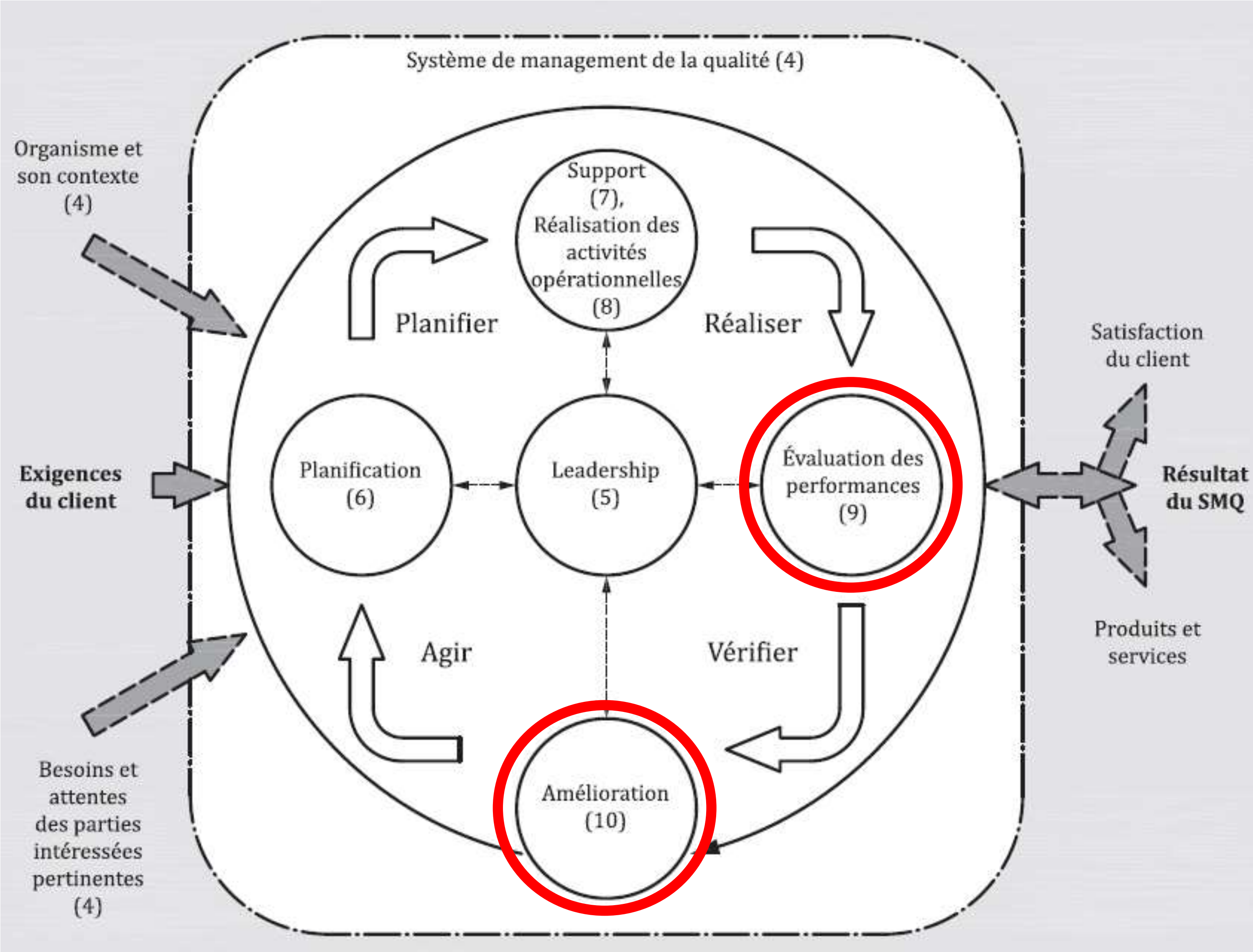
LES PLANS D'EXPERIENCES METHODE TAGUCHI

Comment optimiser les réglages d'un processus par des expérimentations

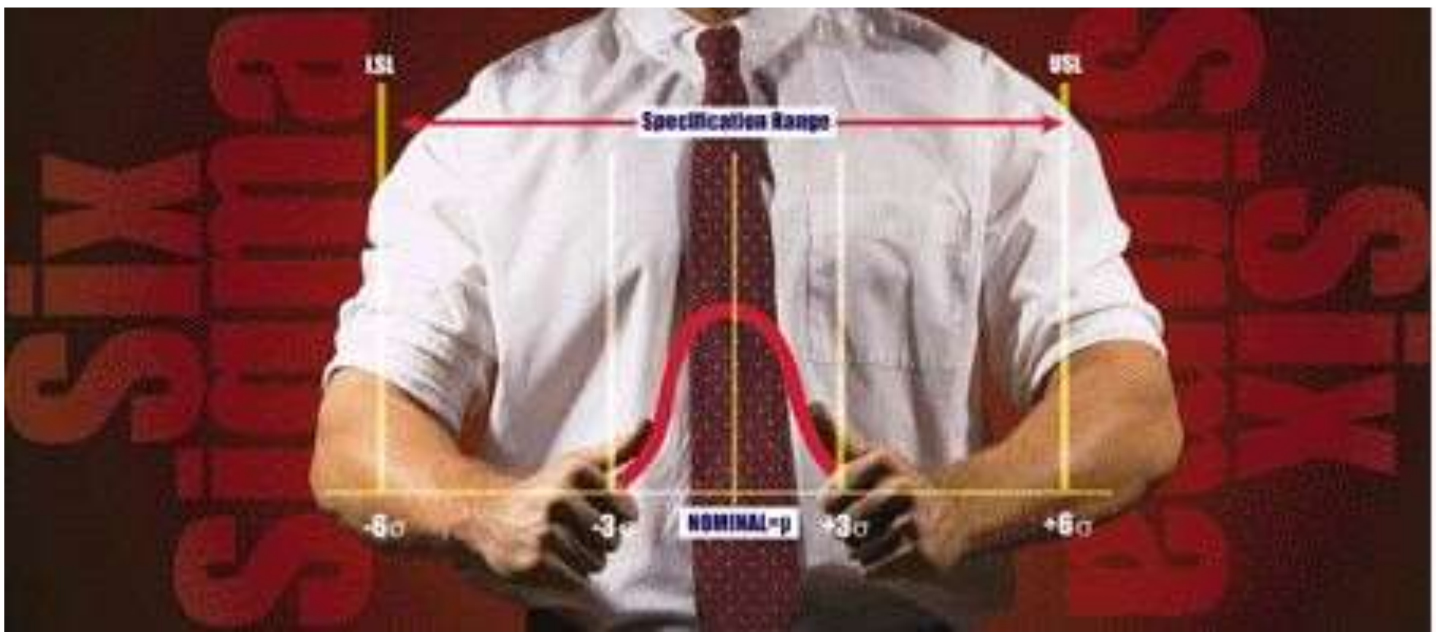
Lien avec ISO 9001



LA METHODE SIX SIGMA

6σ

S I X S I G M A



SIX SIGMA, C'EST :

une stratégie d'affaire basée sur une approche quantitative rigoureuse qui permet aux entreprises d'améliorer considérablement leurs résultats financiers tout en augmentant simultanément la satisfaction des clients.

DES ETAPES : DMAIC

D : DEFINIR (Define)

M : MESURER (Measure)

A : ANALYSER (Analyze)

I : AMELIORER (Improve)

C : MAITRISER (Control)

Caractériser - Optimiser

La Caractérisation des processus se fait par l 'identification des caractéristiques clés du processus, et la détermination des opportunités et des objectifs d 'améliorations

Stratégie Six-Sigma

Caractérisation

Phase 1 : Définir

Phase 2 : Mesurer

Phase 3 : Analyser

Optimisation

Phase 4 : Améliorer

Phase 5 : Maîtriser

L 'optimisation des processus vise à identifier, améliorer et maîtriser les variables clés du processus qui exercent une influence néfaste sur les caractéristiques clés du processus

DES OUTILS ASSOCIES AUX ETAPES

Définir

- Gestion du Projet
- VOC Voix du client
- CTQ Exigences client
- Classification de Kano
- Analyse Fonctionnelle
- Matrice QFD
- SIPOC
- Cartographie des flux
- QQOQCPC
- Est / N'est pas
- Dedans / Dehors
- Gains et Coûts

Mesurer

- Feuille de relevés
- Histogramme
- Echantillonnage
- Diagramme des flux (VSM)
- Analyse de déroulement
- AMDEC (analyse des risques)
- Diagramme de concentration des défauts
- Capabilité de mesure (R&R)
- Sigma du processus
- Capabilités processus
- Estimation du z

Analyser

- Brainstorming
- Méthode KJ
- Pareto
- Vote pondéré
- Analyse de capabilité
- Sigma du processus
- Diagramme causes / effets
- Statistiques descriptives
- Statistique inférentielle (tests)
- Box Plot
- Diagramme multi-vari
- ANAVAR
- Etude de corrélations
- Echantillonnage

Améliorer

- Brainstorming
- Méthodes de créativité et d'Innovation
- Méthode KJ
- Vote pondéré
- Diagramme Forces / Faiblesses
- Plans d'expériences
- ANAVAR
- Etude de corrélations
- AMDEC (analyse de risques)
- Plan d'action

Maîtriser

CONTROLER

- Validation des résultats
- Analyse de capabilité
- Carte de contrôle (MSP)
- Formalisation des modes opératoires
- Mise sous contrôle

STANDARDISER
PERENNISER

- Standardisation
- Simplification
- Documentation
- Poka Yoke
- Audit
- Bilan et Clôture du projet

Plan d'expériences
LE FONDEMENT

CONNAISSANCE

ACQUISE APRES

UNE LONGUE PRATIQUE

DE L'EXPERIENCE

LE MARIAGE

AVEC L'EXPERIENCE

ESSAIS

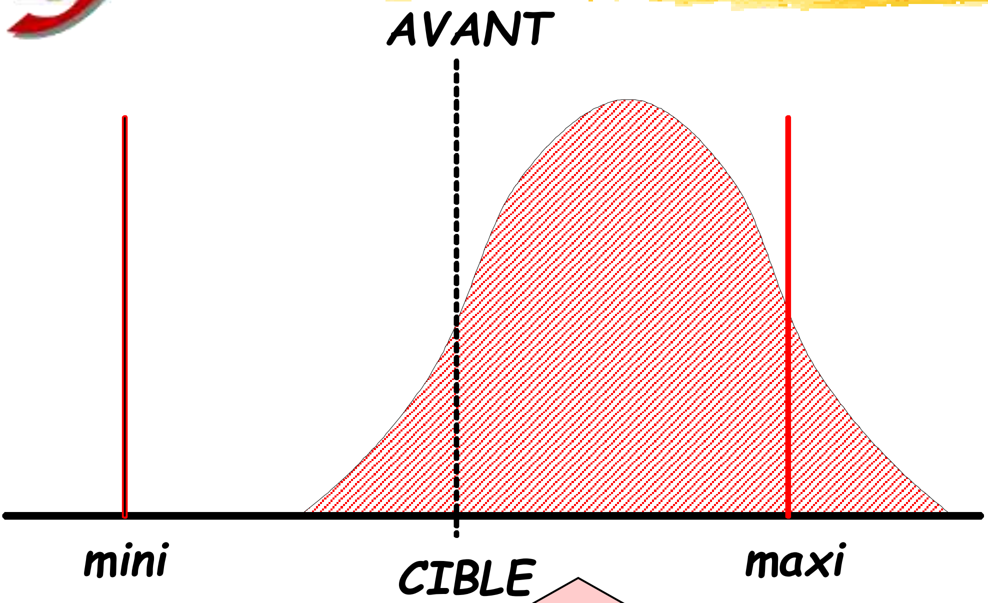
ET

EXPERI-
MENTATIONS

MODELISATION

EXPERIMENTALE

UN DES OBJECTIFS

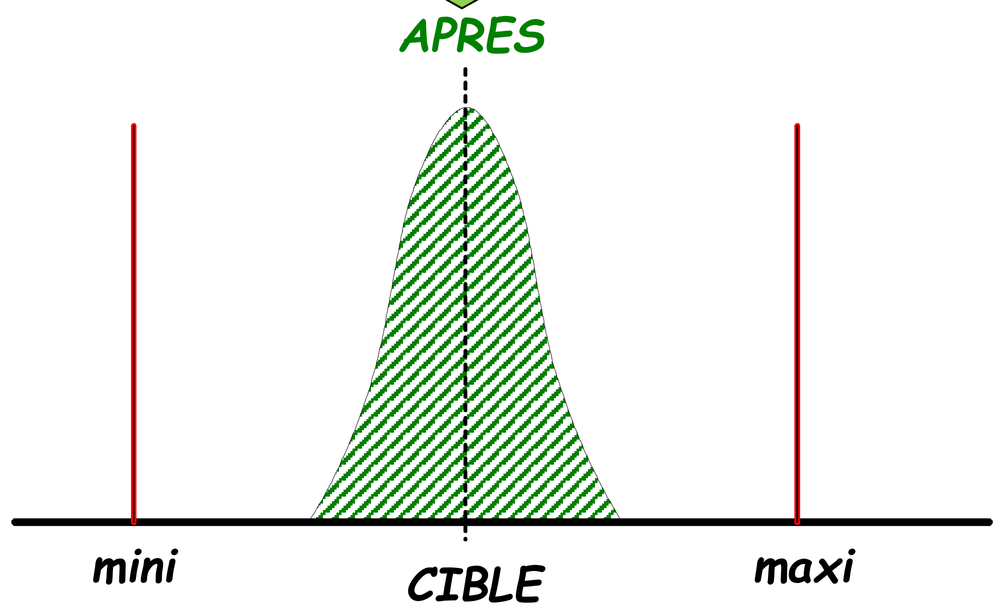


Moyenne décalée par rapport à la cible

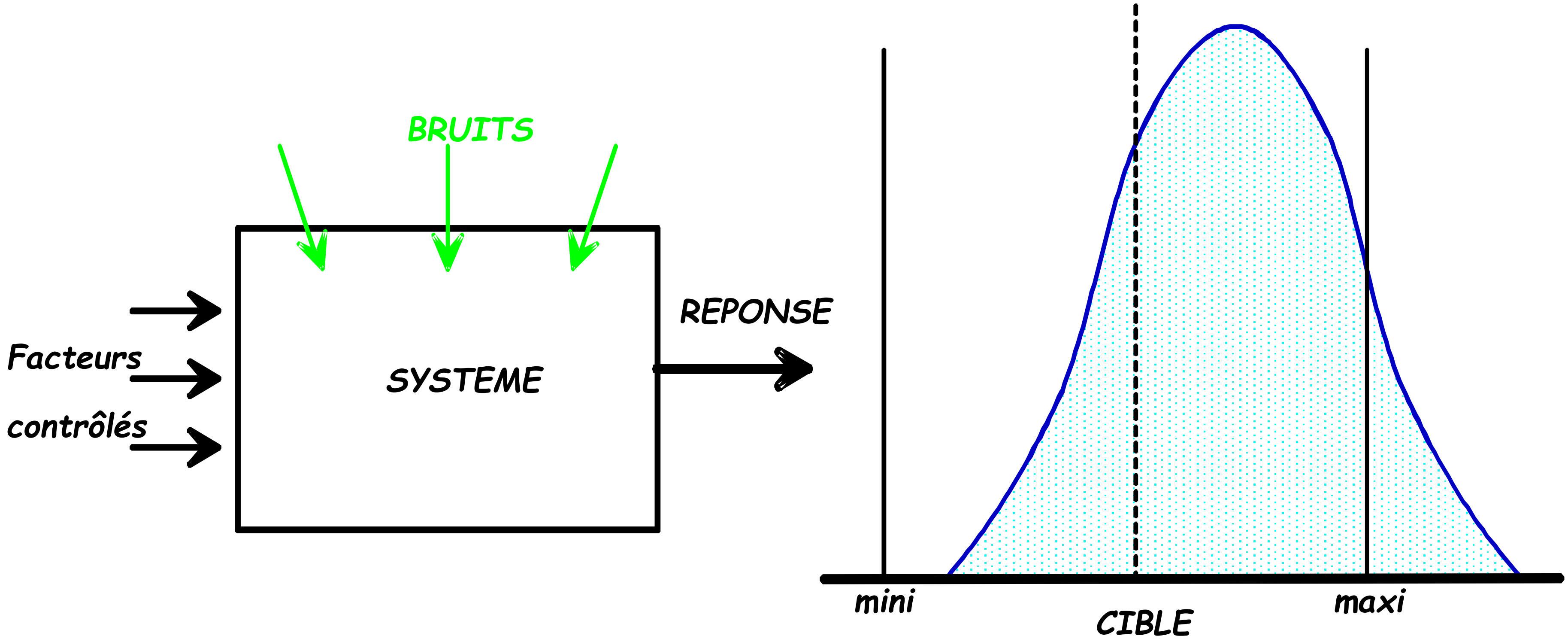
Grande dispersion

Moyenne ciblée

Faible dispersion

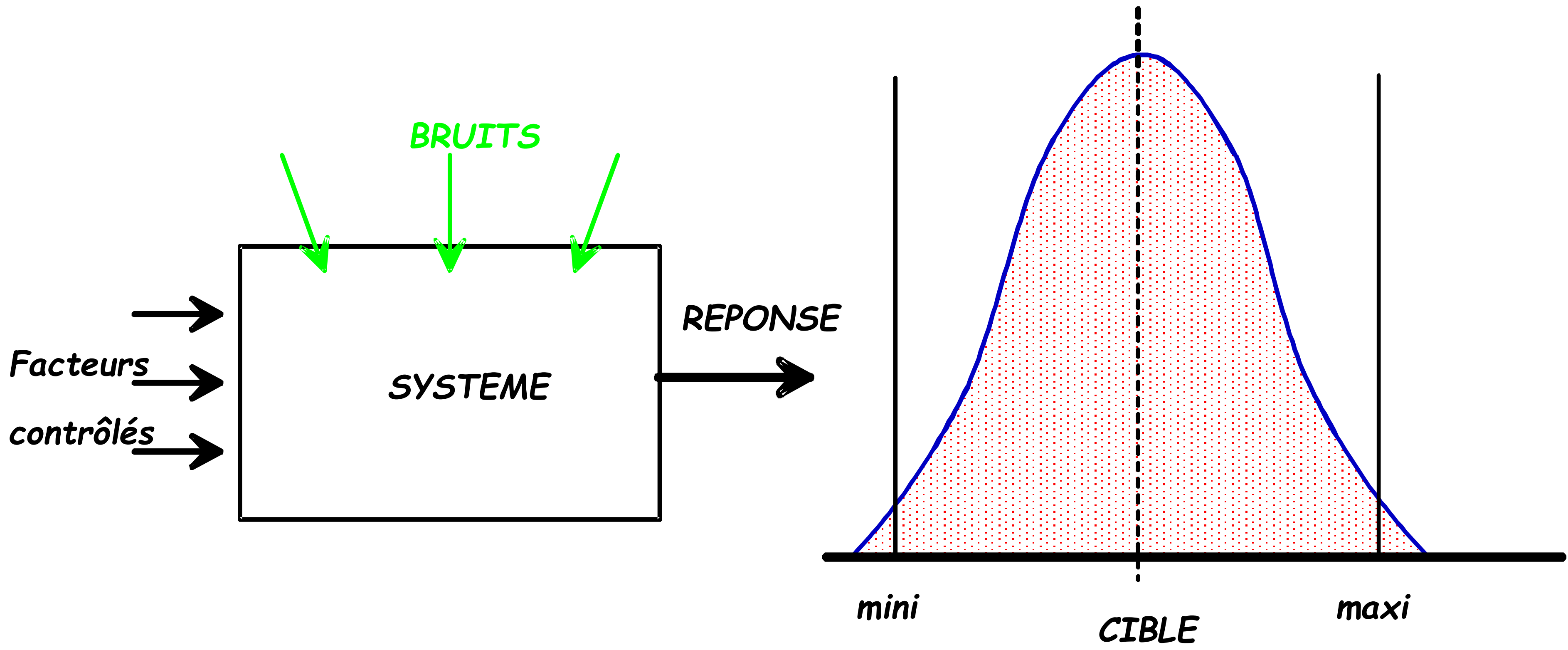


1. SITUATION INITIALE



2. TRAVAIL SUR LES FACTEURS CONTROLES

→ CIBLE ATTEINTE

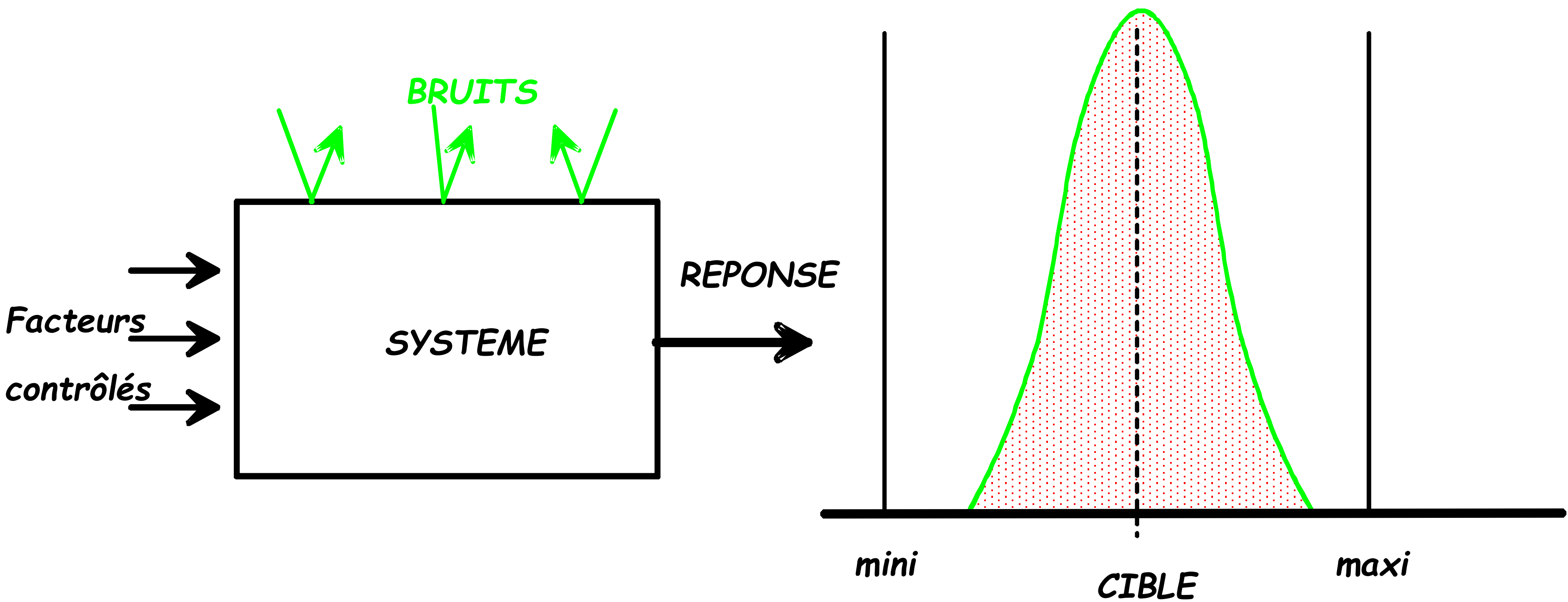


3. TRAVAIL SUR LES FACTEURS CONTROLES

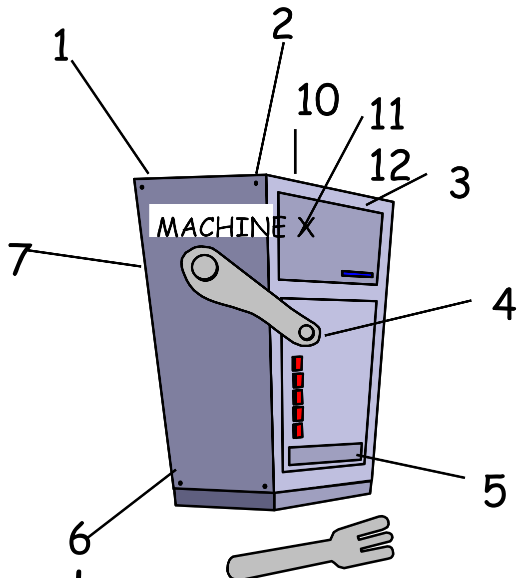
→ CIBLE ATTEINTE

ET LES FACTEURS BRUITS

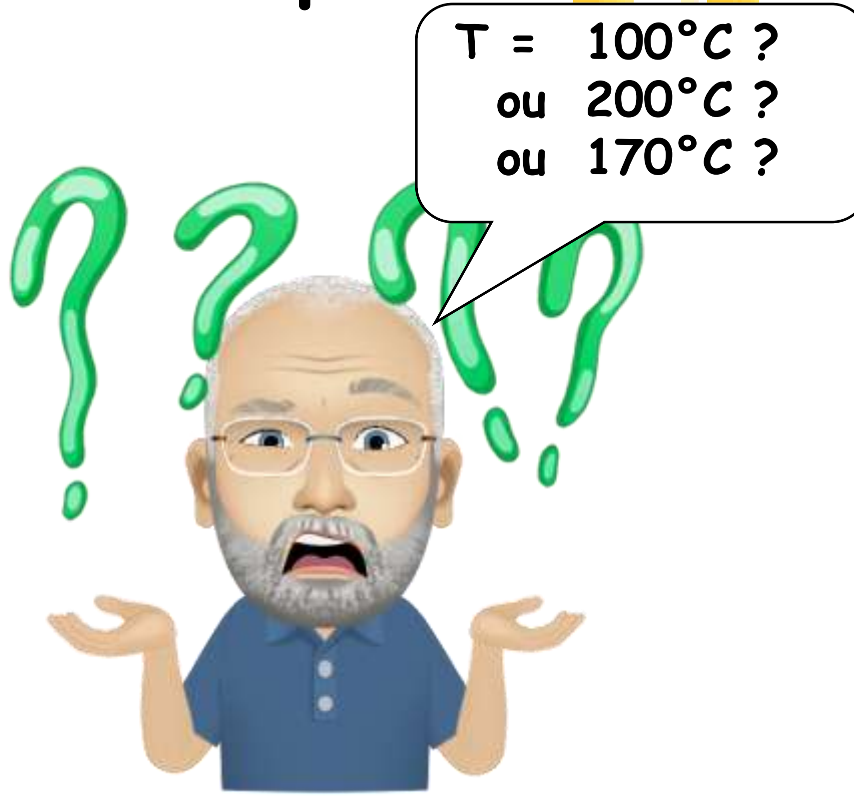
→ ROBUSTESSE / BRUITS



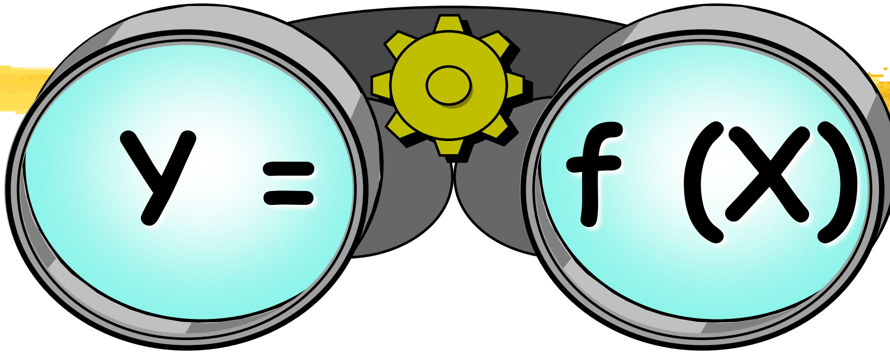
Mise au point et paramétrage d'un processus de production



> 10 paramètres de réglages pouvant prendre chacun de nombreuses valeurs

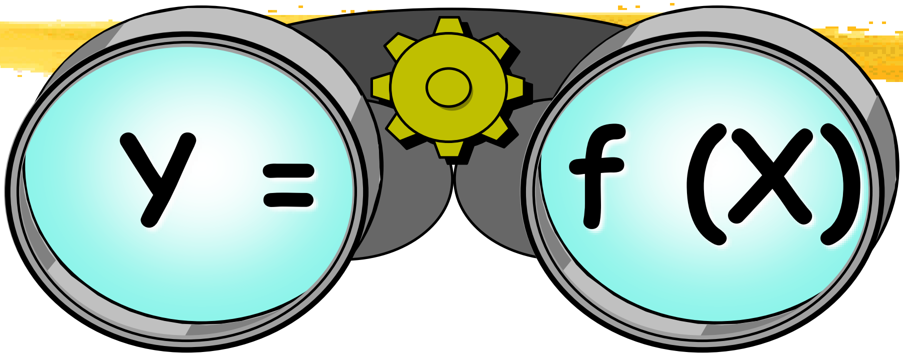


La mise au point sera longue et risque de n'être qu'un compromis acceptable, mais surtout pas une solution optimale.



Pour atteindre nos objectifs, devons-nous nous concentrer sur Y,.. ou sur les X ?

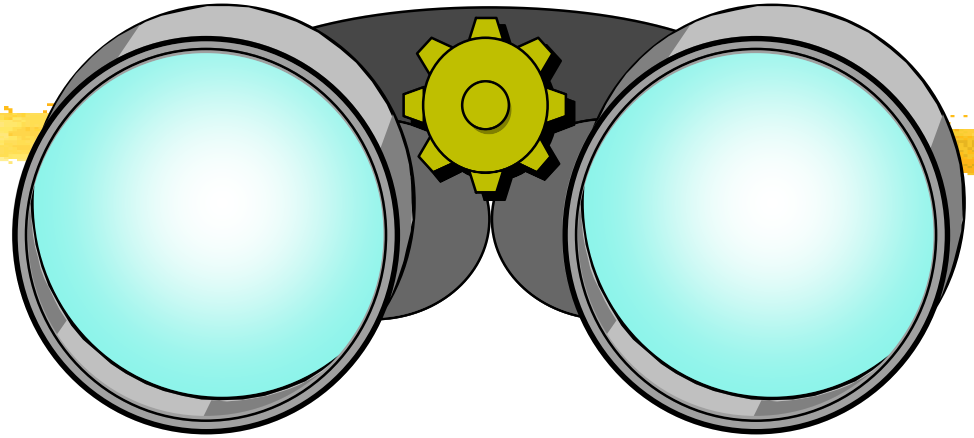
Y	$X_1 \; . \; . \; . \; X_n$
➢ Réponse	➢ Entrées
➢ Effet	➢ Causes
➢ Symptôme	➢ Problèmes
➢ Surveiller	➢ Maîtriser



Pour atteindre nos objectifs, devons-nous nous concentrer sur Y,.. ou sur les X ?

Si nous maîtrisons si bien les X, alors pourquoi devons-nous constamment nous préocupper de tester et inspecter Y?

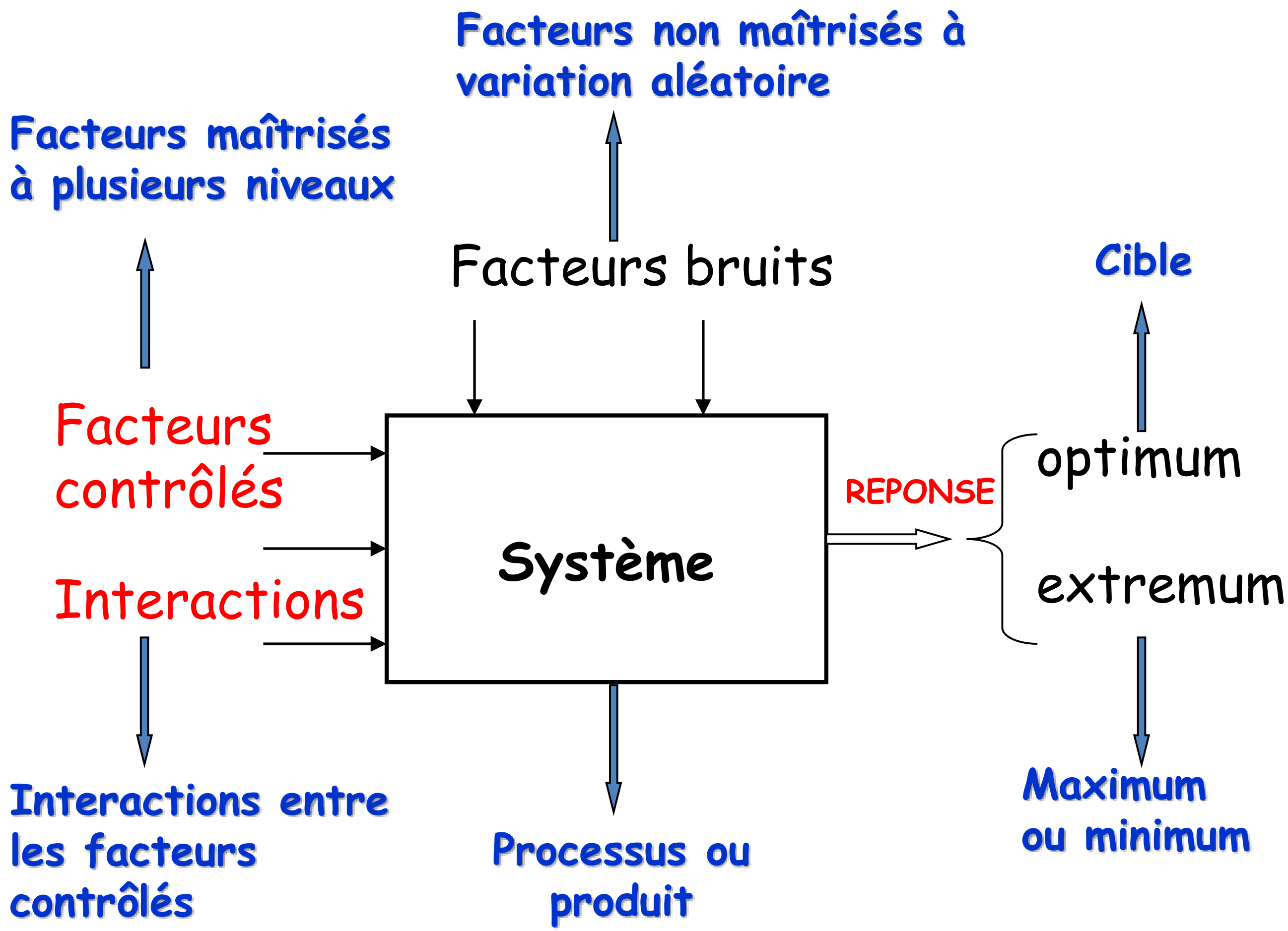
Concentrons nos efforts sur les X plutôt que sur Y comme par le passé



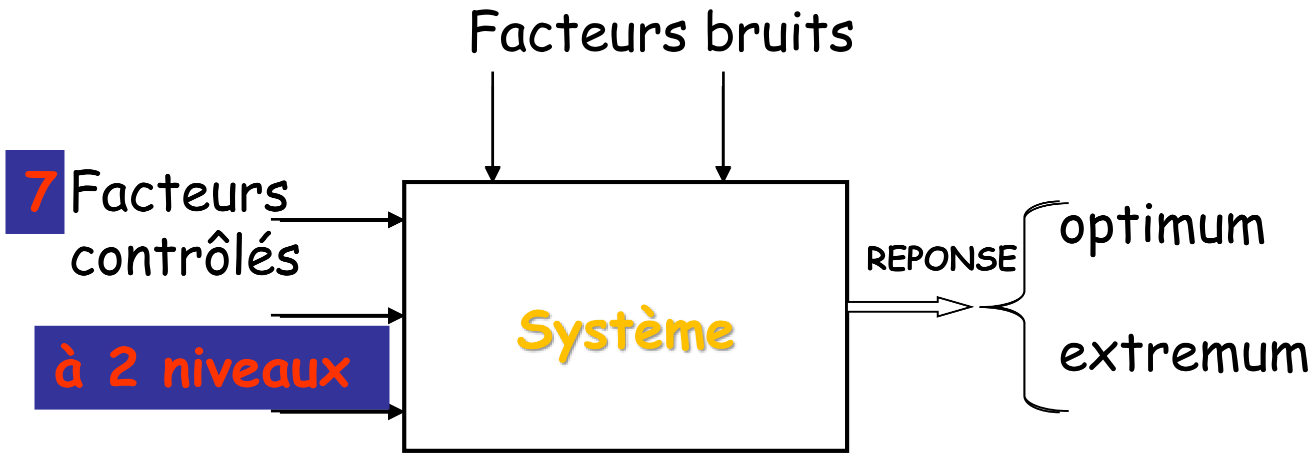
$$Y = f\,(X_1,\ X_2,\ \ldots\ X_n)$$

Comprenons et Gérons les Entrées
et
il en résultera de bonnes sorties

MODELISATION D'UN PROCESSUS



EXEMPLE DE PROCESSUS



Plan complet = 2^7 essais = 128 essais

Echantillonnage

Plan fractionnaire = 8 essais

Modélisation expérimentale

Conclusion Prédiction

LES ORIGINES

Travaux de Fisher en 1925

Travaux de Taguchi au Japon dans les années 60

Méthode introduite aux Etats-Unis dans les années 80

- Ford Motors Company
- Xerox Company

et un peu plus tard en Europe

- Industries du Plastique et de la Chimie
- Industries de grande série (Peugeot, Renault, Aérospaciale, GEC Alsthom, …)

LES OBJECTIFS

- **Maîtriser la conception de produits nouveaux :**

  → Au lancement d'un nouveau produit : pour en définir les valeurs de paramètres clés

- **Maîtriser les processus de production :**

  → Au lancement d'une nouvelle production : pour déterminer les réglages de paramètres machine idéaux

  → À tout moment dans le temps pour optimiser les différents paramètres des processus et valider les modes opératoires

  → A tout moment pour améliorer la capabilité des processus

LES AVANTAGES

- Diminution considérable du nombre d'essais donc du coût des essais
- Possibilité d'étudier un très grand nombre de facteurs à plusieurs niveaux
- Chiffrage des effets des facteurs
- Détection des éventuelles interactions entre facteurs
- Modélisation expérimentale très aisée des résultats
- Détermination des résultats avec une bonne précision

LES PLANS COMPLETS

EXEMPLE

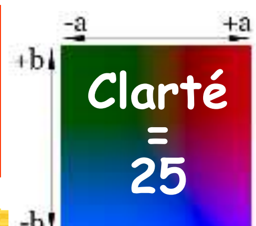
Etude d'une installation de vernissage, mesure de la clarté obtenue

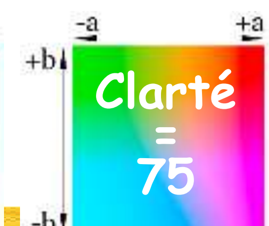
4 facteurs à 2 niveaux

Facteurs	Niveau 1	Niveau 2
Pression	1	3
Ouverture	0	5
Type colorant	Type A	Type B
Quantité colorant	25 %	35 %

le plan complet nécessite :

$2^4 = 2 \times 2 \times 2 \times 2 = 16$ essais





Spectrophotomètre pour mesurer la couleur d'une surface dans le système L*a*b*.

La composante **L*** est la clarté, qui va de 0 (noir) à 100 (blanc).
La composante **a*** représente une gamme de 600 niveaux sur l'axe rouge (+299 valeur positive) → vert (-300 valeur négative) en passant par le gris (0).
La composante **b*** représente une gamme de 600 niveaux sur l'axe jaune (+299 valeur positive) → bleu (-300 valeur négative) en passant par le gris (0).

Le plan complet s'écrit donc :

Les facteurs

Les différentes lignes d'essais

Essais	A	B	C	D	Y
1	1	1	1	1	30.5
2	1	1	1	2	38.0
3	1	1	2	1	30.0
4	1	1	2	2	36.0
5	1	2	1	1	20.5
6	1	2	1	2	27.0
7	1	2	2	1	18.0
8	1	2	2	2	25.5
9	2	1	1	1	35.5
10	2	1	1	2	42.0
11	2	1	2	1	32.5
12	2	1	2	2	39.0
13	2	2	1	1	24.5
14	2	2	1	2	32.0
15	2	2	2	1	23.0
16	2	2	2	2	29.5

La réponse par ligne d'essai

A au niveau 1

A au niveau 2

A : Pression (1 bar ; 3 bar)
B : Ouverture (0 ; 5)
C : Colorant (type A ; Type B)
D : Qté colorant (25% ; 35%)

Y : Mesure de la couleur

$\bar{Y}_{A1} = 28{,}18$

$\overline{Effet}_{A1} = -2$

$\bar{Y} = 30{,}21$

$\overline{Effet}_{A2} = +2$

$\bar{Y}_{A2} = 32{,}25$

Les niveaux des facteurs 1 ou 2

Modélisation du système

$$\tilde{Y} = M + A + B + C + D$$

La réponse théorique Y ~ dépend donc

de la moyenne de toutes les expérimentations M ou I

et

de l'effet des différents facteurs A, B, C et D

Calcul des effets moyens des facteurs

E_{A1} = Moyenne des réponses lorsque A est au niveau 1 – Moyenne générale

Avec E_{A1} : effet moyen de A au niveau 1

$$E_{A1} = \frac{(Y_1 + Y_2 + Y_3 + Y_4 + Y_5 + Y_6 + Y_7 + Y_8)}{8} - M$$

E_{A1} = - 2.03

E_{A1} = - E_{A2}

$$E_{A1} = - E_{A2}$$

Le facteur A ne possède qu'un seul degré de liberté

une seule valeur indépendante

Le nombre de degrés de liberté d'un facteur
=
nombre de niveaux du facteur - 1

E_{B1} = ? 5.22	E_{B2} = ? 5.22
E_{C1} = ? 1.03	E_{C2} = ? 1.03
E_{D1} = ? 3.41	E_{D2} = ? 3.41

A au niveau 1

B, C et D : 4 fois au niveau 1
et 4 fois au niveau 2

Essais	A	B	C	D	Y
1	1	1	1	1	30.5
2	1	1	1	2	38.0
3	1	1	2	1	30.0
4	1	1	2	2	36.0
5	1	2	1	1	20.5
6	1	2	1	2	27.0
7	1	2	2	1	18.0
8	1	2	2	2	25.5
9	2	1	1	1	35.5
[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]
16	2	2	2	2	29.5

Le plan d'expériences est **orthogonal**

à chaque niveau d'un facteur,
les autres facteurs apparaissent
le même nombre de fois à un niveau différent

Modélisation matricielle réponse théorique

$$\tilde{Y} = M + [E_{A1} \quad E_{A2}]\, A + [E_{B1} \quad E_{B2}]\, B + [E_{C1} \quad E_{C2}]\, C + [E_{D1} \quad E_{D2}]\, D$$

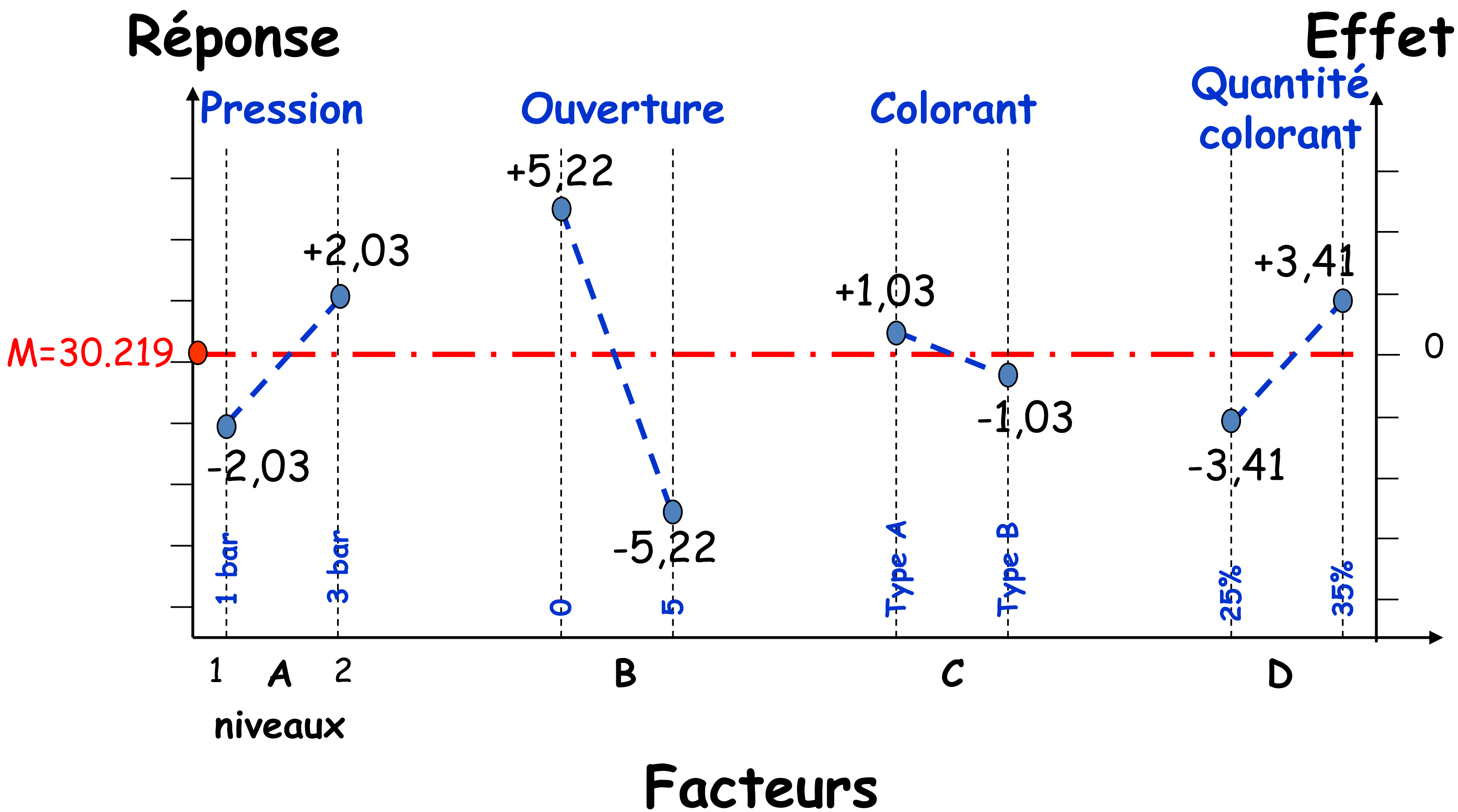
$$\tilde{Y} = 30.219 + [-2.03 \quad 2.03]\, A + [5.22 \quad -5.22]\, B + [1.03 \quad -1.03]\, C + [-3.41 \quad 3.41]\, D$$

Essai 11

$$\tilde{Y} = M + E_{A2} + E_{B1} + E_{C2} + E_{D1}$$

$$\tilde{Y} = 30.219 + 2.03 + 5.22 - 1.03 - 3.41 = \mathbf{33.03}$$

Graphe des effets moyens des facteurs



Plans d'expériences

Notion d'interactions

Une situation connue

La réponse Y mesurée

Le réactiomètre

permet de tester **le temps de réaction d'une personne** et de comparer les distances d'arrêt en fonction de l'état de la chaussée (sol mouillé, verglas , etc) et de l'état physique de la personne (fatigue, **alcool**, stupéfiants, médicaments, téléphone , etc).

Les facteurs X contrôlés

Niveau 1 :
pas de café

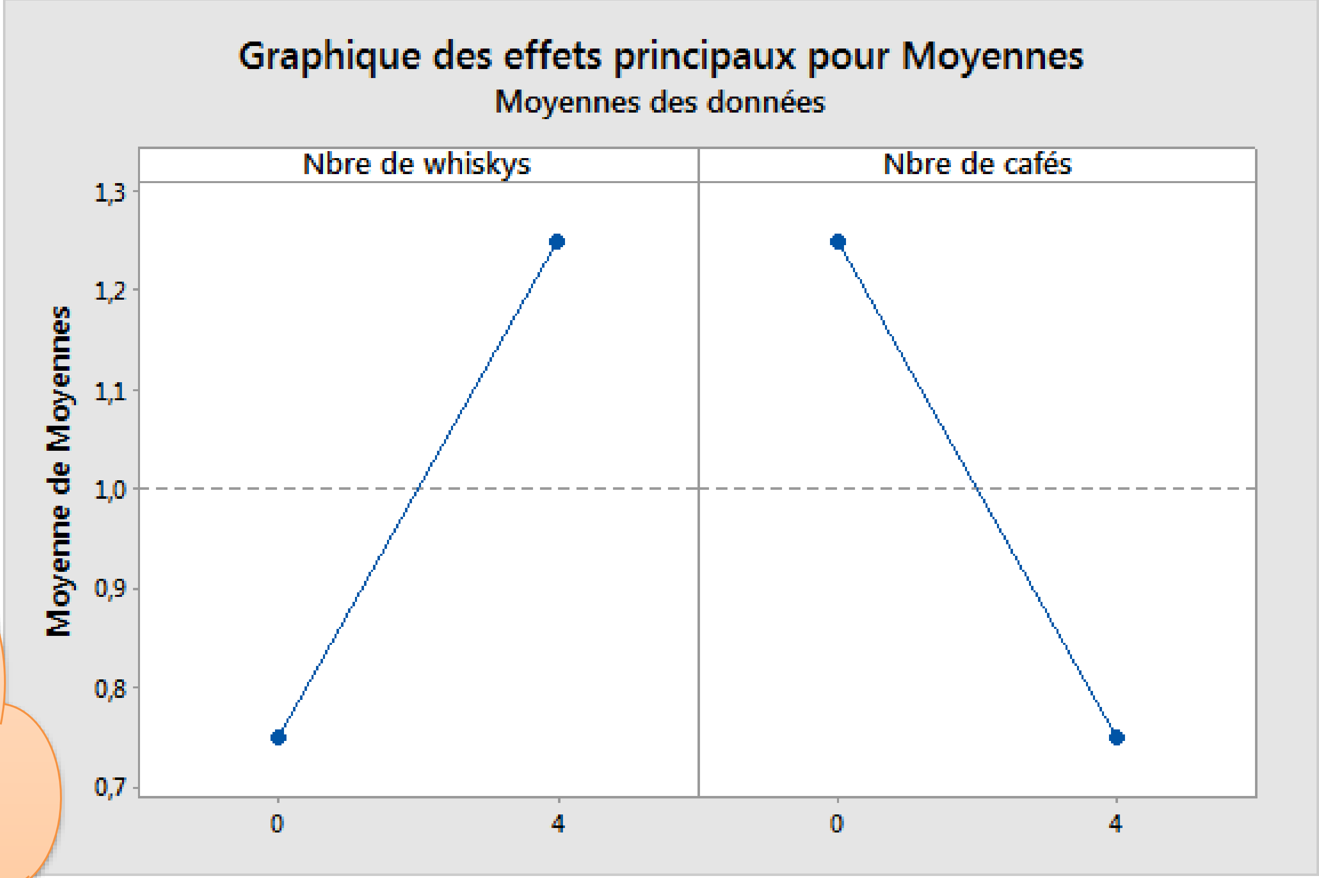
Niveau 2 :
boire 4 cafés

Niveau 1 :
pas de whisky

Niveau 2 :
boire 4 whiskys

Le plan d'expériences

N° essai	Nbre de whiskys	Nbre de cafés	Délai de réaction (s)
1	0	0	**1**
2	0	4	**0,5**
3	4	0	**1,5**
4	4	4	



Quel est à votre avis la réponse (délai de réaction) si on prend **4 cafés ET 4 whiskys ?**

Fonction objective :

Délai de réaction $= Moyenne + Effet\ du\ café + effet\ du\ whisky$

$$\boxed{\textbf{Délai de réaction} = \mathbf{1 - 0,125\ Cafés + 0,125\ Whiskys}}$$

Comment voyez-vous votre amie après…

=

et après…

=

et après…

=

Le plan d'expériences avec interaction

N° essai	Nbre de whiskys	Nbre de cafés	Délai de réaction (s)
1	0	0	**1**
2	0	4	**0,5**
3	4	0	**1,5**
4	4	4	**1,4**

<u>*Fonction objective (ou équation de régression **non codée**) :*</u>

Délai de réaction $= Moyenne + Effet\ du\ café + effet\ du\ whisky + Effet\ de\ l'interaction$

Délai de réaction $= \mathbf{1 - 0,125}\ \boldsymbol{Caf}$**és** $+ \mathbf{0,125}\ \boldsymbol{Whiskys}$ **+ 0,025 Café x Whisky**

Le plan d'expériences avec interaction

N° essai	Nbre de whiskys	Nbre de cafés	Délai de réaction (s)
1	-1	-1	**1**
2	-1	1	**0,5**
3	1	-1	**1,5**
4	1	1	**1,4**

En version codée :

Moyenne = 1,1

Effet moy Whisky = 0,35

Effet moy Café = -0,15

Effet moy W/C = 0,1

Fonction objective ***codée*** *:*

Délai de réaction $= Moyenne + Effet\ du\ café + effet\ du\ whisky + Effet\ de\ l'interaction$

$$\boxed{\textbf{Délai de réaction} = \mathbf{1,1 - 0,15\,c + 0,35\,w + 0,1\ c \times w}}$$

avec $c = \dfrac{C - C_0}{Pas_C} = \dfrac{C-2}{2}$ et $w = \dfrac{W - W_0}{Pas_W} = \dfrac{W-2}{2}$

INTERACTION

Une interaction,
c'est quand l'effet d'un facteur dépend du niveau d'un autre facteur.

L'effet du café n'est pas le même si le nombre de whiskys est à 0 ou à 4 !

Si 0 whisky alors 4 cafés permettent de gagner 0,5 s

Si 4 whiskys alors 4 cafés permettent de gagner 0,1 s

D'autres exemples d'interactions connues ?

LES INTERACTIONS

Exemples d'interaction :

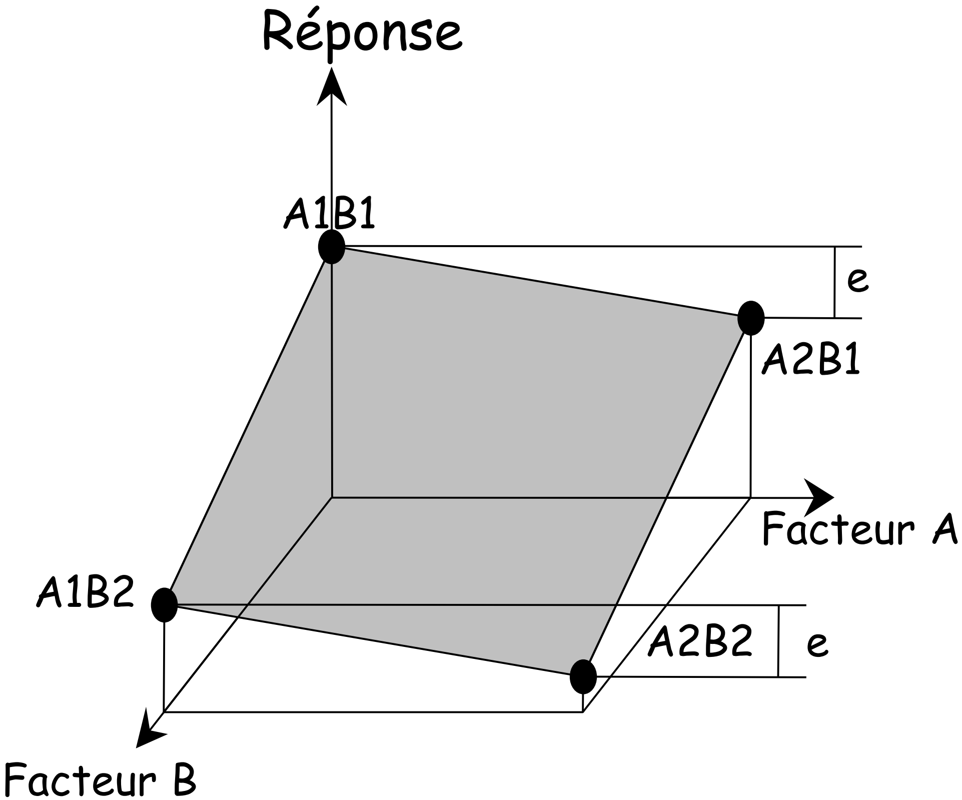
Un exemple qui peut s'avérer **très problématique** est la prise de médicament à base de **millepertuis** (contre la dépression légère à modérée) et la **pilule** (surtout la **microdosée**). Il se peut que dans certains cas la **contraception ne soit plus assurée.**

Deuxième exemple d'interaction : entre la *doxycycline* (un antibiotique vendu en Suisse sous le nom de Vibramycine®) et la prise de Rennie® (à base de *carbonate de calcium* et de *carbonate de magnésium* contre l'hyperacidité gastrique). La prise de Rennie® inactive la Vibramycine®, donc **à ne pas prendre de Rennie®** lors d'un traitement à base de doxycycline.

Voyez vous des interactions pour vos catapultes ?

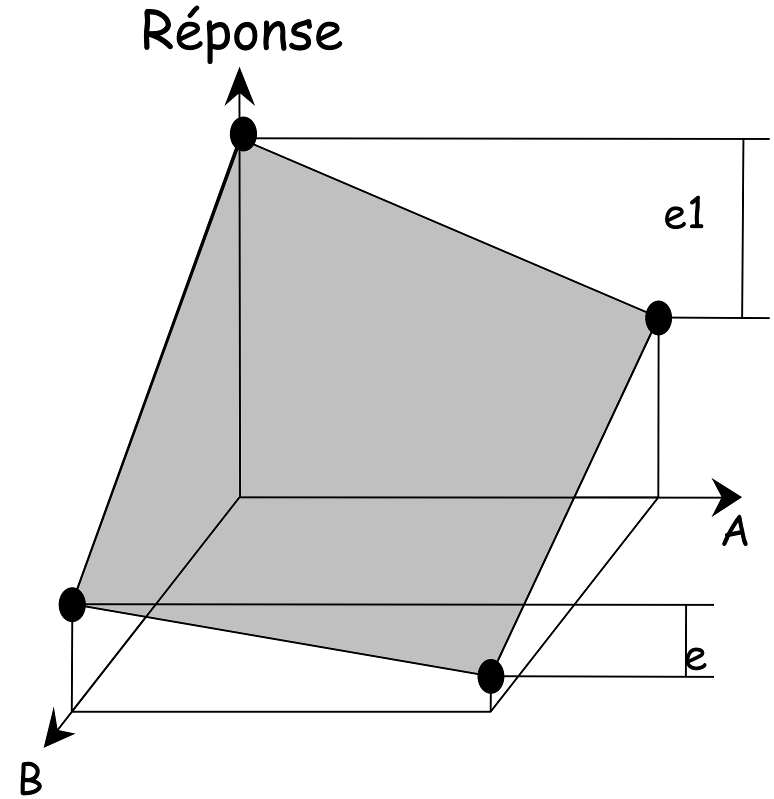
LES INTERACTIONS

Cas N°1



Pas d'interaction entre A et B

Cas N°2



Interaction entre A et B

LES INTERACTIONS (exemple de calcul)

Exemple : Etude de 2 facteurs A, B et de l'interaction AB

	Y ~ =	M +	A +	B +	AB
Niveaux			2	2	4
ddl		1	1	1	1

Essai	A	B	Y
1	1	1	15
2	2	1	20
3	1	2	25
4	2	2	40

Plan factoriel complet :

$M = 25$ $E_{A1} = - E_{A2} = - 5$ $E_{B1} = - E_{B2} = -7.5$

	B1	B2
A1	$I_{A1B1} = +2.5$	$I_{A1B2} = -2.5$
A2	$I_{A2B1} = -2.5$	$I_{A2B2} = +2.5$

$$I_{A1B1} = Y1 - M - E_{A1} - E_{B1} = +2{,}5$$

$$I_{A2B1} = Y2 - M - E_{A2} - E_{B1} = -2{,}5$$

$$I_{A1B2} = Y3 - M - E_{A1} - E_{B2} = -2{,}5$$

$$I_{A2B2} = Y4 - M - E_{A2} - E_{B2} = +2{,}5$$

Modélisation matricielle

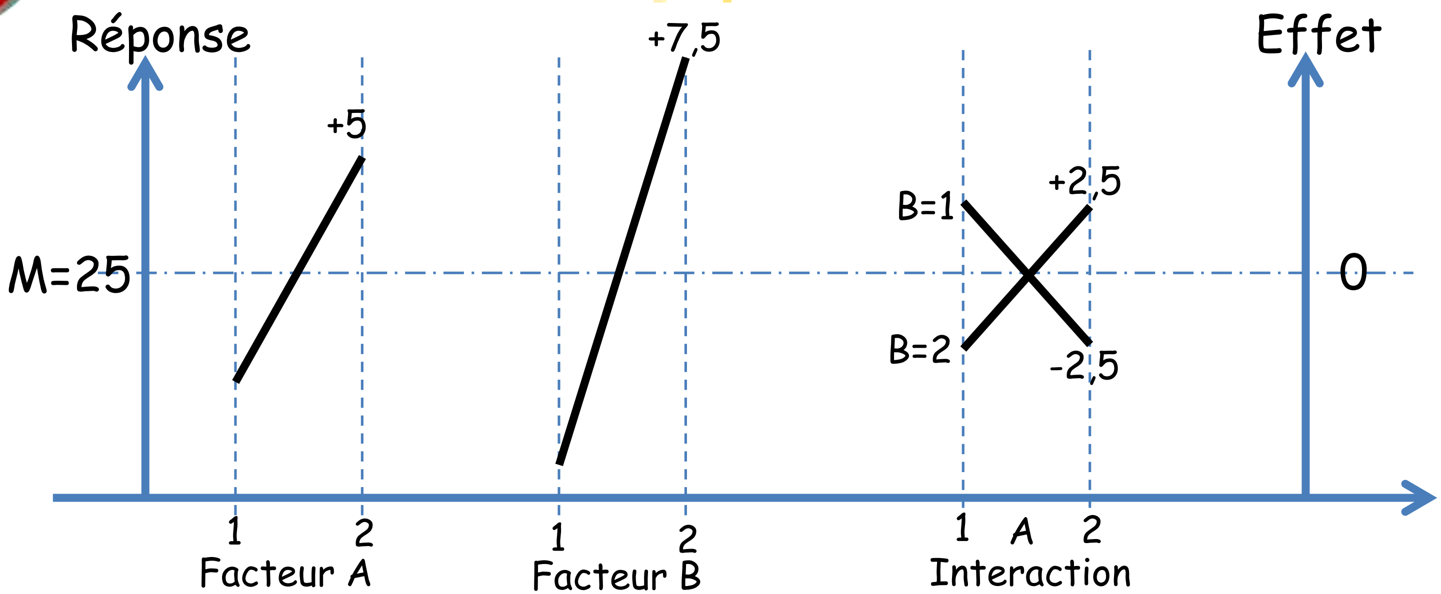
$$Y\sim\ = 25 + [-5; +5]A + [-7{,}5; +7{,}5]B + {}^tA \begin{bmatrix} +2{,}5 & -2{,}5 \\ -2{,}5 & +2{,}5 \end{bmatrix} B$$

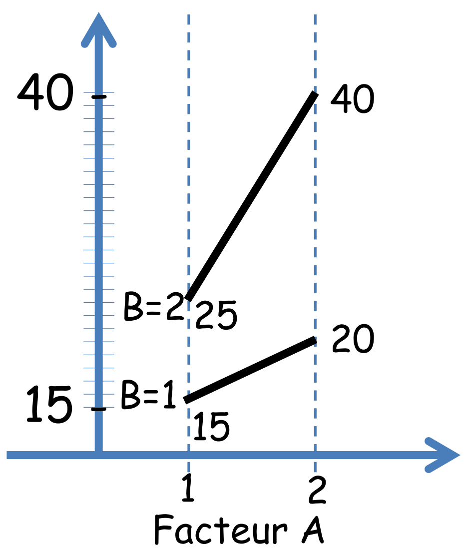
$$A = \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \end{bmatrix} \text{ si } A \text{ est au niveau } 1\ ;\ A = \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix} \text{ si } A \text{ est au niveau } 2$$

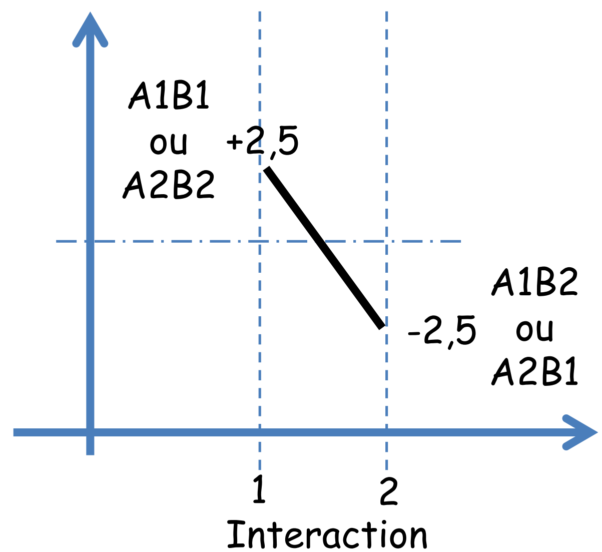
$$B = \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \end{bmatrix} \text{ si } B \text{ est au niveau } 1\ ;\ B = \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix} \text{ si } B \text{ est au niveau } 2$$

LES INTERACTIONS (graphe)

3 façons de les représenter







Conclusion

- Les interactions sont difficiles à anticiper même en connaissant les phénomènes physiques.
- Pour des plans à 2 niveaux on peut traiter les interactions comme des facteurs car elles ont 1 seul degré de liberté.

C'est une des notions les plus difficiles à cerner pour les plans d'expériences.

EFFET DES INTERACTIONS

Calcul de l'effet des interactions : I_{AiBj}

I_{AiBj} = Moyenne des réponses lorsque
A est au niveau i **et** B au niveau j
– Moyenne générale – E_{Ai} - E_{Bj}

$$I_{A1B1} = I_{A2B2} = -\ I_{A1B2} = -\ I_{A2B1}$$

L'interaction AB ne possède donc qu'un seul degré de liberté

Le nombre de degrés de liberté d'une interaction = produit des ddl des facteurs

Plans d'expériences

Les plans fractionnaires

LES PLANS FRACTIONNAIRES

Soit un plan complet de 3 facteurs à 2 niveaux soit 2^3 essais

$L8(2^3)$	A	B	C
1	1	1	1
2	1	1	2
3	1	2	1
4	1	2	2
5	2	1	1
6	2	1	2
7	2	2	1
8	2	2	2

LES PLANS FRACTIONNAIRES

On peut remarquer que les lignes 1, 4, 6 et 7 permettent de reconstituer un plan orthogonal de 4 essais avec les 4 facteurs.

L8(2^3) Complet	A	B	C
1	1	1	1
2	1	1	2
3	1	2	1
4	1	2	2
5	2	1	1
6	2	1	2
7	2	2	1
8	2	2	2

Ce plan est dit fractionnaire

L4(2^3)	A	B	C
1	1	1	1
4	1	2	2
6	2	1	2
7	2	2	1

LES PLANS FRACTIONNAIRES

De la même manière :

$L8(2^3)$	A	B	C
1	1	1	1
2	1	1	2
3	1	2	1
4	1	2	2
5	2	1	1
6	2	1	2
7	2	2	1
8	2	2	2

$L4(2^3)$	A	B	C
2	1	1	2
3	1	2	1
5	2	1	1
8	2	2	2

LES PLANS FRACTIONNAIRES

Lorsque le nombre de facteurs ou de niveaux augmente, les plans complets donnent très vite un nombre d'essais très important

mise au point de **plans fractionnaires**
(une partie du plan factoriel complet)

2 Conditions :

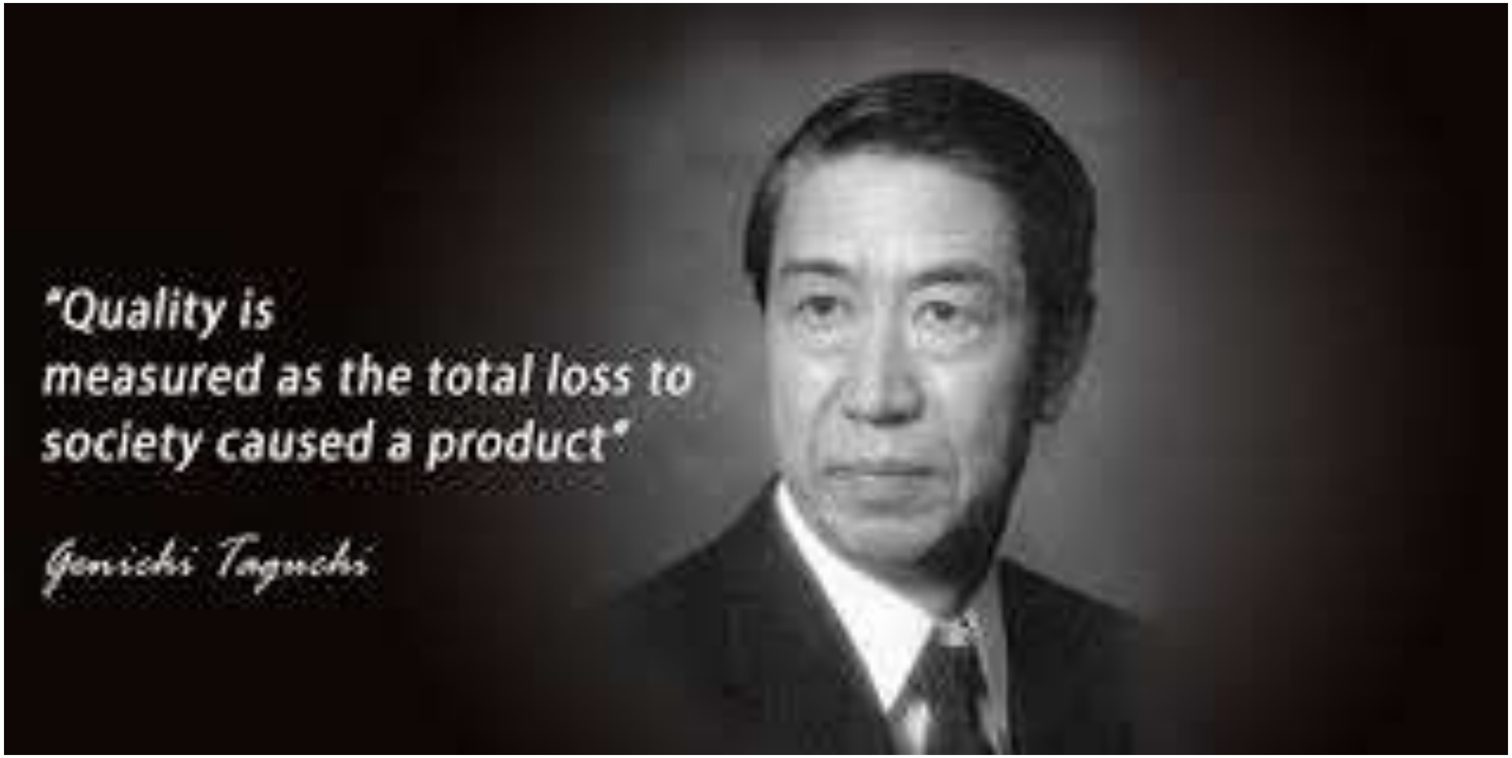
Condition d'orthogonalité

Condition sur les degrés de liberté

LES ETAPES de la DEMARCHE

1. Définir le problème et les moyens
   - Décision du management et constitution d'une équipe
   - Définir la performance à optimiser (la cible)
   - Choisir le moyen de mesure et vérifier sa capabilité
2. Construire le plan d'expériences
   - Recenser les variables agissant sur la réponse
   - Sélectionner les variables importantes et trier en Facteurs, bruits, figés (protocole)
   - Déterminer les modalités de chaque facteur et les interactions
   - Choisir le plan d'expérience approprié
3. Réaliser les essais
   - Organiser les essais (rôles et protocole)
   - Réaliser les expérimentations dans la rigueur
4. Analyser les résultats
   - Calculer les effets des facteurs et interactions et construire les graphes des effets
   - Faire l'Analyse de la Variance (ANAVAR)
   - Ecrire le modèle expérimental du procédé
   - Compléter par l'étude du Signal / Bruit (ratio S/N ou les effets sur la Variance)
5. Choisir les niveaux donnant l'optimum souhaité
6. Réaliser des essais de confirmation
7. Valider ou remettre en cause le plan d'expériences

Les tables standards de Taguchi font partie de ces plans fractionnaires



LOGIGRAMME DE CHOIX DES TABLES DE TAGUCHI

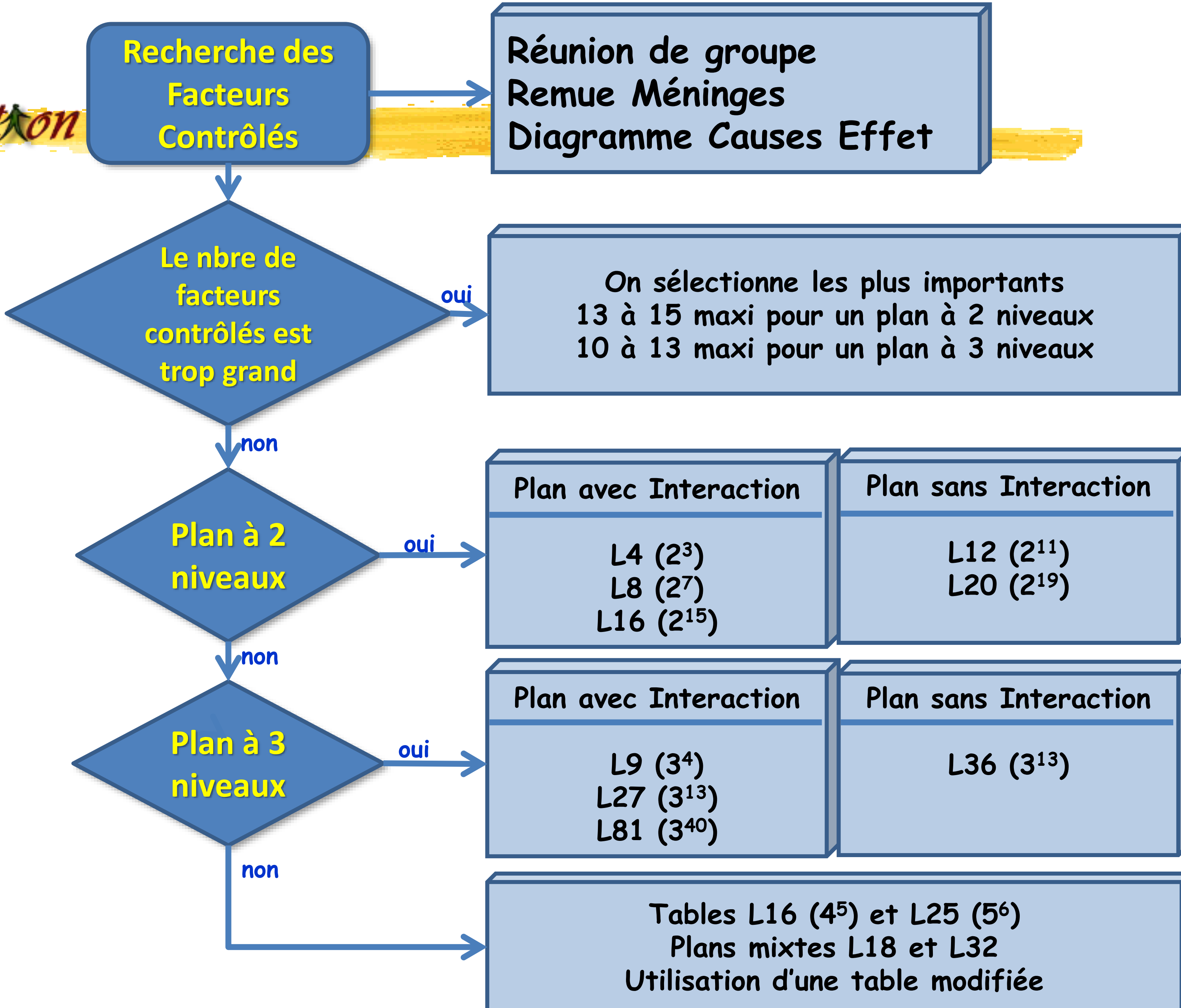


TABLE L8 DE TAGUCHI

Exemple de la table L_8 (2^7) :
8 lignes d'essais et 7 facteurs et/ou interactions étudiables à 2 niveaux

L8(2^7)	1	2	3	4	5	6	7
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

Les lignes d'essais

Les facteurs à affecter

Les niveaux

TABLE L8

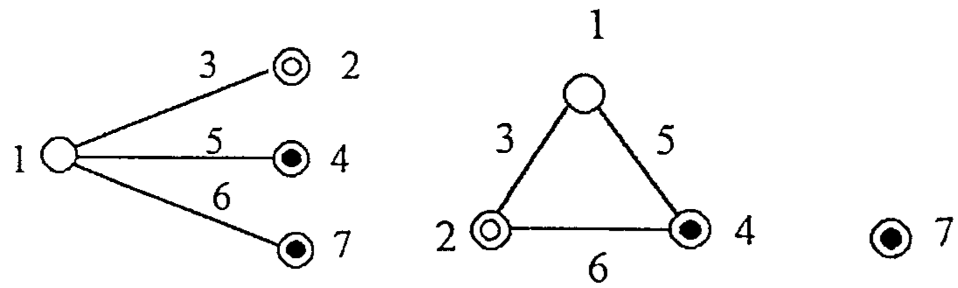
Table L_8 (2^7)

N°	1	2	3	4	5	6	7
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
	a	b	a b	c	a c	b c	a b c
Groupes	1	2		3			

Triangle des interactions entre deux colonnes

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

Graphes

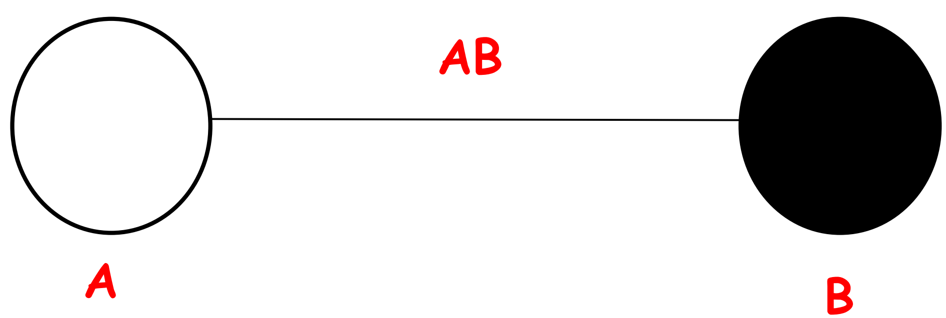


LES GRAPHES LINEAIRES DE TAGUCHI

Représentation des facteurs

symbole	groupe	Difficulté de modification des niveaux
○	1	Difficile
◎	2	Assez difficile
◉	3	Assez facile
●	4	facile

Représentation des interactions



Exemple de représentation d'un modèle

$$\boxed{Y\sim = M + A + B + C + D + AB + AC}$$

Le facteur A étant du groupe 1,
B du groupe 2,
C et D du groupe 4

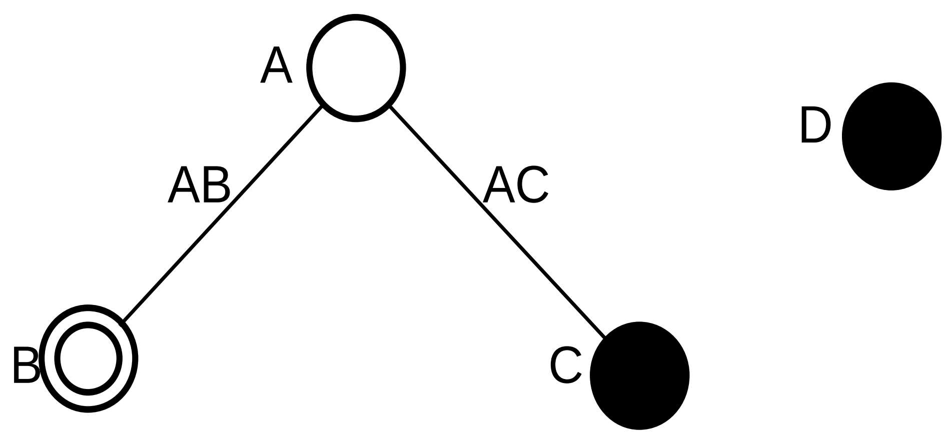
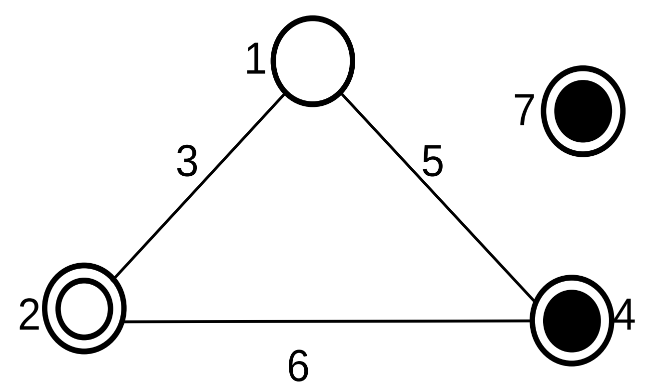


TABLE L8 DE TAGUCHI

Exemple de la table L_8 (2^7) :
8 lignes d'essais et 7 facteurs et/ou interactions étudiables à 2 niveaux

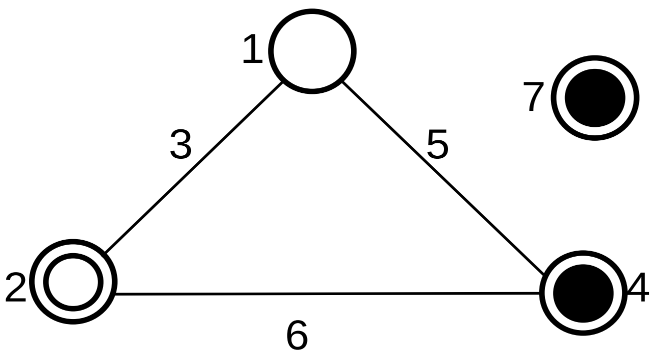
L8(2^7)	1	2	3	4	5	6	7
1	1	1	1	1	1	1	1
2	1	1	1	2	2	2	2
3	1	2	2	1	1	2	2
4	1	2	2	2	2	1	1
5	2	1	2	1	2	1	2
6	2	1	2	2	1	2	1
7	2	2	1	1	2	2	1
8	2	2	1	2	1	1	2

Exemple de graphe linéaire de la table L8



Affectation des facteurs

Graphe de la table L8



A en 1

B en 2

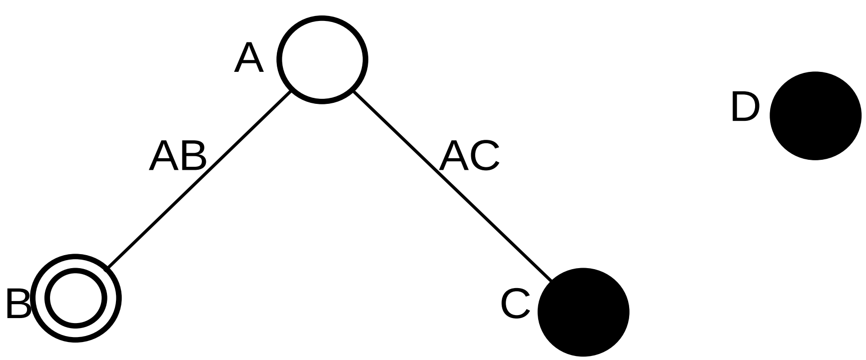
C en 4

D en 7

AB en 3

AC en 5

Graphe de notre modèle



Affectation des facteurs

PLAN D 'EXPERIENCES SUIVANT :

N°	A	B	AB	C	AC	-	D
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

Exemple de choix d'une table

Soit un système pour lequel on a identifié 7 facteurs
Et pour lequel on souhaite étudier 5 interactions :

Facteurs	A	B	C	D	E	F	G
Niveaux	2	2	2	2	2	2	2
Groupe	1	2	3	4	4	4	4

Y~ = M + A + B + C + D + E + F + G + AB + AC + BC + AD + AE

	M	A	B	C	D	E	F	G	AB	AC	BC	AD	AE
Niveaux		2	2	2	2	2	2	2	4	4	4	4	4
ddl	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1

2 conditions

Un plan fractionnaire orthogonal devra être le Plus Petit Commun Multiple (PPCM) du produit du nombre de niveaux de toutes les actions disjointes prises deux à deux.

Le nombre minimal d'essais à réaliser est égal au nombre de degrés de liberté du modèle étudié

Choix de la table Taguchi

Niveau		2	2	2	2	2	2	4	4	4	4	4
		A	B	C	D	E	F	AB	AC	BC	AD	AE
2	A											
2	B	4										
2	C	4	4									
2	D	4	4	4								
2	E	4	4	4	4							
2	F	4	4	4	4	4						
4	AB			8	8	8	8					
4	AC		8		8	8	8					
4	BC	8			8	8	8					
4	AD		8	8		8	8			16		
4	AE		8	8	8		8			16		

Condition d'orthogonalité : PPCM (4, 8, 16)

Condition sur les ddl : 13 ddl (13 essais minimum)

Plan à 2 niveaux avec interactions

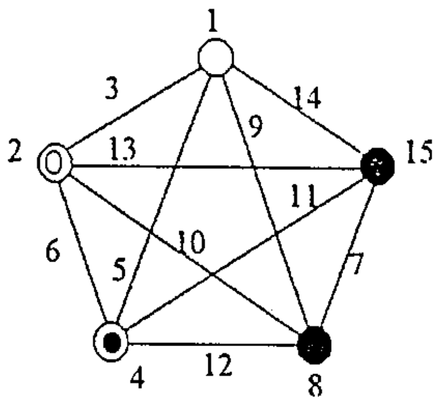
Choix de la table L_{16}

Table L_{16} (2^{15})

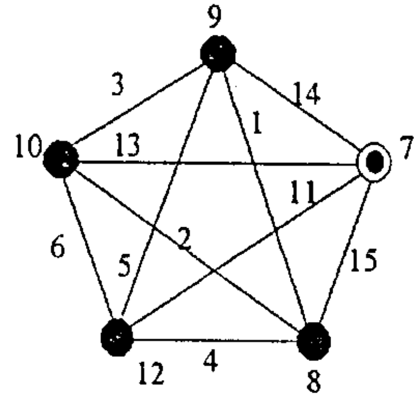
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
2	1	1	1	1	1	1	1	2	2	2	2	2	2	2	2
3	1	1	1	2	2	2	2	1	1	1	1	2	2	2	2
4	1	1	1	2	2	2	2	2	2	2	2	1	1	1	1
5	1	2	2	1	1	2	2	1	1	2	2	1	1	2	2
6	1	2	2	1	1	2	2	2	2	1	1	2	2	1	1
7	1	2	2	2	2	1	1	1	1	2	2	2	2	1	1
8	1	2	2	2	2	1	1	2	2	1	1	1	1	2	2
9	2	1	2	1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

Table L_{16} - Graphes de résolution V

(1a)



(1b)



(1c)

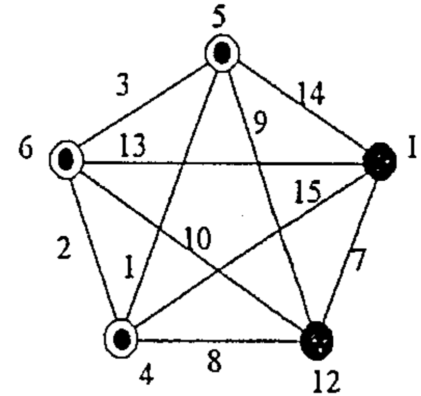
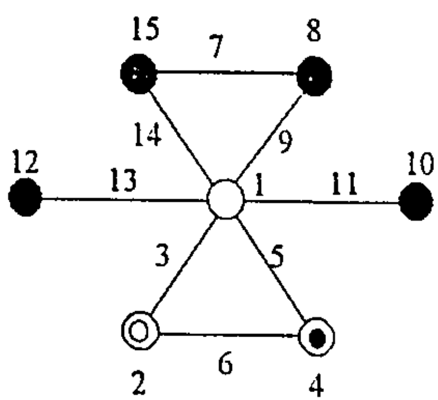
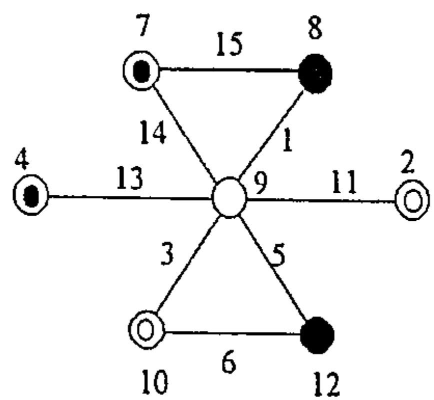


Table L_{16} - Graphes de résolution III

(2a)



(2b)



(2c)

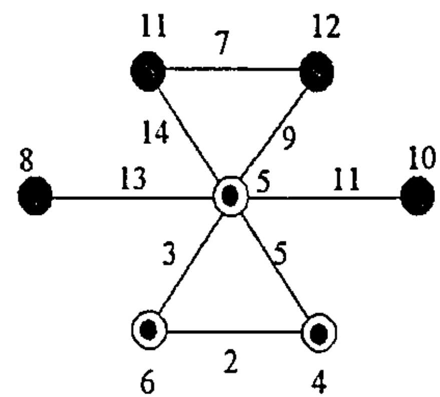
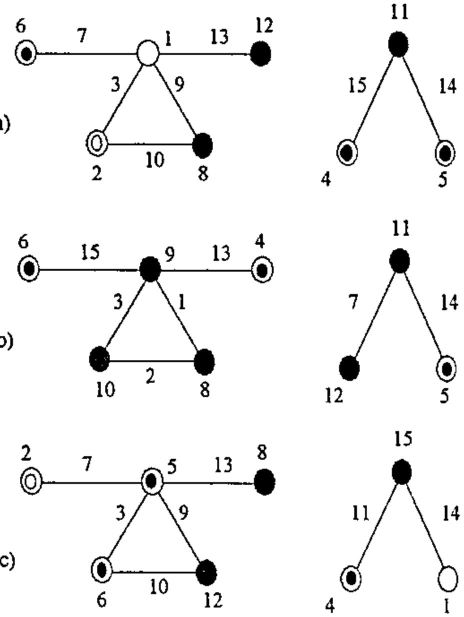


Table L_{16} - Graphes de résolution III (Suite)

(3a)

(3b)

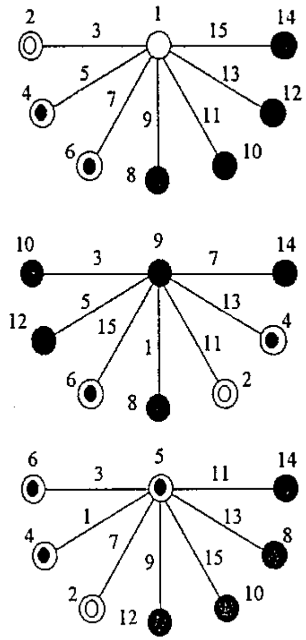
(3c)

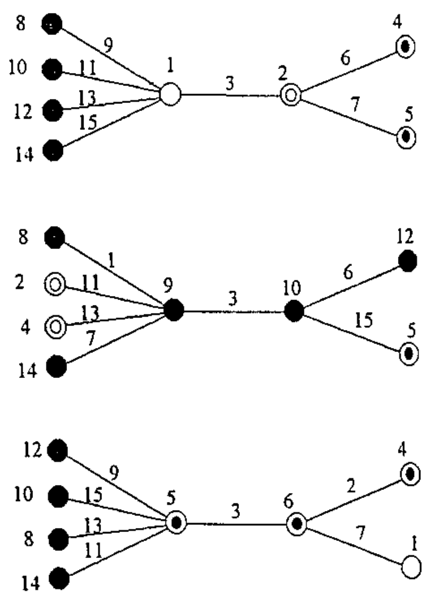


(4a)

(4b)

(4c)





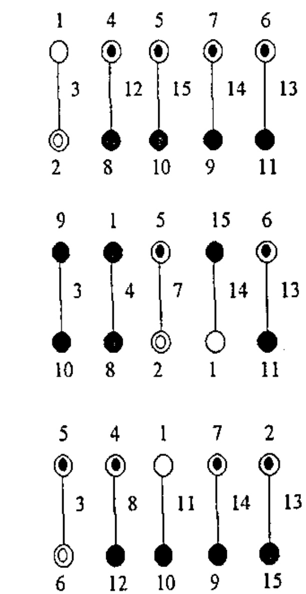
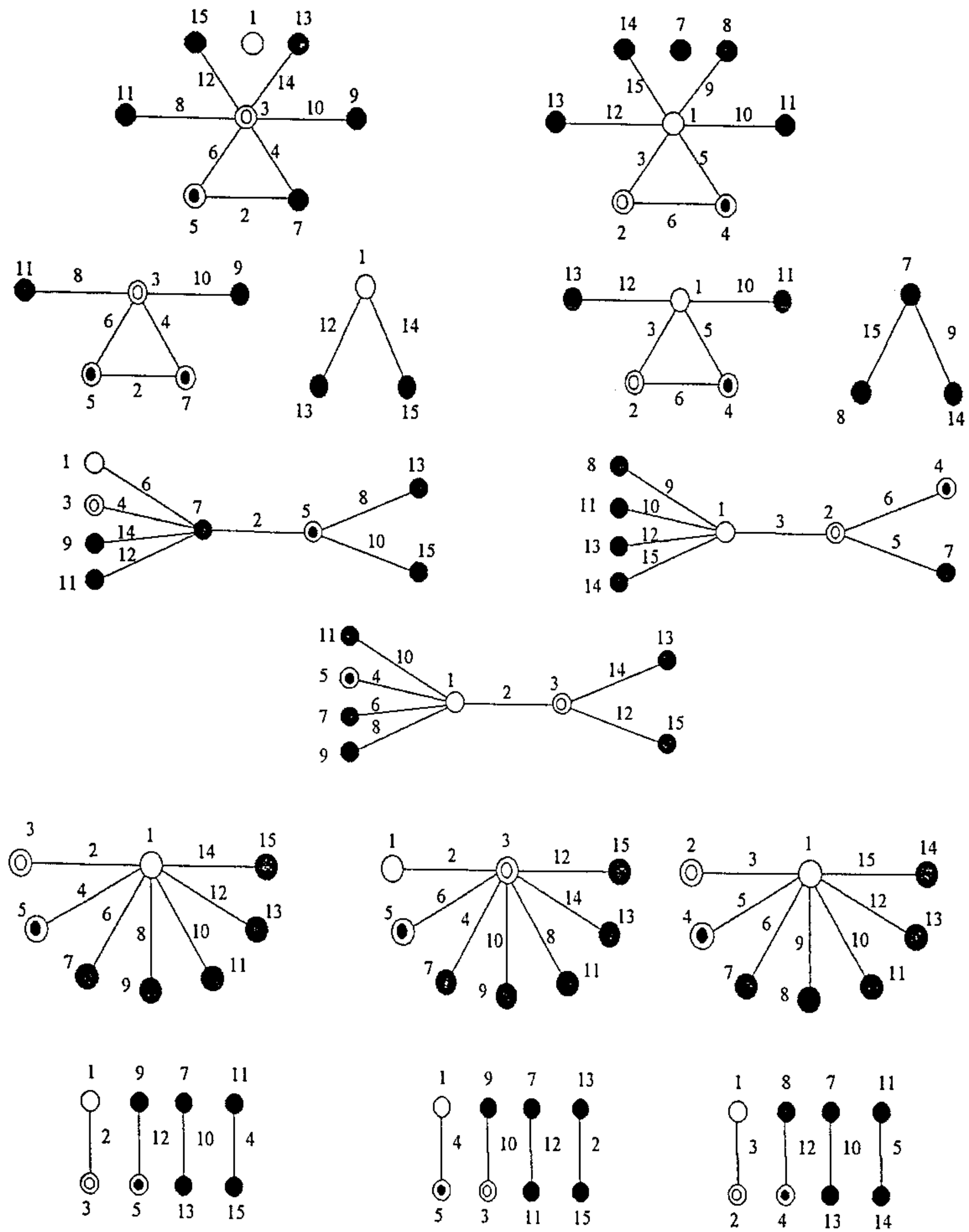
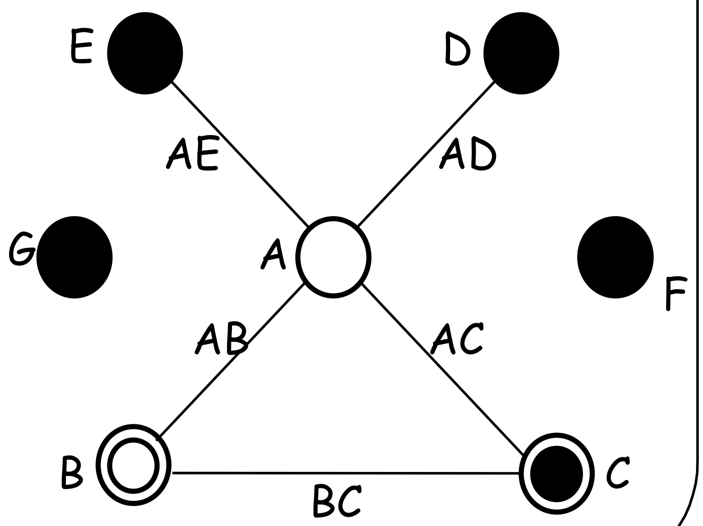


Table L_{16} - Graphes de résolution IV

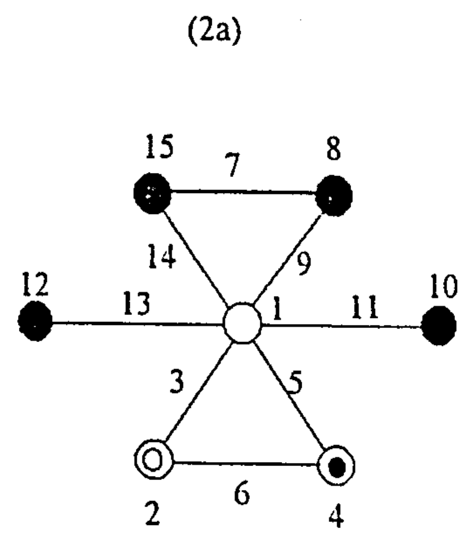


Comparaison des graphes

Graphe de notre modèle



Graphe de Taguchi



La table de Taguchi n 'est pas saturée

Table $L_{16}(2^{15})$

	A	B	AB	C	AC	BC	D	AD	F	G	AE	E
1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
2	1	1	1	1	1	1	2	2	2	2	2	2
3	1	1	1	2	2	2	1	1	1	2	2	2
4	1	1	1	2	2	2	2	2	2	1	1	1
5	1	2	2	1	1	2	1	1	2	1	2	2
6	1	2	2	1	1	2	2	2	1	2	1	1
7	1	2	2	2	2	1	1	1	2	2	1	1
8	1	2	2	2	2	1	2	2	1	1	2	2
9	2	1	2	1	2	1	1	2	1	1	1	2
10	2	1	2	1	2	1	2	1	2	2	2	1
11	2	1	2	2	1	2	1	2	1	2	2	1
12	2	1	2	2	1	2	2	1	2	1	1	2
13	2	2	1	1	2	2	1	2	2	1	2	1
14	2	2	1	1	2	2	2	1	1	2	1	2
15	2	2	1	2	1	1	1	2	2	2	1	2
16	2	2	1	2	1	1	2	1	1	1	2	1
	a	b	a b	c	a c	b c	d	a d	b d	c d	b c d	a b c d
Groupe	1	2		3			4					

Alias et Résolution d'un plan

Résolution de plan

Décrit la mesure dans laquelle les effets d'un plan factoriel fractionnaire possèdent des alias avec d'autres effets. Lorsque vous appliquez un plan factoriel fractionnaire, au moins un des effets est confondu. En d'autres termes, les effets ne peuvent pas faire l'objet d'une estimation en étant séparés les uns des autres. En règle générale, vous souhaitez utiliser un plan factoriel fractionnaire avec la résolution la plus élevée possible par rapport au fractionnement nécessaire.

Plans factoriels disponibles (avec résolution)

	Facteurs													
Essais	**2**	**3**	**4**	**5**	**6**	**7**	**8**	**9**	**10**	**11**	**12**	**13**	**14**	**15**
4	Com	III												
8		Com	IV	III	III	III								
16			Com	V	IV	IV	IV	III	III	III	III	III	III	III
32				Com	VI	IV	IV	IV	IV	IV	IV	IV	IV	IV
64					Com	VII	V	IV	IV	IV	IV	IV	IV	IV
128						Com	VIII	VI	V	V	IV	IV	IV	IV

Résolution III

Aucun effet principal ne possède d'alias avec un autre effet principal, mais les effets principaux possèdent des alias avec des interactions à 2 facteurs.

Résolution IV

Aucun effet principal ne possède d'alias avec un autre effet principal ou une autre interaction à 2 facteurs, mais certaines des interactions à 2 facteurs possèdent des alias avec d'autres interactions à 2 facteurs et des effets principaux possèdent des alias avec des interactions à 3 facteurs.

Résolution V

Aucun effet principal ou aucune interaction à 2 facteurs ne possède d'alias avec un autre effet principal ou une autre interaction à 2 facteurs, mais des interactions à 2 facteurs possèdent des alias avec des interactions à 3 facteurs et des effets principaux possèdent des alias avec des interactions à 4 facteurs.

Plans d'expériences

Effets significatifs

Analyse de la Variance (ANOVA)

Variabilité naturelle d'un processus

- Les produits que nous consommons sont tous différents !
- Les performances d'un processus varient dans le temps !
- Un phénomène ne peut se reproduire 2 fois de façon identique !

Comment caractériser cette variabilité constatée ?

Variabilité naturelle d'un processus

Théorème central limite :

Tout système, soumis à de nombreux facteurs, indépendants les uns des autres, et d'un ordre de grandeur de l'effet équivalent, génère une répartition qui suit une loi de Laplace-Gauss (ou loi Normale).

La loi de La place-Gauss (ou loi Normale) se traduit par une distribution en forme de cloche qui se caractérise par sa moyenne et son écart-type.

Calcul de la moyenne d'un échantillon

$$\overline{X} = \frac{x_1 + x_2 + \ldots + x_n}{n} = \frac{\sum_{i=1}^{n} x_i}{n}$$

x_i : ième valeur

n : nombre de valeurs

Estimation de l'écart type d'une population à partir d'un échantillon

$$\sigma_{n-1} = s_{n-1} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n}\left(x_i - \overline{X}\right)^2}{n-1}}$$

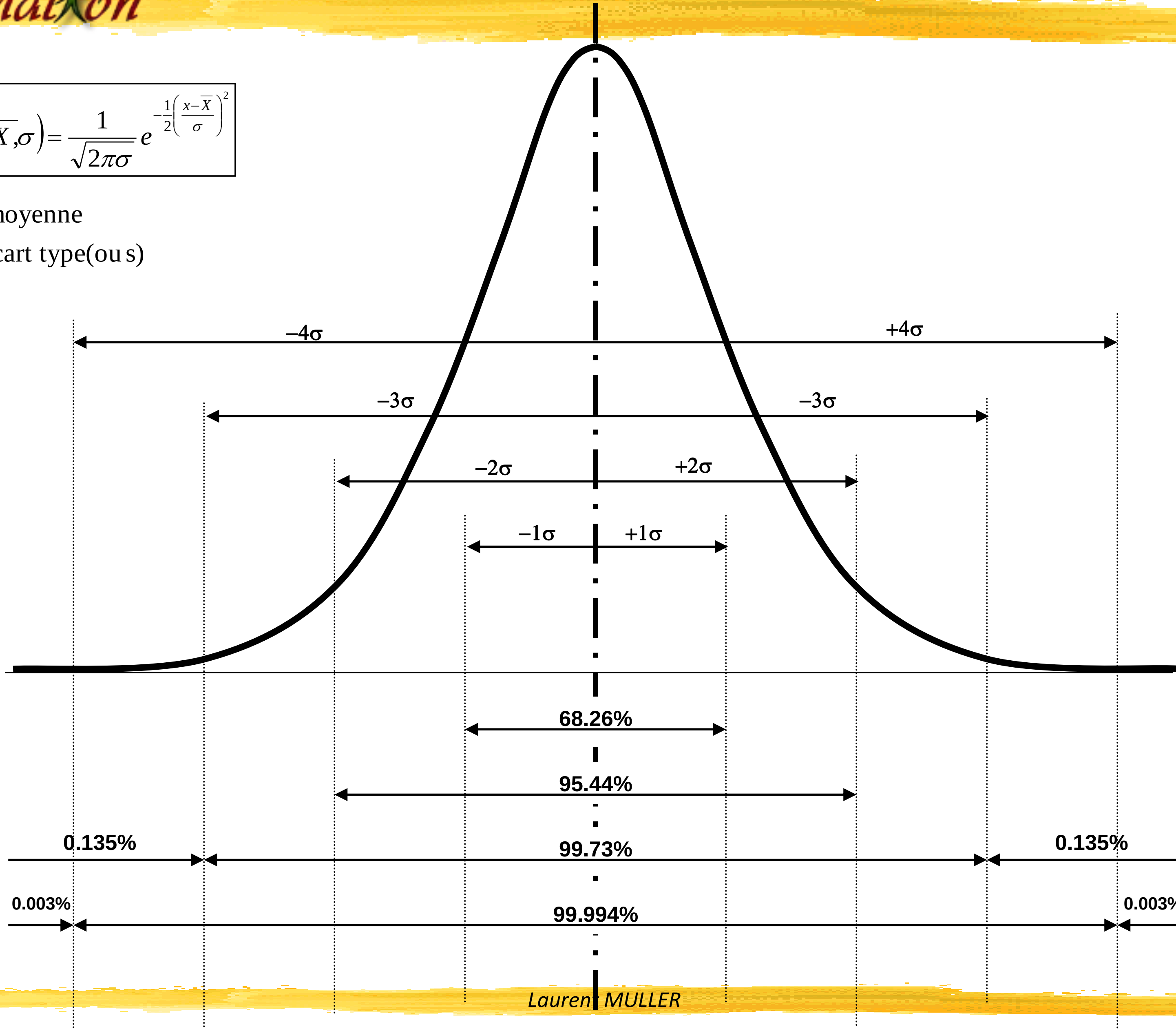
Exemple du trajet domicile / lieu de travail

La distribution « Normale »

$$f\left(x,\overline{X},\sigma\right)=\frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma}}e^{-\frac{1}{2}\left(\frac{x-\overline{X}}{\sigma}\right)^2}$$

$\overline{X}$: moyenne

σ : écart type (ou s)

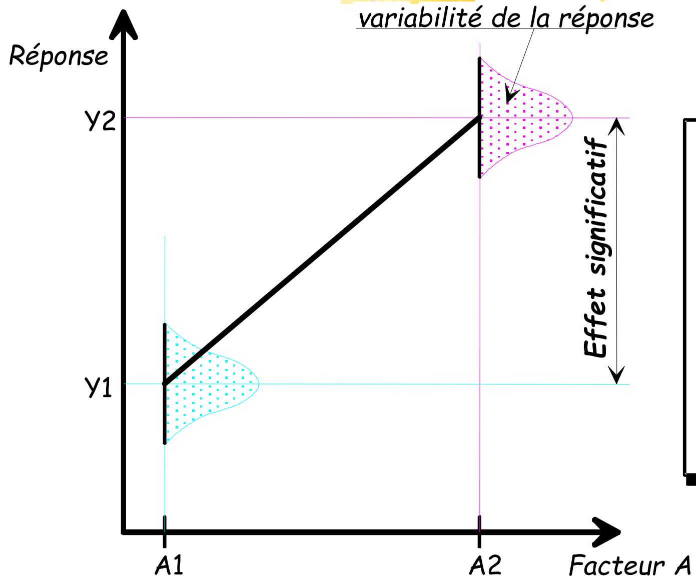


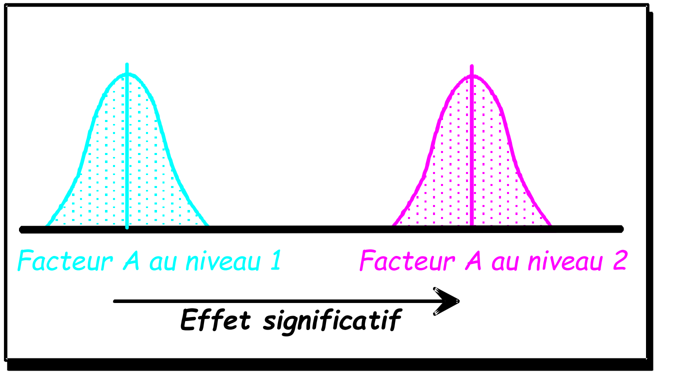
L'effet calculé de chacun des facteurs et interactions
est-il **significatif** ?

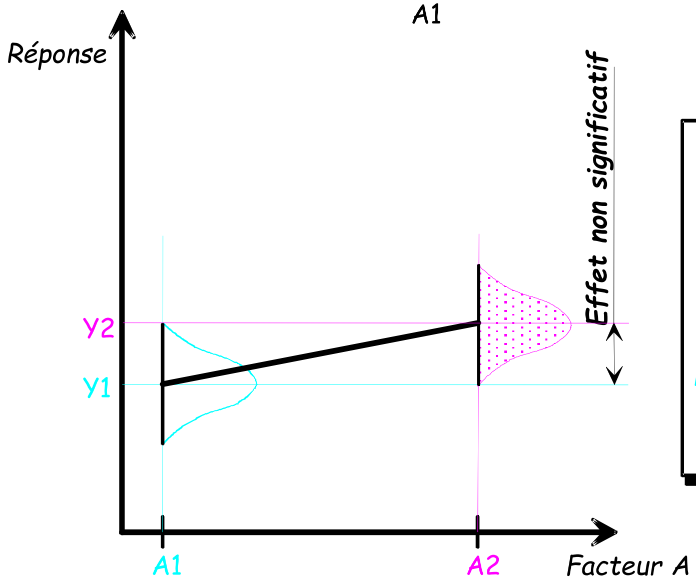
ou

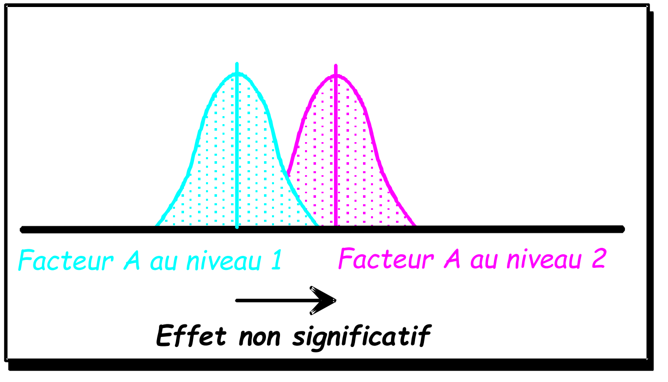
représente-t-il simplement
la **variabilité naturelle**
du processus modélisé ?

L'ANALYSE DE LA VARIANCE









Principe de L'ANALYSE DE LA VARIANCE

Variation Totale : Variation de l'ensemble des mesures

Somme des écarts au carré des valeurs du plan d'expérience par rapport à la moyenne générale.

Variation de l'action d'un facteur : Variation dû à un facteur par rapport à la moyenne

Somme des écart au carré de l'effet d'un facteur par rapport la moyenne générale

Variation des Résidus : Ecart entre le modèle et la réalité (bruit)

Résidus = Ecarts entre les résultats individuels Y_i des essais et les prévisions $Y_{prév}$ correspondantes données par le modèle.

On montre que :

Variation Totale = Variation des Facteurs et Interaction + Variation des Résidus

Ceci nous permettra de calculer la **Variance des résidus**

Comme les variances ont des ddl différents, il va falloir suivre ce raisonnement en utilisant la **Somme des Carrés des Ecarts (SCE) des Résidus**

Principe de L'ANALYSE DE LA VARIANCE

L'ANAVAR consiste à comparer

- la Variance d'un Facteur

avec

- La Variance des résidus

Le rapport des variances appelé $F_{expérimental}$ ou $F_{calculé}$

suit une loi F (de FISHER SNEDECOR)*.

** A condition que la variabilité des réponses suive une loi Normale*

On réalise donc un test d'hypothèse avec la loi F

D'où le tableau de l'ANAVAR…

Le tableau de L'ANALYSE DE LA VARIANCE

Sources de Variation	SCE Somme des Carrés des écarts	dll Degrés de Liberté	Variances	$F_{calculé}$ ou $F_{expérimental}$	$F_{théorique}$ ou F_{table}	% de contribution	Conclusion
A	$SCE(A) = \frac{N}{n_A}\sum_{k=1}^{n_A} {E_{Ak}}^2$	$n_A - 1$	$V(A) = \frac{SCE(A)}{dll(A)}$	$F(A) = \frac{V(A)}{V(\varepsilon)}$	$F_{th}(dll_A, dll_\varepsilon)$	$\frac{SCE(A)}{SCE(Y)}$	
B	$SCE(B) = \frac{N}{n_B}\sum_{k=1}^{n_B} {E_{Bk}}^2$	$n_B - 1$	$V(B) = \frac{SCE(B)}{dll(B)}$	$F(B) = \frac{V(B)}{V(\varepsilon)}$	$F_{th}(dll_B, dll_\varepsilon)$	$\frac{SCE(B)}{SCE(Y)}$	
…							
AB	$SCE(AB) = \frac{N}{n_A.n_B}\sum_{k=1}^{n_A}\sum_{k=l}^{n_B} {E_{AB_{kl}}}^2$	$(n_A - 1)(n_B - 1)$	$V(AB) = \frac{SCE(AB)}{dll(AB)}$	$F(AB) = \frac{V(AB)}{V(\varepsilon)}$	$F_{th}(dll_{AB}, dll_\varepsilon)$	$\frac{SCE(AB)}{SCE(Y)}$	
…							
ε	$SCE(\varepsilon) = SCE(Y) - [SCE(A) + SCE(B) + \cdots + SCE(AB) + \cdots]$	$dll(Y) - \sum dll(E,I)$	$V(\varepsilon) = \frac{SCE(\varepsilon)}{dll(\varepsilon)}$			$\frac{SCE(\varepsilon)}{SCE(Y)}$	
Y	$SCE(Y) = \sum_{i=1}^{N}(Y_i - \bar{Y})^2$ $SCE(Y) = (N-1){\sigma_{n-1}}^2(Y)$	$N - 1$	$V(Y) = \frac{SCE(Y)}{dll(Y)}$ $V(Y) = {\sigma_{n-1}}^2(Y)$			100%	

dans le cas d'un plan orthogonal

N : Nombre de résultats du plan d'expériences, répétitions comprises
n_A : Nombre de niveaux du facteur A

ε : résidu

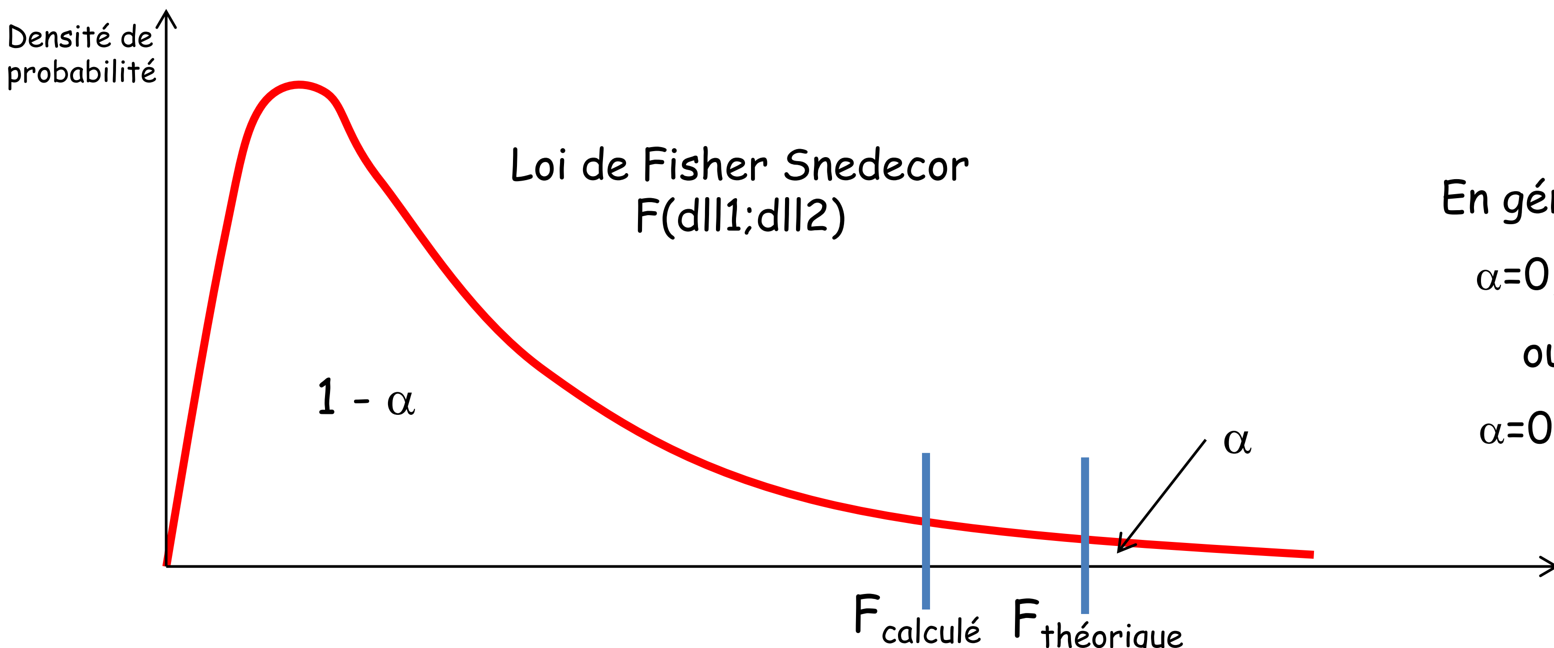
L'ANALYSE DE LA VARIANCE

Si $F_{calculée} \geq F_{théorique}$ (pour α donné)

Alors l'effet du facteur est significatif avec un risque α de se tromper

Si $F_{calculée} < F_{théorique}$ (pour α donné)

Alors l'effet du facteur est **non significatif**



En général

α=0,05

ou

α=0,01

TABLE N° 5 — FRACTILES DE LA LOI $F(\nu_1, \nu_2)$ — $P = 0{,}95$

DEGRÉS DE LIBERTÉ DU NUMÉRATEUR : ν_1 — DEGRÉS DE LIBERTÉ DU DÉNOMINATEUR : ν_2

ν_2 \ ν_1	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	12	14
1	161	200	216	225	230	234	237	239	241	242	244	245
2	18.5	19.0	19.2	19.2	19.3	19.3	19.4	19.4	19.4	19.4	19.4	19.4
3	10.1	9.55	9.28	9.12	9.01	8.94	8.89	8.85	8.81	8.79	8.74	8.71
4	7.71	6.94	6.59	6.39	6.26	6.16	6.09	6.04	6.00	5.96	5.91	5.87
5	6.61	5.79	5.41	5.19	5.05	4.95	4.88	4.82	4.77	4.74	4.68	4.64
6	5.99	5.14	4.76	4.53	4.39	4.28	4.21	4.15	4.10	4.06	4.00	3.96
7	5.59	4.74	4.35	4.12	3.97	3.87	3.79	3.73	3.68	3.64	3.57	3.53
8	5.32	4.46	4.07	3.84	3.69	3.58	3.50	3.44	3.39	3.35	3.28	3.24
9	5.12	4.26	3.86	3.63	3.48	3.37	3.29	3.23	3.18	3.14	3.07	3.03
10	4.96	4.10	3.71	3.48	3.33	3.22	3.14	3.07	3.02	2.98	2.91	2.86
11	4.84	3.98	3.59	3.36	3.20	3.09	3.01	2.95	2.90	2.85	2.79	2.74
12	4.75	3.89	3.49	3.26	3.11	3.00	2.91	2.85	2.80	2.75	2.69	2.64
13	4.67	3.81	3.41	3.18	3.03	2.92	2.83	2.77	2.71	2.67	2.60	2.55
14	4.60	3.74	3.34	3.11	2.96	2.85	2.76	2.70	2.65	2.60	2.53	2.48
15	4.54	3.68	3.29	3.06	2.90	2.79	2.71	2.64	2.59	2.54	2.48	2.42
16	4.49	3.63	3.24	3.01	2.85	2.74	2.66	2.59	2.54	2.49	2.42	2.37
17	4.45	3.59	3.20	2.96	2.81	2.70	2.61	2.55	2.49	2.45	2.38	2.33
18	4.41	3.55	3.16	2.93	2.77	2.66	2.58	2.51	2.46	2.41	2.34	2.29
19	4.38	3.52	3.13	2.90	2.74	2.63	2.54	2.48	2.42	2.38	2.31	2.26
20	4.35	3.49	3.10	2.87	2.71	2.60	2.51	2.45	2.39	2.35	2.28	2.22
21	4.32	3.47	3.07	2.84	2.68	2.57	2.49	2.42	2.37	2.32	2.25	2.20
22	4.30	3.44	3.05	2.82	2.66	2.55	2.46	2.40	2.34	2.30	2.23	2.17
23	4.28	3.42	3.03	2.80	2.64	2.53	2.44	2.37	2.32	2.27	2.20	2.15
24	4.26	3.40	3.01	2.78	2.62	2.51	2.42	2.36	2.30	2.25	2.18	2.13
25	4.24	3.39	2.99	2.76	2.60	2.49	2.40	2.34	2.28	2.24	2.16	2.11
26	4.23	3.37	2.98	2.74	2.59	2.47	2.39	2.32	2.27	2.22	2.15	2.09
27	4.21	3.35	2.96	2.73	2.57	2.46	2.37	2.31	2.25	2.20	2.13	2.08
28	4.20	3.34	2.95	2.71	2.56	2.45	2.36	2.29	2.24	2.19	2.12	2.06
29	4.18	3.33	2.93	2.70	2.55	2.43	2.35	2.28	2.22	2.18	2.10	2.05
30	4.17	3.32	2.92	2.69	2.53	2.42	2.33	2.27	2.21	2.16	2.09	2.04
32	4.15	3.29	2.90	2.67	2.51	2.40	2.31	2.24	2.19	2.14	2.07	2.01
34	4.13	3.28	2.88	2.65	2.49	2.38	2.29	2.23	2.17	2.12	2.05	1.99
36	4.11	3.26	2.87	2.63	2.48	2.36	2.28	2.21	2.15	2.11	2.03	1.98
38	4.10	3.24	2.85	2.62	2.46	2.35	2.26	2.19	2.14	2.09	2.02	1.96
40	4.08	3.23	2.84	2.61	2.45	2.34	2.25	2.18	2.12	2.08	2.00	1.95
50	4.03	3.18	2.79	2.56	2.40	2.29	2.20	2.13	2.07	2.03	1.95	1.89
60	4.00	3.15	2.76	2.53	2.37	2.25	2.17	2.10	2.04	1.99	1.92	1.86
70	3.98	3.13	2.74	2.50	2.35	2.23	2.14	2.07	2.02	1.97	1.89	1.84
80	3.96	3.11	2.72	2.49	2.33	2.21	2.13	2.06	2.00	1.95	1.88	1.82
90	3.95	3.10	2.71	2.47	2.32	2.20	2.11	2.04	1.99	1.94	1.86	1.80
100	3.94	3.09	2.70	2.46	2.31	2.19	2.10	2.03	1.97	1.93	1.85	1.79
∞	3.84	3.00	2.60	2.37	2.21	2.10	2.01	1.94	1.88	1.83	1.75	1.69

Pour les valeurs de F comprises entre 0 et 1, on a :

$$F_{1-P}(\nu_1, \nu_2) = \frac{1}{F_P(\nu_2, \nu_1)}$$

Exemple

	A	B	C	D	E	BD	G	Y1	Y2
1	1	1	1	1	1	1	1	5.82	6.6
2	1	1	1	2	2	2	2	5.58	5.84
3	1	2	2	1	1	2	2	7.48	8.32
4	1	2	2	2	2	1	1	10	10
5	2	1	2	1	2	1	2	6.37	4.55
6	2	1	2	2	1	2	1	5.55	4.1
7	2	2	1	1	2	2	1	10	10
8	2	2	1	2	1	1	2	8.3	8.1

Calculer les effets des facteurs

Construire le tableau d'ANAVAR

Ecrire le modèle expérimental du procédé

Comment peut-on aller plus loin dans l'analyse ?

ETUDE POUR LE FACTEUR B

- Calcul des moyennes des réponses de B :

  Moyenne des réponses lorsque B est au niveau 1 :
  B1 = 5,55

  Moyenne des réponses lorsque B est au niveau 2 :
  B2 =

- **Calcul de SCE de B :**

  $SCE_B = (E_{B1}^2 + E_{B2}^2).\ N / nb$

  $SCE_B = (5,55^2 \times 2)\ 16 / 2$

  $SCE_B = N\ .\ E_B^2$ **Cas d'un facteur à 2 niveaux**

  $SCE_B = 48,268$

ETUDE POUR LE FACTEUR B

- Calcul de la variance de B :

Variance de B = SCE $_B$ / ddl $_B$

Variance de B = SCE $_B$ (cas d'un facteur à 2 niveaux)

Variance de B = 48,268

- Calcul de SCE $_{total}$:

$$SCE_{total} = \sum (Y_i - \bar{Y})^2 = (N-1)\ \sigma_{n-1}^2(Y)$$

SCEtotal = 15 x 4,091

SCEtotal = 61,371

Se calcule aisément avec Excel

ETUDE POUR LE FACTEUR B

- Calcul du ddl $_{total}$:

$$ddl_{total} = N - 1$$

$$ddl_{total} = 15$$

- Calcul du résidu

$$SCE_{résidu} = SCE_{total} - \sum SCE_{(facteurs\ et\ interactions)}$$

$$SCE_{résidu} = 3{,}418$$

$$ddl_{résidu} = ddl_{total} - \sum ddl_{(facteurs\ et\ interactions)} = 15-7$$

$$=8$$

$$VAR_{résidu} = SCE_{résidu} / ddl_{résidu} = 0{,}427$$

ETUDE POUR LE FACTEUR B

- Calcul du F calculé :

  F calculé = VAR $_{facteur}$ / VAR $_{résidu}$

  Pour B : F calculé = 48,268 / 0,427

  = 112,96

- F théorique ou F table

  Pour B : F table = F(1, 8 ; 5%) = 5,32

TABLE N° 5 — FRACTILES DE LA LOI $F(\nu_1, \nu_2)$ — $P = 0{,}95$

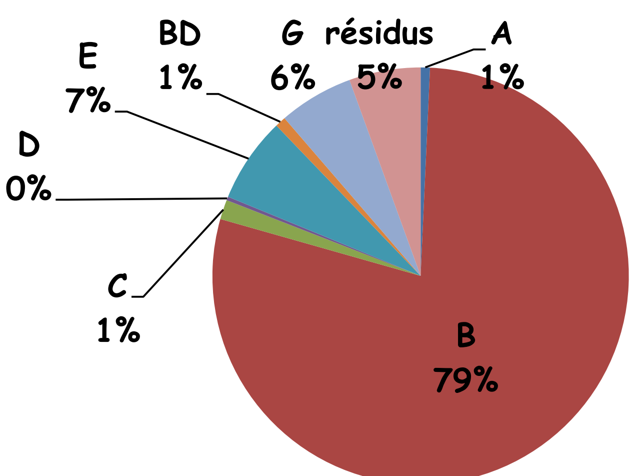
DEGRÉS DE LIBERTÉ DU NUMÉRATEUR : ν_1 — DEGRÉS DE LIBERTÉ DU DÉNOMINATEUR : ν_2

ν_2 \ ν_1	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	12	14
1	161	200	216	225	230	234	237	239	241	242	244	245
2	18.5	19.0	19.2	19.2	19.3	19.3	19.4	19.4	19.4	19.4	19.4	19.4
3	10.1	9.55	9.28	9.12	9.01	8.94	8.89	8.85	8.81	8.79	8.74	8.71
4	7.71	6.94	6.59	6.39	6.26	6.16	6.09	6.04	6.00	5.96	5.91	5.87
5	6.61	5.79	5.41	5.19	5.05	4.95	4.88	4.82	4.77	4.74	4.68	4.64
6	5.99	5.14	4.76	4.53	4.39	4.28	4.21	4.15	4.10	4.06	4.00	3.96
7	5.59	4.74	4.35	4.12	3.97	3.87	3.79	3.73	3.68	3.64	3.57	3.53
8	5.32	4.46	4.07	3.84	3.69	3.58	3.50	3.44	3.39	3.35	3.28	3.24
9	5.12	4.26	3.86	3.63	3.48	3.37	3.29	3.23	3.18	3.14	3.07	3.03
10	4.96	4.10	3.71	3.48	3.33	3.22	3.14	3.07	3.02	2.98	2.91	2.86
11	4.84	3.98	3.59	3.36	3.20	3.09	3.01	2.95	2.90	2.85	2.79	2.74
12	4.75	3.89	3.49	3.26	3.11	3.00	2.91	2.85	2.80	2.75	2.69	2.64
13	4.67	3.81	3.41	3.18	3.03	2.92	2.83	2.77	2.71	2.67	2.60	2.55
14	4.60	3.74	3.34	3.11	2.96	2.85	2.76	2.70	2.65	2.60	2.53	2.48
15	4.54	3.68	3.29	3.06	2.90	2.79	2.71	2.64	2.59	2.54	2.48	2.42
16	4.49	3.63	3.24	3.01	2.85	2.74	2.66	2.59	2.54	2.49	2.42	2.37
17	4.45	3.59	3.20	2.96	2.81	2.70	2.61	2.55	2.49	2.45	2.38	2.33
18	4.41	3.55	3.16	2.93	2.77	2.66	2.58	2.51	2.46	2.41	2.34	2.29
19	4.38	3.52	3.13	2.90	2.74	2.63	2.54	2.48	2.42	2.38	2.31	2.26
20	4.35	3.49	3.10	2.87	2.71	2.60	2.51	2.45	2.39	2.35	2.28	2.22
21	4.32	3.47	3.07	2.84	2.68	2.57	2.49	2.42	2.37	2.32	2.25	2.20
22	4.30	3.44	3.05	2.82	2.66	2.55	2.46	2.40	2.34	2.30	2.23	2.17
23	4.28	3.42	3.03	2.80	2.64	2.53	2.44	2.37	2.32	2.27	2.20	2.15
24	4.26	3.40	3.01	2.78	2.62	2.51	2.42	2.36	2.30	2.25	2.18	2.13
25	4.24	3.39	2.99	2.76	2.60	2.49	2.40	2.34	2.28	2.24	2.16	2.11
26	4.23	3.37	2.98	2.74	2.59	2.47	2.39	2.32	2.27	2.22	2.15	2.09
27	4.21	3.35	2.96	2.73	2.57	2.46	2.37	2.31	2.25	2.20	2.13	2.08
28	4.20	3.34	2.95	2.71	2.56	2.45	2.36	2.29	2.24	2.19	2.12	2.06
29	4.18	3.33	2.93	2.70	2.55	2.43	2.35	2.28	2.22	2.18	2.10	2.05
30	4.17	3.32	2.92	2.69	2.53	2.42	2.33	2.27	2.21	2.16	2.09	2.04
32	4.15	3.29	2.90	2.67	2.51	2.40	2.31	2.24	2.19	2.14	2.07	2.01
34	4.13	3.28	2.88	2.65	2.49	2.38	2.29	2.23	2.17	2.12	2.05	1.99
36	4.11	3.26	2.87	2.63	2.48	2.36	2.28	2.21	2.15	2.11	2.03	1.98
38	4.10	3.24	2.85	2.62	2.46	2.35	2.26	2.19	2.14	2.09	2.02	1.96
40	4.08	3.23	2.84	2.61	2.45	2.34	2.25	2.18	2.12	2.08	2.00	1.95
50	4.03	3.18	2.79	2.56	2.40	2.29	2.20	2.13	2.07	2.03	1.95	1.89
60	4.00	3.15	2.76	2.53	2.37	2.25	2.17	2.10	2.04	1.99	1.92	1.86
70	3.98	3.13	2.74	2.50	2.35	2.23	2.14	2.07	2.02	1.97	1.89	1.84
80	3.96	3.11	2.72	2.49	2.33	2.21	2.13	2.06	2.00	1.95	1.88	1.82
90	3.95	3.10	2.71	2.47	2.32	2.20	2.11	2.04	1.99	1.94	1.86	1.80
100	3.94	3.09	2.70	2.46	2.31	2.19	2.10	2.03	1.97	1.93	1.85	1.79
∞	3.84	3.00	2.60	2.37	2.21	2.10	2.01	1.94	1.88	1.83	1.75	1.69

Exemple

Facteurs	SCE	ddl	Variances	F calculé	F table	significatif
A	0.446	1	0.446	1.04	5.32	Non
B	48.268	1	48.268	112.96	5.32	Oui
C	0.936	1	0.936	2.19	5.32	Non
D	0.174	1	0.174	0.41	5.32	Non
E	4.070	1	4.070	9.53	5.32	Oui
BD	0.515	1	0.515	1.2	5.32	Non
G	3.544	1	3.544	8.29	5.32	Oui
Résidu	3.418	8	0.427			
total	61.371	15	4.091			

Contribution de chaque facteur en % sur la SCE

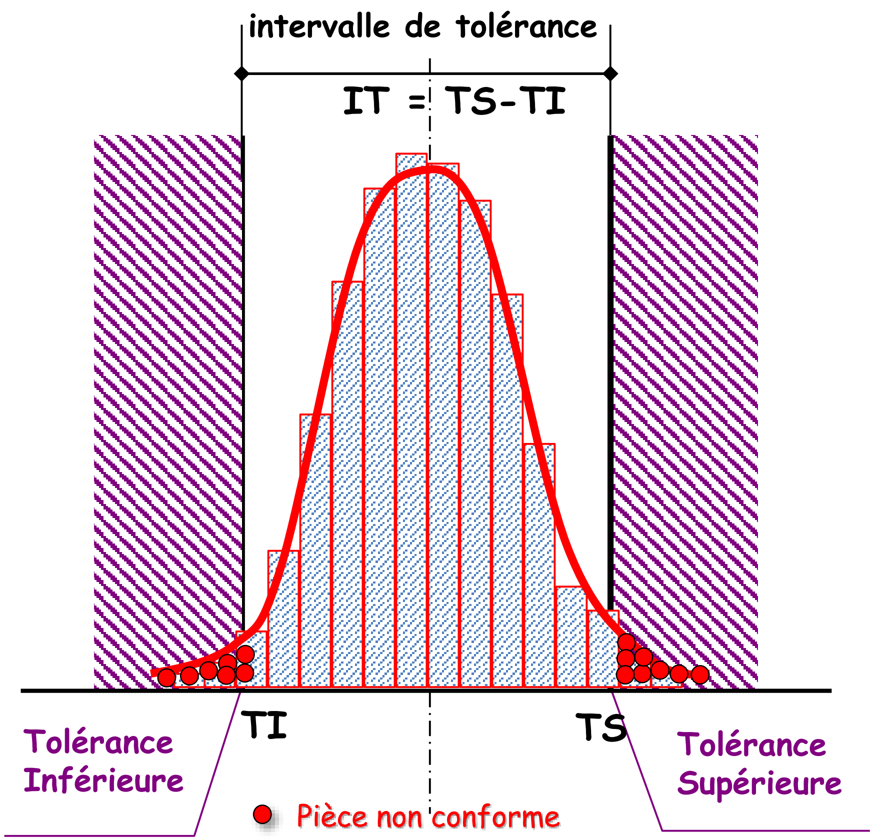


- La résiduelle est très petite < 15 %
- Le facteur B est très influent
- Le plan est une réussite

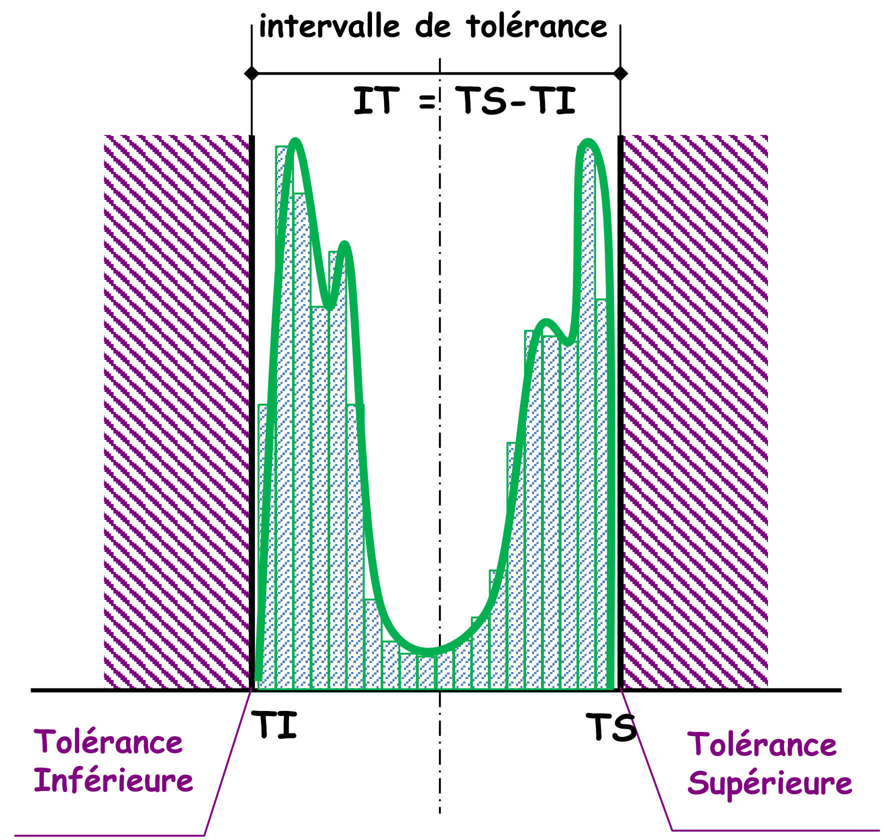
Il faut maintenant réaliser des essais de confirmation

Perte au sens TAGUCHI

Machine N°1

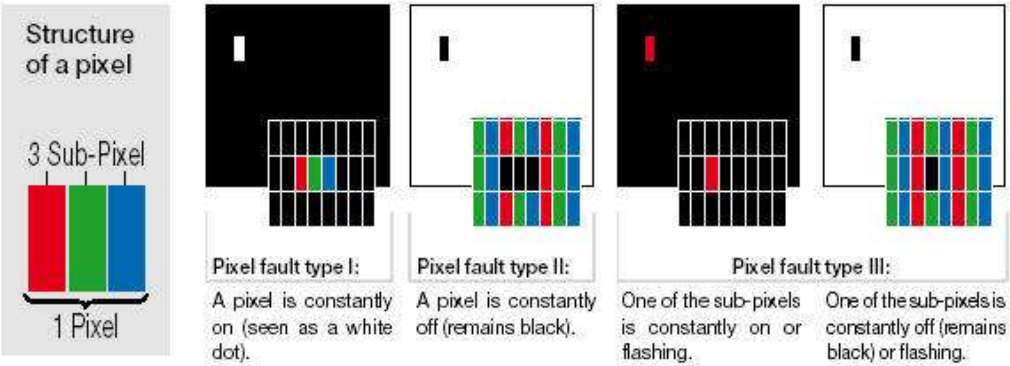


Machine N°2



Quelle machine choisissez-vous ?

Perte au sens TAGUCHI



Maximum acceptable number of faults:

Screen models*		Pixel fault Type I	Pixel fault Type II	Pixel fault Type III
XGA	(1024 x 768)	2	2	4
WXGA	(1280 x 800)	3	3	6
SXGA	(1280 x 1024)	3	3	7
SXGA+	(1400 x 1050)	3	3	8
WXGA	(1280 x 768)	2	2	5
WXGA	(1440 x 900)	3	3	7
UXGA	(1600 x 1200)	4	4	10
WSXGA	(1680 x 1050)	4	4	9
WUXGA	(1920 x 1200)	5	5	12

* To find out what type of screen model you have (e.g. XGA 1024x768) view the technical information of your notebook.

= 5,2ppm

Source : Site internet de TOSHIBA

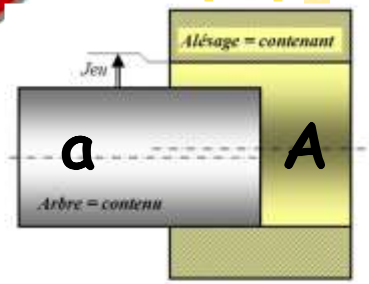
Types de défaut de pixel
En tant que fabricant d'écrans LCD haut qualité, nous nous engageons à vous offrir la meilleure qualité possible, sans excuse. Par conséquent, nous avons spécifié de façon claire le type et le nombre de défauts de pixels qui nécessitent une réparation ou un remplacement de votre écran. L'illustration donne des exemples des différents types de défauts de pixels qui peuvent se produire.

Réclamation dans le cadre de la garantie
La table de droite indique le nombre maximum admissible de défauts de pixels et le type de défaut que votre écran LCD Toshiba risque de présenter. Si vous découvrez d'autres défauts de pixels, qu'ils soient de type I, II ou III, vous êtes autorisé à déposer une réclamation. Dans ce cas, veuillez contacter le Toshiba Support Centre ou votre fournisseur de service agréé par Toshiba pour déposer une réclamation dans le cadre de votre garantie.

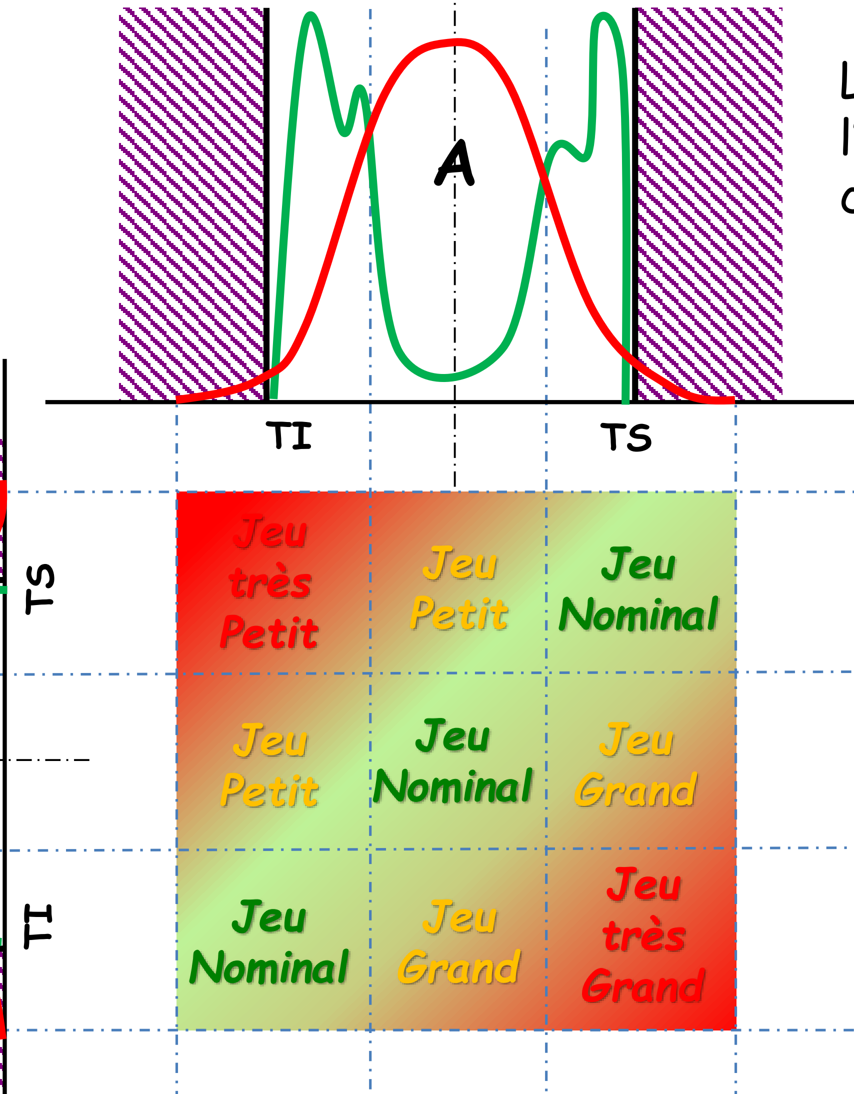
Sur les **2 304 000 pixels** de votre écran vous ne verrez pas les 11 premiers pixels défectueux !

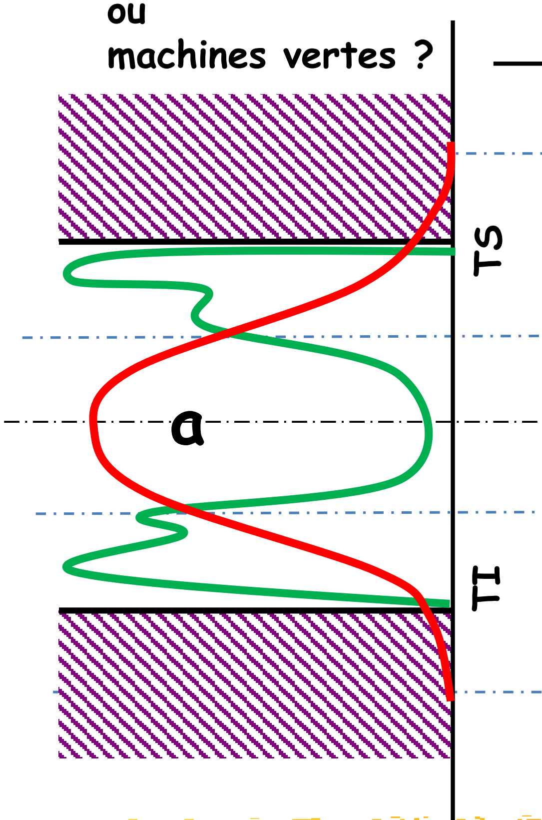
Et le 13ème défectueux vous empêchera-t-il de voir votre émission ?

Une autre façon de voir l'intervalle de tolérance *(d'après M. Pillet, Appliquer la MSP)*



Machines rouges ou machines vertes ?



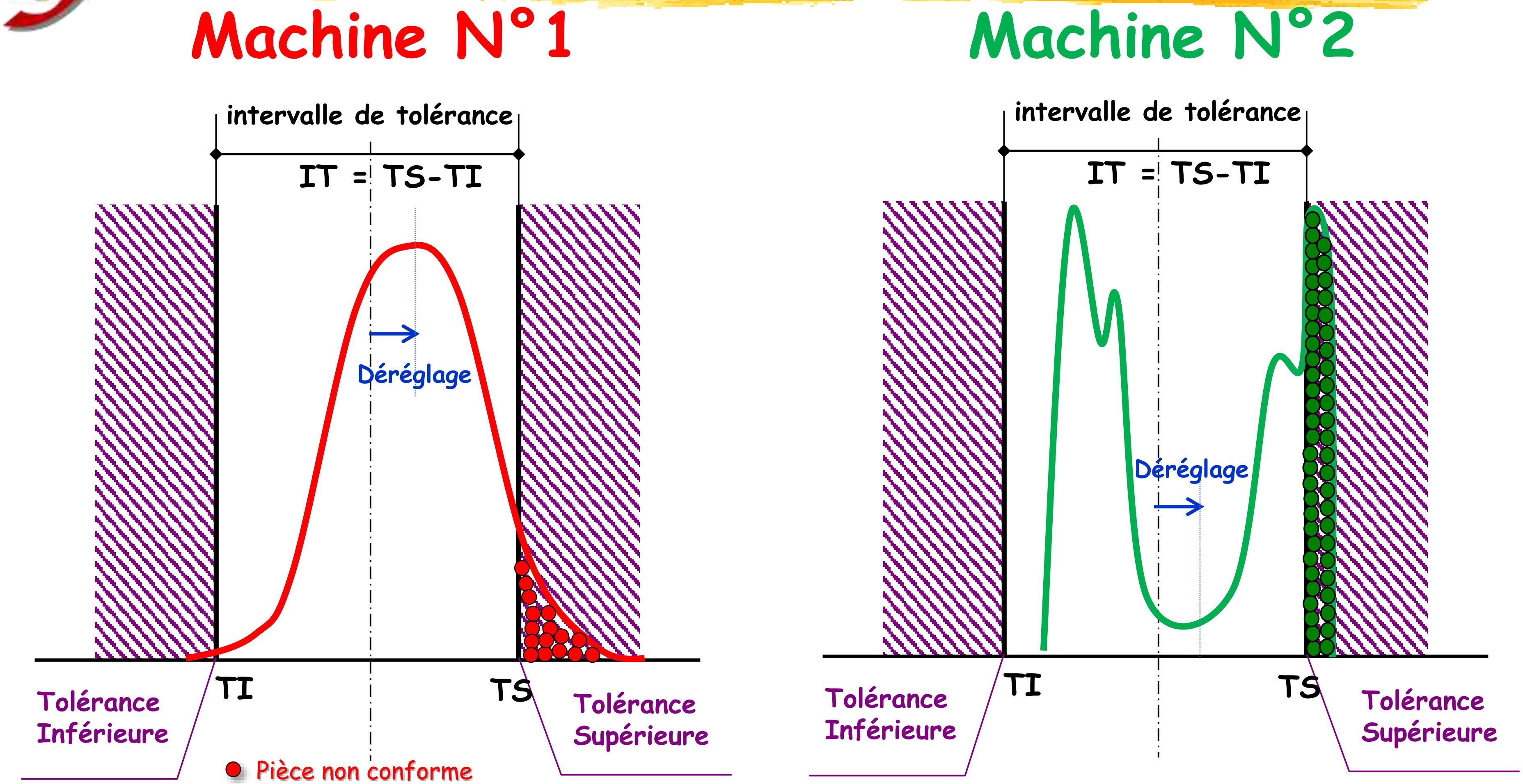


Le jeu entre l'arbre et l'alésage est CTQ : critique pour le client

- Il vaut mieux fabriquer beaucoup de pièces au nominal et peu de pièces proches des tolérances
- Taguchi dirait :

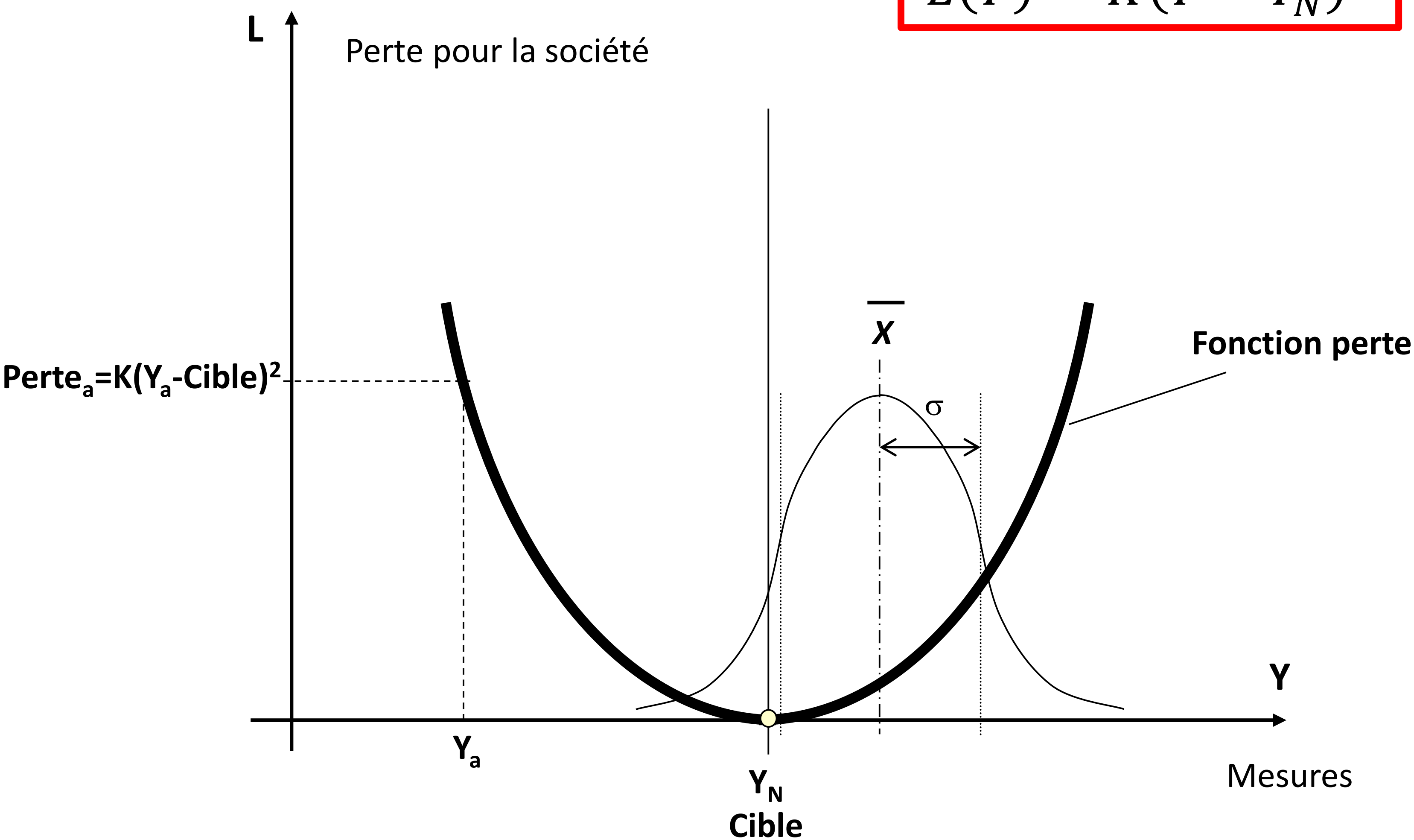
plus on s'éloigne du nominal plus les pertes sont importantes

Sensibilité aux déréglages



Perte au sens TAGUCHI

$$L(Y) = K(Y - Y_N)^2$$



Perte au sens TAGUCHI

$$\boxed{L(Y) = K(Y - Y_N)^2}$$

Pour une mesure (une valeur de Y)

Pour n mesures (n valeurs de Y) : $L(Y) = K\sum_{i=1}^{n}\frac{(Y_i - Y_N)^2}{n}$

Ce qui peut s'écrire également (pour une population n) : $\boxed{L = K({\sigma_n}^2 + (m - Y_N)^2)}$

Ce qui peut s'écrire également (pour un échantillon n) : $\boxed{L = K({\sigma_{n-1}}^2 + (\bar{Y} - Y_N)^2)}$

Si on cherche à minimiser la mesure Y (Y_N=0) : $\boxed{L = K({\sigma_{n-1}}^2 + \bar{Y}^2)}$

Si on cherche à maximiser la mesure Y (Y_N >>) : $\boxed{L = K\frac{1}{\bar{Y}^2}\left(1 + 3\frac{{\sigma_{n-1}}^2}{\bar{Y}^2}\right)}$

Ratio Signal/Bruit (S/N)

$$\boxed{L = K({\sigma_{n-1}}^2 + (\bar{Y} - Y_N)^2)}$$

Pour minimiser la perte il faut modifier les Y dans un rapport : $\frac{Y_N}{\bar{Y}}$

Dans ce cas l'écart type estimé σ_{n-1} va également varier dans un rapport : $\frac{Y_N}{\bar{Y}}$

Une fois cet ajustement fait, la fonction perte s'écrira :

$$\boxed{L = k{Y_N}^2 \frac{{\sigma_{n-1}}^2}{\bar{Y}^2}}$$

$\frac{\text{Le Bruit}}{\text{Le Signal}}$ = RATIO À MINIMISER

Auquel on préfère le Ratio S/N A MAXIMISER : $\frac{\text{Le Signal}}{\text{Le Bruit}}$

Que l'on exprime en dB : $\boxed{S/N(dB) = 10\log\left(\frac{\bar{Y}^2}{s^2} - \frac{1}{N}\right)}$

Ratio Signal/Bruit (S/N)

En résumé :

critère ciblé

$$\boxed{S/N(dB) = 10\log\left(\frac{\bar{Y}^2}{s^2} - \frac{1}{N}\right)}$$

critère à minimiser

$$\boxed{S/N(dB) = -10\log(s^2 + \bar{Y}^2)}$$

critère à maximiser

$$\boxed{S/N(dB) = -10\log\left[\left(\frac{1}{\bar{Y}^2}\right)\left(1 + 3\frac{s^2}{\bar{Y}^2}\right)\right]}$$

CONCLUSION

7 points clés pour réussir un plan d'expérience

1. Attention à ne pas considérer votre problème comme un clou parce que vous ne disposez que d'un marteau
   ⇨ Vérifiez bien que la méthode (plan d'expérience) réponde à la problématique posée
   ⇨ Si une solution simple évidente apparait, mettez la en place !
2. Ne pas s'affranchir de **l'expérience des experts** du processus
3. Mettre les **moyens** (budget) en correspondance avec les **bénéfices** possibles
4. **Choisir les facteurs étudiés** (nombre et niveaux) en fonction de l'objectif
5. Ne pas hésiter à **restreindre l'étude** par des expérimentations préliminaires ou complémentaires.
6. **Méticulosité, précision et rigueur**
   - protocole de réalisation des essais
   - protocole de mesure des résultats
   - feuille d'essais complète et détaillée
7. **L'essai de validation** est la sanction obligatoire de l'expérimentation

Garder à l'esprit que :

Ce qui est simple est faux,
Ce qui est compliqué est inapplicable.

Pour finir en image