

BTS IPM

L'épreuve E52 traitée par les plans d'expériences

PASCAL MALO^[1]

Nous vous présentions dans la première partie (Technologie n° 164, nov.-déc. 2009) la méthode des plans d'expériences. S'agit-il d'un outil trop complexe pour le candidat au BTS ? Preuve que non, ce retour d'expérience issu du travail d'un étudiant pendant les cent heures allouées.

Il est important, avant de découvrir cette étude de cas, de définir les conditions préalables pour qu'un étudiant de STS IPM puisse aborder avec sérénité et autonomie l'épreuve E52 par les plans d'expériences. Commençons par définir succinctement ce qu'est un plan d'expériences, et rappelons que pour de plus amples explications il est nécessaire de se reporter au numéro 164, auquel nous ferons fréquemment référence.

Un plan d'expériences est une suite d'essais, entièrement organisée à l'avance, dont l'objectif est de déterminer, en un minimum d'essais et avec un maximum de précision, l'influence des différents facteurs contrôlés, afin d'optimiser la performance de conception ou de fabrication industrielle d'un produit.

[1] Professeur certifié de génie mécanique - productique au lycée Jules-Ferry de Versailles (78).

Mots-clés

lycée technologique, outil et méthode, postbac, processus, projet, qualité, référentiel et programme

Dans un processus industriel, le problème qui se pose généralement pour la qualification et l'optimisation du processus réside dans la variabilité des éléments d'entrée et des conditions de fabrication, qui entraîne une perte de qualité.

Au départ, le processus peut s'apparenter à une « boîte noire » 1 où une quantité de paramètres non maîtrisés (bruits) viennent interférer. Il n'est alors pas possible de dire avec certitude comment ce processus fonctionne, quels sont ses défauts, ses variations, et donc de le maîtriser totalement. Les bruits doivent disparaître à la suite d'expérimentations qui vont permettre de rendre le processus transparent 2. On sera alors en mesure de le maîtriser totalement, car on en connaîtra le fonctionnement, les variations et les défauts.

• Les prérequis

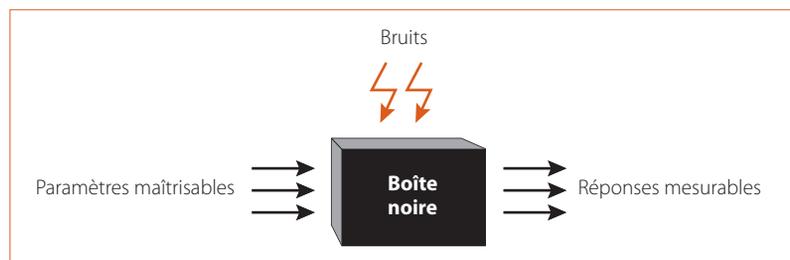
Il est important de ne pas prendre du temps sur les cent heures de projet de l'E52 pour apporter les savoirs et savoir-faire liés à l'expérimentation et plus particulièrement à la méthode des plans d'expériences. L'outil est abordable, mais riche. Il est donc fondamental que la démarche soit abordée en cours et en travaux dirigés, mais aussi dans les différentes activités de travaux pratiques (voir des « Exemples de thèmes et d'activités de TP » en encadré) pendant le deuxième semestre de formation, comme cela est prévu dans les Repères pour la formation de septembre 2006.

• L'étude de cas

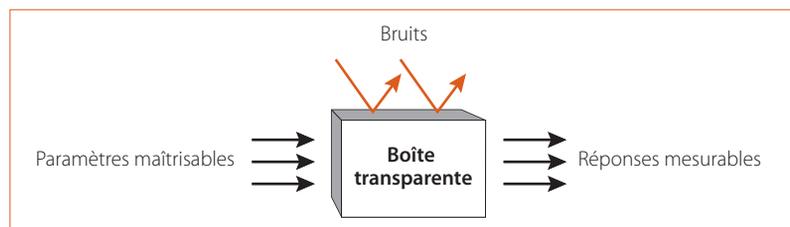
L'étude présentée ici est parfaitement adaptée à l'utilisation d'un plan d'expériences comme outil de résolution de problème par expérimentation. Il s'agit de déterminer les conditions d'usinage permettant de minimaliser et maîtriser la rugosité spécifiée de pièces produites en série.

Attention, il s'agit d'une présentation applicative, ne comportant que de brefs rappels sur la méthode et la terminologie ; il est donc conseillé de prendre préalablement connaissance de la méthode des plans d'expériences et de lire la première partie de l'article.

Nota : Sauf explication complémentaire, l'ensemble de l'étude est le fruit du travail personnel de l'étudiant, qui s'est appliqué à suivre rigoureusement la méthode. Il va de soi qu'il peut y avoir des imperfections, mais il s'agit



1 La représentation du processus comme une boîte noire



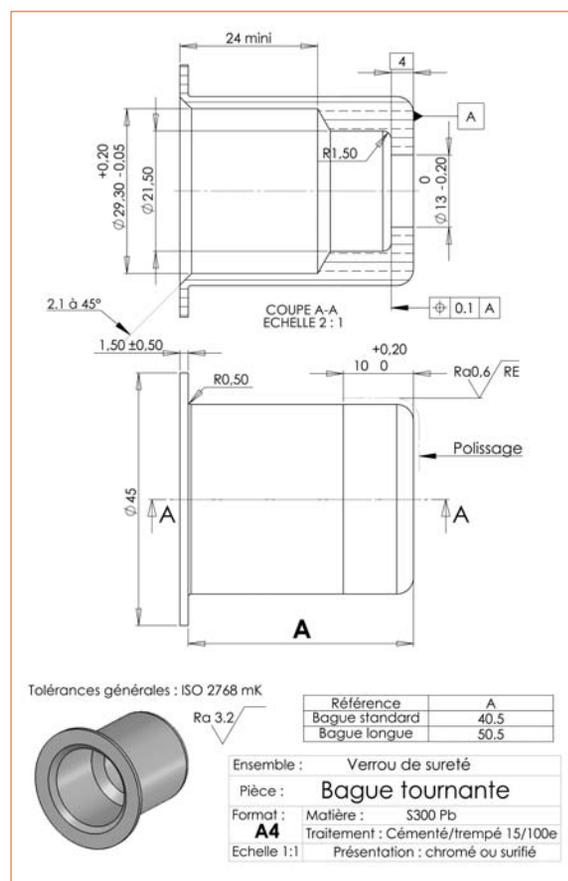
2 La représentation du processus comme une boîte transparente

(seconde partie)

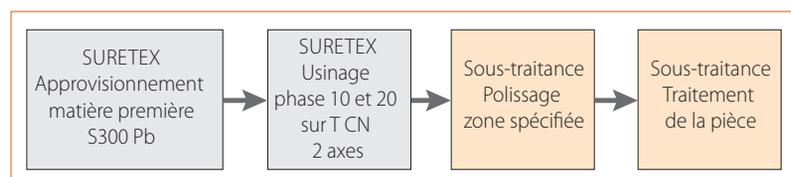
d'évaluer la démarche suivie par le candidat pour gérer un projet de qualification de processus dont l'objectif est de résoudre une problématique industrielle.

Sujet et données de l'étude

Pour des raisons de confidentialité, les noms de l'entreprise et des sous-traitants ne seront pas dévoilés. Nous appellerons la société commanditaire Suretex.



3 Le dessin de définition de la bague tournante de type A



4 Le processus de réalisation des bagues tournantes

● La pièce

La bague tournante 3 appartient à l'ensemble « verrou de sûreté de porte blindée » de la société Suretex. Sa fonction est de protéger des agressions humaines le canon de verrouillage, dont le rôle est d'enclencher le verrou de sûreté. Pour pouvoir être commercialisé, le système doit répondre aux exigences de la norme A2P. Sa durée de vie est la même que celle d'un système de serrure à 2, 3 ou 4 points, et son esthétique doit lui permettre de s'intégrer harmonieusement à la porte blindée.

Depuis des années, l'entreprise Suretex a choisi pour des raisons non communiquées de réaliser les phases 10 et 20 du processus 4 en privilégiant la productivité. Les paramètres de coupe et le débit copeaux maximal font obtenir en moyenne des états de surface dont R_a varie de 3,2 à 6,3 μm . Une phase de polissage avant traitement de surface permet l'obtention de l'état de surface imposé ($R_a = 0,6 \mu\text{m}$).

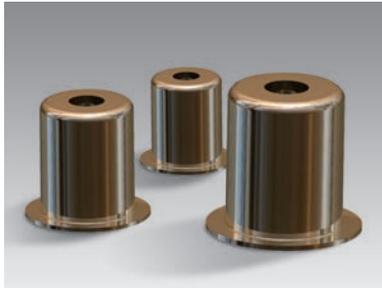
● La raison de l'étude

Le processus actuel d'obtention de la pièce nécessite une phase de polissage après le tournage réalisé chez Suretex. Cette phase est réalisée par un sous-traitant qui polit l'extérieur de la pièce. En fonction du processus de polissage, de son réglage et de la longueur de la bague, le polissage se fait généralement bien au-delà de la zone spécifiée voire dans certains cas sur la longueur totale de la pièce.

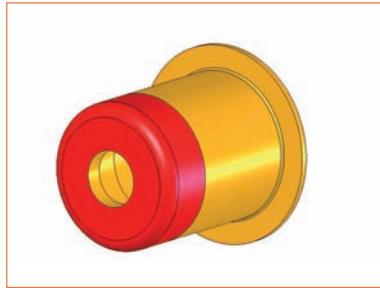
Le polissage est facturé au temps passé. De ce fait, Suretex ne maîtrise ni les délais ni les coûts de réalisation de ses bagues tournantes. Il lui est donc impossible de gérer efficacement sa production et ses coûts. De plus, c'est à la société chargée du polissage de transmettre le lot de bagues polies à un autre sous-traitant ayant en charge le revêtement de surface (chromage ou dorure) 5. Il est alors fréquent que Suretex réceptionne des lots terminés conformes du point de vue du revêtement de surface (aspect et épaisseur) mais dont la qualité de polissage insuffisante rend immédiatement les bagues non conformes et stoppe le processus d'assemblage de la serrure de sûreté, engendrant une insatisfaction du client.

Le traitement de ce type de non-conformité se fait donc au plus tard et crée des difficultés dans la définition des responsabilités et la gestion du litige.

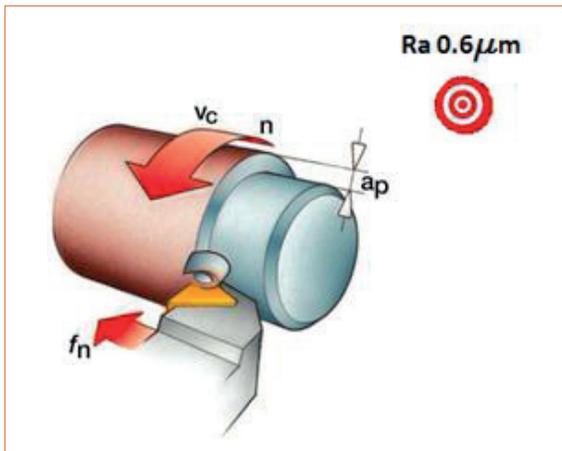
Il faut prendre également en considération que, si le périmètre de l'étude se limite à la bague de type A série courte (40,5), l'entreprise Suretex propose plus de quinze références de bagues. L'intérêt technico-économique est donc conséquent.



5 Bagues polies puis dorées



6 La pièce et la zone d'étude



7 La qualité cible et les paramètres de coupe

Exemples de thèmes et d'activités de TP

Thèmes

Étude sur la formation du copeau et sa maîtrise
La construction d'un diagramme brise-copeaux par usinage
Obtention d'un état de surface et de sa mesure
Usure des outils et durée de vie
Effort de coupe et déformation
Étude du COM (Couple Outil-Matière) (NFE 66-520)
Débit copeaux

Activités

- **Activités d'observation** : identifier, désigner, décrire, reconnaître, constater (bruit, vibration, chaleur, aspect du copeau, aspect de l'état de surface, déformation, rupture lors des activités d'usinage, géométrie des porte-plaquettes et des plaquettes amovibles...).
- Ces activités permettent d'appréhender les phénomènes observés de manière qualitative (les paramètres à maîtriser et les facteurs bruit).
- **Activités d'expérimentation** : conduire des essais, produire, simuler, mesurer (mise en œuvre de plusieurs processus et choix du processus le plus efficace)...
- Ces activités permettent d'appréhender les phénomènes observés de manière quantitative (les résultats de sortie).
- **Activités de manipulation** : réaliser des essais, installer un poste en vue d'appliquer un protocole d'essai...
- Ces activités permettent, par exemple, de comprendre le fonctionnement du processus, la chronologie d'opérations en faisant varier différents paramètres préalablement définis.

Le problème technique

Comment obtenir en phase 20 la rugosité de $0,6 \mu\text{m}$ au maximum directement par outil coupant en tournage de finition dans la zone repérée en rouge sur la figure 6 ? L'objectif est de supprimer la phase de polissage avant chromage pour permettre de réduire les délais et les coûts en garantissant systématiquement la satisfaction du client.

La conduite de la recherche expérimentale

Pour la première partie de son étude, l'étudiant s'appuie sur la démarche présentée dans le numéro 164, p. 35, dans l'organigramme de conduite d'une recherche. Il dresse l'inventaire des informations dont il dispose, après avoir effectué des recherches bibliographiques, compulsé des expériences industrielles, sollicité des hommes de terrain, professeurs et experts techniques. Signalons à ce propos que l'un de ces experts, en échange d'explications sur cette méthode qu'il ne connaissait pas et qui éveillait sa curiosité, a fourni gratuitement les différentes plaquettes.

L'étudiant collecte ainsi des abaques sur le choix de plaquettes et leurs impacts sur l'obtention d'un état de surface. Par contre, il n'y a pas d'information concrète quant à l'effet de chacun des paramètres sur la variation de la réponse (R_a en μm) et leur hiérarchisation, ou sur la présence éventuelle de phénomène d'interactions entre les facteurs.

La perception initiale du processus a donc l'allure d'une boîte noire dans laquelle il est impossible de prévoir exactement les réponses, aléatoires, ou de connaître avec certitude le mécanisme. Il existe probablement un nombre important de facteurs influents. Partant de ce constat, l'étudiant prévoit et réalise des expériences pour augmenter le capital d'informations, l'ensemble constituant le plan d'expériences.

Les essais prévus doivent permettre de répondre aux questions posées, sans oubli (validité du plan) ni redondance (économie). Il s'agit de déterminer les facteurs à tester, de connaître leurs effets et leurs interactions, pour pouvoir régler les paramètres afin d'obtenir la qualité de surface souhaitée.

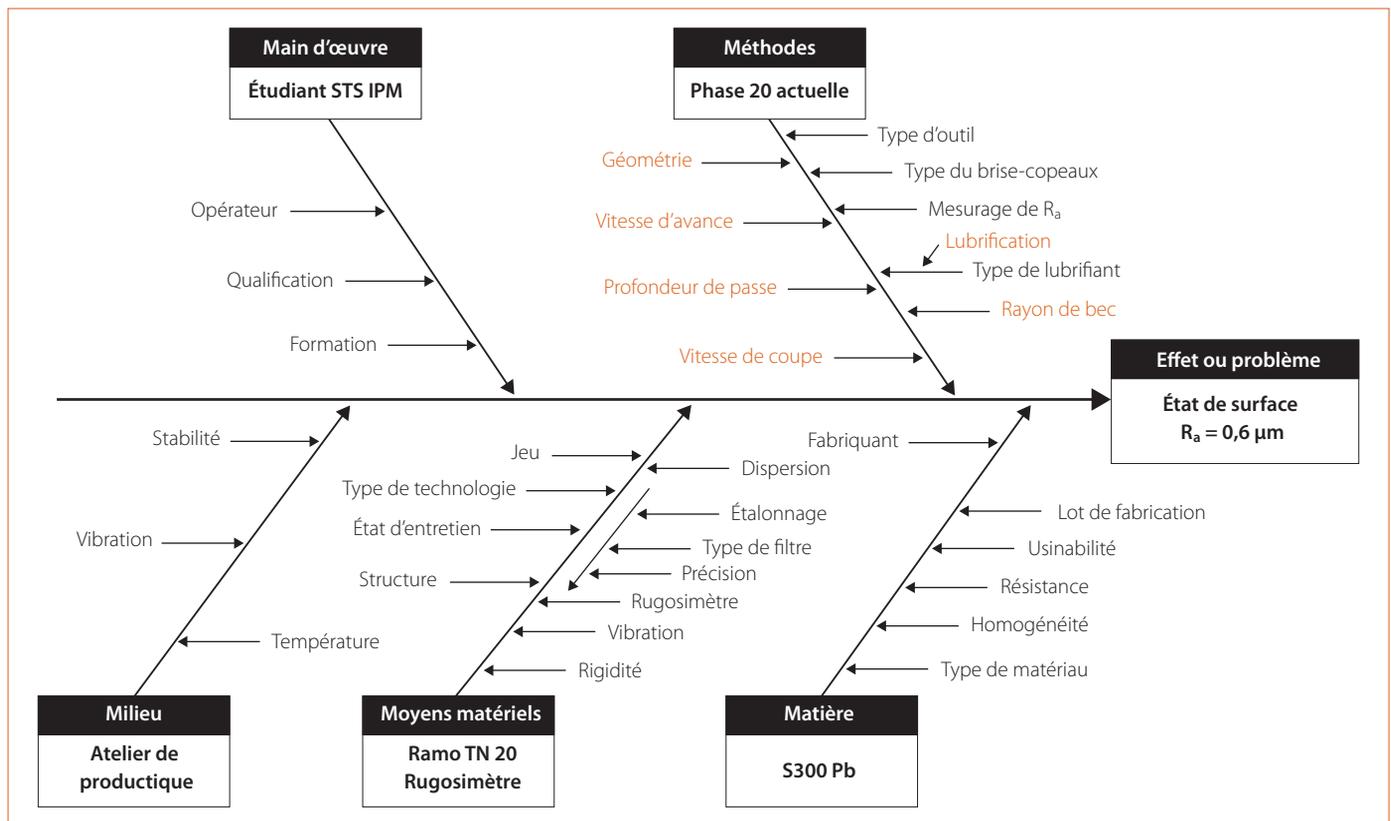
L'étudiant peut évaluer correctement la charge de travail et les besoins en matériels, tout en s'assurant qu'aucune contrainte irréductible ne s'oppose à la réalisation.

Phase n° 1 : la définition précise du sujet

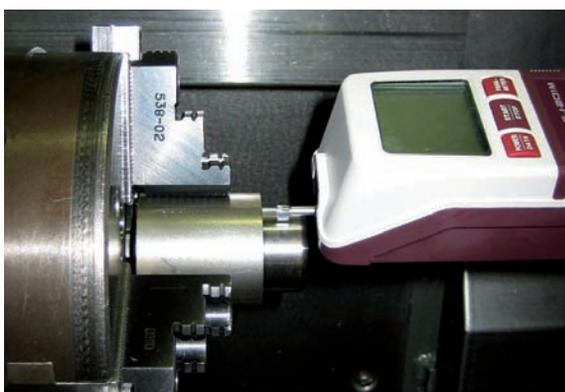
Avant de se lancer dans son étude, le candidat doit poser son problème clairement. C'est la base de toute démarche d'amélioration de la qualité. Qui ne connaît le fameux adage « un problème bien posé est à moitié résolu » ? L'objectif est donc ici d'étudier la possibilité d'éliminer la phase de polissage, au profit d'une opération de finition intégrée dans la phase de tournage.

Phase n° 2 : la synthèse des connaissances

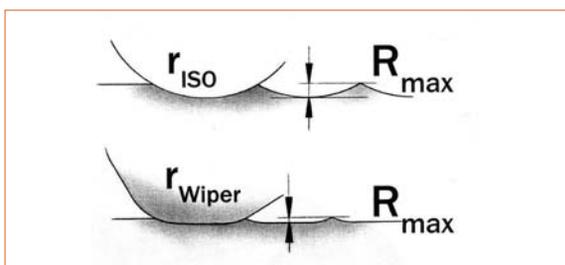
Les opérations de tournage en finition nécessitent une bonne expérience si l'on cherche à obtenir la qualité



8 Le diagramme d'Ishikawa « État de surface sur bague tournante »



9 Le rugosimètre et sa mise en situation sur machine



10 La comparaison entre les plaquettes ISO et Wiper

cible 7 tout en produisant de façon économique. Les paramètres d'influence sont nombreux et peuvent être contradictoires. La connaissance des effets de chacun d'entre eux pris séparément permet une certaine optimisation.

Le diagramme d'Ishikawa 8 est très bien adapté à la représentation des causes agissant probablement sur l'effet attendu ($R_a = 0,6 \mu\text{m}$) ; celles retenues pour mener à bien les expériences sont représentées en rouge.

Pour déterminer la réponse du système étudié, il faut effectuer des mesures de l'état de surface. L'étudiant a donc choisi un rugosimètre 9 donnant directement la valeur R_a en micromètres. Attention : il est conseillé de faire une étude de CMC (Capabilité du Moyen de Contrôle), pour ainsi veiller au parfait étalonnage de l'appareil avec le choix du filtre. De la précision de la mesure dépend la qualité de l'analyse.

La détermination des facteurs et de leurs niveaux

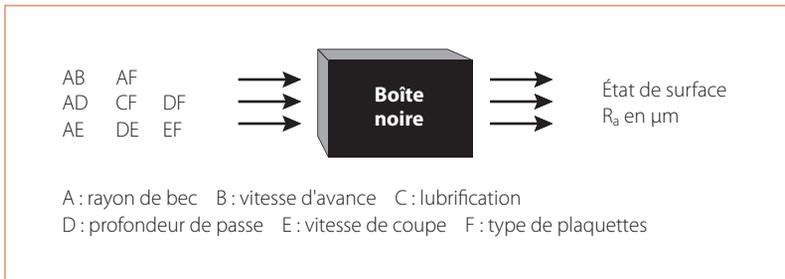
● Les facteurs

À partir des connaissances préalables et des facteurs retenus (en rouge sur l'Ishikawa), l'étudiant a choisi un périmètre de variation binaire pour chacun d'entre eux :

A : rayon de bec	0,4	0,8
B : vitesse d'avance	0,1 mm/tr	0,18 mm/tr
C : lubrification	oui	non
D : profondeur de passe	0,5 mm	2 mm
E : vitesse de coupe	230 m/min	485 m/min
F : type de plaquettes	ISO	Wiper

● L'outil

L'outil choisi est le PCLNL 2020K12 avec la technologie de plaquettes Wiper 10.



11 La boîte noire de la problématique

	M	A	B	C	D	E	F	AB	AD	AE	AF	CF	DE	DF	EF
Modalités		2	2	2	2	2	2	4	4	4	4	4	4	4	4
Degré de liberté (ddl)	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
Total ddl	$Y = M + A + B + C + D + E + F + AB + AD + AE + AF + CF + DE + DF + EF = 15$														

12 Le calcul des coefficients

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
2	1	1	1	1	1	1	1	2	2	2	2	2	2	2	2
3	1	1	1	2	2	2	2	1	1	1	1	2	2	2	2
4	1	1	1	2	2	2	2	2	2	2	2	1	1	1	1
5	1	2	2	1	1	2	2	1	1	2	2	1	1	2	2
6	1	2	2	1	1	2	2	2	2	1	1	2	2	1	1
7	1	2	2	2	2	1	1	1	1	2	2	2	2	1	1
8	1	2	2	2	2	1	1	2	2	1	1	1	1	2	2
9	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2
10	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2
11	2	1	2	2	1	2	1	1	2	1	2	2	1	2	1
12	2	1	2	2	1	2	1	2	1	2	1	1	2	1	2
13	2	2	1	1	2	2	1	1	2	2	1	1	2	2	1
14	2	2	1	1	2	2	1	2	1	1	2	2	1	1	2
15	2	2	1	2	1	1	2	1	2	2	1	2	1	1	2
16	2	2	1	2	1	1	2	2	1	1	2	1	2	2	1
	a	b	a	c	a	b	a	d	a	b	a	c	a	b	a
			b		c	c		d	d	d	d	d	d	c	b
							c			d		d	d	d	c
Groupe	1	2	3			4									

13 La table L16 (2¹⁵)

Symbole	Groupe	Difficulté de modification de niveau
○	1	Difficile
⊙	2	Assez difficile
●	3	Assez facile
●	4	Facile

14 Les symboles du niveau de difficulté de réglage des facteurs

Facteur	Groupe	Symbole
Rayon de bec	3 (assez facile)	⊙
Vitesse d'avance	4 (facile)	●
Lubrification	4 (facile)	●
Profondeur de passe	4 (facile)	●
Vitesse de coupe	4 (facile)	●
Type de plaquettes	3 (assez facile)	⊙

15 L'affectation des niveaux de difficulté estimés par l'étudiant

Il y a plusieurs moyens d'accroître la qualité de l'état de surface lors de l'usinage. L'un des plus efficaces est d'utiliser des plaquettes Wiper. Ce type de plaquettes à haute productivité modifie les habitudes d'usinage de l'industrie dans tous les types de matières et d'opérations. La combinaison de rayons est soigneusement étudiée, avec certaines modifications de la géométrie de plaquette. Le rayon de bec Wiper génère un profil de rugosité moins élevé grâce à un effet de planage de l'arête de coupe.

● **La stratégie**

Un plan factoriel complet nécessiterait un total de 64 essais ($X^k = 2^6$, 6 facteurs à 2 niveaux). Ce serait long, coûteux et sans doute inutile. D'où la nécessité de recourir à un plan fractionnaire avec l'étude des facteurs contrôlés et de certaines interactions sélectionnées.

● **Les interactions**

Les interactions retenues comme possibles sont : AB, AD, AE, AF, CF, DE, DF et EF. Les autres sont supposées nulles ou négligeables.

La problématique sous la forme d'une boîte noire est schématisée en 11.

Phase n° 3 : la construction du plan d'expériences

● **Le modèle expérimental à étudier**

$$Y = M + A + B + C + D + E + F + AB + AD + AE + AF + CF + DE + DF + EF$$

● **Le calcul des coefficients du modèle**

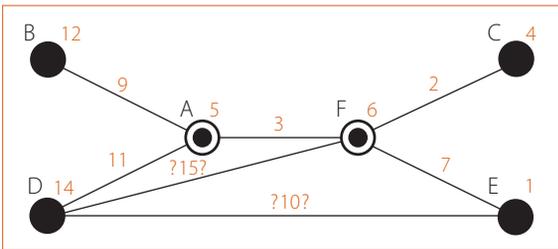
Le nombre total de degrés de liberté est de 15 12.

● **Conclusion**

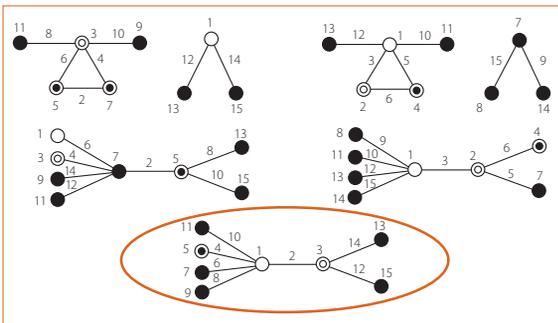
Le nombre de degrés de liberté est de 15, il faut donc une table fractionnaire orthogonale de 15 essais au minimum pour les 15 valeurs à calculer afin de connaître totalement le modèle (facteurs et interactions). Le choix se porte donc logiquement sur la table L16 de Taguchi avec interactions 13.

Il faut maintenant dessiner le graphe représentant les facteurs et leurs interactions. Pour cela, il convient d'abord de déterminer par un symbole 14 le niveau de difficulté de modification des facteurs, car celui-ci varie selon les cas. Il est plus facile, par exemple, de lancer ou d'arrêter la lubrification en appuyant sur un simple bouton que de changer de type de plaquettes par montage et démontage. L'étudiant recense donc dans un tableau les facteurs et leur niveau 15.

En s'appuyant sur le travail effectué en amont, il réalise son graphe 16 en reliant par un trait les interactions entre deux facteurs. Il le compare ensuite avec une banque de données de graphes de Taguchi de prédiction 17 afin de trouver celui le plus proche de l'étude menée (entouré en rouge), puis il place sur le sien les numéros des interactions issues du modèle (en rouge sur le graphe 16). Se



16 Le graphe de Taguchi de l'étudiant



17 Un extrait de la banque de graphes de Taguchi

Facteur	Colonne	Facteur
A	5	Le rayon de bec
B	12	L'avance
C	4	La lubrification
D	14	La profondeur de passe
E	1	La vitesse de coupe
F	6	Le type de plaquettes
AB	9	Interaction
AF	3	Interaction
AD	11	Interaction
CF	2	Interaction
DF	15	Interaction
AE	13	Interaction
DE	10	Interaction
EF	7	Interaction

18 Le tableau récapitulatif des facteurs et interactions

trouvant ainsi en présence de deux interactions qui ne correspondent pas exactement à ce dernier, il leur attribue arbitrairement des nombres (10 et 15) avec des points d'interrogation, pour signifier qu'il y a là possibilité de confusion entre les mesures et le théorique.

Chaque nombre présent sur le graphe de l'étudiant correspond à une colonne de la future matrice d'expériences. Il confectionne alors un tableau récapitulatif pour rappeler clairement à quel facteur chaque nombre est affecté 18.

Phase n° 4 : la conduite des essais

L'étudiant dresse une liste exhaustive du matériel nécessaire pour la mise en œuvre de la campagne d'essais tout en organisant son déroulement.

Il détermine ensuite la faisabilité en moyen et en temps de la campagne en rédigeant un protocole d'essai

Le matériel et l'organisation

Machine : tour à commande numérique TN 20 Ramo (caractéristiques très proches de celles du tour de l'entreprise Suretex)

Nombre d'éprouvettes : 25

- de 1 à 2 éprouvettes pour garantir une mise en œuvre parfaite de la machine
- 16 essais, avec 1 éprouvette par essai 19
- 2 éprouvettes supplémentaires en fonction de l'annulation éventuelle d'essais
- 5 éprouvettes pour les essais de validation

Classement des éprouvettes : une boîte à 16 compartiments pour une meilleure traçabilité 19

Outils : 4 types de plaquettes, Wiper 0,4 et 0,8 et ISO 0,4 et 0,8 de même géométrie avec brise-copeaux

Matière première : 1 barre de 3 mètres de S300 Pb Ø 45

Appareil de mesure : 1 rugosimètre

Temps estimé par essai : 3 minutes

Temps total prévisionnel : de 6 à 8 heures en comptant le réglage de la machine

Rappel des principales définitions et formules

Réponse : grandeur mesurée lors des essais (ici, la rugosité arithmétique R_a en μm)

Facteurs : paramètres que l'on fait varier au cours des essais, afin d'identifier leur influence sur la réponse.

Niveau : valeur prise par un facteur au cours d'un essai

Modèle expérimental : relation mathématique permettant d'exprimer la réponse en fonction des niveaux des facteurs. La démarche consiste habituellement à postuler un modèle (affine, quadratique, avec ou sans interactions...), puis à en identifier les termes et coefficients à l'aide des essais.

Interaction : dépendance entre l'influence d'un facteur et le niveau des autres facteurs. Une interaction peut être double (l'influence de A sur la réponse dépend du niveau de B) ou d'ordre plus élevé (l'influence de A dépend des niveaux conjugués de B, C, D...). En pratique, les modèles de comportement employés se limitent souvent aux interactions doubles.

M : point central du domaine de validité ou moyenne générale des essais
 $M = \Sigma \text{mesures} / \text{nb mesures}$

Effet de A au niveau i :

$$E_{Ai} = (\text{moyenne des réponses lorsque A est au niveau } i) - (\text{moyenne générale})$$

Effet de l'interaction $I_{A/B}$:

$$I_{A/B} = (\text{moyenne des réponses lorsque } A = i \text{ et } B = j) - \text{moyenne} - E_{Ai} - E_{Bj}$$

X : nombre de niveaux d'un facteur et/ou d'une interaction

Nombre de degrés de liberté (ddl) d'une variable (facteur, interaction) : nombre de variables indépendantes constituant cette variable

$$\begin{aligned} \text{ddl}_A &= n_A - 1 \\ \text{ddl}_{AB} &= \text{ddl}_A \cdot \text{ddl}_B \end{aligned}$$

r : résidu. Un résidu est la différence entre la réponse mesurée (Y) et la réponse théorique (Y') :

$$r = Y - Y'$$

Facteur	E				C	A	F					B	D	
Niveau 1	230				oui	0,4	ISO					0,1	0,5	
Niveau 2	485				non	0,8	Wiper					0,18	2	

Interactions et facteurs		E	FC	AF	C	A	F	FE	AB	DE	DA	B	AE	D	DF	Moyenne des mesures	Mesures consécutives / essais				
Essai	Colonne	1	2	3	4	5	6	7	9	10	11	12	13	14	15		1	2	3	4	5
1		230	1	1	oui	0,4	ISO	1	1	1	1	0,1	1	0,5	1	1,622	1,63	1,61	1,62	1,62	1,63
2		230	1	1	oui	0,4	ISO	1	2	2	2	0,18	2	2	2	1,816	1,8	1,83	1,82	1,82	1,81
3		230	1	1	non	0,8	Wiper	2	1	1	1	0,18	2	2	2	0,794	0,79	0,8	0,79	0,8	0,79
4		230	1	1	non	0,8	Wiper	2	2	2	2	0,1	1	0,5	1	1,678	1,69	1,66	1,68	1,68	1,68
5		230	2	2	oui	0,4	Wiper	2	1	2	2	0,1	1	2	2	0,572	0,56	0,56	0,56	0,57	0,61
6		230	2	2	oui	0,4	Wiper	2	2	1	1	0,18	2	0,5	1	2,328	2,34	2,3	2,33	2,33	2,34
7		230	2	2	non	0,8	ISO	1	1	2	2	0,18	2	0,5	1	1,162	1,15	1,15	1,16	1,17	1,18
8		230	2	2	non	0,8	ISO	1	2	1	1	0,1	1	2	2	1,000	0,98	1,02	1	1,01	0,99
9		485	1	2	oui	0,8	ISO	2	2	1	2	0,1	2	0,5	2	0,524	0,54	0,52	0,51	0,53	0,52
10		485	1	2	oui	0,8	ISO	2	1	2	1	0,18	1	2	1	1,106	1,1	1,11	1,11	1,1	1,11
11		485	1	2	non	0,4	Wiper	1	2	1	2	0,18	1	2	1	0,472	0,47	0,47	0,47	0,47	0,48
12		485	1	2	non	0,4	Wiper	1	1	2	1	0,1	2	0,5	2	1,084	1,09	1,09	1,09	1,08	1,07
13		485	2	1	oui	0,8	Wiper	1	2	2	1	0,1	2	2	1	1,998	2	2,01	2	2	1,98
14		485	2	1	oui	0,8	Wiper	1	1	1	2	0,18	1	0,5	2	1,798	1,8	1,79	1,79	1,81	1,8
15		485	2	1	non	0,4	ISO	2	2	2	1	0,18	1	0,5	2	1,778	1,77	1,79	1,78	1,78	1,77
16		485	2	1	non	0,4	ISO	2	1	1	2	0,1	2	2	1	2,038	2,05	2,03	2,06	2,06	1,99
																1,361	Moyenne générale des essais				

19 La matrice d'expériences

N° essai	Rayon de bec	Avance	Lubrification	Profondeur de passe	Vitesse de coupe	Type de plaquettes	Ordre
1	0,4	0,1	oui	0,5	230	ISO	1
2	0,4	0,18	oui	2	230	ISO	2
15	0,4	0,18	non	0,5	485	ISO	3
16	0,4	0,1	non	2	485	ISO	4
7	0,8	0,18	non	0,5	230	ISO	5
8	0,8	0,1	non	2	230	ISO	6
9	0,8	0,1	oui	0,5	485	ISO	7
10	0,8	0,18	oui	2	485	ISO	8
5	0,4	0,1	oui	2	230	Wiper	9
6	0,4	0,18	oui	0,5	230	Wiper	10
11	0,4	0,18	non	2	485	Wiper	11
12	0,4	0,1	non	0,5	485	Wiper	12
3	0,8	0,18	non	2	230	Wiper	13
4	0,8	0,1	non	0,5	230	Wiper	14
13	0,8	0,1	oui	2	485	Wiper	15
14	0,8	0,18	oui	0,5	485	Wiper	16

20 La planification du déroulement de la fabrication des éprouvettes

cohérent et complet et en figeant les conditions de fabrication (même nuance matière, même opérateur, même machine, etc.). Il est nécessaire d'avoir un cahier d'essais rigoureux dans lequel on prend des notes au fur et à mesure avant de reporter les résultats dans la matrice d'expériences 19 confectionnée.

Il est possible de modifier l'ordre des essais par rapport à la table préconisée par Taguchi, surtout quand les facteurs difficiles à régler 20 ne se trouvent pas dans les colonnes des groupes 1 et 2 (voir le bas de la table L16 18). L'étudiant décide que le type de plaquettes (ISO ou Wiper) est le paramètre le plus difficile à régler. Les tests se font donc dans un premier temps avec les plaquettes ISO, puis avec les plaquettes Wiper. Ensuite, le rayon de plaquette influence l'ordre des tests. En effet, le changement des autres paramètres est moins contraignant que le changement de plaquettes. Ce sont donc ces deux principaux paramètres qui ont indiqué l'ordre pour fabriquer les éprouvettes.

Après chaque essai, l'étudiant effectue cinq mesures consécutives sur la même éprouvette, et reporte ensuite ces données dans sa matrice 19.

Phase n° 5 : la validation des résultats

À partir des formules, il est possible de construire le graphe des effets et interactions 21. Cette manière commode de représenter l'évolution de la réponse en fonction des niveaux des différents facteurs consiste à tracer, pour chaque facteur, la moyenne des réponses obtenues lorsqu'il prend ses différents niveaux.

Ce graphe permet de visualiser, en fonction des résultats obtenus, les niveaux des facteurs qui tendent vers l'objectif de $R_a = 0,6 \mu\text{m}$. Les niveaux sélectionnés sont situés en dessous du trait rouge, réponse moyenne du domaine expérimental.

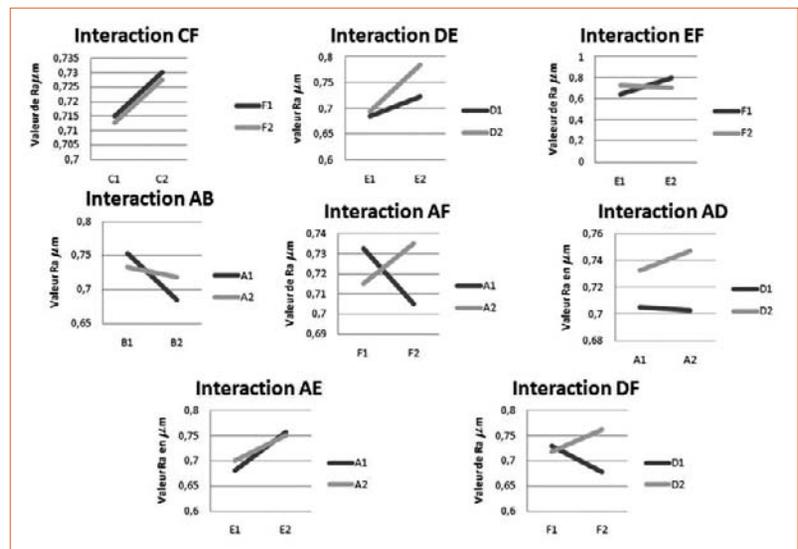
À partir des formules, on peut également construire les graphes des interactions 22. Ils sont élaborés sur le même principe que le graphe des effets des facteurs, à ceci près que l'on trace plusieurs courbes par facteur, correspondant aux effets moyens calculés selon le niveau d'un autre facteur. Par exemple, pour l'interaction CF, on peut voir le comportement du facteur F en fonction du comportement du facteur C. Des courbes confondues traduisent une interaction nulle ; des courbes très différentes traduisent une interaction forte.

Phase n° 6 : l'exploitation des résultats

L'analyse des graphes permet à l'étudiant de déduire un modèle matriciel théorique en choisissant à partir de la hiérarchisation des facteurs et des interactions le choix des niveaux de réglage des facteurs contrôlés. Il utilise maintenant le modèle pour répondre à la question posée au début de l'étude : les conditions d'usinage permettent-elles à l'opération de finition en tournage de se substituer à l'opération de polissage ?



21 Le graphe des effets et interactions



22 Les graphes des interactions

Pour confirmer le résultat théorique, il confectionne un nouveau tableau 23 et réalise un premier essai de confirmation V1. Le résidu est trop grand, le résultat réel est donc trop éloigné du résultat théorique. Des phénomènes inexpliqués subsistent. La décision de reproduire le même essai V2 avec la présence de la lubrification est prise. Le résidu est moins grand, mais le résultat réel est encore trop éloigné du résultat théorique. Des phénomènes inexpliqués subsistent, et, surtout, l'objectif de $R_a = 0,6 \mu\text{m}$ est trop éloigné.

Le candidat décide de chercher dans la matrice d'expériences la meilleure des réponses des 16 essais. Il s'agit de l'essai n° 11. Pour confirmation, il reproduit cet essai à l'identique (V3), et réalise que le résidu est toujours présent, mais moins important.

● Le modèle matriciel théorique

$$Y = M + E_{E1} + E_{C2} + E_{A1} + E_{F2} + E_{B1} + E_{D2} + E_{F2C2} + E_{A1F2} + E_{D2E1} + E_{F2E1} + E_{A1B1} + E_{D2A1} + E_{A1E1} + E_{D2F2}$$

● Le résultat théorique idéal

$$Y' = 1,361 - 0,011 - 0,110 + 0,103 - 0,020 - 0,046 - 0,136 - 0,224 - 0,330 - 0,039 - 0,008 - 0,089 - 0,103 - 0,107 - 0,190 = 0,073$$

Essai	r_e	f	Lub	a_p	V_c	Type de plaquettes	Y Résultat	Y' Résultat théorique	r (Y - Y')
V1	0,4	0,10	non	2	230	Wiper	1,03	0,073	0,957
V2	0,4	0,10	oui	2	230	Wiper	1,14	0,642	0,498
N° 11	0,4	0,18	non	2	485	Wiper	0,472	0,629	0,157
V3	0,4	0,18	non	2	485	Wiper	0,32	0,629	0,309

23 Le tableau des essais de confirmation

	Avance	Standard 0,4	Wiper 0,4	Standard 0,8	Wiper 0,8
	0,07	0,31	0,3	-	-
1 →	0,1	0,63	0,32	0,31	0,3
	0,12	0,9	0,45	0,45	0,3
	0,15	1,14	0,7	0,7	0,35
2 →	0,18	2,03	1	1,01	0,5
	0,2	2,5	1,25	1,25	0,63
	0,22	3,48	1,74	1,74	0,87
	0,25	-	-	2,25	0,9
	0,28	-	-	2,82	0,93
	0,3	-	-	3,23	1,07
	0,35	-	-	4,4	1,1
	0,4	-	-	5,75	1,44
	0,45	-	-	8,54	2,14
	0,5	-	-	10,55	2,54

24 L'abaque du fabricant

● Synthèse finale

L'étudiant explique le résidu par une présence d'interactions non nulles qui ont été négligées en amont, mais aussi par la probabilité d'existence de « bruits » (vibrations, rigidité, etc.). Les propositions d'amélioration sont de revoir les facteurs dans le diagramme d'Hishikawa et d'étendre le champ d'investigation aux autres interactions possibles, avec une table L27, par exemple. En attendant, il est possible de se satisfaire du réglage des paramètres de l'essai n° 11, qui donne $R_a = 0,32 \mu\text{m}$.

● Comparaison avec l'abaque du fabricant 24

Le premier constat est que l'obtention d'un R_a de $0,32 \mu\text{m}$ correspond bien à une plaquette Wiper de $r_e = 0,4 \text{ mm}$, mais avec une avance préconisée de $0,1 \text{ mm/tr}$.

Le second constat est que le résultat de l'essai n° 11 est de $R_a = 0,32 \mu\text{m}$ avec une plaquette Wiper de $r_e = 0,4 \text{ mm}$, mais avec une avance de $0,18 \text{ mm/tr}$, qui normalement donne un $R_a = 1 \mu\text{m}$.

Phase n° 7 : la généralisation

Malgré l'existence d'une zone d'incertitude dans l'analyse de la boîte noire, la modification du contrat de phase est

faite dans le sens du changement de la plaquette, avec le choix de $V_c = 485 \text{ m/min}$ et $a_p = 1,8 \text{ mm/tr}$. L'état de surface avec $R_a = 0,6 \mu\text{m}$ au maximum est respecté ainsi que l'angle de raccordement de $0,5 \text{ mm}$ 3.

Conclusion

Le plan d'expériences mis en place ici a permis d'identifier les conditions d'usinage conduisant à une rugosité minimale. Cet exemple montre que l'application de la méthode (ici, à l'aide d'une table de Taguchi L16) ne présente aucune difficulté particulière, et que, dans les cas les plus simples, les valeurs souhaitées peuvent être trouvées sans faire appel à des techniques mathématiques complexes.

L'étudiant, par l'application de cette méthode, a pu appréhender l'épreuve E52 avec succès. Le jour de l'examen, il a pu reproduire les mêmes résultats devant les membres du jury avec à la clé une note fort honorable. L'équipe pédagogique a la confirmation que cette approche permet d'être avantageusement intégrée au cœur de la formation de STS IPM, et encourage les collègues à se lancer dans l'aventure... Quant à la zone d'incertitude subsistante, elle nous donne des perspectives d'investigation... qui pourraient faire l'objet d'un futur sujet. ■