

République Algérienne Démocratique et Populaire

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique



Université Ibn Khaldoun de Tiaret

Faculté des Sciences Appliquées

Département de Génie Mécanique



## PROJET DE FIN DE CYCLE

### MASTER

**Domaine** : Sciences et Technologie

**Filière** : Génie Mécanique

**Parcours** : Master

**Spécialité** : Construction Mécanique

#### Thème

Modélisation de la résistance à la  
compression et au cisaillement des  
sables de moulage à vert

Préparé par :

M<sup>elle</sup>. MAAMERI SOUMIA

M<sup>elle</sup>. KHENFER SOUMIA

Soutenu publiquement le : 23 / 06 / 2022, devant le jury composé de :

Mr. MADANI AHMED	Maître Assitant "A" (Univ. Ibn Khaldoun)	Président
Mme. MAKHFI SOUAD	Maître de Conférences "B" (Univ. Ibn Khaldoun)	Examineur
Mme. BENARBIA DJAMILA	Maître Assitant "B" (Univ. Ibn Khaldoun)	Examineur
Mr. AISSAT SAHRAOUI	Maître de Conférences "A" (Univ. Ibn Khaldoun)	Encadrant

Année universitaire : 2021 - 2022

# Remerciements

**On remercie Dieu le tout puissant de nous avoir donné la santé et la volonté d'entamer et de terminer ce mémoire.**

**Tout d'abord, ce travail ne serait pas aussi riche et n'aurait pas pu avoir le jour sans l'aide et l'encadrement de Mr « Aissat sahraoui » on le remercie pour la qualité de son encadrement exceptionnel, pour sa patience sa rigueur et sa disponibilité durant notre préparation de ce mémoire.**

**Nos remerciements vont également aux membres du jury pour avoir accepté d'examiner notre travail.**

**Nous tenons particulièrement à remercier tous nos professeurs pour leur générosité et la grande patience dont ils ont su faire preuve malgré leurs charges académiques et professionnelles.**

**On remercie également toute l'équipe du laboratoire des sables de L'Algérienne des fonderies ALFET-Tiaret pour leur aide précieuse.**

# Dédicaces

Tout d'abord, je tiens à remercier DIEU

Je tiens à dédier ce travail à :

- L'âme de ma grand-mère et mon grand-père
- Le plus grand amour, ma plus grande fierté, la femme de ma vie ma mère
  - mon bonheur mon père
  - ma moitié ma p'tite sœur
  - ma tendre ma grande sœur

- Ma sœurette et ma confidente depuis toujours mon binôme
  - mes meilleures amies :

Basma, Sarah, Rania, Bouchra et Lilia

- Tous ceux qui m'aiment et que j'aime

**M. Soumia**

# Dédicaces

**Je dédie ce travail à :**

**Celle qui m'a arrosé de tendresse et d'espoirs, la source d'amour, le secret du succès ma  
chère mère**

**Mon support dans ma vie, mon père pour son soutien, son affection et la confiance qu'il  
m'a accordée**

**À la rose qui ne se fane jamais ma chère grande mère qui je souhaite une bonne santé**

**Ma source de joie et de bonheur mes sœurs et frères**

**Ma meilleure sœur avant d'être mon binôme.**

**Je tiens également à remercier la meilleure équipe «صايين ضايين» qui m'en toujours  
soutenue et encouragée.**

**À tous ceux qui ont contribué de près ou de loin à la réalisation de ce projet, j'adresse  
mes sincères remerciements.**

**k. Soumia**

# SOMMAIRE

Remerciements	
Dédicaces	
Dédicaces	
Liste des figures	
Liste des tableaux	
Introduction générale.....	1
<b>Chapitre I : Généralités sur les sables de moulage</b> .....	<b>4</b>
Introduction.....	5
I.1. Définition d'un moule en sable.....	5
I.2. Principales étapes du procédé de moulage en sable .....	6
I.3. Les différents sables de moulage.....	7
I.4. Constituants de base du sable de moulage à vert.....	8
I.5. Pièces réalisées avec le sable à vert.....	12
I.6. Les propriétés d' <i>utilisation des sables de moulage</i> .....	13
I.7. Autres propriétés.....	17
I.8. Défauts imputables aux sables de moulage .....	17
<b>Chapitre II : Généralités sur la méthode Des plans d'expériences</b> .....	<b>23</b>
Introduction.....	24
II.1. Petit historique sur les plans d'expérience.....	24
II.2. Vocabulaire de base des plans expériences.....	24
II.3. Méthodologie des plans d'expériences.....	26
II.4. Notions de modélisation mathématique.....	27
II.5. Les types des plans d'expériences.....	31
Conclusion.....	35
<b>Chapitre III : Modélisation de la résistance à la compression et au cisaillement des sables de moulage à vert</b> .....	<b>36</b>
Introduction .....	37
III.1. Protocol expérimentale.....	37
III.2. Essais exécutés.....	39
III.3. Analyse statistique des résultats de résistance à la compression.....	42
III.4. Analyse statistique des résultats de la résistance au cisaillement.....	47
Conclusion.....	51

Conclusion générale.....	53
Annexe.....	54
Références bibliographiques	
Résumé	

# LISTE DES FIGURES

Figure I.1 : Moule en sable.....	5
Figure I.2 : Principales étapes du procédé de moulage au sable.....	7
Figure I.3 : Grains de silice arrondis.....	9
Figure I.4 : Grains de silice angulaires.....	9
Figure I.5 : Structure d'une montmorillonite.....	10
Figure I.6 : Exemples de pièces fabriquées par moulage.....	13
Figure I.7 : Eprouvette cylindrique.....	14
Figure I.8 : Tube à pincement.....	14
Figure I.9: Appareil de mesure de la perméabilité.....	15
Figure I.10 : Appareil universel de la compression.....	15
Figure I.11 : Appareil de mesure la résistance au cisaillement.....	16
Figure I.12 : Appareil de mesure la résistance à la traction .....	16
Figure I.13: Appareil de mesure la résistance de flexion.....	17
Figure I.14 : Trou de sableFigure I.15 : Bavures.....	18
Figure I.16: Défaut de fissure.....	19
Figure I.17 : Défauts dus au gaz (soufflure=défaut interne).....	19
Figure I.18: Défaut de retrait de cavité.....	20
Figure I.19 : Défaut de remplissage.....	20
Figure I.20: Défaut de décalage.....	20
Figure I.21: Défaut de combustion du sable.....	21
Figure I.22 : Pénétration d'expansion du métal.....	21
Figure I.23 : Défaut de queue de rat.....	22
Figure I.24 : Criques.....	22
Figure II.1 : Diagramme du principe des plans d'expériences.....	25

Figure II.2 : Espace expérimental.....	26
Figure II.3 : Points expérimentaux dans le cas d'un plan complet à deux facteur.....	32
Figure II.4 : Domaine d'étude dans le cas d'un plan complet à trois facteurs.....	33
Figure III.1 : Mélangeur utilisé pour la préparation de nos mélanges.....	39
Figure III.2 : Eprouvette normalisée.....	40
Figure III.3 : Tube d'éprouvettes.....	40
Figure III.4 : Damoir utilisé pour la confection des éprouvettes.....	40
Figure III.5 : Appareil universel de l'essai de compression et de cisaillemen.....	41
Figure III.6 : Accessoires pour l'essai de résistance.....	41
Figure III.7 : Résultats expérimentaux de la résistance à la compression.....	41
Figure III.8 : Résultats expérimentaux de la résistance au cisaillement.....	42
Figure III.9 : Diagramme de Pareto de Rco.....	44
Figure III.10 : Droite de Henry de Rco.....	45
Figure III.11 : Graphique des effets principaux de Rco.....	46
Figure III.12 : Diagramme des interactions de Rco.....	47
Figure III.13 : Diagramme de Pareto de Rci.....	49
Figure III.15 : Graphique des effets principaux de Rci.....	50
Figure III.16 : Diagramme des interactions d'ordre 2 de Rci.....	51
Figure A.1 : Icône du logiciel Minitab.....	54
Figure A.2 : Fenêtre principale.....	55
Figure A.3 : Menus donnant accès aux plans d'expériences .....	56
Figure A.5 : Fenêtre proposant plusieurs types de plans d'expériences.....	57
Figure A.7 : Fenêtre permettant de remplir les valeurs des niveaux et choisir les types de facteurs.....	58
Figure A.8 : Feuille de travail Minitab avec le plan choisi.....	58
Figure A.9 : Ordre des essais de Rco .....	59
Figure A.10 : Menus déroulants permettant de lancer l'analyse du plan d'expériences.....	59



Figure A.11 : Fenêtre permettant de préciser les modalités de l'analyse.....	60
Figure A.12: Fenêtre permettant de choisir les termes du modèle mathématique.....	60
Figure A.13 : Fenêtre permettant de choisir le diagramme des effets de Pareto les graphiques des valeurs résiduelles.....	61
Figure A.14 : Menu permettant d'avoir un diagramme factoriel.....	62
Figure A.15 : Fenêtre permettant d'avoir les effets principaux et les interaction.....	62
Figure A.16 : Menu permettant d'optimiser les réponses.....	63
Figure A.17: Fenêtre fixant la valeur maximiser.....	63
Figure A.18 : Fenêtre permettant de définir les bornes de la cible .....	64

# Liste des tableaux

Tableau I.1 : Différences entre les sables de moulage.....	8
Tableau I.2 : Différentes caractéristiques de la silice.....	9
Tableau II.1 : Tableau d'analyse de la variance.....	30
Tableau II. 2 : La matrice d'expériences (Plan 2 <sup>2</sup> ).....	32
Tableau II. 3 : Calcul des coefficients dans le cas d'une matrice Hadamard .....	33
Tableau III.1 : Facteurs et niveaux (réels et codés) considérés.....	43
Tableau III.2 : Résultats de l'essai Rco.....	43
Tableau III.3 : Ordre des essais de Rco.....	44
Tableau III.4 : Récapitulatif du modèle.....	45
Tableau III.5 : Résultats de l'essai Rci.....	47
Tableau III.6 : Ordre des essais de Rci.....	48
Tableau III.7 : Récapitulatif du modèle.....	49

# **Introduction générale**

Le travail présenté dans ce document a été réalisé en collaboration avec le laboratoire des sables de l'Algérienne des fonderies de Tiaret (ALFET-Tiaret).

A l'image de la plupart des pays industrialisés, ou le but des entreprises est de livrer un produit qui donne satisfaction au client, le développement de produits pour la fonderie a dû répondre au triptyque : augmentation de la productivité, baisse des coûts, contrôle de la qualité. La réalisation de cet objectif triple passe par la maîtrise technique du procédé dans son ensemble, de la conception de la pièce à couler jusqu'à la réalisation des outillages.

Ce produit - pièces de fonderie - voit ces qualités se détériorées à cause de certaines imperfections liées au sable de moulage.

Le problème du sable de moulage en fonderie de fonte est d'une importance capitale du fait des quantités préparées, et surtout du fait de son influence sur la qualité des pièces. On estime à plus de 50%, les rebuts imputables aux sables de moulage, c'est à dire sur 90 défauts de fonderie, 31 cas citent le sable comme cause probable des défauts. Ces rebuts qui influent considérablement sur le bon fonctionnement de l'entreprise et risqueraient même de mettre l'avenir de celle-ci en péril, sont dus ; d'une part, aux caractéristiques défectueuses se rapportant à la granulométrie, à la perméabilité, à la résistance, à la cohésion, à l'humidité, à la plasticité .....etc., et d'autre part, à une mauvaise mise en œuvre intéressant la préparation (malaxage, frottage .....etc.), et le serrage (excessif ou insuffisant).

Nous avons contribué dans ce travail à optimiser le pourcentage de bentonite et d'eau dans le sable à vert en utilisant un plan factoriel complet de deux facteurs à 3 niveaux et 3 répliques qui peut produire un total de 27 essais.

Les résultats montrent que la valeur du coefficient de détermination  $R^2$  ajusté relate que 98,13% pour la résistance à la compression ( $R_{co}$ ) et que 94,42% pour la résistance au cisaillement ( $R_{ci}$ ) de la variabilité totale était expliquée par le modèle et que le modèle mathématique prédit, correspondait bien aux données expérimentales.

Une analyse à l'aide du logiciel Minitab montre que la bentonite et l'eau ainsi que l'interaction entre ces deux facteurs influent sur ces propriétés. La variation du taux d'humidité (eau) à un effet plus important que celui de la bentonite.

Le mémoire présenté dans ce projet de fin de cycle, comporte trois chapitres :

➤ Le premier chapitre est consacré à des généralités sur les sables de moulage, à savoir : la définition d'un moule en sable, les types de sables, les constituants, les pièces réalisées avec le sable à vert et les propriétés d'utilisation des sables de moulage.

➤ Le deuxième chapitre est axé sur des généralités sur la méthode des plans d'expériences.

➤ Le troisième chapitre présente les résultats expérimentaux et la modélisation de la résistance à la compression et au cisaillement des sables de moulage à vert.

Enfin, nous clôturons ce mémoire par une conclusion générale.

**Chapitre I :**  
**Généralités sur les sables de moulage**

## Introduction :

Le moulage au sable est un procédé qui permet d'obtenir des pièces métalliques brutes en versant du métal en fusion dans un moule en sable ou en métal (représentant l'empreinte de la pièce à obtenir). Il convient non seulement à la production de pièces métalliques de différentes tailles, mais il est également idéal pour la réalisation de moulages très complexes ou détaillés. Bien sûr, il peut être utilisé pour couler presque tous les alliages métalliques.

Lorsque le métal durcit, il reprend les contours et les dimensions de la cavité du moule. Le sable utilisé est un mélange de silice, d'argile et de matériaux auxiliaires

### I.1. Définition d'un moule en sable :

Un moule en sable est composé d'un matériau réfractaire (le sable) qui se présente sous la forme de petits grains ; on peut donc lui donner la forme que l'on veut, et figer cette forme avec un additif. Cela en fait un matériau de choix pour la conception de moules ; cependant, c'est un moule à usage unique, mais que l'on peut fabriquer facilement de manière répétée et qui ne coûte pas cher à fabriquer.

Le moule se compose de deux parties essentielles :

- Un châssis inférieur rempli du sable dans lequel se trouve en creux la partie principale de l'empreinte du modèle.
- Un châssis supérieur qui sert de couvercle et qui peut aussi contenir une partie de l'empreinte. Le métal liquide est coulé dans l'empreinte par un trou de coulée aménagé à cet effet (figure I.1).
- Les masselottes constituent une réserve de métal liquide destinée à céder du métal à la pièce pendant sa solidification.
- Le trou d'évent facilite l'échappement des gaz de l'empreinte.

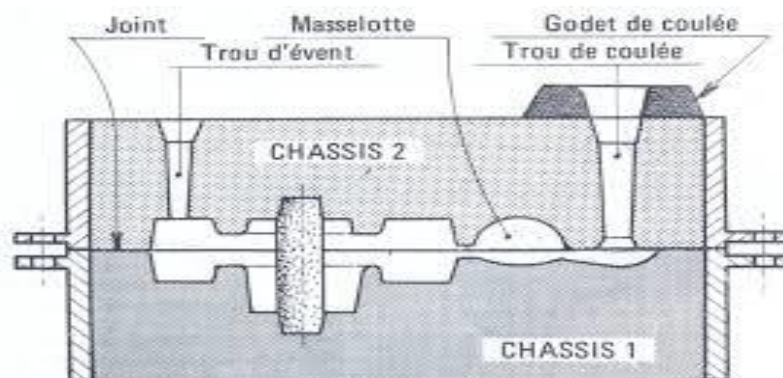


Figure I.1 : Moule en sable

Après solidification par refroidissement naturel, on obtient une pièce ayant la forme de l'empreinte.

## I.2. Principales étapes du procédé de moulage en sable : [2]

Le moulage en sable est un procédé de fonderie utilisant un moule destructible et une coulée par gravité (assez rarement par centrifugation). C'est le procédé qui permet la production des pièces de plus grande taille. Il offre au concepteur plus de liberté que le moulage en coquille au niveau de la complexité des formes mais la qualité des surfaces est comparativement plus mauvaise que celle obtenue par les autres procédés.

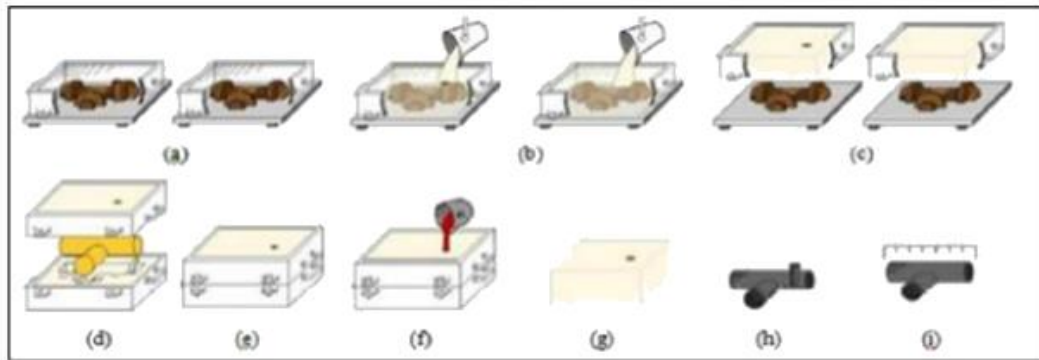
Des plaques modèles en bois ou plastiques, répliques partielles de la pièce finale souhaitée sont placées dans des châssis métalliques (figure I.2 a). Relativement à la pièce finale souhaitée, les dimensions des plaques modèles sont augmentées afin de compenser le retrait volumique engendré lors de la solidification du métal. Les formes du système de coulée doivent également être prévues. Le volume restant des châssis est alors rempli (figure I.2 b) avec un sable spécifique (base de silice, argile avec un taux d'humidité contrôlé et éventuellement des additifs chimiques ou liants). Suivant la nature du sable utilisé, un compactage manuel ou mécanique est effectué (sable à vert) ou une réaction chimique de durcissement aussi appelée prise est déclenchée (sable aggloméré prise chimique à froid ou prise à chaud). Les modèles sont séparés de leur empreinte en sable (figure I.2 c).

Les châssis sont ensuite réunis en y insérant éventuellement des noyaux de sable qui permettront de créer les formes intérieures (figure I.2 d). La mise en position des châssis, afin d'avoir les empreintes bien en regard, doit être prévue et on utilise pour cela des pions de centrage. Le maintien en position des châssis est assuré par leur propre masse. Si celle-ci est insuffisante, on ajoute des masses de serrages supplémentaires posées sur le châssis supérieur (figure I.2 e).

La coulée est alors réalisée (figure I.2 f). Le flux thermique au contact métal/sable entre l'alliage et le moule étant très faible, la solidification est donc lente.

On sépare ensuite les châssis de la pièce en détruisant le sable du moule et du noyau par vibrations (figure I.2 g). Là encore, la grappe récupérée (figure I.2 h) devra être ébarbée puis sablée ou grenillée afin d'obtenir la pièce brute finale (figure I.2 i).





**Figure I.2 :** Principales étapes du procédé de moulage au sable

### **I.3. Les différents sables de moulage : [1]**

On distingue quatre grandes familles de sable :

#### **I.3.1. Les sables silico-argileux : [1]**

Le moulage en sable silico-argileux est l'un des procédés les plus courants. Il reste le plus économique du fait de la simplicité de la régénération du sable est dit aussi synthétique. Les constituants du sable sont :

- Le sable siliceux ;
- L'argile, souvent du type bentonite ;
- Les additifs carbonés ;
- L'eau ;
- D'autres éléments éventuellement.

#### **I.3.2. Les sables synthétiques : [1]**

Le sable synthétique est un sable fabriqué par un dosage précis, il possède une bonne résistance à l'agression du métal à haute température.

Ce sable se compose essentiellement :

- De silice (sable extra siliceux naturel à moins de 0.5 % d'argile naturelle).
- D'argile (montmorillonites). Ce pourrait être une argile de type illites, mais en fait, cela reviendrait à fabriquer un sable naturel. Du point de vue caractéristique, les montmorillonites sont les argiles des sables synthétiques.
- D'eau
- D'impuretés
- D'ingrédients ou adjuvants : noir minérale, farines de bois (stabilisateur d'humidité).

### I.3.3. Les sables semi synthétiques : [1]

Il s'agit d'un sable de moulage intermédiaire entre le sable naturel et le sable synthétique.

Du point de vue composition, le tableau I.1 fait apparaître les différences.

Nature du sable	Support	Agglutinant
Sable semi synthétique	Grains de silice contenus un sable naturel faiblement argileux	Argile naturelle de type illite (sable naturel) + Montmorillonite (bentonite) illites
Sable synthétique	Grain de silice contenu dans un sable extra siliceux naturel	Montmorillonite (bentonite) illites
Sable naturel	Grains de silice contenus dans un sable naturel argileux	Argile naturelle type illites (sable naturel)

**Tableau I.1 : Différences entre les sables de moulage**

### I.3.4. Les sables naturels : [1]

C'est la version "naturelle" du sable de silice, Il est extrait de la carrière et se compose de silice et contient un pourcentage élevé d'argile

Il résulte de la désintégration des roches ignées, notamment du granite, sous l'influence de phénomènes physiques et chimiques.

## I.4. Constituants de base du sable de moulage à vert : [1]

Pour la conception de moule, un sable de fonderie doit être composé de nombreux matériaux et produits ; dont les plus importants sont cités ci-après :

### I.4.1. La Silice : [1]

La silice  $\text{SiO}_2$  est de loin le minéral le plus utilisé. Elle est très répandue dans la nature et plus spécialement sa variété allotropique. Les sables de fonderie siliceux peuvent atteindre 99,5% de  $\text{SiO}_2$ .

Le sable neuf est constitué de quartz, mais après contact avec la chaleur, il peut se trouver sous différentes formes minéralogiques (tridymite, cristobalite). Le quartz est la forme stable de la silice jusqu'à  $870^\circ\text{C}$ . Sous l'effet de la température, il se transforme en d'autres espèces cristallines de manière irréversible, la tridymite ( $\alpha$ ,  $\beta$ ) puis la cristobalite. Il a une réfractarité suffisante pour la plupart des applications et se trouve en quantités abondantes avec une qualité

régulière. Ceci lui confère un avantage économique très important. Le tableau I.2 fait ressortir les différentes caractéristiques de la silice.

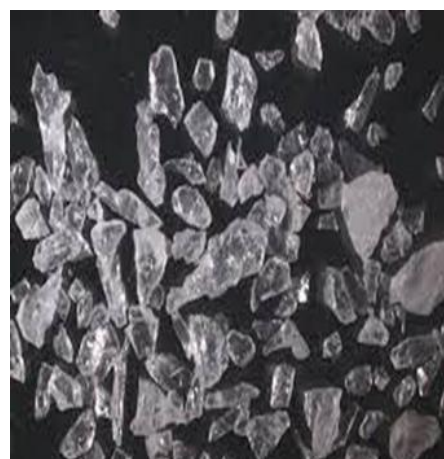
Identification	Nom	Dioxyde de silicium
	Apparence	Poudre de couleur blanc
	Forme	Une forme cristalline : quartz, cristobalite, tridymite, etc.
Une forme amorphe : Terre diatomée (naturelle), gel de silice (artificiel), etc.		
Propriétés chimique	Formule	$\text{SiO}_2$
	Masse molaire	60.084 g/mol
Propriétés physique	Température de fusion	17130°C
	Température d'ébullition	2700°C
	Solubilité	0.14g/mol
	Masse volumique	2.2g/mol
Précautions	Silice amorphe	Produit non contrôlé
	Silice précipité	Produit non contrôlé
	Silice fondu	Produit non contrôlé

**Tableau I.2 : Différentes caractéristiques de la silice**

Les grains de silice se caractérisent par leur forme arrondie ou anguleuse (figure I.3 et I.4). Les grains arrondis sont préférés des grains anguleux, car ces derniers freinent la perméabilité ; la répartition de l'argile est moins régulière que sur les grains ronds et la cohésion est moins bonne.



**Figure I.3 : Grains de silice arrondis**



**Figure I.4 : Grains de silice angulaires**

### I.4.2. L'Argile : [1]

C'est l'agglomérant utilisé pour la confection du moule. Cette argile ajoutée avec de l'eau au sable siliceux, confère au moule une plasticité suffisante pour conserver l'empreinte de la pièce après l'extraction du modèle (opération de démoulage).

C'est un oxyde d'aluminium hydraté ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ), très abondante dans la nature, se présente sous forme de paillettes très fines (0.001mm), blanchâtres, colorée par des oxydes métalliques très réfractaire. Les argiles utilisées en fonderie appartiennent à deux espèces minéralogiques distinctes :

#### I.4.2.1. L'argile réfractaire : [1]

Est une argile primaire à l'aspect d'une terre molle et s'utilise en sculpture, en briqueterie et en poterie. De formule générale  $2\text{SiO}_2, \text{Al}_2\text{O}_3, 2\text{H}_2\text{O}$ . La spécificité d'une argile réfractaire est sa **résistance à des hautes températures** à partir de  $1300^\circ\text{C}$  (fusion entre  $1600$  et  $1750^\circ\text{C}$ ).

L'argile réfractaire est disponible sous forme crue, broyée, mélanger avec de la **chamotte**, de la vermiculite ou du sable (second composant, appelé « charge »).

#### I.4.2.2. Les argiles colloïdales (les bentonites) : [1]

La bentonite est une argile colloïdale dont le nom vient de Fort Benton (Wyoming, Etats-Unis). Elle contient plus de 75% de montmorillonite ; cette dernière fut découverte pour la première fois en 1847 près de Montmorillon, dans le département de la vienne (France)

De formule générale  $4\text{SiO}_2, \text{Al}_2\text{O}_3, \text{H}_2\text{O}$ , leur particule élémentaire est composée d'une couche d'alumine interposée entre deux couches de silice (Figure I.5).

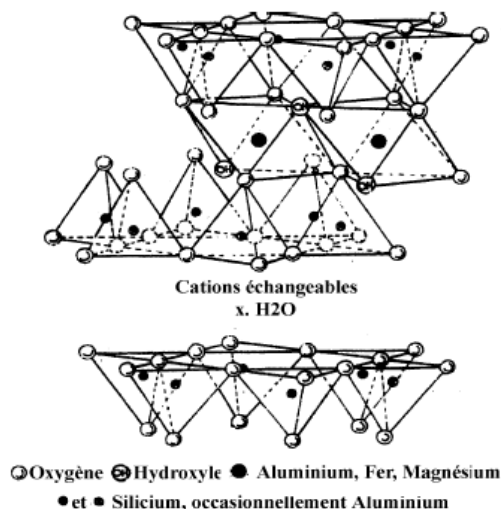


Figure I.5 : Structure d'une montmorillonite

Il existe deux types de bentonite :

**A. Les bentonites sodiques : [1]**

Qui augmentent de volume lorsqu'elles sont humides et qui peuvent absorber plusieurs fois leur masse en eau, ainsi qu'une meilleure résistance thermique ; si leur cohésion à vert est moyenne, leur cohésion à sec et à chaud est élevée, au prix toutefois d'une réfractarité faible. En outre les bentonites sodiques peuvent admettre un taux d'humidité plus élevé ; la vaporisation de l'eau est plus importante au moment de la coulée, que pour les bentonites calciques.

**B. Les bentonites calciques : [1]**

Qui ne possèdent pas ces propriétés de gonflement, en raison de ses fonctionnalités rhéologiques, la bentonite a un comportement thixotrope. Des petites quantités de bentonite en solution aqueuse forment un mélange visqueux, dont la viscosité baisse lorsque l'effort mécanique qui lui est appliqué augmente.

**I.4.3. Produits d'addition (adjuvants) : [1]**

Un certain nombre d'adjuvants, sans pouvoir liant mais néanmoins nécessaires à la réussite d'un moulage, destinés à conférer des propriétés secondaires comme l'état de surface ou bien les propriétés de démoulage (du modèle). Parmi les adjuvants, on trouve :

**I.4.3.1. Noir minéral : [1]**

Ce produit est un charbon pulvérisé dont la taille des particules est inférieure à 80 µm. Son rôle dans le sable de moulage est d'éviter l'abreuvement, la pénétration de l'alliage entre les grains de sable.

**I.4.3.2. Brai : [1]**

Est une substance noirâtre pâteuse et collante obtenue par pyrolyse de matières organiques en conditions anoxiques ou en atmosphère très pauvre en oxygène.

Se comporte sensiblement comme le noir minéral, il a les mêmes effets, mais c'est un substituant moins polluant et il ne produit pas de cendres.

Le brai, à haute teneur en matières volatiles renforce la cohésion du sable aux hautes températures (1250°C).

Du fait de son activité, ce produit est ajouté à des taux de l'ordre de 1%, mais il est plus difficile à incorporer au mélange que le noir minéral.

#### **I.4.3.3. Huiles minérales et Pétroles : [1]**

L'incorporation de ces produits, permet de lutter contre la tendance de certains sables à adhérer aux modèles.

#### **I.4.3.4. Farine de bois : [1]**

Elle est additionnée au sable à des taux de 0.5 à 1%, sa combustion laisse des vides qui facilitent la dilatation des grains de silice et augmente ainsi la perméabilité, par contre elle rend le sable moins compact et diminue son aptitude au serrage (flowability).

#### **I.4.3.5. Liants amylacés (du maïs ou de la pomme de terre) et mélasses : [1]**

Leur addition est souvent nécessaire pour faciliter la destruction des moules et des noyaux après la coulée, ils limitent le dessèchement rapide du sable de moulage et accroissent sa flowability. Ils sont admis à des taux de 1 à 2%.

#### **I.4.4. L'eau : [1]**

Son rôle est d'activer l'argile afin de lui conférer sa plasticité.

### **I.5. Pièces réalisées avec le sable à vert :**

La technique du moulage vise le plus souvent la fabrication d'objets en série plus ou moins importante. Dans la coulée sous-pression, l'objet une fois solidifié peut être libéré (démoulage) sans détérioration du moule, et dans le moulage sable, on fabrique autant de moules que de pièces (cas de la fonderie au sable).

Le moulage en sable peut être utilisé pour :

- Réaliser des pièces de très grande dimension de 150 à 200 tonnes.
- Certains procédés de moulage permettent une production en très grandes séries
- Grandes pièces : carters de moteur pour les véhicules, les poêles à bois, les bâtis de machine, les roues ferroviaires, les canalisations, les cloches d'église, les grandes statues...
- Petites pièces : couronnes dentaires, bijoux, petites statues, et poêles.
- Tous les métaux peuvent être coulés : les ferreux et les non ferreux.

La figure I.6 donne des exemples de ces pièces.



Pale d'hélice



Roues ferroviaires



Carter de moteur pour véhicules



Pièce pour canalisation



Bâti d'une pompe



Les bollards

**Figure I.6 :** Exemples de pièces fabriquées par moulage

### **I.6. Les propriétés d'utilisation des sables de moulage :**

Les propriétés de base du sable de coulée sont variées, résultant du processus de préparation du sable effectué dans la machine appropriée pour produire son mélange parfait. Ces propriétés sont :

### I.6.1. La perméabilité :

La perméabilité est la capacité du sable à laisser passer les gaz libérés lors du processus de moulage. La perméabilité dépend de la taille des grains de sable, de la qualité de l'adhésif et du degré d'étanchéité. L'essai est réalisé par la méthode de pénétration, en utilisant une éprouvette cylindrique (Figure I.7), fixée dans un tube (Figure I.8), à l'aide également d'un pilon standard (masse env. 150 g). Pendant le test, l'échantillon standard reste dans le tube à pincement et il placé dans l'appareil de la figure I.9.



**Figure I.7 :** Eprouvette cylindrique



**Figure I.8 :** Tube à pincement





**Figure I.9:** Appareil de mesure de la perméabilité

### **I.6.2. La résistance des sables de moulage :**

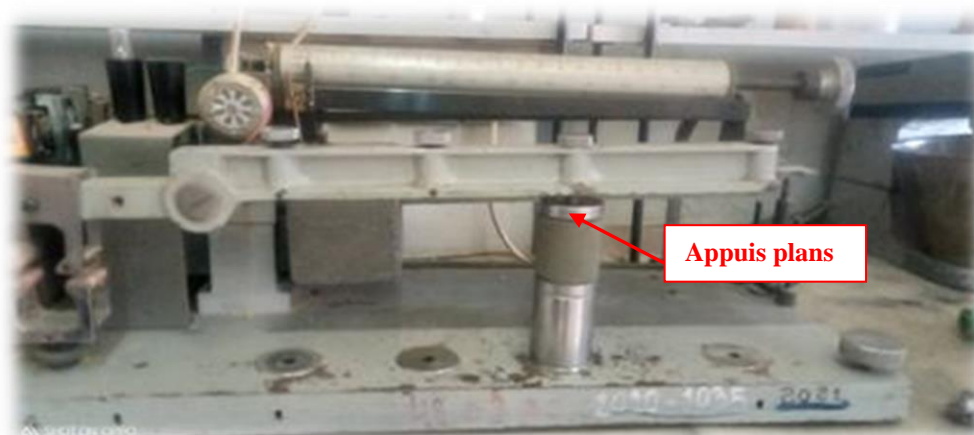
Les essais de la résistance des sables de moulage sont destinés à tester la résistance à la compression, au cisaillement, à la traction et à la flexion des échantillons de sable.

Ces tests se pratiquent avec des appareils spéciaux (Figure I.10), effectués sur des éprouvettes normalisées et en utilisant des équipements spéciaux.

#### **I.6.2.1. Résistance à la compression**

L'essai de la résistance à la compression du sable de moulage est réalisé pour déterminer la résistance caractéristique du sable et contrôler la qualité du sable dans une fonderie.

L'éprouvette de la figure I.7 est placée dans le bâti de l'appareil de la figure I.10. Elle est soumise à deux forces opposées en utilisant les accessoires ou des appuis plans. La résistance à la compression est exprimée en :  $\text{kg/cm}^2$ .



**Figure I.10 :** Appareil universel de la compression

### I.6.2.2. Résistance au cisaillement :

L'essai s'effectue sur une éprouvette de sable placée dans un bâti de cisaillement constitué de deux demi-boîtes indépendantes. Le plan de séparation des deux demi-boîtes constitue un plan de glissement préférentiel correspondant au plan de cisaillement de l'éprouvette (Figure I.11).



Figure I.11 : Appareil de mesure la résistance au cisaillement

### I.6.2.3. Résistance à la traction :

L'essai de traction est l'essai mécanique le plus classique et le plus étudié, et consiste à appliquer une force accrue ou une déformation constante à une éprouvette la faisant déformer et se casser progressivement. L'éprouvette est sous d'un huit (8), comme sur la figure I.12.

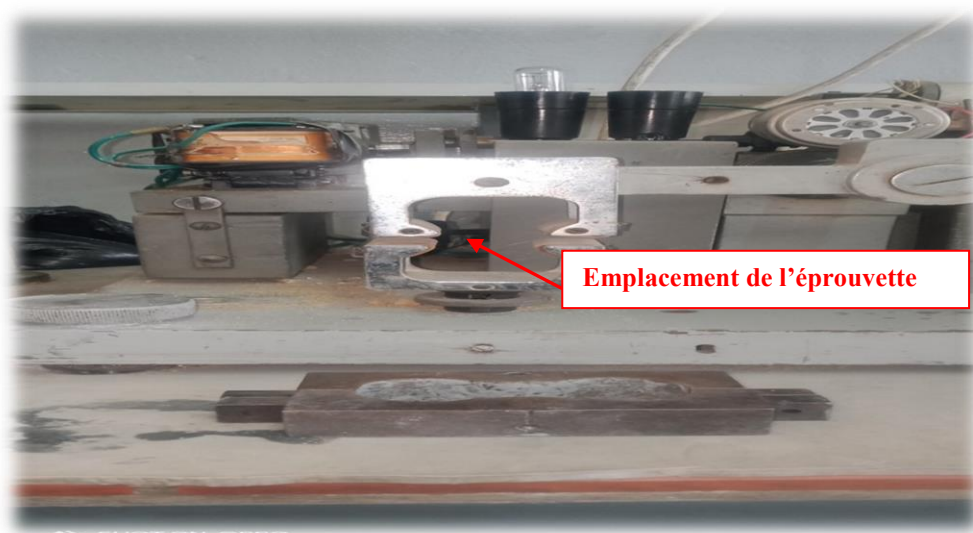
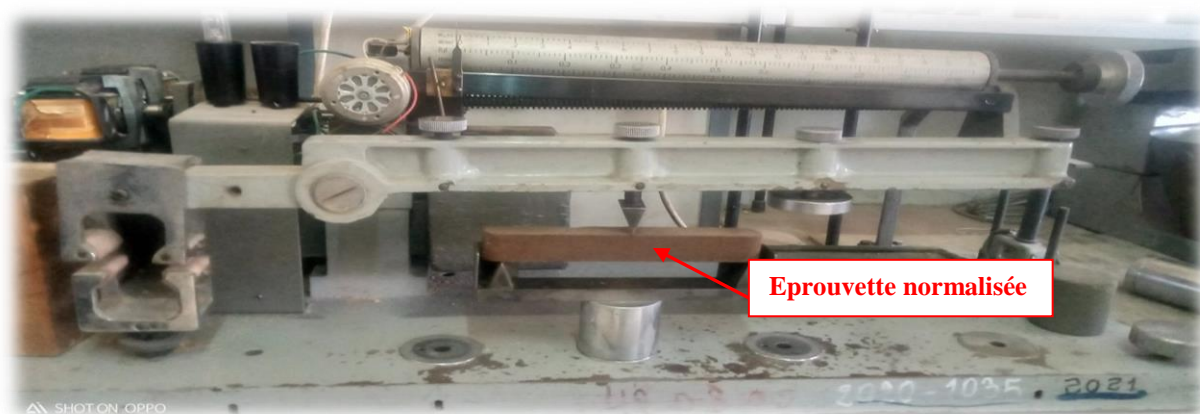


Figure I.12 : Appareil de mesure la résistance à la traction

### I.6.2.4. Résistance à la flexion :

L'essai de flexion permet également de mesurer la résistance à la rupture d'un matériau. Une éprouvette à tester est placée sur deux appuis et l'on applique au centre de la barrette une

force croissante jusqu'à rupture. L'essai de flexion est surtout adapté aux matériaux fragiles. Lors du test, la partie supérieure est en compression et la partie inférieure en traction (Figure I.13).



**Figure I.13:** Appareil de mesure la résistance de flexion

## **I.7. Autres propriétés :**

### **I.7.1. La cohésion:**

Est une propriété qui peut être décrite comme la résistance du sable. La cohésion maintient les autres particules ensemble, à partir du sable. Il leur donne la force de résister au processus de moulage au sable. L'argile aide le sable à conserver cette propriété de cohésion.

### **I.7.2. La plasticité :**

C'est la propriété du sable qui s'écoule dans toutes les parties du moule. Le sable doit être suffisamment malléable pour produire un bon moule.

### **I.7.3. La réfractarité :**

Un matériau réfractaire est un matériau qui a une forte résistance à un facteur (physique, chimique, biologique), le sable doit donc avoir une température de fusion supérieure à la température de coulée de l'alliage considéré.

## **I.8. Défauts imputables aux sables de moulage :**

Les défauts sont fréquents dans tout processus d'ingénierie. Dans ce travail, nous exposons certains défauts de moulage en sable courants et leurs causes.

### **I.8.1. Les trous de sable : [3]**

Les trous de sable sont courants dans l'industrie de la fonderie où des sables à faible résistance tels que certains sables verts sont utilisés. Les trous de sable se produisent lorsque des

particules de sable lâches se précipitent dans le moule et fusionnent à l'intérieur du moulage, provoquant la création de trous à l'intérieur du moulage.

Dans certains cas extrêmes, des trous de sable sont également observés sur la surface extérieure (Figure I.14).



**Figure I.14 : Trou de sable**

### **I.8.2. Les bavures : [3]**

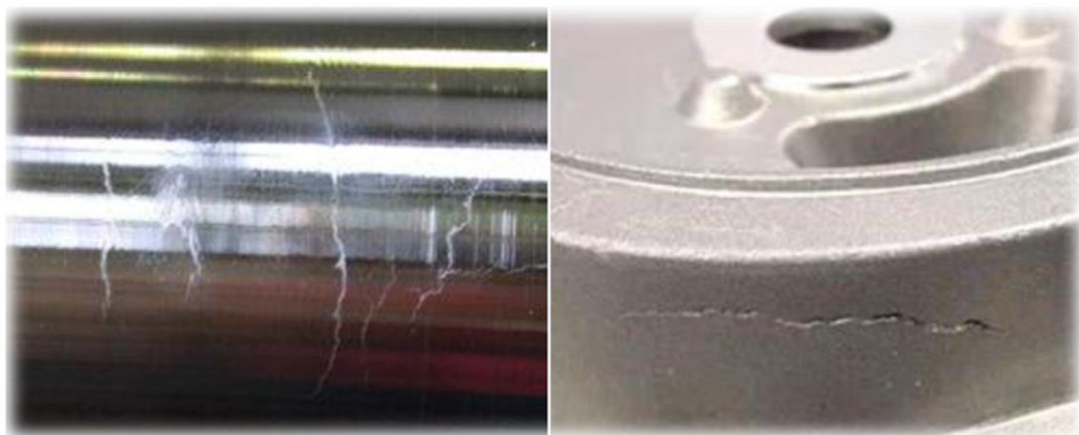
Des bavures apparaissent quand le moule est endommagé, que l'injection est trop rapide ou que le serrage est insuffisant. C'est un problème de coulée et qui peuvent être éliminées par ébarbage (Figure I.15).



**Figure I.15 : Bavures**

### **I.8.3. Défauts métallurgiques : [3]**

Nous listons les fissures qui peuvent être internes ou d'urgence. Les fissures causées par un retrait irrégulier du métal lors de la solidification (Figure I.16).



**Figure I.16:** Défaut de fissure

#### **I.8.4. Défauts dus au gaz : [1]**

Les porosités, c'est le défaut est plus important et subtil, sont les principaux défauts de formation dus au gaz. Ce défaut est causé par une faible perméabilité aux gaz.

Ces bulles sont facilement détectables lorsqu'elles apparaissent à la surface de la pièce. Elles apparaissent comme un trou ou un cratère. Cependant, ils peuvent également être piégés dans le métal (soufflures), altérant gravement le processus de coulée, et les bulles de gaz sont susceptibles de générer des pressions internes dans les pièces coulées (Figure I.17)



**Figure I.17 :** Défauts dus au gaz (soufflure=défaut interne)

#### **I.8.5. Défaut de retrait de cavité : [3]**

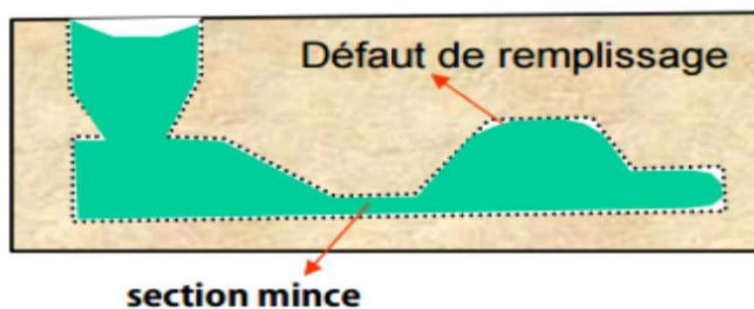
Cavités ouvertes ou fermées à contours rugueux, localisées dans les dernières portions de métal solidifié. Elles sont dues aux contractions de volume subies par le métal liquide au cours de la solidification (Figure I.18).



**Figure I.18:** Défaut de retrait de cavité

### **I.8.6. Défaut de remplissage : [3]**

La pièce se solidifie avant que la cavité ne soit complètement remplie ou que la partie supérieure de la pièce moulée ne manque de matière. Cela peut être dû à de basses températures de coulée, à une fluidité et une fluidité insuffisantes, ou à une mauvaise disposition des pièces (sections trop petites) (Figure I .19).



**Figure I.19 :** Défaut de remplissage

### **I.8.7. Défaut de décalage : [3]**

Défaut de mise en position des deux demi moule l'un par rapport à l'autre (Figure I.20).



**Figure I.20:** Défaut de décalage

### I.8.8. Défaut de combustion de sable : [3]

Un autre inconvénient du moulage au sable est la combustion qui se produit lorsque les oxydes métalliques interagissent avec les impuretés du sable de silice. Cela provoque l'incrustation du grain dans la surface de la pièce finie. Ce défaut peut être évité en abaissant la température du métal liquide, en utilisant des nettoyants pour moules et en utilisant divers additifs dans le mélange de sable (Figure I.21).



**Figure I.21:** Défaut de combustion du sable

### I.8.9. Pénétration de métal :

Ce défaut se manifeste par une irrégularité et une rugosité de la surface de coulée. Lorsque de gros grains de sable sont utilisés, le fer fondu fond dans le sable et se solidifie, créant une soi-disant défaillance de pénétration du métal. La pénétration du métal est causée par l'utilisation de sable à faible résistance, à grande granulométrie et à haute perméabilité. En conséquence, le métal en fusion s'infiltre dans le sable de moulage, créant une surface de fonte rugueuse et inégale. Ce défaut peut être éliminé en utilisant du sable avec une granulométrie plus petite, une perméabilité plus faible et une résistance plus élevée (Figure I.22).



**Figure I.22 :** Pénétration d'expansion du métal

### I.8.10. Queue de rat : [1]

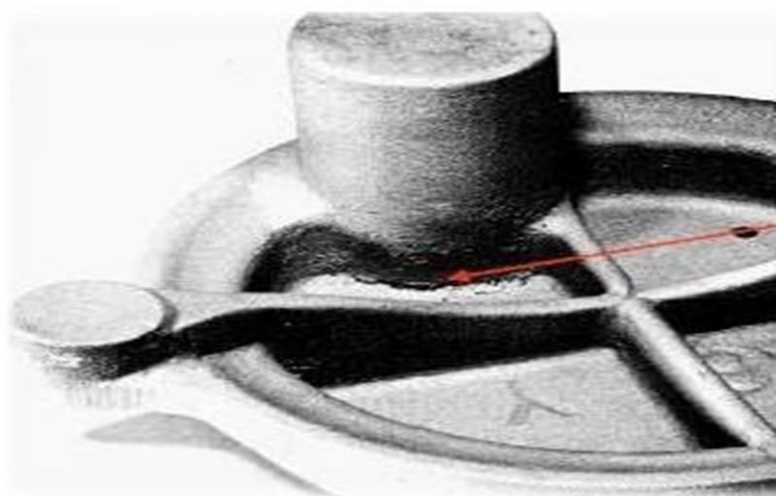
Une ligne de rat est un défaut d'expansion visible sur la face de fonte. Il est causé par l'utilisation de sables de coulée avec de faibles caractéristiques d'expansion et une grande plasticité chaude et de la basse température du métal fondu, ou le système d'évent défectueux (Figure I.23).



**Figure I.23 :** Défaut de queue de rat

### I.8.11. Criques : [3]

Ces des défauts qui peuvent être internes ou débouchant, qui se forment pendant la solidification de la pièce et qui ont l'aspect d'une fissure dirigée dans un sens perpendiculaire à celui du retrait à l'état solide. La cause principale est donc le retrait non linéaire qui n'a pu s'effectuer librement par suite de la présence d'un obstacle formé par les parties déjà solidifiées (Figure I. 24)



**Figure I.24 :** Criques



## **Chapitre II : Généralités sur la méthode des plans d'expériences**

## **Introduction : [4]**

Un plan d'expérience est une approche statistique permettant de maîtriser un problème à plusieurs caractéristiques (facteurs). Il a pour but de minimiser le nombre d'essais pour obtenir des résultats fiables qui reflètent la variation réelle du phénomène étudié en fonction de ses diverses caractéristiques.

Dans les années 1930, les premiers scientifiques à s'être posé le problème de l'organisation des essais sont des agronomes. Ils avaient en effet beaucoup de paramètres à étudier et n'avaient pas la possibilité de multiplier les expériences. De plus, la durée de ces dernières constituait une contrainte supplémentaire forte.

La méthode des plans d'expériences va donc aider l'expérimentateur à structurer sa recherche de manière différente, à confronter et à valider ses propres hypothèses et à mieux comprendre les phénomènes étudiés.

### **II.1. Petit historique sur les plans d'expériences : [10]**

↳ Les bases datent des années 1925 (R. A. FISHER). Dans le secteur Industriel, la technique est restée confidentielle jusqu'après la deuxième guerre mondiale.

↳ Développement au Japon entre les années 1950 et 1960 grâce notamment à Taguchi ; ses travaux sont diffusés aux Etats Unis et appliqués à grande échelle vers les années 1970.

↳ En Europe, les grandes entreprises industrielles utilisent les plans expérimentaux à partir des années 1980. Actuellement cette méthode d'expérimentation est utilisée par l'ensemble des industriels, petits et grands.

La méthode est maintenant considérée comme un outil de la qualité, indispensable :

↳ au stade de la conception des produits pour permettre de fixer les paramètres de développement du produit de façon optimale.

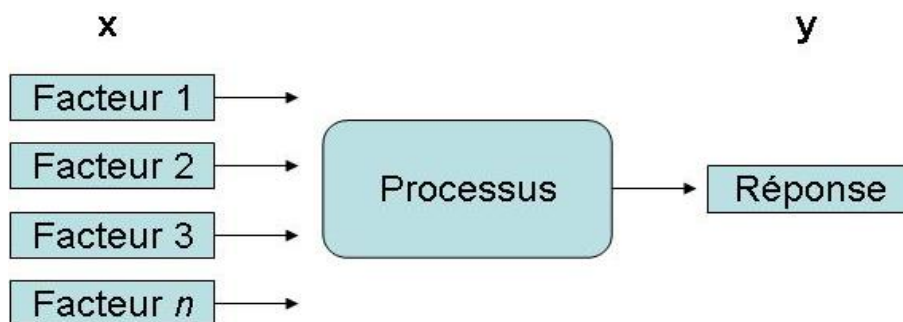
↳ au cours de la production, comme complément indispensable des méthodes de maîtrise des procédés.

### **II.2. Vocabulaire de base des plans expériences : [10]**

La planification expérimentale regroupe un ensemble de techniques statistiques destinées à analyser le comportement d'un système (processus) expérimental dans le but d'en comprendre et d'en améliorer le fonctionnement.

Un dispositif expérimental peut être considéré comme un système délivrant une ou plusieurs réponses. La réponse du système dépend d'un certain nombre de facteurs (Figure II.1).

Le scientifique est souvent amené à comprendre comment réagit ce système en fonction des facteurs susceptibles de le modifier. Pour visualiser cette évolution, il mesure une réponse et va ensuite essayer d'établir des relations de cause à effet entre les réponses et les facteurs.



**Figure II.1 :** Diagramme du principe des plans d'expériences

Les plans d'expériences ont un vocabulaire et une terminologie qu'il est nécessaire de définir.

**II.2.1. Facteur :** Un facteur est un paramètre ou un état du système étudié (phénomène ou procédé) dont la variation est susceptible de modifier le fonctionnement de ce système. Un facteur est dit **contrôlé** si il est identifié et sa variation maîtrisée. Les facteurs **non contrôlés** sont responsables de la dispersion des paramètres de sortie et entraînent les bruits du système, qui viennent perturber les réponses et nécessitent la répétition d'une même combinaison de niveau des facteurs au cours des différentes expériences.

Un facteur peut être **qualitatif** ou **quantitatif**. Facteur **significatif** est un facteur qui, lorsqu'il varie, modifie la réponse du système.

**II.2.2. Facteurs quantifiés :** Facteurs dont la valeur est mesurable, souvent à variation continue.

**II.2.3. Facteurs qualitatifs :** Facteurs dont la valeur est non mesurable.

Dans un même plan expérimental, on peut étudier simultanément des facteurs quantitatifs et qualitatifs.

**II.2.4. Réponse : [5]**

C'est La grandeur physique étudiée lors de l'examen d'un phénomène. La valeur de la réponse ne peut être modifié qu'indirectement par des facteurs changeants.

### II.2.5. Espace expérimental : [6]

Pour présenter l'espace expérimental nous utiliserons un espace à deux dimensions, ce qui facilitera les représentations graphiques. Il est ensuite facile d'étendre les notions introduites à des espaces multidimensionnels. Un facteur continu peut être représenté par un axe gradué et orienté. S'il y a un second facteur continu, il est représenté, lui aussi, par un axe gradué et orienté. Ce second axe est disposé orthogonalement au premier. On obtient ainsi un repère cartésien qui définit un espace euclidien à deux dimensions. Cet espace est appelé l'espace expérimental (figure II.2). L'espace expérimental comprend tous les points du plan « facteur1\*facteur2 » et chacun d'eux représente une expérience.

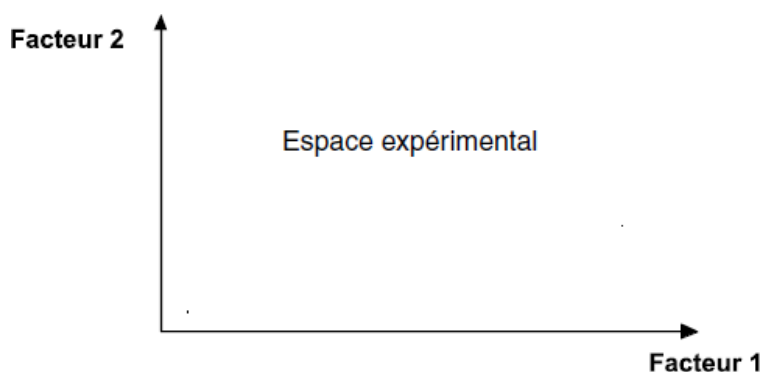


Figure II.2 : Espace expérimental.

### II.3. Méthodologie des plans d'expériences [11] :

Les expériences que doit comporter un plan d'expériences dépendent :

- Des informations que nous souhaitons recueillir.
- Des exigences de l'expérimentation.

Les étapes chronologiques sont :

#### 1. Formalisation du problème (Objectif) :

Cette étape consiste à recueillir un maximum d'informations concernant le phénomène étudié. On détermine l'objectif final, les contraintes de l'étude, l'optimisation à atteindre.

#### 2. Choisir les facteurs, niveaux et interactions (Modèle de base) :

Il s'agit de définir les facteurs, leurs niveaux et les interactions retenues. L'expérience permet de sélectionner certains facteurs, de définir leurs niveaux de variation, d'en figer d'autres, de sélectionner certaines interactions susceptibles d'être influentes sur la réponse.

#### 3. Construire le plan (Choix des affectations) :

Il s'agit de choisir le plan retenu qui peut être soit factoriel complet, soit factoriel fractionné (tables de Taguchi), et d'affecter les facteurs et interactions aux colonnes (graphe linéaire associée à la table).

#### 4. Réaliser les essais du plan (Résultats) :

La réalisation des essais doit se faire dans des conditions optimales. Les facteurs variables sont bien aux niveaux préconisés, les facteurs figés restent stables, l'environnement de la campagne d'essais est contrôlé autant que possible, la réponse est donnée avec la plus grande précision, l'essai est, si possible, répété, les mesures sont réalisées par une unique personne compétente.

#### 5. Analyser les résultats (effets, graphiques, variances) :

Le calcul des moyennes et des effets permettent de déterminer les coefficients du modèle matriciel. La représentation graphique et son analyse donnent une interprétation du poids des effets sur la réponse. L'analyse de la variance permet de vérifier si les effets définis comme influents pour l'étude associée sont réellement associés au facteur étudié ou s'ils ne sont pas les résultats de la variabilité naturelle du phénomène étudié. Elle permet donc, une validation statistique des effets.

#### 6. Optimiser la réponse (Modèle, conclusion) :

Il est retenu pour le modèle matriciel final, les effets influents et statistiquement significatifs. Les coefficients retenus du modèle donnent l'extremum recherché pour la réponse.

L'expérience permet ainsi l'élaboration d'un modèle représentatif du phénomène, l'estimation des quantités d'intérêt, la comparaison entre modèles concurrents ou de reprendre d'autres expériences avec plus d'information et de compréhension du phénomène.

### II.4. Notions de modélisation mathématique :

#### II.4.1. Etablissement du modèle mathématique :

On choisit a priori une fonction mathématique qui relie la réponse aux facteurs. On prend un développement limité de la série de Taylor-Mac Laurin. Les dérivées sont supposées constantes et le développement prend la forme d'un polynôme de degré plus ou moins élevé :

$$\hat{y} = a_0 + \sum a_i x_i + \sum a_{ij} x_i x_j + \dots + \sum a_{ii} x_i^2 + a_{ij\dots z} x_i x_j \dots x_z \quad (\text{II. 1})$$

Où :

- $y$  est la réponse ou la grandeur d'intérêt. Elle est mesurée au cours de l'expérimentation et elle est obtenue avec une précision donnée.

- $x_i$  représente le niveau attribué au facteur  $i$  par l'expérimentateur pour réaliser un essai. Cette valeur est parfaitement connue. On suppose même que ce niveau est déterminé sans erreur (hypothèse classique de la régression).

- $a_0, a_i, a_{ij}$  et  $a_{ij}$  sont les coefficients du modèle mathématique adopté a priori. Ils ne sont pas connus et doivent être calculés à partir des résultats d'expériences.

L'intérêt de modéliser la réponse par un polynôme est de pouvoir calculer ensuite toutes les réponses du domaine d'étude sans être obligé de faire les expériences. Ce modèle est appelé "**modèle postulé**" ou "**modèle a priori**".

Deux compléments doivent être apportés au modèle précédemment décrit.

Le premier complément est le "manque d'ajustement". Cette expression traduit le fait que le modèle a priori est fort probablement différent du modèle réel qui régit le phénomène étudié. Il y a un écart entre ces deux modèles. Cet écart est le manque d'ajustement.

Le second complément est la prise en compte de la nature aléatoire de la réponse. En effet, si l'on mesure plusieurs fois une réponse en un même point expérimental, on n'obtient pas exactement le même résultat. Les résultats sont dispersés et les dispersions ainsi constatées sont appelées erreurs expérimentales.

Ces deux écarts : manque d'ajustement et erreur expérimentale sont souvent réunis dans un seul écart noté  $e$ . Le modèle utilisé par l'expérimentateur peut être écrit alors :

$$y = a_0 + \sum a_i x_i + \sum a_{ij} x_i x_j + \dots + \sum a_{ij} x_i^2 + a_{ij\dots z} x_i x_j \dots x_z + e \tag{II. 2}$$

Chaque point expérimental permet d'obtenir une valeur de la réponse. Cette réponse est modélisée par un polynôme dont les coefficients sont les inconnues qu'il faut déterminer. À la fin du plan d'expériences, on a un système de  $n$  équations (s'il y a  $n$  essais) à  $p$  inconnues (s'il y a  $p$  coefficients dans le modèle choisi a priori). Ce système s'écrit d'une manière simple en notation matricielle :

$$Y = Xa + e \tag{II. 3}$$

$Y$  est le vecteur des réponses ;

$X$  est la matrice de calcul ou matrice du modèle ;

$a$  est le vecteur des coefficients ;

$e$  est le vecteur des écarts.

En utilisant le principe des moindres carrés, les estimations des coefficients sont données selon :

$$a = (X^t X)^{-1} X^t Y \tag{II. 4}$$

Formule dans laquelle la matrice  $\mathbf{X}^t$  est la matrice transposée de  $\mathbf{X}$ . De nombreux logiciels exécutent ce calcul et donnent directement les valeurs des coefficients. Deux matrices interviennent constamment dans la théorie des plans d'expériences :

- La matrice d'information  $\mathbf{X}^t \mathbf{X}$ .
- La matrice de dispersion  $(\mathbf{X}^t \mathbf{X})^{-1}$ .

#### II.4.2. Analyse statistique du modèle :

L'analyse statistique, dont la mise en œuvre est parfois redoutée par les expérimentateurs, apporte des éléments d'aide à la décision. Les outils utilisés pour effectuer cette analyse sont :

##### 1. Test de signification des coefficients du modèle :

Les calculs statistiques, qui permettent de savoir si les effets sont significatifs, de calculer les intervalles de confiance ou de valider la linéarité du modèle, font intervenir d'une part les écarts  $e_i$  (c'est-à-dire la différence entre la valeur expérimentale et la valeur prédite par le modèle), et, d'autre part, un estimateur sans biais de la variance commune des écarts. Cet estimateur est donné par :

$$s^2 = \frac{1}{n-p} \sum e_i^2 \quad (\text{II.5})$$

Où : n est le nombre d'expériences réalisées et p le nombre de coefficients du modèle.

##### 2. Analyse statistique du modèle dans sa globalité :

L'analyse de la variance consiste à comparer à l'aide d'un test **F** la somme des carrés des écarts due uniquement à la régression (donc au modèle) avec la somme des carrés des résidus. On notera par la suite  $y_i$  les réponses observées lors de la réalisation des expériences et  $\hat{y}_i$  la réponse estimée à l'aide du modèle. On notera, de même,  $\bar{y}$  la moyenne des réponses. On définit alors trois types de "variations" :

- a) **Variation due à la liaison (modèle) :**

$$\text{SCEL} = \sum (\hat{y}_i - \bar{y})^2 \quad (\text{II. 6})$$

SCEL : Somme des Carrés des Ecart due à La liaison.

- b) **Variation résiduelle :**

$$\text{SCER} = \sum (y_i - \hat{y}_i)^2 \quad (\text{II. 7})$$

SCER : Somme des Carrés des Ecart due aux Résidus.

- c) **Variation totale :**

$$\text{SCET} = \sum (y_i - \bar{y})^2 \quad (\text{II. 8})$$

$SCET = SCEL + SCER$  : Somme des Carrés des Ecart Total.

On définit de plus un "carré moyen" qui est le quotient d'une somme de carrés par son degré de liberté. SCEL aura  $(p - 1)$  degrés de liberté ( $p$  est le nombre de coefficients estimés à partir du modèle). SCER aura  $(n - p)$  degrés de libertés ( $n$  est le nombre d'expériences réalisées). SCET aura  $(n - 1)$  degrés de liberté. En outre, on note CML le carré moyen associé à SCEL et CMR le carré moyen associé à SCER.

Le tableau de l'analyse de variance se présente alors de la façon suivante (Tableau II.1) :

Variation	Somme des carrés	DDL	Carré moyen	F
Liaison	SCEL	$p - 1$	$\frac{SCEL}{p - 1} = CML$	$F_{calc} = \frac{CML}{s^2}$
Ecart	SCER	$n - p$	$\frac{SCER}{n - p} = s^2$	
Totale	SCET	$n - 1$		

**Tableau II.1** : Tableau d'analyse de la variance

Le test F permet alors de comparer pour un risque fixé à l'avance le  $F_{calc}$  avec un F (critique) lu dans la table de Fisher-Snedecor.

Le test est le suivant :

Hypothèse  $H_0$  : " les deux carrés moyens sont de même grandeur " et donc la régression n'est pas significative.

Hypothèse  $H_1$  : " le carré moyen dû à la régression est significativement plus grand que le carré moyen dû aux résidus " donc la régression est globalement significative.

La règle du test est alors pour un risque  $\alpha$  choisi :

- Si  $F_{calc}$  est inférieure au F (critique), on accepte l'hypothèse  $H_0$ .
- Si  $F_{calc}$  est supérieur au F (critique), on accepte l'hypothèse  $H_1$  avec la confiance  $1 - \alpha$ .

### II.4.3. Qualité descriptive du modèle

Le tableau d'analyse de régression (tableau II.1) permet d'établir immédiatement le coefficient de détermination à partir de la relation suivante :

$$R^2 = \frac{SCEL}{SCET} = 1 - \frac{SCER}{SCET} \tag{II.9}$$

Ce coefficient traduit la contribution du modèle dans la restitution de la variation de la réponse observée. Par définition, le coefficient de détermination appartient à l'intervalle suivant :

$$0 \leq R^2 \leq 1$$



En présence de plusieurs variables explicatives, ce qui est généralement le cas dans l'analyse des résultats d'essais provenant d'un plan d'expériences, il faut impérativement éviter l'utilisation du coefficient de détermination  $R^2$  pour comparer la qualité descriptive de différents modèles. Il faut recourir à l'utilisation du coefficient de détermination ajusté  $R_{ajusté}^2$  pour tenir compte du nombre de coefficients présents dans un modèle et pour comparer différents modèles entre eux ; on définit le coefficient de détermination ajusté à partir de la formule suivante :

$$R_{ajusté}^2 = 1 - \frac{\frac{SCER}{n-p}}{\frac{SCET}{n-1}} \quad (II.10)$$

Plus la valeur du coefficient de détermination ajusté est proche de 1, plus la qualité descriptive du modèle est satisfaisante.

## II.5. Les types de plans d'expérience :

On distingue plusieurs plans d'expériences :

### II.5.1. Plans factoriel complets : [9]

Un plan factoriel complet est un plan de toutes les combinaisons éventuellement dans les limites du domaine d'études : c'est la quantité de nombre maximal d'exécutions pour le plan factoriel de l'expérience. Le nombre d'essais  $N$  est calculé selon la formule suivante :  $N = 2^k$  où  $k$  est le nombre de facteurs.

#### II.5.1.1. Plan complet à deux facteurs : [7]

Ces plans possèdent un nombre de niveaux limité à deux pour chaque facteur. Toutes les combinaisons de niveaux sont effectuées au cours de l'expérimentation. Ces plans peuvent être utilisés indistinctement pour les variables continues et pour les variables discrètes.

Pour deux facteurs, le domaine d'étude est un carré, les meilleurs emplacements des points d'expériences sont situés aux sommets de ce carré (Figure II.3).

Le modèle mathématique postulé est un modèle du premier degré par rapport à chaque facteur :

$$Y = a_0 + a_1x_1 + a_2x_2 + a_{12}x_1x_2 + e \quad (II.11)$$

**Y**: est la réponse

**X<sub>i</sub>**: représente le niveau attribué au facteur  $i$ .

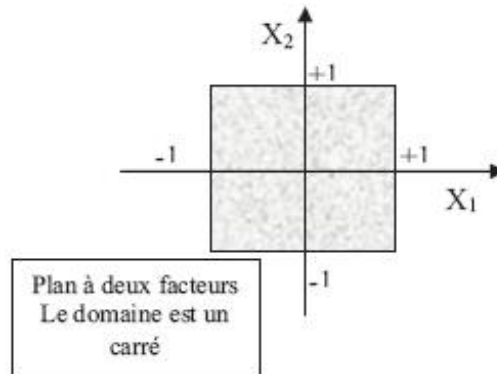
**a<sub>0</sub>**: est la valeur de la réponse au centre du domaine d'étude.

**a<sub>1</sub>**: est l'effet (ou effet principal) du facteur 1.

**a<sub>2</sub>** : est l'effet (ou effet principal) du facteur 2.

$a_{12}$ : est l'interaction d'ordre 2 entre les facteurs 1 et 2.

$e$  : est l'écart. (Résidu).



**Figure II.3 :** Points expérimentaux dans le cas d'un plan complet à deux facteurs

Le niveau bas du facteur est noté par - 1 et le niveau haut par +1. Le domaine de variation du facteur est constitué de toutes les valeurs comprises entre le niveau bas et le niveau haut.

La matrice d'expériences se construit selon le tableau II.2 pour le cas des plans  $2^2$  et avec des facteurs  $X_1$  et  $X_2$ .

N° d'essai	$X_1$	$X_2$
1	-1	-1
2	1	-1
3	-1	1
4	1	1

**Tableau II. 2 :** La matrice d'expériences (Plan  $2^2$ )

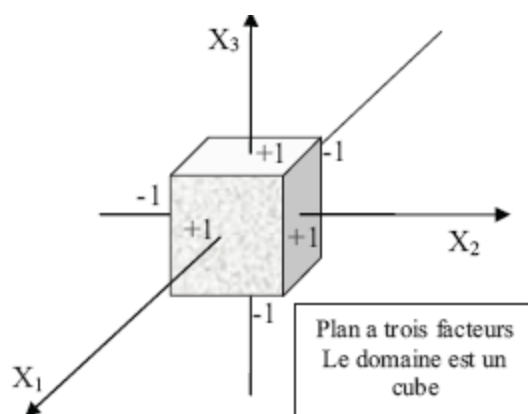
### II.5.1.2. Plans factoriels à k facteurs

On peut augmenter le nombre de facteurs. L'espace expérimental possède autant de dimensions qu'il y a de facteurs et le modèle mathématique, pour un plan factoriel à 3 facteurs (par exemple)  $x_1$ ,  $x_2$  et  $x_3$ , correspond à la relation :

$$Y = a_0 + a_1.x_1 + a_2.x_2 + a_3.x_3 + a_{12}.x_1.x_2 + a_{13}.x_1.x_3 + a_{23}.x_2.x_3 + a_{123}.x_1.x_2.x_3 \quad (\text{II.12})$$

$a_{123}$  : est l'interaction d'ordre 3 entre les facteurs 1, 2 et 3.

Pour trois facteurs, le domaine d'étude est un cube, comme sur la figure II.4.



**Figure II.4 :** Domaine d'étude dans le cas d'un plan complet à trois facteurs

La matrice d'expériences se construit selon le tableau II.3 pour le cas des plans  $2^3$  et avec des facteurs  $X_1$ ,  $X_2$  et  $X_3$ .

N° essai	Constante	X1	X2	X3	Réponse
1	1	-1	-1	1	y5
2	1	1	-1	-1	y6
3	1	-1	1	-1	y7
4	1	1	1	1	y8
coefficient	$a_0=(y_5+y_6+y_7+y_8)/4$	$a_1=(-y_5+y_6-y_7+y_8)/4$	$a_2=(-y_5-y_6+y_7+y_8)/4$	$a_3=(y_5-y_6-y_7+y_8)/4$	

**Tableau II. 3 :** Calcul des coefficients dans le cas d'une matrice Hadamard

Les matrices d'Hadamard sont des matrices orthogonales, c'est à dire le produit  $X^tX = N*I$  ou  $X^t$  est la matrice transposée de  $X$ ,  $I$ , la matrice unité ou bien le produit scalaire de deux colonnes (ou de deux lignes) est nul.

Elles ont pour éléments 1 ou -1. Hadamard a démontré qu'elles n'existent que pour  $N = 2$  et  $N$  multiple de 4.

### II.5.1.3. Plans complets à trois niveaux : [7]

S'il y a deux facteurs prenant chacun trois niveaux, il faut exécuter 9 essais. On note ce plan  $3^2$ .

S'il y a trois facteurs prenant chacun trois niveaux (plan  $3^3$ ), il faut exécuter 27 essais. Ce qui commence à faire beaucoup. C'est la raison pour laquelle on a introduit les plans fractionnaires correspondants qui portent le nom de carrés latins.

**II.5.2. plans fractionnaires : [7]**

Pour les plans factoriels complets, le nombre d'essais augmente de façon exponentielle ( $N=n^k$ ,  $n$ =niveaux,  $k$ =facteurs), à partir d'un certain nombre de facteurs et de niveaux, la charge expérimentale devient trop pénible à réaliser. D'où les plans fractionnaires.

Les plans factoriels fractionnaires sont l'un des aspects les plus intéressants des méthodes de conception expérimentale. Ils offrent la possibilité de réaliser des plans factoriels avec  $k$  facteurs en moins de  $2k$  expériences.

**II.5.3. Plans hybrides : [4]**

Les plans hybrides ont été mis au point par Roquemaure. Leur objectif est d'essayer d'approcher deux critères d'optimalité, celui d'orthogonalité et celui d'iso variance par rotation.

L'orthogonalité garantie la meilleure précision possible sur les coefficients du modèle et l'iso variance par rotation conduit à des erreurs de prévisions identiques à une même distance du centre du domaine. Si l'expérimentateur recherche ces deux propriétés, il doit penser à utiliser un plan hybride.

Les plans hybrides se désignent de la manière suivante : on indique le nombre de facteurs, puis le nombre de points expérimentaux dont un seul point central, enfin une lettre pour distinguer deux plans ayant le même nombre de facteurs et le même nombre de points expérimentaux.

**II.5.4. Plans de Plackett et Burman : [8]**

Les matrices de calcul des plans de Plackett et Burman sont des matrices d'Hadamard, c'est-à-dire des matrices ayant 4, 8, 12, 16, 20, 24, 28, 32, 36 lignes etc. Elles permettent donc des expérimentations ayant un nombre d'essais intermédiaire de celui des plans factoriels qui, eux, ont seulement  $2^k$  lignes (4, 8, 16, 32, etc.).

Les plans de Plackett et Burman sont le plus souvent saturés. Le modèle mathématique est alors un modèle sans interaction, comme ci-dessous :

$$Y = a_0 + \sum a_i x_i \quad (\text{II.13})$$

**II.5.5. Plans Taguchi: [5]**

Une conception Taguchi est une conception expérimentale qui vous permet de choisir un produit ou un processus qui fonctionne de manière plus cohérente dans son environnement d'exploitation. Le plan de Taguchi suppose que tous les facteurs qui contribuent à la variabilité ne peuvent pas être contrôlés.

Les tables de Taguchi sont des plans de Plackett et Burman dans lesquels on a remplacé +1 par 1 et -1 par 2. Les noms des plans ont également été traduits. Le plan  $2^3$  est la Table L8 et le plan  $2^4$  est la Table L16. Le plan de 12 essais, appelé Table L12, est un plan de Plackett et Burman.

**Conclusion :**

Pour permettre la prévision de la réponse et l'optimisation du système, la méthode des plans d'expériences de sa conception et sa structure permet une représentation mathématique de la réponse « y » en fonction des facteurs sujets de l'étude.

Cette méthode sera utilisée dans le quatrième chapitre pour la modélisation et l'optimisation de la résistance à la compression et au cisaillement du sable de moulage en fonction du taux d'humidité (eau) et de bentonite.

## **Chapitre III**

### **Modélisation de la résistance à la compression et au cisaillement des sables de moulage à vert**

## **Introduction : [12]**

Les logiciels des plans d'expériences possèdent des bibliothèques de plans classiques et ils permettent aussi de construire les plans particuliers. On peut réaliser le calcul des coefficients avec un tableur, mais cela nécessite de la programmation et du temps. Il est donc préférable d'utiliser un logiciel adapté qui effectue non seulement le calcul des coefficients mais aussi les calculs statistiques permettant d'évaluer la qualité du modèle mathématique. Les logiciels des plans d'expériences sont aussi programmés pour calculer des réponses dans tous les domaines d'étude, pour effectuer les analyses de variance, pour tracer des courbes d'iso réponses, pour construire les surfaces de réponses et pour déterminer les zones d'intérêt. Cet ensemble de possibilités permet d'effectuer de multiples analyses et de regarder ces données sous tous les angles. On arrive ainsi à extraire, en peu de temps, toute l'information présente dans les résultats d'un plan d'expériences.

Dans le présent chapitre, nous allons utiliser la méthode des plans d'expériences pour l'analyse statistique des résultats de résistance à la compression et au cisaillement des essais effectués au laboratoire des sables d'ALFET-Tiaret.

Pour arriver à nos fins, nous avons utilisé le logiciel Minitab version 19. Les Etapes réalisées pour établir un plan d'expériences, évaluer les coefficients du modèle mathématique et effectuer les différentes analyses sur le modèle choisi sont décrites en annexe.

### **III.1. Protocole expérimental :**

#### **III.1.1. Préparation du sable de moulage :**

Après coulage du métal liquide dans le moule en sable, le sable récupéré après la retombée est très différent du sable de secours, car ayant subi une dégradation plus ou moins importante, et ses effets se caractérisent par :

- une perte d'eau
- une déshydratation de l'argile qui enrobe les grains de silice
- une élévation de température

La régénération et la réutilisation du sable brûlé peuvent permettre de réaliser d'importantes économies. Cette opération, difficile à maîtriser en fonderie, vise à redonner à ce sable toutes ses propriétés de cohésion, de serrage et de perméabilité en le rendant apte aux opérations de mise en forme

La préparation du sable de moulage assure un mélange homogène des matériaux utilisés (sable ancien, bentonite, noir minéral, eau). Le but de cette opération est de remplacer l'argile dégradée, l'eau évaporée, les combustibles brûlés et de restaurer le vieux sable. La restauration du vieux sable comprend les actions suivantes :

- broyage de mottes
- refroidissement
- dépoussiérage
- vérification des caractéristiques (pourcentage d'argile, granulométrie, teneur en matières combustibles, ...).

Cette opération est suivie d'un dosage gravimétrique des différents ingrédients couramment utilisés et est plus précise que le dosage volumétrique car l'erreur relative due aux variations du taux d'humidité est très faible. Enfin, les différents ingrédients sont mélangés avec plus ou moins de précision après dosage afin que le matériau final ait la bonne homogénéité.

### III.1.2. Composition des mélanges :

Les différents ingrédients sont pré-préparés avant d'être ajoutés au mélangeur. Ceci est fait pour tous les tests que nous effectuons, y compris :

- **Le tamisage** : il procure une meilleure fluidité au mélange et permet d'éliminer différents déchets, il est réalisé pour les divers éléments utilisés au tamis de 1.6 mm (ouverture des mailles).

- **Le séchage** : Nous sommes partis pour nos essais des constituants dépourvus de leur eau libre. Le séchage est effectué dans un four d'étuvage du type W.S.983

- **Le dosage** : Le dosage des constituants est effectué par pesée car ce type de dosage donne de meilleures précisions.

Les produits utilisés pour la réalisation de nos essais sont donnés en pourcentage comme suit :

- vieux sable : 95 %
- sable neuf (silice) : 5 %
- noir minéral : 30 % du taux de bentonite
- bentonite : 4 %, 7 %, et 11 %.
- Eau : 3 %, 5 % et 7 %.

### III.1.3. Préparation des mélanges :

Le mélange doit être correctement traité pour que la pâte argileuse formée par la bentonite et l'eau soit très homogène et recouvre parfaitement les grains de sable. Les ingrédients sont introduits dans un même mélangeur (Figure III.1).





**Figure III.1 :** Mélangeur utilisé pour la préparation de nos mélanges

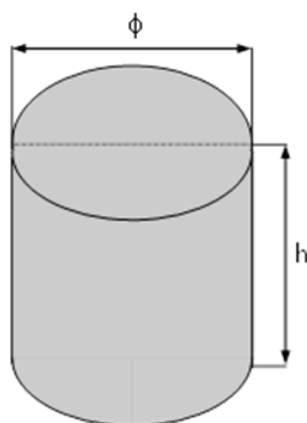
Le temps de malaxage est un facteur important et doit être choisi aussi étroitement que possible, car le sable se dessèche s'il est prolongé. Le temps que nous avons choisi pour tous les tests était de 10 minutes. La séquence d'ajout des ingrédients au mélangeur pour les différents tests a été réalisée selon les étapes suivantes :

- 1) 50 % du vieux sable + 5 % de silice → malaxage pendant une minute.
- 2) Le reste du vieux sable + le % de bentonite + le % du noir minéral → malaxage pendant une minute.
- 3) 50 % de l'eau → malaxage pendant 4 minutes.
- 4) Le reste de l'eau → malaxage pendant 4 minutes.

## **III.2. Essais exécutés :**

### **III.2.1. Confection des éprouvettes pour l'essai de résistance à la compression et au cisaillement :**

Les mélanges préparés et prêt à l'emploi sont confectionnés sous forme d'éprouvettes cylindriques normalisée de diamètre  $\Phi = 50$  mm et de hauteur  $h = 50$  mm (Figure III.2).



**Figure III.2 :** Epreuve normalisée

Ces éprouvettes sont obtenues en mettant une quantité suffisante de sable préparé dans le tube d'éprouvette de diamètre  $\Phi = 50$  mm et de hauteur  $h = 120$  mm (Figure III.3).

Le sable est serré par trois coups de fouloir du damoir de la figure III.4. L'éprouvette, ainsi préparée est extraite du tube d'éprouvette et elle est utilisée pour mesurer la résistance à la compression et celle au cisaillement.



**Figure III.3 :** Tube d'éprouvettes



**Figure III.4 :** Damoir utilisé pour la confection des éprouvettes

### III.2.2. Réalisation des essais de résistance à la compression et au cisaillement :

L'essai de résistance à la compression et au cisaillement est effectué sur l'éprouvette normalisée de la figure III.2. Cette éprouvette est placée dans un bâti de compression ou de cisaillement de l'appareil de la figure III.5. Elle est soumise à deux forces opposées en utilisant les accessoires de la figure III.6 (a) pour l'essai de compression et ceux de la figure III.6 (b) pour l'essai de cisaillement (le plan de séparation de ces accessoires constitue un plan de glissement préférentiel correspondant au plan de cisaillement de l'éprouvette).

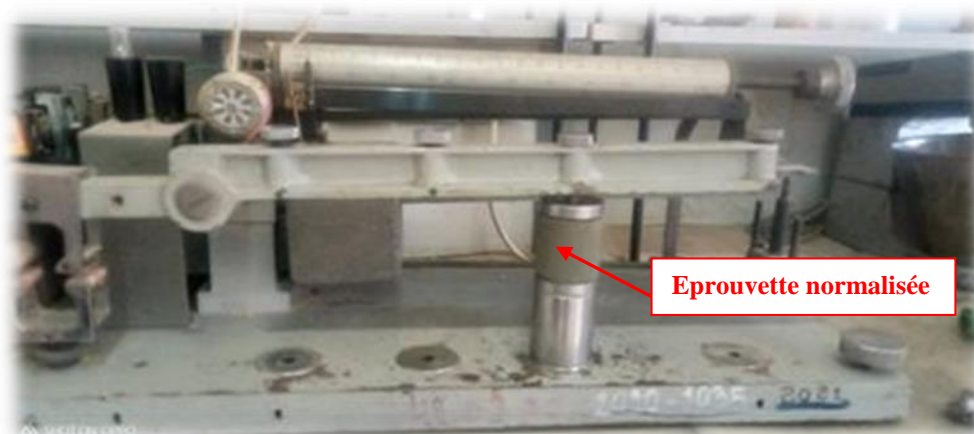
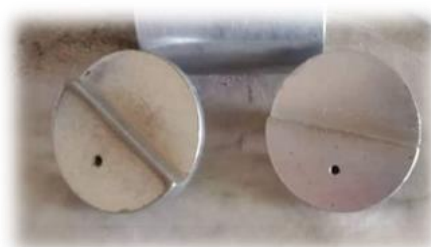


Figure III.5 : Appareil universel de l'essai de compression et de cisaillement



(a) L'essai de compression



(b) L'essai de cisaillement

Figure III.6 : Accessoires pour l'essai de résistance

### III.2.3. Résultats de l'essai de résistance à la compression

Les résultats des essais expérimentaux de résistance à la compression sont représentés sur la figure III.7 pour différents taux de bentonite (4 %, 7 % et 11 %) et différents taux d'humidification (3 %, 5% et 7%).

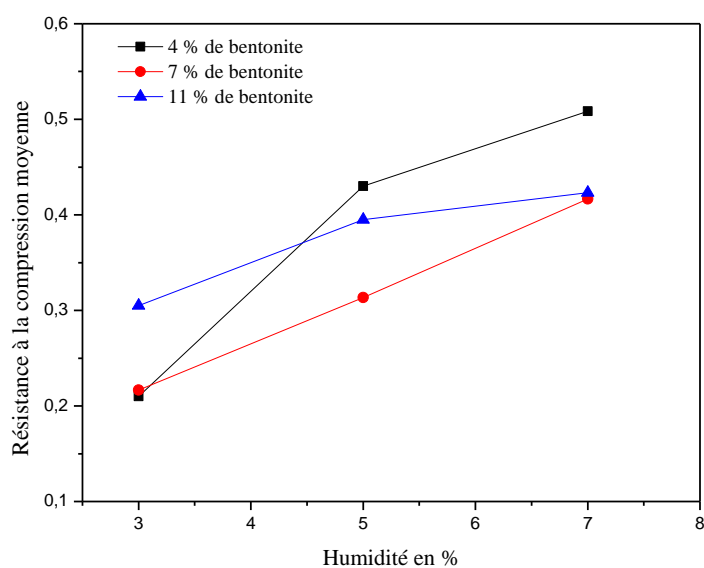
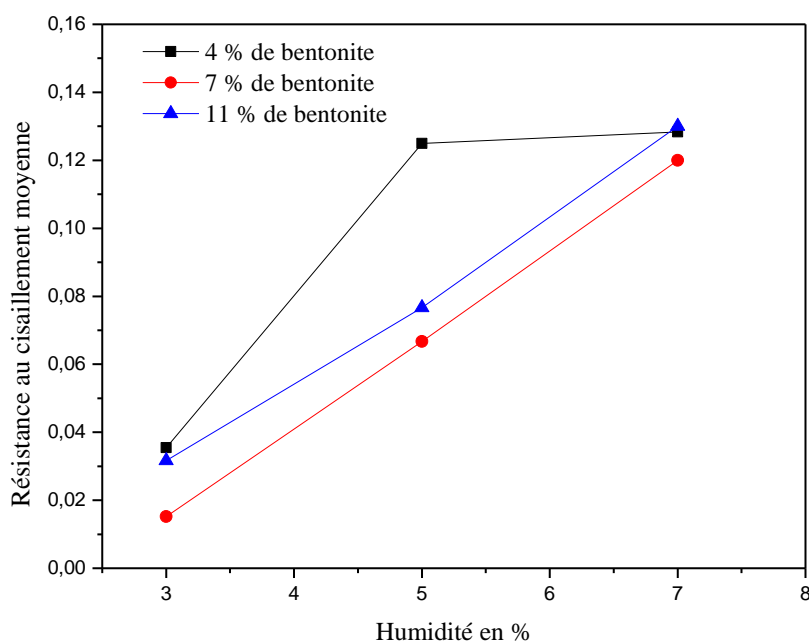


Figure III.7 : Résultats expérimentaux de la résistance à la compression

Les mélanges préparés donnent une résistance à la compression moyenne qui augmente avec l'augmentation du taux d'humidité. Pour des taux d'humidification dépassant les 5%, la résistance à la compression augmente rapidement. Elle affiche son maximum pour un taux de bentonite de 4% et une humidité de 7%.

### III.2.4. Résultats de l'essai de résistance au cisaillement

Les résultats concernant les essais expérimentaux de résistance au cisaillement sont illustrés sur la figure III.8 pour différents taux de bentonite (4 %, 7 % et 11 %) et différents taux d'humidification (3 %, 5% et 7%).



**Figure III.8 :** Résultats expérimentaux de la résistance au cisaillement

Pour les différents pourcentages de bentonite la résistance au cisaillement moyenne augmente d'une manière importante avec l'augmentation du taux d'humidité. Pour un taux d'humidification de 7% la résistance au cisaillement signe des valeurs maximales pour les 3 taux de bentonite considérés dans ce travail.

## III.3. Analyse statistique des résultats de résistance à la compression

### III.3.1. Plan d'expériences (DOE) adopté

Les facteurs considérés dans ce travail et qui peuvent influencer la résistance à la compression et au cisaillement (réponse) sont présentés dans le tableau III.1. Le plan considéré sera un plan factoriel complet de deux facteurs A et B (tableau III.1) à 3 niveaux et 3 répliques (essai1, essai2 et l'essai3) (tableau III.2), c'est-à-dire on aura  $9 \times 3 = 27$  essais au total.

Facteur	Symbole	Type de Facteur	Niveaux codés	Niveaux réels
% d'eau	A	Numérique	1	3 %
			2	5 %
			3	7 %
% de bentonite	B	Numérique	1	4 %
			2	7 %
			3	11 %
<b>Réponse (y) : Résistance à la compression ou au cisaillement</b>				

**Tableau III.1 : Facteurs et niveaux (réels et codés) considérés**

			Résultats expérimentaux de résistance à la compression		
Expérience	A (% d'eau)	B (% de bentonite)	Essai 1	Essai 2	Essai 3
1	3	4	0,22	0,20	0,21
2	3	7	0,22	0,21	0,22
3	3	11	0,30	0,31	0,305
4	5	4	0,45	0,41	0,43
5	5	7	0,28	0,34	0,32
6	5	11	0,39	0,40	0,395
7	7	4	0,515	0,50	0,51
8	7	7	0,415	0,425	0,41
9	7	11	0,425	0,42	0,425

**Tableau III.2 : Résultats de l'essai Rco**

### III.3.2. Tableau des résultats expérimentaux

L'ordre des 27 essais (9 essais x 3 répliques) des deux facteurs considérés est obtenu par randomisation en utilisant le logiciel Minitab 19 comme indiqué dans le tableau III.3. Les résultats de la résistance à la compression sont représentés à la dernière colonne du tableau ci-dessous :

Numéro d'essai	Facteur 1 (% d'eau)	Facteur 2 (% de bentonite)	Réponse
	A	B	Rco
1	7	4	0,515
2	3	11	0,300
3	7	11	0,425
4	7	7	0,415
5	5	4	0,450
6	5	11	0,390
7	7	4	0,500
8	3	11	0,310

9	3	7	0,220
10	5	4	0,410
11	3	11	0,305
12	3	4	0,220
13	5	7	0,280
14	7	11	0,420
15	5	7	0,340
16	7	4	0,510
17	5	4	0,430
18	5	11	0,400
19	5	11	0,395
20	5	7	0,320
21	3	4	0,200
22	7	11	0,425
23	3	4	0,210
24	3	7	0,210
25	7	7	0,425
26	7	7	0,410
27	3	7	0,220

**Tableau III.3 :** Ordre des essais de Rco

### III.3.3. Diagramme de Pareto :

Le diagramme de Pareto est utilisé pour identifier les effets dominants, les plus influents sur la réponse.

La figure III.9 présente le diagramme de Pareto pour la résistance à la compression des mélanges préparés. Nous constatons que les effets principaux (A et B) et l'interaction d'ordre 2 entre ces deux facteurs sont statistiquement significatifs au seuil  $\alpha = 0,05$  avec les termes du modèle considéré.

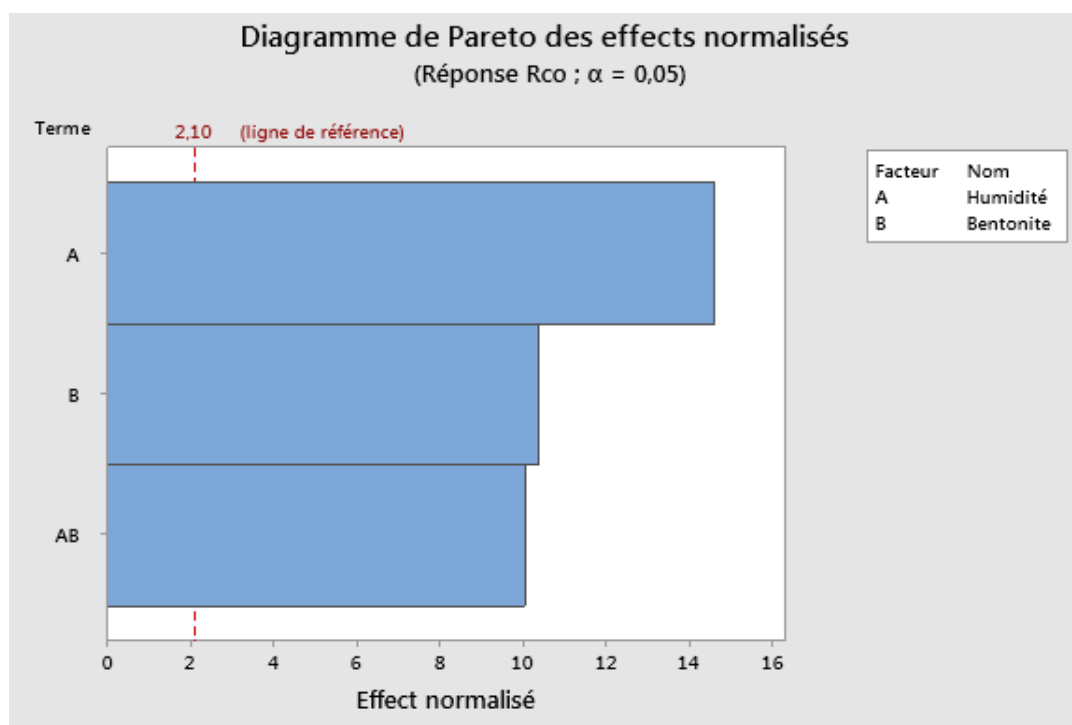


Figure III.9 : Diagramme de Pareto de Rco

### III.3.4. Equation de régression de la résistance à la compression (modèle de Rco)

Une analyse de régression est utilisée pour trouver la relation entre les facteurs significatifs et leur interaction (figure III.9). Cette relation est donnée ci-dessous :

$$\begin{aligned} \text{Résistance à la compression (Rco)} = & 0,35759 - 0,11370 A3 + 0,02185 A5 + 0,09185 A7 + \\ & 0,02519 B4 - 0,04204 B7 + 0,01685 B11 - 0,05907 A3*B4 + 0,01481 A3*B7 \\ & + 0,04426 A3*B11 + 0,02537 A5*B4 - 0,02407 A5*B7 - 0,00130 A5*B11 + 0,03370 A7*B4 \\ & + 0,00926 A7*B7 - 0,04296 A7*B11 \end{aligned}$$

### III.3.5. Récapitulatif du modèle

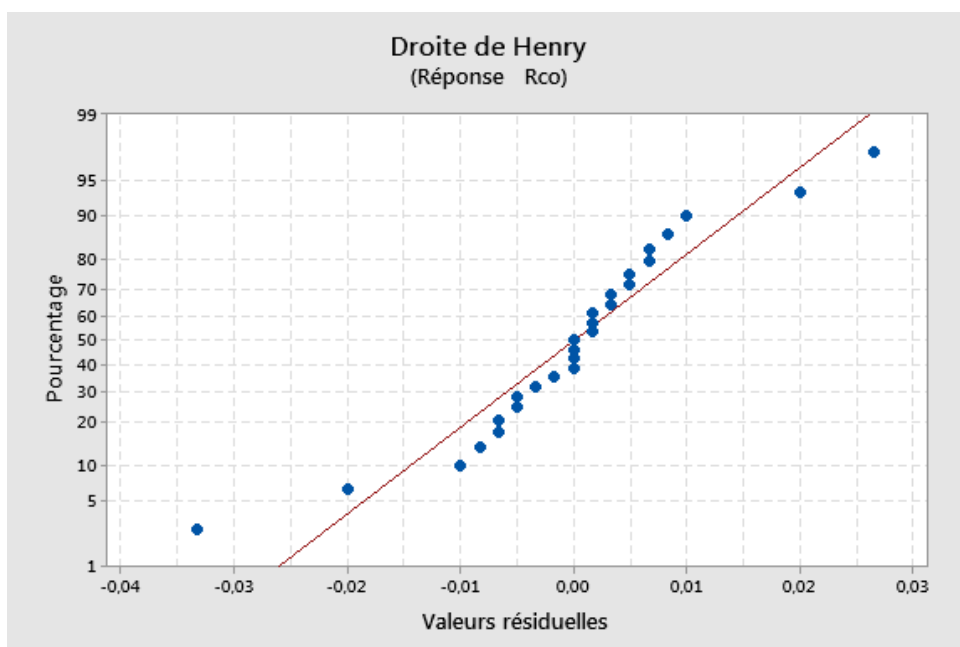
Les valeurs de l'écart type (S), R<sup>2</sup> (coefficient de détermination), R<sup>2</sup> ajusté et R<sup>2</sup> prédit pour la variable de réponse (Rco) obtenues à partir de l'équation de régression sont résumées ci-dessous dans le tableau III.4.

S	R <sup>2</sup>	R <sup>2</sup> ajusté	R <sup>2</sup> prédit
0,0135058	98,71%	98,13%	97,09%

Tableau III.4 : Récapitulatif du modèle

### III.3.6. La droite de Henry :

Les valeurs résiduelles de la résistance à la compression calculées à partir des valeurs expérimentales et prédites par le modèle retenu (à partir de l'équation de régression) sont représentées sur la figure III.10.



**Figure III.10 : Droite de Henry de Rco**

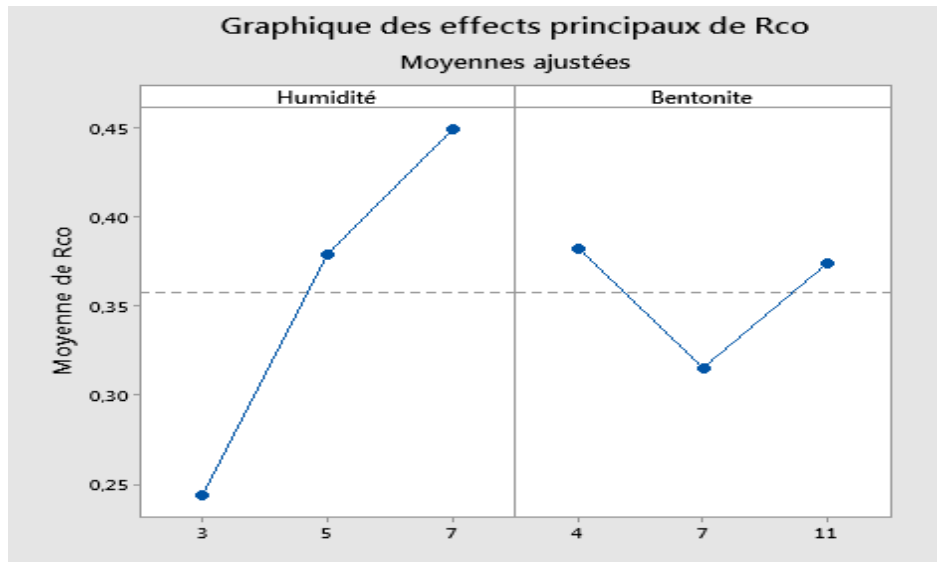
D'après ce graphique (figure III.10) et la valeur de  $R^2$  ajusté (tableau III.4), on peut dire que le modèle sélectionné est satisfaisant et que les valeurs prédites sont en très bon accord avec les valeurs mesurées. Seuls 1,29 % de la variation totale ne peut être expliquée à l'aide de ce modèle. La valeur  $R^2$  ajustée ( $R^2$  ajusté = 98,13 %) montre également que le modèle prédit correspond bien aux données de l'expérience et qu'il est hautement significatif.

### III.3.7. Diagrammes des effets principaux et des interactions de Rco :

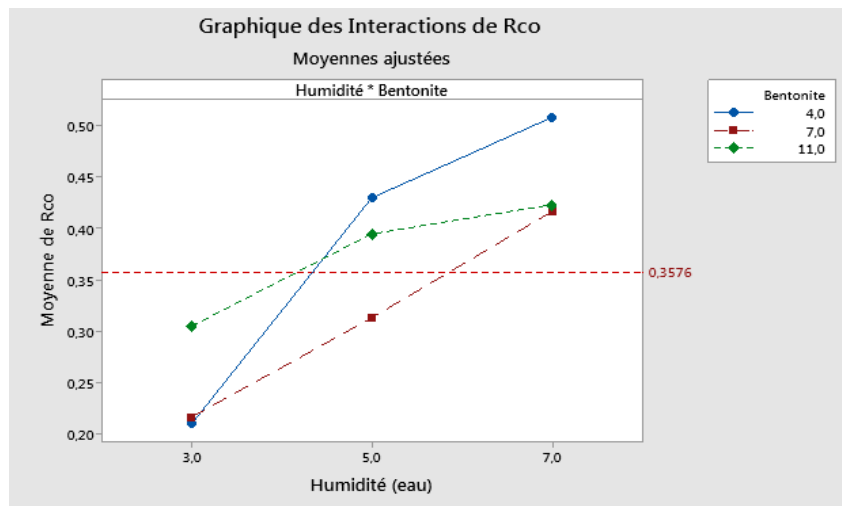
Le graphique des effets principaux est utilisé pour représenter le niveau optimal des caractéristiques d'entrée pour cette étude. Celui des interactions, il nous indique l'effet simultané de tous les facteurs considéré. Les effets principaux des facteurs et l'interaction entre les facteurs de la Rco moyenne sont illustrés aux figures III.11 et III.12.

Nous pouvons conclure du graphique de la figure III.11 que la variation de l'humidité affecte d'une manière plus significative la résistance à la compression du sable de moulage que la variation du taux de bentonite. Cette propriété (Rco) augmente avec l'augmentation du pourcentage de l'eau. Un taux de 7% de bentonite diminue cette propriété.





**Figure III.11 :** Graphique des effets principaux de Rco



**Figure III.12 :** Diagramme des interactions de Rco

Le niveau optimal maximisant la résistance à la compression est une humidification de 7 % et un taux de bentonite de 4 %. Cette combinaison paramétrique appartient à la série expérimentale no. 1, 7, et 16 du tableau III.3.

Pour une optimisation efficace, un graphique d'interaction est utilisé pour démontrer l'interaction entre les niveaux et les paramètres d'entrée. Le résultat est illustré à la figure III.12.

La variation du taux d'humidité a un effet plus significatif sur la résistance à la compression moyenne pour les mélanges préparés avec 4 et 7 % de bentonite.

L'effet de la variation du taux d'humidité sur la résistance à la compression moyenne est plus limité pour les mélanges préparés avec 11 % de bentonite.

Une valeur maximale de 0,52 Kg/cm<sup>2</sup> de la résistance à la compression est atteinte pour 4% de bentonite et 7% d'eau.

### III.4. Analyse statistique des résultats de la résistance au cisaillement

#### III.4.1. Plan d'expériences (DOE) adopté

Le plan considéré est le même que celui adopté pour la Rco. Les résultats expérimentaux des essais de résistance au cisaillement sont donnés au tableau III.5.

Expérience	A (% d'eau)	B (% de bentonite)	Résultats expérimentaux de résistance au cisaillement		
			Essai 1	Essai 2	Essai 3
1	3	4	0,035	0,0355	0,036
2	3	7	0,015	0,015	0,0155
3	3	11	0,03	0,03	0,035
4	5	4	0,12	0,13	0,125
5	5	7	0,06	0,075	0,065
6	5	11	0,06	0,1	0,07
7	7	4	0,13	0,13	0,125
8	7	7	0,11	0,13	0,12
9	7	11	0,11	0,15	0,13

Tableau III.5 : Résultats de l'essai Rci

#### III.4.2. Tableau des résultats expérimentaux

L'ordre des 27 essais de la résistance au cisaillement est présenté au tableau III.6.

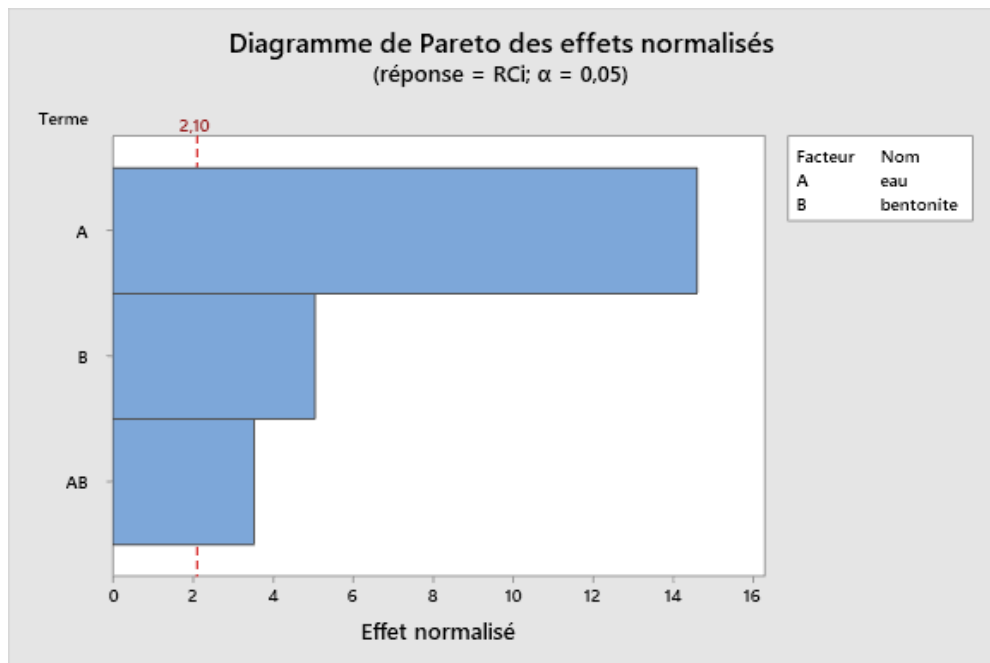
Numéro d'essai	Facteur 1 (% d'eau)	Facteur 2 (% de bentonite)	Réponse
	A	B	Rci
1	3	4	0,0350
2	5	11	0,0600
3	3	11	0,0300
4	7	11	0,1100
5	5	7	0,0600
6	5	4	0,1200
7	3	7	0,0150
8	3	11	0,0300
9	5	11	0,1000
10	7	11	0,1500
11	3	4	0,0355
12	5	7	0,0750
13	7	7	0,1100
14	7	7	0,1300
15	7	4	0,1300
16	3	7	0,0150
17	3	4	0,0360
18	7	4	0,1300
19	7	11	0,1300
20	7	4	0,1250
21	3	7	0,0155
22	3	11	0,0350
23	5	4	0,1300
24	5	4	0,1250

25	7	7	0,1200
26	5	11	0,0700
27	5	7	0,0650

**Tableau III.6 : Ordre des essais de Rci**

**III.4.3. Diagramme de Pareto :**

La figure III.13 présente le diagramme de Pareto pour la résistance au cisaillement des mélanges préparés. Nous constatons que les effets principaux (A et B) et l'interaction d'ordre 2 entre ces deux facteurs sont statistiquement significatifs au seuil  $\alpha = 0,05$  avec les termes du modèle considéré.



**Figure III.13 : Diagramme de Pareto de Rci**

**III.4.4. Equation de régression de la résistance au cisaillement (modèle de Rci)**

La relation entre les facteurs significatifs et leur interaction (figure III.13) est donnée par l'équation ci-dessous :

$$\text{Résistance au cisaillement (Rci)} = 0,08100 - 0,05356 A^3 + 0,00844 A^5 + 0,04511 A^7 + 0,01528 B^4 - 0,01372 B^7 - 0,00156 B^{11} - 0,00722 A^3 \cdot B^4 + 0,00144 A^3 \cdot B^7 + 0,00578 A^3 \cdot B^{11} + 0,02028 A^5 \cdot B^4 - 0,00906 A^5 \cdot B^7 - 0,01122 A^5 \cdot B^{11} - 0,01306 A^7 \cdot B^4 + 0,00761 A^7 \cdot B^7 + 0,00544 A^7 \cdot B^{11}$$

### III.4.5. Récapitulatif du modèle

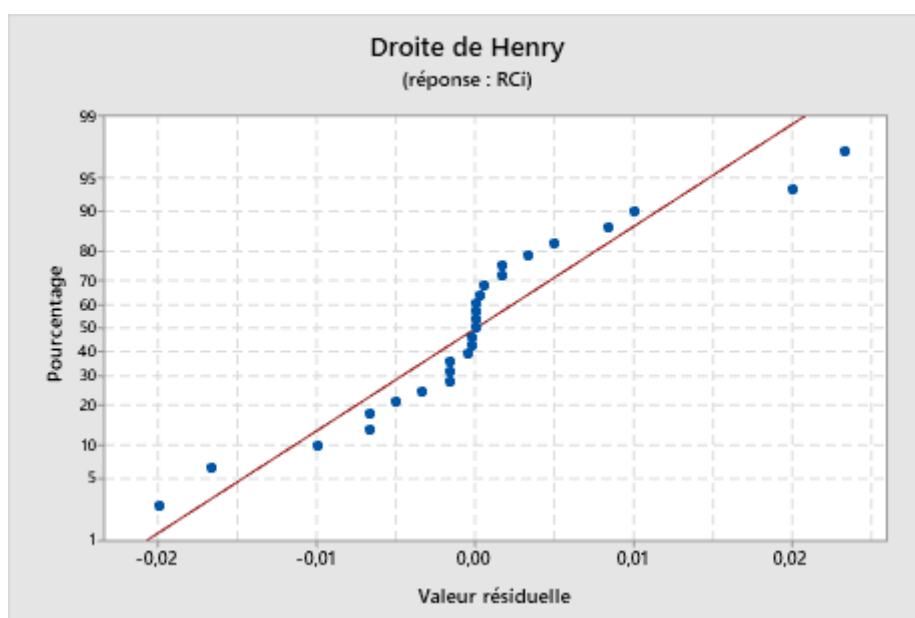
Les valeurs de l'écart type (S),  $R^2$  (coefficient de détermination),  $R^2$  ajusté et  $R^2$  prédit pour la réponse Rci obtenues à partir de l'équation de régression sont résumées dans le tableau III.7.

S	$R^2$	$R^2$ ajusté	$R^2$ prédit
0,0107169	96,14%	94,42%	91,31%

**Tableau III.7 :** Récapitulatif du modèle

### III.4.6. La droite de Henry :

La figure III.14 montre le graphique des valeurs résiduelles de la résistance au cisaillement du modèle retenu.



**Figure III.14:** Droite de Henry du Rci

D'après ce graphique (figure III.14) et la valeur de  $R^2$  ajusté (tableau III.7), on peut dire que le modèle sélectionné est satisfaisant et que les valeurs prédites sont en très bon accord avec les valeurs mesurées. Seuls 3,86 % de la variation totale ne peut être expliquée à l'aide de ce modèle. La valeur  $R^2$  ajustée ( $R^2$  ajusté = 94,42%) montre également que le modèle prédit correspond bien aux données de l'expérience et qu'il est hautement significatif.

### III.4.7. Diagrammes des effets principaux et des interactions de Rci

Les graphiques des effets principaux et de leur interaction d'ordre 2 de la Rci moyenne sont illustrés aux figures III.15 et III.16.

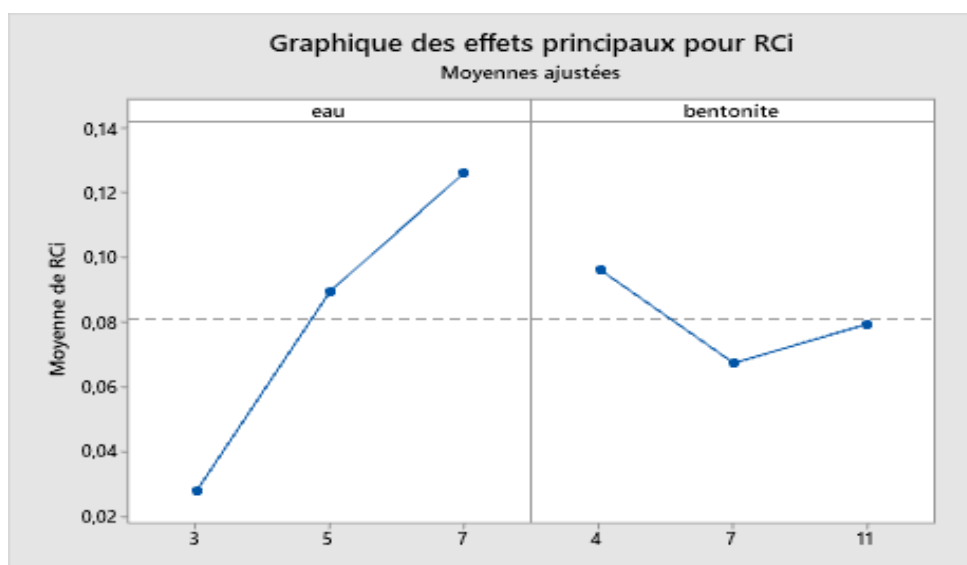


Figure III.15 : Graphique des effets principaux de Rci

D'après la figure III.15, nous remarquons que l'humidité a un effet plus significatif sur la résistance au cisaillement moyenne que le pourcentage de la bentonite. Les essais expérimentaux réalisés avec des taux d'humidité croissants augmentent la résistance au cisaillement, tandis qu'un taux de 7 % de bentonite a un effet inverse sur celle-ci.

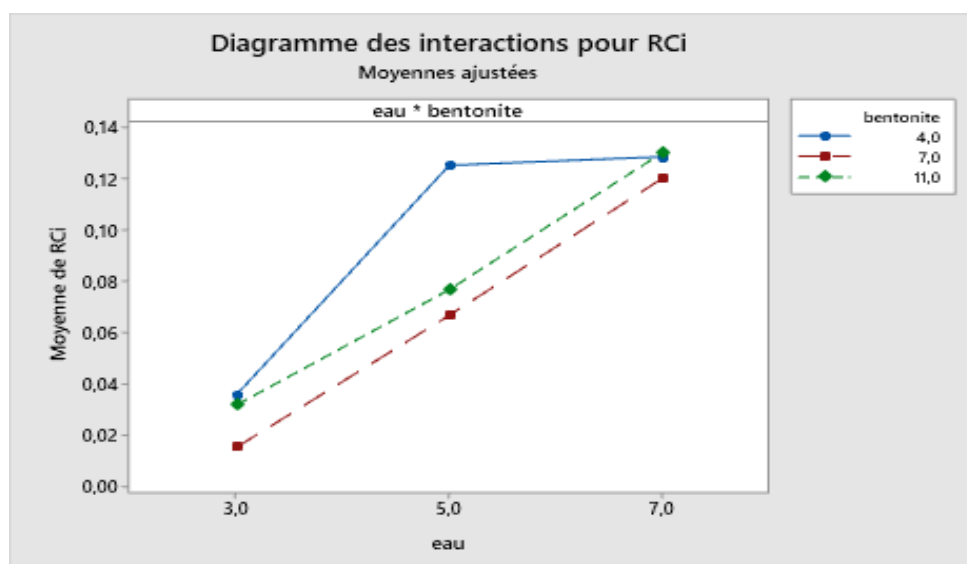


Figure III.16 : Diagramme des interactions d'ordre 2 de Rci

Une résistance au cisaillement maximale est obtenue pour un niveau de 7% d'eau et les différents pourcentages de bentonite (figure III.16). Ces combinaisons paramétriques appartiennent aux séries expérimentales (15, 18, 20), (13, 14, 25) et (4, 10, 19) du tableau III.6, où la résistance au cisaillement moyenne est de 0,128, 0,12 et 0,13 Kg/cm<sup>2</sup>.

## Conclusion

La méthode des plans d'expériences et plus particulièrement le plan factoriel complet à 3 niveaux est utilisé efficacement dans la modélisation et l'optimisation de la résistance à la compression et au cisaillement des sables de moulage à vert.

Les effets principaux (les facteurs : humidité et bentonite) ainsi que l'interaction entre ces deux facteurs influent sur ces propriétés. La variation du taux d'humidité a un effet plus important que celui de la bentonite.

Ces caractéristiques ( $R_{co}$  et  $R_{ci}$ ) doivent être maximisées pour conférer ainsi au moule une bonne résistance à la pression du métal liquide.

L'analyse des résultats montre que la résistance à la compression et au cisaillement atteignent des valeurs maximales pour un taux d'humidité de 7% et un taux de 4% de bentonite pour la  $R_{co}$ . Ce taux peut atteindre les 11% pour la  $R_{ci}$ .

Une faible résistance est obtenue pour des taux d'humidité très faibles (3%) et des taux de bentonite de 7%.

Un modèle mathématique est établi dans ce travail. Il prend en considération les deux facteurs considérés (taux d'humidité et bentonite) et l'interaction entre ces deux facteurs.

Les valeurs prédites par ce modèle sont en bon accord avec les valeurs expérimentales, avec un coefficient de détermination ajusté ( $R^2$  ajusté) de 98,13% pour la  $R_{co}$  et de 94,42% pour la  $R_{ci}$ .

## Conclusion générale :

Le problème du sable de fonderie est extrêmement important en raison des grandes quantités utilisées en moulage, et surtout du fait de son influence sur la qualité des pièces moulées.

Le moulage se trouve dans une grande variété d'industries, les produits fabriqués sont de haute qualité et on utilise généralement des moules en sable.

Pour la conception de ce moule, le sable de fonderie doit être composé de nombreux matériaux et produits (argile, silicate de sodium, additifs auxiliaires) nécessaires à la réussite du moulage.

Après avoir donné un aperçu sur les propriétés de base du sable de moulage (perméabilité, résistance à la compression, au cisaillement, à la traction, à la flexion et d'autres propriétés) résultant du processus de préparation du sable effectué dans des machines appropriées pour produire un mélange parfait, nous avons exposé par la suite, certains défauts du moulage en sable courants et leur causes.

Ces propriétés sont mesurées par des essais normalisés (éprouvettes, matériels ...etc.) et elles sont grandement influencées par la variation de la teneur en eau et en bentonite.

Cette étude nous a permis de chercher les facteurs les plus influents sur la résistance à la compression et au cisaillement en exploitant des résultats expérimentaux obtenus sur différents mélanges et en utilisant la méthode des plans d'expériences comme moyen d'optimisation de ces propriétés. Un aperçu sur cette méthode est présenté au chapitre II.

Le plan d'expériences factoriel complet est utilisé pour la modélisation et l'optimisation de la résistance des sables de moulage à vert, en considérant 2 facteurs (l'eau et la bentonite) à 3 niveaux (3, 5 et 7% d'eau et 4, 7 et 11% de bentonite).

Dans ce travail, un modèle mathématique est établi en considérant ces deux facteurs et leurs interactions.

Enfin, nous pouvons conclure que :

✓ La résistance à la compression et au cisaillement atteignent des valeurs maximales pour un taux d'humidité de 7% et un taux de 4% de bentonite pour la Rco. Ce taux peut atteindre les 11% pour la Rci.

✓ Une faible résistance est obtenue pour des taux d'humidité très faibles (3%) et des taux de bentonite de 7%.

✓ Les valeurs prédites par ce modèle sont en bon accord avec les valeurs expérimentales, avec un coefficient de détermination ajusté ( $R^2$  ajusté) de 98,13% pour la Rco et de 94,42% pour laRci

## Annexe : Etapes réalisées sur Minitab pour établir un plan d'expériences

Le tableau A.1 présente les principaux logiciels des plans d'expériences et les sites internet correspondants. Quelques-uns d'entre eux mettent à disposition des personnes intéressées des versions de démonstration et certains des versions complètes simplement limitées dans le temps.

Logiciels	Sites internet
JMP	<a href="http://www.jmpdiscovery.com">http://www.jmpdiscovery.com</a>
Minitab	<a href="http://www.minitab.fr">http://www.minitab.fr</a>
Statistica	<a href="http://www.intesoft.com/produits/tech/statistica">http://www.intesoft.com/produits/tech/statistica</a>
Statgraphics	<a href="http://www.sigmaplus.fr">http://www.sigmaplus.fr</a>
Unscrambler	<a href="http://www.camo.no">http://www.camo.no</a>
Pirouette	<a href="http://www.infometrix.com">http://www.infometrix.com</a>
Modde	<a href="http://www.umetrics.com">http://www.umetrics.com</a>

**Tableau A.1: Principaux logiciels des plans d'expériences**

### A.1. Logiciel Minitab : [13]

Le logiciel Minitab est un logiciel de statistiques dans lequel une partie est consacrée aux plans d'expériences. Dans le présent travail, nous n'avons utilisé que la partie des plans d'expériences. La version 19 utilisée existe en plusieurs langues : anglais, français, etc.

Minitab aide les entreprises et les institutions à identifier les tendances, à résoudre les problèmes et à découvrir des informations précieuses sur les données en proposant une suite complète et de pointe d'outils d'analyse de données et d'amélioration des processus. Combiné à une facilité d'utilisation inégalée, Minitab simplifie plus que jamais l'obtention d'informations approfondies à partir des données.



**Figure A.1 : Icône du logiciel Minitab**

### A.2. Etapes réalisées sur Minitab

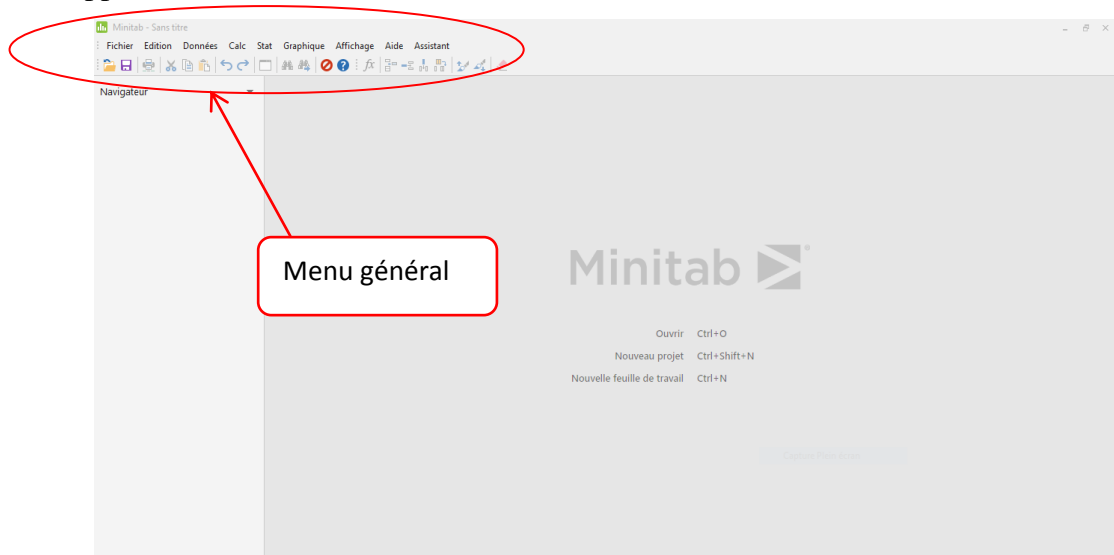
Pour arriver à établir un plan d'expériences, évaluer les coefficients du modèle mathématique et effectuer les différentes analyses sur le modèle choisi, les étapes nécessaires utilisées sur Minitab sont décrites par la suite :



**A.2.1. Première phase :** 6 étapes sont à considérer dans la première phase :

**A) Première étape : Accès au menu principal**

Une fois que vous avez double-cliqué sur l'icône Minitab de la figure A.1, une nouvelle fenêtre apparaîtra sur l'écran (figure A.2). Cette fenêtre va vous fournir la possibilité de créer une nouvelle application.



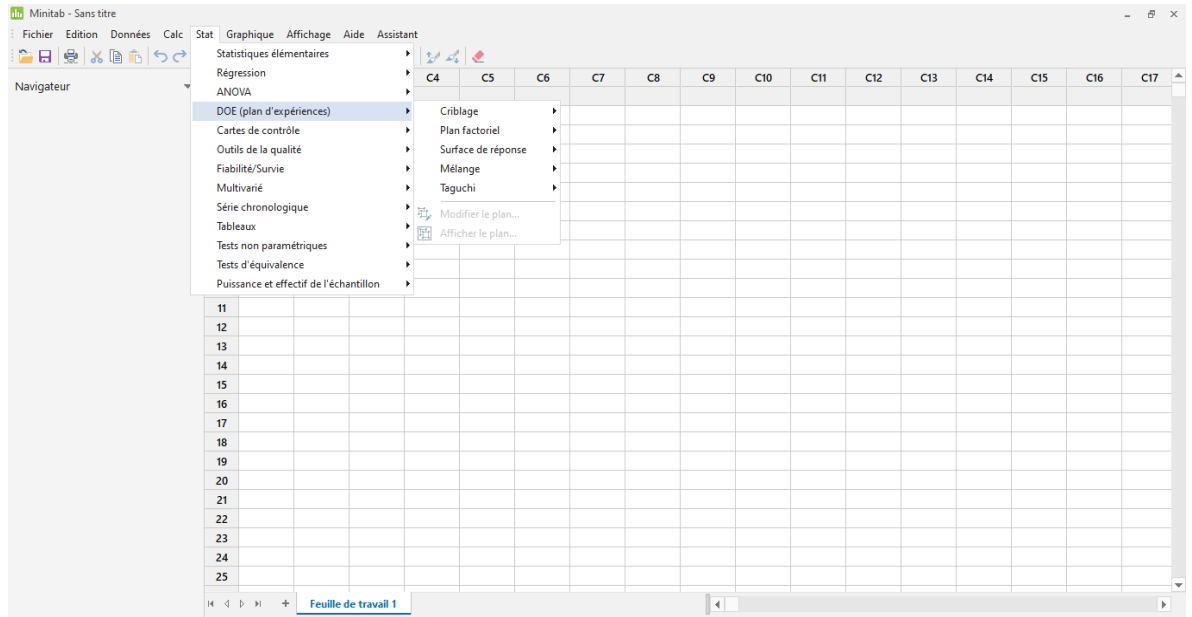
**Figure A.2 :** Fenêtre principale

**B) Deuxième étape : Accès aux plans d'expériences**

❖ Cliquez sur Stat du menu principal. Un menu déroulant apparaît dans lequel figure DOE (Plan d'expériences).

❖ Cliquez sur DOE (Plan d'expériences). Un nouveau menu apparaît (Figure A.3) dans lequel il y a quatre choix :

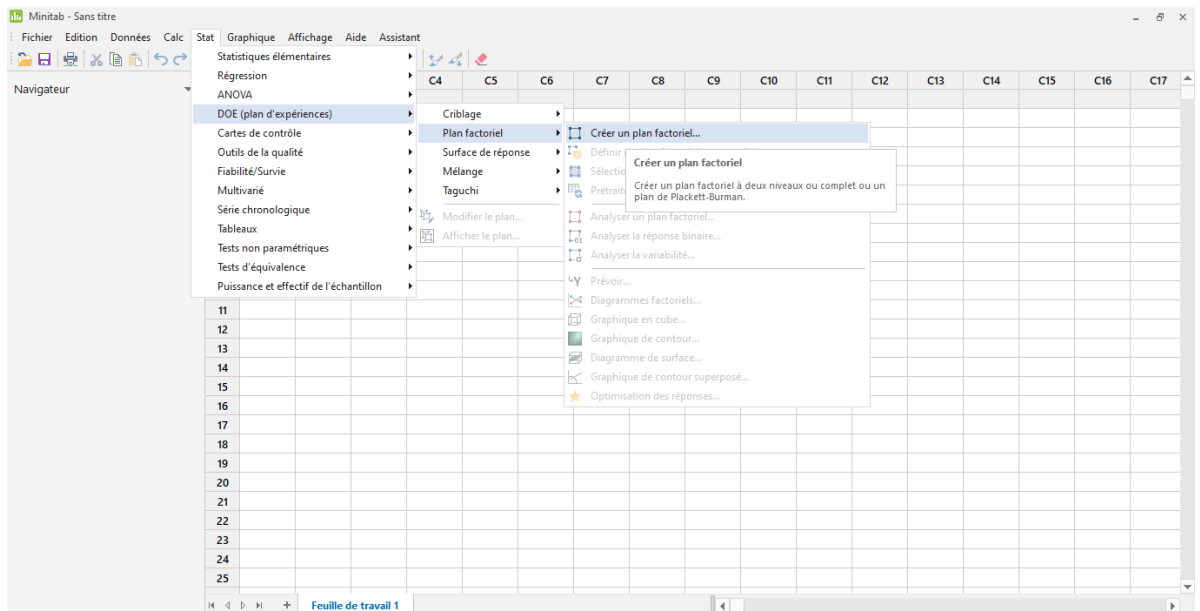
- ❖ Plan factoriel
- ❖ Surface de réponse
- ❖ Mélange
- ❖ Taguchi



**Figure A.3 :** Menus donnant accès aux plans d'expériences

### C) Troisième étape : Création d'un plan factoriel

Cliquez sur la rubrique plan factoriel. Il apparaît un menu dans lequel vous avez la possibilité de créer un plan factoriel (Figure A.4).



**Figure A.4 :** Menu permettant de créer un plan factoriel

### D) Quatrième étape : Création d'un plan factoriel complet

La fenêtre de la figure A.5, vous propose plusieurs types de plans (surtout à 2 niveaux). Cliquez sur créer un plan factoriel complet général pour choisir un plan à 3 niveaux. Choisir aussi le nombre de facteurs.

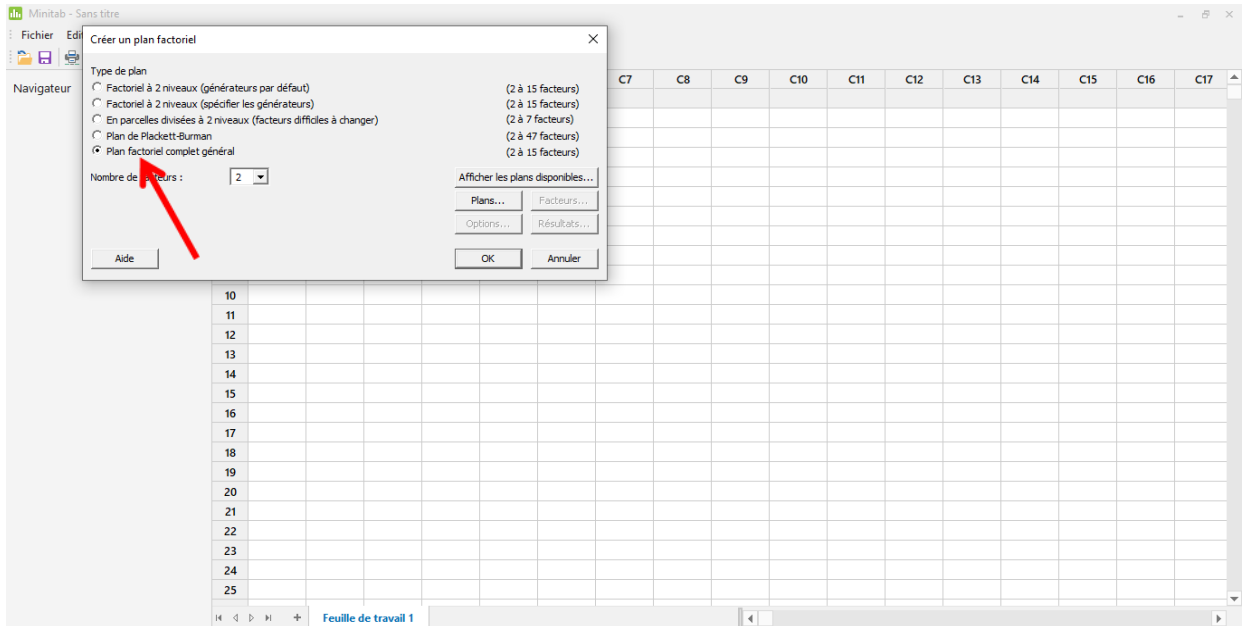


Figure A.5 : Fenêtre proposant plusieurs types de plans d'expériences

### E) Cinquième étape : Choix du nombre de niveaux et du nombre de répliques

Cliquer sur la rubrique plan. On peut nommer les facteurs et choisir le nombre de niveaux et de répliques, comme le montre la figure A.6.

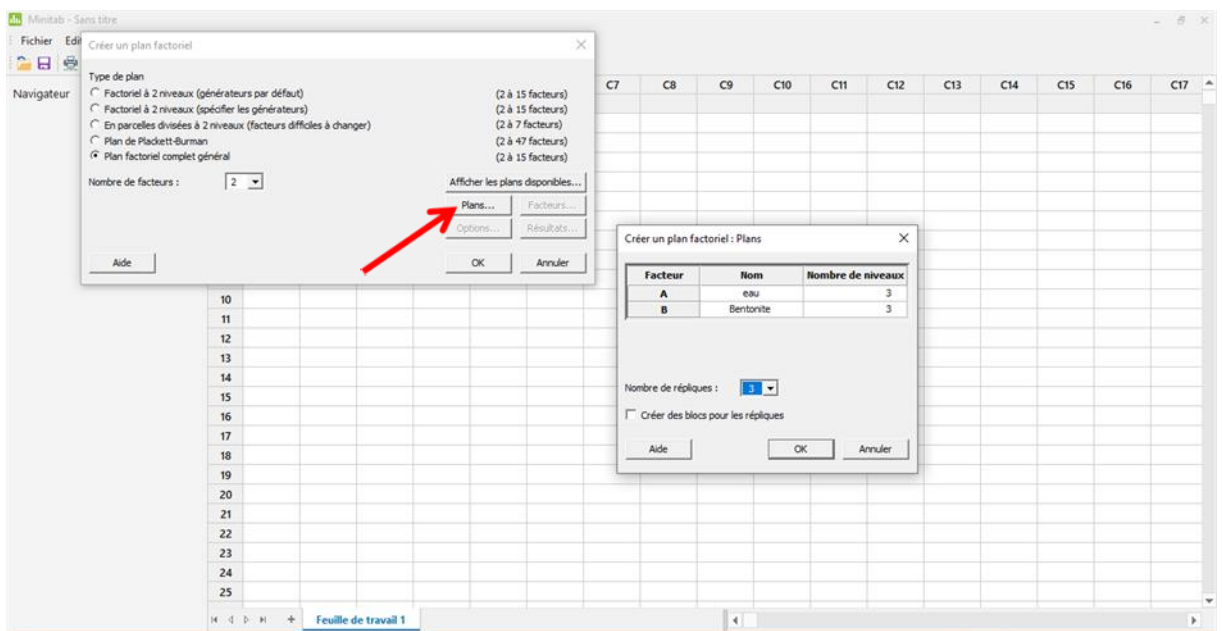
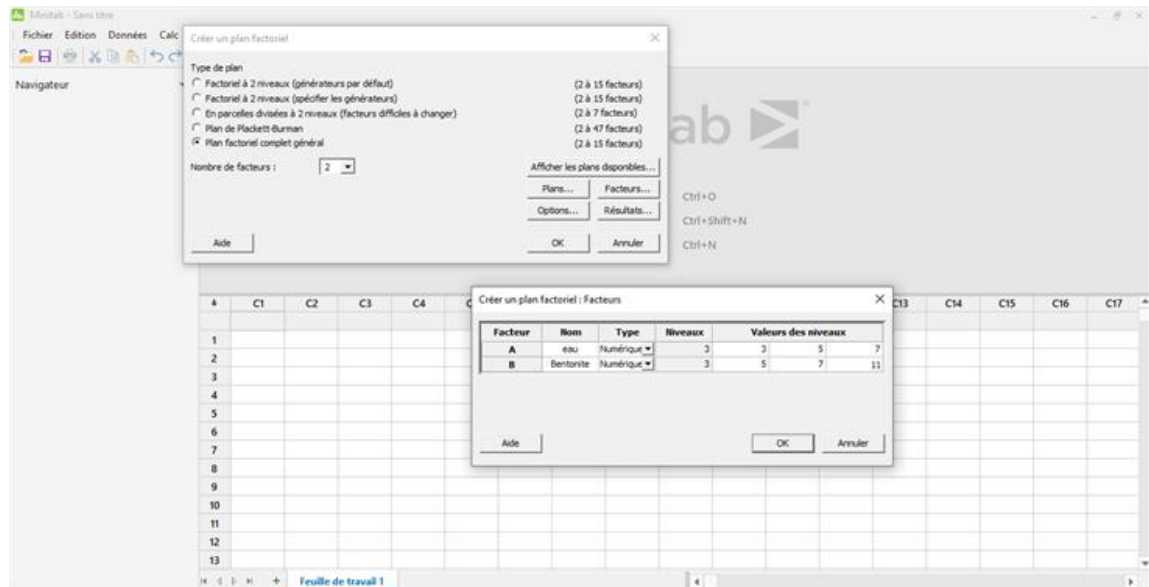


Figure A.6: Choix du nombre de niveaux et de répliques

### F) Sixième étape : Choix des valeurs des niveaux et types de facteurs

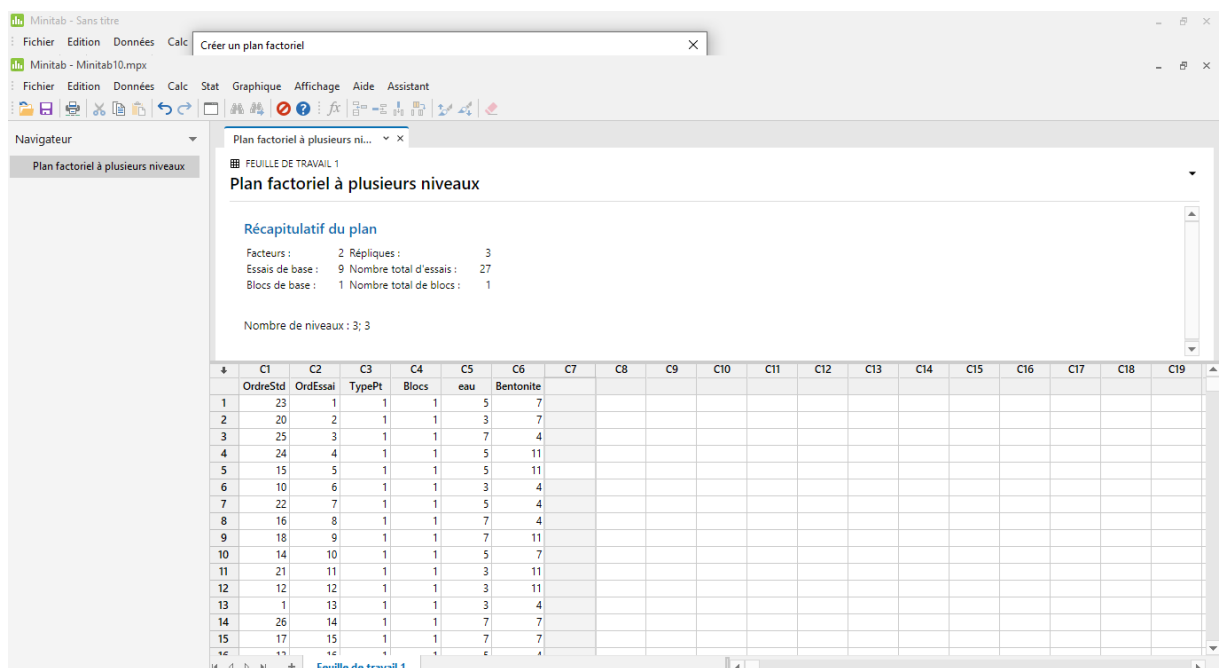
- Lorsque vous appliquez les choix précédents, vous revenez alors à la fenêtre créer un plan factoriel (Figure A.7) dans laquelle les trois boutons précédemment grisés sont maintenant accessibles : Facteurs, Options, Résultats.

- Cliquez sur le bouton Facteurs, vous obtenez la figure A.7 dans laquelle figurent les 2 facteurs avec leur nom, leur type, et leurs valeurs des niveaux.
- Vous pouvez modifier les noms des facteurs pour les adapter à votre étude. Vous pouvez aussi modifier le type des facteurs : numérique ou texte. Vous pouvez également modifier la valeur des niveaux.



**Figure A.7 :** Fenêtre permettant de remplir les valeurs des niveaux et choisir les types de facteurs

Lorsque vous validez l'étape précédente, vous obtenez la fenêtre de la figure A.8. Elle contient toutes les informations introduites dans les étapes antérieures.



**Figure A.8 :** Feuille de travail Minitab avec le plan choisi

La colonne C7 de la feuille de travail de la figure A.8 doit être remplie avec les données des essais de la réponse à traiter (Rco pour notre travail), tout en respectant l'ordre des essais indiqués sur les colonnes C5 et C6. L'ordre des essais est donné à la colonne C2. La figure A.9 permet de visualiser ces informations.

	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7	C8	C9	C10	C11	C12	C13	C14	C15	C16	C17	C18	C19
	OrdreStd	OrdEssai	TypePt	Blocs	eau	Bentonite	Rco												
1	23	1	1	1	5	7	0,280												
2	20	2	1	1	3	7	0,220												
3	25	3	1	1	7	4	0,515												
4	24	4	1	1	5	11	0,390												
5	15	5	1	1	5	11	0,400												
6	10	6	1	1	3	4	0,220												
7	22	7	1	1	5	4	0,450												
8	16	8	1	1	7	4	0,500												
9	18	9	1	1	7	11	0,425												
10	14	10	1	1	5	11	0,340												
11	21	11	1	1	3	11	0,300												
12	12	12	1	1	3	11	0,310												
13	1	13	1	1	3	4	0,200												
14	26	14	1	1	7	7	0,415												
15	17	15	1	1	7	11	0,425												
16	13	16	1	1	5	11	0,410												
17	11	17	1	1	3	11	0,210												
18	3	18	1	1	3	11	0,305												
19	19	19	1	1	3	11	0,210												
20	2	20	1	1	3	11	0,220												
21	8	21	1	1	7	11	0,410												
22	27	22	1	1	7	11	0,420												
23	4	23	1	1	5	11	0,430												
24	5	24	1	1	5	11	0,320												
25	6	25	1	1	5	11	0,395												
26	9	26	1	1	7	11	0,425												
27	7	27	1	1	7	11	0,510												
28																			
29																			
30																			

Figure A.9 : Ordre des essais de Rco

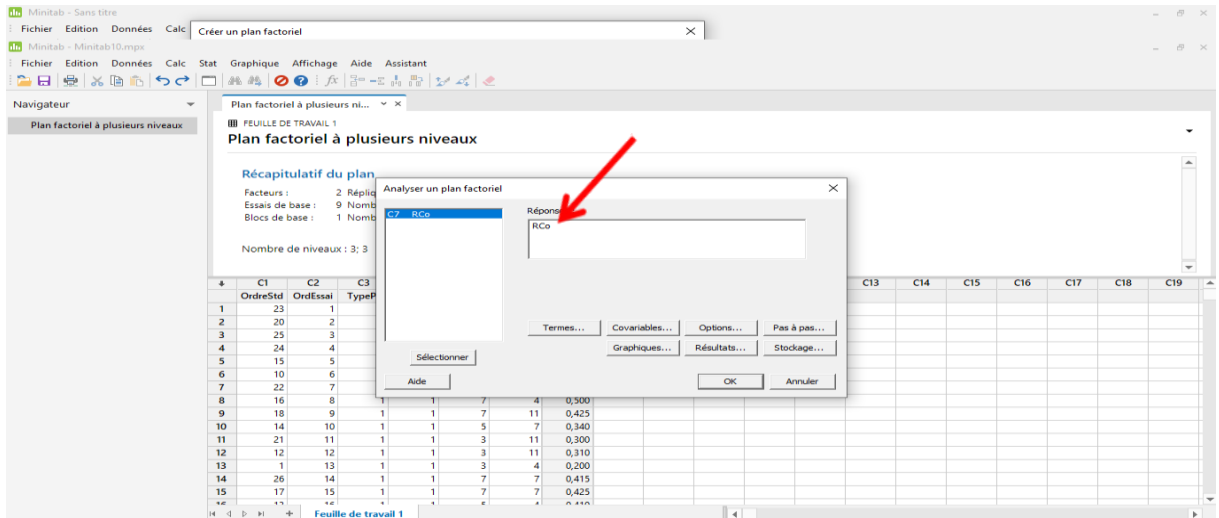
**A.2.2. Deuxième Phase :** La feuille de travail étant prête, cette phase est utilisée pour analyser le plan factoriel choisi, elle comporte deux étapes essentielles.

### A) Première étape : Choix des termes du modèle mathématique

➤ Cliquez sur Stat du menu principal, vous obtenez un menu déroulant dans lequel vous choisissez un plan factoriel. Puis définir analyser plan factoriel. La fenêtre de la Figure A.10 apparaît.

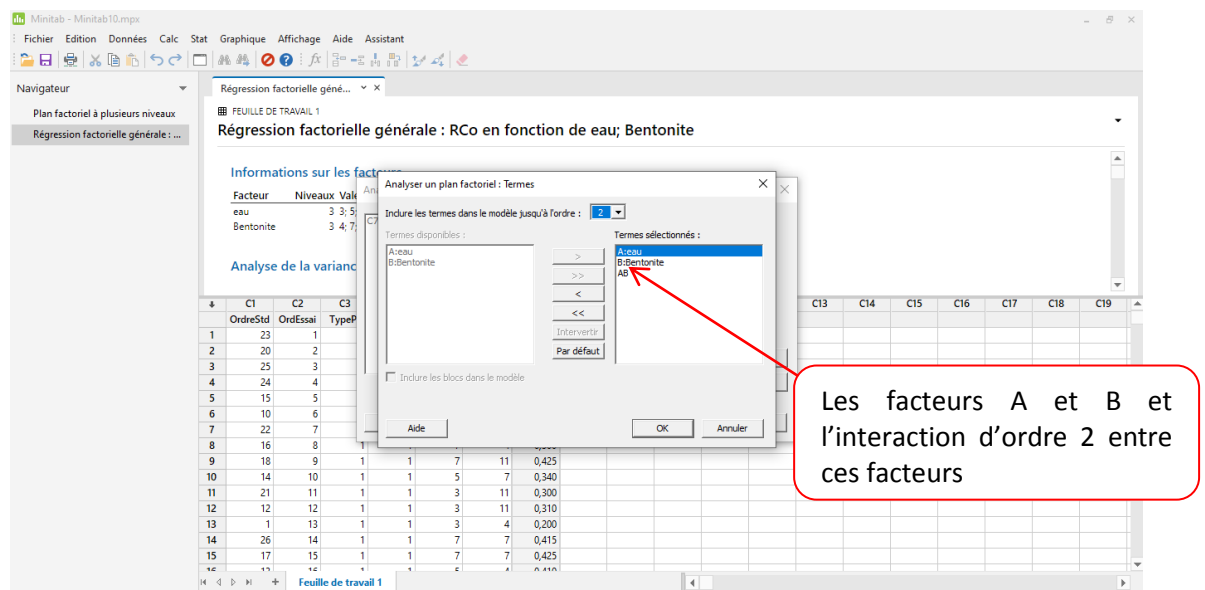
Figure A.10 : Menus déroulants permettant de lancer l'analyse du plan d'expériences

➤ Dans la fenêtre analyser un plan factoriel vous devez choisir la réponse à analyser. Pour cela, vous surlignez C7 Rco et vous cliquez sur le bouton graphique (figure A.11).



**Figure A.11 :** Fenêtre permettant de préciser les modalités de l'analyse

➤ Vous cliquez sur le bouton termes pour vérifier que les deux facteurs et l'interaction entre eux sont sélectionnés (figure A.12).

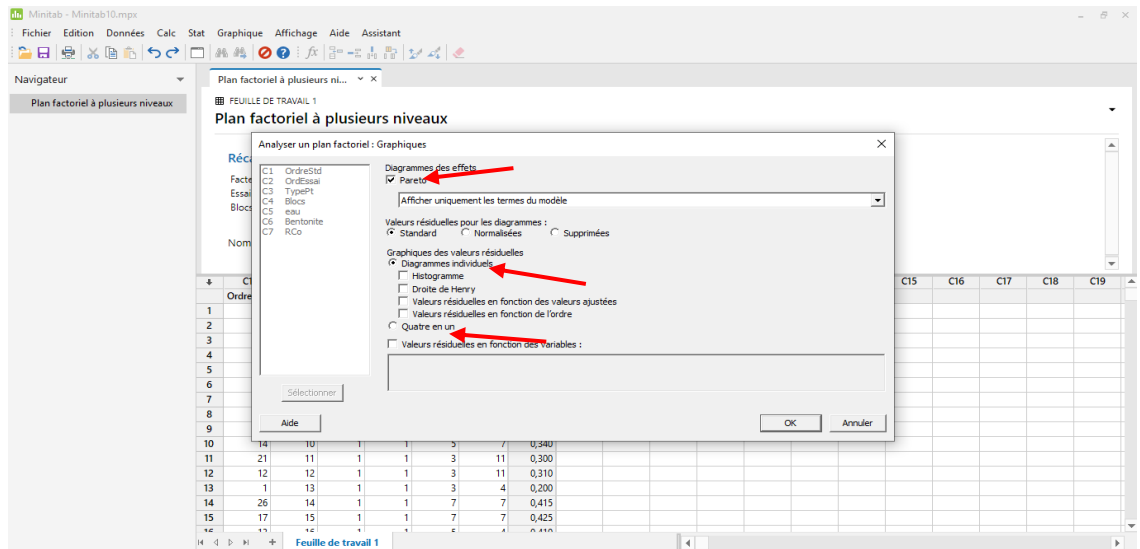


**Figure A.12:** Fenêtre permettant de choisir les termes du modèle mathématique

➤ Cliquez sur le bouton OK quand vous avez défini le modèle mathématique. Cette fenêtre disparaît.

## B) Deuxième étape : Choix des graphiques à tracer

- Lorsque vous appliquez le choix précédent, vous revenez alors à la fenêtre de figure A.11.
- Cliquez sur le bouton graphique.
- Pour avoir le diagramme des effets de Pareto on laisse le choix par défaut (Figure A.13)



**Figure A.13 :** Fenêtre permettant de choisir le diagramme des effets de Pareto les graphiques des valeurs résiduelles

- Cliquez sur le bouton OK.
- Pour avoir le graphique des valeurs résiduelles, vous revenez alors la fenêtre de la figure A.11 et cliquez sur le bouton graphique.
- Découchez le diagramme des effets de Pareto et utiliser le graphique des valeurs résiduelles chacun seul ou les quatre en un (figure A.13). Cliquez OK.

**A.2.3. Troisième phase :** Cette phase permet de tracer le diagramme factoriel des effets principaux et des interactions.

#### A) Première étape :

Pour avoir le diagramme factoriel des effets principaux, il faut revenir au menu principal, cliquez sur Stat, puis sur DOE (Plan d'expériences), sur plan factoriel et enfin diagramme factoriel, comme sur la fenêtre de la figure A.14.

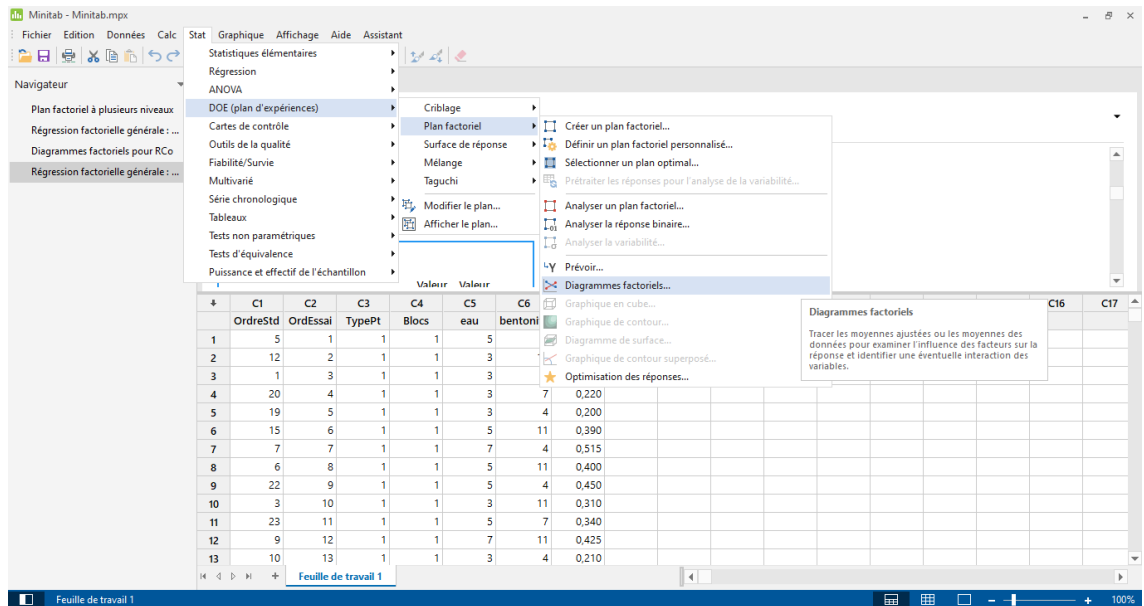


Figure A.14 : Menu permettant d'avoir un diagramme factoriel

## B) Deuxième étape

- ❖ Cliquez sur graphique.
- ❖ Laissez les choix par défaut figure A.15. Cliquez sur OK.

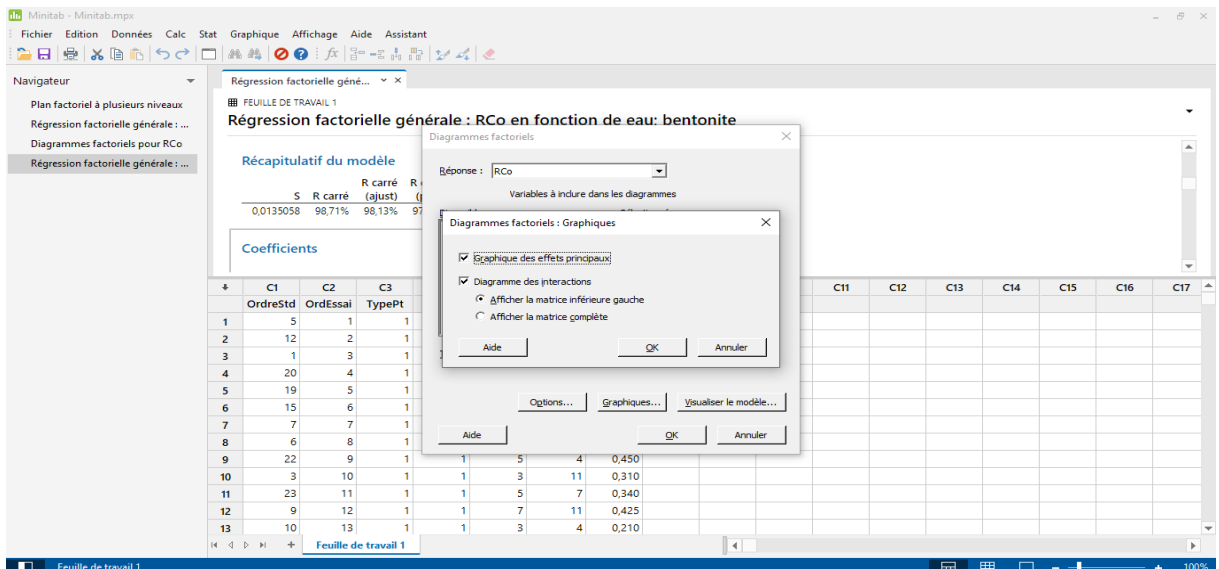
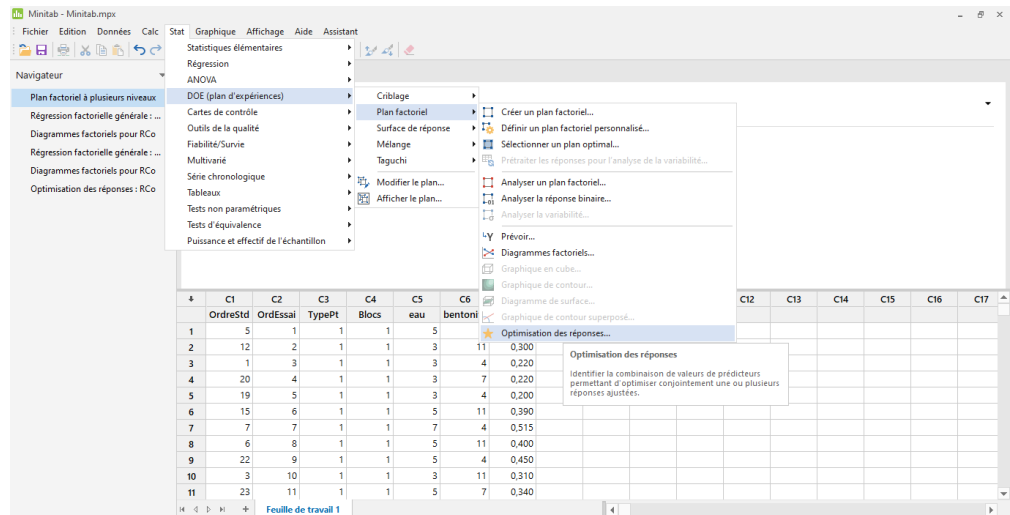


Figure A.15 : Fenêtre permettant d'avoir les effets principaux et les interactions

### A.2.4. Quatrième phase : Optimisation des réponses

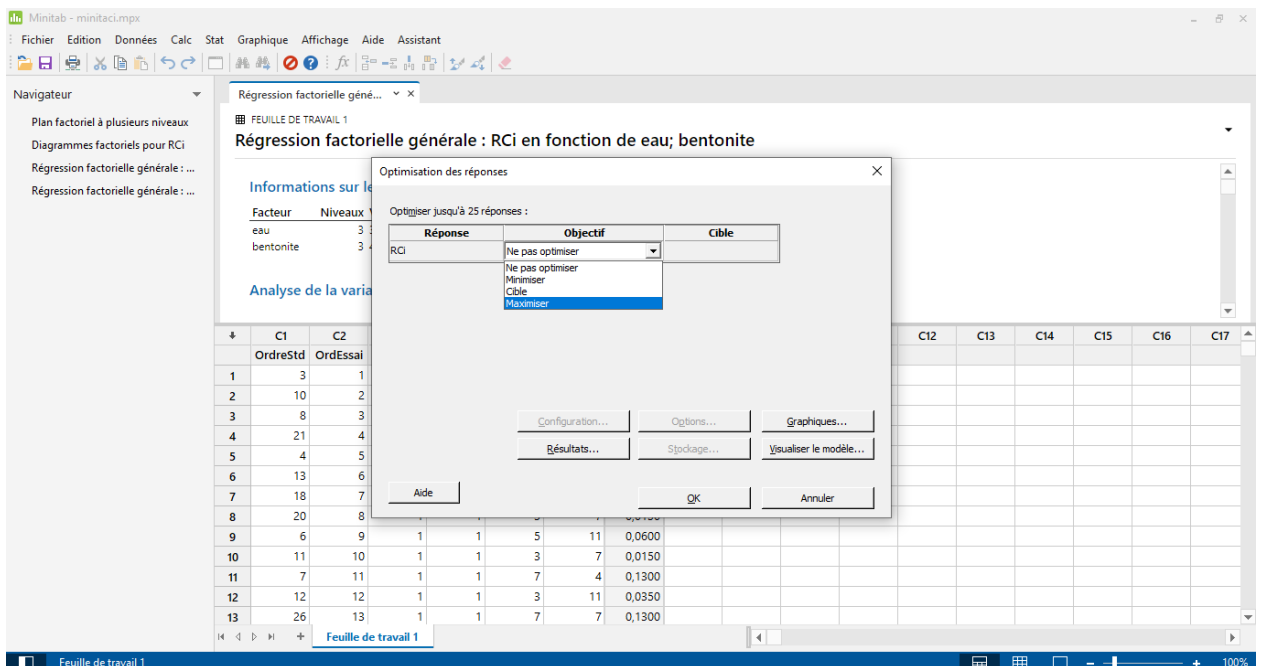
- ❖ Pour pouvoir optimiser les réponses obtenues lors des étapes précédentes, vous revenez au menu principal, cliquez sur Stat, puis sur DOE (Plan d'expériences).
- ❖ Un nouveau menu apparaît (figure A.16) dans lequel on choisit le plan factoriel et enfin optimisation des réponses.





**Figure A.16 :** Menu permettant d'optimiser les réponses

- ❖ Pour chercher une solution optimale, vous sélectionnez l'objectif maximisé  
Comme le montre la figure A.17.



**Figure A.17:** Fenêtre fixant la valeur maximiser

- ❖ Cliquez sur le bouton Configuration. Vous obtenez une nouvelle fenêtre où il faut remplir les valeurs minimale et de la cible. Cliquez sur OK (Figure A.18).

**Régression factorielle générale : RCo en fonction de eau: bentonite**  
Optimisation des réponses : Configuration

Réponse	Objectif	Inférieur	Cible	Supérieur	Pondération	Importance
RCo	Maximiser	0,2	0,515	0,515	1	1

Fonctions de désirabilité pour différents objectifs : Comment les pondérations agissent sur leurs formes

Minimiser la réponse      Atteindre une valeur cible      Maximiser la réponse

Weight 0,1      Weight 0,1      Weight 0,1

Target Upper      Lower Target Upper      Lower Target

Aide      OK      Annuler

	6	9	1	1	5	11	0,390
10	11	10	1	1	3	7	0,210
11	7	11	1	1	7	4	0,515
12	12	12	1	1	3	11	0,305
13	26	13	1	1	7	7	0,425

Figure A.18 : Fenêtre permettant de définir les bornes de la cible

### Références bibliographiques :

1. Sahraoui. Aissat, « Amélioration des propriétés mécaniques des boulets de broyages », mémoire de magister Université de Chleff 2000.
2. Ben yettou Riad, Bennouioua Abla, « réalisation d'un broyeur de malaxeur M 55-C0199/B par moulage au sable », mémoire de master de université Mohamed Boudiaf –M'silla, 2020.
3. GHAZI BRAHIM, MEDJADI ABDELKRIM, « Analyse des défauts de fonderie par la méthode de Pareto et le diagramme ABC, » mémoire de master université de Tiaret, 2021.
4. AHEB FARES & MAHDJOUR OUMESAAD, « modélisation de conception de mélange pour évaluer l'effet de la nature de sable sur les propriétés physico mécanique de béton », mémoire de master Université Ziane Achour – Djelfa, 2017.
5. BOUKHOULEF Hamida, « Traitement des margines des huileries d'olive par les procédés d'oxydation avancée basés sur le système Fenton-like (H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>/Cu) », université MOULOUD MAMMERI, TIZI-OUZOU, 2014.
6. Jacques Goupy INTRODUCTION AUX PLANS D'EXPÉRIENCES Avec applications 5e édition, 2005.
7. Goupy Jacques, Les plans d'expériences, Revue modulad, 34, 2006.
8. G. Allaire et J. Garnier, plans d'expérience, construction et analyse statique 2002.
9. Philippe TRIBOULET (Lycée Niepce – Chalon sur Saône) 09/09/2008.
10. Claude HOINARD, Faculté des Sciences Pharmaceutiques de Tours, mai 2009.
11. RABTA Boualem, BARECHE Aïcha, « Les plans d'expériences », Université A/Mira de Bejaia, 2001.
12. BOUDJENIBA-BOUZAOUIT Nadia, Etude par simulations numériques de la réactivité dans la réaction d'acylation enzymatique de substrats osidiques, mémoire de master, université de, BADJI MOKHTAR-ANNABA, 2012.
13. Assistance Minitab 19 - Minitab.

## Résumé :

L'une des priorités de la fonderie est de préparer d'abord le sable et de savoir comment celui-ci et les ajouts affectent la pièce.

À travers cette étude, nous avons voulu prononcer sur l'influence de l'eau et de la bentonite sur la résistance à la compression et au cisaillement du sable de moulage à vert en utilisant la méthode des plans d'expériences.

Cette méthode, nous a permis en premier lieu, de déterminer les facteurs influents ces propriétés et par la suite, de les modéliser et de les optimiser.

L'analyse des résultats obtenus, nous permis de conclure qu'une haute résistance évite tout problème de défauts apparents ou cachés liés au sable de moulage.

**Mots clés :** Sable de moulage, bentonite, eau, résistance au cisaillement, résistance à la compression, plans d'expériences, défauts de moulage.

## Abstract:

One of the priorities of the foundry is to prepare the sand first and to know how it and the additions affect the part.

Through this study, we wanted to pronounce on the influence of water and bentonite on the compressive and shear strength of green sand casting using the design of experiments method.

This method first allowed us to determine the factors influencing these properties and then to model and optimize them.

The analysis of the results obtained, allowed us to conclude that a high resistance avoids any problem of apparent or hidden defects related to the molding sand.

**Keywords:** Molding sand, bentonite, water, shear strength, compressive strength, experimental plans, molding defects.

**ملخص :** من أولويات المسبك تحضير الرمل أولاً ومعرفة كيفية تأثيره والإضافات على الجزء.

من خلال هذه الدراسة، أردنا أن نتحدث عن تأثير الماء والبنتونيت على مقاومة الانضغاط وقوة القص لرمل القولية الرطب باستخدام طريقة تصميم التجارب.

سمحت لنا هذه الطريقة أولاً بتحديد العوامل التي تؤثر على هذه الخصائص ثم نمذجتها وتحسينها.

سمح لنا تحليل النتائج التي تم الحصول عليها باستنتاج أن المقاومة العالية تتجنب أي مشكلة من العيوب المرئية أو الخفية المتعلقة برمل القولية.

**الكلمات المفتاحية:** رمل القولية ، البنتونيت ، الماء ، مقاومة القص ، مقاومة الانضغاط ، الخطط التجريبية ، عيوب الصب.