

Modélisation et optimisation par les plans d'expériences de la trempabilité des boulets de broyage

Sahraoui AISSAT^{1*}, Hamid SADEDDINE²

¹ Laboratoire de Recherche des Technologies Industrielles / Faculté des sciences appliquées Université Ibn Khaldoun – Tiaret / B.P. 78 – 14000 Tiaret / Algérie

² Laboratoire de Technologie des Matériaux et Génie des Procédés / Faculté de Technologie. Université A. MIRA – Bejaia / 06000 Bejaia / Algérie

E-mail : sh_aissat@yahoo.fr

Résumé. Les boulets de broyage ou de concassage sont des éléments de broyeurs utilisés dans les cimenteries ; ils exigent une résistance à l'usure élevée sous l'action de produits abrasifs lors de la transformation de la roche en fines de taille inférieure au millimètre.

Les traitements thermiques constituent une étape essentielle pour l'élaboration du boulet. Ils permettent d'obtenir des duretés et une résistance à l'usure convenables.

Nous avons réalisé des traitements thermiques, en prenant en considération certains facteurs influençant ces traitements afin d'obtenir la structure favorable pour ce type d'étude.

Les facteurs considérés dans le présent travail sont : la température de trempe (950 °C et 1050 °C), la sévérité du milieu de trempe (refroidissement à l'air soufflé et à l'huile) et le diamètre des boulets (boulets de diamètre 50 et 70).

L'utilisation du logiciel STATISTICA nous a permis de choisir la méthode des plans d'expériences (MPE) et en particulier les plans factoriels complets à deux niveaux pour repérer dans un premier temps parmi les facteurs considérés et leurs interactions les plus influents sur la trempabilité des boulets de broyage.

Un modèle mathématique reliant la réponse aux effets principaux et aux interactions retenues est obtenu dans ce travail en utilisant ce même logiciel.

Mots clés : Modélisation, optimisation, plans d'expériences (PE), boulet de broyage, trempabilité, dureté.

1. Introduction

Les boulets de broyage ou de concassage constituent la pièce essentielle du broyeur. Ils sont réalisés en fonte blanche alliée, élaborée dans des fours à induction à hautes fréquences à 1600°C et coulée dans des moules en sable à vert avec différents diamètres [1, 2].

Ces boulets sont employés pour le broyage de la roche généralement dans des broyeurs à deux chambres (chambre de concassage et chambre de finition). Ces dernières sont séparées par une cloison permettant le passage d'une certaine granulométrie (figure 1).

L'application correcte des traitements thermiques aux fontes et en particulier les fontes blanches alliées permet d'étendre leur gamme de structures et l'exploitation totale de leurs caractéristiques mécaniques. Donc l'extension de l'utilisation de ces matériaux dans des applications pour lesquelles les fontes non traitées ne sont pas satisfaisantes. Ainsi, est d'une manière générale, la résistance à l'usure s'améliore lorsque la dureté augmente et une fonte de grande dureté résiste mieux à l'usure avec moins de risque de se gripper en présence de particules abrasives car elle s'oppose à leur pénétration dans sa couche superficielle [4, 5, 6].

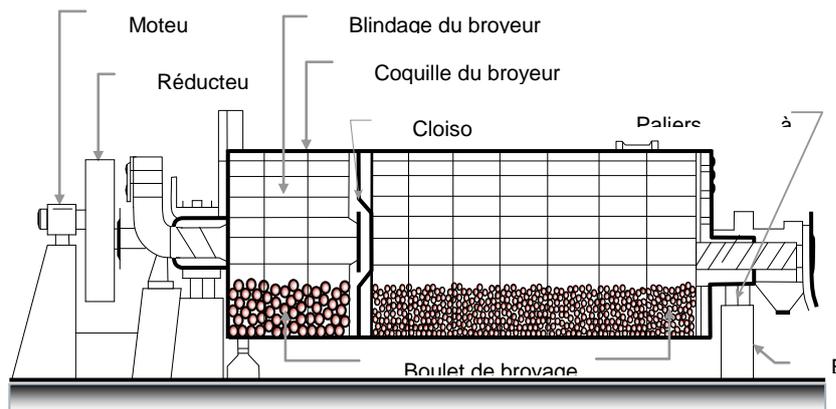


Figure 1 : Principe du broyage [3]

Dans ce travail, nous présentons tout d'abord les résultats de la variation de la dureté HRC mesurée de la surface jusqu'au cœur des boulets (distance de la surface en mm) en fonction de la température de trempe, de la sévérité du milieu de trempe et du diamètre des boulets.

Nous déterminons, ensuite les facteurs les plus influents sur la trempabilité des boulets de broyage en exploitant les courbes de la dureté HRC obtenues.

Un modèle mathématique reliant la réponse (trempabilité des boulets de broyage) aux effets principaux et aux interactions retenues est proposé dans ce modeste travail.

2. Procédure expérimentale

2.1. Matériau utilisé

Nous avons choisi des boulets de diamètre 50 et des boulets de diamètre 70 procurés de l'Algérienne des fonderies de Tiaret (ALFET) / Algérie à l'état brut de coulée pour la réalisation de nos travaux. Ils sont analysés avant d'entreprendre les essais.

Le tableau 1 fait apparaître les résultats des compositions chimiques des alliages étudiés, obtenues au cours de fusions différentes.

5.1. Tableau 1 : Compositions chimiques des alliages étudiés

Diamètre	C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	Ni	Cu
Ø 50	2.5 - 2.87	0.27 - 0.48	0.32 - 0.6	0.056 - 0.063	0.036 - 0.08	11.5 - 13	0.1 - 1.0	0.11 - 0.2	0.06 - 0.13
Ø 70	2.5 - 2.86	0.46 - 0.56	0.48 - 0.55	0.06 - 0.076	0.06 - 0.086	13.0 - 14.0	0.42 - 0.53	0.29 - 0.33	0.12 - 0.2

2.2. Essais réalisés

2.2.1. Traitements thermiques

Les traitements thermiques ont été réalisés dans un four à chambre (ou un moufle), chauffé par des tiges en Carborundum placées sur toute la longueur de sa partie supérieure et qui fournissent une température nominale de 1350°C [1, 2].

Les températures de trempes étaient fixées à 950 °C et 1050 °C. Le but de ces traitements est double. Ils permettent dans un premier lieu d'étudier l'influence de l'effet de masse (trempabilité) sur la dureté des boulets de broyage, d'une part, et, d'autre part, d'étudier les répercussions de la taille des boulets sur l'effet de masse.

Les boulets traités étaient refroidis à l'air soufflé et dans l'huile utilisée à la température ambiante.

2.2.2. Essais de dureté

Les mesures de dureté Rockwell HRC, réalisées dans ce travail, sont effectuées sur des boulets de diamètre 50 et 70 mm traités en partant de la surface extérieure jusqu'au cœur et ceci par une diminution progressive de l'épaisseur du boulet.

Ces essais étaient effectués à l'aide d'un duromètre du type HP250 du laboratoire des essais mécaniques d'ALFET, il est doté d'un pénétrateur conique constitué par un diamant. Ce cône ayant un angle au sommet de 120° est arrondi à son sommet (R = 0.2 mm) [1, 2].

3. Résultats expérimentaux

3.1. Influence de la température de trempes

L'effet de masse (trempabilité) qui se traduit par une diminution de la dureté de la surface des boulets vers le cœur est estimé en fonction de la température de trempes pour les boulets de diamètre 50 trempés à l'air soufflé et dans l'huile (figure 2 et 3). Les figures 4 et 5 présentent la variation de la dureté HRC en fonction de la température de trempes pour les boulets de diamètre 70 trempés à l'air soufflé et dans l'huile [7].

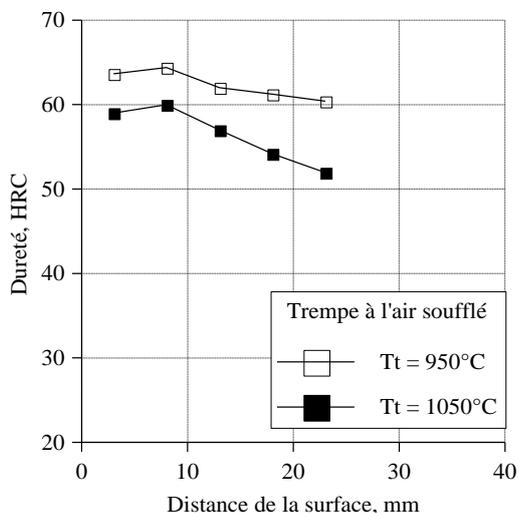


Figure 2 : Variation de la dureté HRC des boulets de diamètre 50 en fonction de la température de trempes

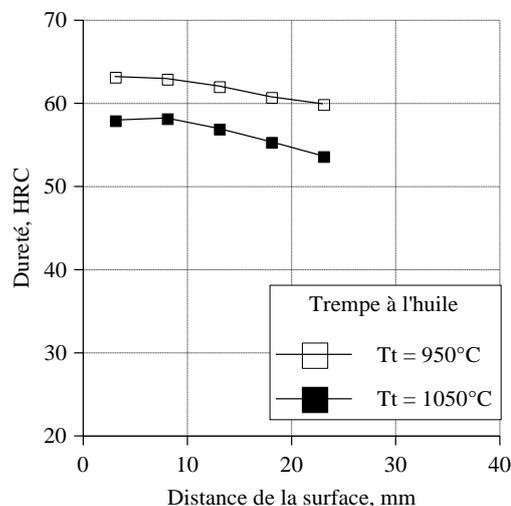


Figure 3 : Variation de la dureté HRC des boulets de diamètre 50 en fonction de la température de trempes

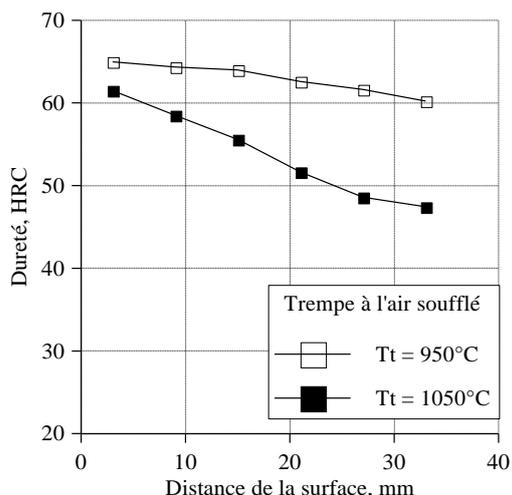


Figure 4 : Variation de la dureté HRC des boulets de diamètre 70 en fonction de la température de trempe

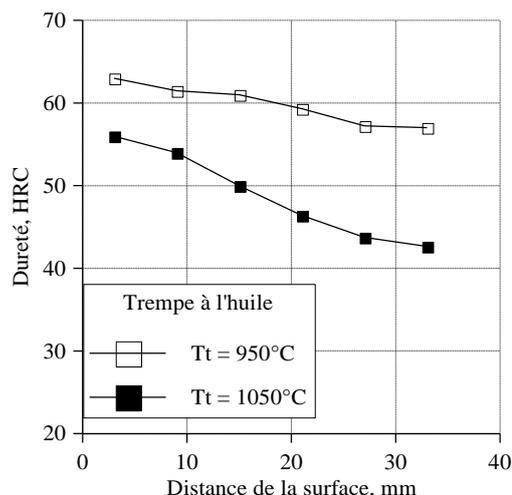


Figure 5 : Variation de la dureté HRC des boulets de diamètre 70 en fonction de la température de trempe

L'écart de dureté entre la surface et le cœur des boulets de diamètre 50 et 70 chauffés à 1050 °C et refroidis à l'air soufflé et dans l'huile est plus important que celui des boulets de diamètre 50 et 70 chauffés à 950 °C et refroidis à l'air soufflé et dans l'huile.

3.2. Influence de la sévérité du milieu de trempe

Les résultats qui mettent en évidence l'influence de la sévérité du milieu de trempe sur la variation de la dureté de la surface vers le cœur des boulets de diamètre 50 et 70 sont représentés sur les figures 6, 7, 8, et 9 [7].

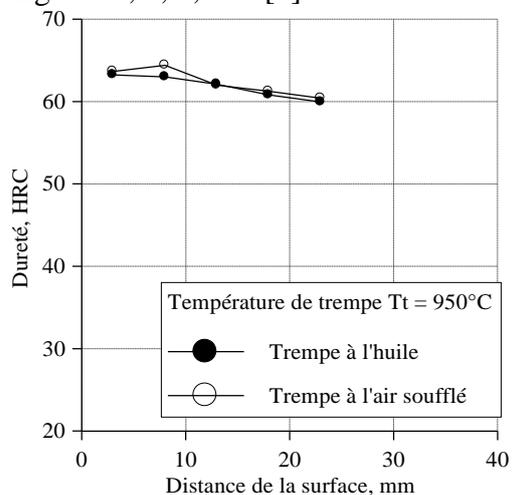


Figure 6 : Mise en évidence de la sévérité du milieu de trempe pour les boulets de diamètre 50

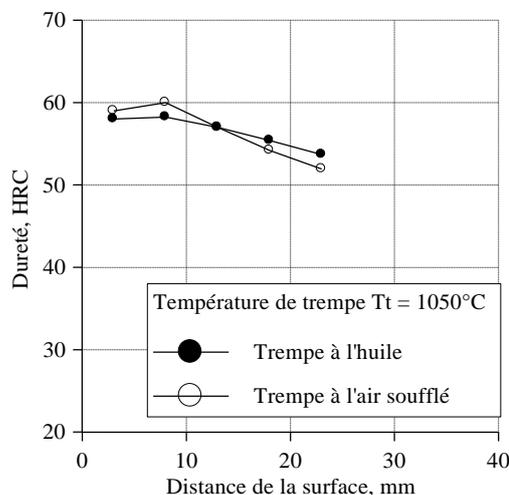


Figure 7 : Mise en évidence de la sévérité du milieu de trempe pour les boulets de diamètre 50

On remarque que les trempes à l'air soufflé et dans l'huile des boulets de diamètre 50 chauffés à 950°C n'apportent pas de modifications importantes dans les duretés entre la surface et le cœur. Par contre, les boulets chauffés à 1050°C trempés à l'air soufflé et dans l'huile voient leur dureté chutée entre la surface et le cœur.

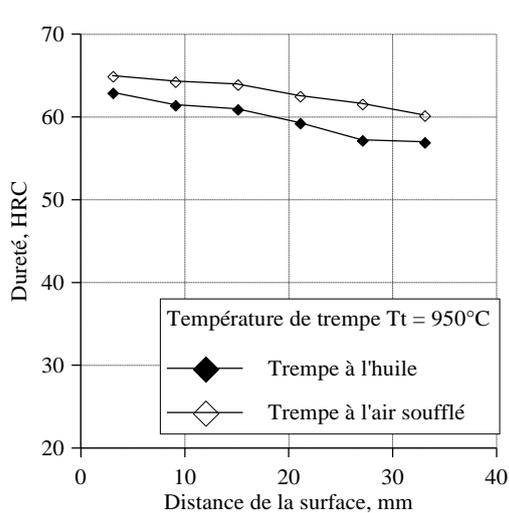


Figure 8 : Mise en évidence de la sévérité du milieu de trempe pour les boulets de diamètre 70

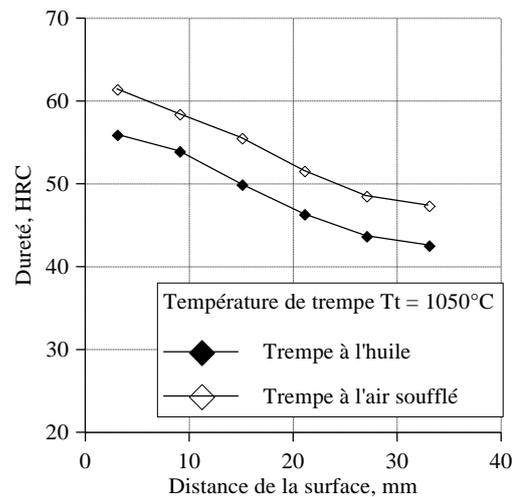


Figure 9 : Mise en évidence de la sévérité du milieu de trempe pour les boulets de diamètre 70

Les boulets de diamètre 70 chauffés à 950°C, trempés à l'air soufflé et dans l'huile représentent les moindres écarts de dureté entre la surface et le cœur. Ceux chauffés à 1050°C, trempés à l'air soufflé et dans l'huile représentent des variations très importantes en dureté entre la surface et le cœur.

3.3. Influence de la taille des boulets

Les figures 10 et 11 se rapportent à des comparaisons des duretés HRC effectuées sur les boulets de diamètres 50 et 70 et trempés à l'air soufflé. Les résultats concernant les boulets trempés dans l'huile font l'objet des figures 12, et 13 [7].

L'aptitude à prendre la trempe ou à durcir en profondeur des boulets de diamètre 50 et 70 traités à 950°C et trempés à l'air soufflé et dans l'huile est plus grande, suite aux valeurs des duretés prélevées, qui restent excellentes entre la surface et le cœur.

En revanche, les boulets de diamètre 50 chauffés à 1050°C et trempés à l'air soufflé et dans l'huile ont des écarts de duretés plus élevés de la surface vers le cœur. Ces écarts deviennent plus prononcés pour les boulets de diamètre 70, qui représentent une faible trempabilité.

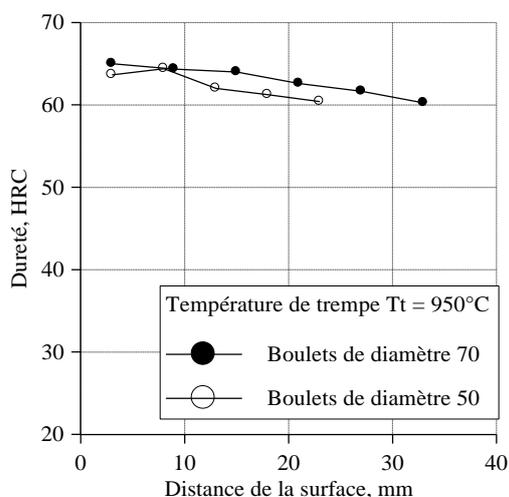


Figure 10 : Comparaison des duretés des boulets trempés à l'air soufflé

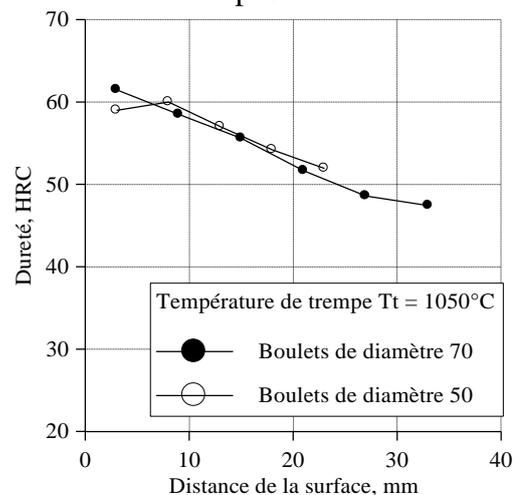


Figure 11 : Comparaison des duretés des boulets trempés à l'air soufflé

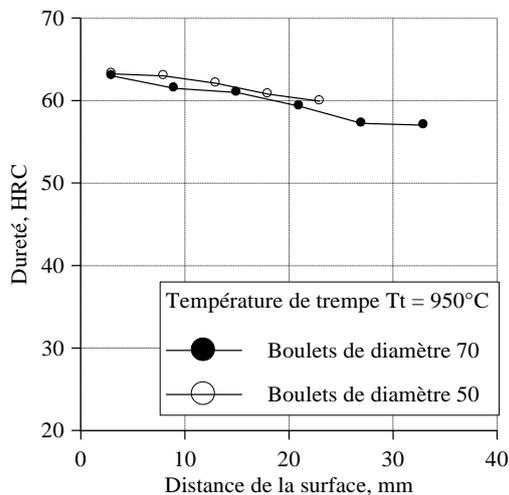


Figure 12 : Comparaison des duretés des boulets trempés dans l'huile

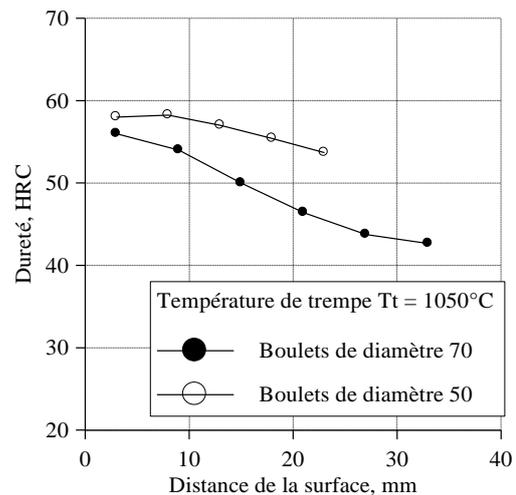


Figure 13 : Comparaison des duretés des boulets trempés dans l'huile

Ainsi, les écarts des duretés dans les boulets de diamètre 50 et 70 traités à 950°C et trempés à l'air soufflé et dans l'huile sont faibles et la transformation martensitique est à peu près uniforme dans toute la masse (figures 10 et 12).

Une augmentation de la taille des boulets cause la dégradation de la trempabilité de ces boulets (figures 11, 13), surtout ceux de diamètre 70 chauffés à 1050 °C.

4. Analyse des résultats

4.1. Plan d'expériences (DOE) adopté

Les facteurs considérés dans ce travail et qui peuvent influencés l'écart de dureté (réponse) entre la surface et le cœur des boulets sont représentés dans le tableau 2. Le plan que nous construisons constitue 8 essais sans répétition. C'est un plan de 3 facteurs à deux niveaux [8, 9, 10].

5.2. Tableau 2 : Facteurs et modalités considérées dans ce travail

Facteurs	Niveaux ou modalités	Valeurs
Température de trempe (F1)	-1	950 °C
	1	1050 °C
Sévérité du milieu de trempe (F2) (vitesse de refroidissement)	-1	Air soufflé
	1	Huile
Diamètre des boulets de broyage (F3)	-1	50
	1	70
Réponse : Ecart de dureté entre la surface et le cœur des boulets de broyage		

4.2. Valeurs des réponses

Les résultats expérimentaux exprimant l'écart de dureté entre la surface et le cœur du boulet sont représentés sur le tableau 3.

Tableau 3 : Résultats expérimentaux

Expérience	F1	F2	F3	Réponse y
1	-1	-1	-1	3,24
2	1	-1	-1	7,05
3	-1	1	-1	3,3
4	1	1	-1	4,3
5	-1	-1	1	4,75
6	1	-1	1	14,07
7	-1	1	1	5,98
8	1	1	1	13,35

4.3. Facteurs influents sur la trempabilité

La décomposition de la variabilité totale selon les différentes sources présentes dans les données [11] est réalisée par une analyse de la variance présentée dans le tableau 4.

Tableau 4 : Analyse de variance (ANOVA) des facteurs et des interactions

Facteurs et interactions	Somme des carrés	Degré de liberté	Moyenne des carrés	F	P (P < 0,05)	Terme du modèle
(1)Température de trempage	57,7812	1	57,78125	625,0000	0,025451	Signifiant
(2)Sévérité du milieu de trempage	0,5940	1	0,59405	6,4256	0,239211	Insignifiant
(3)Diamètre des boulets	51,3085	1	51,30845	554,9859	0,027007	Signifiant
1 by 2	2,8322	1	2,83220	30,6349	0,113792	Insignifiant
1 by 3	17,6418	1	17,64180	190,8253	0,046005	Signifiant
2 by 3	1,2800	1	1,28000	13,8453	0,167142	Insignifiant
Erreur	0,0925	1	0,09245			
Total	131,5302	7				

Les effets apparaissant les plus importants sont ceux du premier facteur (température de trempage), du troisième facteur (diamètre des boulets) et l'interaction entre ces deux facteurs 13. L'influence du deuxième facteur et des interactions entre les facteurs 12, et 23 restent modérées. L'interaction 123 est totalement omise devant les interactions 12, 13, et 23.

4.4. Modèle de la trempabilité des boulets de broyage

Le modèle complet de l'écart de dureté en fonction de l'ensemble des facteurs et des interactions est donné par l'expression :

$$y = E_H = b_0 + b_1F1 + b_2F2 + b_3F3 + b_{12}F1F2 + b_{13}F1F3 + b_{23}F2F3 \quad (1)$$

Avec, b_0 , b_1 , b_2 , b_3 , b_{12} , b_{13} et b_{23} les coefficients du modèle, qui sont calculés avec le logiciel Statistica et représentés dans le tableau 5.

Tableau 5 : Coefficients du modèle complet

b_0	b_1	b_2	b_3	b_{12}	b_{13}	b_{23}
7,0050	2,6875	□ 0,2725	2,5325	□ 0,5950	1,4850	0,4000

En remplaçant ces coefficients par leurs valeurs respectives, le modèle complet sera de la forme :

$$y = 7.005 + 2.6875 T_t - 0,2725 S_v + 2,5325 D_b - 0,595 T_t S_v + 1.485 T_t D_b + 0,4 S_v D_b \quad (2)$$

Avec $y = EH$: Ecart de dureté (réponse),

$F1 = T_t$: Température de trempe (°C),

$F2 = S_v$: Sévérité du milieu de trempe

$F3 = D_b$: Diamètre du boulet (mm).

4.5. Optimisation par détermination des meilleurs sous-modèles

Dans le but de connaître la qualité de la modélisation obtenue, nous avons procédé à la détermination des sous modèles. Ces derniers sont déduits du modèle (complet) par suppression d'au moins un monôme, mis à part la composante constante b_0 . On exclut la possibilité que le sous-modèle soit uniquement égal à b_0 .

Nous avons réalisé un classement des sous modèles suivant la valeur du coefficient de détermination R^2 par ordre décroissant de qualité.

Parmi les meilleurs sous-modèles, on repère les monômes absents. Cela permet de déduire les facteurs principaux et les interactions correspondants, ayant le moins d'influence sur la perte de qualité du modèle originel. Ils peuvent donc être considérés comme peu influents vis-à-vis de la réponse puisque leur absence n'affecte que de manière limitée la qualité et l'aspect prédictif de la modélisation.

Pour un modèle initial à p coefficients (donc à p monômes), on compte donc $(p - 1)!$ sous - modèles [12].

Le tableau 6 fait ressortir quelques uns de ces modèles.

Tableau 6 : Détermination des meilleurs sous-modèles

	<i>Ecriture des sous modèles</i>	R^2
Meilleurs sous modèles	$y = 7.005 + 2.6875 T_t - 0,2725 S_v + 2,5325 D_b - 0,595 T_t S_v + 1.485 T_t D_b + 0,4 S_v D_b$	0,999297120
	$y = 7.005 + 2.6875 T_t + 2,5325 D_b - 0,595 T_t S_v + 1.485 T_t D_b + 0,4 S_v D_b$	0,994780666
	$y = 7.005 + 2.6875 T_t - 0,2725 S_v + 2,5325 D_b - 0,595 T_t S_v + 1.485 T_t D_b$	0,989565514
	$y = 7.005 + 2.6875 T_t - 0,2725 S_v + 2,5325 D_b + 1.485 T_t D_b + 0,4 S_v D_b$	0,977764422
	$y = 7.005 + 2.6875 T_t + 2,5325 D_b + 1.485 T_t D_b$	0,963516364
	$y = 7.005 + 2.6875 T_t - 0,2725 S_v + 2,5325 D_b - 0,595 T_t S_v + 0,4 S_v D_b$	0,865169748
	$y = 7.005 + 2.6875 T_t - 0,2725 S_v + 2,5325 D_b - 0,595 T_t S_v$	0,855438143
	$y = 7.005 + 2.6875 T_t - 0,2725 S_v + 2,5325 D_b + 0,4 S_v D_b$	0,843637051
	$y = 7.005 + 2.6875 T_t + 2,5325 D_b$	0,829388992
Sous modèles moyennement bons	$y = 7.005 + 2.6875 T_t - 0,2725 S_v - 0,595 T_t S_v + 1.485 T_t D_b + 0,4 S_v D_b$	0,609208380
	$y = 7.005 + 2.6875 T_t - 0,595 T_t S_v + 1.485 T_t D_b + 0,4 S_v D_b$	0,604691926
	$y = 7.005 + 2.6875 T_t - 0,2725 S_v - 0,595 T_t S_v + 1.485 T_t D_b$	0,599476774
	$y = 7.005 + 2.6875 T_t + 1.485 T_t D_b$	0,573427623
	$y = 7.005 - 0,2725 S_v + 2,5325 D_b - 0,595 T_t S_v + 1.485 T_t D_b + 0,4 S_v D_b$	0,559996868
	$y = 7.005 + 2,5325 D_b - 0,595 T_t S_v + 1.485 T_t D_b + 0,4 S_v D_b$	0,555480414
	$y = 7.005 + 2,5325 D_b + 1.485 T_t D_b$	0,524216112

	$y = 7.005 + 2.6875 T_t - 0,2725 S_v - 0,595 T_t S_v + 0,4 S_v D_b$	0,475081008
	$y = 7.005 + 2.6875 T_t$	0,439300252
	$y = 7.005 + 2,5325 D_b$	0,390088740
Sous modèles moins bons	$y = 7.005 + -0,2725 S_v - 0,595 T_t S_v + 1.485 T_t D_b + 0,4 S_v D_b$	0,169908128
	$y = 7.005 + 1.485 T_t D_b + 0,4 S_v D_b$	0,143858977
	$y = 7.005 - 0,2725 S_v + 1.485 T_t D_b$	0,138643825
	$y = 7.005 + 1.485 T_t D_b$	0,134127372
	$y = 7.005 - 0,2725 S_v - 0,595 T_t S_v + 0,4 S_v D_b$	0,035780756
	$y = 7.005 - 0,595 T_t S_v + 0,4 S_v D$	0,031264303
	$y = 7.005 - 0,2725 S_v + 0,4 S_v D_b$	0,014248059
	$y = 7.005 - 0,2725 S_v$	0,004516453

Le classement des sous-modèles en fonction du coefficient de détermination R², nous permet de tirer les conclusions suivantes :

- ♦ Le meilleur modèle reste le modèle complet.
- ♦ Les meilleurs sous-modèles sont ceux pour lequel le deuxième facteur (F2) et les interactions avec les autres facteurs (interaction 12 et 23) ont été supprimées. Ces termes semblent ne jouer qu'un rôle limité dans la qualité d'ajustement. Cette remarque a été déjà constatée par l'ANOVA (tableau 4) et l'étude des coefficients du modèle (tableau 5).
- ♦ Le sous-modèle $y = 7.005 + 2.6875 T_t + 2,5325 D_b + 1.485 T_t D_b$ peut être jugé de qualité suffisante et considéré comme le modèle susceptible d'expliquer la trempabilité des boulets de broyage. Son coefficient de détermination est intéressant et il ne prend en considération que les effets les plus importants, ceux du premier facteur (température de trempe), du troisième facteur (diamètre des boulets) et l'interaction entre ces deux facteurs 13 (tableau 4 et 5). Ce modèle nous permet de réduire à moitié le nombre d'expériences.
- ♦ Le deuxième facteur est éliminé de ce sous modèle, car les interactions de ce facteur et les autres facteurs sont insignifiantes.
- ♦ L'élimination de l'un des facteurs principaux (F1 ou F3) influe considérablement sur la qualité d'ajustement et diminue fortement R².
- ♦ En comparant les sous-modèles ($y = 7.005 + 2.6875 T_t + 1.485 T_t D_b$) et ($y = 7.005 + 2,5325 D_b + 1.485 T_t D_b$), nous constatons que la liaison entre la réponse et le premier facteur (T_t) est plus forte que celle de la réponse et le troisième facteur (D_b).

5. Conclusion

Nous avons pu constater que la température de trempe et la taille des boulets influents plus sur la trempabilité des boulets que la sévérité du milieu de trempe.

La mauvaise aptitude des boulets à prendre la trempe ou à durcir en profondeur est influencée plus par le surchauffage des boulets à la température d'austénitisation de 1050 °C que par la sévérité du milieu de trempe. Un chauffage à cette température causera le grossissement du grain austénitique et la dégradation de la trempabilité du matériau.

L'effet de masse est plus significatif quand la taille des boulets augmente et surtout avec l'augmentation de la température de trempe.

La sévérité du milieu de trempe influence notablement sur la trempabilité des boulets par son interaction avec la température de trempe.

Un modèle mathématique est établi dans ce travail. Il ne prend en considération que le premier facteur (température de trempe), le troisième facteur (diamètre des boulets) et l'interaction entre ces deux facteurs 13.

Ainsi, et pour minimiser l'écart de dureté entre la surface et le cœur des boulets (améliorer la trempabilité), un choix judicieux serait donc celui d'un niveau bas de la température de trempe et de l'utilisation d'un refroidissement à l'air soufflé sur les boulets de faibles diamètres.

Références

1. S. AISSAT, Amélioration des caractéristiques mécaniques du boulet de broyage, mémoire de Magister, Université Ibn Khaldoun, Tiaret, (1999).
2. S. AISSAT, A. SASSI, A. KHATIR, Production de fonte blanche dure par traitements thermiques, Quatrièmes Journées Maghrébines d'Etudes de Génie Mécanique (JMEGM'99), Constantine, Algérie, (1999).
3. P. BLAZY, E. AIDJIDID, J. YVON, Fragmentation – Application, techniques de l'ingénieur, J4, (1992), A 5070-2 ; A 5070-23.
4. Manuel des fontes moulées, traduit et adapté de IRON CASTINGS HANDBOOK par le centre d'information des fontes moulées, (1983).
5. J. C. MARGERIE, Traitements thermiques des fontes, techniques de l'ingénieur, traité de métallurgie, (1994), M 1145-20 ; M 1145-24.
6. F. MARATRAY, A. POULALION et P. RABBE, Contribution à l'étude des alliages Fe - Cr - Mo - C, colloque international sur les alliages ferreux à haute teneur en chrome et carbone, Saint Etienne, France, (1973).
7. S. AISSAT, A. SADEDDINE, Recherche des facteurs influents sur la trempabilité des boulets de broyage, Congrès Algérien de Mécanique (CAM'2013), Mascara, Algérie, (2013).
8. J. VAILLÉ, J. GOUPY, Construire et interpréter un plan d'expériences factoriel complet, Revue MODULAD, N°35, (2006), p. 1-5.
9. J. GOUPY, Étude comparative de divers plans d'expériences, Revue de statistique appliquée, tome 38, N° 4, (1990), p. 5-44.
10. J.-N. BALÉO, al., Méthodologie expérimentale, méthodes et outils pour les expérimentations scientifiques, éditions TEC & DOC, Paris, (2003).
11. B. CLEMENT, Modèles d'analyse de variance avec STATISTICA, Génistat Conseils Inc, Montréal, Canada, (2010).
12. S. VIVIER, Stratégies d'optimisation par la méthode des plans d'expériences et application aux dispositifs électrotechniques modélisés par éléments finis, thèse de doctorat, Université des Sciences et Technologies de Lille, (2002).