

BTS IPM

L'épreuve E52 traitée par les plans d'expériences

PASCAL MALO^[1]

Au cours de sa deuxième année de formation, l'étudiant en STS IPM doit présenter un projet de qualification de processus. Quand il est nécessaire d'effectuer des essais avec un grand nombre de paramètres variant, le travail peut s'avérer complexe voire impossible dans le temps imparti. Voici donc une méthode efficace de résolution de problème basée sur l'expérimentation pour aider le candidat au BTS dans sa tâche.

Depuis les années 1970, les entreprises se préoccupent de plus en plus de la qualité de leurs produits. Pour cela, ils essaient de mieux définir leurs besoins (analyse de la valeur, analyse fonctionnelle, QFD), d'analyser les effets et les criticités des produits, des processus et des moyens (Amdec), de suivre et piloter le processus (MSP).

La qualité d'un produit est sa capacité à satisfaire les besoins du client. Elle demande de savoir écouter et exprimer les besoins du client, traduire ces besoins en cible de caractéristiques produit, définir les tolérances client, savoir viser cette cible et réduire la dispersion autour de cette cible.

Il y a un problème de qualité quand le produit livré ne correspond pas aux attentes du client ou ne respecte pas les spécifications (non-conformité).

Ce problème peut venir du procédé de fabrication, qui subit un nombre important de sources de variation plus ou moins bien identifiées, maîtrisables et maîtrisées, d'une méconnaissance des liaisons, de consignes non respectées ou non adaptées...

Il s'agit donc de maîtriser et améliorer le processus.

Rappelons que tous les processus connaissent des variations. Ces variations ont des causes, et 20 % d'entre elles produisent 80 % des effets (Pareto). Si on connaît ces causes, on doit pouvoir les contrôler. C'est vrai pour les processus, mais aussi pour les produits, les services...

On évolue donc dans le domaine de l'aléatoire. Dans ce contexte, des décisions importantes sont prises à

Mots-clés

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

partir de résultats d'essais. D'où la nécessité d'une méthodologie rigoureuse pour conduire une campagne d'essais, afin d'obtenir un maximum de résultats objectifs et garantis sur le procédé ou le produit étudiés avec un minimum d'essais.

Face à la variabilité, il faut disposer de méthodes de recherche expérimentale et de résolution de problèmes.

Comment conduire une recherche expérimentale ?

L'organigramme de conduite d'une recherche est donné en figure 1.

Lorsque le problème est posé, bien défini avec ses objectifs 1, il faut le décomposer en une série de questions bien hiérarchisées, assorties des décisions et risques correspondants (une question est pertinente si la décision prise est différente selon la réponse) 2.

On dresse alors l'inventaire des informations dont on dispose 3, grâce aux connaissances théoriques, aux recherches bibliographiques, à l'expérience antérieure, aux raisonnements par analogie..., et on se demande si ce « capital informations » est suffisant 4 :

- Si oui, on peut alors élaborer les réponses 10, et, dans une phase de réflexion, vérifier leur adéquation avec le problème posé 11. Si l'on a bien répondu aux questions actualisées 12, prenant en compte l'évolution possible

Une histoire déjà longue

Les plans d'expériences sont issus des travaux menés dans les années 1920 par Ronald Aylmer Fisher, l'un des fondateurs de la statistique moderne. En 1935, Frank Yates en a proposé une approche moins mathématique en introduisant les interactions.

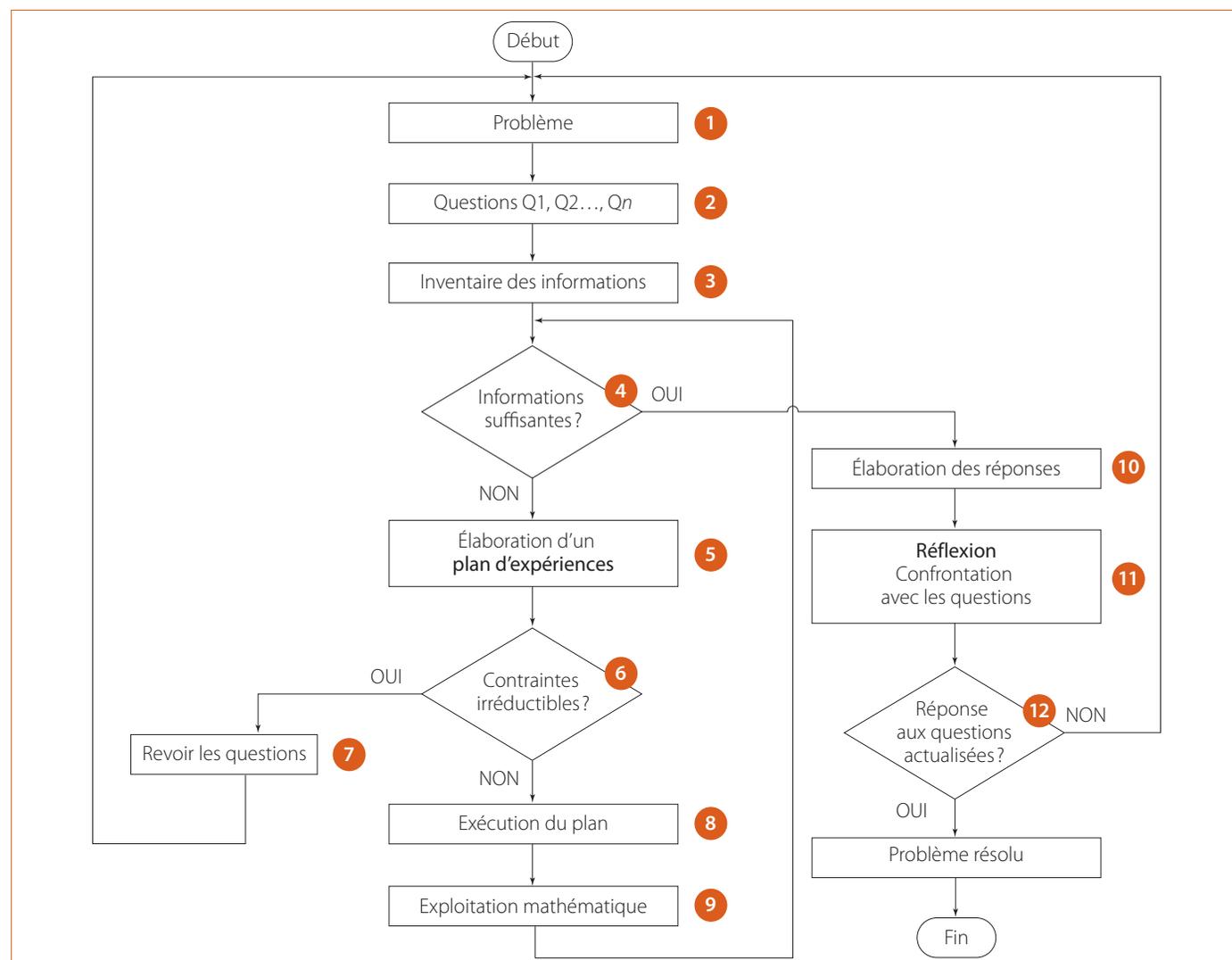
Cette méthode a été utilisée tout d'abord dans le domaine de l'agronomie, mais elle n'est parvenue aux entreprises occidentales qu'au début des années 1970. L'une des raisons de ce retard est la complexité de sa partie théorique. C'est à Genichi Taguchi que l'on doit, dans les années 1950, la simplification et la clarification qui ont permis l'adoption des plans d'expériences par Toyota. Il a créé les tables orthogonales et a introduit l'étude du rapport du signal/bruit, puis, en 1980, la fonction « perte de qualité », permettant de chiffrer les pertes pour l'entreprise dues à l'absence d'amélioration de ses processus.

Aujourd'hui, cette méthode est indispensable à tout industriel soucieux d'améliorer la qualité de ses produits, et ce, quel que soit son secteur d'activités. En réponse à son utilisation croissante, de nombreux logiciels de plans d'expériences sont apparus depuis 1990.

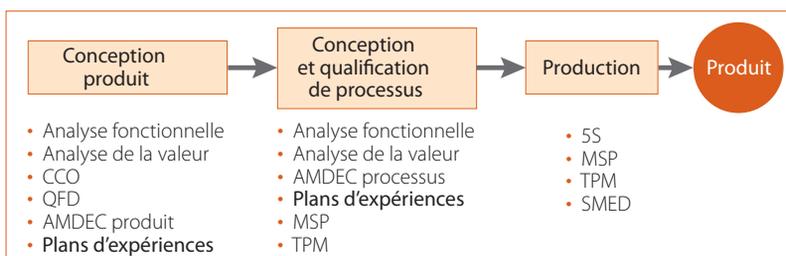
Nota : La démarche expérimentale et les plans d'expériences étaient déjà présents dans le référentiel du BTS Productique (C26, « définir et mettre en œuvre des procédures d'essai et/ou de contrôles permettant de qualifier un processus »).

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

(première partie)



1 L'organigramme de conduite d'une recherche



2 La place des plans d'expériences parmi les méthodes et outils de la qualité

du contexte, on a résolu le problème, sans cela il faut reprendre au début avec le nouveau contexte ¹.

• Sinon, il faut réaliser des expériences pour augmenter le capital informations. Ces expériences doivent être planifiées. Leur ensemble constitue un plan d'expériences ⁵.

L'intérêt de cette planification est double : d'une part, elle permet de vérifier que les essais prévus permettent de répondre aux questions posées, sans oubli (validité du plan) ni redondance (économie), d'autre part, elle

permet d'évaluer correctement la charge de travail, les besoins en matériels et en personnels.

Avant d'exécuter le plan, l'expérimentateur doit s'assurer qu'aucune contrainte irréductible ne s'oppose à sa réalisation 6 :

- S'il en existe 7, il faut soit confier le problème à quelqu'un qui n'a pas ces contraintes, soit voir quelles questions peuvent être abandonnées pour que le plan soit réalisable.
- Sinon, on exécute le plan 8.

Les résultats sont exploités à l'aide des outils mathématiques 9, et le capital informations est augmenté d'autant.

Il est prudent de parcourir en plusieurs fois la boucle 4, 5, 6, 8 et 9. Ce traitement séquentiel évitera des surprises désagréables s'il y a eu évolution des données du problème (contexte, changement dans la hiérarchie des questions, domaine expérimental mal défini...).

Les plans d'expériences

Beaucoup de processus dépendent d'un grand nombre de paramètres externes (appelés *facteurs*) pour lesquels on ne possède pas de modèles analytiques. On parle de *boîte noire* lorsqu'il est impossible de prévoir exactement les réponses, qui sont aléatoires. La connaissance incertaine des mécanismes ne permet que de suspecter les facteurs susceptibles d'influer sur les réponses. Se pose alors une série de questions :

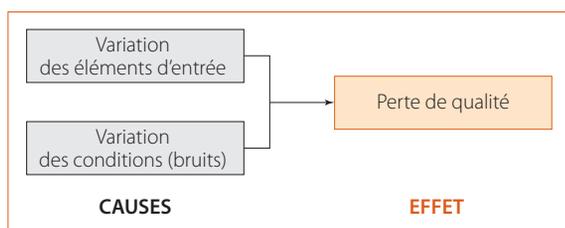
- Quels sont les facteurs les plus influents ?
- Existe-t-il des interactions entre les facteurs (corrélations) ?
- Peut-on linéariser le processus en fonction de ces facteurs, et le modèle ainsi obtenu est-il prédictif ?
- Comment obtenir le maximum d'informations tout en minimisant le nombre de points de mesure du processus ?

La méthodologie du plan d'expériences permet de répondre à ces questions.

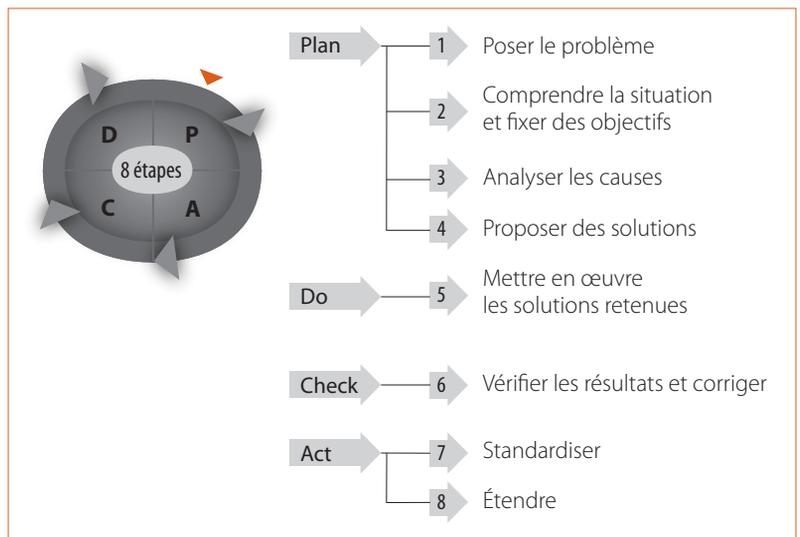
Un plan d'expériences est une suite d'essais rigoureusement organisée par avance de façon à déterminer, en un minimum d'essais et avec un maximum de précision, l'influence des différents facteurs contrôlés.

Il s'agit, une fois établis des objectifs précis, de mettre en œuvre les moyens nécessaires pour les atteindre dans un délai prévu par une suite d'opérations ordonnées qui permet :

- de minimaliser le nombre d'essais ;
- d'étudier un très grand nombre de facteurs ;
- de modéliser les résultats ;



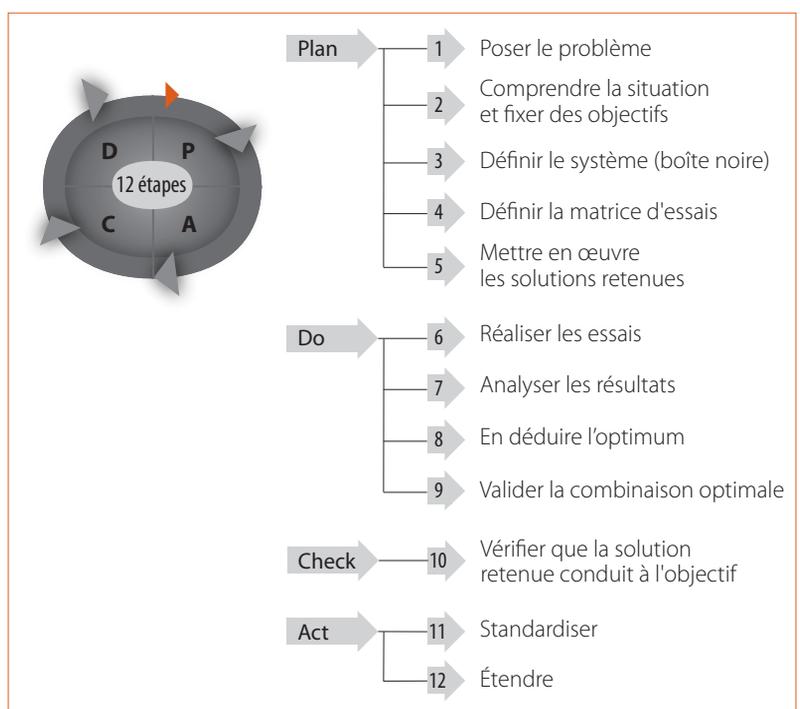
3 les causes de perte de qualité



4 La roue de Deming (PDCA) adaptée à une méthode classique de résolution de problème

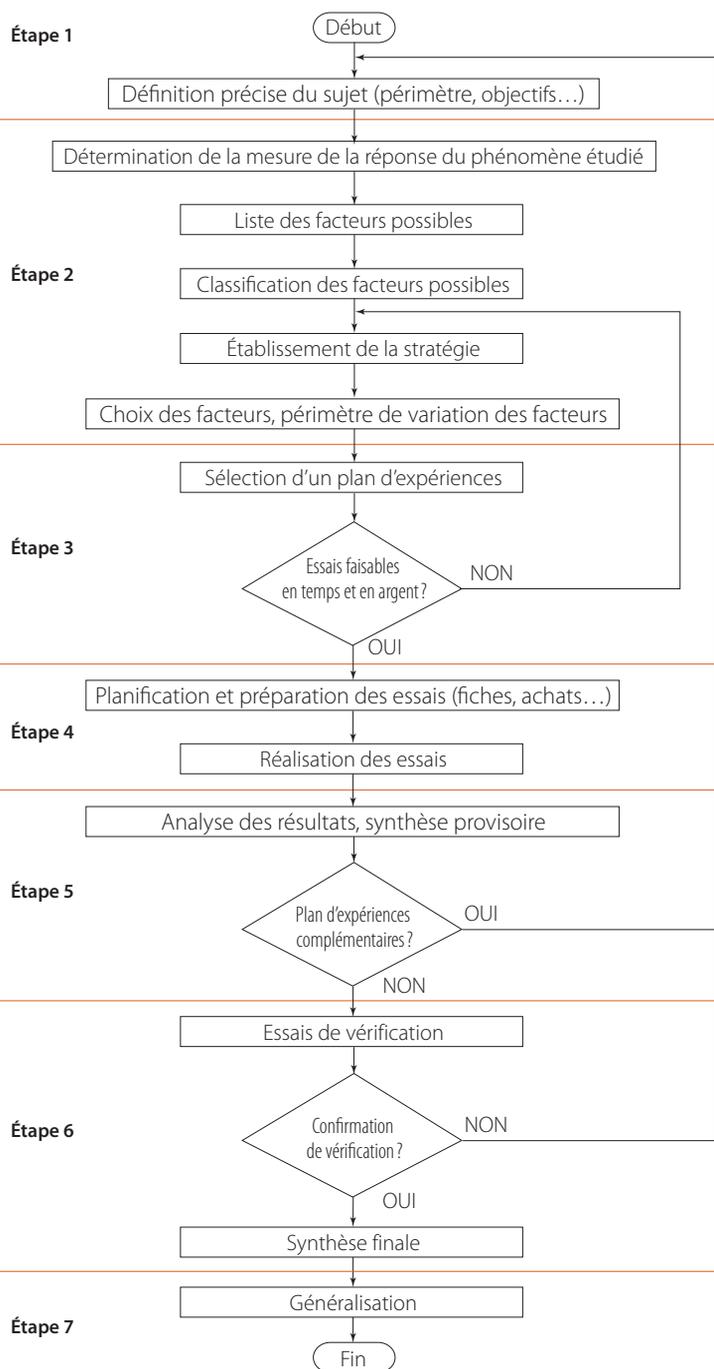
| N° des essais | Paramètres | | | | | | | Résultats des essais |
|---------------|------------|---|---|---|---|---|---|----------------------|
| | A | B | C | D | E | F | G | |
| 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | |
| 2 | 1 | 1 | 1 | 2 | 2 | 2 | 2 | |
| 3 | 1 | 2 | 2 | 1 | 1 | 2 | 2 | |
| 4 | 1 | 2 | 2 | 2 | 2 | 1 | 1 | |
| 5 | 2 | 1 | 2 | 2 | 2 | 1 | 2 | |
| 6 | 2 | 2 | 2 | 2 | 1 | 2 | 1 | |
| 7 | 2 | 2 | 1 | 1 | 2 | 2 | 1 | |
| 8 | 2 | 2 | 1 | 2 | 1 | 1 | 2 | |

5 La matrice d'expériences



6 La roue de Deming (PDCA) adaptée au plan d'expériences

La conduite d'un plan d'expériences



Étape 1

Définition précise du sujet

Pour définir le périmètre et les objectifs, on utilisera la méthode du QQQCP

Étape 2

Synthèse des connaissances (brainstorming)

Détermination de la réponse (par une mesure) du système étudié

Recensement des paramètres pouvant influencer sur la réponse (diagramme causes-effets)

Établissement de la stratégie

Choix des facteurs (matrice de décision)

Périmètre de variation des facteurs

Étape 3

Construction du plan d'expériences

Optimisation du plan d'expériences

Choix d'une stratégie

Rédaction du protocole d'essai

Étape 4

Conduite des essais

Assister à tous les essais ou au minimum aux premiers essais

Tenir un cahier des essais

Étape 5

Validation des résultats obtenus

Analyse des résultats

Synthèse provisoire

Étape 6

Exploitation des résultats

Essais de vérification

Synthèse finale

Si la solution est trouvée, passage à l'étape 7

Si la solution n'est pas satisfaisante, reposer le problème et recommencer la démarche

Étape 7

Généralisation

Diffuser les résultats

Faciliter la méthode pour de nouvelles applications

Mettre en place des nouveaux modes opératoires

Mise en place d'un contrôle statistique (MSP) sur les caractéristiques importantes

Mise en place de dispositifs anti-erreur (SAE)

– de donner des résultats avec une bonne précision.

Les plans d'expériences s'inscrivent dans la démarche de qualité totale au même titre que les autres outils statistiques **2**. Ils cherchent les causes d'une non-qualité, ou plus positivement les paramètres pouvant améliorer la qualité actuelle. La méthode des plans d'expériences est un outil expérimental puissant indispensable pour conduire une étude de façon optimale. Elle est utilisée dans de nombreux domaines industriels ou de recherche pour la conception et l'amélioration de produits et de

processus – surtout s'ils sont complexes (voir l'encadré « Bon plan ou pas? »).

La résolution de problèmes

Deux méthodes

Le problème qui peut se poser pour la qualification et l'optimisation d'un processus industriel réside dans la variabilité des éléments d'entrée et des conditions de fabrication, qui entraîne une perte de qualité **3**.

Classiquement, quand on constate une dispersion ou une instabilité des caractéristiques d'un produit lors de sa fabrication ou de son utilisation, on en recherche les causes afin de les réduire, voire les éliminer. Il semble alors logique de résoudre le problème avec une méthode classique **4**, assortie de quelques essais basés sur le principe de ne faire varier qu'un seul paramètre à la fois pour justifier certaines hypothèses.

En règle générale, les résultats de ces essais montrent que les responsables de la perte de qualité sont les facteurs de « bruit », généralement multiples et difficilement maîtrisables, dus à la variabilité des conditions d'environnement (température, hygrométrie, poussières...), des caractéristiques des matières premières et des composants utilisés, des façons de procéder des différents opérateurs, etc. De ce fait, les propositions de solution s'orientent vers le resserrement des tolérances, la diversification des produits, la modification de la composition des matières premières, l'utilisation de machines plus performantes, le renforcement des procédures de réglage et de contrôle, la climatisation des locaux...

Toutes ces solutions ont un coût qui souvent n'est pas négligeable, et le résultat n'est pas toujours à la hauteur de l'investissement. Et, si ce dernier est estimé trop important, on se satisfera, après une multitude de réglages, de trouver un état du processus acceptable, qui restera figé. C'est le principe du « on ne sait pas comment, mais ça marche, ne touchons plus à rien ».

A contrario, les plans d'expériences ne cherchent pas à éliminer les causes, difficilement maîtrisables, mais leur effet – la dispersion ou l'instabilité des caractéristiques d'un produit. Le principe général en est de rechercher la combinaison des facteurs d'entrée qui donne systématiquement le meilleur résultat en sortie, celle où les influences cumulées des différents facteurs se compensent pour donner en sortie un écart minimal par rapport aux valeurs nominales. La seule manière de trouver cette combinaison est d'en expérimenter plusieurs, afin de mettre en évidence l'influence de chaque facteur. Cette campagne d'essais est planifiée selon une *matrice d'expériences* **5**.

On le voit, la stratégie adoptée par les plans d'expériences est diamétralement opposée à celle de la méthode classique : elle s'attache non pas à éliminer les facteurs parasites, mais à minimaliser leur impact (voir en encadré « Méthode traditionnelle vs plan d'expériences »). Concrètement, elle consiste à identifier les combinaisons de paramètres qui réduisent les effets des causes, sans s'attaquer directement à celles-ci. La méthode de résolution suit le schéma global que propose la roue de Deming, mais prend en compte l'aspect expérimentation **6**.

La méthode des plans d'expériences est souvent trois à quatre fois plus efficace que les démarches habituelles de conduite d'essais, autrement dit elle permet d'arriver aux mêmes résultats avec trois à quatre fois moins

► Bon plan ou pas ?

Les trois conditions qui justifient l'utilisation d'un plan d'expériences :

- Le problème expérimental ressemble à une « boîte noire ».
- On a des soupçons plutôt que des certitudes.
- Le problème est multifactoriel.

Dans quels cas ne pas recourir à un plan d'expériences ?

- Quand les mécanismes pilotant la boîte noire sont connus. Un plan d'expériences n'est pas un prétexte à réinventer le fil à couper le beurre.
- Quand la réponse est trop dispersée. C'est le cas des durées de vie en fiabilité, qui en outre ont la mauvaise idée de suivre une loi non normale (Weibull).
- Pour démontrer un niveau de fiabilité. Un plan d'expériences sert à concevoir un bon produit, vient ensuite l'essai de fiabilité, qui en démontre la longévité.

d'essais. Des résultats, qui, aisément modélisables, sont faciles à présenter à des non-spécialistes.

La démarche de conduite d'un plan d'expériences est détaillée en encadré.

Les points clés

● La définition de l'objectif

Le problème à résoudre doit relever de la méthode des plans d'expériences (boîte noire). L'objectif doit être parfaitement défini. On peut procéder à des investigations préalables en vue de limiter et de localiser exactement le sujet à traiter. Il convient de le formaliser par écrit, en faisant un exposé de la situation actuelle (machines utilisées, matière consommée...) et en précisant les caractéristiques à optimiser, classées par ordre de priorité. Pour chaque caractéristique, il faut préciser la valeur à atteindre. Le document de travail doit indiquer les protocoles de réalisation de l'expérimentation et de mesure des résultats, ainsi que le calendrier et le budget de réalisation.

● La détermination des critères de qualité

Le choix des caractéristiques à optimiser et des modalités de leur mesure s'avère l'étape la plus critique de la conception d'une expérimentation si l'on veut que cette dernière soit fiable et efficace. D'une manière générale, il faut choisir des caractéristiques en connexion directe avec l'énergie – quelle qu'elle soit et sous toutes ses formes – mise en œuvre dans le système étudié. L'acuité, la précision et la fiabilité de la mesure des résultats sont primordiales. Il convient de définir de manière pragmatique le nombre de mesures à effectuer, en fonction des connaissances techniques quant au sujet à traiter et du budget alloué.

● Le choix des facteurs à tester

Il faut respecter les mêmes conditions que pour le choix des critères de qualité. Les facteurs qui accroissent, consomment ou transforment l'énergie du système ont des chances d'influer sur les résultats. Les facteurs retenus doivent être réellement indépendants les uns des autres. Plus on teste de facteurs, plus on accroît

les chances de trouver les facteurs influents. Pour obtenir des effets bien différenciés, il faut choisir des modalités de réglage pertinentes.

● La préparation de l'expérimentation

C'est une étape importante, qui doit mobiliser toutes les compétences requises. Elle est menée par le groupe de réflexion, réunissant les personnes qui possèdent les meilleures compétences théoriques, technologiques et pratiques quant au sujet à traiter.

● La recherche de stratégie pour l'étude des interactions

Il convient d'apprécier l'utilité de la connaissance précise des interactions risquant de se produire lors de l'expérimentation et d'estimer correctement le coût de leur étude, qui doit rester raisonnable. Il y a plus à gagner à multiplier les facteurs qu'à s'appesantir sur les problèmes d'interactions.

On peut procéder de manière pragmatique, en deux phases : d'abord un dégrossissage permettant d'identifier les deux à quatre facteurs les plus influents ; ensuite, si nécessaire, l'étude de l'interaction de ces facteurs à l'aide d'une petite expérimentation complémentaire destinée à affiner les résultats.

● La rigueur dans la préparation et la réalisation de l'expérimentation

Rigueur et précision sont indispensables à l'obtention de résultats satisfaisants. Trois documents doivent être formalisés minutieusement : un protocole de réalisation de l'expérimentation, un protocole de mesure des résultats et une feuille d'essai pour chaque essai à réaliser.

● La validation de l'expérimentation

Un essai de validation est indispensable ; si les résultats obtenus ne concordent pas avec les prévisions, il est nécessaire de chercher des explications, parfois en menant une véritable investigation pour déterminer les facteurs ayant varié.

Les conditions de la réussite

● Avoir les moyens d'expérimenter

En effet, cette méthode a quand même quelques inconvénients : elle demande l'implication d'une équipe, du temps, des fonds et du matériel.

● Choisir moins de dix paramètres

Ces paramètres sont en fait les causes chiffrables ; l'expérience montre qu'en moyenne dix critères peuvent suffire, mais évidemment il faut bien les choisir sans en omettre.

● Maîtriser les paramètres

Puisque la méthode consiste à faire intervenir ces paramètres afin de savoir s'ils sont conséquents pour le processus, il faut savoir donner des valeurs et les stabiliser pour que le test soit efficace et analysable.

● Mesurer la réponse avec précision

Une fois tous les paramètres appliqués au processus, on sait lesquels peuvent être utilisés, mais il faut faire attention aux interactions. En effet, un paramètre qui semble insignifiant pour le processus peut interagir avec un autre de façon décisive.

● Suivre rigoureusement la démarche

Étant donné qu'elle suit un plan ordonné, il faut bien évidemment la respecter.

Les plans d'expériences et le BTS IPM

Le champ d'application est extrêmement vaste, et chacun est libre de l'étendre à de nouveaux domaines ou de nouveaux usages. Cette approche pragmatique, par étapes successives, fait appel au bon sens et à la connaissance des phénomènes acquise au cours des années par les étudiants. Cette connaissance, qui s'accroît au fur et à mesure des expérimentations, est évidemment la clé qui permet de limiter le nombre d'essais.

Les plans d'expériences constituent donc un puissant moyen naturel de formation.

La pédagogie est essentiellement pratique, et se limite au strict nécessaire quant aux rappels et développements théoriques. Chaque étape de l'apprentissage s'appuie sur l'application des méthodes et outils. Pour chaque méthode ou outil sont précisés ses objectifs, ses fondements, les domaines et contraintes de son utilisation, la méthodologie de sa mise en œuvre, des commentaires et interprétations, des conseils clairs et pragmatiques.

Mais, sans méticulosité, précision et rigueur dans les procédures de réalisation des essais et mesures, l'interprétation et la reproductibilité des résultats seront hasardeuses. L'expérience enseigne qu'il faut s'astreindre à formaliser minutieusement ces procédures dans les documents.

Les objectifs

Il s'agit de permettre aux étudiants de pratiquer, de façon autonome et avec assurance, une méthode destinée à décupler l'efficacité des campagnes expérimentales (essais) ou de simulation (calculs) pour le développement, l'amélioration ou la maîtrise des performances de produits ou processus.

Dans le cadre de l'épreuve professionnelle de synthèse (E62) du BTS productique (ancienne version du

► Méthode traditionnelle vs plan d'expériences

La méthode traditionnelle :

- n'est pas rigoureuse
- est longue et coûteuse
- n'expérimente pas toutes les solutions
- ne tient pas compte des interactions entre facteurs
- ne donne pas de résultats précis

La méthode des plans d'expériences :

- est rigoureuse
- est moins coûteuse et plus rapide car elle limite les essais
- expérimente toutes les solutions
- tient compte des interactions entre facteurs
- donne des résultats précis

BTS IPM), il était courant que les étudiants n'abordent pas, ou que partiellement, faute de temps et de savoir-faire, la qualification et l'optimisation de processus, support d'étude de leur 2^e année. L'épreuve E52 (« Présentation du projet de qualification de processus », sous-épreuve de l'épreuve E5, « Avant-projet et projet d'industrialisation ») du BTS IPM (référentiel de 2005) a permis de combler ce manque, répondant ainsi à une attente d'industriels souhaitant s'entourer de techniciens disposant de compétences en qualification et optimisation de processus. Elle porte entre autres sur les compétences C12, « définir et mettre en œuvre des essais réels et/ou par simulation permettant de qualifier un processus », et C15, « proposer des solutions d'amélioration technico-économique du processus ». La démarche des plans d'expériences répond parfaitement à ces exigences.

Mais elle peut également s'inscrire dans les différentes activités de travaux pratiques, en fonction des objectifs pédagogiques fixés par l'enseignant :

- **Activités d'observation** : identifier ; désigner ; décrire ; reconnaître ; constater...

- Appréhender les phénomènes observés de manière qualitative (les paramètres à maîtriser et les facteurs bruit).

- **Activités d'expérimentation** : conduire des essais ; produire ; simuler ; mesurer...

- 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...

- Comprendre, par exemple, le fonctionnement du processus ou la chronologie d'opérations.

- **Activités de réalisation, de validation ou d'évaluation** : choisir ; construire ; mettre au point une démarche expérimentale ; faire les essais...

- Associer des connaissances afin de mieux les assimiler.

Procédant d'une démarche pédagogique, ces activités ont pour finalité de :

- **Faciliter l'appropriation des connaissances** par l'action des élèves (réalisation, observation, expérimentation, manipulation) ;

- **Formaliser et structurer ces connaissances** à travers des activités de synthèse (validation, évaluation), et ce, à partir de pédagogies inductives ou déductives mettant en œuvre des travaux pratiques ou dirigés ;

- **Mettre en œuvre des évaluations** en cohérence avec les objectifs visés.

► Les points forts de la méthode

- Démarche organisée
- Analyse simple
- Résultats fiables
- Capitalisation des résultats
- Outil de communication graphique

L'impact sur les enseignements

L'approche expérimentale et la méthode des plans d'expériences vont nous demander de changer certaines habitudes :

- **La façon de poser le problème**

Il s'agit de délimiter clairement le phénomène physique étudié, de le décrire en termes de système en identifiant ses entrées et ses sorties, et non de chercher à expliquer son mode de fonctionnement. Bien que cette façon de poser un problème puisse paraître évidente, elle nécessite, de la part de l'étudiant, un certain effort pour s'affranchir de ses préoccupations focalisées en général sur les équations régissant le phénomène.

- **La façon de construire une campagne d'essais**

La construction du plan d'expériences conduira l'étudiant à faire varier plusieurs facteurs à la fois, ce qui va à l'encontre du sacro-saint principe selon lequel il ne faut faire varier qu'un seul facteur à la fois sinon il est impossible de comprendre ce qui se passe.

- **La façon de construire un argumentaire**

La démarche des plans d'expériences prône le langage des faits afin de substituer aux échanges d'opinions des discussions argumentées portant sur des données objectives. Le langage des chiffres est particulièrement bien approprié pour transmettre une information factuelle et précise. Un étudiant sera mieux armé lors de la présentation orale de son mémoire d'études avec un argumentaire chiffré provenant de l'exploitation d'un plan d'expériences, qui contribuera à l'instauration d'échanges efficaces.

La mise en œuvre d'une démarche expérimentale nécessite de la part de chacun un changement profond dans certaines habitudes de travail ; une telle révolution ne peut être obtenue par un coup de baguette magique, aussi nécessite-t-elle toute une stratégie d'implantation, qui doit être décidée par l'équipe pédagogique, et une formation appropriée.

Penser plans d'expériences doit devenir un réflexe.

Nous verrons prochainement comment appliquer cette méthode à travers un exemple concret, tiré d'un sujet de l'épreuve E52, qui devrait rassurer ceux qui craignent encore que cette méthode soit trop lourde à faire passer auprès des étudiants de STS IPM. ■