

M. Boyer Etienne
Mme Hirsch Dominique
M. Joly Michael
M. Nevoret Sylvain
M. Piat Jean François
M. Plouchart Sébastien
Mme Verger Laure



FORMATION AUX PLANS D'EXPERIENCES

Expérimentation avec la catapulte

Très bon compte rendu extrêmement précis et qui relate bien ce que vous avez vécu. Penser ratio S/N pour parler de la dispersion avant capabilité (on évoque la capabilité quand le centrage est proche de l'objectif).

Note 17/20

Sommaire

SOMMAIRE.....	1
PARTIE A : PRELIMINAIRES.....	2
I - DEFINITION DE LA CIBLE A ATTEINDRE ET OBJECTIF.....	2
II - PRISE DE CONNAISSANCE DE L' APPAREIL.....	3
III - DEFINITION DES VARIABLES	3
IV - ATTEINTE DE LA CIBLE PAR TATONNEMENT.....	4
1 - <i>Description sommaire des 1^{ers} tests :</i>	4
2 - <i>Estimation de la dispersion initiale résultante :</i>	5
3 - <i>Définition et mise en place Modes Opérateurs</i>	7
PARTIE B : ÉLABORATION DU PLAN D'EXPERIENCES.....	10
I - INTERACTIONS ENTRE LES DIFFERENTS PARAMETRES.....	10
II - DETERMINATION DE LA MATRICE D'EXPERIMENTATION	12
III - POSITIONNEMENT DES FACTEURS DANS LA MATRICE.....	12
PARTIE C : LES ESSAIS ET LE DEPOUILLEMENT	13
I - LES ESSAIS DU PLAN ET RESULTATS.....	13
II - DEPOUILLEMENT	15
PARTIE D : LES OPTIMISATIONS	20
I - 1 ^{ERE} OPTIMISATION = LA RECHERCHE DE LA DISPERSION MINIMALE.....	20
II - 2 ^{EME} OPTIMISATION = LE CIBLAGE.....	21
III - 3 ^{EME} OPTIMISATION = PAR INTERPOLATION.....	22
IV - 4 ^{EME} OPTIMISATION = UTILISATION D'UN FACTEUR EXTERNE.....	24
CONCLUSION	26

Partie A : Préliminaires

Etape	Durée	Heure	
		8:30	← Heure à modifier
Présentation du TP (catapulte, documents, logiciel)	20	8:50	
Découverte de la catapulte	10	9:00	
Essais pour atteindre la cible	15	9:15	
Mesure de la dispersion	15	9:30	Zone de saisie
Reproductibilité mesure (Mode Opérateur)	20	9:50	Heures calculées
Reproductibilité de tir (Mode Opérateur)	20	10:10	
Mesure du gain sur la dispersion	15	10:25	
Choix des facteurs selon interactions	20	10:45	
Ordre des facteurs	10	10:55	
Choix de la matrice	5	11:00	
Saisie du plan	15	11:15	
Essais	100	12:55	
Pause repas	60	13:55	
Saisie résultats	10	14:05	
Dépouillement ==> optimum (validation 1)	15	14:20	
Essai validation de l'optimum	10	14:30	
Dépouillement ==> cible (validation 2)	15	14:45	
Essai validation de la cible	10	14:55	
Dépouillement ==> interpolation (validation 3)	15	15:10	
Essai validation de l'interpolation	10	15:20	
Dépouillement ==> facteur hors plan (validation 4)	15	15:35	
Essai validation de l'interpolation	10	15:45	
Synthèse rédaction CR	45	16:30	
	420		

Tableau 1 : Planning du TP

I - Définition de la cible à atteindre et objectif

L'objectif de ce TD est d'optimiser la configuration d'une catapulte dans le but de réaliser des envois de projectile à une distance cible (de 2700mm) et ce, avec un minimum de dispersion. La dispersion sera caractérisée par un écart type minimal (~34mm) et par un ratio signal sur bruit (S/N) maximal de l'ordre de 38 dB.

	Objectif
Moyenne	2700 mm
Ecart type	34 mm
S/N	38,0 dB

La mesure de dispersion sera réalisée à la suite de n essais de catapultage

II - Prise de connaissance de l'appareil

Pour cela, nous disposons d'une catapulte munie de 3 élastiques de tensions différentes (dont nous ne connaissons pas les raideurs) ainsi que de 4 sacs de sable de masses : 15g, 20g, 25g et 30g

La catapulte peut être configurée selon 8 paramètres différents:

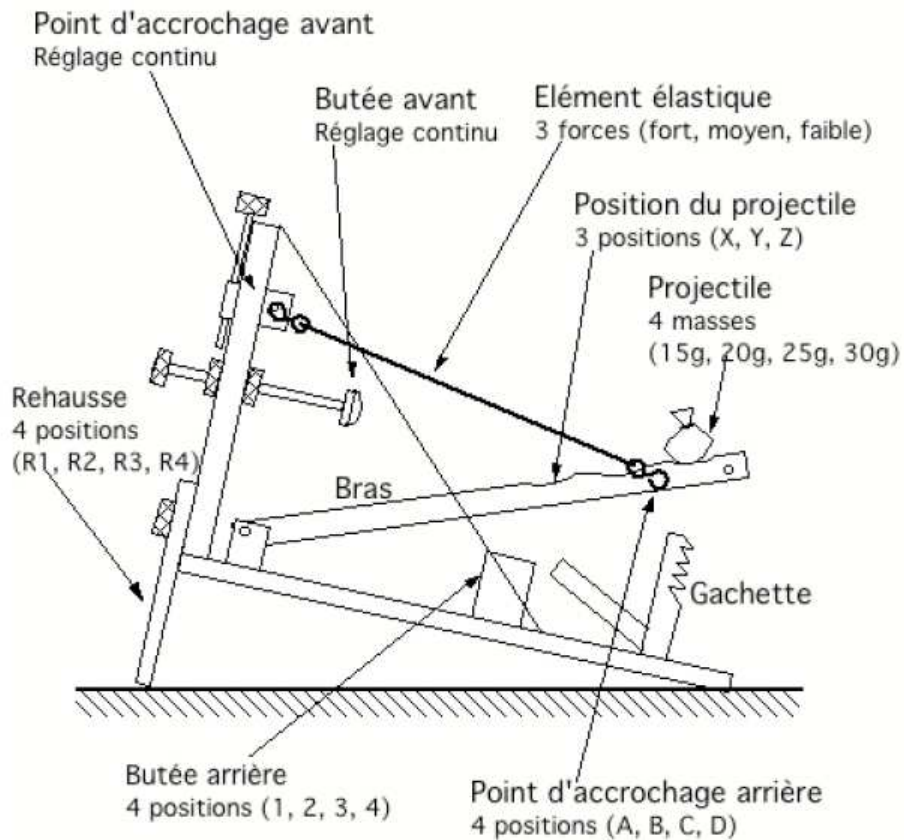


Figure 2 : Schéma de la catapulte

III - Définition des variables

Chaque paramètre possède de 3 à 4 positions de réglages. Ces paramètres n'ont pas de valeurs prédéfinies, il est préférable et même indispensable de construire un croquis établissant les positions des différents paramètres. Cela simplifie ainsi la lecture des variables à modifier lors des essais d'optimisation et permet surtout une compréhension rapide des paramètres modifiés. Le schéma ci-dessus a été établi dans cette optique.

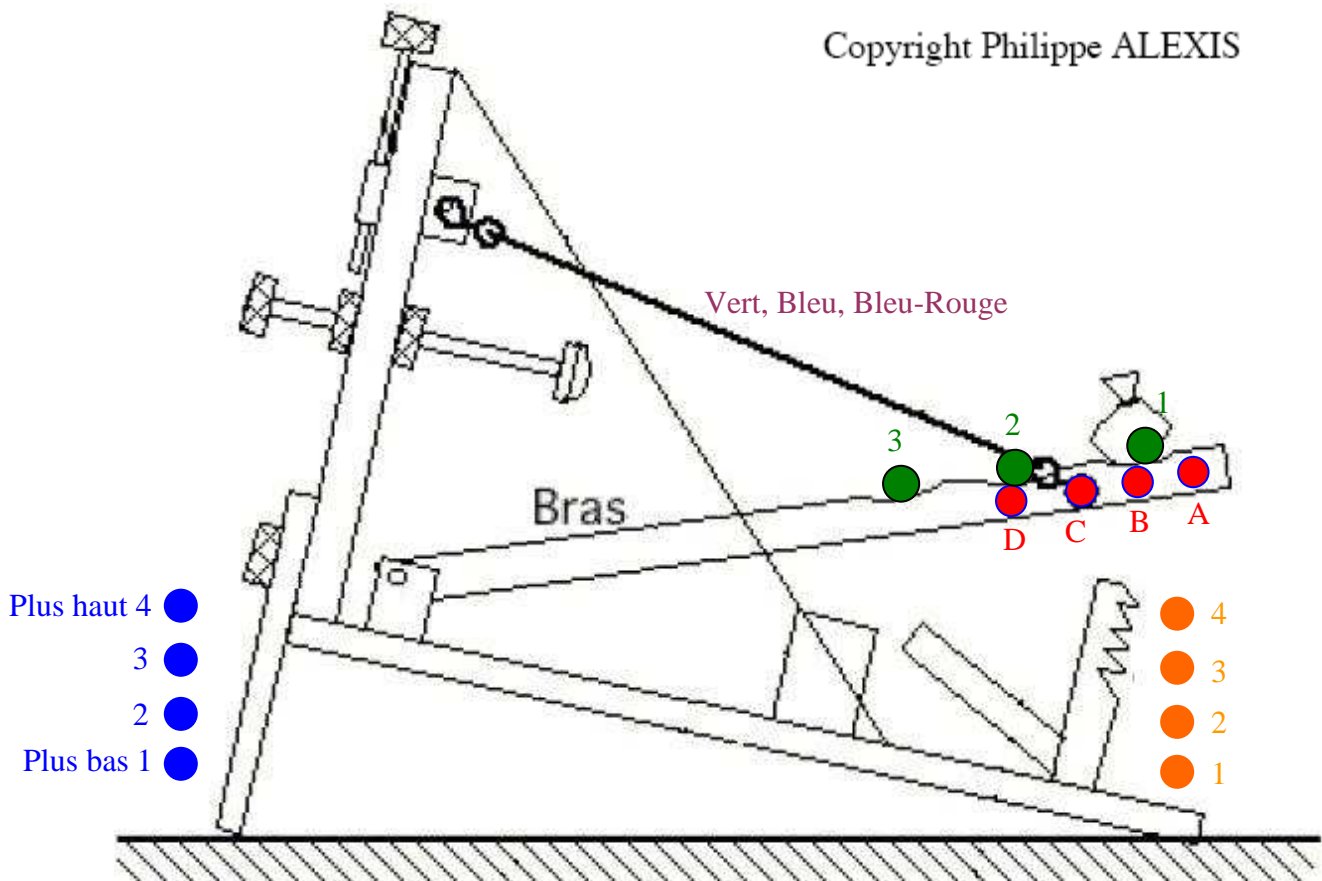


Figure 3 : Schéma des variables utilisées

IV - Atteinte de la cible par tâtonnement

Dans cette phase préliminaire de tâtonnement, nous avons effectué des tests pour atteindre notre cible à ± 100 mm. Le but de ces essais est de :

- Prendre en main la machine
- Élaborer un mode opératoire reproductible
- Adopter des réglages permettant de nous approcher de la valeur cible, sans pour autant connaître la finesse, la portée et la variabilité qu'ils peuvent potentiellement induire sur la réponse attendue : la distance.
- Effectuer un état zéro des réglages qui permet à priori une atteinte de la cible: notre référentiel

Dans cette phase préliminaire, nous choisissons des réglages moyens.

1 - Description sommaire des 1^{ers} tests :

Notre groupe est organisé avec :

Un tireur : E. Boyer

Une personne pour caler la catapulte : JF Piat

Trois personnes pour visualiser l'impact du sac M.Joly, D Hirsch, S.Plouchart

Une personne pour mesurer S.Nevoret

Une personne pour prendre en note les relevés. L.Verger

Les tirs sont effectués au niveau du sol.

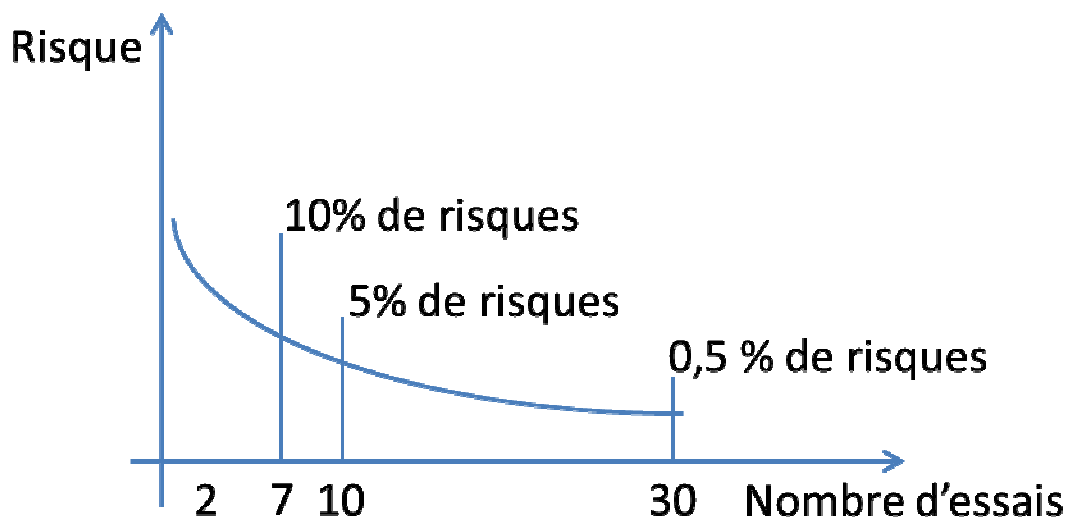
Chaque résultat de test est consigné dans le tableau récapitulatif (tableau figure 11 colonne recherche). Dès qu'un test permet d'approcher la cible à ± 100 mm, on note les réglages de chaque paramètre de la machine. Ces réglages sont les suivants :

Point d'accroche arrière	B
Point d'accroche avant	75 mm
Position gâchette	2
Élastique	bleu
Position projectile	2
Poids sac	20 g
Réhausse	3
Butée avant	37,5 mm

2 - Estimation de la dispersion initiale résultante :

Nous avons effectué 10 tirs dans le but de calculer une moyenne et un écart-type, afin de connaître la dispersion de nos résultats.

- Le choix d'effectuer un nombre de tirs égal à 10 a été fait pour obtenir un risque d'erreur bas, tout en limitant le nombre de tirs. Le risque d'erreur est égal à 5%, soit un niveau 2 sigma appliqué à 95% de la population.
- Un nombre de tirs égal à 30 aurait été préférable car il correspond dans l'industrie à la taille d'échantillonnage normalement requise puisqu'elle génère un risque résiduel très faible (0,5%, soit 3 sigma). Mais l'accumulation d'essais coûte cher à une entreprise.
- A contrario, un échantillonnage de 7 tirs aurait été insuffisant, car il correspond à un risque d'erreur trop élevé (10%). Ceci n'est pas acceptable pour nous permettre de prendre des décisions et atteindre un niveau de qualité de tirs acceptable.



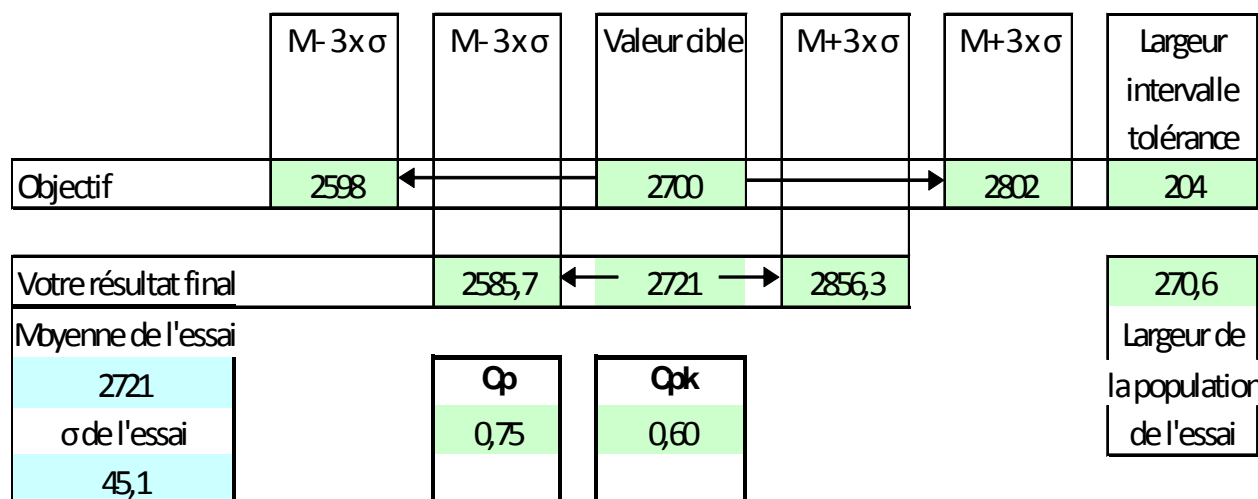
Les 10 essais de tâtonnement nous conduisent à obtenir les résultats suivants :

	Réglages empiriques	Objectifs
Moyenne	2721 mm	2700 mm
Écart type	45.1 mm	34 mm
S/N	30 dB	38 dB

Chaque résultat de test est noté dans le tableau récapitulatif (Cf. partie dispersion).

Analyse des résultats obtenus par rapport aux objectifs.

Nous constatons que la moyenne est proche de la cible. Cependant l'écart type de la distribution de nos résultats est trop important par rapport à la valeur qu'on nous demande d'atteindre. Le Processus est très dispersif (C_p de 0.75) et décalé par rapport à la moyenne ($C_{pk}=0.6 \ll C_p$). ~~La largeur de l'intervalle de mesure est supérieure à l'objectif ($270.6 > 204$)~~ *On préférera parler du ratio S/N qui est un indicateur de dispersion indépendant de la grandeur mesurée ici 30 dB très inférieur à l'objectif !*



Causes possibles.

Nous constatons que nous ne savons pas mesurer de façon très précise et répétable la distance. En effet le résultat est la moyenne des relevés effectués par 3 personnes : A partir de quel point de référence faut-il mesurer la distance (nous avons mesuré la distance à partir de la rehausse, or cette rehausse peut être pivotée et le départ de mesure s'en trouve changé)?

Nous remarquons également que nous n'avons pas toujours été répétables dans le processus de tir : nous n'appuyons pas toujours sur la gâchette de la même manière, le positionnement de la catapulte et du sac sur la catapulte a pu varier.

Plan d'actions correctives → nouvel objectif (éventuellement).

Nous allons devoir réduire la dispersion et l'écart type de la distribution de nos résultats d'essais.

Les premières actions correctives vont concerner le mode opératoire afin de mettre rapidement et facilement sous silence le maximum de causes de variabilité possibles.

3 - Définition et mise en place Modes Opératoires

Ces actions correctives concernent les modes opératoires de mesure et de tir :

Mesure :

- Disposition du sable : afin de réduire les erreurs de lecture sur le point d'impact du sac de sable, nous étendons une pellicule de sable sur le sol (épaisseur d'un grain de sable, nous utiliserons une feuille de papier pour lisser le sable à chaque essai).
- Mesure répétable de la distance :
 - Point de départ : Nous prendrons en référence toujours le même point de départ du mètre (coin de table qui bloque le recul de la catapulte)
 - Point d'arrivée : nous choisissons le point d'impact le plus proche de la catapulte.
 - Façon d'utiliser le mètre entre ces 2 points : Entre les 2 mesures, nous tendons le mètre afin qu'il ne se vrille pas.
- Positionnement de l'épaisseur de sable après chaque réglage de la catapulte : Il faut déplacer le tas de sable en prenant en compte les paramètres qui augmentent ou réduisent la distance. A ce titre un tir d'essai visant à déterminer le point de chute estimé est réalisé pour déplacer au besoin le sable.
- Solution conservatoire si le sac ne tombe pas dans le sable : Si tel est le cas, l'essai est considéré mauvais et est à refaire.

Tir :

- Opérateur de tir : Un seul et même opérateur de tir est désigné.
- Blocage de la catapulte :
 - Nous mettons la catapulte en butée arrière contre la table. (axe x)
 - Nous nous alignons sur un repère tracé au marqueur sur le coin de la table. (axe y)
 - L'opérateur appuie sur la catapulte. (axe z)
- Installation de l'élastique et du sac de sable :
 - Nous installons ensuite l'élastique, et attendons 20 secondes (afin de nous assurer que toutes les fibres des élastiques aient atteint un niveau égal de tension). Pour cela nous utilisons un chronomètre.
 - Pendant ces 20 secondes, nous installons le sac de sable projectile : la couture est placée sur le dessus, les coins à l'arrière, tangents au bord circulaire du logement. Puis une pression est appliquée par le pouce du tireur sur le sac (avec 4 pivotements successifs d'angles $\pm 45^\circ$). Ceci afin de permettre au sac de sable de prendre appui toujours de la même façon dans son logement, et donc figer la répétabilité du chargement.
- Lâcher de gâchette
 - Pour appuyer sur la gâchette, nous appuyons sur l'extrémité de la gâchette de façon rapide, avec le pouce gauche, et ce pour éviter les effets de frottements entre le bâti et la gâchette qui pourraient affecter la portée du tir, et qui sont par nature des phénomènes non reproductibles d'un essai à l'autre.

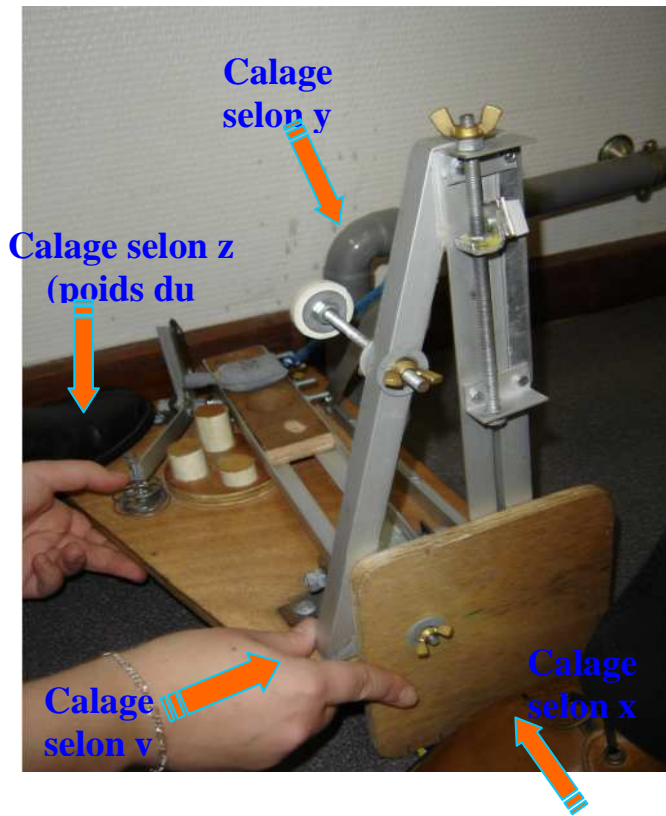


Figure 4-1 : Calage de la catapulte



Figure 4-2 : Position du sac



Figure 4-3 : Position du sable

Afin de mesurer les progrès apportés par la mise en place de ces Modes Opératoires, nous avons effectué 10 tirs, avec les mêmes réglages que précédemment, pour avoir une dispersion estimée avec un risque de 5%.

On obtient en synthèse :

	Réglages empiriques sans MO	Réglages empiriques avec MO	Objectifs
Moyenne	2721 mm	2632 mm	2700 mm
Écart type	45.1 mm	36,4 mm	34 mm
S/N	30 dB	37.2 dB	38 dB

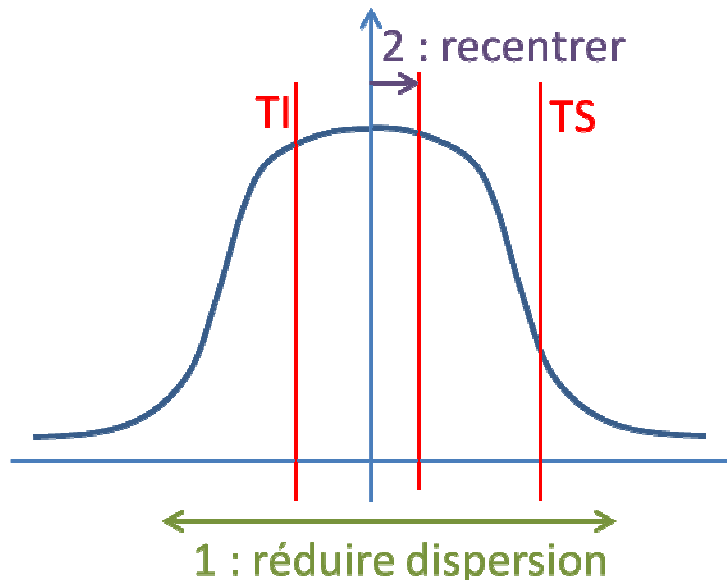
Chaque résultat de test est noté dans le tableau récapitulatif (partie Essai N°1).

Analyse des résultats obtenus par rapport aux objectifs. Gain par rapport à l'étape précédente ?

Nous avons réduit la variabilité (-19% sur l'écart-type), et cela s'est traduit par une amélioration du Cp de 0,75 à 0,93. *On préférera parler du ratio S/N qui est un indicateur de dispersion indépendant de la grandeur mesurée ici 37,2 dB, qui a bien été amélioré avec les modes opératoires qui sont donc efficaces, mais encore < l'objectif.*

Cependant la dispersion n'est encore pas suffisamment étroite pour qualifier le processus de robuste (il faut viser au minimum un Cp de 1,33, voir 2). La largeur de l'intervalle des résultats est encore légèrement supérieure à l'objectif (218,4>204).

La moyenne des tirs se trouve maintenant décalée en dessous de la valeur cible. De ce fait, le CpK est dégradé, ce qui dans un premier temps n'est pas grave, étant donné que l'on souhaite diminuer la dispersion, avant de centrer notre procédé :



	M-3 σ	M-3 σ	Valeur cible	M+3 σ	M+3 σ	Largeur intervalle tolérance
Objectif	2598		2700		2802	204
Votre résultat final		2522,8	2632	2741,2		218,4
Moyenne de l'essai						
2632	Cp		Cpk		Largeur de la population de l'essai	
σ de l'essai	0,93		0,31		de l'essai	
36,4						

Causes possibles.

Nous n'avons pas identifié de cause possible à cette valeur toujours trop importante de dispersion. La dispersion observée avec ce jeu de paramètres n'est pas optimale → *c'est donc que la combinaison des réglages est la cause de cette dispersion*

Plan d'actions correctives → nouvel objectif (éventuellement).

Un plan d'expérience de screening est nécessaire pour déterminer le meilleur jeu de paramètres qui nous permettra d'atteindre la valeur cible de distance avec un niveau de dispersion réduit.

Partie B : Élaboration du plan d'expériences

I - Interactions entre les différents paramètres

Différents paramètres sont ajustables sur la catapulte. Ils sont au nombre de 8. Cependant certains d'entre eux peuvent être en interaction et il faut donc identifier ces interactions.

Le nombre d'interactions possibles entre ces facteurs est au nombre de 28 (nombre de combinaisons de 2 paramètres parmi 8). On remplit la table ci-dessous avec les interactions que nous supposons.

On notera qu'il ne faut pas confondre interaction entre 2 facteurs et additivité de facteurs. On décide de fixer les paramètres « accrochage arrière » et « butée avant » (en rouge et en bleu sur la matrice) pour éliminer le maximum d'interactions, et ce car ce sont les 2 paramètres qui concentrent le plus grand nombre d'interactions avec les autres paramètres. On ne fixe que 2 paramètres sur 8 (75%), proportion de norme pour les plans d'expérience (bloquer 20% des facteurs qui font 80% des interactions) → ceci nous permet d'espérer avoir ultérieurement un modèle prédictif non « pollué ». *En bloquant 2 facteur sur 8 soit 25% des facteurs on a éliminé 7 interactions sur 9 soit 78% des interactions (loi de Pareto ou des 20-80).*

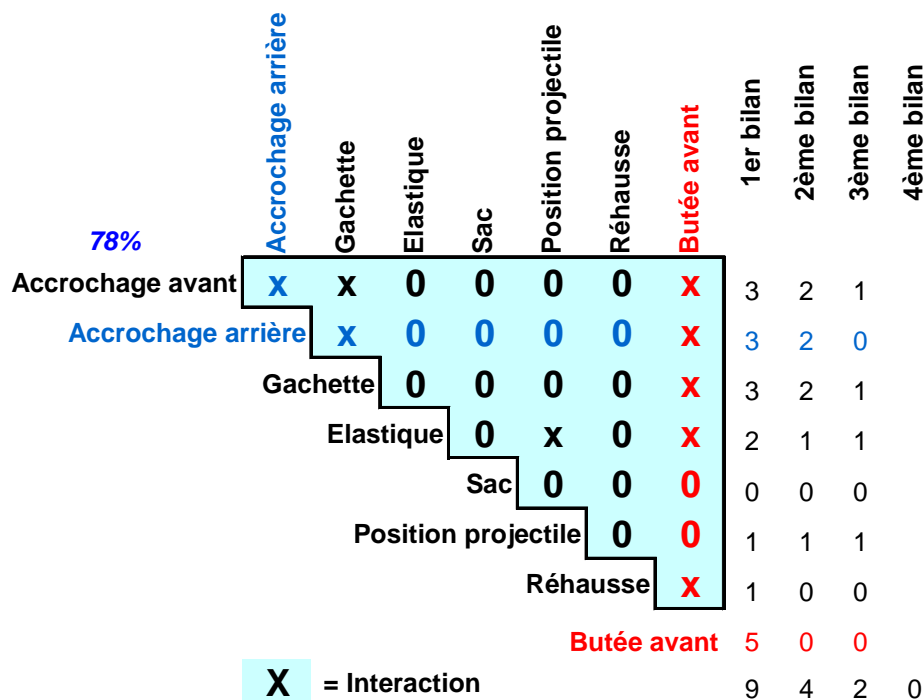


Figure 5 : Graphique des interactions

Pour chaque paramètre, on associe deux niveaux :

- on ne prend que 2 niveaux dans un premier temps afin de déterminer l'influence relative de chaque facteur (plan screening)
- le niveau 1 correspond aux paramètres approchant la valeur moyenne
- le niveau 2 correspond aux paramètres qui impliquent soit l'augmentation de la distance du jet soit la diminution de la distance du jet.

Il faut faire en sorte d'avoir autant de paramètres de niveau 2 qui réduisent la distance de jet que de paramètres de niveau 2 qui augmentent la distance de jet (et ce par rapport aux paramètres que l'on avait choisis au préalable (Niveau 1)) → le but est que tous les essais du plan encadrent l'essai N°1 (tous les paramètres sont réglés sur le niveau 1), lequel est proche de la cible à atteindre. Les niveaux testés sont en gras dans le tableau de la figure 6 (niveaux non retenus en rouge).

Facteur	Unité	Niveau 2 Distance -	Niveau 1 (dispersion)	Niveau 2 Distance +	Difficulté réglage	Colonne matrice
Accrochage arrière	Cran N°		<i>B</i>			
Accrochage avant	mm	60	75	<i>90</i>	1	A
Gachette	Cran N°	3	2	<i>1</i>	4	E
Elastique	Couleur	<i>vert</i>	bleu	<i>rouge</i>	2	B
Position projectile	Trou N°	3	2	<i>1</i>	5	F
Sac	g	25	20	<i>15</i>	6	G
Réhausse	Position N°	2	3	<i>4</i>	3	C
Butée avant	mm		37,5			

Colonne D
éliminée

Méthodologie de choix de la matrice :

(comporte le plus de changement)

- ▶ Une matrice orthogonale
- ▶ La plus petite possible en nombre d'essais (ex : L9 = 9 essais)
- ▶ Capable d'accueillir au minimum le nombre de facteurs souhaité
- ▶ Capable d'accueillir le nombre de niveau retenu pour chaque facteur
- ▶ Choix : **L8 (7 facteurs * 2 niveaux) que l'on transforme en L8 (6 facteurs * 2 niveaux)**

Figure 6 : Analyse des niveaux (tableau excel → accès par double-clic)

II - Détermination de la matrice d'expérimentation

Nous avons 6 paramètres qui varient puisqu'on a figé les facteurs « accrochage arrière » et « butée avant ». Nous cherchons donc une matrice d'expérimentation qui prend en compte 6 paramètres à deux niveaux. On opte ainsi pour la matrice d'expérimentation Taguchi L 8 (6 facteurs x 2 niveaux) ci-dessous, qui prend en compte 6 facteurs à 2 niveaux : accrochage avant, gâchette, élastique, position projectile, sac et rehausse.

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

Essai N°	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

Chgmt niv 1 3 2 7 6 4 5

Figure 7 : Matrice d'expérimentation à 7 facteurs à 2 niveaux

Cependant nous n'avons que 6 paramètres alors que la matrice en compte 7, il faut donc éliminer une colonne. Nous choisissons d'enlever la colonne qui génère le plus grand nombre de « changements de série », dans notre cas : la colonne D (6 changements de niveau). Nous retrouvons donc avec une matrice à 6 colonnes.

Matrice modifiée

Nombre essais : 8

Nombre facteurs 6

Nombre interactions :

Essai N°	Facteurs contrôlés					
	A	B	C	E	F	G
1	1	1	1	1	1	1
2	1	1	1	2	2	2
3	1	2	2	1	2	2
4	1	2	2	2	1	1
5	2	1	2	2	1	2
6	2	1	2	1	2	1
7	2	2	1	2	2	1
8	2	2	1	1	1	2

Figure 8 : Matrice d'expérimentation modifiée

III - Positionnement des facteurs dans la matrice

On veut maintenant attribuer chaque paramètre de la machine à une colonne de la matrice et changer de niveaux le moins souvent possible pour les paramètres les plus contraignants à modifier,

en l'occurrence ici le réglage de la butée avant, puis le changement d'élastique. On classe ainsi les paramètres suivant leur niveau de difficultés de réglage. En regardant la matrice, on remarque que le facteur A ne change de niveau qu'une seule fois. Ainsi il correspondra au paramètre de notre butée. On fait de même pour chaque facteur :

Accrochage avant	→ colonne A	(1 changement de niveaux)
Rehausse	→ colonne C	(2 changements de niveaux)
Elastique	→ colonne B	(3 changements de niveaux)
Position du projectile	→ colonne F	(4 changements de niveaux)
Sac	→ colonne G	(5 changements de niveaux)
Gâchette	→ colonne E	(6 changements de niveaux)
Supprimé	→ colonne D	(7 changements de niveaux)

Maintenant que le travail est bien préparé on peut saisir l'ensemble de ces informations dans le logiciel mis à disposition (Kit_MW505).

Bilan des actions réalisées sur le nombre d'essais, le nombre de tirs et donc le budget, le temps nécessaire à la réalisation d'un tel plan.

Le nombre d'essai d'un plan d'expérience complet à **6** paramètres à 2 niveaux est de 2^6 , soit 64 essais. La matrice L8 permet d'étudier 8 **jeux combinaisons** de niveaux de paramètres (**ou essais**) et d'en déduire les 54 autres : le nombre d'essai a été réduit de 88% (passage de 64 à 8 essais).

Suite à l'analyse des interactions, nous avons figé 2 paramètres, pour réduire les interactions potentielles de près de 80% (passage de 9 à 2 interactions)

Le nombre de tirs pour ce plan L8 sera donc de **80 (consommation matière), soit 80 k€ (coût) soit 80 mn (temps)**.

Objectif du plan

L'objectif du plan est de déterminer les seuils des paramètres influents sur la dispersion dans un premier temps, puis sur la distance → **cela viendra après ! L'objectif est d'acquérir de l'information quant à l'effet des facteurs sur la distance et la dispersion.**

Partie C : Les essais et le dépouillement

I - Les essais du plan et résultats

La matrice décrite ci-dessus nécessite, pour faire notre plan d'expériences, 8 essais. Nous choisissons de réaliser 10 répétitions de chaque essai pour appréhender la dispersion. De la matrice, le logiciel déduit les différents réglages à effectuer pour chaque essai sur la catapulte.

Le Programme Kit-Tag nous donne pour chaque essai une « feuille essai », comme ci-dessous :

Référence expérimentation
catapulte groupe 1

Essai N°1

Observations relevées durant la réalisation de l'essai

N°	Facteur contrôlé	Rep.Nv.	Valeur Niveau
A	Accrochage avant	1	75 mm
B	Elastique	1	bleu
C	réhausse	1	position 3
E	Gachette	1	cran 2
F	Position du projectile	1	trou 2
G	Sac	1	20g

Par exemple :

- écarts entre les valeurs prévues et réelles de certains facteurs,
- température, hygrométrie, pression atmosphérique ambiantes, etc ...)

Figure 9 : Exemple d'une feuille d'essai

Une fois nos 80 tirs notés dans le tableau récapitulatif (partie Essai N°1 à 8) on peut saisir les moyennes et écart-type de chaque essais dans le logiciel.

Au préalable on aura saisi le nombre de caractéristiques à analyser (ici 1 seule : la distance de tir) et le type de ratio S/N que l'on adoptera (ici : atteinte d'une cible avec toutes les valeurs mesurées positives). On obtient les résultats suivants :

RECAPITULATION DES RESULTATS

Référence expérimentation			
catapulte groupe 1			
Caractéristique mesurée	Unité de mesure		
Distance de tir	mm		
Critère ciblé_1			
Nombre de mesures par essai : : 10			
N°essai	Moyenne	Ecart type	Ratio Signal/Bruit
1	2632,00	36,40	37,18
2	2825,00	71,00	31,99
3	2684,00	60,40	32,95
4	1883,00	122,40	23,74
5	2122,00	42,70	33,93
6	2894,00	61,80	33,41
7	2333,00	46,90	33,93
8	2006,00	15,40	42,30

Figure 10 : Tableau des moyennes, écart-types et ratio S/N de chaque essai

Analyse des résultats d'essais entre eux, de la moyenne des essais par rapport aux objectifs.

La moyenne des résultats est décentrée par rapport à la cible (2390mm pour une cible de 2700 mm), seuls 2 essais sur 8 sont supérieurs à la cible.

L'écart-type varie selon les essais de manière importante (presque d'un facteur 10).

Le ratio signal sur bruit varie de manière importante (presque d'un facteur 2). Il prend simultanément en compte la valeur souhaitée et la variabilité. *Vous avez un essai (le N°8) dont la valeur est > l'objectif (38 dB) → il est donc possible de réduire la dispersion, mais la distance obtenue n'est alors pas la bonne !*

Causes possibles.

Sur les différents paramètres étudiés, il est probable que l'un (ou plusieurs) d'entre eux ait une forte influence sur la distance de projection mais que le niveau de réglage présélectionné ne permette pas d'atteindre la cible. D'autre part, le modèle prédéfini est peut être faux.

Nous n'avons testé que 8 combinaisons sur les 64 combinaisons possibles il se peut que la combinaison optimale se trouve dans les 56 non testées !

Objectif

Le dépouillement va nous permettre de déterminer quels sont les facteurs qui nous permettront d'agir sur la dispersion de nos tirs puis sur leur centrage.

II - Dépouillement

L'analyse de la variance nous informe sur la significativité de nos résultats. Nous pouvons expliquer 96,63 % des résultats obtenus par les facteurs et les éventuelles interactions choisies.

Mais 3.37% restent inexplicables par le modèle (résidu). Ces incertitudes peuvent être expliquées par différents éléments :

- Facteurs externes non contrôlés
- Facteur du procédé non pris en compte dans le plan d'expérience
- Présence d'interaction entre facteurs du plan d'expérience
- Erreur de manipulation

On remarque également que les facteurs, sont significatifs à 99%.

Un 2^{ème} tableau nous informe sur les effets de chaque facteur sur la moyenne et leur contribution au signal S/N.

- On observe que les facteurs Accrochage avant, Elastique, Gâchette, Position du projectile influencent fortement la valeur de la moyenne.
- Les facteurs Accrochage avant, Réhausse, Gâchette, Sac influencent fortement la valeur du ratio S/N.
- Les facteurs Accrochage avant, Gâchette jouent sur la valeur moyenne et sur le ratio S/N. Aucun facteur n'a ni d'influence sur la valeur moyenne, ni sur le ratio S/N.

Vérification de la réalité physique du modèle :

- Pour chaque facteur il s'agit de vérifier que l'effet « calculé » par le simulateur est conforme à ce qu'on peut attendre (« par rapport à la physique ») :
- exemple : si la masse augmente → la distance diminuée : VRAI
si le bras de levier augmente → la distance diminuée : FAUX → colonne polluée par une interaction

N° col	Fact	Libellé	Sens de variation de la distance quand le facteur passe du niv 1 au niv 2				
			Prévu	Modèle	Inter 1	Inter 2	Inter 3
1	A	Accrochage avant	▼	▼			
2	B	Elastique	▲	▼	AC	DF	EG
3	C	Réhausse	▲	▼	AB	DG	EF
4	D						
5	E	Gachette	▼	▼			
6	F	Position projectile	▲	▲			
7	G	Sac	▼	▼			

Les interactions sont définies à partir de la table triangulaire associée à la matrice L8 :

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

Par exemple : pour la colonne 2 (B : élastique pour nous), la matrice nous indique des interactions potentielles entre les colonnes 1 et 3 (A et C), 4 et 6 (D et F) et 5 et 7 (E et G) que nous n'avons pas détectées lors de nos estimations préliminaires. On peut supprimer D et F le facteur D n'existant pas.

Selon la matrice des interactions, des interactions potentielles se trouvent entre Accrochage avant et Réhausse, Gâchette et Sac, Accrochage avant et Élastique, Gâchette et Position du projectile : on les note par un « point d'interrogation » dans la table des interactions :

	Accrochage arrière	Gâchette	Elastique	Sac	Position projectile	Réhausse	Butée avant	1er bilan	2ème bilan	3ème bilan	4ème bilan
78% Accrochage avant	X	X	?2	0	0	?1	X	3	2	1	
Accrochage arrière		X	0	0	0	0	X	3	2	0	
Gâchette			0	?1	?2	0	X	3	2	1	
Elastique				0	X	0	X	2	1	1	
Sac					0	0	0	0	0	0	
Position projectile						0	0	1	1	1	
Réhausse							X	1	0	0	
Butée avant								5	0	0	
X = Interaction								9	4	2	0

Titre	Recherche	Dispersion	Essai 1	Essai 2	Essai 3	Essai 4	Essai 5	Essai 6	Essai 7	Essai 8	Validation 1	Validation 2	Validation 3	Validation 3'
Répétition 1	400	2700	2664	2820	2568	1884	2144	2979	2396	2006	2328	2444	2903	2752
Répétition 2	2000	2720	2658	2876	2703	2110	2024	2873	2390	2013	2343	2458	2876	2710
Répétition 3	2700	2770	2633	2893	2730	2003	2129	2972	2345	2012	2363	2439	2901	2733
Répétition 4		2690	2694	2907	2686	1833	2180	2866	2368	2015	2303	2529	2860	2720
Répétition 5		2690	2645	2815	2689	1813	2146	2852	2279	2029	2362	2489	2929	2699
Répétition 6		2710	2601	2735	2712	1948	2148	2939	2291	2014	2356	2446	2887	2716
Répétition 7		2690	2613	2829	2605	1771	2129	2904	2333	2011	2402	2452	3006	2727
Répétition 8		2710	2640	2677	2650	1915	2125	2872	2366	1994	2360	2434	2903	2687
Répétition 9		2830	2595	2856	2754	1881	2086	2771	2271	1983	2344	2450	2820	2691
Répétition 10		2700	2573	2844	2746	1674	2104	2911	2293	1980	2348	2460	2887	2691
Répétition 11														
Répétition 12														
Moyenne		2721	2632	2825	2684	1883	2122	2894	2333	2006	2351	2460	2897	2713
Ecart type		45,1	36,4	71,0	60,4	122,4	42,7	61,8	46,9	15,4	25,7	28,6	48,2	21,1
S/N		35,6	37,2	32,0	32,9	23,7	33,9	33,4	33,9	42,3	39,2	38,7	35,6	42,2

Objectif							Prévu			Logiciel ==>	Prévu	Prévu
Moyenne	2700		Valeur moyenne plan	2422,3						Moyenne	2418,0	2550,0
Ecart type	34,0		S/N moyen plan	33,7						Ecart type	15,2	20,5
S/N	38,0		% résidu variance							S/N	44,0	41,9

N° Groupe	1	Renseigner votre N° de groupe	Zone de saisie	Résultats calculés	Δ valeur	67,1	89,9
					Δ S/N	10,8%	7,6%

Coût en €	3000	10000	10000	10000	10000	10000	10000	10000	10000	10000	10000	10000	10000	10000	10000
Coût total en €		133000	##												
Reste en caisse		17000													
Score	100	710	270	100	600	0	0	10	0	0	0	0	0	0	930
Score max		930													
/ Score objectif		Très bien													

Figure 11 : Résultats des essais

NB : le calcul S/N se fait avec la formule suivante :

- Ratio signal / bruit dans le cas d'un critère ciblé

- avec valeurs toutes positives :

$$\frac{S}{N} \text{ (db)} = 10 \log \left[\left(\frac{\bar{y}}{s} \right)^2 \cdot \frac{1}{n} \right]$$

TABLEAU DES EFFETS

Référence expérimentation					Caractéristique mesurée					Type	
catapulte groupe 1					Distance de tir					Critère ciblé_1	
%Contribution SN(dB)=(SNniveau facteur-SNmoyen) / valeur absolue de SNmoyen					Effet sur la valeur mesurée = valeur niveau facteur - valeur moyenne						
%Contribution SN(dB)					Facteur	Effet sur la valeur mesurée					Valeur moyenne : 2422,38 mm
Niveau 1	Niveau 2	Niveau 3	Niveau 4	Niveau 5		Niveau 1	Niveau 2	Niveau 3	Niveau 4	Niveau 5	
-6,57%	6,57%				A	83,63	-83,63				
1,33%	-1,33%				B	195,88	-195,88				
7,93%	-7,93%				C	26,63	-26,63				
8,26%	-8,26%				E	131,63	-131,63				
1,80%	-1,80%				F	-261,63	261,63				
-4,79%	4,79%				G	13,13	-13,13				

Figure 12 : Tableau des effets

Il y a 4 facteurs très influents sur le ratio S/N: A, C, E, et G

Il y a 2 facteurs très influents sur la valeur cible : A, B, E et F

Aucun facteur n'a à priori d'effet ni sur la dispersion ni sur la cible.

Les facteurs A, et E ont à priori un effet sur le ratio S/N et sur la valeur cible

Le facteur C n'a à priori d'effet que sur le ratio S/N

Les facteurs B et F n'ont d'effet à priori que sur la valeur cible

ANALYSE DE LA VARIANCE

Référence expérimentation
catapulte groupe 1
Caractéristique mesurée
Distance de tir

Origine de la variation	Degré de liberté	Somme des carrés brute	Variance V	*F ² expérimentation Vf / Vr	Somme des carrés nette	% Contribution
A	1	559 451,25	559 451,25	123,48 **	554 920,40	5,09%
B	1	3 069 361,25	3 069 361,25	677,44 **	3 064 830,40	28,14%
C	1	56 711,25	56 711,25	12,52 **	52 180,40	0,48%
E	1	1 386 011,25	1 386 011,25	305,91 **	1 381 480,40	12,68%
F	1	5 475 811,25	5 475 811,25	1 208,56 **	5 471 280,40	50,23%
G	1	13 781,25	13 781,25	3,04		0,00%
Résidu	73	330 751,80	4 530,85		367 187,28	3,37%
Total	79	10 891 879,30				

* = significatif à 95% ** = significatif à 99%

Figure 13 : Analyse de la variance

Comme nous l’avons déjà expliqué au début du point II-, on observe une contribution résiduelle, non négligeable de 3.37%. Dans l’industrie une valeur en dessous de 5% est un bon résultat. Mais dans le cas de la catapulte on attend une valeur entre 0.2 à 2%. On peut attribuer cette valeur résiduelle à des interactions qui n’ont pas été détectées. On constate aussi 5 facteurs significatifs A, B, C, E et F. Seul le G (poids du sac) n’est apparemment pas significatif.

Figure 14 : Graphe de l’influence sur la moyenne et sur le ratio S/N

Ce graphe est non disponible sur cette version d’Excel.

Partie D : Les optimisations

I - 1^{ère} optimisation = la recherche de la dispersion minimale

On va rechercher à atteindre un résultat d'essais conduisant à une dispersion minimale. Pour ce faire, le logiciel Kit-Tag nous propose une solution pour optimiser notre dispersion : celle dont le ratio S/N est le plus élevé.

On va valider ce choix en faisant un test de validation.

La configuration optimale serait : **A 2 / B 1 / C 1 / E 1 / F 1 / G 2**

Nous avons effectué 10 tirs pour avoir une dispersion estimée avec un risque de 5%.

On obtient en synthèse :

	Prévision	Réels	Objectifs
Moyenne	2418 mm	2351 mm	2700 mm
Écart type	15.2 mm	26.7 mm	34 mm
S/N	44 dB	39.2 dB	38 dB

Chaque résultat de test est noté dans le tableau récapitulatif (partie Optimisation N°1).

	M - 3 x σ	M - 3 x σ	Valeur cible	M + 3 x σ	M + 3 x σ	Largeur intervalle tolérance
Objectif	2598	2700	2700	2802	2802	204
Votre résultat final	2270,9	2351	2351	2431,1	2431,1	160,2
Moyenne de l'essai	2351					
σ de l'essai	26,7		Cp	Cpk	160,2	
			1,27	-3,08	Largeur de la population de l'essai	

Analyse des résultats obtenus par rapport aux prévisions. Ecarts ?

En termes de distance, nous ne sommes pas à la valeur cible ni dans ses tolérances (le Cpk est négatif), ~~Par contre, nous avons seulement 0.27% de différence avec la prévision.~~

De plus, nous avons amélioré le Cp, donc diminué la **dispersion : le ratio S/N est > l'objectif mais < prévision.**

Causes

Des interactions viennent polluer notre modèle mathématique.

Plan d'actions correctives.

Il nous faut maintenant recentrer le processus. Il faudrait donc agir sur un facteur qui a de l'effet sur la valeur à atteindre et peu sur sa dispersion.

Au lieu de nous engager dans cette voie, nous décidons de repartir de l'essai n°8 pour la deuxième optimisation car nous avons remarqué que les dernières valeurs atteintes ne sont pas aussi bonnes que celles issues de l'essai n°8, et ce en termes d'écart par rapport à la cible et de ratio signal/bruit. La valeur signal/bruit de l'essai 8 est d'ailleurs jusqu'à présent la meilleure qui ait été atteinte. On peut en déduire que les réglages de l'essai 8 font ressortir l'influence d'un paramètre de premier ordre.

II - 2^{ème} optimisation = le ciblage

On va maintenant tenter de s'approcher de notre valeur moyenne objectif de 2700. Pour cela, on doit comme nous venons de le dire modifier un ou plusieurs facteurs, qui influencent fortement la moyenne sans pour autant trop dégrader notre dispersion (ratio S/N). Notre choix s'est porté sur la configuration suivante:

Par rapport à l'essai n°8 qui reste notre référence en termes de performance, nous changeons le paramètre F qui passe à 2 : position du projectile.

Les 2 facteurs « B : élastique » et « F : position du projectile » ont une influence sur la moyenne, mais pas sur la dispersion.

Le facteur « F : position du projectile » nous permet d'augmenter le résultat vers la valeur cible, alors que le facteur « B : élastique » diminue cette distance.

Configuration : **A 2 / B 2 / C 1 / E 1 / F 2 / G 2**

Nous avons effectué 10 tirs pour avoir une dispersion estimée avec un risque de 5%. On obtient en synthèse :

	Prévision	Réels	Objectifs
Moyenne	2550 mm	2460 mm	2700 mm
Écart type	20.5 mm	28.6 mm	34 mm
S/N	41.9 dB	38.7 dB	38 dB

Chaque résultat de test est noté dans le tableau récapitulatif (partie Optimisation N°2). Nous avons maintenant $C_p = 1.19$ et $C_{pk} = -1.61$

Pour rappel, la capabilité permet de s'assurer si la conformité aux spécifications peut être assurée de façon permanente et si non, prendre les mesures correctives nécessaires.

Remarque : C_p n'exige pas la connaissance de la moyenne pour son évaluation. L'indice C_{pk} est introduit afin de prendre en compte le centrage de la population par rapport aux tolérances.

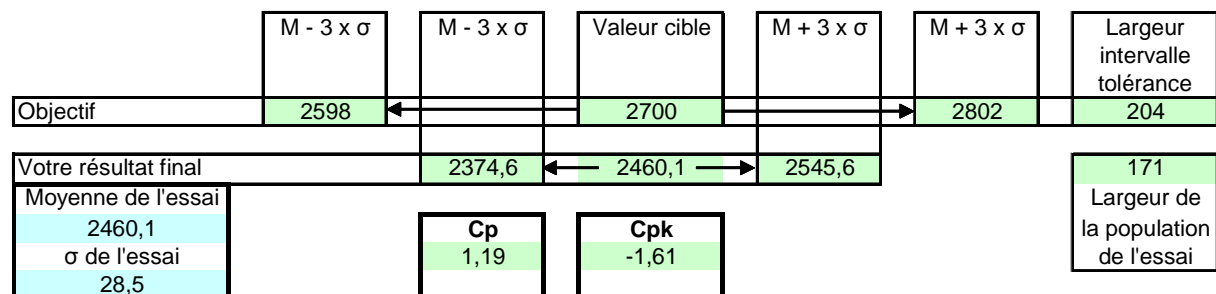


Figure 15 : Capabilité obtenue

Analyse des résultats obtenus par rapport aux prévisions. Ecart ?

Nous n'atteignons pas la prévision en termes de distance. De plus le Cp a baissé. Et le Cpk reste médiocre.

Causes

Le réglage de la position du projectile ne permet pas d'atteindre la cible de 2700mm. Il faut faire intervenir un autre paramètre plus pertinent.

Plan d'actions correctives.

Nous allons jouer sur la variable « accroche avant » qui est une variable continue dans le but de nous rapprocher de la valeur cible, en espérant qu'elle ne soit pas influente sur le ratio signal/bruit.

La valeur d' « accroche avant » à paramétrer sera explicitée dans le paragraphe suivant.

III - 3^{ème} optimisation = par interpolation

Comme nous l'avons vu, le paramètre « accroche avant » est un paramètre que l'on peut régler de façon précise (au millimètre près) et ainsi on peut l'ajuster pour se rapprocher d'un objectif précis en espérant ne pas trop modifier le ratio S/N. A l'aide d'une inter-extrapolation linéaire, on trouve avec ce logiciel que pour un réglage du paramètre « accroche avant » de 81mm, on atteindrait une moyenne égale à la cible, donc de 2700mm.

	Facteur = accroche avant						
	Cible	Niveau 1	Cible	Ecart	Cible	Niveau 2	Cible
Réglage		75	▶	-15	◀	60	
Effet		84	▶	-168	▶	-84	
Distance Optimisation 2		2628	→			2460	
Cible extérieure Niv 1	2700	240	◀				
Réglage	81	21	◀				
Cible entre Niv 1 et Niv 2					◀		
Réglage					◀		
Cible extérieure Niv 2					▶		
Réglage					▶		

Distance Optimisation 2	→		▶				
Cible extérieure Niv 2					▶		
Réglage					▶		
Cible entre Niv 1 et Niv 2			▶				
Réglage			▶				
Cible extérieure Niv 1			◀				
Réglage			◀				

- Saisir dans l'une ou l'autre des 2 cellules selon le niveau du facteur continu dans l'optimisation 2
- Saisir dans l'une des 3 cellules selon la position de la cible (extérieure au niveau 1, entre niveau 1 et niveau 2, extérieur au niveau 2)
- Zone de saisie
- Résultats calculés

Figure 16 : Tableau de calcul par inter-extrapolation

Nous avons effectué 10 tirs pour avoir une dispersion estimée avec un risque de 5%.
On obtient en synthèse :

	Réels	Objectifs
Moyenne	2897 mm	2700 mm
Écart type	48.2 mm	34 mm
S/N	35.6 dB	38dB

Chaque résultat de test est noté dans le tableau récapitulatif (partie Optimisation N°3).

Ce « recentrage » n'est pas celui escompté : nous atteignons une valeur au-delà de la valeur cible. Du coup, la population se déplace vers le haut des spécifications et le Cpk est toujours médiocre.

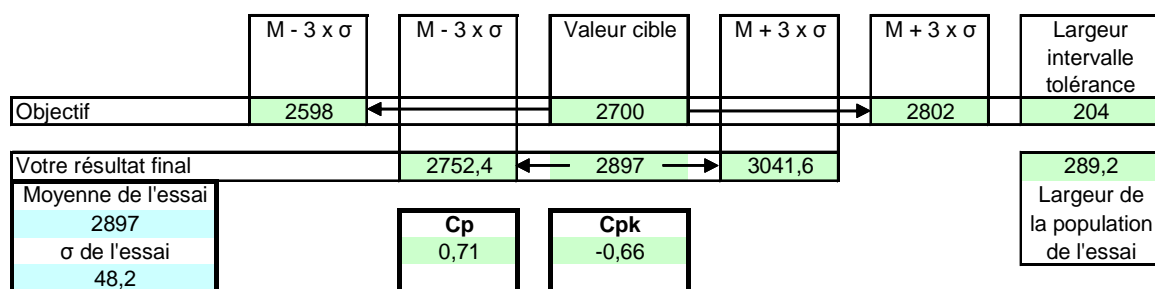


Figure 17 : Capabilité obtenue

Causes probables

Le modèle n'est pas assez bon pour prévoir les résultats en pratique. On peut donc penser que les données qui alimentent le simulateur ne sont pas suffisantes, ou que les interactions que nous lui avons fournies ne sont pas les bonnes ou sont insuffisantes.

Plan d'actions correctives.

Nous allons affiner la valeur d' « accroche avant » pour recentrer la population *par tâtonnements*.

IV - 4^{ème} optimisation

Nous avons affiné manuellement (par tâtonnement) la valeur d' « accroche avant » jusqu'à la valeur de 65.5mm qui nous permet de centrer la population avec une dispersion réduite.

Chaque résultat de test est noté dans le tableau récapitulatif (partie Recherche 2).

Nous avons trouvé au bout de 3 réglages (1 tir par réglage) celui qui nous permet d'atteindre la cible : 70mm, 64mm puis 65.5mm.

Puis nous avons effectué 10 tirs pour avoir une dispersion estimée avec un risque de 5%. On obtient en synthèse :

	Réels	Objectifs
Moyenne	2713 mm	2700 mm
Écart type	21.1 mm	34 mm
S/N	42.2dB	38dB

Chaque résultat de test est noté dans le tableau récapitulatif (partie Optimisation N°4).

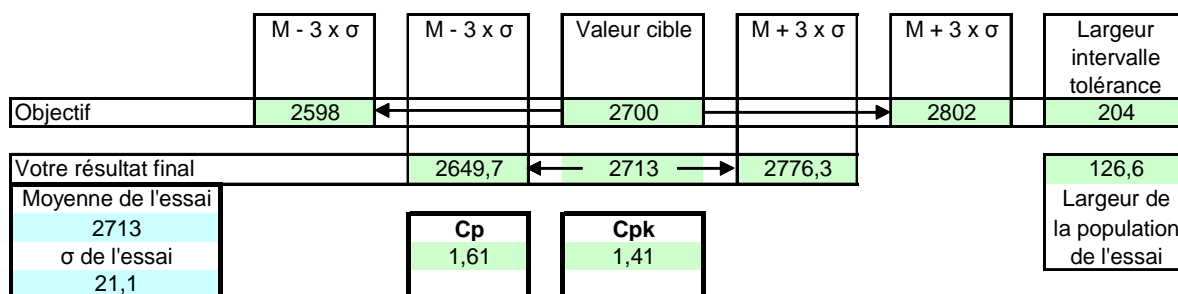


Figure 18 : Capabilité obtenue

Analyse des résultats obtenus par rapport aux espoirs. Ecarts ?

Ce « recentrage » nous permet d'obtenir la capabilité Cp de 1.61 et un Cpk de 1.41, représentant une situation suffisante (supérieure à 1.33) et en rapport avec l'objectif. Nous sommes donc en position de réaliser des productions de jets de sacs de sable permettant d'atteindre la cible, sans réaliser de jets hors de limites requises. La production est sous contrôle et il faut noter la configuration des paramètres choisis dans un standard de travail.

OPTIMISATION PROPOSEE N°1

Référence expérimentation
catapulte groupe 1

04/09/13

Ecart type théorique résultant : 15,23

N°	Facteur contrôlé	Nv	%Contribution SN(dB) & Effet sur la valeur mesurée							
			Distance de tir							
A	Accrochage avant	2	6,57%							
				-83,63						
B	Elastique	1	1,33%							
				195,88						
C	réhausse	1	7,93%							
				26,63						
E	Gachette	1	8,28%							
				131,63						
F	Position du projectile	1	1,80%							
				-261,63						
G	Sac	2	4,79%							
				-13,13						
Ratio SN(dB) théorique résultant			44,01							
SN(dB) moyen			33,680							
Valeur mesurée ou Sensibilité théorique résultante			2418,13							
Coefficient de pondération			1	1	1	1	1	1	1	1

Figure 19 : Optimisation proposée par le logiciel « Kit Tag » pour optimiser la dispersion (validation 1)

OPTIMISATION PROPOSEE N°3

Référence expérimentation
catapulte groupe 1

04/09/13

Ecart type théorique résultant : 20,48

N°	Facteur contrôlé	Nv	%Contribution SN(dB) & Effet sur la valeur mesurée							
			Distance de tir							
A	Accrochage avant	2	6,57%							
				-83,63						
B	Elastique	2	-1,33%							
				-195,88						
C	réhausse	1	7,93%							
				26,63						
E	Gachette	1	8,28%							
				131,63						
F	Position du projectile	2	-1,80%							
				261,63						
G	Sac	2	4,79%							
				-13,13						
Ratio SN(dB) théorique résultant			41,90							
SN(dB) moyen			33,680							
Valeur mesurée ou Sensibilité théorique résultante			2549,63							
Coefficient de pondération			1	1	1	1	1	1	1	1

Figure 20 : Optimisation proposée par le logiciel « Kit Tag » pour le ciblage (validation 2)

Conclusion

Ce TP nous a permis d'appréhender la méthodologie « plan d'expériences » en la mettant en pratique au travers d'un jeu.

La méthodologie mise en œuvre a consisté à successivement :

- Évaluer l'influence des paramètres de la catapulte dans le but de cibler une plage de travail
- Mesurer la dispersion dans ces conditions
- Définir et mettre en place un protocole opératoire rigoureux
- Modéliser le système et construire le plan d'expérience
- Réaliser le plan et évaluer l'influence des différents facteurs (dépouillement)
- Optimiser la dispersion
- Optimiser le ciblage

La méthodologie des plans d'expérience nous a permis d'atteindre nos objectifs et de mettre sous contrôle notre système en seulement 13 essais bien que nous n'ayons que très peu de connaissances préalables du système, ni de modèle le décrivant. Au final, nos objectifs sont atteints et nous avons pu pondérer l'influence des différents facteurs et identifier les principales interactions dans le système. Nous avons ainsi des pistes permettant d'envisager de futures améliorations.

	Accrochage ar	Gchette	Elastique	Sac	Position projec	Réhausse	Butée avant	1er bilan	2ème bilan	3ème bilan	4ème bilan
0,77777778											
Accrochage avant	X	X	?2	0	0	?1	X	3	2	1	
Accrochage arrière		X	0	0	0	0	X	3	2	0	
Gchette			0	?1	?2	0	X	3	2	1	
Elastique				0	X	0	X	2	1	1	
Sac					0	0	0	0	0	0	
Position projectile						0	0	1	1	1	
Réhausse							X	1	0	0	
Butée avant								5	0	0	
								9	4	2	0

X = Interaction

La matrice des interactions a été complétée à postériori avec les tendances observées suite aux essais et au traitement informatique (points d'interrogation) : la logique voudrait que nous refassions un plan d'expérience en intégrant ces interactions que nous avons négligées jusqu'alors.

On pourrait imaginer bloquer plus que 2 facteurs dans ce nouveau plan d'expérience, mais on ne peut pas car il faut rester dans le ratio de 20% de facteurs expliquant 80% des interactions supposées.

Ce plan présentant un plus grand nombre d'interactions prises en compte, le nombre d'essais à mener s'en trouve accru.

Il faudrait utiliser alors non pas une matrice Taguchi L8 mais une matrice L16.

Les 3 points majeurs que nous retenons de la méthode sont :

- Une rapidité d'obtention d'un résultat fiable et reproductible à partir d'un nombre d'essai limité.
- L'obtention de résultats indépendamment de l'existence d'un modèle valide.
- Au-delà des résultats obtenus, la méthode des plans d'expérience permet de pondérer l'influence des paramètres opératoires et d'identifier de potentielles interactions.