

NOM et Prénom 1
NOM et Prénom 2
NOM et Prénom 3
NOM et Prénom 4
NOM et Prénom 5

Logo école

**FORMATION AUX PLANS
D'EXPERIENCES
Expérimentation avec la catapulte**

Nom école
Groupe, Filière, ...

Mars 2013

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 Opératoires</i>	5
PARTIE B : ÉLABORATION DU PLAN D'EXPERIENCES.....	7
I - INTERACTIONS ENTRE LES DIFFERENTS PARAMETRES.....	7
II - DETERMINATION DE LA MATRICE D'EXPERIMENTATION	9
III - POSITIONNEMENT DES FACTEURS DANS LA MATRICE.....	9
PARTIE C : LES ESSAIS ET LE DEPOUILLEMENT	10
I - LES ESSAIS DU PLAN ET RESULTATS.....	10
II - DEPOUILLEMENT	10
PARTIE D : LES OPTIMISATIONS	14
I - 1 ^{ERE} OPTIMISATION = LA RECHERCHE DE LA DISPERSION MINIMALE.....	14
II - 2 ^{EME} OPTIMISATION = LE CIBLAGE.....	14
III - 3 ^{EME} OPTIMISATION = PAR INTERPOLATION.....	15
IV - 4 ^{EME} OPTIMISATION = UTILISATION D'UN FACTEUR EXTERNE.....	17
CONCLUSION	19

Partie A : Préliminaires

Etape	Durée	Heure
		10:00
		10:20
Présentation du TP (catapulte, documents, logiciel)	20	10:20
Découverte de la catapulte	10	10:30
Essais pour atteindre la cible	15	10:45
Mesure de la dispersion	15	11:00
Reproductibilité mesure (Mode Opérateur)	20	11:20
Reproductibilité de tir (Mode Opérateur)	20	11:40
Mesure du gain sur la dispersion	15	11:55
Choix des facteurs selon interactions	20	12:15
Ordre des facteurs	10	12:25
Choix de la matrice	5	12:30
Saisie du plan	15	12:45
Essais	100	14:25
Pause repas	60	15:25
Saisie résultats	10	15:35
Dépouillement ==> optimum (validation 1)	15	15:50
Essai validation de l'optimum	10	16:00
Dépouillement ==> cible (validation 2)	15	16:15
Essai validation de la cible	10	16:25
Dépouillement ==> interpolation (validation 3)	15	16:40
Essai validation de l'interpolation	10	16:50
Dépouillement ==> facteur hors plan (validation 4)	15	17:05
Essai validation de l'interpolation	10	17:15
Synthèse rédaction CR	45	18:00
	420	

Heure à modifier

Zone de saisie

Heures calculées

Tableau 1 : Planning du TP (tableau excel → accès par double-clic)

I - Définition de la cible à atteindre et objectif

L'objectif de ce TD est d'optimiser l'envoi d'un projectile à une distance et un écart-type donné ce qui donne un ratio S/N (signal sur bruit) de 38 dB. Le ratio S/N est un indicateur de dispersion, plus il est élevé plus la dispersion est faible.

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

Il est à noter que la distance voir objectif ci-dessus est une moyenne, les distances atteintes lors des différents essais s'étageront autour de cet objectif.

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 valeurs de tension) ainsi que de 4 sacs de sable de diverses masses (15g, 20g, 25g, 30g).

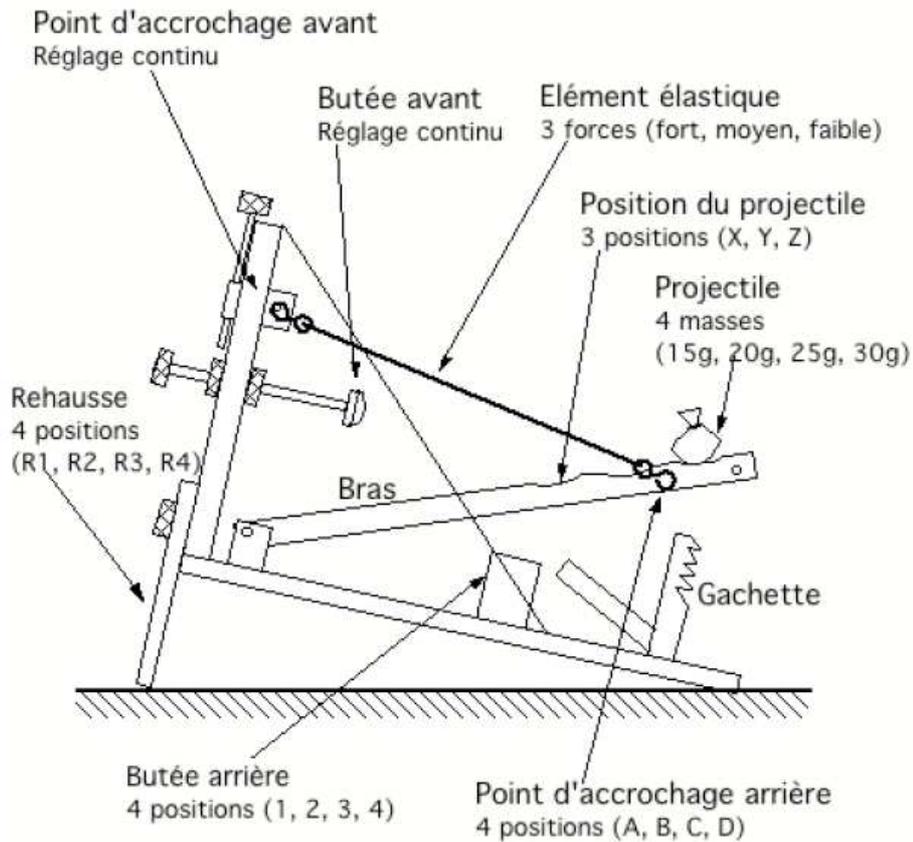


Figure 2 : Schéma de la catapulte

III - Définition des variables

Les différents paramètres possèdent entre 3 et 4 positions de réglages. Ces paramètres ne correspondant à aucune valeur prédéfinie, il est préférable et même indispensable de construire un croquis établissant les positions des différents paramètres. Ainsi cela simplifie la lecture des variables à modifier lors des essais d'optimisation et permet surtout une compréhension rapide des paramètres modifiés. Ainsi le schéma ci-dessus a été établi dans cette fin.

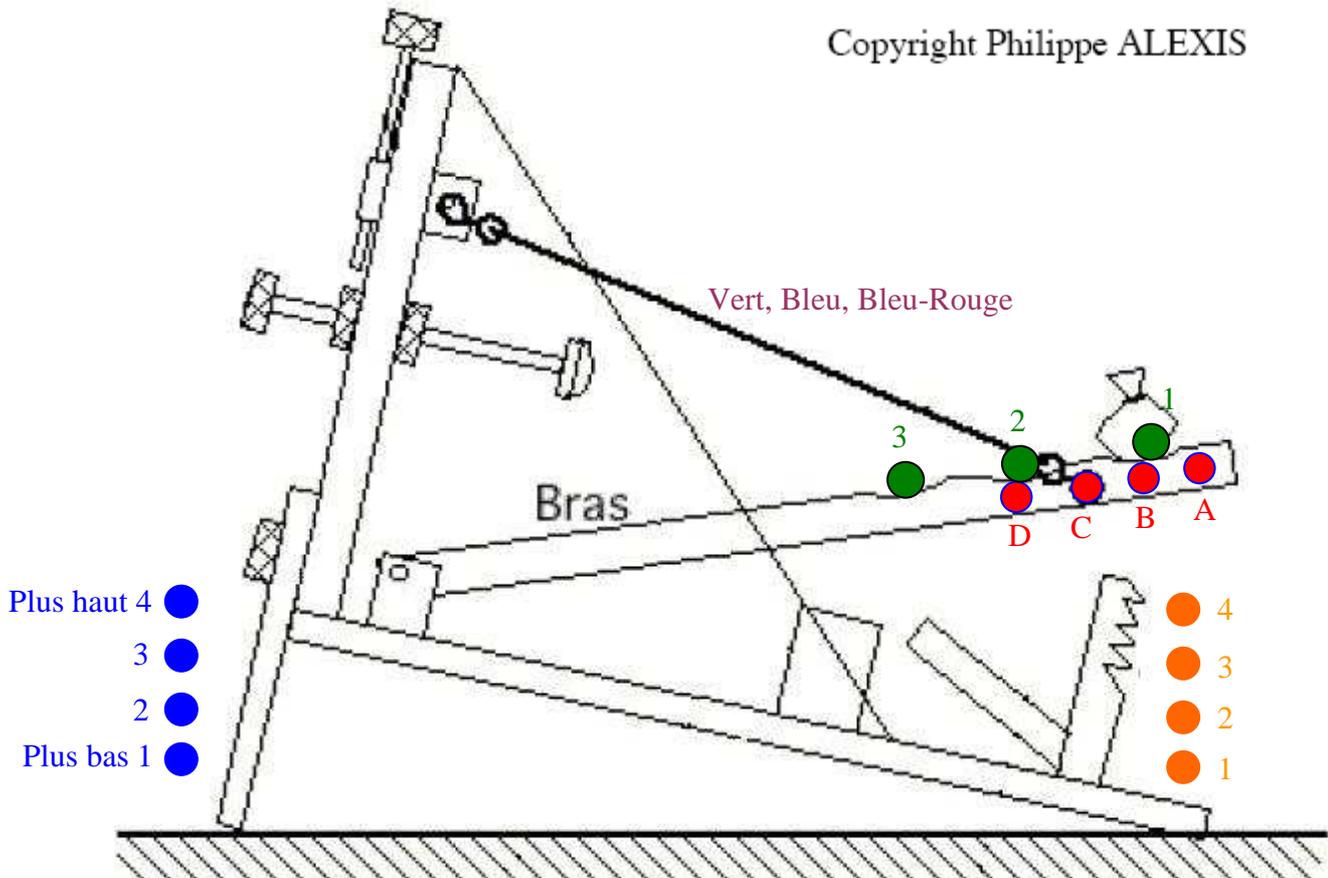


Figure 3 : Schéma des variables utilisées

IV - Atteinte de la cible par tâtonnement

Dans cette phase préliminaire, nous avons effectué un certain nombre de tests pour atteindre notre cible objectif à ± 100 mm.

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

Chaque résultat de test est noté dans le tableau récapitulatif (partie recherche). Une fois un test approchant la cible à ± 100 mm, on note les réglages de chaque paramètre de la machine qui sont les suivants :

Point d'accroche arrière	x
Point d'accroche avant	xx mm
Position gâchette	x
Élastique	Couleur
Position projectile	x
Poids sac	xx g
Réhausse	x
Butée avant	xx mm

2 - Estimation de la dispersion initiale résultante :

Nous avons effectué **A compléter** tirs pour **A compléter** On obtient en synthèse :

	Réglages empiriques	Objectifs
Moyenne	xxxx mm	xxxxx mm
Écart type	xx mm	xx mm
S/N	xxx dB	38 dB

Ceci représente la précision que l'on a obtenue avec un réglage par tâtonnement.

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

Analyse des résultats obtenus par rapport aux objectifs.

A compléter

Causes possibles.

A compléter

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

A compléter

3 - Définition et mise en place Modes Opérateurs

Mode opératoire de mesure à compléter

Penser à définir :

- Le point de départ de la mesure
- Le point d'arrivée de la mesure
- La façon d'utiliser le mètre entre ces 2 points

... mais aussi :

- Des solutions conservatoires si le sac ne tombe pas dans le sable
- Comment positionner le sable après chaque dérèglement de la catapulte
- Que le tireur est le seul habilité à dire avant mesure que le tir n'est pas à mesurer s'il s'est produit un événement extraordinaire

Mode opératoire de tir à compléter

Penser à définir :

- Le calage et immobilisation catapulte sens x = direction de tir
- Le calage et immobilisation catapulte sens y = perpendiculaire à la direction de tir
- Le calage et immobilisation catapulte sens z = verticale

... mais aussi :

- Le positionnement du sac sens x
- Le positionnement du sac sens y
- Le positionnement du sac sens z
- Le positionnement du sac en forme / trou de positionnement
- Le lâcher de gâchette

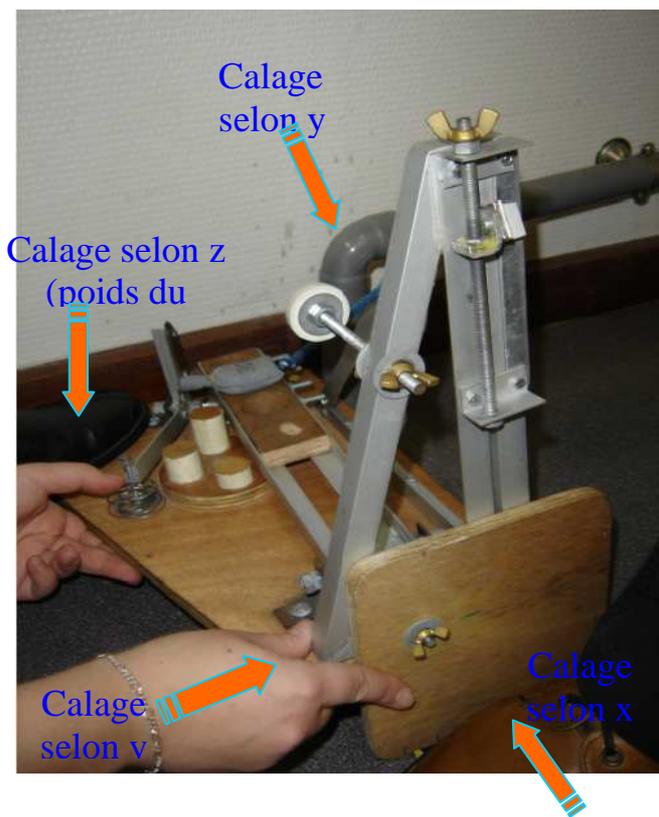
Figure 4-1 : Calage de la catapulte

Figure 4-2 : Position du sac



La mesure ...

Figure 4-3 : Position du sable



Les réglages des paramètres de la machine sont les mêmes que précédemment.

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

On obtient en synthèse :

	Réglages empiriques sans MO	Réglages empiriques avec MO	Objectifs
Moyenne	xxxx mm	xxxx mm	xxxx mm
Écart type	xx mm	xx mm	xx mm
S/N	xxx dB	xxx 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 ?

A compléter

Causes possibles.

A compléter

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

A compléter

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. Il faut donc identifier ces interactions. On remplit la table ci-dessous pour 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 **A compléter ...** (en rouge sur la matrice) pour éliminer le maximum d'interactions → ceci nous permet d'espérer avoir ultérieurement un modèle prédictif non « pollué ».

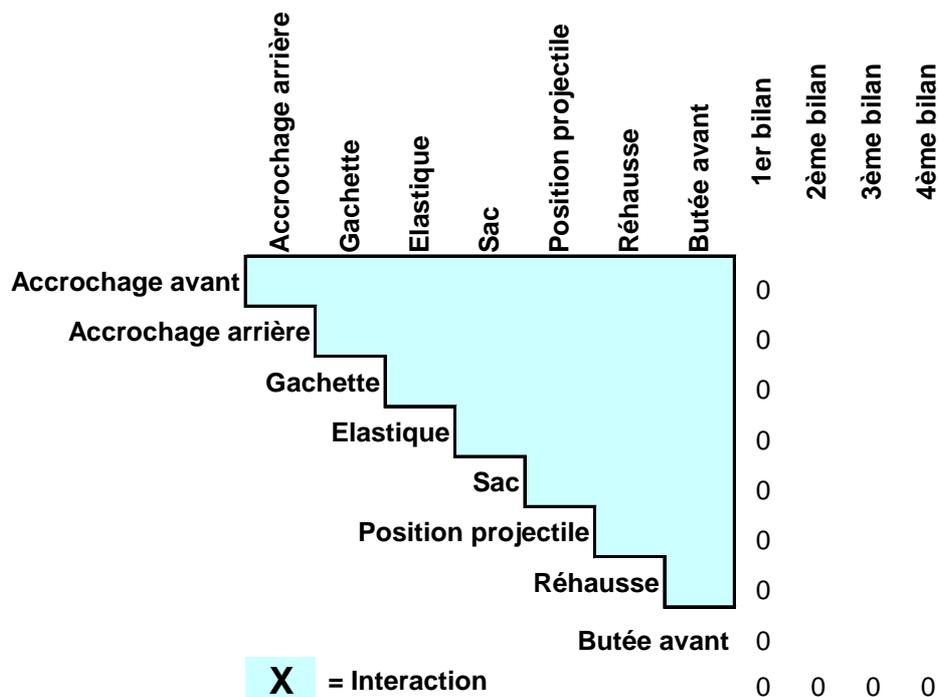


Figure 5 : Graphique des interactions (tableau excel → accès par double-clic)

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. On fait 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 par rapport aux paramètres que l'on avait choisi 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.

Facteur	Unité	Niveau 2 Distance -	Niveau 1 (dispersion)	Niveau 2 Distance +	Difficulté réglage	Colonne matrice
Accrochage arrière	Cran N°					
Accrochage avant	mm					
Gachette	Cran N°					
Elastique	Couleur					
Position projectile	Trou N°					
Sac	g					
Réhausse	Position N°					
Butée avant	mm					

Colonne X
éliminée

Méthodologie de choix de la matrice :

- ▶ 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

On a donc **A compléter ...** paramètres qui varient puisqu'on en a fixé **A compléter ...**. On cherche donc une matrice d'expérimentation qui prend en compte **A compléter ...** paramètres à deux niveaux. On trouve ainsi la matrice d'expérimentation L **A compléter ...** prenant en compte **A compléter ...** facteurs à **A compléter ...** niveaux :

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

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

Chgmt niv

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

Cependant on n'a que **A compléter ...** paramètres, il faut donc éliminer **A compléter ...** colonnes. On choisit d'enlever les colonnes qui font varier le plus souvent le niveau d'un paramètre, c'est-à-dire, dans cette matrice, les colonnes **A compléter ...** (**A compléter ...** changements de niveau). On se retrouve donc avec une matrice à **A compléter ...** colonnes.

A copier du logiciel

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. On veut 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 :

A compléter ...	→ colonne A	(1 changement de niveaux)
A compléter ...	→ colonne C	(2 changements de niveaux)
A compléter ...	→ colonne B	(3 changements de niveaux)
A compléter ...	→ colonne F	(4 changements de niveaux)
A compléter ...	→ colonne G	(5 changements de niveaux)
A compléter ...	→ colonne E	(6 changements de niveaux)
A compléter ...	→ 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.

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.

A compléter ...

Objectif du plan

A compléter ...

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 sur la catapulte pour chaque essai.

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

A copier du logiciel

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 :

A copier du logiciel

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.

A compléter ...

Causes possibles.

A compléter ...

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

Un 1^{er} tableau sur l'analyse de la variance nous informe sur la significativité de nos résultats. On peut ainsi dire que l'on peut expliquer *A compléter ...* % des résultats obtenus par les facteurs (et les éventuelles interactions choisies).

Mais *A compléter ...* % restent inexpliqués par le modèle (résidu). Ces incertitudes peuvent être expliquées par différents éléments : *A compléter ...*

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

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

On observe que les facteurs **A compléter ...** influencent fortement la valeur de la moyenne ; il s'agit de **A compléter ...** . Indépendamment les facteurs **A compléter ...** influencent fortement la valeur du ratio S/N.

Vérification de la réalité physique du modèle :

- Pour chaque facteur vérifier que l'effet « calculé » 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		Inter 1	Inter 2	Inter 3
			Prévu	Modèle			
1	A		▼	▲			
2	B						
3	C						
4	D						
5	E						
6	F						
7	G						

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

A copier du logiciel

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

Partie D : Les optimisations

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

On va rechercher la 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 compléter ...**

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

	Prévision	Réels	Objectifs
Moyenne	xxxx mm	xxxx mm	xxxx mm
Écart type	xx mm	xx mm	xx mm
S/N	xxx dB	xxx dB	xxx dB

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

Analyse des résultats obtenus par rapport aux prévisions. Ecarts ?

A compléter ...

Causes → Cela pourrait sous entendre que soit nos tirs ne sont pas reproductibles, soit nous avons omis une interaction. Conclusion ??? quant à la validité du modèle **A compléter ...**

Plan d'actions correctives.

A compléter ...

II - 2^{ème} optimisation = le ciblage

On va maintenant tenter de s'approcher de notre valeur moyenne objectif de **A compléter ...**

. Pour cela, on doit 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 : **A compléter ...**

La configuration proposée serait : **A compléter ...**

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

	Prévision	Réels	Objectifs
Moyenne	xxxx mm	xxxx mm	xxxx mm
Écart type	xx mm	xx mm	xx mm
S/N	xxx dB	xxx dB	xxx dB

Chaque résultat de test est noté dans le tableau récapitulatif (partie Optimisation N°2).

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

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

	M - 3 x σ	M - 3 x σ	Valeur cible	M + 3 x σ	M + 3 x σ	Largeur intervalle tolérance
Objectif	2598		2700		2802	204
Votre résultat final		2670	2730	2790		120
Moyenne de l'essai	2730		Cp		Cpk	
σ de l'essai	20		1,70		1,20	
					Largeur de la population de l'essai	

Figure 15 : Capacité obtenue (tableau excel → accès par double-clic)

Analyse des résultats obtenus par rapport aux prévisions. Ecart ?

A compléter ...

Causes

A compléter ...

Influence interaction ?

Plan d'actions correctives.

A compléter ...

Si nécessaire : validation 2 bis

III - 3^{ème} optimisation = par interpolation

On recherche un facteur dont le réglage est continu (*A compléter ...*) et on ne touchera plus aux autres facteurs. En effet, il s'agit d'un paramètre que l'on peut régler de façon précise (au millimètre près) et ainsi que l'on peut ajuster pour se rapprocher d'un objectif précis en espérant ne pas trop toucher au ratio S/N. A l'aide d'une inter-extrapolation linéaire, on trouve pour un réglage de *A compléter ...* pour une moyenne objectif de *A compléter ...* mm,

Le logiciel ne peut établir de prévisions car nous n'avons définis que 2 niveaux par facteurs. Par 2 points il peut passer un infinité de courbes ... nous avons choisi une droite ...

Facteur = accrochage avant								
	Cible	Niveau 1	Cible	Ecart	Cible	Niveau 2	Cible	
Réglage		80	▶	10	◀	90		
Effet		-96	▶	192	▶	96		
Distance Optimisation 2		2301	→				2493	
Cible extérieure Niv 1			◀					
Réglage			◀					
Cible entre Niv 1 et Niv 2					◀			
Réglage					◀			
Cible extérieure Niv 2						49	2542	
Réglage						3	93	

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 (tableau excel → accès par double-clic)

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

	Réels	Objectifs
Moyenne	xxxx mm	xxxx mm
Écart type	xx mm	xx mm
S/N	xxx dB	xxx dB

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

Ce « recentrage » nous permettrait d'obtenir la capabilité : capabilité intrinsèque Cp, était de **A compléter ...** et le Cpk était de **A compléter ...**, représentant une situation suffisante ? **A compléter**

	M - 3 x σ	M - 3 x σ	Valeur cible	M + 3 x σ	M + 3 x σ	Largeur intervalle tolérance
Objectif	2598		2700		2802	204
Votre résultat final		2670	2730	2790		120
Moyenne de l'essai	2730		Cp		1,70	
σ de l'essai	20		Cpk		1,20	
					Largeur de la population de l'essai	

Figure 17 : Capabilité obtenue (tableau excel → accès par double-clic)

Analyse des résultats obtenus par rapport aux espoirs. Ecart ?

A compléter ...

Causes probables

A compléter ...

Plan d'actions correctives.

A compléter ...

IV - 4^{ème} optimisation = utilisation d'un facteur externe

On recherche un facteur qui n'a pas été utilisé dans le plan (écarté pour ne pas créer d'interaction), dont le réglage est continu (A compléter ...) et dont la faible variation devrait permettre de se rapprocher d'un objectif de distance précis en espérant ne pas trop toucher au ratio S/N ; on ne touchera plus aux autres facteurs. Le réglage de ce facteur se fait par tâtonnement.

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

Nous avons trouvé au bout de A compléter ... réglages (1 tir par réglage) celui qui nous permet d'atteindre la cible.

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

	Réels	Objectifs
Moyenne	xxxx mm	xxxx mm
Écart type	xx mm	xx mm
S/N	xxx dB	xxx dB

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

Ce « recentrage » nous permettrait d'obtenir la capabilité : capabilité intrinsèque Cp, était de A compléter ... et le Cpk était de A compléter ..., représentant une situation suffisante ? A compléter

	M - 3 x σ	M - 3 x σ	Valeur cible	M + 3 x σ	M + 3 x σ	Largeur intervalle tolérance
Objectif	2598		2700		2802	204
Votre résultat final		2670	2730	2790		120
Moyenne de l'essai	2730					Largeur de la population de l'essai
σ de l'essai	20					
	Cp 1,70		Cpk 1,20			

Figure 18 : Capabilité obtenue (tableau excel → accès par double-clic)

Analyse des résultats obtenus par rapport aux espoirs. Ecart ?

A compléter ...

A copier du logiciel

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

A copier du logiciel

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

Conclusion

A compléter ...