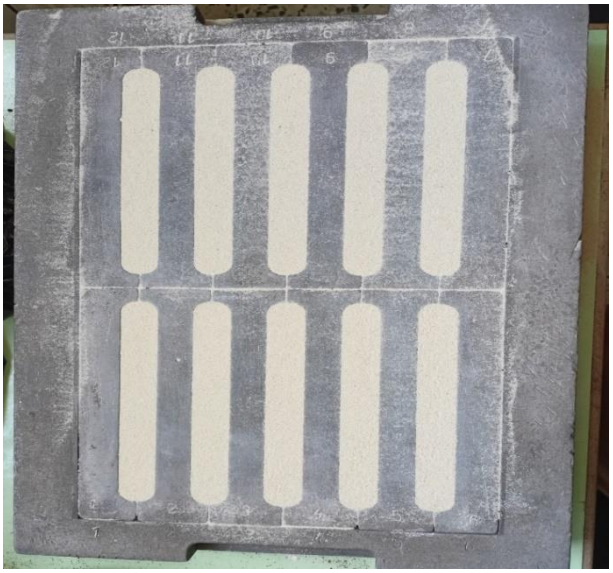


Figure III.33 : Compactage du sable d'expérience dans le moule.



Figure III.34 : Insérer le moule dans le four de cuisson.



Figure III.35 : Débourrage des éprouvettes d'essai.



Figure III.36 : Photographie des éprouvettes d'essai mécanique.

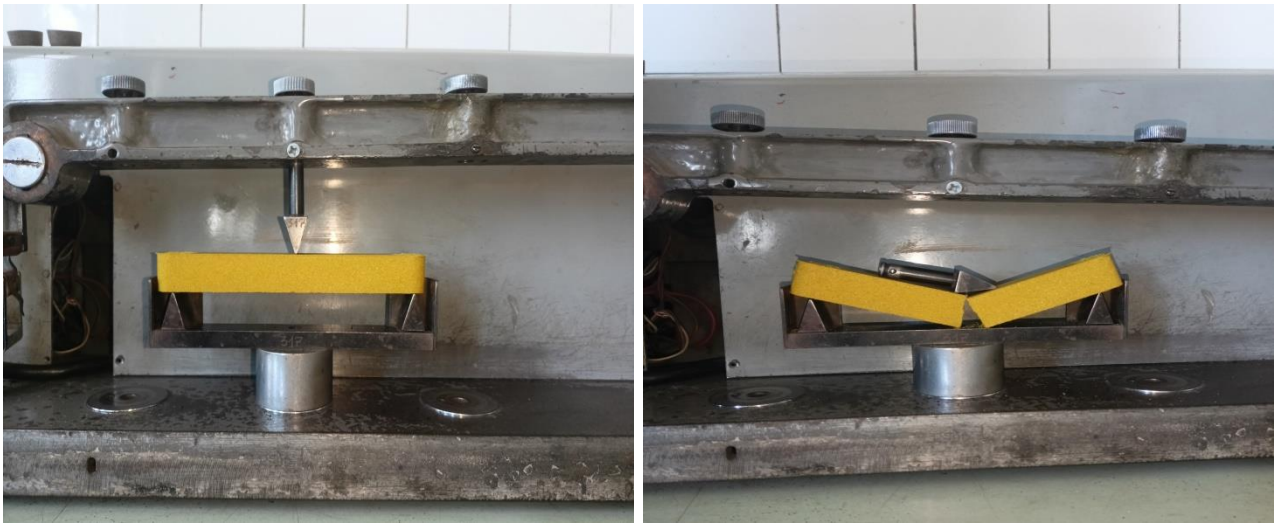


Figure III.37 : Photographie des éprouvette avant est après l'essai mécanique.

C. Expression des résultats:

Les résultats sont exprimés en Kg F/cm^2.

Tableau III.5 : Résultats de la résistance à la flexion en fonction de temps de stockage.

N° d'essai	**1**	**2**	**3**	**4**
Temps de stockage (h)	½	1	4	24
La résistance à la flexion (Kg F / cm^2)	**> 85**	**> 85**	**> 85**	**> 85**

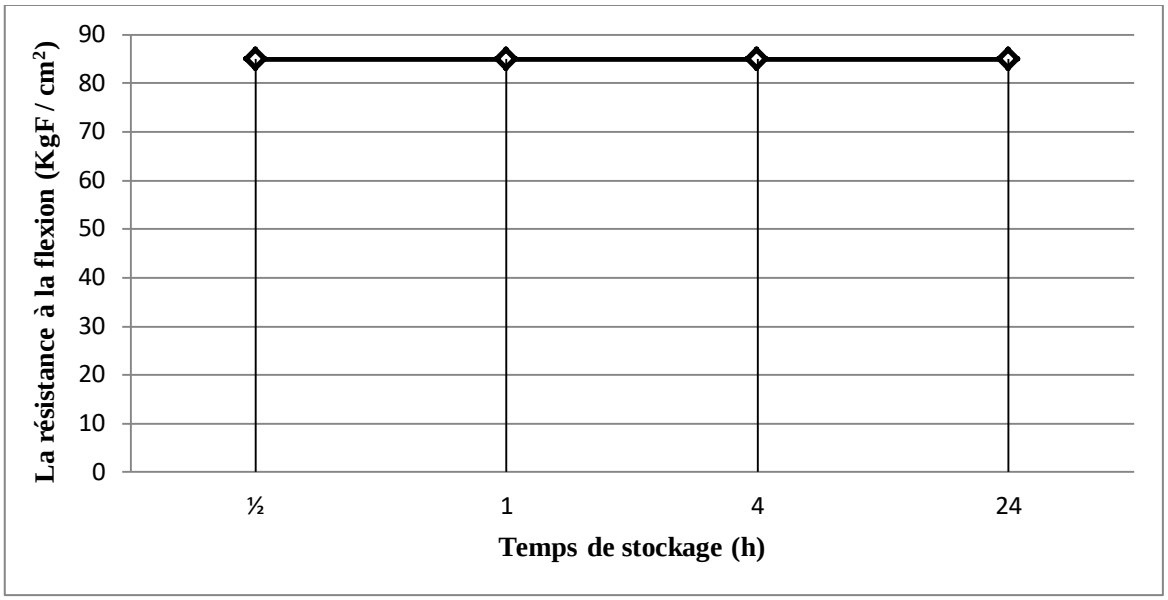


Figure III.38 : La résistance à la flexion en fonction du temps du stockage.

C.1 Interprétation de la figure III.38 :

Le procédé Cronning, également connu sous le nom de Cronning Process, est une technique de fabrication utilisée dans l'industrie pour produire des pièces à haute résistance à la flexion. D'après les observations réalisées sur la figure III.38, il est clair que la résistance à la flexion reste constante et significativement élevée au fil du temps de stockage, atteignant une valeur supérieure à 85 kg F / cm^2.

Cette interprétation suggère que le procédé Cronning présente une stabilité remarquable en termes de résistance à la flexion au fil du temps. Cela signifie que les pièces fabriquées selon cette méthode conservent leur capacité à résister aux contraintes et à maintenir leur intégrité structurelle sur une période prolongée, sans compromettre leur performance.

La constance de la résistance à la flexion du matériau traité par le procédé Cronning est un avantage clé de cette technique, car cela garantit une fiabilité accrue dans diverses applications industrielles. Les pièces produites par ce procédé conservent ainsi leur qualité structurelle et leur capacité à résister aux forces extérieures, offrant ainsi une durabilité et une résistance accrues dans des conditions d'utilisation variées.

En résumé, le procédé Cronning se distingue par sa capacité à maintenir une résistance élevée à la flexion au fil du temps, ce qui en fait une méthode attrayante pour la fabrication de pièces robustes et fiables.

D. Essai de débourrage :

- Débourrage de pièce contenant un noyau croning :

D.1 Réalisation du noyau :

Le noyau, de forme simple pour cette pièce, est réalisé à l'aide une boite à noyau (Figure III.39) et avec du sable croning.

La boite à noyau chauffés est remplie de sable, tassé de façon homogène, lorsque le noyau est durci, la boite est démontée, le noyau délicatement sorti et ébavuré (Figure III.40).



Figure III.39 : La boite à noyau.



Figure III.40 : Le noyau sorti de sa boîte.

D.2 Réalisation du moule :

Nous avons réalisé un moule contenant un modèle de notre pièce, ce modèle a été fabriqué en bois à l'aide d'une machine de tournage selon les dimensions de notre noyau, comme présenté sur les figures suivantes :



Figure III.41 : Photographie de model et de demi moule.



Figure III.42 : Positionnement du noyau et Assemblage du moule.

D.3 La coulée et le débourrage de la pièce :

Le moule est posé à proximité de poche contenant fonte liquide, La température de la coulée de fonte FGL 20 est entre 1400°C et 1600°C.

Nécessite un équipement de protection : casque avec masque, tablier, guêtres et moufles.

La coulée doit être faite rapidement en un seul geste, il est nécessaire de prélever la bonne quantité à l'aide de la louche préalablement poteyée.

Après la coulée, la pièce se solidifie rapidement mais refroidit très peu, il est donc important de réaliser le démoulage avec précaution.

La pièce est solidaire du châssis supérieur et peut être séparée en soulevant le châssis supérieur du châssis inférieur, qui garde la trace de la pièce moulée.

Le noyau est inclus dans la pièce, il est préférable de ne pas mélanger les deux types de sable. Il est donc nécessaire d'extraire la pièce et son noyau en premier lieu, puis de réaliser l'opération de débourrage sur le noyau séparément, En fonction de la méthode de débourrage utilisée, des résultats différents peuvent être observés.



Figure III.43: Photographie représente la coulée de la pièce.



Figure III.44: Photographie représente la pièce après le débourrage.

D.4 Interprétation des résultats :

Après avoir effectué des travaux expérimentaux sur le procédé Cronning, nous avons recueilli les observations suivantes :

- Le noyau fabriqué selon le procédé Cronning présente une excellente résistance à la flexion, dépassant les 85 kg F/cm^2. Cette caractéristique assure une solidité et une capacité à supporter des charges importantes, ce qui est essentiel pour des applications où la résistance à la flexion est cruciale.
- Contrairement à d'autres méthodes de noyautage, le noyau Cronning conserve sa résistance structurelle même après un stockage prolongé, sans nécessité de retirer

l'humidité. Cela simplifie le processus de préparation et d'utilisation des noyaux, ce qui permet de gagner du temps et de réduire les étapes supplémentaires.

- Le noyau Cronning présente une résistance exceptionnelle à l'effritement pendant le stockage. Cela garantit que les noyaux restent intacts et en bon état, même sur une période prolongée, évitant ainsi les pertes de matériau et les problèmes de qualité associés.
- Le procédé Cronning offre également des avantages esthétiques et dimensionnels. Les pièces moulées avec des noyaux Cronning présentent un état de surface de qualité, ce qui contribue à une finition visuellement attrayante. De plus, la précision dimensionnelle des pièces est très élevée, ce qui est crucial dans de nombreux domaines d'application.
- Enfin, l'opération de débourrage des noyaux Cronning est considérée comme facile. Les noyaux sont retirés automatiquement sans difficulté, simplifiant ainsi le processus de démoulage et permettant une productivité accrue.

En somme, l'essai de débourrage du procédé Cronning met en évidence les nombreux avantages de ce procédé, tels que la facilité de débourrage, la résistance élevée des noyaux, la bonne qualité de surface, la précision dimensionnelle et la résistance pendant le stockage. Ces caractéristiques en font une méthode prometteuse pour la fabrication de pièces durables et de haute qualité dans diverses industries.

III.3.3 Procédé furanique (procédé No-back):

A. Préparation de mélange :

Cette procédure décrit une méthode pour la préparation des mélanges avec un malaxeur de laboratoire à pales, utilisable pour le procédé autodurcissants.

- Matériel :

- Balance.
- Malaxeur de laboratoire à pales de capacité 5kg.
- Chronomètre.

- Conditions opératoires :

- Matériel propre et sec sans acidité résiduelle.
- Température du matériel et des constituants du mélange 23±1°C.

- Mode opératoire :

- Vérifier que le matériel est propre et sec.
- Peser la charge de sable au gramme prés et l'introduire dans le malaxeur.
- Peser au centigramme la quantité de résine à introduire.
- Mettre en marche le malaxeur pour que la résine être bien mélangé avec le sable.
- Peser la quantité d'acide au mélange (sable, acide)
- Mettre en marche le malaxeur.
- Malaxer pendant 5 à 10 minutes.
- Nettoyer les récipients à l'eau et la verrerie à l'acétone.
- Essuyer et sécher Nettoyer le malaxeur et faire une malaxée de sable neuf pour le neutraliser.

B. Détermination des caractéristiques mécaniques (la résistance à la flexion) :

Une essais est effectué : Flexion

Détermination de des charges de ruptures d'éprouvettes conventionnelles soumise à la contrainte de flexion.

- Equipement:

- Moule d'éprouvette d'essai mécanique,
- Machine universelle d'essai mécanique pour les sables,
- Chronomètre.

- Mélange en sable à résine furanique :

Tableau III.6 : Composition de mélange.

Matière	Pesé (g)	Pourcentage %	Temps de malaxage (min)
Sable	965	96.50	5 à 10 min
Résine furanique	16.5	1.65	
Durcisseur (acide)	18.5	1.85	//

- Peser 965 g (96.50 %) de sable neuf,
- Peser 16.5g (1.65٪) de résine furanique,
- Introduire ensuite dans un malaxeur,
- Malaxer pendant 5 minutes,
- Peser 18.5g (1.85 %) de durcisseur (acide).
- Puis malaxer le mélange complet (sable + résine + durcisseur) pendant 5 à 10 min.

B.1 Caractérisation mécanique (essai de flexion) :

- Mise en œuvre des éprouvettes :



Figure III.45 : Remplissage et compactage du mélange au niveau du moule.

On attend 5 minutes que les éprouvettes se solidifient.



Figure III.46: Photographie des éprouvettes après compactage.



Figure III.47: Photographie des éprouvettes après le démoulage pour les essais mécaniques.



Figure III.48 : Photographie des éprouvette avant est après l'essai mécanique.

C. Expression des résultats:

Les résultats sont exprimés en Kg F/cm^2.

Tableau III.7 : Résultats de la résistance à la flexion en fonction de temps de stockage.

N° D'essai	1	2	3	4	5
Temps de stockage (h)	½	1	2	4	24
La résistance à la flexion (Kg F / cm^2)	7	18	30	43	37

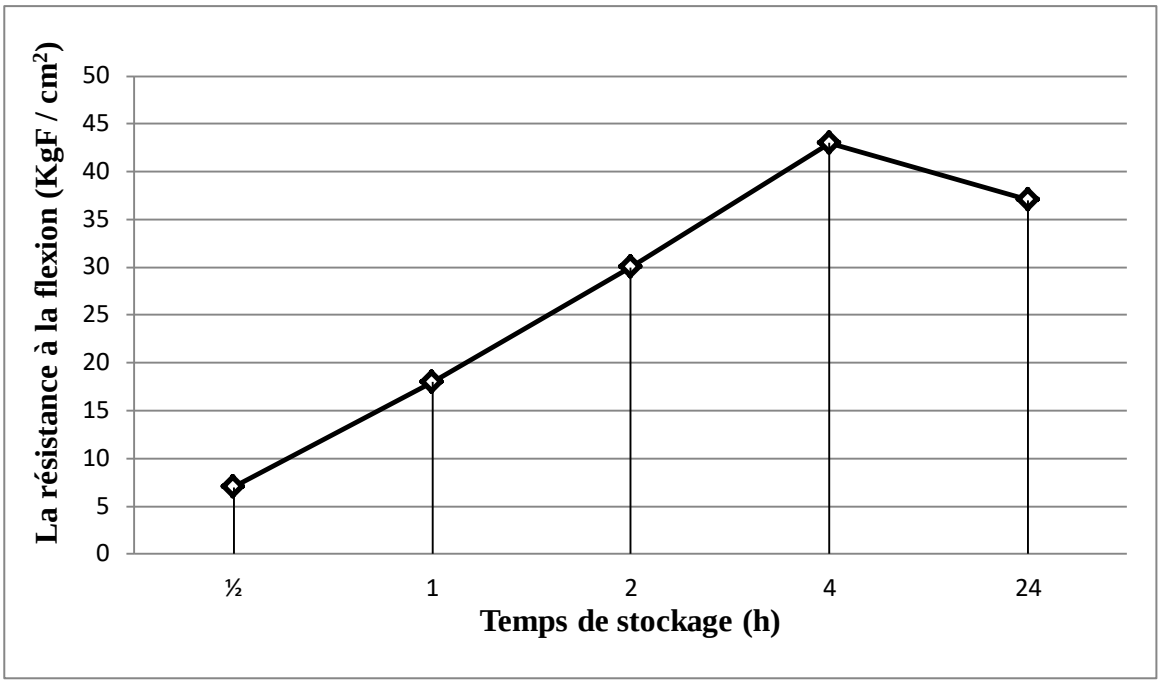


Figure III.49 : La résistance à la flexion en fonction du temps du stockage.

C.1 Interprétation de la figure III.49 :

D'après l'analyse de la figure III.49, nous pouvons observer que la résistance à la flexion des échantillons augmente progressivement pendant les premières heures de stockage, atteignant un pic à quatre heures avec une valeur de 43 kg F/cm2. Cependant, après 24 heures de stockage, cette résistance diminue relativement pour atteindre une valeur de 37 kg F/cm2.

Plusieurs facteurs peuvent contribuer à la diminution de la résistance à la flexion :

- Les conditions de stockage, telles que l'humidité et la température, peuvent détériorer les propriétés mécaniques du noyau au fil du temps. Ces conditions environnementales peuvent altérer les caractéristiques physiques et chimiques du matériau, ce qui peut entraîner une réduction de sa résistance à la flexion.
- Les défauts structurels, tels que les fissures, les porosités, les inclusions et les zones de faiblesse, peuvent également affecter négativement la résistance à la flexion du noyau. Ces imperfections structurelles peuvent affaiblir la structure interne du matériau, réduisant ainsi sa capacité à résister aux contraintes mécaniques, notamment la flexion.
- La qualité des matériaux utilisés, tels que la résine et le durcisseur, joue un rôle crucial dans la résistance à la flexion du noyau. Des matériaux de mauvaise qualité ou mal dosés peuvent altérer les propriétés mécaniques du matériau, diminuant ainsi sa

capacité à résister à des contraintes de flexion. Par conséquent, un contrôle strict de la qualité des noyaux utilisés dans le processus de fabrication est essentiel pour assurer des performances optimales en termes de résistance à la flexion.

En résumé, la diminution de la résistance à la flexion observée peut être attribuée à des facteurs tels que les conditions de stockage, les défauts structurels et la qualité des matériaux utilisés. Une meilleure gestion de ces aspects peut contribuer à maintenir une résistance à la flexion optimale des noyaux dans le procédé étudié.

D. Essai de Débourrage :

- Débourrage de pièce contenant un noyau en sable à résine furanique :

D.1 Réalisation du noyau :

Le noyau, de forme simple pour cette pièce, est réalisé à l'aide une boite à noyau (Figure III.50) et avec procédé en sable à résine furanique.

La boite à noyau remplie de mélange (sable neuf, résine, durcisseur), tassé de façon homogène, Lorsque noyau est durci, la boite est démontée, le noyau délicatement sorti.



Figure III.50 : Photographie de la boite à noyau utilisé au cours de notre étude.

Après avoir rempli la boîte à noyau avec du sable à résine furanique, il est recommandé d'attendre entre 5 et 15 minutes pour permettre au mélange de se solidifier. Une fois que le noyau a durci, le noyau il est déboité pour commencer la réalisation du moule.

D.2 Réalisation du moule :

Nous avons réalisé un moule contenant un modèle de notre pièce, ce modèle a été fabriqué en bois selon les dimensions de notre noyau.



Figure III.51 : Le modèle fixée à l'intérieur du ½ châssis inférieur positionné.

Apres remplissage du châssis inférieur avec le sable à vert, On racle alors la surface du châssis pour pouvoir retourner le tout.



Figure III.52 : Le positionnement du châssis supérieur sur le châssis inférieur (demi-premier modèle) se fait en ajoutant de la poudre de séparation entre les deux.



Figure III.53 : Le remplissage du châssis supérieur avec du sable à vert se fait en ajoutant le système d'alimentation.



Figure III.54: Sépare les deux châssis et on enlève délicatement les deux ½ modèles.



Figure III.55 : Placé le noyau dans l'empreinte du châssis inférieur.



Figure III.56 : Assemblage des deux châssis



Figure III.57 : Coulée et remplissage du moule.

D.3 Les étapes de débourrage (enlèvement le noyau) :



Figure III.58 : Démoulage de la pièce en détruisant le moule.



Figure III.59 : La pièce après enlever le système d'alimentation.





Figure III.60 : Détruire le noyau.





Figure III.61 : Photographie représente la pièce après le débourrage et après dessablage.

D.4 Interprétation de résultat des figures précédemment :

La préparation du mélange pour ce procédé est relativement lente, ce qui peut nécessiter une certaine patience lors de sa mise en œuvre. Les noyaux fabriqués selon ce procédé présentent une résistance à la flexion maximale de 43 kg F/cm2. Cela indique que les noyaux peuvent supporter une certaine charge avant de se déformer.

Les noyaux en sable à résine furanique peuvent être stockés pendant plus de 48 heures, mais il est recommandé de les débarrasser de toute humidité avant de les utiliser. Cela garantit une meilleure qualité des noyaux et évite les problèmes potentiels liés à l'humidité.

Ce procédé offre une haute précision dimensionnelle pour les noyaux fabriqués. Cela signifie que les noyaux sont conformes aux spécifications requises et qu'ils présentent des dimensions précises.

Le débourrage, c'est-à-dire le retrait du noyau de la pièce après la solidification du matériau, est facile à réaliser avec ce procédé. Cela facilite le processus de fabrication et réduit les risques de dommages aux pièces.

La figure III.61 confirme que les pièces produites avec ce procédé ont une surface lisse. Cela indique que le procédé est efficace pour obtenir des finitions de surface de qualité.

Ce procédé est spécifiquement utilisé pour la fabrication de noyaux massifs et complexes. Il est adapté pour produire des noyaux de formes et de tailles variées, même lorsqu'ils sont complexes ou volumineux.

En résumé, cette interprétation des remarques met en évidence à la fois les avantages et les caractéristiques spécifiques du procédé, ainsi que les recommandations pour son utilisation optimale.

III.4 Comparaison entre les procédés de noyautage utilisé à l’unité fonderie de Berrouaghia :

Après avoir terminé les travaux expérimentaux sur chaque procédé de noyautage utilisé à l'unité de fonderie de Berrouaghia, nous allons comparer les résultats obtenus afin d'avoir une application spécifique et recommander le procédé le plus adapté en fonction des critères de sélection établis. Ces critères comprennent l’impact environnementale, les coûts de production, la gestion des déchets, la prise, la résistance à la flexion, la durée de stockage et l'aptitude au débourrage.

Tableau III.8 : La comparaison entre les trois procédés de noyautage.

Les Procédés / Les critères	**Silicate de Soude – CO_2**	**Sable Croning**	**Résine Furanique (No – back)**
Le coûts de production	Bon marché	Très Cher	Cher
La gestion des déchets	Non Recyclable	Non Recyclable	Non Recyclable
La prise	Lent	Rapide	Lent
La résistance à la flexion	Faible	Elevée	Moyen
La durée de stockage	Très Courte	Très Long	Très Long
L'aptitude au débourrage.	Difficile	Très Facile	Facile
La qualité des pièces	Surface Rugueuse	Surface Très Lisse	Surface Lisse
La complexité des pièces	Non	Oui	Oui
La productivité	Elevée	Très élevée	Faible
L'impact environnementale	Non Toxique	Toxique	Très Toxique
Disponibilité des matières premières	Disponible	Disponible (Importation)	Disponible (Importation)

D’après le Tableau III.8, la comparaison des trois procédés de production - Silicate de Soude - CO2, Sable Croning et Résine Furanique (No - back) - révèle des différences significatives sur plusieurs critères importants.

Le Silicate de Soude - CO2 se distingue par son faible coût de production, une productivité élevée et un impact environnemental non toxique. Cependant, il présente des inconvénients tels qu'une résistance à la flexion faible, une durée de stockage très courte et une surface rugueuse pour les pièces produites.

Le Sable Croning se caractérise par une productivité très élevée, une aptitude au débourrage très facile et une surface très lisse pour les pièces produites. Cependant, il est coûteux à produire, présente un impact environnemental toxique et nécessite potentiellement l'importation de matières premières.

La Résine Furanique (No - back) offre une résistance à la flexion élevée, une durée de stockage très longue et une surface lisse pour les pièces produites. Toutefois, elle présente des coûts de production élevés, une productivité relativement faible et un impact environnemental très toxique. De plus, elle peut également nécessiter l'importation de matières premières.

Il est important de prendre en compte les besoins spécifiques de chaque situation et les priorités de l'entreprise pour choisir le procédé le plus approprié. La décision finale dépendra de facteurs tels que le budget disponible, les exigences de qualité des pièces, la complexité des pièces, les considérations environnementales et la disponibilité des matières premières.

III.5 Conclusion :

Il est important de procéder à une comparaison rigoureuse des résultats obtenus pour chaque procédé de noyautage à l'unité de fonderie de Berrouaghia, en se basant sur les critères de sélection établis.

Pour évaluer l'impact environnemental de chaque procédé, il est nécessaire de prendre en compte les matières premières utilisées, les consommations d'énergie et d'eau, ainsi que la production de déchets et d'émissions polluantes. Les coûts de production doivent également être évalués en prenant en compte les coûts des matières premières, de l'énergie et de la main-d'œuvre. La gestion des déchets doit être analysée afin de déterminer les quantités produites et les méthodes de traitement appropriées.

La prise et la résistance à la flexion sont des critères importants pour garantir la qualité des pièces produites. La durée de stockage et l'aptitude au débourrage sont également des facteurs à considérer pour assurer une production efficace et une utilisation optimale des ressources.

En analysant les résultats obtenus pour chaque procédé, il est important de tenir compte de ces critères de sélection et de déterminer quel procédé convient le mieux à l'application spécifique de la fonderie de Berrouaghia.

Selon le tableau précédent, on peut conclure que le meilleur procédé est le procédé de résine furanique (No-Back) pour les pièces massives, mais pour les petites pièces de complexité supérieure, le procédé Croning est le meilleur.

CONCLUSION GÉNÉRALE

Conclusion générale :

En conclusion, cette étude comparative des différents procédés de noyautage en fonderie a permis de déterminer les avantages et inconvénients de chaque méthode. Il a été constaté que le choix du type de noyau et du procédé de noyautage dépend principalement de la géométrie (compléxité) de la pièce à mouler, des exigences de qualité et des coûts.

Les noyaux fabriqués à partir de silicate de soude présentent une bonne résistance thermique, ce qui les rend adaptés aux applications à haute température, telles que la coulée de métaux ferreux (Acier), comme ont une résistance mécanique adéquate, ce qui facilite leur manipulation et leur transport sans risque de rupture, Le silicate de soude est généralement moins cher que d'autres liants utilisés dans le noyautage, ce qui en fait une option économique pour les fonderies, Le silicate de soude réagit rapidement avec le dioxyde de carbone présent dans l'air, ce qui entraîne un durcissement rapide des noyaux. Cela permet d'accélérer le processus de production. Le silicate de soude a tendance à absorber l'humidité de l'air (hygroscope), ce qui peut entraîner une instabilité dimensionnelle des noyaux. Il est donc nécessaire de stocker et de manipuler les noyaux avec précaution pour éviter une absorption excessive d'humidité, ce qui est considéré comme inconvénient. Comme d'autres inconvénients, le noyau de silicate de soude ne sont pas adaptés aux applications où ils sont exposés à l'eau ou à l'humidité prolongée, car le matériau peut se désintégrer ou perdre sa résistance, ce procédé peut avoir des limitations en termes de complexité de la forme du noyau. Les détails fins et les géométries complexes peuvent être difficiles à obtenir avec ce procédé. En ce qui concerne l'impact environnemental, ce procédé nécessite des méthodes spéciales de traitement des déchets.

Le sable à la résine furanique offre une grande précision dimensionnelle ce qui permet d'obtenir des pièces finales aux dimensions précises, stockage de noyaux illimitées dans le temps, offre une grande résistance mécanique ce qui facilite leur manutention et une résistance thermique élevée, mais comparé à certains autres procédés de noyautage, l'utilisation de résine furanique peut être plus coûteuse en raison du coût des matériaux utilisées (résine + catalyseur). Le sable au résine furanique peut nécessiter un temps de durcissement relativement long par rapport à d'autres matériaux de noyautage, ce qui peut prolonger le temps de production global. Le sable au résine furanique peut présenter des préoccupations environnementales en raison de sa toxicité et de la nécessité de méthodes

spéciales de traitement des déchets. Des précautions doivent être prises pour minimiser les effets néfastes sur l'environnement.

Le sable croning présente une bonne résistance mécanique et thermique et peut être utilisé pour des pièces de petite et moyenne taille complexe, mais il est plus coûteux (prix élevé de l'outillage) et peut causer des problèmes environnementaux (gestion des déchets).

Il est donc important pour les fonderies de bien évaluer les avantages et les inconvénients de chaque procédé de noyautage pour choisir la méthode la plus appropriée en fonction de leurs besoins spécifiques. Les résultats expérimentaux ont montré que le sable à la résine furanique est le meilleur choix pour les pièces nécessitant une grande précision et une résistance thermique élevée, tandis que le sable croning est plus adapté pour les petite et moyenne pièces à degré de complexité supérieur.

En somme, cette étude permet de guider les fonderies dans le choix du type de noyau et de procédé de noyautage pour produire des pièces de haute qualité tout en minimisant les coûts et les impacts environnementaux.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

[1] "Mémoire de master (Utilisation d'une méthode récente pour le contrôle de la qualité du sable de moulage de l'unité de fonderie de Berrouaghia), Nechachda. D & Seghir. M,2022".

[2] "Notions de Fonderie, MANSOURI Naïma, Université de batna 2".

[3] "Le site : (https://www.sous-traiter.fr/)".

[4] "Le site : (https://www.techniques-ingenieur.fr/)".

[5] "Le site : (https://www.fonderielaroche.com)".

[6] "Les cours de Mr Habireche. M".

[7] "Jean Marc Biezanik, Maquette Amicie Hommes & Fonderie N°396 Juin-Juillet 2009".

[8] "Plateforme pédagogique (Université des Sciences et de la Technologie d'Oran usto), janvier 2017".

[9] "Mémoire de master (Etude de l'influence du taux de bentonite sur les propriétés mécanique d'un sable de moulage), BENCHOHRA. H, MAAROUF. Z, 2021".

[10] "Le site : (https://fr-academic.com/)".

[11] "Le site : (https://fr.unionpedia.org)".

[12] "Le site : (www .fonderie-vincent.com)".

[13] "Techniques – ingénieur article de Réf /M3659 Auteur(s) : jean-Marie BRIARD ,date de publication 10 sept 2003".

[14] "Manuel des fontes moulées, centre d'information des fontes moulées, 1983".

[15] "Manuel des sables a prise chimique de la mise en œuvre au recyclage, Le centre technique des industries de la fonderie CTIF".

[16] "Accessoires pour le procédé de moulage / noyautage au CO2, Européenne Produits Matériels Fonderie/modelage,1998-2011".

[17] "Moulage/noyautage pour metaux ferreux maroc, chimiplex Au service de la métallurgie, 1981".

[18] "Les sites pour vendre des produits".

[19] "Le site :(http://tsaucray.free.fr/4%20noyautage/F36.htm)".