

# Cours plan d'expérience (théorie et pratique)

---

Type : **L8(7 fact \* 2 niv)**

Nb essais (NE) : 8

Nb facteurs (NFc) 7

Nb interactions (Nint)

Essai N°	1	2	3	4	5	6	7
	Facteurs contrôlés						
	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	1	2	1	2
6	2	1	2	2	1	2	1
7	2	2	1	1	2	2	1
8	2	2	1	2	1	1	2

*Cours Plans  
d'Expériences  
(théorie et mise en place)*

# Cours plan d'expérience (théorie et pratique)

---

## *OBJECTIFS*

L'instabilité des valeurs des caractéristiques des produits fabriqués industriellement, est le problème le plus fréquent et le plus difficile que cherchent à combattre tous les techniciens, quels que soient les domaines technologiques

# Cours plan d'expérience (théorie et pratique)

---

## Qu'est-ce qu'un plan d'expériences ?

Un plan d'expériences est une suite d'essais rigoureusement organisés, afin de déterminer avec un minimum d'essais et le maximum de précision l'influence respective des différents paramètres de conception ou de fabrication d'un produit, afin d'en optimiser les performances.

Domaine d'utilisation =  
l'obtention de produits aux caractéristiques stables

- Production industrielle répétitive.
- Degrés de liberté sur le procédé de fabrication ou sur le design produit.

## A quel moment ?

- Fiabilisation d'une production existante et instable.
- Optimisation de l'industrialisation dès la conception d'un nouveau produit.
- Optimisation de la conception d'un nouveau produit.

# Cours plan d'expérience (théorie et pratique)

---

## Bénéfices – Avantages - Comment

Les gains résultants de l'utilisation des plans :

- Taux de Retour sur Investissement  $\geq 3$ ,
- Délai de fin projet industrialisation connu au départ.

Les avantages liés à l'utilisation des plans :

- Projet jalonné avec points de contrôle et livrables bien définis,
- Synergie des compétences centre technique, industrialisation, fabrication.
- Quantification de la performance attendue ultérieurement en production,

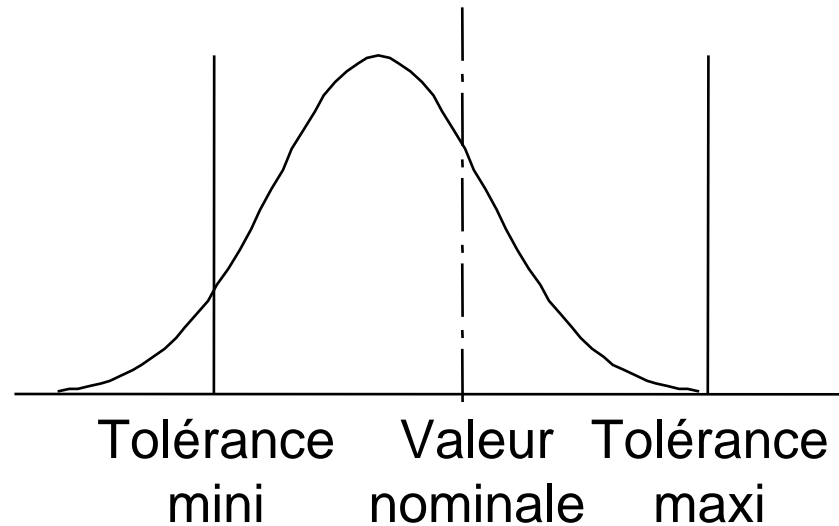
Les principaux points de la méthodologie :

- Constitution d'un groupe,
- Quels moyens attribuer au groupe (temps, moyen de mesure, ...),
- Comment bien définir l'objectif du groupe.

# Cours plan d'expérience (théorie et pratique)

---

Pourquoi les caractéristiques d'un produit varient-elles ?



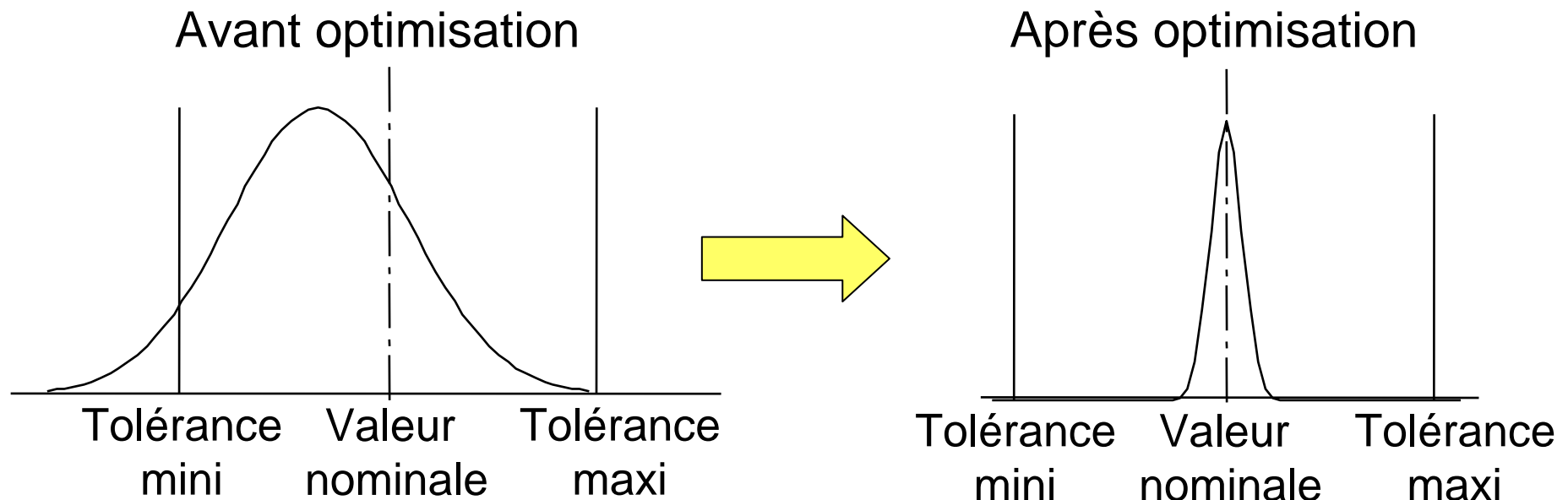
Causes multiples:

- variations des caractéristiques des matières utilisées
- irrégularité des alimentations en énergies et fluides utilisés (électricité, air comprimé, ...)
- fluctuations de l'environnement (température, hygrométrie, pression atmosphérique, poussières, ...)
- usure ou détérioration des composants, des outillages, ...
- erreurs humaines, changements d'opérateurs ou d'utilisateurs.

# Cours plan d'expérience (théorie et pratique)

Optimiser chacune des caractéristiques d'un produit, c'est minimiser simultanément :

- la dispersion des valeurs individuelles mesurées, par rapport à leur moyenne arithmétique
- l'écart entre cette valeur moyenne et la valeur nominale à respecter



# Cours plan d'expérience (théorie et pratique)

---

## Stratégie (1)

Les facteurs qui affectent les caractéristiques à optimiser sont à classer en 2 catégories :

- les facteurs facilement maîtrisables (appelés **facteurs contrôlés**)  
(matières utilisées, température d'injection , vitesse de production,...)
- les **facteurs bruits**, variables parasites, difficiles, impossibles ou trop coûteuses à contrôler  
(fluctuations de la température et de l'hygrométrie ambiantes, irrégularité de la tension du courant électrique, ...)

# Cours plan d'expérience (théorie et pratique)

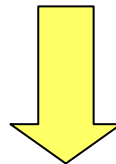
---

## Stratégie (2)

Identifier les facteurs contrôlés importants, et définir leurs valeurs, de façon que le produit (ou le processus) **soit aussi insensible que possible aux fluctuations des facteurs bruits**

Au lieu de chercher à éliminer les causes - *qui sont souvent des facteurs bruits* - la démarche consiste à réduire, voire supprimer, leur impact

**Le produit (ou le processus) deviendra robuste par rapport aux bruits**

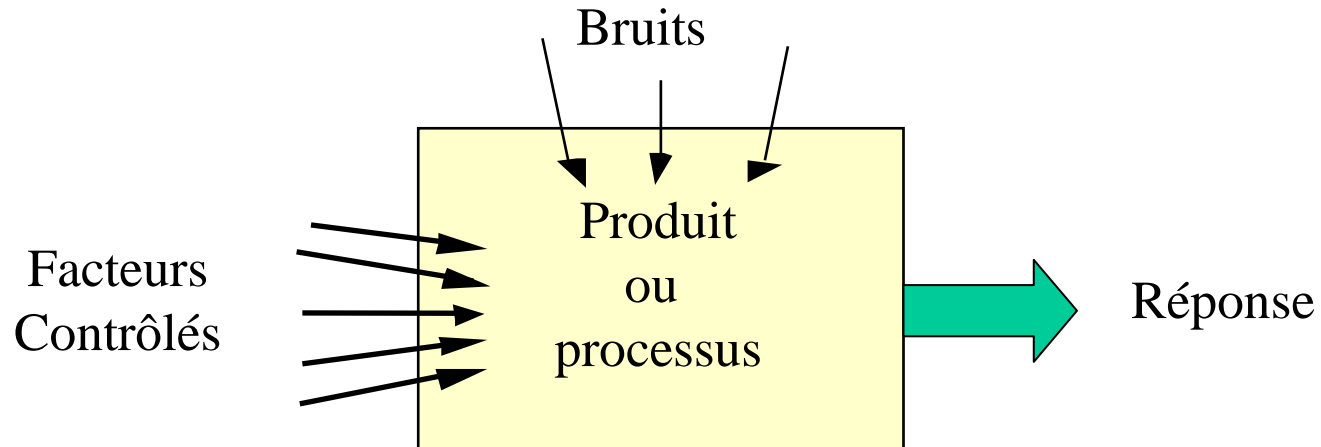


**Robustesse = Haute qualité**



# Cours plan d'expérience (théorie et pratique)

## Perception initiale du produit



Classiquement, on s'attaque aux causes des variations :

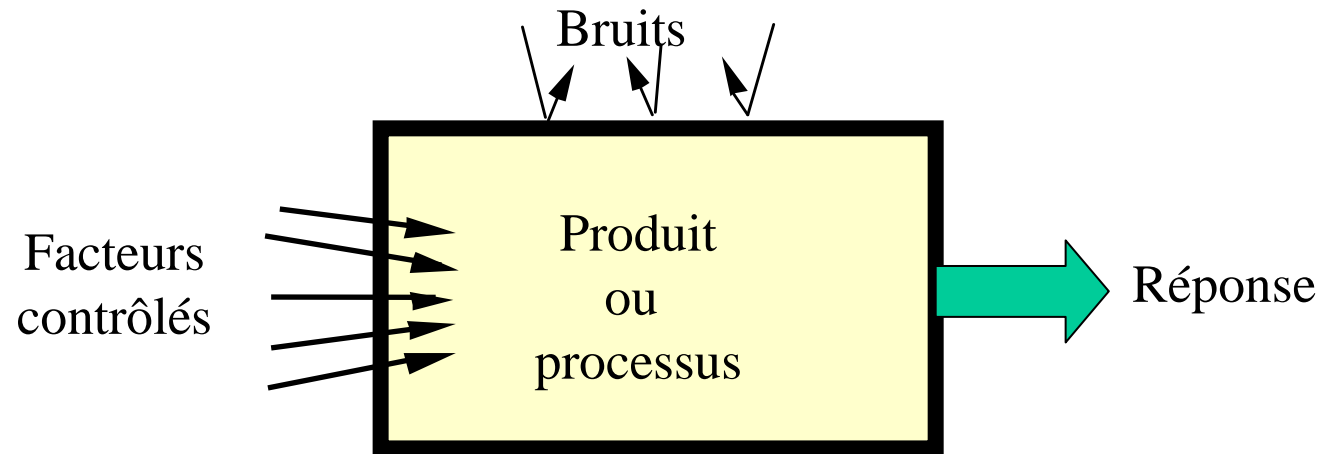


- surdimensionnement des composants
- resserrement des tolérances
- diversification des produits
- diversification des conditions d'utilisation, ...

coûte de l'argent

# Cours plan d'expérience (théorie et pratique)

## Connaissance et maîtrise après expérimentation



À l'inverse, les causes de variations - appelées facteurs bruits - existent toujours :



- inutile de s'y attaquer
- s'affranchir de leurs effets

**Robustesse / bruits**

# Cours plan d'expérience (théorie et pratique)

---

## Plans d'expériences Taguchi

Objet :

Identifier les meilleures valeurs des facteurs contrôlés qui influencent favorablement les performances du produit ou du processus à optimiser.

Il existe 3 méthodes d'expérimentation :

- expérimentation ne faisant varier qu'un facteur à la fois
- expérimentation avec un plan factoriel complet
- expérimentation avec un plan factoriel fractionnaire

# Cours plan d'expérience (théorie et pratique)

Expérimentation ne faisant varier qu'un facteur à la fois

Essai N°	Facteurs contrôlés							Résultat essai
	A	B	C	D	E	F	G	
1	1	1	1	1	1	1	1	R1
2	2	1	1	1	1	1	1	R2
3	1	2	1	1	1	1	1	R3
4	1	1	2	1	1	1	1	R4
5	1	1	1	2	1	1	1	R5
6	1	1	1	1	2	1	1	R6
7	1	1	1	1	1	2	1	R7
8	1	1	1	1	1	1	2	R8

Cette méthode semble réellement objective ! Mais dans les conditions industrielles réelles, **cette approche est à proscrire** :

- chaque niveau de chaque facteur n'est testé que face à une seule configuration des niveaux des autres facteurs
- les effets ne sont pas toujours indépendants les uns des autres

# Cours plan d'expérience (théorie et pratique)

## Expérimentation avec un plan factoriel complet

Essai N°	Facteurs contrôlés							Résultat essai
	A	B	C	D	E	F	G	
1	1	1	1	1	1	1	1	R1
2	1	1	1	1	1	1	2	R2
3	1	2	1	1	1	2	1	R3
4	1	1	2	1	1	2	2	R4
5	1	1	1	1	2	1	1	R5
6	1	1	1	1	2	1	2	R6
7	1	1	1	1	2	2	1	R7
8	1	1	1	1	2	2	2	R8
9	1	1	1	2	1	1	1	R9
10	1	1	1	2	1	1	2	R10
11	1	1	1	2	1	2	1	R11
12	1	1	1	2	1	2	2	R12
13	1	1	1	2	2	1	1	R13
14	1	1	1	2	2	1	2	R14
15	1	1	1	2	2	2	1	R15
16	1	1	1	2	2	2	2	R16
17	1	1	2	1	1	1	1	R17
-	-	-	-	-	-	-	-	-
-	-	-	-	-	-	-	-	-
-	-	-	-	-	-	-	-	-
126	2	2	2	2	2	1	2	R126
127	2	2	2	2	2	2	1	R127
128	2	2	2	2	2	2	2	R128

Nombre de combinaisons :

$$2^7 = 128 \text{ essais}$$

Toutes les combinaisons possibles sont essayées et permettent d'isoler :

- les effets de tous les facteurs
- les interactions éventuelles

Cette méthode est parfaite, mais les coûts et les délais d'expérimentation deviennent prohibitifs dès qu'on dépasse 3 ou 4 facteurs

# Cours plan d'expérience (théorie et pratique)

## Expérimentation avec un plan factoriel fractionnaire

Essai N°	Facteurs contrôlés							Résultat essai
	A	B	C	D	E	F	G	
1	1	1	1	1	1	1	1	R1
2	1	1	1	2	2	2	2	R2
3	1	2	2	1	1	2	2	R3
4	1	2	2	2	2	1	1	R4
5	2	1	2	1	2	1	2	R5
6	2	1	2	2	1	2	1	R6
7	2	2	1	1	2	2	1	R7
8	2	2	1	2	1	1	2	R8

Ce plan ne comprend que 8 essais, soigneusement sélectionnés parmi les 128 essais du plan factoriel complet correspondant

# Cours plan d'expérience (théorie et pratique)

## Notion d'orthogonalité d'un plan factoriel (1)

Essai N°	Facteurs contrôlés							Résultat essai
	A	B	C	D	E	F	G	
1	1	1	1	1	1	1	1	R1
2	1	1	1	2	2	2	2	R2
3	1	2	2	1	1	2	2	R3
4	1	2	2	2	2	1	1	R4
5	2	1	2	1	2	1	2	R5
6	2	1	2	2	1	2	1	R6
7	2	2	1	1	2	2	1	R7
8	2	2	1	2	1	1	2	R8

Chaque niveau de chaque facteur est combiné un même nombre de fois avec chaque niveau des autres facteurs

# Cours plan d'expérience (théorie et pratique)

## Notion d'orthogonalité d'un plan factoriel (2)

Essai N°	Facteurs contrôlés							Résultat essai
	A	B	C	D	E	F	G	
1	1	1	1	1	1	1	1	R1
2	1	1	1	2	2	2	2	R2
3	1	2	2	1	1	2	2	R3
4	1	2	2	2	2	1	1	R4
5	2	1	2	1	2	1	2	R5
6	2	1	2	2	1	2	1	R6
7	2	2	1	1	2	2	1	R7
8	2	2	1	2	1	1	2	R8

Quand on compare :

$$\text{- résultat moyen A1} = \frac{1}{4} (R1 + R2 + R3 + R4)$$

$$\text{- résultat moyen A2} = \frac{1}{4} (R5 + R6 + R7 + R8)$$

les effets de tous les autres facteurs B, C, ..., G  
interviennent avec le même poids dans A1 et A2.

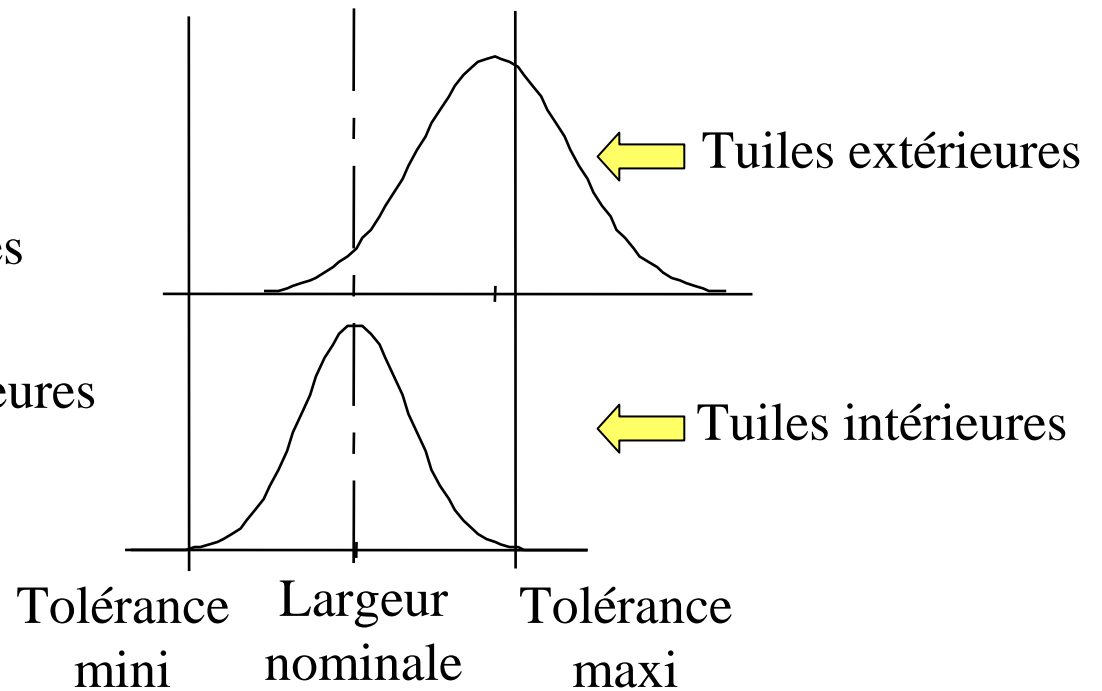
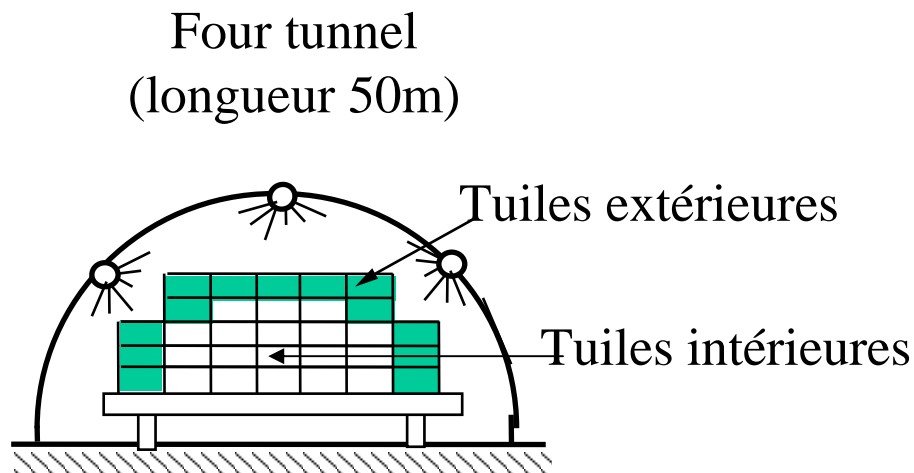
**Il n'y a pas de mélange entre leurs effets**



# Cours plan d'expérience (théorie et pratique)

## Cas de la fabrique de tuiles Ina Seito

### Courbes des dispersions de largeurs





# Cours plan d'expérience (théorie et pratique)

## 1 - Plan d'expériences et ses résultats

Essai N°	Facteurs contrôlés							Résultat essai
	A	B	C	D	E	F	G	
1	1	1	1	1	1	1	1	16%
2	1	1	1	2	2	2	2	17%
3	1	2	2	1	1	2	2	12%
4	1	2	2	2	2	1	1	6%
5	2	1	2	1	2	1	2	6%
6	2	1	2	2	1	2	1	68%
7	2	2	1	1	2	2	1	42%
8	2	2	1	2	1	1	2	26%

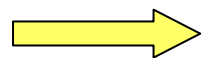
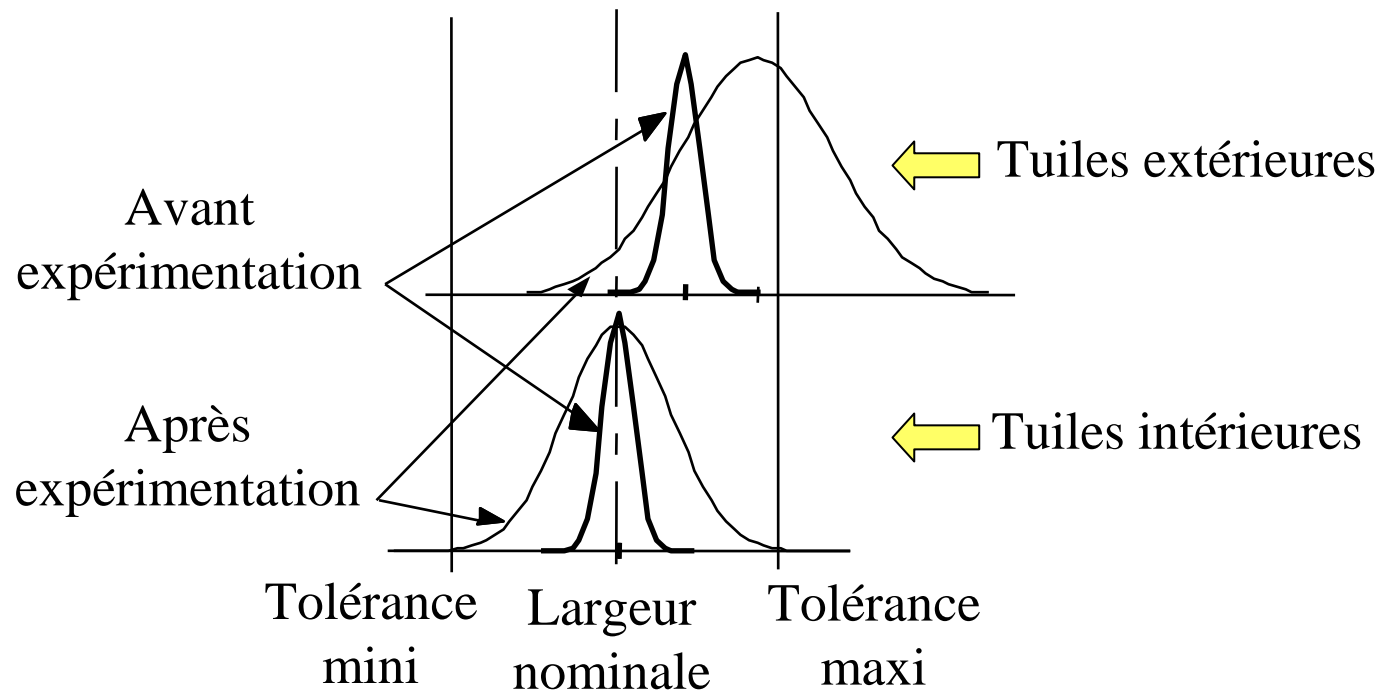
## 2 - Tableau des réponses

Facteurs		A	B	C	D	E	F	G
%	Niv 1	12.75	26.75	25.25	19.00	30.50	13.50	33.00
rebut	Niv 2	35.50	21.25	23.00	29.25	17.75	34.75	15.25
Différence		-22.75	5.25	2.25	-10.25	12.75	-21.25	17.75

**Configuration optimale : A1 B2 C2 D1 E2 F1 G2**

# Cours plan d'expérience (théorie et pratique)

## Résultats



Élimination des effets parasites sans en supprimer la cause

# Cours plan d'expérience (théorie et pratique)

## Solution finale

### Tableau des réponses

Facteurs		A	B	C	D	E	F	G
%	Niv 1	12.75	26.75	25.25	19.00	30.50	13.50	33.00
rebut	Niv 2	35.50	21.25	23.00	29.25	17.75	34.75	15.25
Différence		-22.75	5.25	2.25	-10.25	12.75	-21.25	17.75

Configuration finalement retenue : A1 B2 **C1** D1 E2 F1 G2

➔ Réduction des coûts tout en augmentant la qualité

Remarques importantes sur l'exemple de la fabrique de tuiles

- Le résultat de chaque essai est mesuré par le % de rebuts
- Seule la largeur est optimisée.  
Quid des autres caractéristiques : résistance mécanique, aspect, ...?
- “Réduction miraculeuse” de la dispersion des largeurs des tuiles !

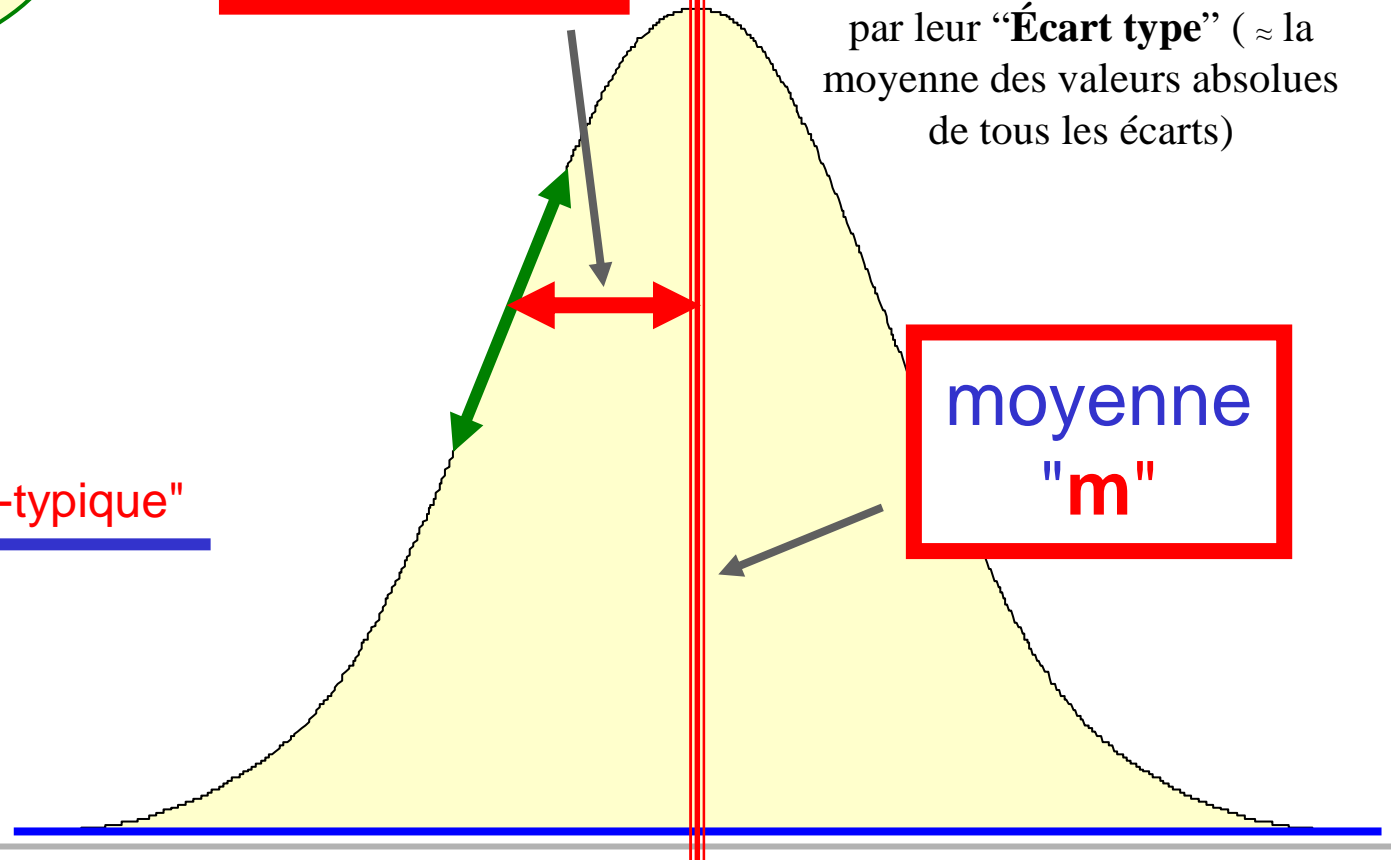
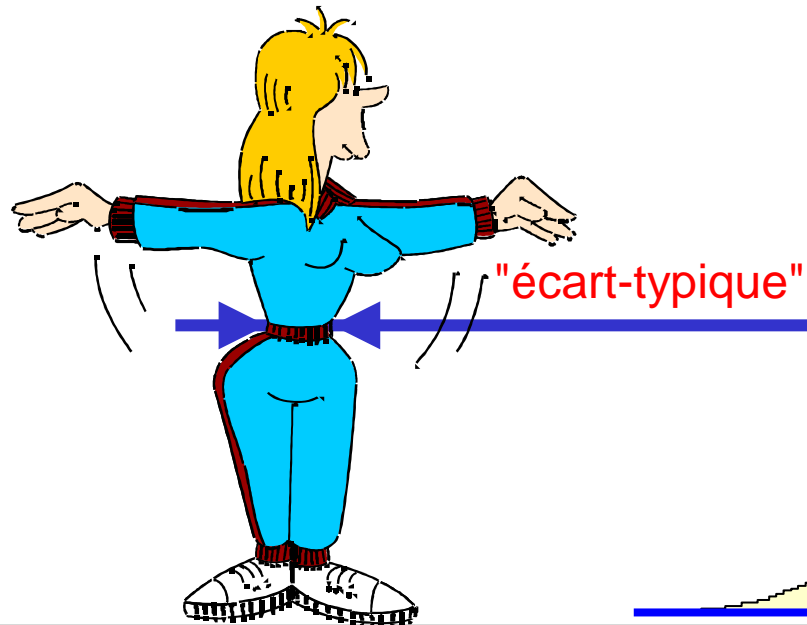
# Cours plan d'expérience (théorie et pratique)

## Mesure de la variabilité des résultats (1)

l'écart-type c'est  
le tour de taille  
de la courbe en cloche

écart-type  
" $\sigma$ "

La dispersion des mesures individuelles d'une caractéristique est mathématiquement exprimée par leur "Écart type" ( $\approx$  la moyenne des valeurs absolues de tous les écarts)



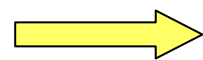
# Cours plan d'expérience (théorie et pratique)

---

## Mesure de la variabilité des résultats (2)

La valeur d'un écart type ne signifie rien par elle-même

Elle doit toujours être relativisée par rapport à la moyenne des valeurs mesurées



Exemple du joueur de golf

# Cours plan d'expérience (théorie et pratique)

---

## Ratio Signal/Bruit

La supériorité de la méthode Taguchi résulte de l'utilisation d'un indicateur de performance : **le ratio Signal/Bruit**

Il prend simultanément en compte :

- la valeur souhaitable (le "Signal"), à atteindre
- la variabilité indésirable de cette valeur (le "Bruit"), à combattre

La formule de calcul du ratio Signal/Bruit dépend du type de caractéristique à optimiser :

- critère ciblé
- critère à minimiser
- critère à maximiser, etc.. ...

Dans tous les cas : **la performance est d'autant plus grande, que la valeur algébrique du ratio Signal/Bruit est grande**



# Cours plan d'expérience (théorie et pratique)

## Expression des résultats d'un plan d'expériences Taguchi

Pour chaque caractéristique à optimiser, le résultat de chaque essai est exprimé de 2 façons complémentaires :

- le ratio Signal/Bruit (S/N)
- la moyenne des valeurs mesurées

Essai N°	Facteurs contrôlés							Résultat de l'essai	
	A	B	C	D	E	F	G	Moyenne	S/N
1	1	1	1	1	1	1	1	72.00	6.45
2	1	1	1	2	2	2	2	108.60	9.68
3	1	2	2	1	1	2	2	111.80	7.12
4	1	2	2	2	2	1	1	125.60	5.75
5	2	1	2	1	2	1	2	102.60	14.13
6	2	1	2	2	1	2	1	118.99	8.99
7	2	2	1	1	2	2	1	100.80	7.17
8	2	2	1	2	1	1	2	90.40	10.92
Moyenne générale des réponses :								103.85	8.78

# Cours plan d'expérience (théorie et pratique)

## Récapitulatif des mesures réalisées

N° Essai	Moyenne caractéristique	S/N
1	72	6.45
2	108.6	9.68
3	111.8	7.12
4	125.6	5.75
5	102.6	14.13
6	119	8.99
7	100.8	7.17
8	90.4	10.92
<b>Moyenne plan</b>		
	103.85	8.78

## Calcul des effets bruts puis par rapport à la moyenne du plan

Effets bruts sur la valeur de la caractéristique			
Issu de	Niv 1	Fact	Niv 2
R1-R2-R3-R4	104.50	A	103.20
R1-R2-R5-R6	100.55	B	107.15
R1-R2-R7-R8	92.95	C	114.75
R1-R3-R5-R7	96.80	D	110.90
R1-R3-R6-R8	98.30	E	109.40
R1-R4-R5-R8	97.65	F	110.05
R1-R4-R6-R7	104.35	G	103.35

Effets bruts sur le S/N		
Niv 1	Fact	Niv 2
7.25	A	10.30
9.81	B	7.74
8.56	C	9.00
8.72	D	8.84
8.37	E	9.18
9.31	F	8.24
7.09	G	10.46

Effet / moyenne plan		
103.85		
0.65	A	-0.65
-3.30	B	3.30
-10.90	C	10.90
-7.05	D	7.05
-5.55	E	5.55
-6.20	F	6.20
0.50	G	-0.50

Effet / moyenne plan		
8.78		
-1.53	A	1.53
1.04	B	-1.04
-0.22	C	0.22
-0.06	D	0.06
-0.41	E	0.41
0.54	F	-0.54
-1.69	G	1.69

# Cours plan d'expérience (théorie et pratique)

## Expression des effets d'un facteur

Le but d'un plan d'expériences est de déterminer l'effet de chaque facteur testé.

Avec la méthode Taguchi, cet effet est exprimé de 2 façons distinctes :

- Effet sur la valeur à optimiser
- Effet sur le ratio S/N

Effet sur ratio Signal/Bruit		Facteur n°	Effet sur la valeur mesurée	
Niveau 1	Niveau 2		Niveau 1	Niveau 2
-1.53	1.53	A	0.65	-0.65
1.04	-1.04	B	-3.30	3.30
-0.22	0.22	C	-10.90	10.90
-0.06	0.06	D	-7.05	7.05
-0.41	0.41	E	-5.55	5.55
0.54	-0.54	F	-6.20	6.20
-1.69	1.69	G	0.50	-0.50

# Cours plan d'expérience (théorie et pratique)

## Les 4 types de facteurs contrôlés

Type de facteur	Effet sur la valeur de la caractéristique	Effet sur le ratio Signal/Bruit
1	oui	oui
2	non	oui
3	oui	non
4	non	non

Pour optimiser efficacement une caractéristique, il faut :

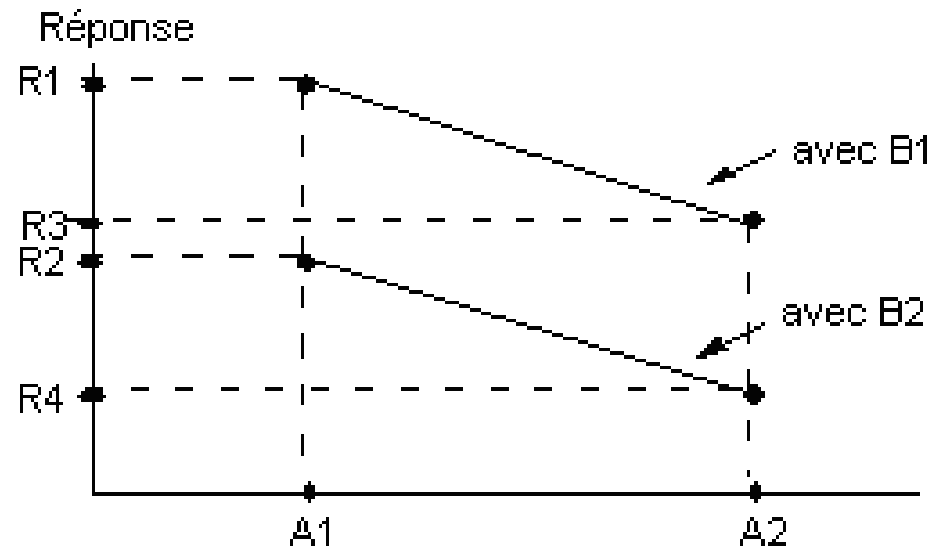
- 1 Choisir les niveaux des facteurs de types 1 et 2 qui procurent des effets positifs, afin de **maximiser la valeur algébrique du ratio S/N** et réduire ainsi l'instabilité des résultats
- 2 Si nécessaire, choisir parmi les facteurs de types 3, *puis 1*, les niveaux qui permettent d' **ajuster la moyenne sur la valeur cible**
- 3 Choisir les niveaux des facteurs de type 4 selon des **critères économiques**

*Cette démarche est simple, claire, et s'avère très puissante*

# Cours plan d'expérience (théorie et pratique)

## Interactions

- On peut observer que l'effet du facteur A ne dépend pas des niveaux de B : → les droites correspondantes sont parallèles.
- De la même façon l'effet de B ne dépend pas des niveaux de A.



Cela signifie qu'il n'y a aucune interaction entre les facteurs A et B, aux niveaux testés : *les facteurs A et B sont indépendants.*

# Cours plan d'expérience (théorie et pratique)

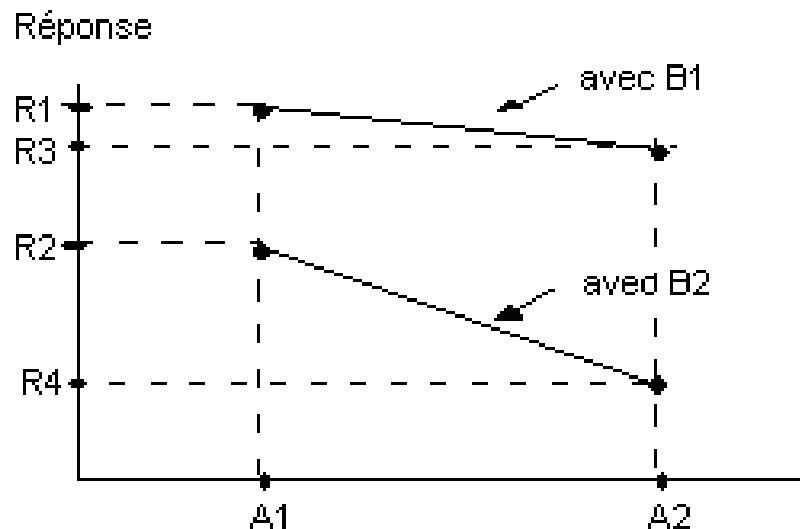
## Interactions

- Les droites traduisant l'effet des facteurs ne sont pas parallèles :

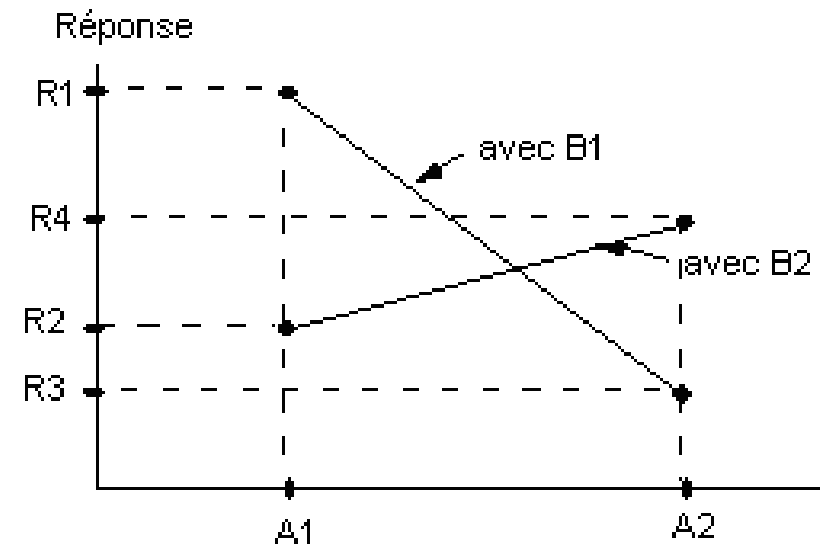
*l'effet de A change suivant que le facteur B est au niveau 1 ou 2.*

- Cela signifie qu'une interaction entre les facteurs A et B s'est manifestée :

*les facteurs A et B ne sont pas indépendants.*



Interaction faible



Interaction particulièrement forte

# Cours plan d'expérience (théorie et pratique)

---

## Traitement des interactions

Lorsqu'on soupçonne des interactions entre certains facteurs, on peut recommander deux méthodes :

- on bloque certains facteurs afin de ne pas provoquer d'interactions,
- on regroupe les facteurs provoquant des interactions en un « facteur composite »

➔ Exemple de la cuisson de la brioche

Dans un deuxième temps, faire un plan d'expérience pour étudier l'effet des interactions et les intégrer dans l'optimisation finale.

Il existe des matrices pour cela MAIS il faut savoir que dans ce cas on doit faire un plan factoriel complet. Pour étudier une interaction il faut payer le prix fort !

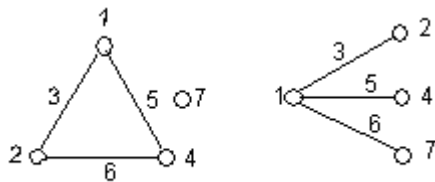
# Cours plan d'expérience (théorie et pratique)

## Traitement des interactions

Il existe des matrices pour cela MAIS il faut savoir que dans ce cas on doit faire un plan factoriel complet. Pour étudier une interaction il faut payer le prix fort !

Essai N°	1	2	3	4	5	6	7
	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	1	2	1	2
6	2	1	2	2	1	2	1
7	2	2	1	1	2	2	1
8	2	2	1	2	1	1	2

1	2	3	4	5	6	7
1	3	2	5	4	7	6
2		1	6	7	4	5
3			7	6	5	4
4				1	2	3
5					3	2
6						1



Essai N°	Facteurs contrôlés				Interactions		
	A	B	C	D	AD	BD	CD
1	1	1	1	1	1	1	1
2	1	1	1	2	2	2	2
3	1	2	2	1	1	3	3
4	1	2	2	2	2	4	4
5	2	1	2	1	3	1	3
6	2	1	2	2	4	2	4
7	2	2	1	1	3	3	1
8	2	2	1	2	4	4	2



# Cours plan d'expérience (théorie et pratique)

## Traitement des interactions

- Matrice d'expériences L16 (5 facteurs à 2 niveaux et 10 interactions)

N° essai	1	2	4	8	15	3	5	9	14	6	10	13	12	11	7
	Facteurs contr <sup>TM</sup> 's					Interactions									
	A	B	C	D	E	AB	AC	AD	AE	BC	BD	BE	CD	CE	DE
1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
2	1	1	1	2	2	1	1	2	2	1	2	2	2	2	4
3	1	1	2	1	2	1	2	1	2	2	1	2	3	4	2
4	1	1	2	2	1	1	2	2	1	2	2	1	4	3	3
5	1	2	1	1	2	2	1	1	2	3	3	4	1	2	2
6	1	2	1	2	1	2	1	2	1	3	4	3	2	1	3
7	1	2	2	1	1	2	2	1	1	4	3	3	3	3	1
8	1	2	2	2	2	2	2	2	2	4	4	4	4	4	4
9	2	1	1	1	2	3	3	3	4	1	1	2	1	2	2
10	2	1	1	2	1	3	3	4	3	1	2	1	2	1	3
11	2	1	2	1	1	3	4	3	3	2	1	1	3	3	1
12	2	1	2	2	2	3	4	4	4	2	2	2	4	4	4
13	2	2	1	1	1	4	3	3	3	3	3	3	1	1	1
14	2	2	1	2	2	4	3	4	4	3	4	4	2	2	4
15	2	2	2	1	2	4	4	3	4	4	3	4	3	4	2
16	2	2	2	2	1	4	4	4	3	4	4	3	4	3	3

# Cours plan d'expérience (théorie et pratique)

---

## Efficacité des plans d'expériences

- Leur efficacité exceptionnelle dépend essentiellement de la façon de les utiliser
- La connaissance théorique du fonctionnement des plans d'expériences est tout à fait secondaire par rapport à l'apprentissage des points clés qu'il faut respecter pour réussir une expérimentation
- Il est facile d'évacuer tous les aspects théoriques et mathématiques des plans d'expériences, en étant guidé et contrôlé pas à pas par un logiciel conçu pour effectuer chacune des étapes :
  - réalisation des essaiset
  - exploitation des résultats

# Cours plan d'expérience (théorie et pratique)

---

Un Plan d'expériences c'est :

**20% de statistiques  
au service  
de 80% d'organisation.**

- Une gestion de projet rigoureuse respectant les 7 points clés de la réussite d'un plan.

ET

- Une recherche systématique de toutes les causes de variabilité à chacune des étapes de choix techniques.

# Cours plan d'expérience (théorie et pratique)

---

## Les 7 points clé

- Définition chiffrée de l'objectif.
- Mise en commun de toutes les expertises.
- Choix correct des caractéristiques à optimiser et des modalités de leur mesure.
- Choix des facteurs et des valeurs de leurs niveaux à tester.
- Choix de la stratégie pour l'étude des interactions.
- Rigueur dans la préparation et la réalisation de l'expérimentation.
- Validation de l'expérimentation.

# Cours plan d'expérience (théorie et pratique)

---

## Mise en oeuvre

Donneur d'ordre

- Définition du problème à résoudre
- Choix du maître d'œuvre / expérimentation

Groupe de réflexion

- Choix des caractéristiques à optimiser
- Choix des facteurs et leurs valeurs à tester
- Modalités de réalisation des essais et des mesures des résultats

Maître d'œuvre de l'expérimentation

- Réalisation des essais
- Mesures des résultats
- Analyse des résultats
- Définition de la configuration optimale des niveaux des facteurs
- Réalisation de l'essai de validation
- Diffusion du rapport d'expérimentation

Mise en oeuvre Industrielle

- Nouveau mode opératoire
- S P C, dispositifs anti-erreur, ...

# Cours plan d'expérience (théorie et pratique)

---

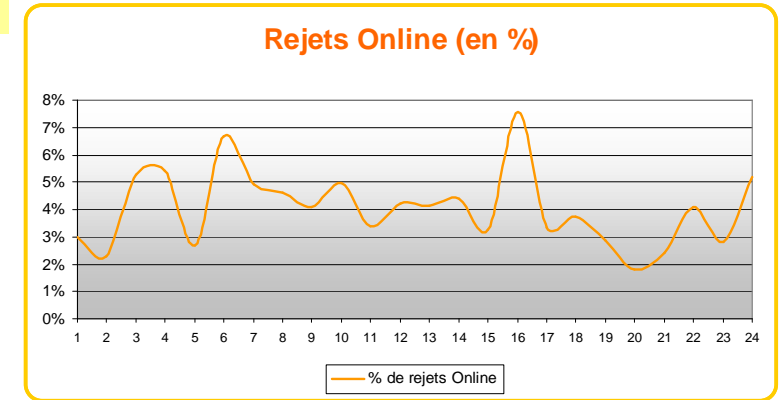
## Traque de la dispersion

- Capabilité du moyen de mesure.
- Unicité des moyens de mesures.
- Figeage des valeurs des paramètres non influents.
- Reproductibilité des réglages des paramètres.
- Reproductibilité des conditions de fabrication.
- Expression de la dispersion résiduelle lors des essais.
- Base fiable de résultats limitée à ceux du plan.
- Standardisation, plan de contrôle procédé.
- S P C, dispositifs anti-erreur, ...

# Cours plan d'expérience (théorie et pratique)

## Expression du problème par le donneur d'ordre

- Choix du sujet à traiter, limité à un produit ou une machine.
- Chiffré = enjeu.
  - ➔ Réduire les coûts de non-qualité.
  - ➔ Garantir à ses clients, la qualité des produits par la maîtrise des procédés de fabrication (capabilité).
- Contraintes à supporter (matières, environnement).
  - ➔ Gains rapides et vérifiés, sans investissement préalable.
- Nomination d'un maître d'oeuvre.
  - ➔ Avec une méthodologie accessible à tout son personnel.
  - ➔ Projet à présenter comme un investissement.



# Cours plan d'expérience (théorie et pratique)

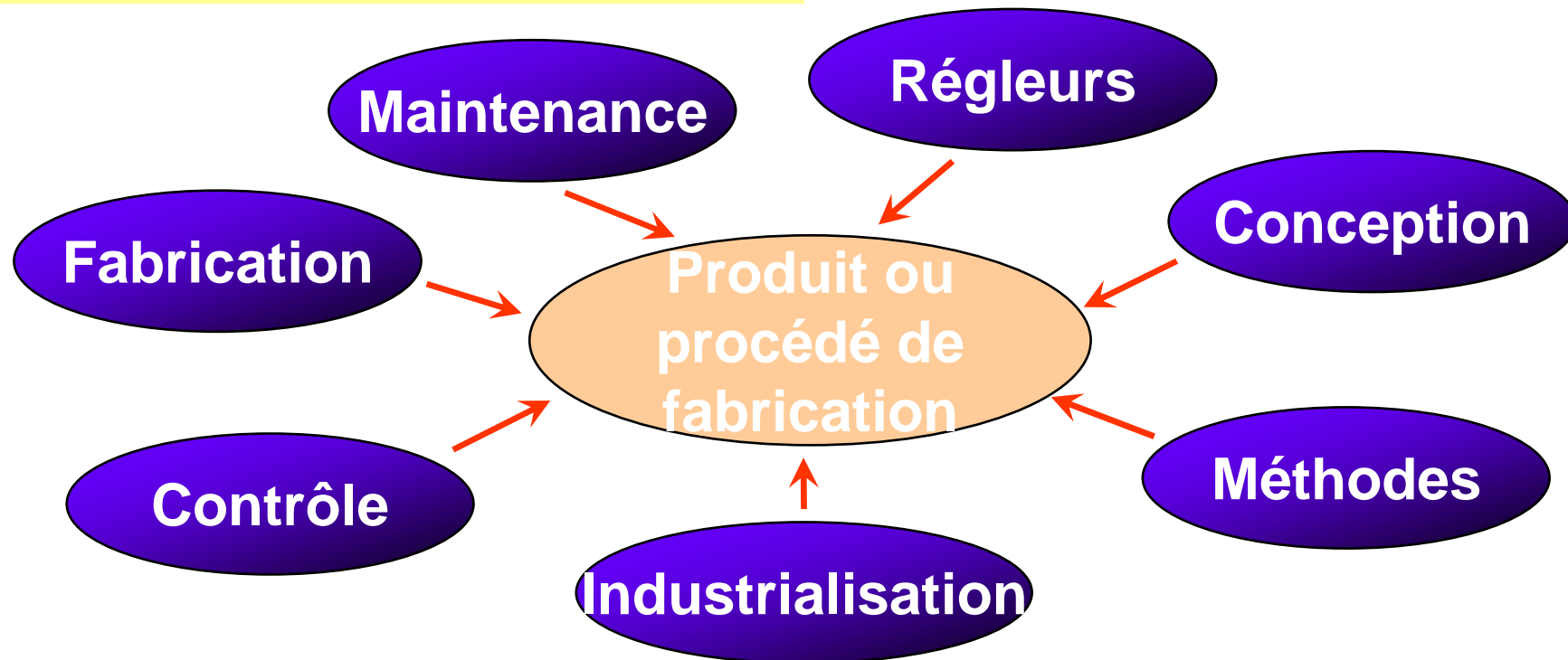
## Chiffrage du problème : coûts globaux de la qualité

Type	Nature	Nb	%	Coût unitaire	Coût en k€	% coût global	% du CA	
		1245368				25678		
Produit	Rebuts	4639	0,373%	100	463,9	43,5%	1,81%	
	Retouches	25752	2,068%	1	25,8	2,4%	0,10%	
	Nouvelle opération en production	12734	1,023%	10	127,3	11,9%	0,50%	
	Retour client	45	0,004%	10000	450,0	42,2%	1,75%	
<i>Sous total</i>		<b>43170</b>	<b>3,466%</b>		<b>1067,0</b>	<b>29%</b>	<b>4,16%</b>	
Hommes	Contrôle	104652		5	523,3	49,0%	2,04%	
	Traitement d'une non-conformité	5864		250	1466,0	137,4%	5,71%	
	Expertises produit	569		500	284,5	26,7%	1,11%	
	Méthodes	27		5000	135,0	12,7%	0,53%	
<i>Sous total</i>					<b>2408,8</b>	<b>65%</b>	<b>9,38%</b>	
Organisation	Etalonnage	200		50	10,0	0,9%	0,04%	
	Audit	20		4000	80,0	7,5%	0,31%	
	Actions correctives	48		1500	72,0	6,7%	0,28%	
	Campagne de rappel produit	1		50000	50,0	4,7%	0,19%	
<i>Sous total</i>					<b>212,0</b>	<b>6%</b>	<b>0,83%</b>	
					<b>3687,8</b>		<b>14,4%</b>	



# Cours plan d'expérience (théorie et pratique)

## Constitution du groupe de réflexion



- Compétences multiples pour faire émerger les connaissances.
- Taille du groupe: mini 5 – maxi 7.
- Pré requis : notions de moyenne, d'écart type, de capabilité.

# Cours plan d'expérience (théorie et pratique)

---

## La mesure du problème

- Trop souvent exprimée en taux de non qualité.
- Le produit doit tenir des performances exprimées à travers des caractéristiques sur lesquelles le groupe est d'accord.
- La mesure doit être continue et non par attributs afin de pouvoir calculer une dispersion (exprimée par le S/N).
- Le moyen de mesure doit être fidèle et capable.

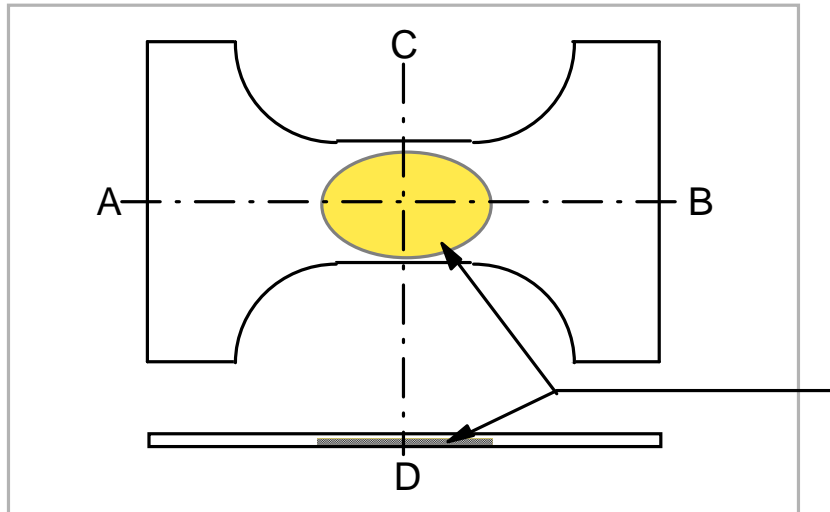
➔ Investigations (étalonnage, mode opératoire, opérateur).

Ensuite pour chaque essai la variabilité des résultats découlera des niveaux des facteurs testés.

- Définir le nombre adéquat de mesures à effectuer qui :
  - ne seront à réaliser que pendant le plan
  - feront partie de l'investissement à consentir.

# Cours plan d'expérience (théorie et pratique)

## La mesure sur des changes pour bébés (1)



Fabrication à très grande cadence  
en mêlant 2 flux automatisés  
de fibres textiles  
et de granulés absorbants.

Localisation idéale  
des granulés absorbants

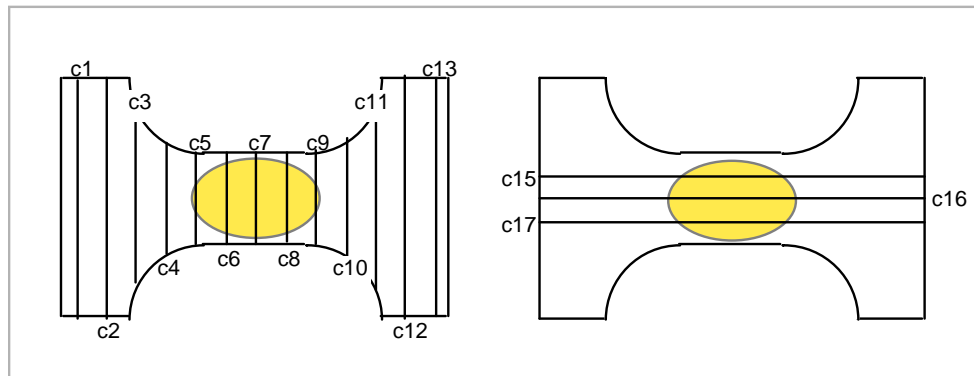
2 difficultés pour mesurer la caractéristique qui est  
la quantité de granulés dans les différentes zones du change :

- avec des moyens classiques le comptage des granulés noyés dans l'épaisseur du change est très fastidieux et imprécis,
- les résultats seront d'autant plus pertinents que le nombre de zones mesurées sera grand, chacune d'elles constituant une caractéristique à optimiser solidairement avec toutes les autres.

# Cours plan d'expérience (théorie et pratique)

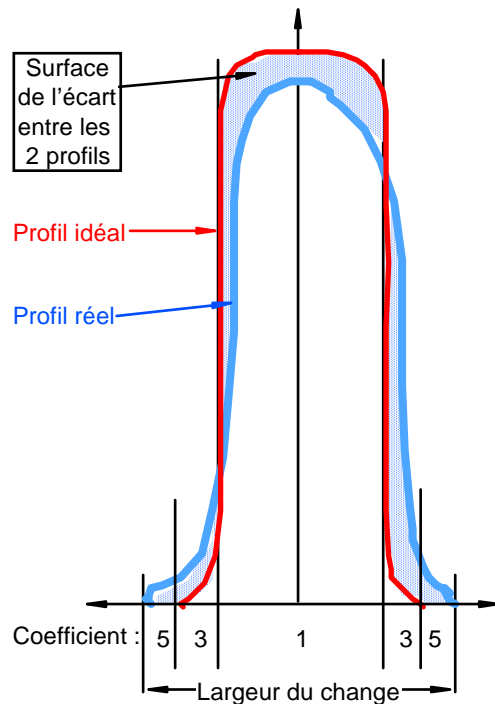
## La mesure sur des changes pour bébés (2)

- Le Groupe de réflexion imagina un protocole expérimental astucieux :
- Saturer le change à mesurer, avec de l'eau additionnée d'un colorant spécifique des granulés, puis le rigidifier en le congelant à  $-30^{\circ}$ ,
- Effectuer des coupes C1, C2, ... de changes congelés, avec un disque abrasif, sur lesquelles les granulés colorés deviennent facilement quantifiables.
- Pour chacun des échantillons prélevés, les courbes idéales et réelles de répartition des granulés sont tracées pour chacune des coupes C1 à C17.



# Cours plan d'expérience (théorie et pratique)

## La mesure sur des changes pour bébés (3)



- Le dénombrement des granulés visibles sur les coupes est parfaitement représentatif de leur répartition dans l'ensemble du change.
- Il devient facile de quantifier, en  $\text{mm}^2$ , les surfaces traduisant les écarts entre le profil idéal et le profil réel.
- Les zones du profil, critiques pour la sécurité du bébé et l'efficacité du change, sont pondérées par des coefficients, de façon à accentuer les écarts correspondants.

La surface totale des écarts quantifiés sur les 17 coupe devient la caractéristique à minimiser pour optimiser la répartition des granulés dans les changes.

# Cours plan d'expérience (théorie et pratique)

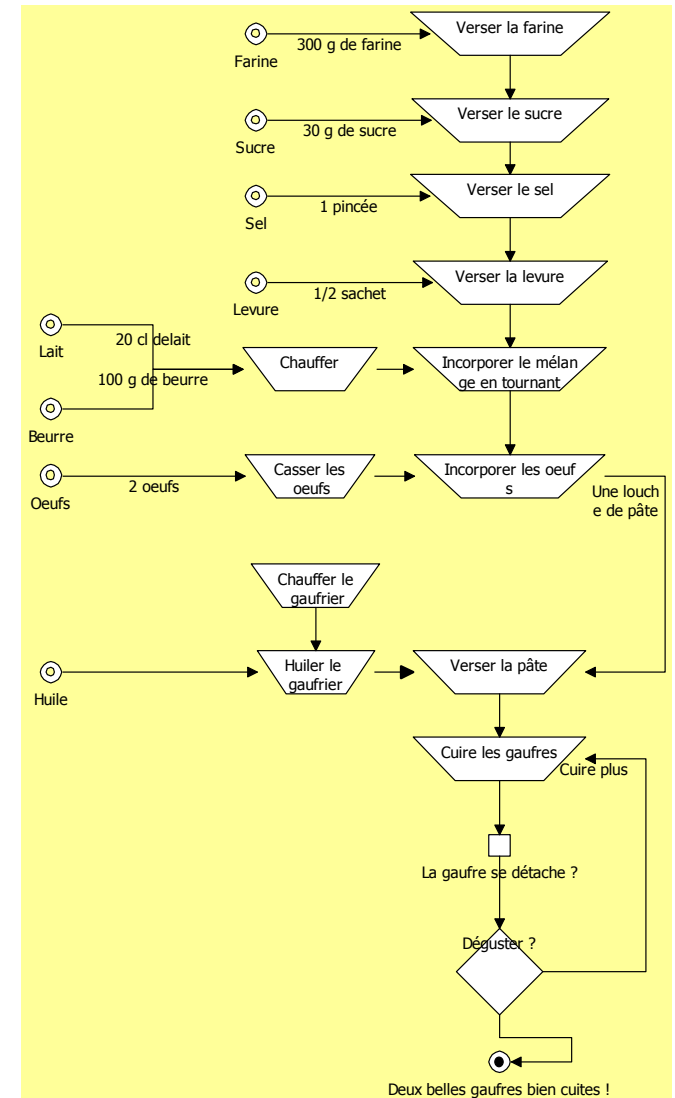
## La recherche des facteurs

Partir d'un process mapping (cartographie de process) détaillant les étapes du process et les variables associées :

- Variables d'entrée (matière).
- Variables de milieu (environnement).
- Variables de réglage (paramètres procédé).

➔ Aller vérifier sur le terrain.

Ce process mapping décrit comment faire des gaufres



# Cours plan d'expérience (théorie et pratique)


---

## Les 3 types de facteurs

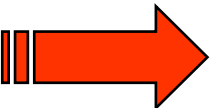
- **LES FACTEURS CONTROLÉS**

 les facteurs dont on peut maîtriser aisément la variation de leur niveau et dont on suspecte un effet.

- **LES FACTEURS BLOQUÉS**

 les facteurs dont on ne suspecte aucun effet mais dont on fixera le niveau pendant les essais.

- **LES FACTEURS BRUITS**

 les facteurs dont on suspecte un effet, pour lesquels on maîtrisera exceptionnellement la variation de leur niveau.

# Cours plan d'expérience (théorie et pratique)

---

## Le tri des facteurs à tester

- Chaque facteur doit être en « relation » avec une ou plusieurs des caractéristiques du produit.
- Il faut regrouper en un seul ‘facteur composite’ les facteurs suspectés dépendre les uns des autres (exemple de la brioche : cas de la T° et de la durée pour une cuisson).
- Sur un plan industriel, il y a plus à gagner à multiplier le nombre de facteurs testés, qu’à s’appesantir sur les problèmes d’interactions.
- Dans premier plan limiter le nombre de niveaux à 2 (évaluation importance effet des facteurs).
- Il faut vérifier la reproductibilité d’obtention de chacun des niveaux de chaque facteur et la suffisance de leur écart.  
→ Investigations pour obtenir cette reproductibilité.



# Cours plan d'expérience (théorie et pratique)

---

## Décision de lancement du plan d'expériences

- Les objectifs (enjeu) et l'ensemble des modalités précises de réalisation des essais (nombre et durée) et de mesure des résultats, décidés par le Groupe de réflexion, doivent être officialisés dans le

### **Protocole de l'expérimentation**

qui est valorisé (essais, mesures, dépouillement).

- ➔ Le plan est soumis à l'engagement du donneur d'ordre (comme un investissement).
- L'objectif minimal de résultat est une stabilisation au meilleur niveau qualité observé.

# Cours plan d'expérience (théorie et pratique)

---

## Réalisation des essais et des mesures

- Le maître d'œuvre s'assure du strict respect de la gamme (feuille d'essai) et de la saisie correcte des résultats sur les feuilles d'enregistrement prévues.
- Les mesures sont réalisées si possible par un seul contrôleur et à l'aide d'un seul appareil de contrôle.
- Contrôle de faisabilité de l'essai N°1 (supposé le plus mauvais quant aux caractéristiques produit attendues) et pertinence des résultats obtenus.
- Exécuter tous les essais même si:
  - l'un des essais donne des résultats proches de l'objectif,
  - les premiers essais donnent des résultats pires que ceux observés habituellement.

# Cours plan d'expérience (théorie et pratique)

---

## Dépouillement des résultats

Une base de données fiable avec une bonne traçabilité des conditions d'obtention.

- Pas besoin de nettoyer le jeu de données.
- Pas d'analyse de corrélations à réaliser.

% de la variance globale expliquée par la variation des facteurs.

- Pertinence du choix des facteurs.

Méthodologie de dépouillement privilégiant l'obtention de la dispersion minimale (voir p 27).

# Cours plan d'expérience (théorie et pratique)

---

## Définition de la configuration optimale des niveaux des facteurs

En utilisant le ratio S/N comme indicateur de dispersion :

- analyse caractéristique par caractéristique,
- analyse de la somme pondérée de toutes les caractéristiques (optimisation solidaire)

→ Utilisation d'un moteur de simulation.

Définition des essais de vérification à réaliser :

- La configuration optimale et les prévisions de résultats par caractéristique (dispersion et moyenne),
- Réplication de l'essai du plan ayant donné les meilleurs résultats.

→ Vérifier la prévision.

# Cours plan d'expérience (théorie et pratique)

---

## Essai de validation

- Réalisé dans les mêmes conditions opératoires que les autres essais du plan (durée, mesures, ...).
  - Analyse de la correspondance entre résultats attendus et résultats obtenus :
    - parfaite superposition → le plan n'inclut pas d'interaction.
    - écart → on suspecte des interactions.
  - En cas d'interactions bâtir un nouveau plan d'expériences capable de déterminer entre quels facteurs elles ont lieu.
- Soumis à l'engagement du donneur d'ordre (comme un investissement).

# Cours plan d'expérience (théorie et pratique)

---

## Plan de pérennisation

Le plan d'expérience a permis de hiérarchiser les facteurs influant sur les caractéristiques produit :

- Toilettage des gammes de fabrication.
- Plan de contrôle procédé et de maintenance sur les parties du procédé dont le réglage des paramètres est primordial.
- Simplification ou dispositifs anti-erreur (poka yoke) pour les réglages devant être retouchés lors d'un changement de fabrication.
- Mise en place de carte de contrôle (SPC) sur les caractéristiques dont la capabilité est la moins bonne avec mode opératoire de réaction.

➔ Mise en œuvre industrielle.

# Cours plan d'expérience (théorie et pratique)

---

## Conclusion (1) : les différences de cette méthode

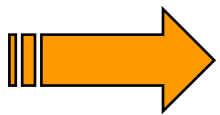
- Elle optimise solidairement toutes les caractéristiques à travers **une analyse prioritaire des résultats en terme de dispersion.**
- Elle privilégie une action limitée dans le temps, centrée sur les paramètres facilement maîtrisables, sans s'attaquer aux causes de variabilité, difficiles ou trop coûteuses à contrôler.
- Elle permet de s'affranchir de la maîtrise coûteuse de facteurs bruit externes.
- Elle redonne aux compétences internes de l'entreprise une autorité quant à la justesse de leur expertise.
- Elle s'intègre facilement et sans préalable dans toutes les démarches de progrès déjà en cours.

# Cours plan d'expérience (théorie et pratique)

---

## Conclusion (2) : des résultats pour l'entreprise

- Un retour sur investissement très important.
- Une sécurité assurée par un engagement progressif et bien jalonné.
- Des résultats réellement et régulièrement constatés.
- Une juste connaissance des paramètres significatifs du procédé.
- Une amélioration de la synergie des compétences internes.
- Une pérennité de la solution.



**MEILLEURES PERFORMANCES INDUSTRIELLES**



# Cours plan d'expérience (théorie et pratique)

---

## *Conclusion sur les plans d'expériences*

Utile pour déterminer la hiérarchie des influences des divers facteurs du procédé sur les caractéristiques produit que l'on veut assurer.

Ne se met en place qu'en groupe pluridisciplinaire et que si :

- On a défini des mesures continues et capables (l'occasion de remettre en cause ses moyens de mesure)
- On a choisi tous les facteurs du procédé susceptibles d'influer sur le produit (facteurs contrôlés, facteurs bruits, facteurs figés, niveaux des facteurs reproductibles et suffisamment séparés)
- On a traqué la dispersion partout où elle peut fausser le résultat

Alors on réalise les essais et les mesures avec la plus grande rigueur et l'on constate :

- Le % de la variance expliqué par les facteurs choisis (qualité du diagnostic)
- La justesse du modèle prédictif lors de l'essai de validation (présence éventuelle d'interactions)

Le plan se présente comme un investissement à consentir pour résoudre à moindre coût un problème dont l'enjeu est bien déterminé.

## Discussion

Vos problèmes d'industrialisation

La méthode des plans d'expériences

La mise en place

Votre pilotage

...

Le retour d'expérience

Evaluation