
OUTIL STATISTIQUE DE RE-CONCEPTION PRODUIT

I. Introduction

L'élaboration de l'outil statistique de re-conception est basée sur la création d'une base de données matériau et procédé. Cette base de données est alimentée par les résultats des deux plans d'expériences réalisés et présentés dans les chapitres précédents. Après avoir détaillé et analysé l'ensemble des résultats expérimentaux obtenus dans les précédents chapitres, le chapitre V vient présenter l'outil statistique de re-conception produit.

Les différents acteurs qui interagissent dans la re-conception d'une pièce automobile nécessitent de pouvoir vérifier la tenue mécanique de cette pièce. Pour cela, l'outil de re-conception produit proposé se présente sous trois formats différents pour s'adapter aux différentes utilisations visées :

- Cartographies des caractéristiques mécaniques
- Estimation des caractéristiques mécaniques par des surfaces de réponses
- Outil de re-conception sous VBA

Avant de passer à l'outil de re-conception, la première partie développe le cadre méthodologique utilisé dans la construction des plans d'expériences et le traitement des résultats. Une grande partie de cette méthodologie a été réalisée dans les chapitres précédents. Reste la dernière étape qui consiste au développement de l'outil de re-conception. Celle-ci fait l'objet du dernier axe de ce chapitre.

II. Cadre méthodologique

Avant de passer à l'outil de re-conception produit qui va permettre aux concepteurs industriels d'adapter les conceptions de leurs pièces produites en fonderie sous pression aux contraintes Matériau/ Procédé du marché local lors d'une localisation hors Europe, nous allons, dans ce paragraphe, présenter la procédure suivie pour la construction de cet outil.

Cette démarche commence par l'identification du besoin, passe par la construction de plan d'expériences, la réalisation des essais nécessaires à l'étude de la variabilité des caractéristiques testées, l'analyse statistique des résultats et la création de modèles empiriques qui vont servir à la construction de l'outil de re-conception produit.

1. Besoin de re-conception

La première étape consiste à définir le cadre de l'étude et à formaliser le besoin. Elle commence par un brainstorming qui regroupe l'ensemble des acteurs pour recenser toutes les questions suscitées lors de l'industrialisation d'une pièce donnée hors Europe et consiste à :

Définir le problème

Il s'agit de poser clairement le problème et de définir les acteurs concernés par l'étude. Généralement dans le cas de la re-conception d'une pièce automobile, les acteurs concernés sont les spécialistes produits (les concepteurs), les spécialistes matériaux et les spécialistes procédés. Cette étape permet aussi de préciser l'intérêt de l'étude.

Déterminer les objectifs

De manière générale, l'objectif principal consiste à estimer avec suffisamment de précision l'effet de l'ensemble des variables d'entrée influentes, de façon à pouvoir prévoir de manière assez fiable, la valeur de sortie que l'on obtiendrait pour l'ensemble des combinaisons des variables d'entrée. Dans notre étude, le but est de déterminer et de quantifier l'influence des paramètres matériau/produit/procédé sur les propriétés du produit.

Définir le système

Cette étape consiste à définir la pièce qui fera l'objet de l'étude, les surfaces fonctionnelles, les zones de prélèvement, le matériau (la famille d'alliages) et le procédé de fabrication.

2. Paramètres d'entrée et leurs plages de variation / Réponses

Les paramètres d'entrée/sortie mis en jeu sont des grandeurs physiques modifiables ou non, on distingue :

La réponse : c'est la caractéristique produit nécessaire lors de la conception et le redimensionnement de la pièce, elle doit être représentative, quantifiable et la moins dispersée possible pour des variables d'entrées maîtrisées et constantes. La vérification de faisabilité de l'essai permettant la mesure de la réponse doit être réalisée sur la pièce prototype, notamment, la possibilité de prélèvement d'éprouvettes. On a choisi d'étudier dans ma thèse les caractéristiques mécaniques de traction (R_m , $R_{p0,2}$ et $A\%$), le module d'Young et la dureté.

Les facteurs : ce sont les paramètres du produit, du matériau et de la technologie de fabrication appliquée. Ce sont des grandeurs physiques modifiables susceptibles d'influencer sur la variation de la réponse. La détermination des facteurs consiste à :

- Recenser l'ensemble des paramètres
- Sélectionner les paramètres contrôlables les plus influents en s'appuyant sur l'expérience et les connaissances des acteurs.
- Sélectionner les facteurs non contrôlables (bruits)
- Classer ces éléments selon leur importance et leur influence.

Nous avons commencé par le recensement des paramètres matériau, principalement les éléments d'alliage principaux (%Si, %Cu, %Mg et %Zn), et des paramètres procédé : Paramètres d'injection (vitesses de remplissage, pression troisième phase, etc...), température de la coulée, température du moule, ... etc. Ensuite, le classement de ces paramètres selon leur importance et leur influence en se basant sur les différentes discussions réalisées avec les experts Matériau/ Procédé nous a permis de sélectionner les paramètres matériau/procédé suivants : %Si, %Cu, %Mg, pression 3^{ème} phase et température de la coulée.

3. Choix du type de plan et de modèle

Le choix du plan d'expériences à mettre en œuvre dépend de l'objectif de l'étude. On distingue deux types de plans : les plans de screening (plan à deux niveaux) et les plans de surface de réponses (plan à trois niveaux). Le paragraphe IV.1 du premier chapitre donne une description des principaux plans d'expériences existants (Plan factoriel complet, Plan de Taguchi, Plan de Rechtschafner, ... etc.).

Le choix du plan dépend de l'objectif de l'étude mais aussi des contraintes matérielles, de faisabilité et économiques. En effet, la réponse du système est recherchée pour l'ensemble des points constituant du domaine considéré. Mais, pour des contraintes de temps et de coût, le nombre d'expériences nécessaires pour tout point du domaine peut être non réalisable. C'est pourquoi nous utilisons un modèle empirique qui permettra d'avoir le maximum d'informations en réalisant un minimum

d'expériences. Nous avons opté dans le cas de notre étude pour le plan de Rechtschaffner à trois niveaux pour l'étude de l'influence des éléments d'alliage indépendamment du procédé puis nous avons réalisés un deuxième plan qui étudie l'influence de l'interaction des paramètres matériau et des paramètres procédé.

4. Technique de screening

La méthode des plans d'expériences commence par une première étape de sélection des facteurs d'entrée. Elle permet de déterminer, par un ensemble de facteurs, les éléments influents.

Cette étape consiste à réaliser un test statistique permettant d'accepter ou non l'hypothèse selon laquelle un facteur induit des variations de la réponse significativement plus importantes que celles engendrées par des facteurs considérés comme constants. Un facteur est alors jugé influent si son action sur la réponse étudiée est statistiquement supérieure à certain niveau. Le test utilisé dans cette étude est le test de Fisher et le niveau de signification α est de 0,05.

Rappelons que la technique de screening passe par les étapes suivantes:

- Lancer le test de Fisher en considérant tous les paramètres susceptibles d'influencer la caractéristique étudiée
- Calculer p-value pour chaque paramètre
- Calculer les deux coefficients R^2 (coefficient de détermination : est défini comme étant la fraction des variations de la réponse, il mesure l'adéquation entre le modèle et les données observées et estime la qualité de l'ajustement du modèle) et Q^2 (représente la fraction de la variation de la réponse prédite par le modèle et mesure la capacité du modèle à prédire les réponses dans le domaine de variation des facteurs).
- Relancer le test de Fisher en ne considérant que les paramètres dont p-value est inférieur au niveau de signification α
- Vérifier que R^2 est proche de 1 et supérieur à 0,5.
- Vérifier que Q^2 est plus élevé que celui de l'itération précédant. Plus Q^2 est proche de 1 plus sa capacité de prédiction est meilleur.

Le test de Fisher est alors répété n fois en ne considérant à chaque fois que les facteurs jugés influents par l'itération n-1 tout en vérifiant R^2 et Q^2 jusqu'à ce que tous les paramètres considérés sont influents ou que le Q^2 est inférieur de celui de l'interaction n-1.

5. Méthode de surface de réponse

La technique MSR vient s'appliquer à la suite de la technique de screening, elle n'utilise que les facteurs précédemment jugés influents et vise à déterminer d'une façon quantitative les variations de la fonction réponse vis-à-vis des facteurs d'influence significative. Pour chacune des caractéristiques produit, la technique de surface de réponses nous a permis de calculer par le test de Fischer la valeur de la p-value qui permet de calculer le pourcentage de contribution de chacun des facteurs influents sur la caractéristique étudiée comme détaillé dans le paragraphe IV de ce chapitre.

6. Modèle à régression polynomiale

La suite de la méthodologie des plans d'expériences consiste à construire un modèle approché qui apportera des éléments d'informations à l'expérimentateur encore appelé « modèle empirique ». Ce modèle est destiné à analyser les résultats des plans d'expériences physiques et à les interpréter statistiquement. Ainsi, il n'est valable que dans le domaine étudié des facteurs d'entrée La robustesse et la capacité de prédiction sont vérifiées par le calcul des deux coefficients R^2 et Q^2 , les valeurs minimales de R^2 et Q^2 acceptables sont 0,5 et 0,25 respectivement.

La figure 93 résume l'ensemble des étapes de la méthodologie utilisée :

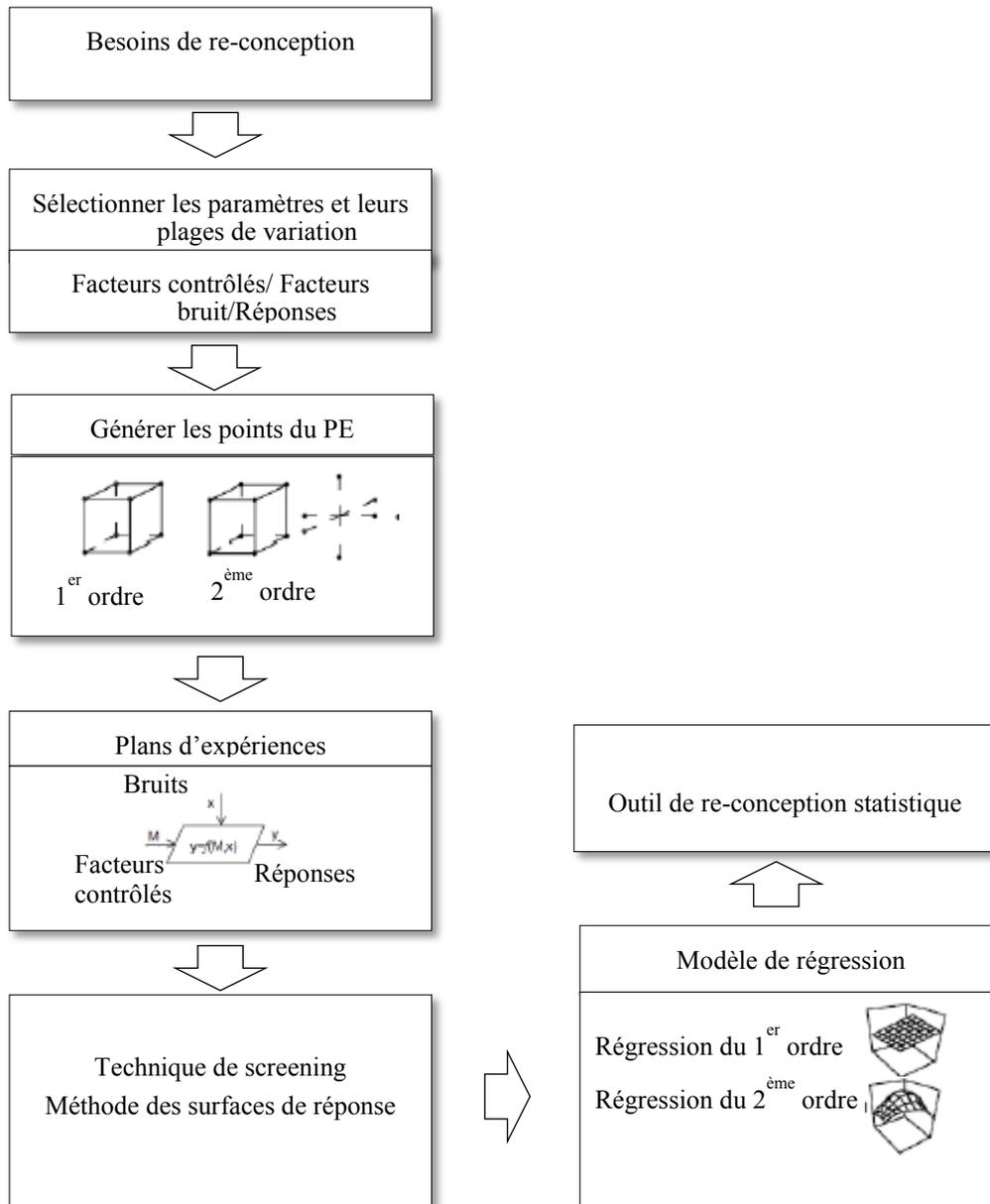


Figure 93 : Méthodologie de construction de l'outil de re-conception produit

III. Outil statistique de re-conception produit

La réalisation de l'outil de re-conception produit s'est basée sur la construction d'interfaces personnalisées permettant à tout opérateur sans qualification particulière en outils informatiques d'estimer les plages de variabilité des caractéristiques du produit en fonction des variations des facteurs influents sur ces caractéristiques. Le langage utilisé est capable d'évolutions et de transformations, pouvant ainsi s'adapter aux besoins à venir. Le but étant de l'adapter aux principaux acteurs concernés par la re-conception et l'industrialisation de pièces produites en fonderie sous pression, nous proposons l'outil sous trois formats :

1. Cartographies des caractéristiques mécaniques

Pour aider les spécialistes procédés à vérifier la tenue mécanique de pièces automobiles en fonderie sous pression lors de modification de la teneur en éléments d'alliage ou de la valeur de l'un des paramètres procédés étudiés, nous avons utilisé le logiciel de fonderie ProCAST pour construire des cartographies des propriétés mécaniques (dureté, $R_{p0,2}$, R_m et $A\%$) pour un alliage donné, une température de coulée et une pression sur le métal bien déterminés. La cartographie visualise les zones conformes aux spécifications, les zones à risque et les zones non conformes.

ProCast est un logiciel, basé sur la méthode des éléments finis, de simulation du procédé de moulage pour le calcul des écoulements de fluides, et des phénomènes thermiques et thermomécaniques qui se produisent lors de la fabrication des pièces moulées. Une coulée type se réalise en versant du métal liquide dans une cavité de moule contenant la topologie de la pièce préparée auparavant. Ensuite, le métal liquide se refroidit et se solidifie grâce au transfert de la chaleur à travers les parois du moule, produisant ainsi une pièce métallique. La qualité globale de la pièce est fortement influencée par les conditions de l'écoulement du métal liquide pendant les phases du remplissage et de solidification.

Les principaux modules utilisés par le logiciel ProCast sont les suivants [90] :

- MeshCast : ce module est utilisé pour la création de la géométrie et le maillage par éléments finis du système de coulée (y compris le moule, le système d'alimentation, etc.). En effet, un modèle 3D de l'outillage avec l'empreinte de la pièce à simuler constitue une entrée nécessaire à la réalisation des calculs sous ProCast.
- VisualCast : il permet de définir les propriétés physiques assignées au matériau ainsi que les conditions initiales et limites du processus.
- ProCast : c'est le moteur de calcul qui effectue les calculs mathématiques nécessaires pour la simulation de la vitesse du métal, de la température, de la fraction solide, ...etc.
- VisualViewerCast : il permet de visualiser les résultats des calculs effectués

Les paramètres procédés utilisés pour la réalisation des cartographies sont donnés dans le tableau 35. Ce sont les mêmes paramètres procédés que ceux utilisés dans la coulée des pièces produites pour la réalisation des essais mécaniques de la thèse.

Vitesse de la 1ère phase VI_1 (m/s)	0,09
Vitesse de la 1ère phase VI_2 (m/s)	0,2
Vitesse de la 2ème phase (m/s)	2
Vitesse de remplissage VA (m/s)	30
Température du moule (°C)	250
Pressions 3ème phase PIII (bar)	180 & 275
Pressions sur le métal PS (bar)	875 & 1275
Températures du métal coulé (°C)	630 & 680

Tableau 35 : Paramètres procédé utilisés dans la simulation sous ProCast

La construction de ces cartographies s'est réalisée par intégration des modèles polynomiaux qui lient les caractéristiques mécaniques aux facteurs Matériau/ Procédé/ Produit générés par analyse de la variance (voir annexe B). Comme les alliages du plan d'expériences ne sont pas des alliages standards et ainsi ne font pas partie de la base de données du logiciel, nous avons déclaré les éléments d'alliages (%Si, %Mg, %Cu) comme variables dans Procast et assigné pour chaque cartographie les valeurs des pourcentages massiques des éléments d'alliage de l'alliage correspondant à ces variables. Les figures 94, 95 et 96 donnent les cartographies de la dureté, de $Rp_{0,2}$ et de Rm de l'alliage 3 dont la composition chimique est proche de celle de l'alliage RENAULT. Elle montre que la dureté et $Rp_{0,2}$ sont indépendantes de la géométrie de la pièce contrairement à Rm .



Figure 94: Cartographie de la dureté (HBw) de l'alliage 3



Figure 95: Cartographie de la limite élastique(MPa) de l'alliage 3

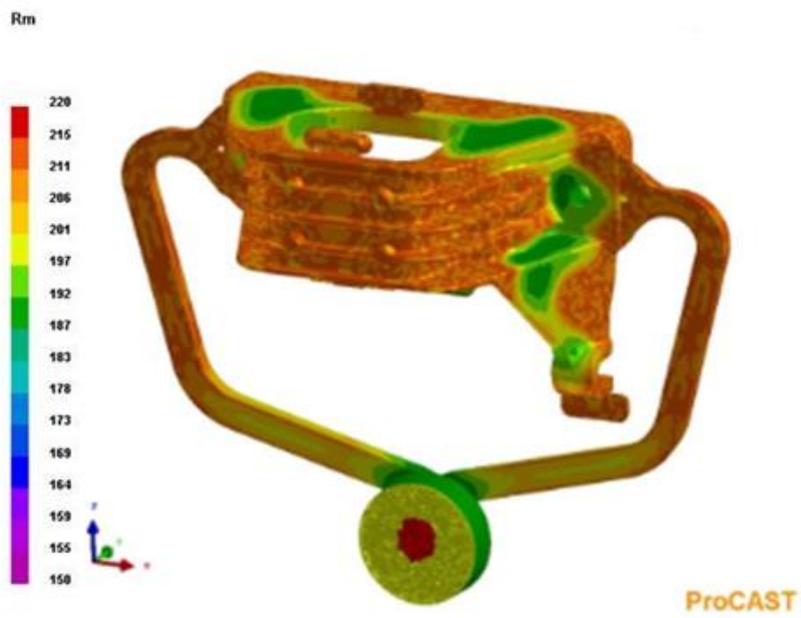


Figure 96 : Cartographie de la résistance à la traction (MPa) de l'alliage 3

2. Estimation des caractéristiques mécaniques par des surfaces de réponses

Les alliages utilisés dans les usines de RENAULT sont fournis avec des plages de variation qui ne sont pas toujours conformes aux spécifications demandées. Pour permettre aux responsables des usines de fonderie de vérifier l'effet de la variabilité de la composition chimique des alliages livrés, de la température de la coulée et de la pression sur le métal, des surfaces de réponses des caractéristiques mécaniques ont été construites sous Excel. Ces surfaces permettent de prédire les caractéristiques mécaniques (dureté, $R_{p0,2}$ et R_m) en fonction des plages de variation de deux facteurs parmi les cinq facteurs étudiés : les trois éléments d'alliage Si, Cu et Mg et les deux paramètres procédé : température du métal et pression sur le métal. En effet, sont fixés les trois paramètres qui représentent moins de variabilités, ainsi que la classe de porosité et on obtient une surface de réponse de la caractéristique de sortie en fonction des deux paramètres restants (voir exemple figure 97).

Dans l'exemple, les paramètres fixes sont le pourcentage massique en Cu (2,5%), la température de coulée (670°C) et la pression 3^{ème} phase (935 bar), on cherche la variabilité de R_m en fonction du Si et du Mg pour une classe de porosité de 1. Le calcul permet de donner les valeurs prédites de R_m dans la plage de variation des facteurs silicium et magnésium et il nous donne aussi la valeur minimale et la valeur maximale de R_m dans ces plages de variation.

Pour une composition chimique donnée, on peut également générer une surface de réponses qui donne la variabilité des caractéristiques mécaniques en fonction de la variabilité de la température de coulée et de la pression sur le métal. Ainsi, on obtient les valeurs minimales de la température et de la pression du procédé de fonderie qui permettent d'avoir des propriétés mécaniques conformes aux spécifications de la pièce. Dans ce cas, l'interface est utilisée pour des raisons économiques

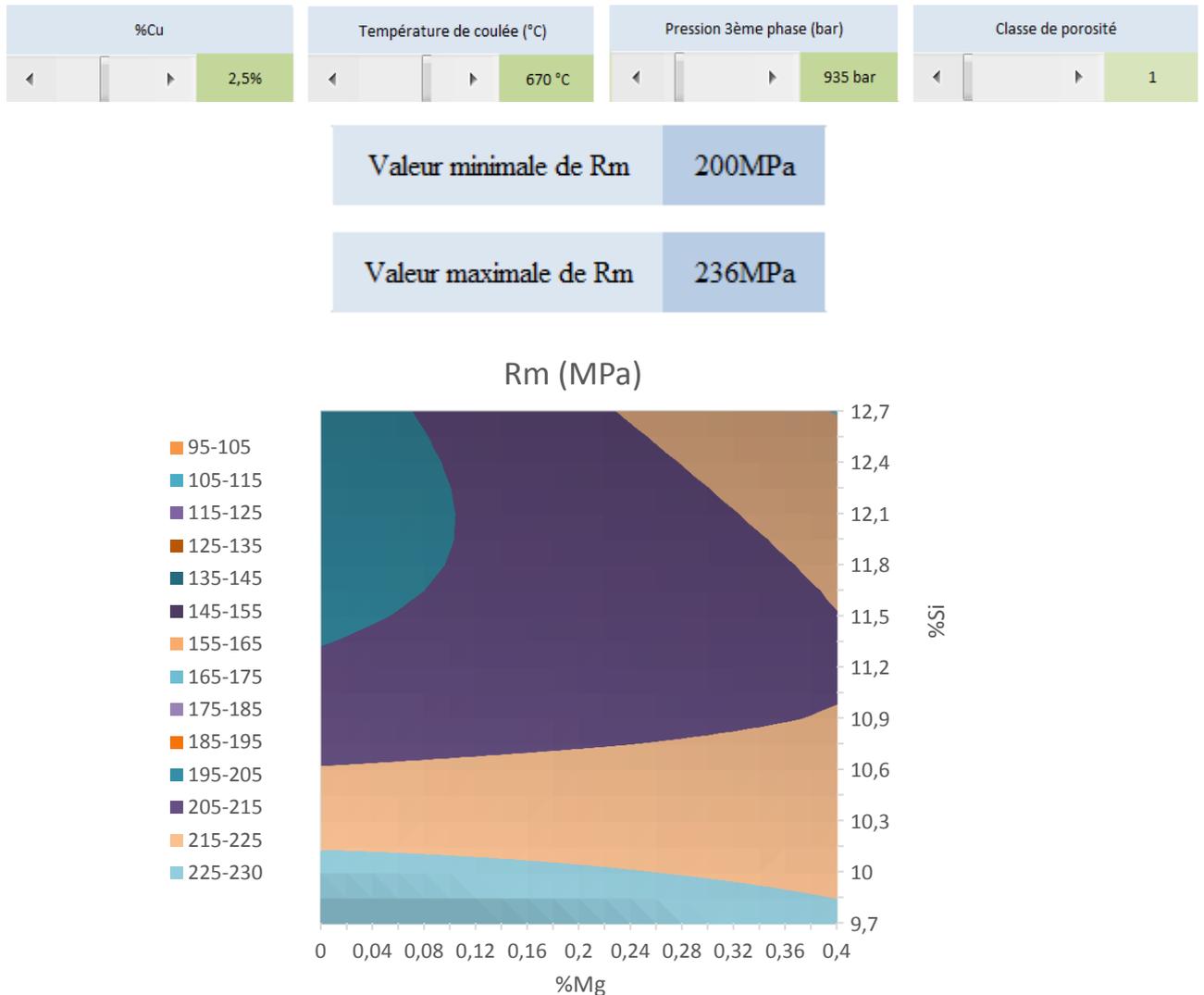


Figure 97 : Exemple de surface de réponse de la résistance à la traction

3. Outil de re-conception sous VBA

Le troisième format de l'outil est une interface construite en se basant sur Excel Visual Basic pour Application qui est un langage de programmation simple, permettant d'utiliser le code Visual Basic pour exécuter les nombreuses fonctionnalités de l'application Excel. On travaille alors avec des macros pour écrire le programme.

Le programme est conçu de telle manière à permettre à l'utilisateur d'introduire la valeur minimale et la valeur maximale de tous les paramètres étudiés et de lancer le calcul. Une fois que le calcul est terminé, l'interface affiche la valeur minimale et la valeur maximale de la caractéristique de sortie pour chaque classe de porosité allant de 1 à 4 (figure 98).

The interface displays the following input fields:

- Top Parameters:**
 - Cu(%):** Cumin, Cumax
 - Mg(%):** Mgmin, Mgmax
 - Si(%):** Simin, Simax
 - T°(C):** T°min, T°max
 - P(bar):** Pmin, Pmax
- ASTM Classes and Rm Values:**
 - Classe ASTM 1:** Rm1min, Rm1max, Cu1min, Mg1min, Si1min, T°1min, P1min, Cu1max, Mg1max, Si1max, T°1max, P1max
 - Classe ASTM 2:** Rm2min, Rm2max, Cu2min, Mg2min, Si2min, T°2min, P2min, Cu2max, Mg2max, Si2max, T°2max, P2max
 - Classe ASTM 3:** Rm3min, Rm3max, Cu3min, Mg3min, Si3min, T°3min, P3min, Cu3max, Mg3max, Si3max, T°3max, P3max
 - Classe ASTM 4:** Rm4min, Rm4max, Cu4min, Mg4min, Si4min, T°4min, P4min, Cu4max, Mg4max, Si4max, T°4max, P4max
- Action:** Calculer

Figure 98 : Interface de calcul des valeurs min et max de Rm en fonction des plages de variation des paramètres d'entrée

Pour chacune des caractéristiques étudiées: dureté, Rm, Rp0,2 et A%, une interface permettant de calculer la valeur minimale et la valeur maximale de la caractéristique pour chacune des classes de porosité en fonction des plages de variabilité des paramètres d'entrée : %Si, %Mg, % Cu, température de la coulée et pression sur le métal a été créée. Par ailleurs, l'interface est capable d'évolutions dans le cas où d'autres paramètres d'entrée seraient jugés intéressants d'être ajoutés ou d'autres propriétés étudiées.

4. Conclusion

L'outil statistique de conception produit se présente sous plusieurs formats :

Tout d'abord des cartographies des caractéristiques mécaniques construites dans le logiciel de simulation de fonderie sous pression Pro-Cast. Cette visualisation des propriétés mécaniques permettra aux spécialistes procédé de vérifier la tenue mécanique de la pièce dans le cas de modification de la teneur en éléments d'alliage Si, Cu ou Mg, ou des paramètres procédé température de la coulée et pression sur le métal.

Ensuite, des surfaces de réponses qui donnent la variabilité des propriétés mécaniques en fonction de la variabilité de deux paramètres parmi les cinq étudiés tout en fixant les valeurs des trois autres paramètres et en fin un interface réalisé en VBA qui permet de calculer les valeurs minimale et maximale des caractéristiques en fonction des plages de variation de tous les paramètres d'entrée pour chacun des classes de porosité.

L'outil proposé est un outil capable d'évolution. En effet, le cadre méthodologique donné dans ce chapitre et la simplicité du langage pour la création de l'outil permettant d'ajouter d'autres facteurs ou d'autres caractéristiques dans le cas où on s'intéresse à l'étude de la variabilité d'autres propriétés (ex : fatigue).