

Les Plans d'Expériences : un outil d'aide à la conception du Produit et des Essais par / by

J. DEMONSANT
Institut Renault de la Qualité*

RESUME

Les plans d'expériences permettent, non seulement, d'optimiser les performances d'un produit, mais aussi de vérifier sa faible sensibilité, -- sa « robustesse » --, aux conditions de fabrication et d'environnement; un premier exemple illustre ce point.

La méthode des Plans d'expériences peut également s'appliquer à la mise au point d'une procédure d'essai; dans le deuxième cas présenté, l'objectif visé est la sélection des contraintes d'environnement à introduire dans un essai destiné à valider la fiabilité d'un mécanisme.

Ces deux exemples démontrent la synergie existant entre moyens de simulation de l'environnement et méthode des plans d'expériences.

ABSTRACT

Design of Experiments as a tool for product design and tests

Design of Experiments allows, not only, optimizing the product performances, but also validates its low sensitivity, -- its « robustness » --, towards Fabrication and Environment conditions; a first example illustrates this point.

The Design of Experiments method can also be used to perfect a test procedure; in the second case, the aimed target is selecting Environment constraints which have to be introduced in a mechanism Reliability test.

These two examples show the synergy between Environment simulation means and Design of Experiments method.

Premier exemple : mise au point d'une solution non bruyante

Le problème: lors de l'essai d'un de nos véhicules en cours d'étude, un bruit qualifié de craquement est apparu en roulage par temps froid, en provenance de l'avant du véhicule; les premières investigations menées par nos spécialistes ont permis de localiser la source de ce bruit: il s'agissait d'un bruit provoqué par le contact entre le protecteur de serti de porte AV et l'enjoliveur de pare-brise.

Pour mettre au point une solution non bruyante, la démarche suivante a été adoptée:

1/ réalisation d'un Plan d'Expériences afin de sélectionner la ou les solutions donnant un bon résultat sur un véhicule neuf;

2/ réalisation d'un essai de vieillissement accéléré, afin de vérifier que les solutions sélectionnées à la fin de la première étape restent bonnes au terme de cet essai représentant plusieurs années en clientèle.

** précédemment, Centre technique Renault - 91510 Lardy.*

Cet article a fait l'objet d'une première communication au colloque ASTELAB organisé par l'Association pour les Sciences et Techniques de l'Environnement - Paris - juin 1992

La formalisation du problème

Objectif assigné au plan d'expériences :

trouver une conception non bruyante,

- quelles que soient les dispersions obtenues en usine dans le montage de la porte, du moment que celles-ci respectent les tolérances,

et

- quelles que soient les conditions d'utilisation de la voiture: type de routes et conditions climatiques.

Moyen d'essai :

simulateur routier climatique

caractéristiques du banc: deux vérins hydrauliques verticaux; plage de variation de la température: de - 40° C à + 80° C.

Définition des facteurs et modalités retenues :

-Facteurs de conception:

... Enjoliveur de pare-brise: les trois modalités retenues, -- notées E1, E2, E3 --, correspondent à des matériaux différents;

... Protecteur de serti: trois modalités correspondant à des produits différant par le matériau et par la forme, -- notées P1, P2, P3 --, ont été retenues;

-Facteurs de montage:

« Serrage » de la porte: trois conditions de réglage de la porte par rapport à la caisse ont été retenues correspondant respectivement à un jeu minimum, nominal et maximum.

-Facteurs d' environnement:

... Profil routier: trois profils simplifiés, -- de type sinus --, à simuler.

... Température: - 30° C; - 10° C; + 10° C.

Choix d'une première réponse :

Afin de pouvoir appliquer la méthode des plans d'expériences, il est impératif de disposer d'un critère quantifié caractérisant la réponse du système; il est, par ailleurs, souhaitable que cette réponse soit la plus continue possible pour que le plan soit efficace, et même que cette réponse obéisse à une loi normale pour que l'on puisse faire appel, en toute rigueur, aux tests d'analyse de la variance.

Dans notre cas, la réponse retenue était la détection ou la non détection d'un bruit parasite par l'oreille d'un technicien spécialisé dans l'écoute des bruits; la valeur numérique attribuée à la réponse était 0 en l'absence de bruit, 1 en présence du bruit; une valeur intermédiaire (0,5) a été réservée aux cas douteux.

Choix d'une deuxième réponse :

Afin de se rapprocher du cas d'une réponse plus continue, le « stratagème » suivant a été imaginé:

chaque objet , -- c'est-à-dire, la voiture support équipée d'un enjoliveur et d'un protecteur donnés, la porte AV étant réglée à l'une des modalités prévues -- a été jugée successivement dans les différentes configurations de roulage et de température. Dans chacune de ces configurations, une note « primaire » valant 0, 0.5 ou 1 était attribuée selon la méthode exposée ci-dessus; chacune de ces configurations a alors été affectée d'une pénalité, d'autant plus importante que la configuration

considérée était représentative d'une situation plus fréquente pour le client; ainsi les températures élevées ont-elles été plus fortement pénalisées que les températures basses. Le calcul de la somme pondérée des pénalités associée à chaque objet permet alors de lui affecter une note de démerite, d'autant plus élevée que l'objet est mal jugé.

pénalité -->	température: -30°C			température: -10°C			température: +10°C			Réponse : démerite		
	Profil routier			Profil routier			Profil routier					
	R1	R2	R3	R1	R2	R3	R1	R2	R3			
	5	5	5	10	10	10	50	50	50			
Prot	Enjo	serr										
P1	E1	m	0	1	0	1	1	1	0	1	1	135
P1	E1	n	0	0	0	1	1	1	0	0	0	30
P1	E1	M	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Facteur "serrage de la porte" : m = mini n = nominal M = maxi

Dans ce tableau l'apparition du bruit de craquement est codé par une variable indicatrice en 0/1.
On lit, par exemple, qu'avec le protecteur P1, l'enjoliveur E1, la porte étant réglée avec un serrage minimum (m), le craquement est apparu dans les conditions suivantes :

- à - 30°C avec le profil routier R2 ;
- à - 10°C avec chacun des trois profils routier simulés ;
- à + 10°C avec les deux profils routiers R2 et R3.

Cette manière de faire:

- conduit à une réponse, certes pas véritablement continue, mais pouvant prendre un certain nombre de valeurs;
- intègre les facteurs d'environnement à la réponse.

Construction du plan d'expériences

Du fait de l'intervention de trois types de facteurs, un plan « croisé » au sens de G. Taguchi, paraît tout à fait approprié.

Les facteurs « bruit » au sens de Taguchi sont ici de deux natures:

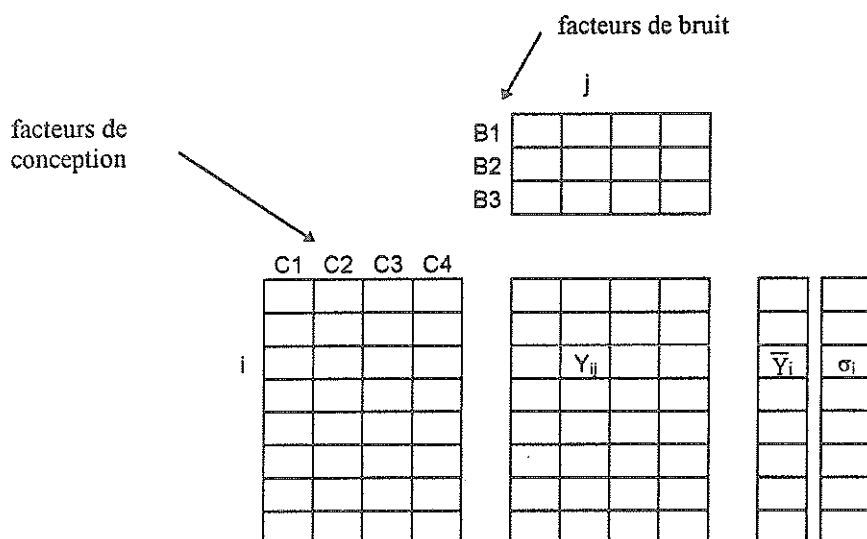
- les facteurs de montage du véhicule;
- les facteurs d'environnement;

ces derniers facteurs ayant été intégrés à la réponse, les facteurs de montage qui se limitent ici à un seul facteur sont alors pris en compte en tant que facteur « bruit » à croiser avec les facteurs de conception.

Compte tenu du faible nombre de facteurs, le plan croisé obtenu est un plan factoriel complet: 9 x 3 objets sont essayés dans les 9 configurations d'environnement choisies.

Plan « croisé »

Un plan « croisé » au sens de Taguchi est le produit cartésien de deux plans d'expériences; le premier plan est construit à partir des facteurs de conception du produit tandis que le second porte sur les facteurs dits de « bruit »; ces derniers facteurs sont des facteurs non maîtrisables par le concepteur, mais susceptibles d'altérer la performance du produit. Le second plan, puisqu'il porte sur les facteurs de bruit, n'est, bien sûr, envisageable que si l'on est capable de simuler expérimentalement les facteurs de « bruit ».



Y_{ij} représente la réponse observée pour la combinaison i du plan d'expérience portant sur les facteurs de conception et dans les conditions de bruit définies par la combinaison j du plan d'expérience portant sur les facteurs de bruit.

Le but d'un plan d'expériences « croisé » est alors de trouver les valeurs à retenir pour les facteurs de conception afin d'obtenir une conception « robuste », c'est-à-dire qui minimise l'influence des facteurs de « bruit » sur la performance, tout en assurant un niveau minimum pour la performance moyenne.

Dépouillement du plan

Deux types de dépouillement ont été menés.

Dépouillement avec la première réponse définie ci-dessus; dans ce cas, les facteurs d'environnement sont considérés comme des facteurs du Plan, ce qui permet:

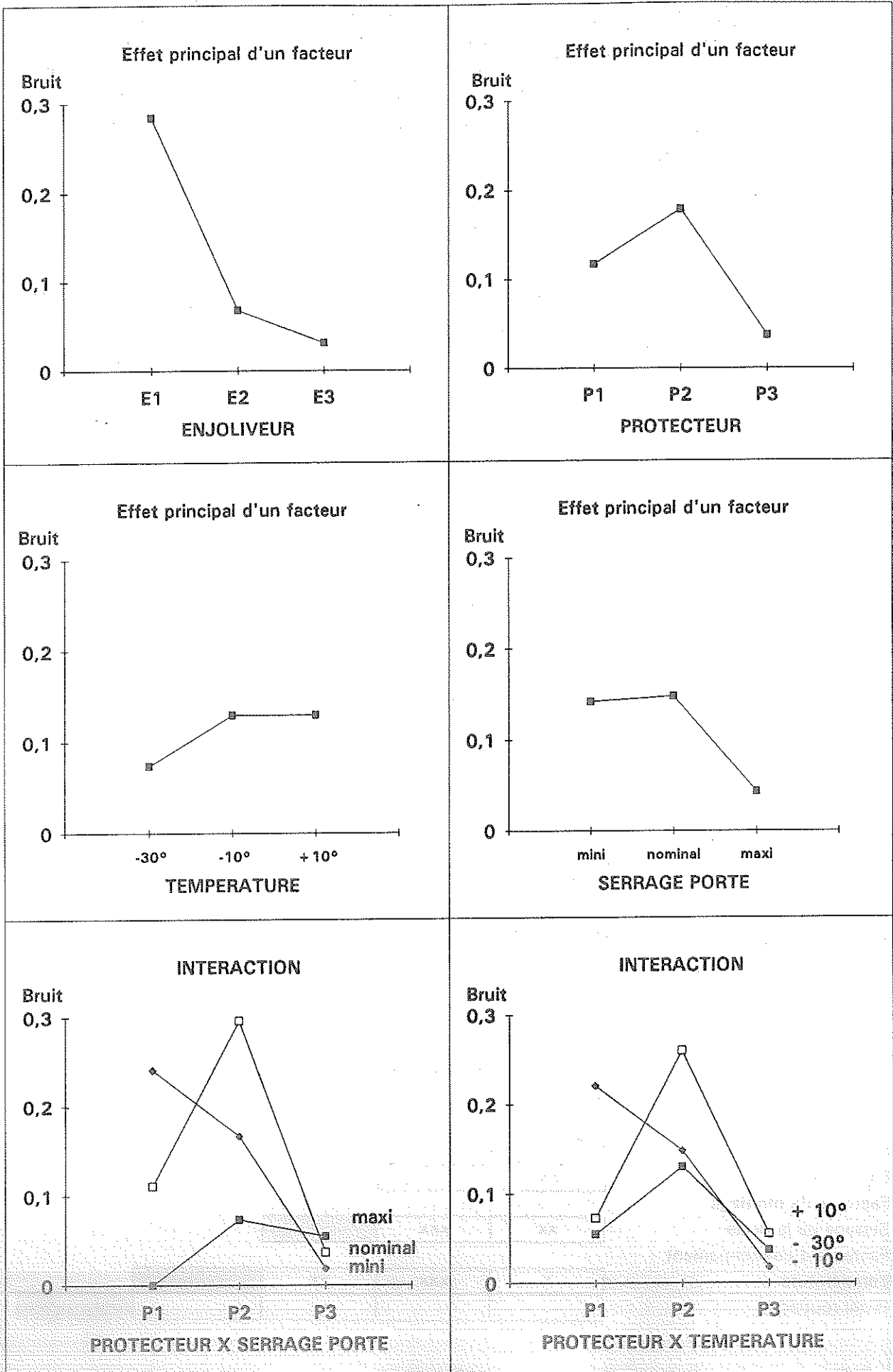
1/ de quantifier l'influence de ces facteurs sur l'apparition du bruit ; les graphiques présentés ci-après illustrent l'influence des principaux facteurs sur l'apparition du bruit.

2/ de comparer les différentes conceptions, du point de vue de leur « robustesse » par rapport aux conditions d'environnement; ainsi la solution comportant l'enjoliveur P3 est-elle « robuste » par rapport à la température dans la mesure où elle se révèle bonne quelle que soit la température (cf graphiques 1 : interaction « protecteur x température »).

L'analyse de la variance, bien que l'hypothèse de loi normale ne soit pas remplie, permet de mettre en évidence les facteurs ayant une influence significative sur l'apparition du bruit (cf. tableau 3).

Deuxième dépouillement avec comme réponse le démerite calculé selon le procédé indiqué ci-dessus.

Graphiques 1



Ce cas permet d'illustrer, sur un exemple particulièrement simple, la notion de plan croisé; chacune des conceptions testées est caractérisée par la moyenne et l'écart-type du démerite calculés à partir des différentes conditions de montage. La solution P3, E3 apparaît comme la meilleure (cf. tableau 2), car elle reste bonne quelles que soient les conditions de montage; c'est, à la fois, la solution qui maximise la performance moyenne et qui minimise la dispersion. C'est, d'ailleurs, cette solution qui, après un essai de vieillissement satisfaisant, a été adoptée.

Tableau 2
Performance et robustesse par rapport au montage des différentes solutions

Facteurs "conception"		Facteur "Bruit" Serrage de portes			Démérite	
protecteur	enjoliveur	mini	nominal	maxi	moyenne	écart-type
P1	E1	135	30	0	55.0	57.9
P1	E2	0	0	0	0.0	0.0
P1	E3	3	0	0	0.8	1.2
P2	E1	160	130	0	96.7	69.4
P2	E2	0	103	5	35.8	47.2
P2	E3	3	3	5	3.3	1.2
P3	E1	25	0	25	16.7	11.8
P3	E2	0	30	5	11.7	13.1
P3	E3	0	0	0	0.0	0.0

Tableau 3

Facteurs et interactions ayant une influence significative

niveau de significativité : 95% = x 99% = xx 99.9% = xxx

1-Effets principaux

Facteurs de conception	
Protecteur	xxx
Enjoliveur	xxx
Facteurs de montage	
Serrage de la porte	xx
Facteurs d'environnement	
Température	
Profil routier	x

2-Interactions

	Protecteur	Enjoliveur	Serrage	Température	Pr routier
Facteurs de conception					
Protecteur					
Enjoliveur	xx				
Facteurs de montage					
Serrage de la porte	xx	xxx			
Facteurs d'environnement					
Température	x	xxx	xx		
Profil routier					

Conclusions de ce premier exemple

Cet exemple simple, car comprenant peu de facteurs, possède l'intérêt suivant:

1/ il fait intervenir les trois catégories de facteurs, -- conception, montage, environnement --, auxquels est confronté un concepteur, ce qui conduit aux notions de conception « robuste » par rapport aux conditions de montage et d'environnement;

2/ il quantifie une réponse, a priori, subjective;

3/ il montre l'intérêt des moyens de simulation de l'environnement pour la mise au point de produits capables de maintenir leur performance, quelles que soient les conditions d'environnement.

Deuxième exemple : optimisation d'une procédure d'essai

Le problème

Jusqu'à une date récente, les essais de fiabilité d'un mécanisme de carrosserie, -- il s'agit ici d'un moteur électrique actionnant les verrouillage / déverrouillage des portes d'une voiture --, consistaient à faire subir à ces mécanismes un certain nombre de manoeuvres correspondant à la durée de vie de la voiture; ces essais avaient lieu dans les conditions climatiques de l'atelier; d'autres essais de résistance à des environnements sévères étaient réalisés en parallèle.

Or la fiabilité d'un mécanisme résulte, non seulement du nombre de manoeuvres effectuées, mais aussi des diverses conditions d'environnement rencontrées tout au long de sa vie. En particulier le « mélange » de certaines conditions extrêmes durant la vie d'un même mécanisme peut avoir des répercussions importantes sur la fiabilité.

De là est venue l'idée de concevoir des essais combinant différentes conditions d'environnement; mais quelles conditions d'environnement retenir ?

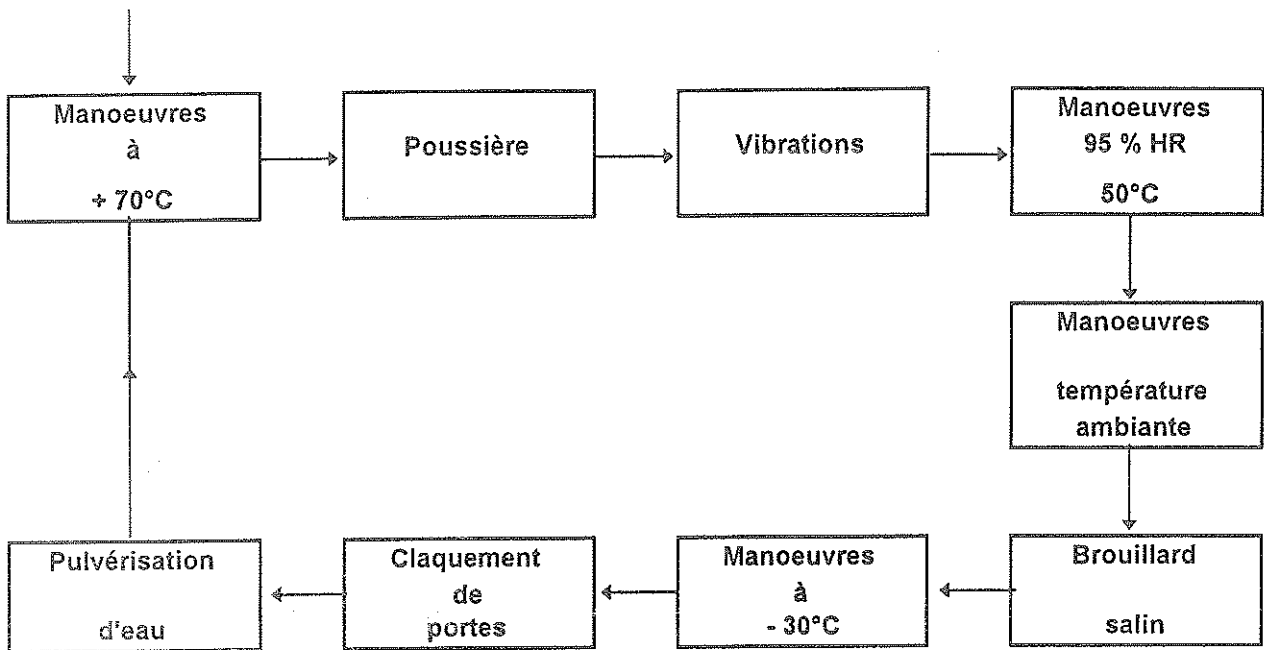
Pour se faire une première idée sur le sujet, il a été alors décidé d'avoir recours à un plan d'expériences.

Objectif du plan d'expériences :

Quantifier l'influence de différentes contraintes d'environnement sur la fiabilité d'un actionneur; si cet objectif est atteint, il sera alors possible de sélectionner les types de contraintes à introduire impérativement dans un tel essai.

Formalisation du problème

Les objets considérés par le plan d'expériences sont des procédures d'essai; chacune des procédures envisagées se présente sous la forme d'une succession d'épreuves correspondant chacune à une condition d'environnement particulière :



Nombre de cycles : 4

Nbre de manoeuvres : 12500 X 4

Nous intéressent uniquement à l'influence des conditions d'environnement, le nombre total de manoeuvres est maintenu constant dans toutes les procédures envisagées; chacune de ces procédures est constituée d'un cycle répété 4 fois afin de mieux « mélanger » les différentes conditions d'environnement.

Les différentes procédures envisagées diffèrent par la présence ou l'absence des différentes contraintes recensées.

Définition des facteurs

Les facteurs d'environnement testés sont au nombre de 8:

- | | |
|--|---------------------------------------|
| 1 - Facteur PO : séjour dans une cabine d'empoussiérage; | 5 - Facteur CL : claquements de porte |
| 2 - Facteur GF : Grand froid (- 30° C) | 6 - Facteur VI : vibrations |
| 3 - Facteur BS : Brouillard salin | 7 - Facteur HR : humidité |
| 4 - Facteur CH : Chaud (+ 70° C) | 8 - Facteur AR : arrosage |

chacun de ces facteurs possède deux niveaux : le premier consiste à introduire la condition d'environnement dans l'essai, le second à ne pas l'introduire.

Définition de la réponse

A chacune des procédures d'essai testées ont été soumis 8 actionneurs; la procédure est alors caractérisée par la proportion d'actionneurs encore en état de marche au terme de l'essai; cette valeur constitue la réponse du plan d'expériences.

Interactions pressenties

Dans ce plan d'expériences 8 interactions ont été envisagées a priori :

tableau 4
Interactions pressenties

		CH	PO	VI	HR	CL	GF	BS	AR
CH	chaud								
PO	poussière								
VI	vibrations		X						
HR	humidité		X						
CL	claquements								
GF	grand froid				X				
BS	brouillard salin				X				
AR	arrosage		X				X	X	

on fait l'hypothèse que toutes les autres interactions d'ordre 2, ainsi que l'ensemble des interactions d'ordre supérieur à 2, sont négligeables.

Construction d'un Plan fractionnaire orthogonal

Un plan factoriel complet aurait conduit à un nombre de combinaisons ($2^8 = 256$), qu'il n'était pas envisageable de réaliser; nous nous sommes donc orientés vers un plan fractionnaire.

Le nombre de paramètres indépendants à estimer par ce plan est donné par le calcul du nombre de degrés de liberté:

effet global (estimé par la moyenne générale):	1
8 effets principaux de facteurs à 2 modalités:	8
7 interactions d'ordre 2 entre facteurs à 2 modalités:	7
nombre de degrés de liberté:	16

Le plan à construire comprend donc, au minimum, 16 combinaisons.

La méthode de Box et Hunter

La méthode préconisée par Box et Hunter permet de construire des plans d'expériences fractionnaires orthogonaux avec des facteurs ayant tous deux niveaux. Cette méthode consiste à fractionner p fois un plan d'expériences factoriel complet à n facteurs en retenant, à chaque fois, une demi-fraction; un tel plan composé de 2^{n-p} est noté 2^{n-p} . La réduction du nombre de combinaisons à essayer dans le plan fractionnaire est obtenu au prix d'un certain nombre de confusions entre interactions. Les interactions confondues avec l'effet ou l'interaction que l'on souhaite estimer sont souvent appelées « alias ».

Un plan 2^{8-4} de Box et Hunter doit répondre à la question; un tel plan permet d'estimer 8 effets principaux et 7 interactions d'ordre 2, mais l'ensemble de ces 28 interactions sont réparties en 7 paquets de 4 « alias » (interactions confondues), si bien que la construction du plan a consisté à rechercher, par tâtonnement, une affectation des facteurs au plan de Box et Hunter conduisant à placer chacune des interactions à estimer dans un paquet différent (cf tableau 5).

Le plan d'expériences ainsi construit est optimum: il permet, en effet, d'estimer les effets principaux et les interactions pressenties avec un nombre de combinaisons minimum et sans

ambiguïté, les effets principaux et les interactions pressenties n'étant « aliassés » qu'avec des interactions supposées négligeables.

Tableau 5

Interactions pressenties	Alias (interactions d'ordre 2)		
BS x HR	PO x GF	CH x AR	CL x VI
GF x HR	PO x BS	CH x VI	CL x AR
GF x AR	PO x CH	BS x VI	CL x HR
BS x AR	PO x CL	GF x VI	CH x HR
PO x VI	BS x CH	GF x CL	HR x AR
PO x HR	GF x BS	CH x CL	VI x AR
PO x AR	GF x CH	BS x CL	VI x HR

Dépouillement des résultats

L'examen de la matrice de corrélation mettant en évidence une corrélation très faible entre l'interaction « BS x AR » et la réponse, cette dernière est éliminée des analyses suivantes, ce qui permet de réaliser une analyse de la variance avec les résultats du plan (malgré, là encore, l'absence de loi normale) :

Tableau 6

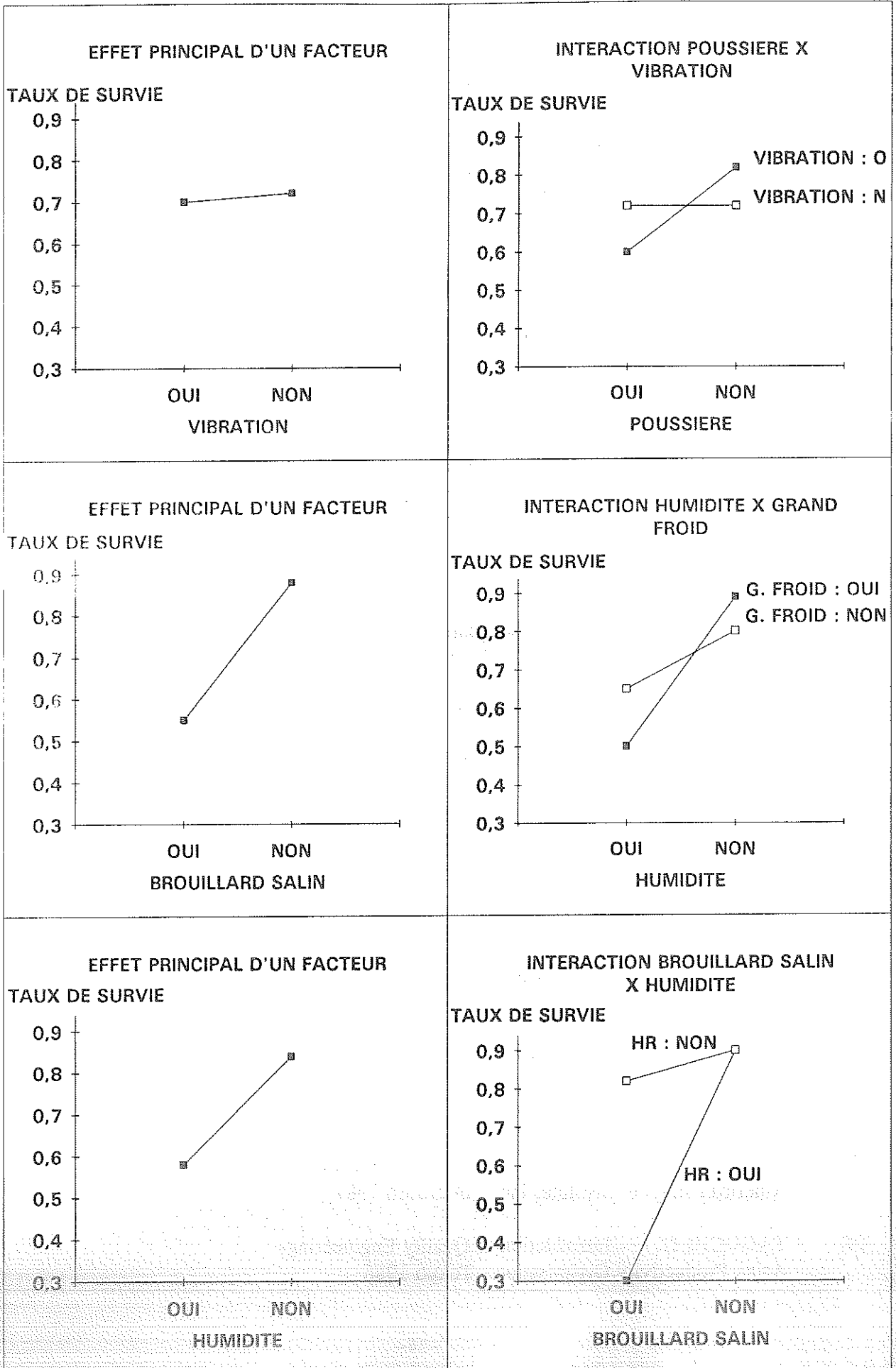
Facteurs et interactions ayant une influence significative

Effets principaux			Interactions	
Poussière	PO	x	PO X VI	x
Grand Froid	GF		PO X HR	
Brouillard Salin	BS	xx	PO X AR	
Chaud	CH		GF X HR	x
Claquement de portes	CL	x	GF X AR	
Vibrations	VI		BS X HR	xx
Humidité	FR	xx	BS X AR	
Arrosage	AR			

L'analyse des résultats, illustrés par les graphiques 2 ci-joints, met en évidence:

- l'influence forte des facteurs « Brouillard salin » et « Humidité » et de leur interaction; la présence d'une phase chaude et humide amplifie considérablement l'effet du brouillard salin;
- l'influence de l'interaction « Poussière x vibration », alors que le facteur vibration seul n'exerce aucune influence sur la fiabilité, il devient endommageant dès qu'il est combiné avec de la poussière, ce qui se comprend aisément;
- on note également une interaction significative entre les facteurs « Grand froid » et « Humidité », liée à l'action du gel.
- deux facteurs n'interviennent ni en tant que facteur principal, ni en tant qu'interaction: il s'agit des facteurs « Chaud » et « Arrosage ».

Conclusion pratique: de ce plan, il ressort qu'il est impératif d'introduire dans l'essai de fiabilité d'un actionneur, les contraintes d'environnement correspondant aux facteurs significatifs soit en tant que facteur principal, soit en tant qu'interaction; il est, par ailleurs, inutile d'introduire une phase



poussière si l'on n'introduit pas simultanément une phase de vibrations; même remarque pour ce qui concerne l'humidité et le brouillard salin, d'une part, et l'humidité et le grand froid, d'autre part.

Intérêt de ce plan:

malgré certaines limites, notamment l'absence de « dosage » des contraintes, ce plan d'expériences apporte un certain nombre d'enseignements:

- il montre que les plans d'expériences peuvent s'appliquer à d'autres objets que le produit; ils peuvent notamment être utiles dans la mise au point de procédures d'essais;
- il montre que la réponse binaire de la fiabilité peut être contournée par la mise en essais simultanée, quand c'est possible, de plusieurs pièces;
- comme le plan précédent, il montre l'intérêt de la mise en oeuvre de plans d'expériences quand on dispose de moyens de simulation de l'environnement.

Synergie entre Plans d'expériences et moyens de simulation de l'environnement

La mise au point d'un véhicule nécessite la prise en compte des conditions d'environnement les plus sévères dans lesquelles il est susceptible d'être utilisé. Le développement de moyens de simulation de l'environnement permet de réaliser une part croissante des essais nécessaires à cette mise au point sur banc d'essais; cette pratique possède de nombreux avantages, notamment celui de pouvoir maîtriser et, dans certains cas combiner, différentes contraintes d'environnement; on se trouve alors dans un contexte dans lequel l'application des plans d'expériences peut être particulièrement fructueuse.

Bibliographie

- [1] BENOIST D. - « Notions sur les plans d'expériences »
Société des éditions TECHNIP / Institut français du pétrole - Rueil 1975
- [2] BOX Georg E.P., HUNTER William G., HUNTER J. Stuart - « Statistics for Experimenters »
John Wiley and sons - New York 1978
- [3] GOUPY Jacques - « La méthode des plans d'expériences »
DUNOD - Paris 1988
- [4] LOCHNER Robert H., MATAR Joseph E. - « Designing for quality »
Chapman and Hall - Londres, New York 1990
- [5] ROSS Philip J. - « Taguchi techniques for Quality Engineering »
McGraw-Hill Book company - New York 1988
- [6] SADO Gilles et Marie-Christine - « Les Plans d'expériences : de l'expérimentation à l'assurance qualité »
AFNOR techniques - Paris 1991
- [7] TAGUCHI G., KONISHI S. - « Orthogonal arrays and linear graphs »
American supplier institute, inc. - Dearborn 1987
- [8] TAGUCHI G. - « Introduction to Quality Engineering »
Asian Productivity Organisation - Tokyo 1986

- [9] TAGUCHI G. - « System of experimental design » (2 vol.)
UNIPUB - New York 1987
- [10] VIGIER Michel G. - « Pratique des plans d'expériences - Méthodologie Taguchi »
Les éditions d'organisation - Paris 1988

12/12/2023