

**MARIE Vincent**  
**ROUX-RIMET Mathieu**  
**VARELA Julien**  
**VERNAY Alexandre**



**FORMATION AUX PLANS  
D'EXPERIENCES**  
**Expérimentation avec un avion en  
papier**

*Note 13/20*

*Bon CR mais vous pouvez encore plus soigner votre rédaction (voir mes corrections en bleu dans votre texte : unités et précision de la rédaction)*

# Sommaire

<b>SOMMAIRE.....</b>	<b>1</b>
<b>PARTIE A : PRELIMINAIRES.....</b>	<b>2</b>
I - DEFINITION DE LA CIBLE A ATTEINDRE ET OBJECTIF.....	2
II - PLIAGE ET DEFINITION DES VARIABLES.....	3
III - PREMIERS TESTS DE PLIAGE ET DE LANCER.....	5
1 - <i>Description sommaire des facteurs</i> :.....	5
2 - <i>Estimation de la dispersion initiale résultante</i> :.....	5
3 - <i>Définition et mise en place Modes Opératoires</i> .....	6
<b>PARTIE B : ÉLABORATION DU PLAN D'EXPERIENCES.....</b>	<b>10</b>
I - INTERACTIONS ENTRE LES DIFFERENTS PARAMETRES.....	10
II - DETERMINATION DE LA MATRICE D'EXPERIMENTATION.....	12
III - POSITIONNEMENT DES FACTEURS DANS LA MATRICE.....	12
<b>PARTIE C : LES ESSAIS ET LE DEPOUILLEMENT.....</b>	<b>13</b>
I - LES ESSAIS DU PLAN ET RESULTATS.....	13
II - DEPOUILLEMENT.....	14
<b>PARTIE D : LES OPTIMISATIONS.....</b>	<b>17</b>
I - 1 <sup>ERE</sup> OPTIMISATION = LA RECHERCHE DE LA DISPERSION MINIMALE.....	17
II - 2 <sup>EME</sup> OPTIMISATION = LA MAXIMISATION DE LA DISTANCE.....	18
III - 3 <sup>EME</sup> OPTIMISATION = PAR INTERPOLATION.....	19
<b>CONCLUSION.....</b>	<b>23</b>

## Partie A : Préliminaires

N°	Etape	Durée	Heure
			9:30
0	Présentation du TP (avion, documents, logiciel)	20	9:50
1	Premier pliage et premiers lancers	20	10:10
2	Mesure de la dispersion	15	10:25
3	Reproductibilité mesure (Mode Opérateur)	20	10:45
	Reproductibilité de lancer (Mode Opérateur)	20	11:05
4	Mesure du gain sur la dispersion	15	11:20
5	Choix des facteurs selon interactions	20	11:40
6	Choix de la matrice	5	11:45
7	Définition des niveaux des facteurs	10	11:55
8	Saisie du plan	15	12:10
9	Essais	100	13:50
	<b>Pause repas</b>	<b>60</b>	<b>14:50</b>
10	Saisie résultats	10	15:00
11	Dépouillement ==> optimum (validation 1)	15	15:15
12	Essai validation de l'optimum	10	15:25
13	Dépouillement ==> cible (validation 2)	15	15:40
14	Essai validation de la cible	10	15:50
15	Dépouillement ==> interpolation (validation 3)	15	16:05
16	Essai validation de l'interpolation	10	16:15
17	Synthèse rédaction CR	45	17:00
		390	

Heure à modifier ←

Zone de saisie  
Heures calculées

**Tableau 1 : Planning du TP**

Etape 0 - Présentation des documents à utiliser :

- Word : « Règle du jeu catapulte avion »,
- Word : le présent CR,
- Excel : « Objectif, planning et calculs »,
- Pdf : « Cours complet » → en page 26 les matrices et en page 12 les ratios S/N
- Excel : le logiciel Kit-Tag à installer.

### I - Définition de la cible à atteindre et objectif

L'objectif de ce TD est d'optimiser l'envoi d'un avion à la plus grande distance possible ou à une distance donnée (2300 mm) avec une dispersion donnée ( $S/N = 23,7$  dB).

Rappel : le ratio S/N est un indicateur de dispersion, plus il est élevé plus la dispersion est faible.

## II - Pliage et définition des variables

Pour cela, nous disposons d'un Mode Opératoire de pliage.

Etape 1 - Il s'agit de faire le tour des différents facteurs, de bien identifier les différents niveaux de chacun d'eux et de comprendre leur influence sur la distance du vol.

Etape 1 : Plier la feuille en 2 dans le sens de la longueur puis faire un rabat

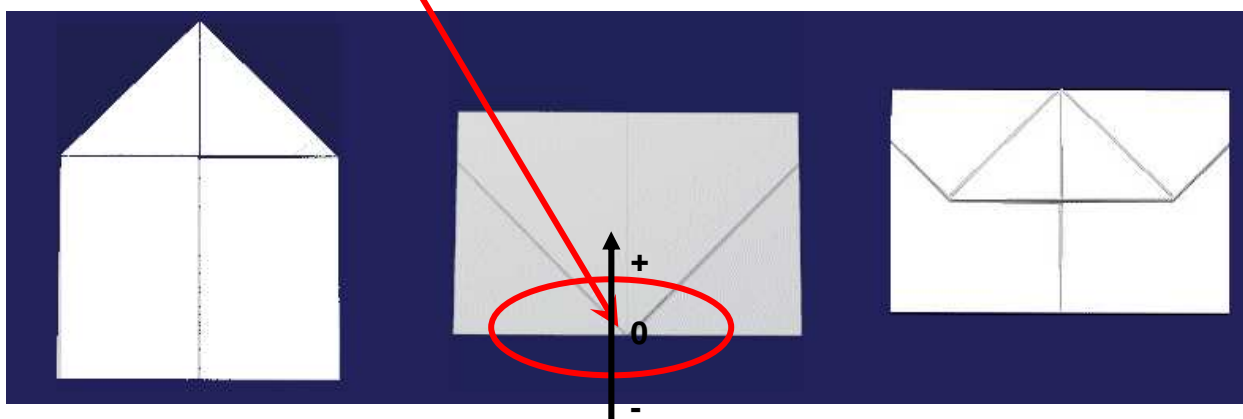


Etape 2 : Retourner la feuille puis faire le 2ème rabat



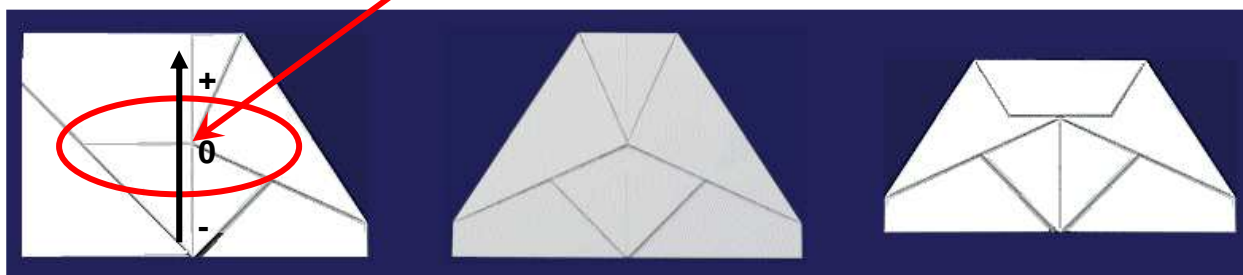
Etape 3 : Ouvrir le pliage longitudinal et faire les 2 pliages en accordéon

1<sup>er</sup> facteur : Affleurement du pliage (valeur initiale : 0 ; niveaux suggérés : +20 mm, +40 mm)



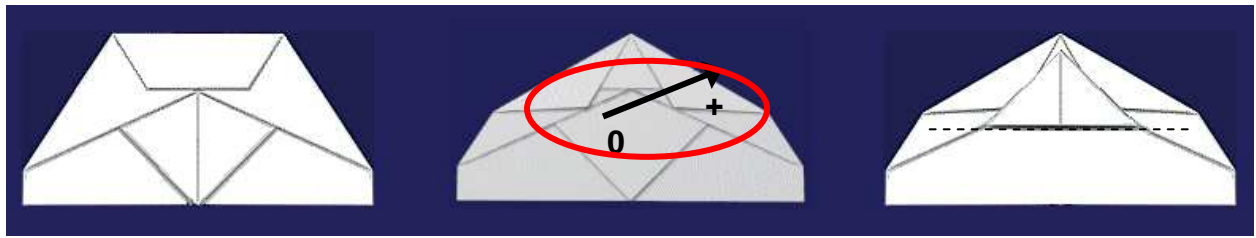
Etape 4 : Faire les 3 pliages comme suit

2<sup>ème</sup> facteur : Point de visée du pliage (valeur initiale : 0 ; niveaux suggérés : -10 mm, +10 mm)

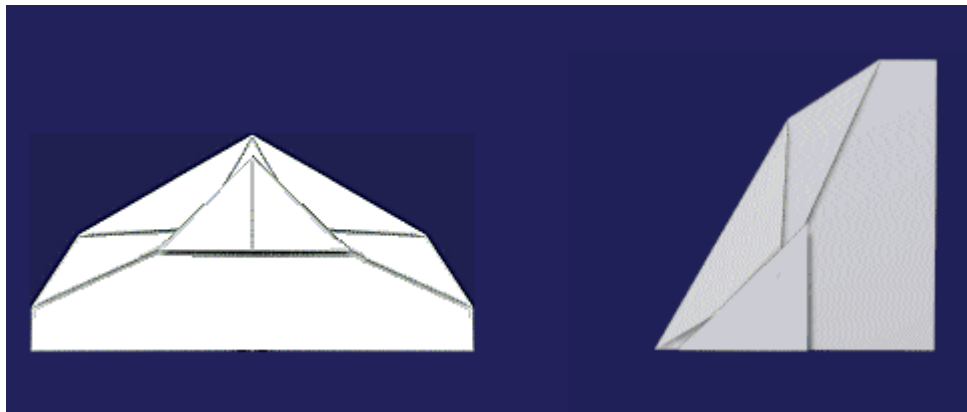


Etape 5 : Faire les 3 pliages comme suit

3<sup>ème</sup> facteur : point d'arrivée du rabat (valeur initiale : 0 ; niveaux suggérés : -10 mm, +10 mm)

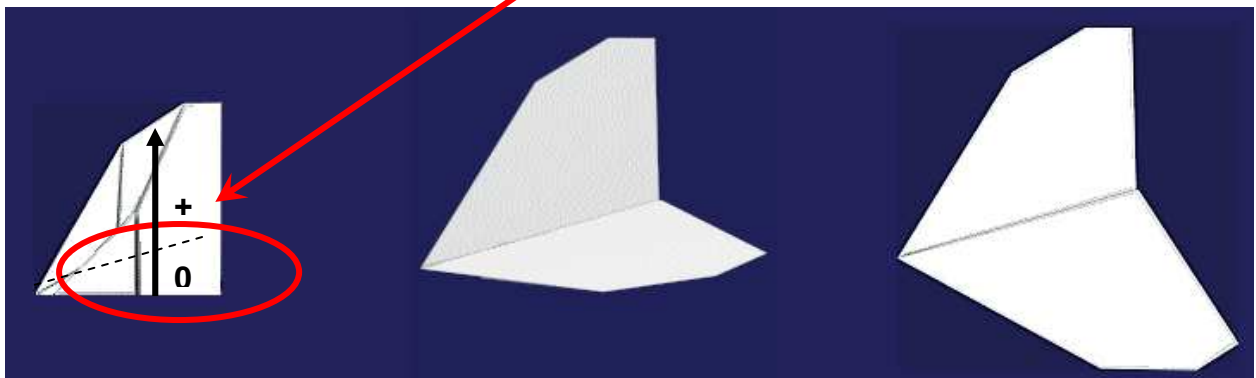


Etape 6 : Plier le planeur en 2 selon l'axe de symétrie

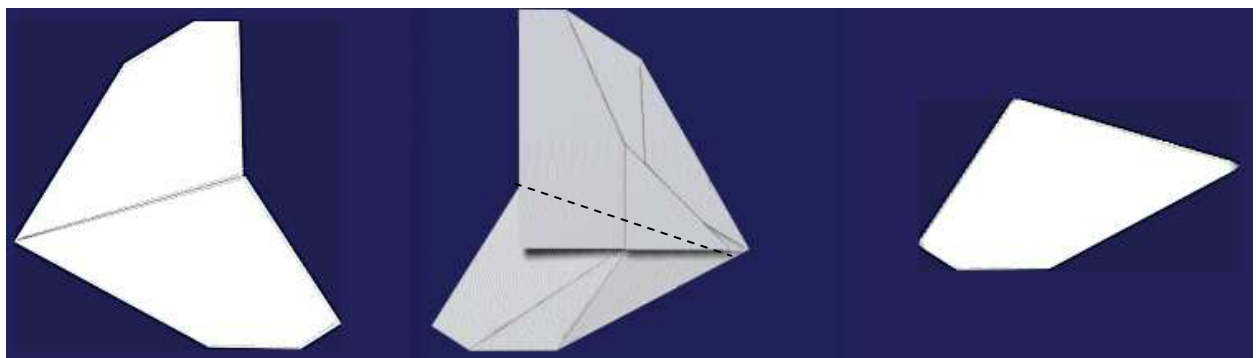


Etape 7 : Plier la 1<sup>ère</sup> aile

4<sup>ème</sup> facteur : Hauteur du pliage au niveau de l'arrière (valeur initiale : 30 mm ; niveaux suggérés : 20 mm, 10 mm)



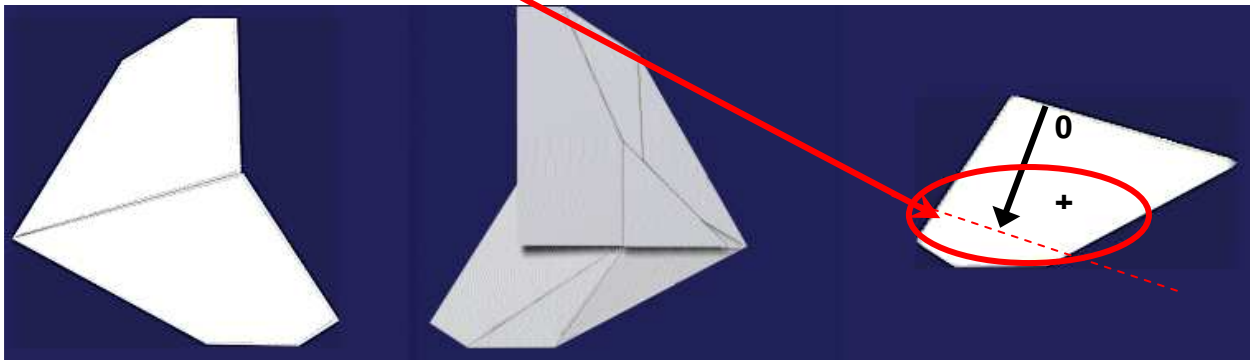
Etape 8 : Retourner le planeur et plier la 2<sup>ème</sup> aile de façon symétrique



Etape 9 : Ouvrir les 2 ailes

Etape 10 : Créer des winglets : replier parallèlement au corps l'extrémité de l'aile (même coté sur les 2 ailes)

5<sup>ème</sup> facteur : Largeur de l'aile au pliage du winglet (valeur initiale : 50 mm ; niveaux suggérés : 60 mm, 70



<http://www.origami-kids.com/avionsenpapier-2-theflyfr.php>

### III - Premiers tests de pliage et de lancer

Dans cette phase préliminaire, nous avons effectué une définition précise des facteurs et de la valeur du niveau nominal (suivre le pliage original ci-dessus).

#### 1 - Description sommaire des facteurs :

On note les réglages de chaque paramètre de l'avion qui sont les suivants :

Affleurement du pliage (ét. 3)	0 mm
Point de visée du pliage (et. 4)	0 mm
Point d'arrivée du rabat (et. 5)	0 mm
Hauteur du pliage au niveau de l'arrière (et. 7)	30 mm
Hauteur du pliage du winglet (et. 10)	50 mm

#### 2 - Estimation de la dispersion initiale résultante :

Etape 2 - On effectue une série de 12 lancers et on mesure avec soin les résultats que l'on note dans le dossier Excel « Objectif, planning et calculs » dans l'onglet « Calcul » dans la colonne « Dispersion ». Le nombre n de tirs doit être le même dans tout le plan (n=10 par exemple).

Nous avons effectué 12 lancers pour avoir une estimation de la dispersion avec un risque de 5 %. On obtient en synthèse :

	Sans Mode Opérateur
Moyenne	1800 mm
Écart type	183.4 mm
S/N	19.8 dB

Ceci représente la précision que l'on a obtenue avec les réglages initiaux.

### ***Analyse des résultats obtenus par rapport aux objectifs.***

Les résultats obtenus sont inférieurs aux objectifs définis (3500mm). La moyenne est inférieure de 1700 mm aux attentes. Le rapport Signal / Bruit est trop faible (<23.7 **dB**) il faut donc améliorer le mode opératoire.

### ***Causes possibles.***

Mode de lancer non approprié et non homogène.

Mauvaise mesure.

Dégradation de l'avion au fur et à mesure des essais.

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

Amélioration des conditions du lanceur :

- immobiliser la chaise avec un poids ou autre
- Coude à l'avant de façon que le dossier fasse une butée lors le bras est vertical.
- Poignet rigide
- Tenir l'avion par le centre de gravité
- Lancer à l'horizontale
- Contrôle de la validité du lancé

Amélioration des conditions de mesure :

- Mieux définir le point de départ de la mesure
- Mesurer le point d'impact au plus court.
- Mettre un marqueur de chute (sable ou encre sur avion) afin de déterminer plus précisément le point d'impact.

Définition et mise en place Modes Opératoires

Etape 4 – On doit mettre au point un protocole de mesures que vous conserverez durant tout le déroulement du plan, et qui permettra de réduire au maximum la dispersion de mesure.

- Le point de départ de la mesure est le centre bas de la chaise.
- Le point d'arrivée de la mesure est la trace d'impact le plus proche de la chaise.
- La façon d'utiliser le mètre entre ces 2 points : type lancer de javelot / lancer du poids. Référence sur le bas de la chaise à l'aplomb du lâché de l'avion.
- Si l'avion n'atterrit pas dans le sable, l'essai n'est pas pris en compte
- On saupoudre la zone impactée après chaque nouvel avion après chaque nouveau tir.
- Le lanceur ainsi que le contrôleur du lancé valide si le tir c'est bien passé.

Etape 4 – On doit mettre au point un protocole de lancer, que vous conserverez durant tout le déroulement du plan, et qui permettra de réduire au maximum la dispersion afin d'augmenter la reproductibilité des lancers.

- Le point de départ de l'avion (axe x = horizontal) : Le lancer s'effectue dans le sens du couloir à l'opposé du sens de la chaise.
- Le point de départ de l'avion (axe z = verticale) est à 900mm du sol (voir photo), correspondant à la hauteur de l'avion lorsque le bras est vertical (moment du lâché)
- L'angle de l'avion avec l'horizontale est nul. Il est contrôlé par le contrôleur de lancé.
- Le point de prise de l'avion est son centre de gravité, sur la partie inférieure de l'avion.

- Le débattement du bras du lanceur sens  $x = 180\text{mm}$  avec départ contact de l'avion sur l'épaule et butée avant sur le dossier de la chaise.
- La vitesse du bras du lanceur est de  $72\text{cm/s}$  ( $1/4\text{s}$  pour  $180\text{mm}$ )

**Figure 4-1 : Position de lancer**



Avion:  
- Tenue par  
centre de gravité  
- Contact épaule

Coude:  
- En contact  
- En avant

Chaise:  
- Immobilisée  
- Alignée suivant une ligne



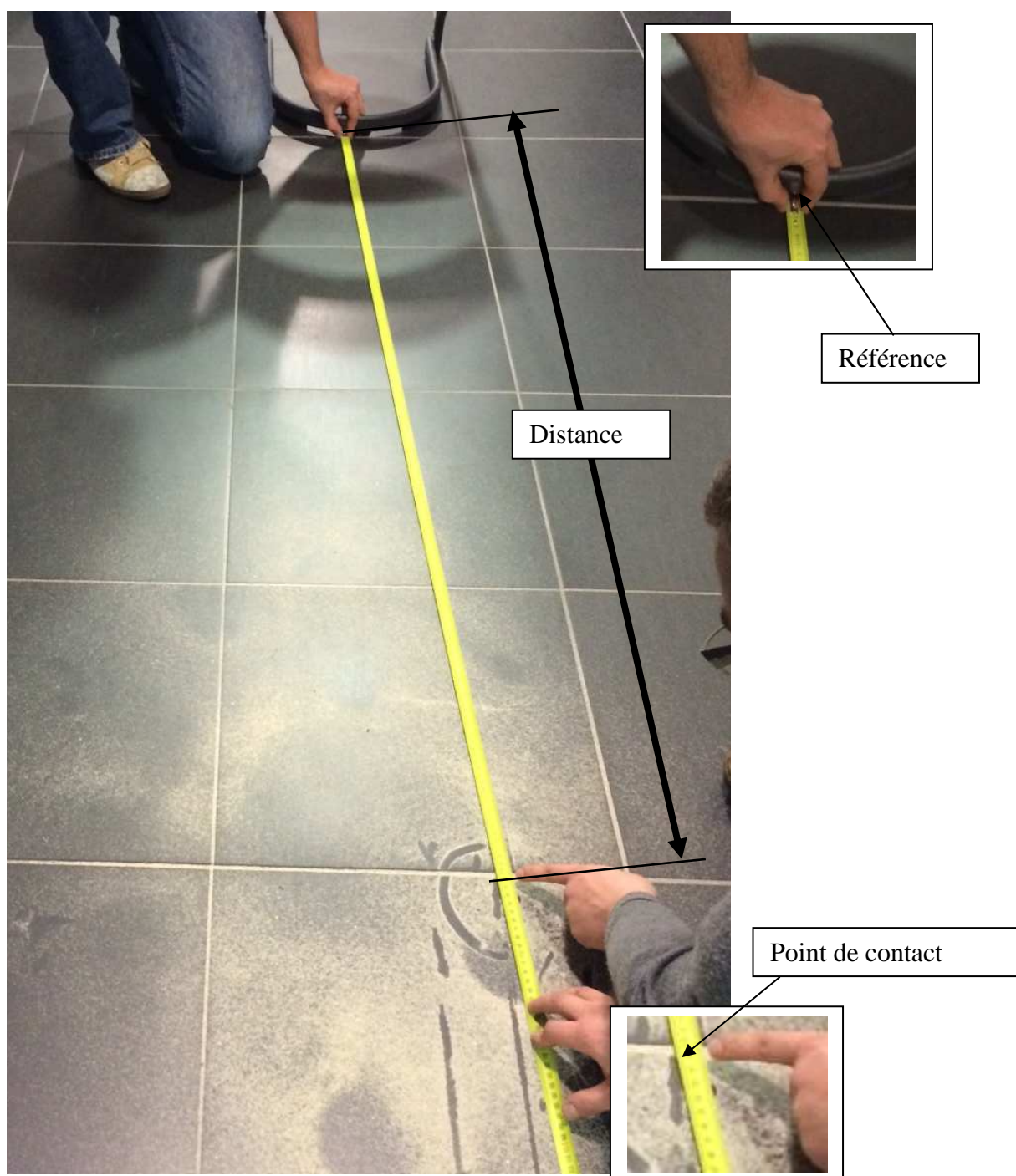
### Contrôleur de lancé



### Immobilisation de la chaise



Figure 4-2 : Mesure de point d'arrivée



Etape 4 – Lorsque le mode opératoire est en place, on reprend les réglages de la phase 1 et on refait une série de 10 lancers (pour avoir une dispersion estimée avec un risque de 5%) afin de mesurer les progrès apportés par la mise en place de ces Modes Opératoires. On note ces lancers dans le dossier Excel « Objectif, planning et calculs » dans l’onglet « Calcul » dans la colonne « Essai 1 ». On calcule la moyenne, l’écart type et le ratio signal/bruit (S/N).

On obtient en synthèse :

	Sans Modes Opératoires	Avec Modes Opératoires
Moyenne	1800 mm	1737 mm
Écart type	183.4 mm	94.3 mm
S/N	19.8 dB	25.3 dB

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

Le rapport S/N s’est nettement amélioré grâce à la mise en place du mode opératoire qui réduit fortement les facteurs aléatoires dû au lanceur (action humaine). La moyenne est également en baisse par rapport à la première série d’essais du fait des restrictions du mode opératoire (course de lancer raccourci). *Vous n’avez toujours pas la bonne distance !*

*Causes possibles.*

Amélioration du rapport S/N par la mise en place du plan d’action sur le lancé et la mesure. La moyenne a été réduite due à la modification du point de lancé (débattement réduit du coude). L’usure de l’avion (impacts) peut être une cause supplémentaire de la réduction de la moyenne.

*Plan d’actions correctives → nouvel objectif (éventuellement).*

Supprimer la cause liée à l’usure de l’avion en refaisant les essais en remodelant le nez avant chaque essai.

## Partie B : Élaboration du plan d’expériences

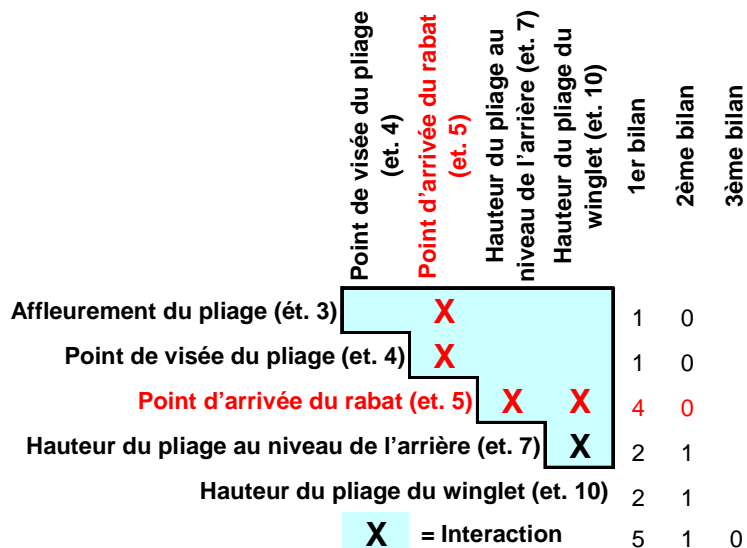
### I - Interactions entre les différents paramètres

Différents paramètres sont ajustables sur l’avion. Ils sont au nombre de 5. Cependant certains d’entre eux peuvent être en interaction. Il faudrait donc identifier ces interactions. On devrait remplir 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. Par exemple on déciderait de fixer le paramètre : point d’arrivée du rabat (en rouge sur la matrice) pour éliminer le maximum d’interactions → ceci nous permettrait d’espérer avoir ultérieurement un modèle prédictif non « pollué ».

Etape 5 – On choisit les facteurs qui vont intervenir dans le plan, en tenant compte des interactions éventuelles que l’on éliminera (éliminer 20% des facteurs responsables de 80% des interactions). On peut ainsi décider de laisser le minimum de facteurs fixes, ou de faire un facteur composite pour éliminer le maximum d’interactions → ne jamais garder moins de 4 facteurs.

Dans l’exemple ci-dessous on voit qu’en bloquant 1 seul facteur (1 sur 5 soit 20% des facteurs) on élimine 4 interactions (4 sur 5 soit 80% des interactions) → loi de Pareto ou des 20-80.



**Figure 5 : Graphique des interactions**

Etape 6 – On choisit la matrice du plan expériences (voir Pdf « Cours complet page 26). Celle-ci peut être directement une matrice « type » disponible, ou bien une matrice que l'on va fabriquer en supprimant une, ou plusieurs colonnes, d'une matrice « type ».

Attention : on ne supprime jamais de ligne (sinon la matrice ne sera plus orthogonale).

On met dans les colonnes possédant le moins de changements de niveaux les facteurs les plus difficiles à modifier → *pas utile pour le pliage de l'avion car les pliages ne sont pas réutilisables !*

Etape 7 – Pour chaque paramètre :

- on prendra 3 niveaux afin d'avoir une courbe de réponse pour l'influence de chaque facteur,
- le niveau 1 correspond aux paramètres initiaux de construction de l'avion,
- les niveaux 2 et 3 correspondent aux paramètres qui impliquent théoriquement une augmentation de la distance du vol.

Facteur	Unité	Niveau 1 (dispersion)	Niveau 2	Niveau 3	Difficulté réglage	Colonne matrice
Affleurement du pliage (ét. 3)	mm	0	20	40	N/A*	A
Point de visée du pliage (ét. 4)	mm	0	-10	10	N/A*	B
Hauteur du pliage au niveau de l'arrière (ét. 7)	mm	30	20	10	N/A*	C
Largeur de l'aile au pliage du winglet (ét. 10)	mm	50	60	70	N/A*	D

N/A\* car nous ne pouvons pas utiliser un pliage 2 fois

**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 : **L9 (4 facteurs \* 3 niveaux)**

**Figure 6 : Analyse des niveaux**

Les difficultés de réglage ne sont pas applicables à l'expérimentation avec l'avion car chaque paramètre est non modifiable. Il faudra réaliser un avion à chaque changement de réglages.

## II - Détermination de la matrice d'expérimentation

On a donc 4 paramètres qui varient puisqu'on en a fixé l'étape 5 (Point d'arrivé du rabat). On fixe donc le réglage à la valeur initiale : 0. On cherche donc une matrice d'expérimentation qui prend en compte 4 paramètres à trois niveaux. On trouve ainsi la matrice d'expérimentation L 9 prenant en compte 4 facteurs à 3 niveaux :

Type : L9(4 fact. à 3 niv.)

Essai N°	Facteurs contrôlés			
	1	2	3	4
	A	B	C	D
1	1	1	1	1
2	1	2	2	2
3	1	3	3	3
4	2	1	2	3
5	2	2	3	1
6	2	3	1	2
7	3	1	3	2
8	3	2	1	3
9	3	3	2	1

Chgmt niv      2      8      8      6

Figure 7 : Matrice d'expérimentation à 4 facteurs à 3 niveaux

Cependant on n'a que 4 paramètres, il faut donc éliminer 0 colonne. 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 B ou C (8 changements de niveau). On se retrouve donc avec une matrice à 4 colonnes.

## 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 .... 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	(2 changements de niveaux)
A compléter ...	→ colonne B	(8 changement de niveaux)
A compléter ...	→ colonne C	(8 changement de niveaux)
A compléter ...	→ colonne D	(6 changement 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.**

Il y a 9 essais (9 avions) à réaliser avec 10 tirs par essais.

90 tirs d'une durée de 90 minutes à réaliser pour un coût de 90 000 euros.

### Objectif du plan

L'objectif est de comprendre l'influence de chaque réglage et leurs interactions afin d'atteindre une moyenne de 2300 mm, un écart type de 150 mm et un S/N  $\geq$  23.7 dB.



## Partie C : Les essais et le dépouillement

### I - Les essais du plan et résultats

Etape 8 – On saisit le plan dans le logiciel « Kit-Tag ».

La matrice décrite ci-dessus nécessite, pour faire notre plan d'expériences, 3 essais nous choisissons de réaliser à 10 répétitions de chaque essai pour appréhender la dispersion. De la matrice le logiciel déduit les différents réglages à effectuer sur l'avion pour chaque essai.

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

#### DÉFINITION DES FACTEURS ET DE LEURS NIVEAUX

<b>Référence expérimentation</b>
Avion_type2

N°	Facteur contrôlé	Niveau 1	Niveau 2	Niveau 3	Niveau 4	Niveau 5
A	Affl. Plage Et3	0 mm	20 mm	40 mm		
B	Point de visée Et4	0 mm	-10 mm	10 mm		
C	Hauteur plage Et7	30 mm	20 mm	10 mm		
D	Winglet Et10	50 mm	60 mm	70 mm		

**Figure 9 : Exemple d'une feuille d'essai**

Etape 9 – On réalise les essais qui correspondent au plan d'expériences qui a été décidé. Chacun doit avoir un rôle bien défini et veiller à ce que les lancers soient effectués dans les meilleures conditions de reproductibilité (respect des Modes Opérateurs). Une fois nos 90 lancers notés dans le tableau récapitulatif Excel « Objectif, planning et calculs » dans l'onglet « Calcul » dans les colonnes « Essai N°2 à 9 ». Vérifier si les écarts entre les ratios S/N des différents essais sont conséquents (> 20%) ; vérifier si les moyennes des différents essais se répartissent autour de l'objectif à atteindre.

Titre	Dispersion	Essai 1	Essai 2	Essai 3	Essai 4	Essai 5	Essai 6	Essai 7	Essai 8	Essai 9	Validation 1	Validation 2	Validation 3
Moyenne	1815	1737	1570	1765	1775	1432	2273	1970	2252	2332	2415	2885	3526
Ecart type	190,1	94,3	162,7	104,4	133,0	200,3	242,9	249,4	276,1	141,7	110,6	192,1	202,4
S/N	19,6	25,3	19,7	24,6	22,5	17,1	19,4	17,9	18,2	24,3	26,8	23,5	24,8

Etape 10 – on peut saisir les moyennes et écart-type de chaque essai dans le logiciel.

Au préalable on aura saisi le nombre de caractéristiques à analyser (ici 1 seule : la distance de vol) et le type de ratio S/N que l'on adoptera (ici : à maximiser). On obtient les résultats suivants :

#### RECAPITULATION DES RESULTATS

<b>Référence expérimentation</b>			
Avion_type2			
<b>Caractéristique mesurée</b>	<b>Unité de mesure</b>		
Distance de vol	mm		
Critère ciblé_1		Nombre de mesures par essai : 10	
N°essai	Moyenne	Ecart type	Ratio Signal/Bruit
1	1737,00	94,30	25,30
2	1570,00	162,70	19,69
3	1765,00	104,40	24,56
4	1775,00	133,00	22,50
5	1432,00	200,30	17,08
6	2273,00	242,90	19,42
7	1970,00	249,40	17,94
8	2252,00	276,10	18,22
9	2332,00	141,70	24,33

**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.*

On remarque le rapport Signal/Bruit (S/N) est variant, entre 17.1 et 25.3 dB reflétant *une influence certaine des facteurs sur la dispersion !* ~~imprécision sur la répétition du process.~~ Cependant la grande majorité des résultats tournent autour de 20 dB, valeur acceptable. La moyenne de dispersion est de 21 dB.

Dans un second temps, la moyenne des distances varient de 1432 à 2332mm ce qui ne correspond pas à la valeur cible de 3500mm, car nous sommes dans une phase d'apprentissage/réglage du processus. *Nous n'avons aucun essai qui atteigne simultanément les objectifs de distance et de dispersion*

#### *Causes possibles.*

La variation du rapport S/N peut être dû à des facteurs extérieurs non pris en compte (facteur environnementaux), une instabilité du process de lancé (facteur humain), ou encore des réglages sur l'avion diminuant la précision (pour un vol en ligne droite).

En ce qui concerne la distance, l'influence des réglages de l'avion est très importante. Certains avions ont tendance à vite partir vers le bas tandis que d'autre on tendance à remonter un peu.

*En bref vous n'avez pas la bonne combinatoire car vous n'avez réalisé que 9 combinaisons sur les  $3^4 = 81$  possibles !*

#### *Objectif*

Le dépouillement va nous permettre de déterminer quels sont les facteurs qui nous permettront d'agir sur la dispersion de nos vols puis sur l'augmentation de la distance de vol.

## **II - Dépouillement**

Etape 11 - Un 1<sup>er</sup> tableau sur l'analyse de la variance nous informe sur la significativité de nos résultats. On peut ainsi dire que l'on peut expliquer 68.6 % des résultats obtenus par les facteurs (et les éventuelles interactions choisies).

Mais 31.4% restent inexpliqués par le modèle (résidu). Ces incertitudes peuvent être expliquées par différents éléments : *Vent, hygrométrie, la force de lancé non homogène, le moment de lâché de l'avion.*

On remarque également que les facteurs *A / B / C*, sont significatifs à 99%.

Un 2<sup>ème</sup> tableau celui des effets nous informe sur les effets de chaque facteur à moyenne et leur contribution pour le signal S/N.

On observe que les facteurs *Point de visée du pliage (et. 4), Affleurement du pliage (ét. 3), Largeur de l'aile au pliage du winglet (et. 10), Hauteur du pliage au niveau de l'arrière (et. 7)* influencent fortement sur la valeur de la moyenne ; il s'agit de *A > C > B > D* (Dans l'ordre). Indépendamment les facteurs *B > A > D > C* (dans l'ordre) influencent fortement la valeur du ratio S/N.

Titre	Dispersion		Essai 1	Essai 2	Essai 3	Essai 4	Essai 5	Essai 6	Essai 7	Essai 8	Essai 9		Validation 1	Validation 2	Validation 3	
Répétition 1	1950		1620	1428	1668	1920	1472	2181	2045	2328	2300		2470	2961	3722	
Répétition 2	1600		1720	1538	1762	1791	1160	2604	1954	2425	2262		2312	2880	3335	
Répétition 3	1850		1800	1546	1825	1673	1546	2486	1991	2025	2250		2282	2703	3404	
Répétition 4	1400		1595	1694	1738	1636	1312	2098	1806	2163	2532		2370	3007	3221	
Répétition 5	1900		1850	1893	1687	1905	1457	2532	1686	2054	2524		2411	2666	3393	
Répétition 6	1900		1760	1515	1640	1980	1582	1950	1805	2061	2322		2610	3164	3716	
Répétition 7	1950		1650	1357	1911	1626	1118	2400	2540	2247	2504		2581	2711	3824	
Répétition 8	1700		1820	1725	1916	1689	1353	2307	2083	2606	2302		2315	3197	3433	
Répétition 9	2000		1850	1415	1848	1864	1541	2283	2082	2742	2124		2413	2740	3710	
Répétition 10	1900		1700	1588	1657	1667	1776	1888	1708	1865	2200		2382	2823	3498	
Moyenne	1815		1737	1570	1765	1775	1432	2273	1970	2252	2332		2415	2885	3526	
Ecart type	190,1		94,3	162,7	104,4	133,0	200,3	242,9	249,4	276,1	141,7		110,6	192,1	202,4	
S/N	19,6		25,3	19,7	24,6	22,5	17,1	19,4	17,9	18,2	24,3		26,8	23,5	24,8	
	Objectif												Logiciel ==>	Prévu	Prévu	Prévu
Distance	A maximiser												Moyenne	1838	2429	3356
	A cibler	X											Ecart type	78,9	155,8	
Mini	2000												S/N	27,3	23,9	
Capabilité	1,33															
Moyenne	3500												Δ valeur	576,6	456,2	
Ecart type	228												Δ S/N	1,9%	1,5%	
S/N	23,7															
Coût en €	10000		10000	10000	10000	10000	10000	10000	10000	10000	10000		10000	10000	10000	10000
Coût total en €	130000	##														
Reste en caisse	Epuisé															

Figure 11 : Résultats des essais



**TABLEAU DES EFFETS**

<b>Référence expérimentation</b> Avion_type2	<b>Caractéristique mesurée</b> Distance de vol	<b>Type</b> Critère ciblé_1
---	---	--------------------------------

% Contribution S/N(dB)=(S/N niveau facteur-S/N moyen) / valeur absolue de S/N moyen

Effet sur la valeur mesurée = valeur niveau facteur - valeur moyenne

% Contribution S/N(dB)					S/N(dB) moyen : 21 dB	Facteur N°	Effet sur la valeur mesurée					Valeur moyenne : 1900,67 mm
Niveau 1	Niveau 2	Niveau 3	Niveau 4	Niveau 5	Niveau 1		Niveau 2	Niveau 3	Niveau 4	Niveau 5		
10,37%	-6,37%	-4,00%			A	-210,00	-74,00	284,00				
4,35%	-12,74%	8,39%			B	-73,33	-149,33	222,67				
-0,11%	5,56%	-5,45%			C	186,67	-8,33	-178,33				
5,86%	-9,47%	3,61%			D	-67,00	37,00	30,00				

**Figure 12 : Tableau des effets**

**ANALYSE DE LA VARIANCE**

<b>Référence expérimentation</b> Avion_type2
<b>Caractéristique mesurée</b> Distance de vol

Origine de la variation	Degré de liberté	Somme des carrés brute	Variance V	*F* expérimentation Vf / Vr	Somme des carrés nette	% Contribution
A	2	3 906 960,00	1 953 480,00	49,20 **	3 827 556,77	32,87%
B	2	2 317 760,00	1 158 880,00	29,19 **	2 238 356,77	19,22%
C	2	2 001 500,00	1 000 750,00	25,21 **	1 922 096,77	16,51%
D	2	202 740,00	101 370,00	2,55		0,00%
<b>Résidu</b>	81	3 215 831,00	39 701,62		3 656 780,70	31,40%
<b>Total</b>	89	11 644 791,00				

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

**Figure 13 : Analyse de la variance**

## Partie D : Les optimisations

### I - 1<sup>ère</sup> 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 : **A1 / B3 / C2 / D1**

Affleurement du pliage (ét. 3)	0 mm
Point de visée du pliage (et. 4)	10 mm
Hauteur du pliage au niveau de l'arrière (et. 7)	20 mm
Hauteur du pliage du winglet (et. 10)	50 mm

Etape 12 - Nous avons effectué 10 lancers pour avoir une estimation de la dispersion avec un risque de 5%. On obtient en synthèse :

	Prévision	Réels
Moyenne	1838 mm	2415 mm
Écart type	78.9 mm	110.6 mm
S/N	27.3 dB	26.8 dB

Chaque résultat de test est noté dans le tableau récapitulatif Excel « Objectif, planning et calculs » dans l'onglet « Calcul » dans la colonne « Validation 1 ».

#### *Analyse des résultats obtenus par rapport aux prévisions. Ecart ?*

Le rapport S/N des essais réels est vraiment proche de la prévision simulée par le logiciel. En ce qui concerne la moyenne les essais réalisés nous donnent une moyenne nettement supérieure à la prévision du logiciel. *Nous n'atteignons pas les objectifs de distance et de dispersion*

#### *Causes*

Cela pourrait sous entendre que soit nos tirs ne sont pas reproductibles, soit nous avons omis une interaction.

~~Le modèle peut être pollué par des interactions entre les facteurs avoir des imprécisions lors de la fabrication. Les facteurs humains et environnementaux peuvent aussi influencer sur les résultats.~~ *Nous n'avons pas les bons réglages*

#### *Plan d'actions correctives.*

Prévoir un système de lancement mécanique (plus stable) et un environnement clos (à contrario d'un couloir, courant d'air). *Jouer sur les réglages.*

## II - 2<sup>ème</sup> optimisation = la maximisation de la distance

Etape 13 - On va maintenant tenter d'augmenter la longueur du vol de notre avion.

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 : **l'affleurement du pliage, point de visée du pliage.**

La configuration proposée serait : **A3/B3/C2/D3**

Etape 14 - Nous avons effectué **10 tirs** pour **avoir une estimation de la dispersion avec un risque de 5%**. On obtient en synthèse :

	Prévision	Réels
Moyenne	2429 mm	2885 mm
Écart type	155.8 mm	192.1mm
S/N	23.9 dB	23.5 dB

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

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 : 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.

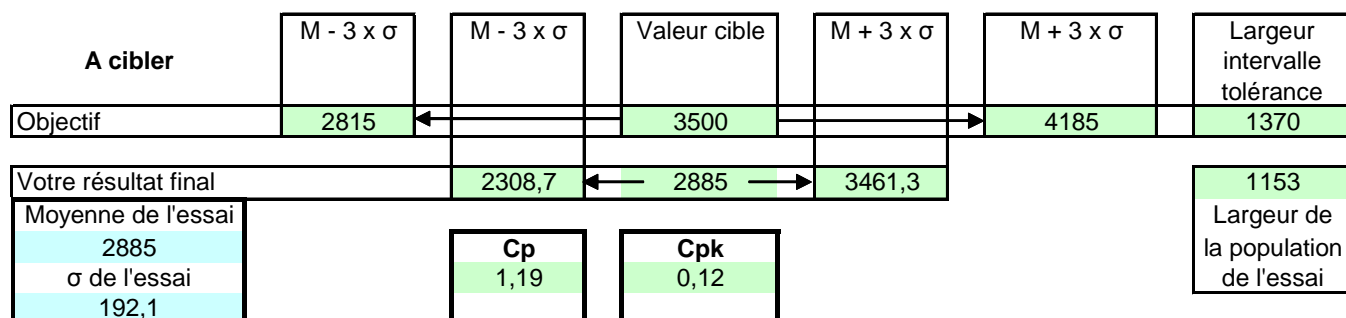


Figure 15 : Capabilité obtenue

**Analyse des résultats obtenus par rapport aux prévisions. Ecart ?**

La moyenne des essais est supérieure aux prévisions, mais le rapport S/N en est proche (23.5 dB pour 23.7 dB en objectif).

On est donc dans la fenêtre (Cp = 1.19 **théoriquement capable**) mais très excentré de celle-ci (Cpk=0.12 << Cp).

**Causes**

~~Au niveau du bruit, le facteur humain est largement responsable. Malgré les mesures prises et l'attention portée au respect de ses dernières, il est difficile de garantir un bruit constant.~~ Cependant, on remarque que plus on augmente la distance de vol plus le bruit a tendance à diminuer. Les réglages de l'avion influent également sur le facteur de bruit.

Pour le Cpk, les réglages de l'avion sont essentiellement en cause due aussi bien à un défaut de pliage (dissymétrie) qu'à un défaut au niveau du positionnement du lanceur ou de la trajectoire de lancé.

**Nous n'avons pas encore les bons réglages**

**Plan d'actions correctives.**

Il faut ajuster les réglages de distance, tout en essayant de maintenir de rapport S/N. Dans la mesure du possible, un lanceur mécanique permettra de réduire significativement la dispersion observée et d'également vérifier l'exactitude des réglages.

A défaut, il est nécessaire de renforcer le contrôle sur le lanceur.

**III - 3<sup>ème</sup> optimisation = par interpolation**

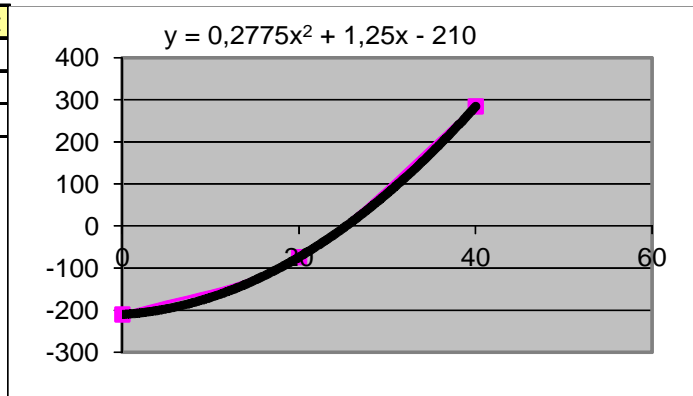
Etape 15 - On recherche pour tous les facteurs le réglage que l'on peut régler de façon précise (au millimètre près) et ainsi que l'on peut ajuster pour obtenir la distance maximale en espérant ne pas trop toucher au ratio S/N.

Le logiciel ne peut établir de prévisions car nous n'avons définis que 3 niveaux par facteurs. **Par 3 points il peut passer une infinité de courbes ... nous avons choisi une parabole.**

A l'aide d'une inter-extrapolation, on trouve pour chaque réglage un optimum de distance.

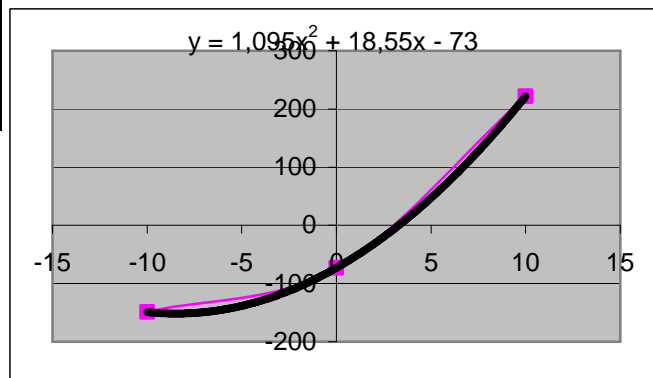
Facteur A	Réglage	Effet
Niv1	0	-210
Niv2	20	-74
Niv3	40	284

Réglage	Effet
45	408
<b>Prévu</b>	<b>124</b>



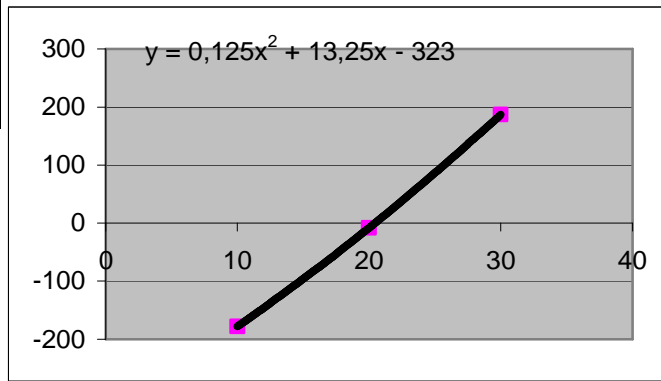
Facteur B	Réglage	Effet
Niv1	-10	-149
Niv2	0	-73
Niv3	10	222

Réglage	Effet
15	452
<b>Prévu</b>	<b>230</b>



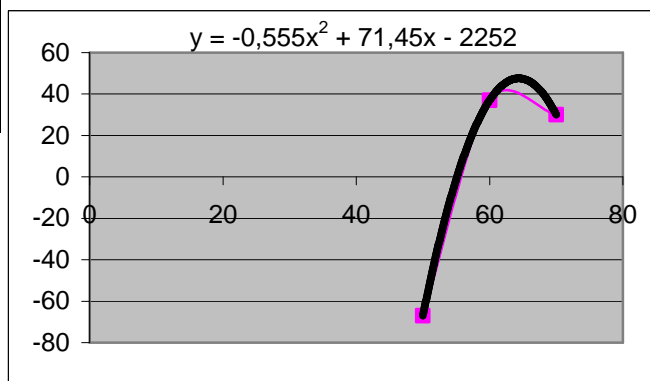
Facteur C	Réglage	Effet
Niv1	10	-178
Niv2	20	-8
Niv3	30	187

Réglage	Effet
35	294
<b>Prévu</b>	<b>107</b>



Facteur D	Réglage	Effet
Niv1	50	-67
Niv2	60	37
Niv3	70	30

Réglage	Effet
65	47
<b>Prévu</b>	<b>10</b>



**Figure 16 : Tableaux de calcul par inter-extrapolation**

Etape 16 - La configuration retenue est :

Facteur	Réglage	Effet
Affleurement du pliage (ét. 3)	45 mm	124 mm
Point de visée du pliage (et. 4)	15 mm	229,6 mm
Point d'arrivée du rabat (et. 5)	0 mm	---
Hauteur du pliage au niveau de l'arrière (et. 7)	35 mm	106,88 mm
Hauteur du pliage du winglet (et. 10)	65 mm	10,3 mm
Somme des effets		470,78 mm

Nous avons effectué 10 tirs pour avoir une estimation de la dispersion avec un risque de 5%. La distance prévue est de 3356 mm (2880 + 471).

L'ensemble des réglages ont été choisis afin de maximiser la distance de vol en se mettant à la limite de réalisation de l'appareil.

On obtient en synthèse :

	Réels	Prévu	Objectifs
Moyenne	3526 mm	3356 mm	3500 mm
Écart type	202mm	---	Cp > 1,33
S/N	24.8 dB	---	

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

## Nouvelle capabilité

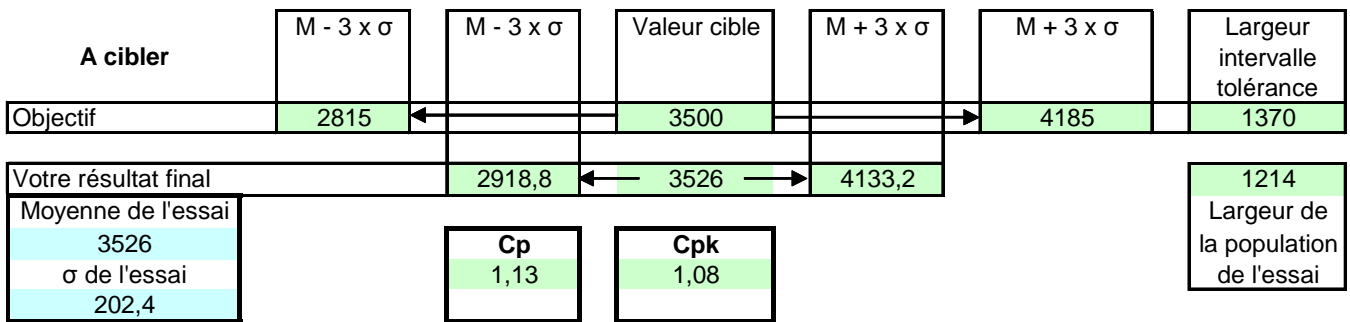


Figure 17 : Capabilité obtenue

### *Analyse des résultats obtenus par rapport aux espoirs. Ecart ?*

On remarque que l'on est très proche de la valeur prévue et que l'on est centré dans la fenêtre de l'objectif (+/- 3 Sigma). Par contre, la capabilité n'est pas suffisante.

### *Causes probables*

La précision de fabrication des avions est plus que discutable, ainsi que la méthode de tir. De plus le papier est un matériau très sensible au choc et à la déformation.

### *Plan d'actions correctives.*

Faire des avions par une machine, dans un matériau moins sensible (balsa, depron, etc....) et faire un système de lancement à forte répétabilité (angle, force, direction, point de lâché).

**OPTIMISATION PROPOSEE N°1**

Référence expérimentation  
Avion\_type2

Ecart type théorique résultant : 78,90

N°	Facteur contrôlé	Niv	% Contrib	
			Distance de vol	
A	Affl. Plage Et3	1	10,37%	
			-210,00	
B	Point de visée Et4	3	8,39%	
			222,67	
C	Hauteur pliage Et7	2	5,56%	
			-8,33	
D	Winglet Et10	1	5,86%	
			-67,00	
Ratio S/N(dB) théorique résultant			27,34	
S/N(dB) moyen			21,005	
Valeur mesurée ou Sensibilité théorique résultante			1838,00	
Coefficient de pondération			1	1

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

**OPTIMISATION PROPOSEE N°2**

Référence expérimentation  
Avion\_type2

Ecart type théorique résultant : 155,85

N°	Facteur contrôlé	Niv	% Contrib	
			Distance de vol	
A	Affl. Plage Et3	3	-4,00%	
			284,00	
B	Point de visée Et4	3	8,39%	
			222,67	
C	Hauteur pliage Et7	2	5,56%	
			-8,33	
D	Winglet Et10	3	3,61%	
			30,00	
Ratio S/N(dB) théorique résultant			23,85	
S/N(dB) moyen			21,005	
Valeur mesurée ou Sensibilité théorique résultante			2429,00	
Coefficient de pondération			1	1

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

## Conclusion

Nous pouvons en conclure qu'après optimisation des réglages de l'avion, en s'appuyant sur les données émises par le logiciel, les objectifs en termes de distances et de bruits sont quasiment atteints.

Il faut souligner que la méthode de plan d'expérience est vraiment efficace. Nous avons doublé la distance de vol avec une bonne précision. Il aurait été difficile d'arriver au même résultat sans cette méthode, et surtout avec un budget nettement supérieur à celui obtenu via ce plan.

A titre personnel, cela fut une belle découverte et nous a fait ouvrir les yeux sur la capacité des modèles mathématique à optimiser n'importe quel système, et cela en ciblant parfaitement les résultats voulus. Le plan d'expérience est un outil réellement puissant.

Nous retiendrons également que la mise en place d'un mode opératoire est essentielle dans l'analyse et l'optimisation d'un processus. Cela permet de définir les conditions de fonctionnement du process (donnée d'entrées), afin de savoir de quelle situation précise on part et où il faut ajuster pour avoir l'effet escompter sur le processus (données de sorties).