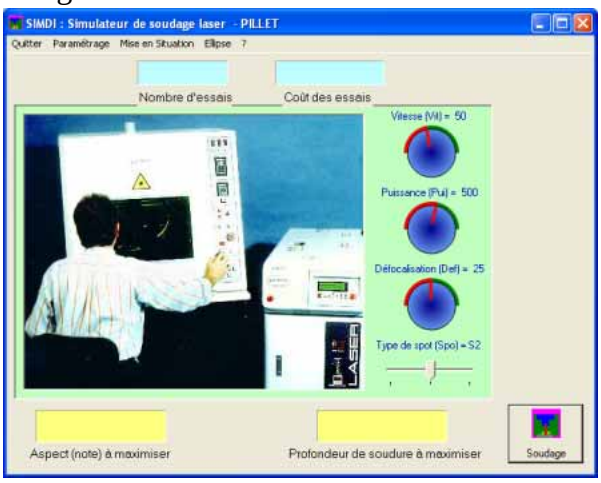
SIMDI - Laser

« Les élèves apprennent à réaliser un plan d'expériences»

Objectifs du simulateur

Simuler les différentes étapes de la construction, de la réalisation, et de l'interprétation d'un plan d'expériences en surface de réponse. Faire une optimisation selon deux critères a priori antagoniste.



Apport pédagogique de la séquence de formation

- Développer la compréhension de l'intérêt de réaliser un plan d'expériences en surface de réponse.
- Compréhension de la notion d'effets de second ordre
- Optimisation de deux critères simultanés
- Définition du domaine d'étude

But du simulateur

Le but de la simulation est d'améliorer un soudage au laser. Une bonne soudure a comme caractéristique principale une épaisseur soudée suffisante. Pour réaliser cette mesure, on coupe la pièce soudée et on mesure la profondeur soudée au microscope. Mais il faut également que l'aspect de la soudure soit le plus parfait possible, c'est à dire ne comportant pas de fissures, de porosités, de bossages ou de creux.

Les deux réponses à optimiser sont les suivantes :

- La profondeur de la soudure. C'est directement la profondeur en centième de mm. L'objectif est d'avoir une soudure d'au moins 80.
- L'aspect de la soudure. Le simulateur donne une note qui cumule les différents défauts. Le meilleur aspect correspond à la note la plus élevée. L'objectif est d'avoir un aspect avec une note au moins égale à 60.

Pour mesurer la profondeur de la soudure, il faut couper les pièces. Ce travail est long et coûteux, il faut donc diminuer au maximum le nombre d'essais

L'aspect est une note qui cumule un ensemble de défauts tels que :

- le creux ou la bosse en surface
- la présence de fissures
- la présence de porosités
- …

Habituellement les opérateurs travaillent avec la configuration donnée par l'initialisation, c'est à dire :

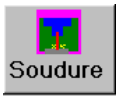
Vitesse d'avance du faisceau laser = 50
Puissance du faisceau = 500
Défocalisation par rapport à la surface = 25
type de spot = 2

Les experts fixent le mini et le maxi raisonnables de la façon suivante :

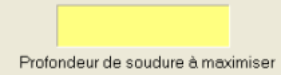
Facteurs	actuel	mini	maxi
Vitesse	50	20	80
Puissance	500	300	700
défocalisation	25	17	33

Lorsque la soudure n'est pas acceptable (on a percé plutôt que soudé) ou pas réalisée la réponse en profondeur et en aspect est de 0

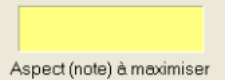
Fonctionnalités principales de SIMDI Laser



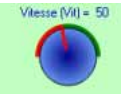
Ce bouton permet de lancer une simulation de soudure. A chaque simulation, le coût des essais augmente de 80 Euros.



Après la simulation, apparaît dans ce cadre la moyenne 3 profondeurs de la soudure en trois endroits différents.



Après la simulation, apparaît dans ce cadre la note correspondant à l'aspect. Plus la note est élevée, meilleure est la soudure



Boutons de réglage. Un réglage grossier peut être fait avec la souris, un réglage fin est réalisé en maintenant le bouton de la souris appuyé, mais un s'écartant du centre du bouton.

Choix entre trois types de spots (faisceaux laser) possibles

Exemple d'utilisation

L'exemple d'utilisation ci-dessous utilise un plan en surface de réponse. On ne prend pas en compte le type de spot qui reste fixé à 2. Le plan portera sur 3 facteurs : vitesse, puissance, défocalisation.

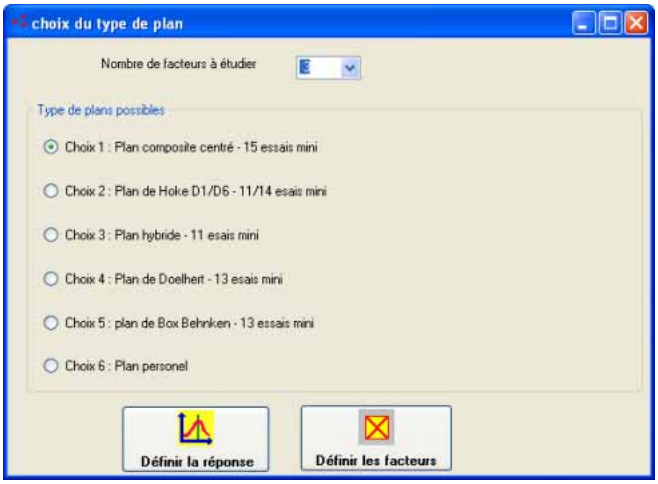
Construction du plan en surface de réponse

La construction du plan d'expériences est réalisée grâce au logiciel Ellipse surface de réponse. On peut le lancer directement depuis le programme laser (menu Ellipse)
Les différents plans disponibles sont les suivants :

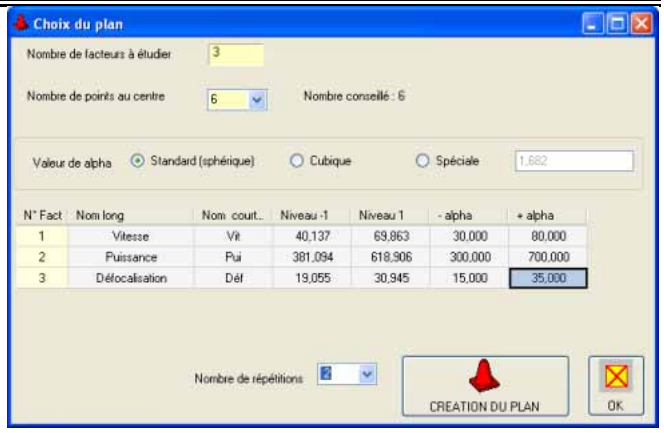
aideplans

Différents plans en surface de réponse			
Plans	**Avantages**	**Inconvénients**	**Exemple d'utilisation**
Composite centré	Meilleure précision sur les coefficients Variance uniforme sur le domaine d'étude	Un peu plus d'essais Les facteurs doivent être quantitatifs	On veut un modèle très prédictif, avec une faible erreur sur les coefficients
Hybride	Bonne précision sur les coefficients Un peu moins d'essais que composite centré	Les facteurs doivent être quantitatifs	On veut une bonne prédiction sur les coefficients mais en diminuant le nb d'essais
Box Behnken	Ne comporte que des -1, 0, 1 donc peut éventuellement être utilisé avec des facteurs qualitatifs	Précision faible sur les coefficients quadratiques Nombre d'essais élevés lorsque le nombre de niveau dépasse 4	On veut une bonne prédiction sur les coefficients, et on a au moins un facteur qualitatif à 3 niveaux
Hoke	Plans presque saturés → Nombre d'essais minimal Ne comporte que des -1, 0, 1 donc peut éventuellement être utilisé avec des facteurs qualitatifs	Précision faible sur l'ensemble des coefficients	On veut une idée de la surface de réponse mais on veut privilégier un faible nombre d'essais
Réseaux de Doehlert	Permet des stratégies évolutives → soit en se déplaçant dans le domaine d'étude → soit en rajoutant progressivement des facteurs Nombre d'essais peu élevé	Précision faible sur l'ensemble des coefficients	On privilégie un nombre d'essais peu élevé et on veut pouvoir faire évoluer le domaine d'étude au ours des essais

Si l'on souhaite une bonne précision sur la surface de réponse, on a intérêt à choisir un plan composite centré.



On définit les facteurs :

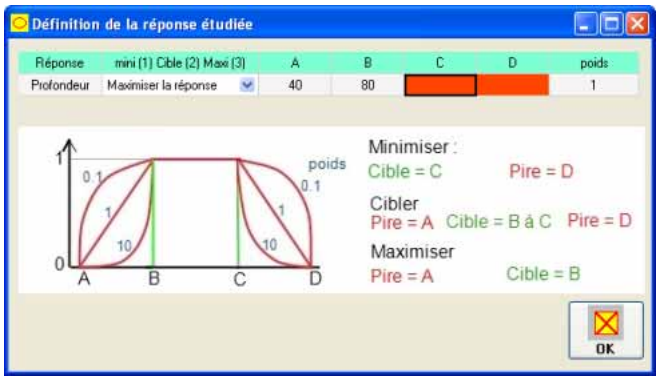


Pour définir le plan, on saisit :

- Le nombre de facteurs ;
- Le nombre de points au centre (si possible laisser le nombre conseillé) ;
- La valeur de alpha (si possible choisir la valeur standard) ;
- Le nom long, le nom court ;
- Les valeurs extrêmes à tester (-alpha et +alpha). Attention dans ce simulateur les valeurs extrêmes ne sont pas forcément des valeurs permettant une soudure.

Le nombre de répétitions

Et la première réponse (profondeur) :



On peut alors créer le plan en cliquant sur

Les valeurs réelles des points testés peuvent être modifiés (arrondies) dans la saisies des réponses pour correspondre au vraies valeurs testées.

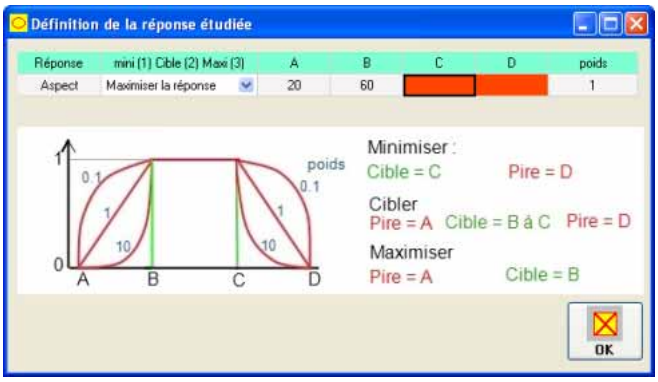
Saisie exemple SR Laser profondeur.pex

	Vte	Pui	Déf	Rep 1	Rep 2
1	40	380	19,054696...		
2	40	380	30,945303...		
3	410	618,90606...	19,054696...		
4	40	618,90606...	30,945303...		
5	70	381,09393...	19,054696...		
6	70	381,09393...	30,945303...		
7	70	618,90606...	19,054696...		
8	70	618,90606...	30,945303...		
9	55	500	25		
10	55	500	25		
11	55	500	25		
12	55	500	25		
13	55	500	25		
14	55	500	25		
15	30	500	25		
16	80	500	25		
17	55	300	25		
18	55	700	25		
19	55	500	15		
20	55	500	35		

OK

On enregistre le fichier sous le nom « profondeur » par exemple

Comme il y a deux réponses à optimiser, on ouvre une nouvelle session de Ellipse surface de réponse, on ouvre le fichier qui vient d'être sauvegarder, on modifie la réponse (Aspect)



Quel l'on enregistre sous le nom « aspect » par exemple. L'optimisation va donc se faire sur deux réponses en utilisant deux sessions de ellipse.

Saisie des résultats

On peut directement sur le plan modifier les valeurs des niveaux des facteurs pour les arrondir.

Saisie exemple SR Laser profondeur.pex

	Vte	Pui	Déf	Rep 1	Rep 2
1	40	380	19	66	74
2	40	380	31	81	86
3	40	620	19	72	73
4	40	620	31	91	81
5	70	380	19	69	66
6	70	380	31	81	74
7	70	620	19	55	51
8	70	620	31	64	64
9	55	500	25	78	70
10	55	500	25	71	81
11	55	500	25	73	65
12	55	500	25	65	70
13	55	500	25	80	74
14	55	500	25	70	76
15	30	500	25	79	66
16	80	500	25	51	48
17	55	300	25	60	51
18	55	700	25	41	40
19	55	500	15	85	87
20	55	500	35	113	114

OK

Saisie exemple SR Laser aspect.pex

	Vte	Pui	Déf	Rep 1	Rep 2
1	40	380	19	38	41
2	40	380	31	47	54
3	40	620	19	25	31
4	40	620	31	45	44
5	70	380	19	31	33
6	70	380	31	44	44
7	70	620	19	24	20
8	70	620	31	31	32
9	55	500	25	38	36
10	55	500	25	32	40
11	55	500	25	34	38
12	55	500	25	35	34
13	55	500	25	39	41
14	55	500	25	35	32
15	30	500	25	38	37
16	80	500	25	23	22
17	55	300	25	51	50
18	55	700	25	37	47
19	55	500	15	25	25
20	55	500	35	42	44

OK

On note qu'aucun de ces essais ne satisfait les objectifs Aspect >60 et Profondeur >80

Interprétation

L'interprétation consiste à exploiter les différents écrans d'analyse :

Analyse de significativité

En profondeur

Action	Coef réel	Coef red	Sigma	T	Proba p	Signif	éliminer
Cte	93,87935	72,674	1,349	53,857	0,000	Très	cliquer
Vte	0,13628	-6,493	0,895	-7,253	0,000	Très	cliquer
Pui	0,58326	-3,531	0,895	-3,944	0,000	Très	cliquer
Dél	-13,58206	6,901	0,895	7,708	0,000	Très	cliquer
Vte²	0,00204	-3,656	0,871	-4,195	0,000	Très	cliquer
Vte*Pui	-0,00133	-4,125	1,170	-3,526	0,001	Très	cliquer
Vte*Dél	-0,00459	-0,750	1,170	-0,641	0,526	Non	cliquer
Pui²	-0,00056	-8,251	0,871	-9,469	0,000	Très	cliquer
Pui*Dél	0,00080	0,125	1,170	0,107	0,916	Non	cliquer
Dél²	0,29264	10,041	0,871	11,523	0,000	Très	cliquer

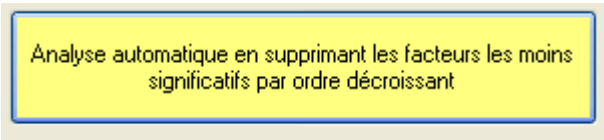
Paramètre	S	R²	R² Ajusté
Valeur	4,6790	93,1%	91,1%

Analyse automatique en supprimant les facteurs les moins significatifs par ordre décroissant

Le R² ajusté donne le pourcentage des variations observées dans le plan d'expériences qui sont expliquées par le modèle.

En cas de coefficients non significatifs (en rouge) on peut le supprimer du modèle en cliquant sur le "cliquer" de la ligne à supprimer. L'analyse est alors réinitialisé.

En principe, on élimine action après action en partant des actions les moins significatives (ayant la probabilité p la plus élevée). Cette méthode peut se faire de manière automatique par le bouton :



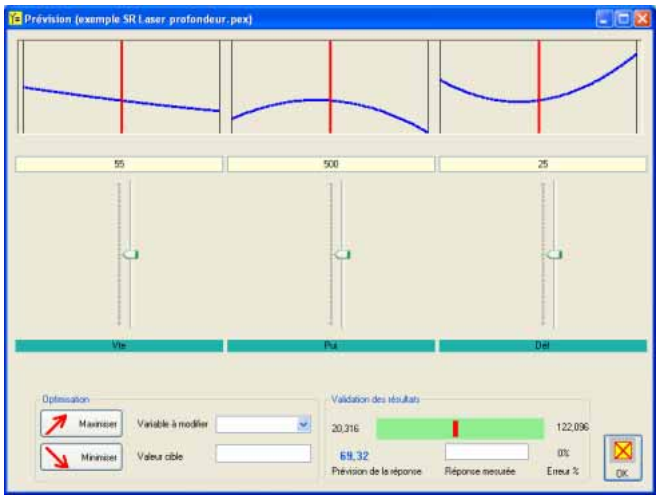
à la fin on a :

Action	Coef réel	Coef red	Sigma	T	Proba p	Signif	éliminer
Cte	88,51994	72,674	1,316	55,235	0,000	Très	cliquer
Vte	0,07989	-6,493	0,873	-7,439	0,000	Très	cliquer
Pui	0,60848	-3,531	0,873	-4,045	0,000	Très	cliquer
Dél	-13,51246	6,901	0,873	7,906	0,000	Très	cliquer
Vte²	0,00201	-3,656	0,850	-4,303	0,000	Très	cliquer
Vte*Pui	-0,00145	-4,125	1,141	-3,617	0,001	Très	cliquer
Vte*Dél							cliquer
Pui²	-0,00056	-8,251	0,850	-9,711	0,000	Très	cliquer
Pui*Dél							cliquer
Dél²	0,29379	10,041	0,850	11,818	0,000	Très	cliquer

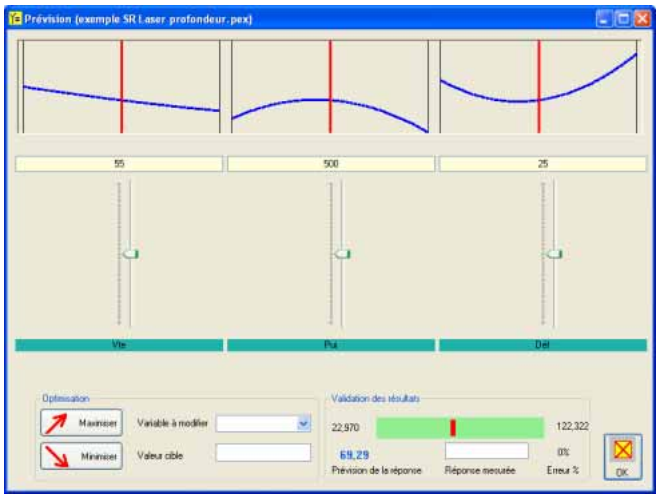
Paramètre	S	R²	R² Ajusté
Valeur	4,5622	93,0%	91,5%

Analyse automatique en supprimant les facteurs les moins significatifs par ordre décroissant

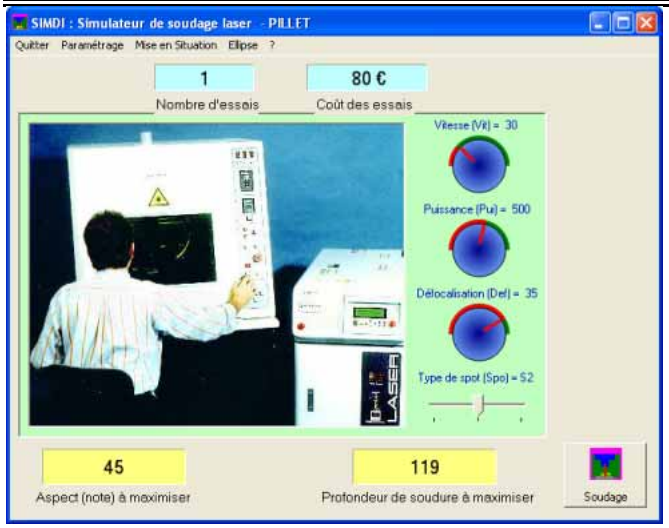
Graphe des effets
Menu prévision / Prévision sur la réponse



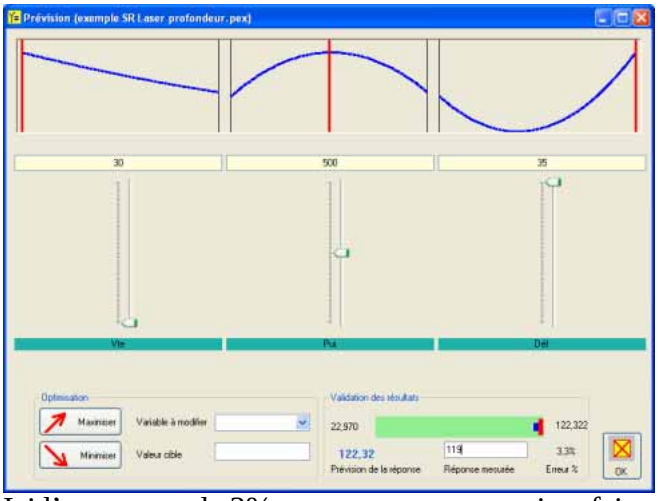
Dans ce menu on peut facilement trouver la configuration qui maximise la réponse et prévoir une réponse pour une configuration quelconque. Ci-dessous la configuration qui maximise l'aspect



Que l'on peut tester

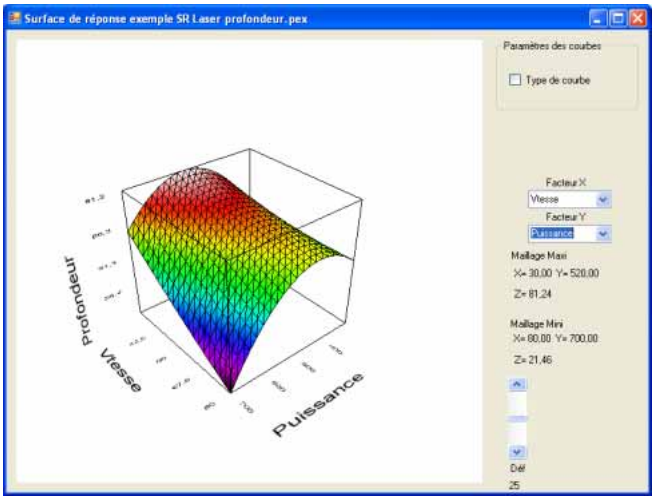


La réponse est de 119 pour une réponse attendue de 122. En saisissant la réponse obtenue on a un calcul d'erreur :



Ici l'erreur est de 3%, notons que cet essai ne fait pas partie des essais du plan d'expériences, une erreur inférieure à 10% est tout à fait satisfaisante.

Visualisation en 3D de la surface



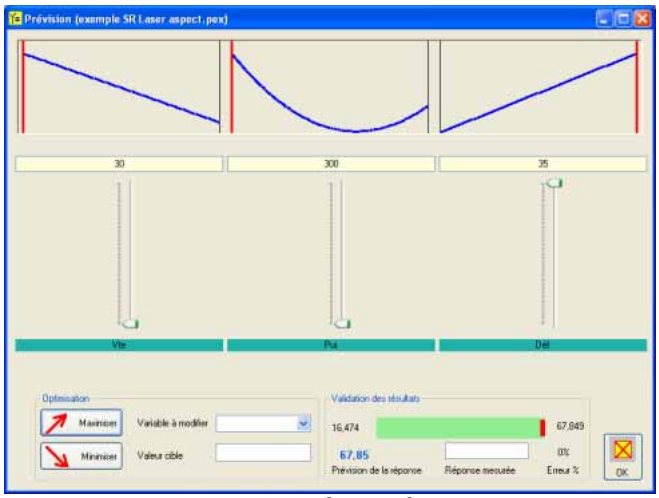
La visualisation 3D permet de comprendre l'influence de deux facteurs sur la réponse. On peut également modifier les autres facteurs en agissant sur les curseurs correspondants.

Cette fenêtre donne les points maxi et mini de la surface de réponse.

En aspect

On fait de même pour la seconde réponse : aspect. Avec les choix qui ont été faits on aboutit à :

Et comme configuration donnant la valeur maximum :

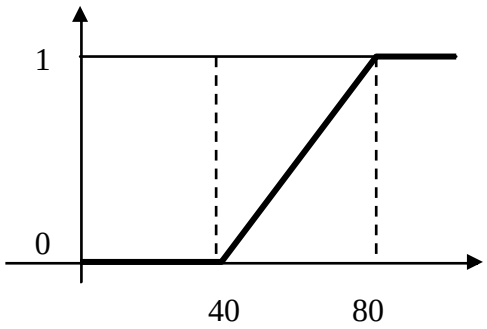


Qui ne donne pas le même résultat que pour la profondeur. Le bon résultat doit donc donner un bon compromis entre ces deux résultats.
Une première solution connsiste à bouger les curseurs pour trouver par tatonnement un résultats satisfaisant les deux objectifs. La seconde solution consiste à utiliser la désirabilité.

Optimisation de deux réponses par la désirabilité

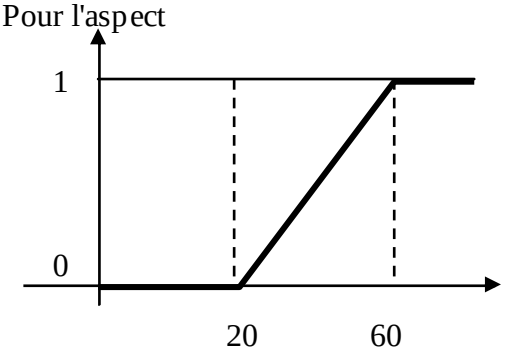
La désirabilité consiste à utiliser une réponse unique qui ferait directement l'optimum entre les deux réponses. Pour cela, il faut ramener les deux valeurs à une réponse entre zéro et 1. On parle alors de désirabilité

Par exemple pour la profondeur on définit une "désirabilité" telle que :



Si la profondeur est inférieure à 40 la désirabilité = 0, si la profondeur est supérieure à 100, la désirabilité est égale à 1. Entre les deux, avec un poids de 1 on a une progresssion linéaire

Pour l'aspect



La désirabilité globale est obtenue en faisant la moyenne géométrique des deux désirabilités.

$$D_{globale} = \left(D_{prof}^{Poids_{prof}} . D_{asp}^{Poids_{asp}}\right)^{1/\sum Poids}$$

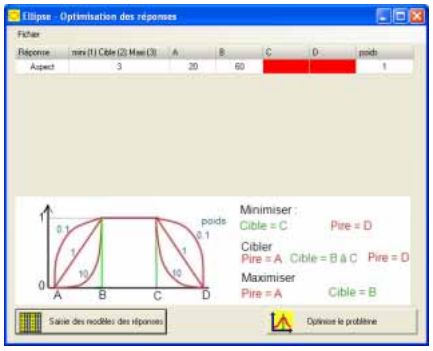
Avec la moyenne géométrique si une des désirabilité est égale à 0, la désirabilité globale sera également à 0. Un compromis n'existe pas si une des parties est totalement insatisfaite.

Pour pouvoir faire cette optimisation, on active le module d'optimisation de ellipse. Pour cela il faut préalablement sauver les modèles polynomiaux des surface de réponses (Fenêtre Principale/menu Fichiers/exporter le modèle)

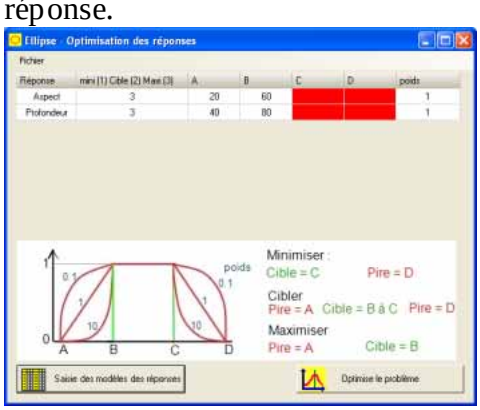
On enregistre ainsi le modèle aspect.eli et le modèle Profondeur.eli

Utilisation du module d'optimisation

On charge le premier modèle (exemple aspect) au démarrage du programme

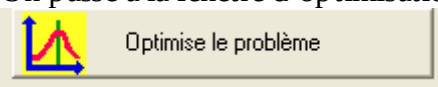


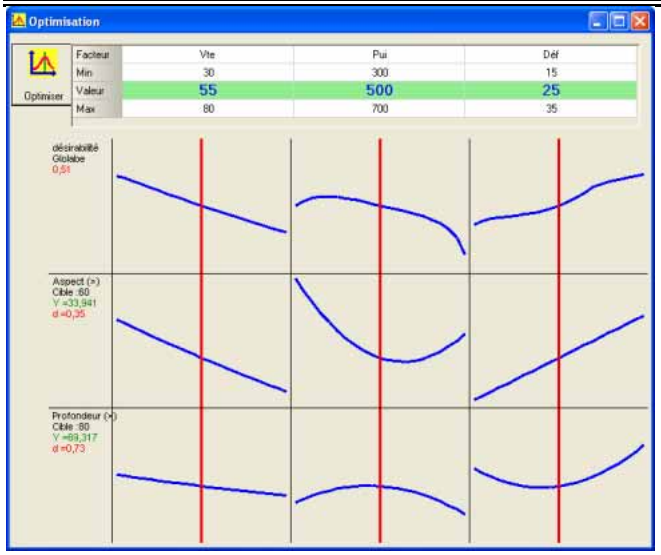
Et par le menu fichier on importe la seconde réponse.



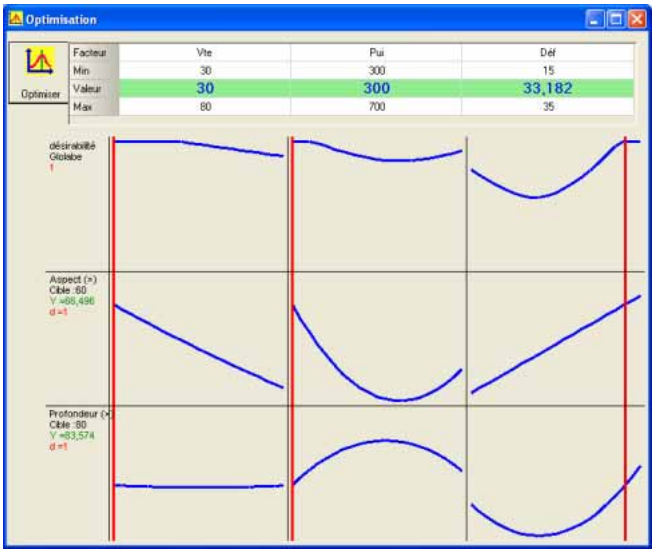
On a ainsi les deux réponses à optimiser avec la définition de leur désirabilité.

On passe à la fenêtre d'optimisation par le bouton





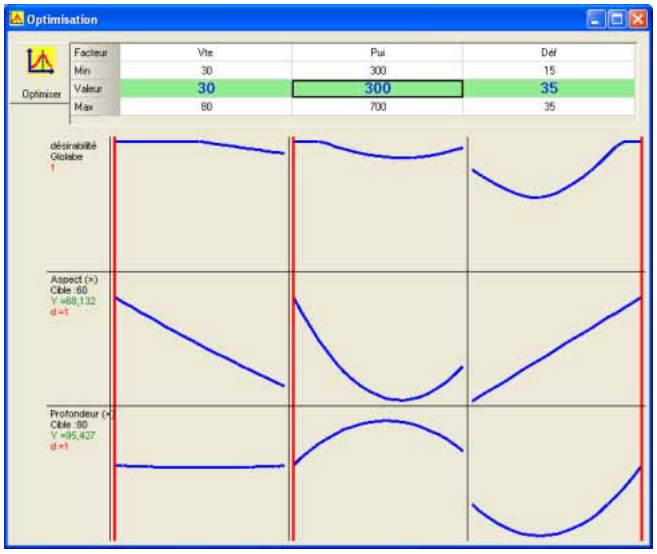
Une première solution optimale est proposée par ellipse en appuyant sur le bouton



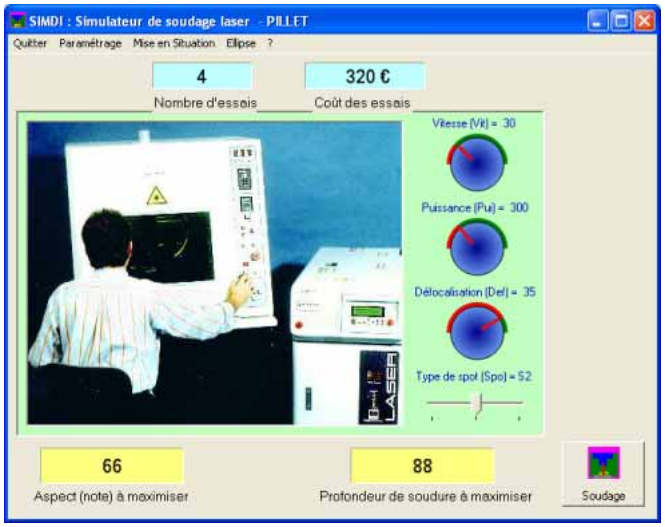
Cette fenêtre montre trois réponses :
La réponse en profondeur
La réponse en aspect
La désirabilité globale que l'on cherche à avoir à 1 : solution qui satisfait à la fois les deux exigences.

En cliquant directement sur le graphique ou en saisissant le valeurs des facteurs dans le tableau, on peut réaliser une optimisation manuelle.

Par exemple, même si la solution proposée par ellipse donne une désirabilité de 1 (critère d'arrêt de l'algorithme de recherche), on peut trouver une solution encore plus satisfaisante :



Que l'on teste sur le simulateur :

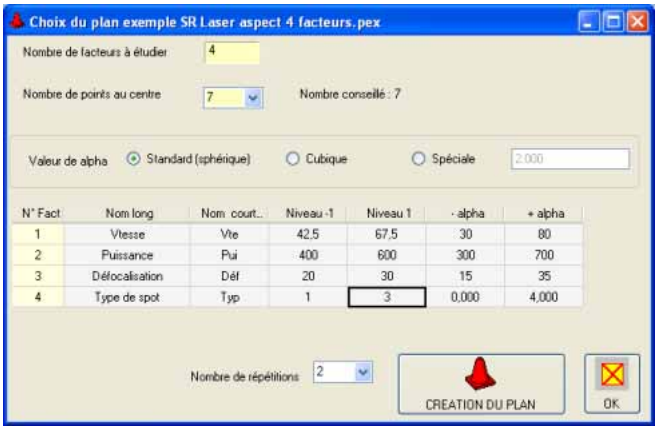


Qui satisfait bien le résultat souhaité aspect > 66 et profondeur > 80, bien qu'aucun des résultat du plan ne donnait satisfaction.

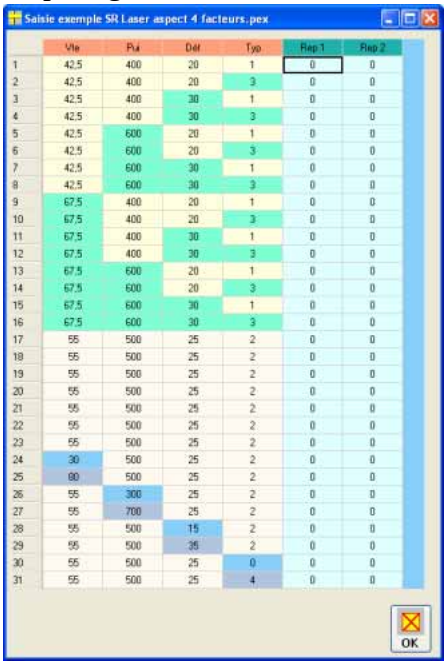
Autres types de plan que l'on peut tester avec le simulateur Laser

Plan en surface de réponses avec 4 facteurs dont un facteur qualitatif

On peut (en modifiant le plan proposé) insérer un facteur qualitatif (type de spot) dans une plan composite centré de la façon suivante :

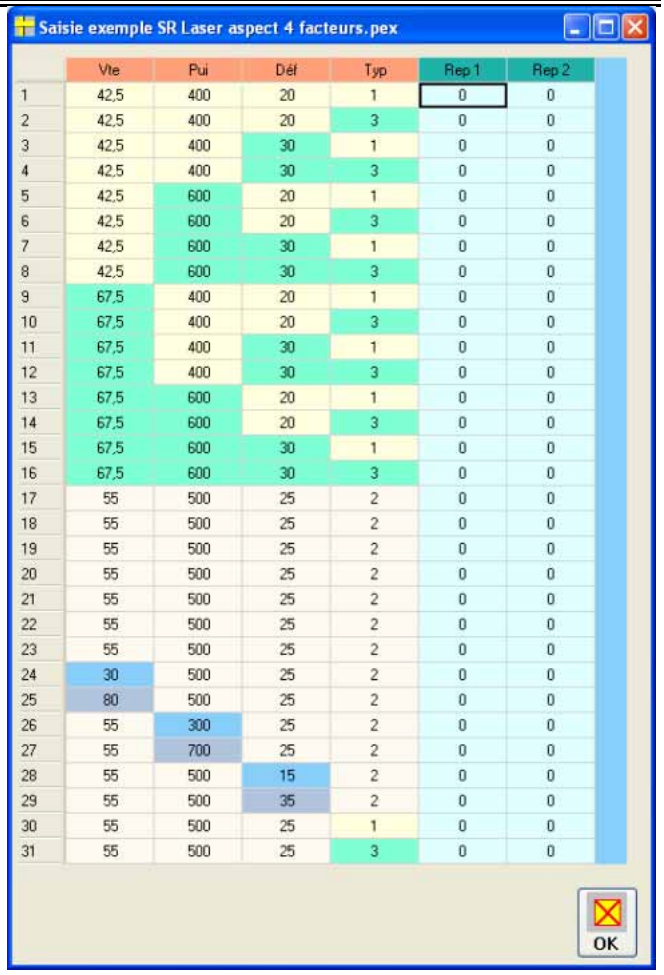


Le plan généré est le suivant



	Vte	Pui	Déf	Typ	Rep 1	Rep 2
1	42,5	400	20	1	0	0
2	42,5	400	20	3	0	0
3	42,5	400	30	1	0	0
4	42,5	400	30	3	0	0
5	42,5	600	20	1	0	0
6	42,5	600	20	3	0	0
7	42,5	600	30	1	0	0
8	42,5	600	30	3	0	0
9	67,5	400	20	1	0	0
10	67,5	400	20	3	0	0
11	67,5	400	30	1	0	0
12	67,5	400	30	3	0	0
13	67,5	600	20	1	0	0
14	67,5	600	20	3	0	0
15	67,5	600	30	1	0	0
16	67,5	600	30	3	0	0
17	55	500	25	2	0	0
18	55	500	25	2	0	0
19	55	500	25	2	0	0
20	55	500	25	2	0	0
21	55	500	25	2	0	0
22	55	500	25	2	0	0
23	55	500	25	2	0	0
24	30	500	25	2	0	0
25	80	500	25	2	0	0
26	55	300	25	2	0	0
27	55	700	25	2	0	0
28	55	500	15	2	0	0
29	55	500	35	2	0	0
30	55	500	25	0	0	0
31	55	500	25	4	0	0

Le type de spot n'ayant que 3 niveaux, on modifie les deux dernier essais pour les ramener aux trois niveaux testables



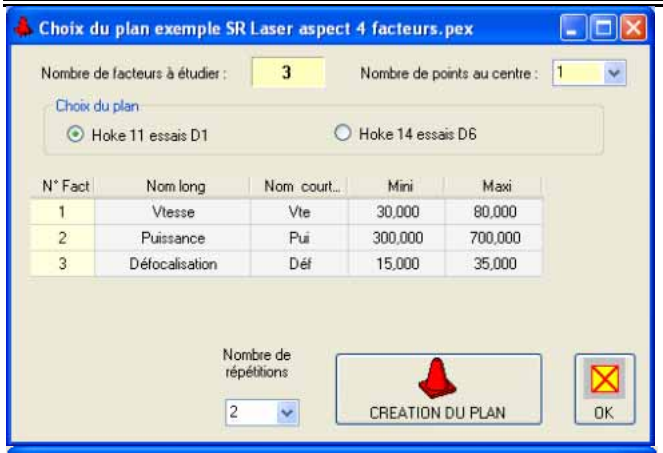
	Vte	Pui	Déf	Typ	Rep 1	Rep 2
1	42,5	400	20	1	0	0
2	42,5	400	20	3	0	0
3	42,5	400	30	1	0	0
4	42,5	400	30	3	0	0
5	42,5	600	20	1	0	0
6	42,5	600	20	3	0	0
7	42,5	600	30	1	0	0
8	42,5	600	30	3	0	0
9	67,5	400	20	1	0	0
10	67,5	400	20	3	0	0
11	67,5	400	30	1	0	0
12	67,5	400	30	3	0	0
13	67,5	600	20	1	0	0
14	67,5	600	20	3	0	0
15	67,5	600	30	1	0	0
16	67,5	600	30	3	0	0
17	55	500	25	2	0	0
18	55	500	25	2	0	0
19	55	500	25	2	0	0
20	55	500	25	2	0	0
21	55	500	25	2	0	0
22	55	500	25	2	0	0
23	55	500	25	2	0	0
24	30	500	25	2	0	0
25	80	500	25	2	0	0
26	55	300	25	2	0	0
27	55	700	25	2	0	0
28	55	500	15	2	0	0
29	55	500	35	2	0	0
30	55	500	25	1	0	0
31	55	500	25	3	0	0

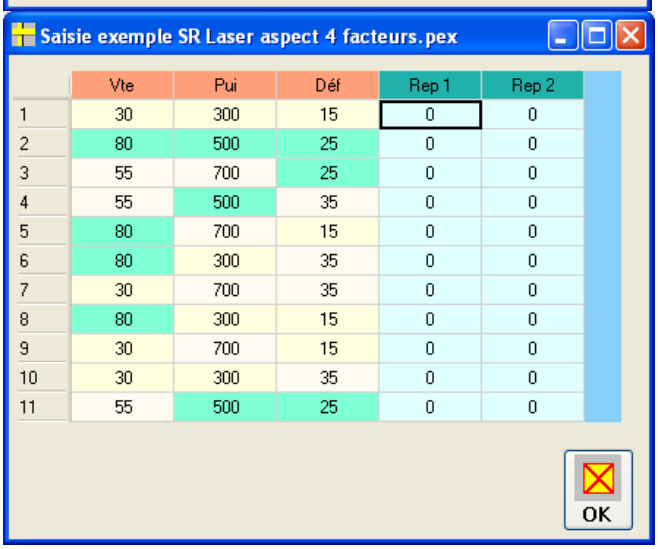
Le traitement du plan se réalise ensuite de la même façon que précédemment. Attention cependant à l'interprétation du facteur « type de spot ».

Dans ce cas même si Ellipse représente une surface de réponses, seuls les niveaux 1 2 et 3 doivent être pris en compte. Le niveau 1.5 n'a bien sûr pas de signification.

Plan hybide avec 3 facteurs dont un facteur qualitatif

L'intérêt de ce type de plan est de réduire de façon importante le nombre d'essais à réaliser. On peut demander aux étudiants de comparer les résultats obtenus avec le plan composite précédent (20 essais) et le plan hybride suivant (11 Essais)





On notera la plus faible précision sur le domaine d'étude, mais le compromis trouvé par ce type de plan reste toutefois excellent.

SIMDI - SIMPLEXE

« Les élèves apprennent à trouver un optimum par la méthode du simplexe»

Objectifs du simulateur

Le marin sur son bateau doit rechercher le point le plus (ou le moins) profond. Pour cela il peut mesurer à chaque endroit la profondeur. Le but est de trouver l'optimum en un minimum d'essais.

Ce jeu pédagogique permet de simuler les différentes étapes de la construction, de la réalisation, et de l'interprétation d'une optimisation par la méthode du simplexe.

Apport pédagogique de la séquence de formation

- Connaissance d'un stratégie d'optimisation très utilisée
- Comprendre la logique de la méthode du simplexe
- Savoir faire évoluer un simplexe (modification de pas, contraction…)

Bibliographie utile

Les plans d'expériences, une approche pragmatique et illustrée – Expérimentique – François Louvet & Luc Delplanque - 2005

Exemple d'utilisation

Dans un premier temps on demande aux stagiaires de trouver le point le plus profond par tatonnement.

Chaque fois qu'une mesure est réalisée, il apparaît un point avec la profondeur.

Il est possible d'afficher la liste des essais à partir du menu "Affichage/Historique"

historique1

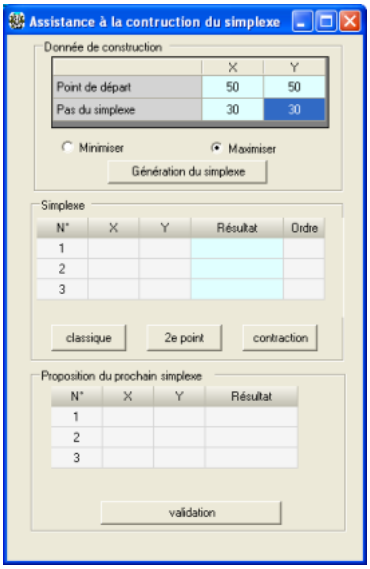
N°	X	Y	Profondeur
1	50	50	52
2	75	58	100
3	65	75	111
4	84	82	95
5	67	87	112
6	51	74	105
7	58	82	109
8	19	52	39

Cette méthode permet de trouver un optimum mais demande de très nombreux essais.
Le Jeux consiste à mettre en œuvre la méthode du simplexe ou la méthode EVOP pour trouver le point le plus (ou le moins) profond.

Utilisation du simplexe

On peut construire le simplexe à partir du menu "génération des simplexes"

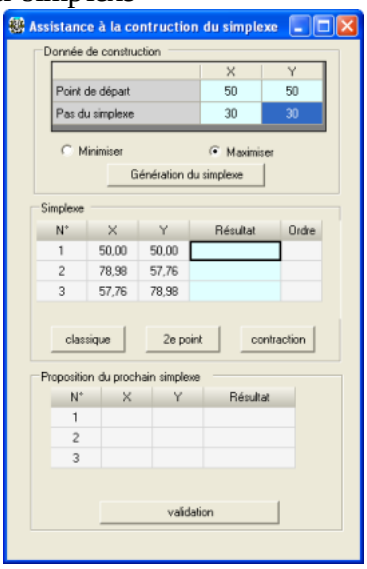
On peut préalablement effacer les points avec le menu "Affichage/Effacer Points"



Pour construire le premier simplexe, on doit donner :

- Le point de départ (par exemple le centre de la zone 50 ; 50)
- Le pas du simplexe (assez grand au départ entre 20 et 30)

On choisit l'option "Maximiser" et on génère le premier simplexe



Les trois essais du simplexe de départ sont à réaliser en mesurant la profondeur pour chacun des points. On saisie les résultats dans la zone bleue.

Simplexe

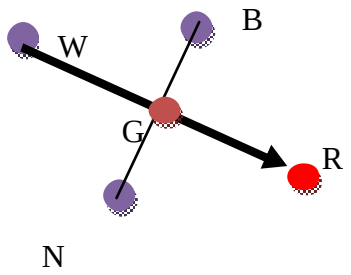
N°	X	Y	Résultat	Ordre
1	50,00	50,00	52	W
2	78,98	57,76	99	N
3	57,76	78,98	110	B

classique | 2e point | contraction

Le point W est le pire (Worst), le B est le meilleur (Best). L'ordre est trouvé automatiquement.

Génération du prochain point (Méthode classique)

On génère le prochain point en calculant l'image du pire des points par rapport au centre de gravité des meilleurs points :



Centre de gravité G=(B+N)/2

B	57.76	78.98
N	78.98	57.76
W	50.00	50.00
G	68.37	68.37

Le nouveau point R (Reflex) est alors :

Reflex R=G+(G-W)

G-W	18.37	18.37
G+(G-W)	86.74	86.74

Simplexe

N°	X	Y	Résultat	Ordre
1	50,00	50,00	52	W
2	78,98	57,76	99	N
3	57,76	78,98	110	B

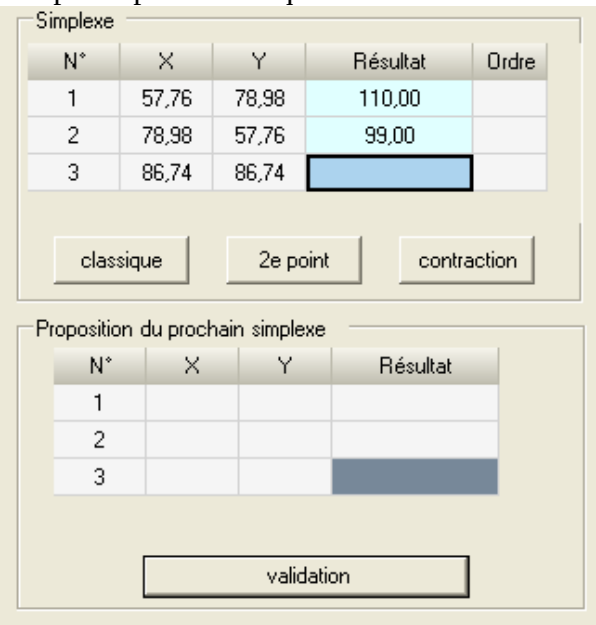
classique | 2e point | contraction

Proposition du prochain simplexe

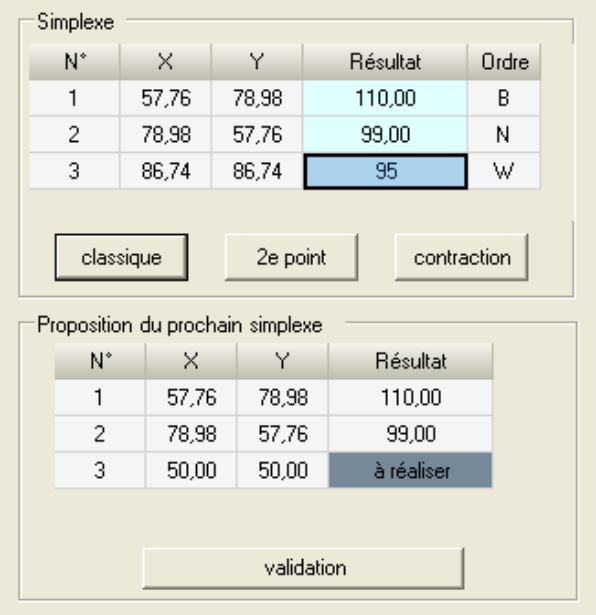
N°	X	Y	Résultat
1	57,76	78,98	110,00
2	78,98	57,76	99,00
3	86,74	86,74	à réaliser

validation

Si le point est dans la zone possible, on accepte le point en cliquant sur "Validation"

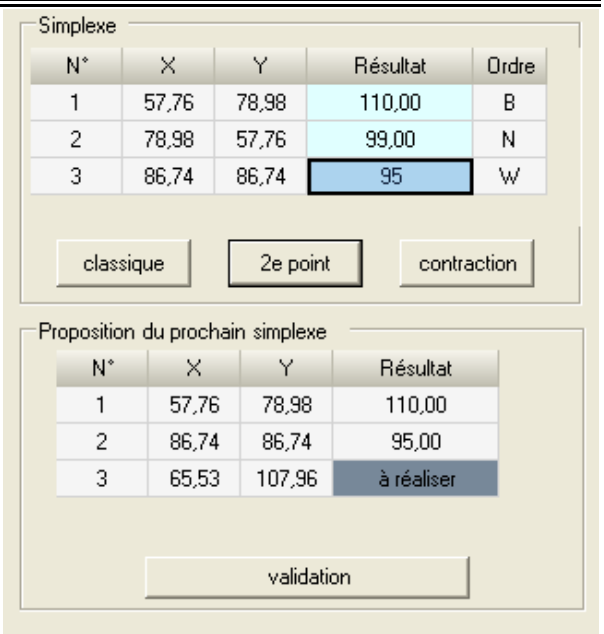


Il faut alors réaliser le prochain point :



Le point suivant est déjà réalisé ou est en dehors de la zone possible :

On peut générer un autre point en prenant non pas le point W, mais le second plus mauvais point (On clique sur "2e Point")



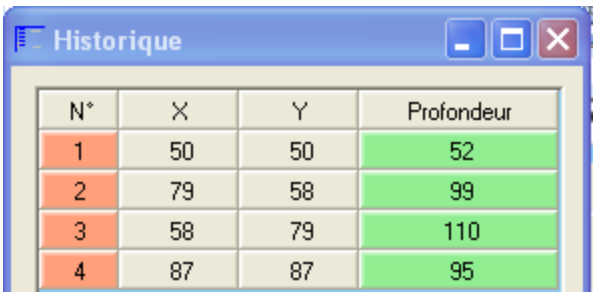
Dans ce cas le point n'est pas réalisable (en dehors de la zone)

On peut prendre la méthode de la contraction en calculant le point C :

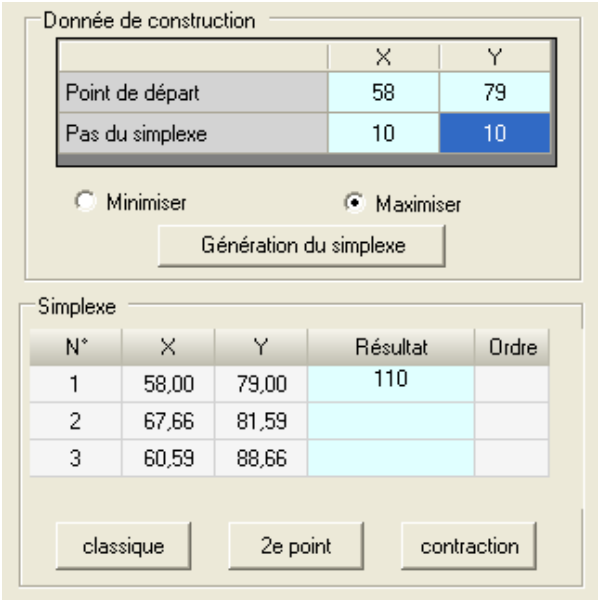
C=G-0.5(G-W)

Ou générer un nouveau simplexe en prenant comme point de départ le meilleur des points réalisés précédemment, et en diminuant le pas.

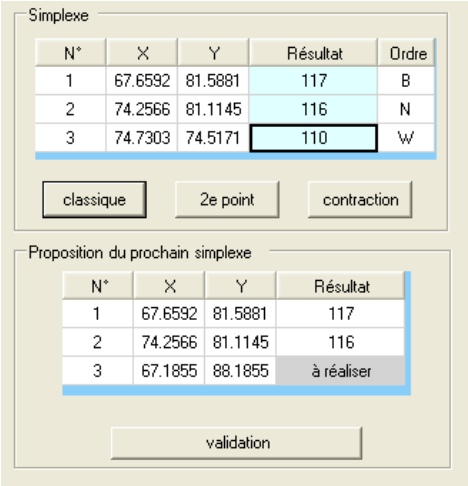
Dans notre cas :



Le meilleur point est 58 ; 79, on prend un pas de 10



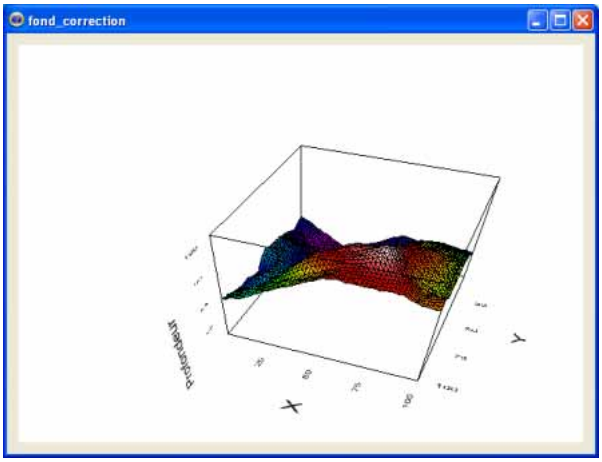
On recommence la procédure



On s'arrête lorsque le point maximal est entouré de point testé et que le pas est jugé suffisant. Le stagiaire peut voir facilement l'évolution des différents simplexes testés

Dans ce cas notre optimum serait de 117 pour les coordonnées 68;82.
Le vrai optimum est pour 70; 80 pour ce fond.

On peut voir l'image réelle du fond à condition de connaître le mot de passe "simdi" à partir du menu "Affichage/Vue 3D du Fond"



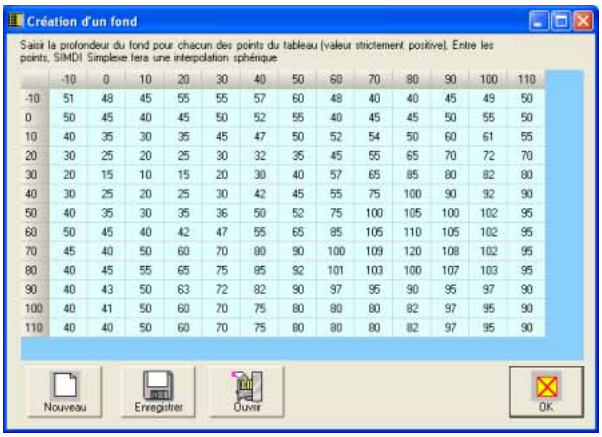
Avec le bouton droit de la souris, on peut faire le zoom, avec le bouton gauche, on peut faire tourner le repère.

Bien sur le même fond peut servir pour chercher le point le moins profond (minimisation).

Modification du fond

SIMDI Simplexe est livré avec deux types de fond par défaut.

Il est possible pour le professeur de créer ses propres fonds soit en les modifiant, soit en saisissant une grille de fond.
On accède à cette possibilité par le menu "Fichiers/Créer Modifier"



	-10	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100	110
-10	51	48	45	55	55	57	60	48	40	40	45	49	50
0	50	45	40	45	50	52	55	40	45	45	50	55	50
10	40	35	30	35	45	47	50	52	54	50	60	61	55
20	30	25	20	25	30	32	35	45	55	65	70	72	70
30	20	15	10	15	20	30	40	57	65	85	80	82	80
40	30	25	20	25	30	42	45	55	75	100	90	92	90
50	40	35	30	35	36	50	52	75	100	105	100	102	95
60	50	45	40	42	47	55	65	85	105	110	105	102	95
70	45	40	50	60	70	80	90	100	109	120	108	102	95
80	40	45	55	65	75	85	92	101	103	100	107	103	95
90	40	43	50	63	72	82	90	97	95	90	95	97	90
100	40	41	50	60	70	75	80	80	80	82	97	95	90
110	40	40	50	60	70	75	80	80	80	82	97	95	90

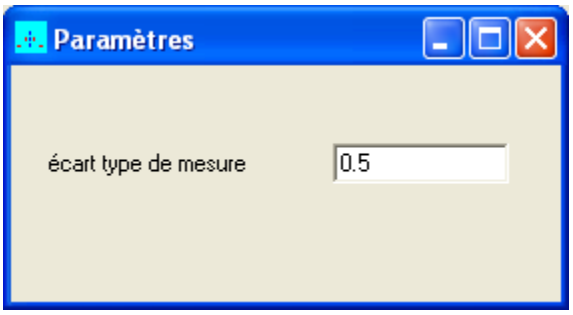
On saisi alors le fond pour chaque nœud d'un maillage de 10, y compris au-delà de la zone mesurable. SIMDI Simplexe se charge de faire une interpolation quadratique entre les points.

On peut par exemple facilement montrer la difficulté d'utilisation de la méthode en présence de quelques optimum locaux.

Chaque grille modifiée peut alors être sauvegardée sous forme d'un fichier ***nom.sim*** qui pourra être relu.

Modification de la dispersion

Par défaut, l'écart type de mesure est de 0.5.
On peut modifier ce paramètre à partir du menu "Fichiers/paramètres"



En augmentant la dispersion, on peut également montrer les difficultées de convergence de la méthode dans le cas d'une forte dispersion de mesure.

Méthode EVOP (Evolutionnary Opération)

L'approcheEVOP permet également de faire ce type d'optimisation.

Donnée de construction

	X	Y
Point de départ	50	50
Pas du simplexe	30	30

Minimiser Maximiser

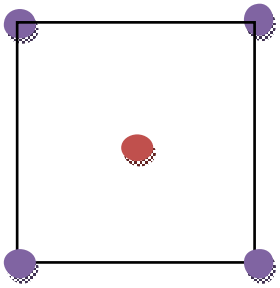
Génération du simplexe

Plan factoriel 2²

N°	X	Y	Résultat	Ordre
1	50	50		
2	20	20		
3	20	80		
4	80	20		
5	80	80		

Evolution classique Entourer le meilleur

On prend un point de départ et un pas comme dans l'approche du simplexe. On génère un plan d'expériences complet entourant le point de départ.



Plan factoriel 2²

N°	X	Y	Résultat	Ordre
1	50	50	52	N
2	20	20	25	W
3	20	80	65	N
4	80	20	66	N
5	80	80	100	B

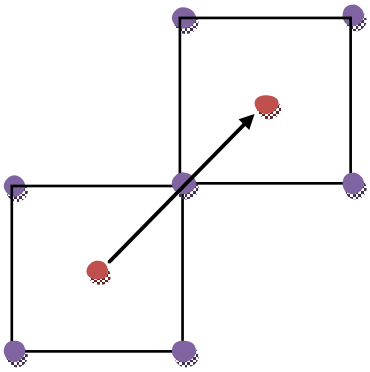
Evolution classique Entourer le meilleur

Proposition du prochain plan

N°	X	Y	Résultat
1	110	110	à réaliser
2	80	80	100
3	80	140	à réaliser
4	140	80	à réaliser
5	140	140	à réaliser

validation

L'évolution classique consiste à créer un nouveau plan d'expérience autour d'un point dans la direction du meilleur résultat. On récupère un point dans la précédente campagne.



Avec le pas que l'on a pris les points suggérés sont à l'extérieur du domaine. On peut donc prendre la seconde stratégie qui consiste à entourer le meilleur point. On récupère deux point de la précédente campagne.

Plan factoriel 2²

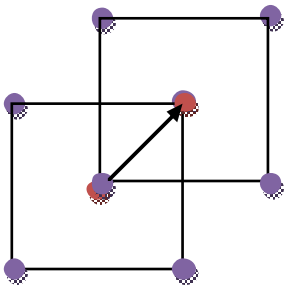
N°	X	Y	Résultat	Ordre
1	50	50	52	N
2	20	20	25	W
3	20	80	65	N
4	80	20	66	N
5	80	80	100	B

Evolution classique | Entourer le meilleur

Proposition du prochain plan

N°	X	Y	Résultat
1	80	80	100
2	50	50	52
3	50	110	à réaliser
4	110	50	à réaliser
5	110	110	à réaliser

validation



Avec le pas choisi, cette stratégie donne également des point à tester en dehors du domaine, on passe alors à la troisième stratégie posssible qui consiste à refaire une génération de plan autour du meilleur point, mais avec un pas plus faible.

Assistance à la contruction des plans EVOP

Donnée de construction

	X	Y
Point de départ	80	80
Pas du simplexe	5	5

Minimiser | Maximiser

Génération du simplexe

Plan factoriel 2²

N°	X	Y	Résultat	Ordre
1	80	80	100	N
2	75	75	110	N
3	75	85	112	B
4	85	75	96	W
5	85	85	96	N

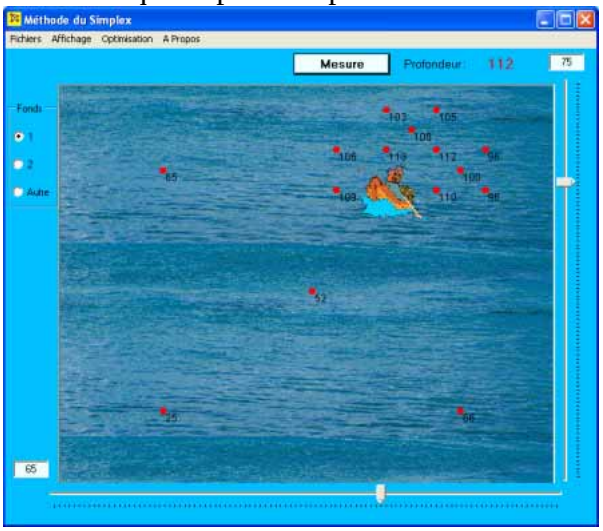
Evolution classique | Entourer le meilleur

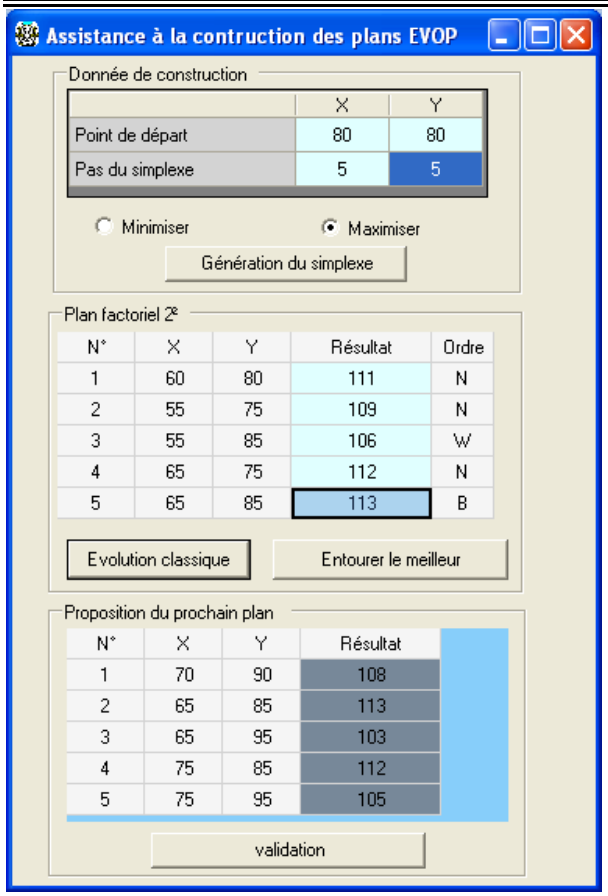
Proposition du prochain plan

N°	X	Y	Résultat
1	70	90	à réaliser
2	65	85	à réaliser
3	65	95	à réaliser
4	75	85	112
5	75	95	à réaliser

validation

La méthode se termine lorsque l'on trouve une évolution qui ne possède plus d'essai à tester.

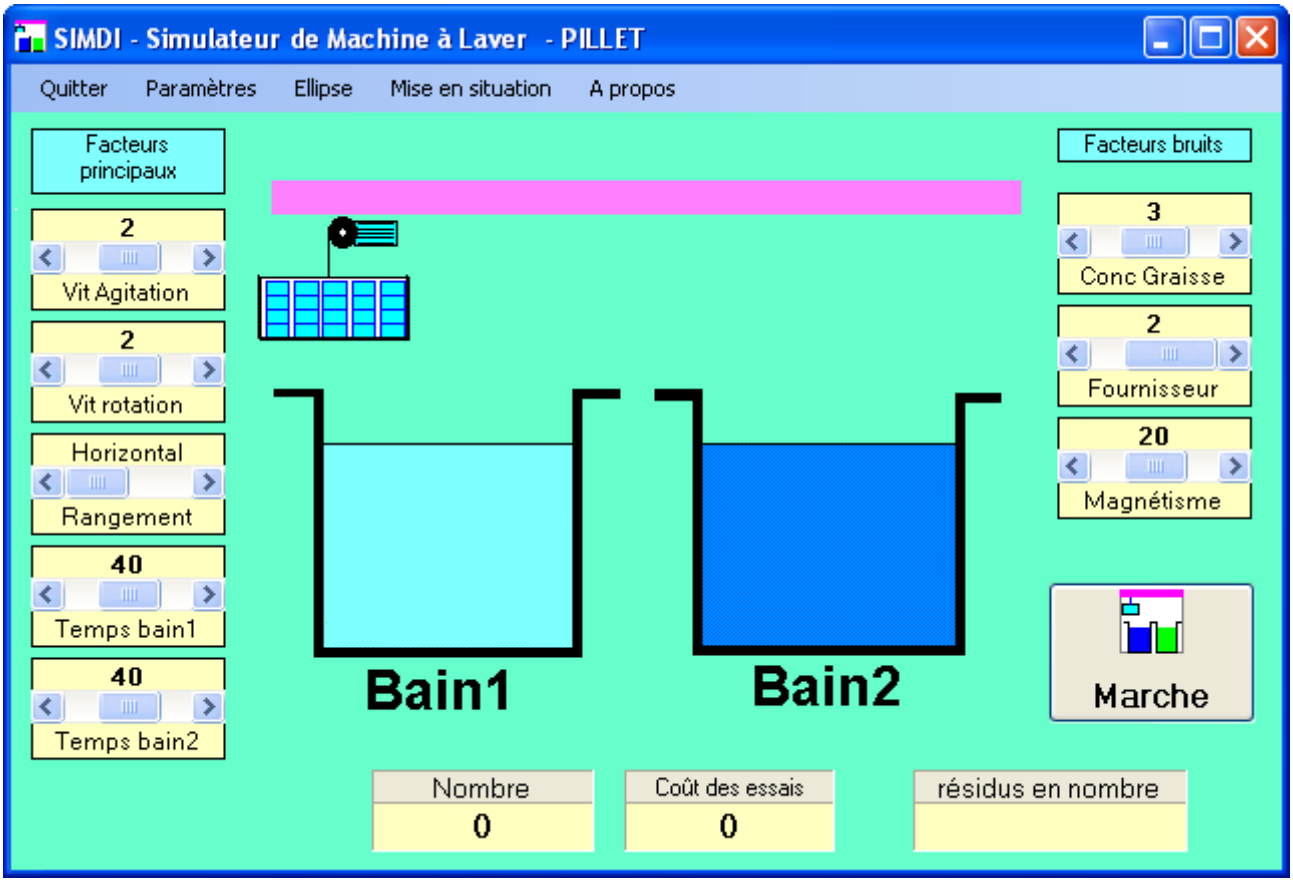




On peut continuer éventuellement en prenant un nouveau point de départ avec un pas encore plus fin.

SIMDI - Machine à Laver industrielle

« Les élèves apprennent à réaliser un plan d'expériences produit de Taguchi»



Objectifs du simulateur

Simuler les différentes étapes de la construction, de la réalisation, et de l'interprétation d'un plan d'expériences produit de Taguchi.

Apport pédagogique de la séquence de formation

- montrer la différence entre un facteur pilotable et un facteur bruit ;
- développer la compréhension de l'intérêt de réaliser un plan d'expériences produit ;
- réalisation d'un plan produit ;
- minimisation du nombre d'essais dans un plan produit.

Bibliographie utile :

« Les plans d'expériences par la méthode Taguchi » - Maurice PILLET - - Editions d'organisation

Guide de mise en place du travail pratique

Le TP tel qu'il est présenté dans cette fiche se déroule sur une période de deux heures.

Création du plan produit

Le groupe de stagiaires analyse les facteurs principaux et les facteurs bruits afin de créer le plan principal et le plan bruit.

Suivant les considérations sur les interactions et le nombre de niveaux, le plan principal peut faire 8, 12, 16 ou 18 essais. De même, suivant la complexité du modèle sur le plan bruit, on peut créer de 2 à 8 répétitions pour étudier l'influence du bruit. En combinant le plan principal et le plan bruit, on peut donc résoudre ce problème en 16 essais au minimum ou en 144 essais. D'où l'intérêt d'une étude fine afin de déterminer le plan le mieux adapté.

On orientera les élèves vers un plan très fractionnaire à huit essais pour le plan principal, en faisant des hypothèses fortes sur les interactions, tout en se réservant la possibilité de désaliasser le plan en continuant sur une table L_{16}. Le but de cette étude est de minimiser la réponse, pas de connaître le modèle de comportement du système, on peut prendre plus de risques par rapport aux interactions.

Pour le plan produit, on a intérêt à regrouper les facteurs bruits en un seul facteur. Une petite étude de deux essais peut permettre de conclure que les deux fournisseurs n'ont pas une grande influence. On étudiera donc comme facteur bruit :

	Concent graisseuse	Magnétisme
Bruit 1	Faible	Faible
Bruit 2	Forte	Forte

Le plan produit comportera donc 8 x 2 = 16 essais qui permettent d'optimiser le système et de laver correctement les pièces à moindre coût et de façon robuste.

Interactions programmées

Phase 1
Interactions Vitesse de rotation/temps 1, Temps 1/Temps2 et Rangement/Temps 2 .
Il n'y a pas d'interaction entre les facteurs principaux et les facteurs bruits.

Phase 2
Interactions Vitesse de rotation/temps 1 - Temps1/Temps2 et Rangement/Temps2.

Il existe des interactions entre les facteurs principaux et les facteurs bruits.
Temps 2/Magnétisme - Matière/Temps 1 - Vitesse rotation/Concentration graisseuse - Vitesse Rotation/Magnétisme.

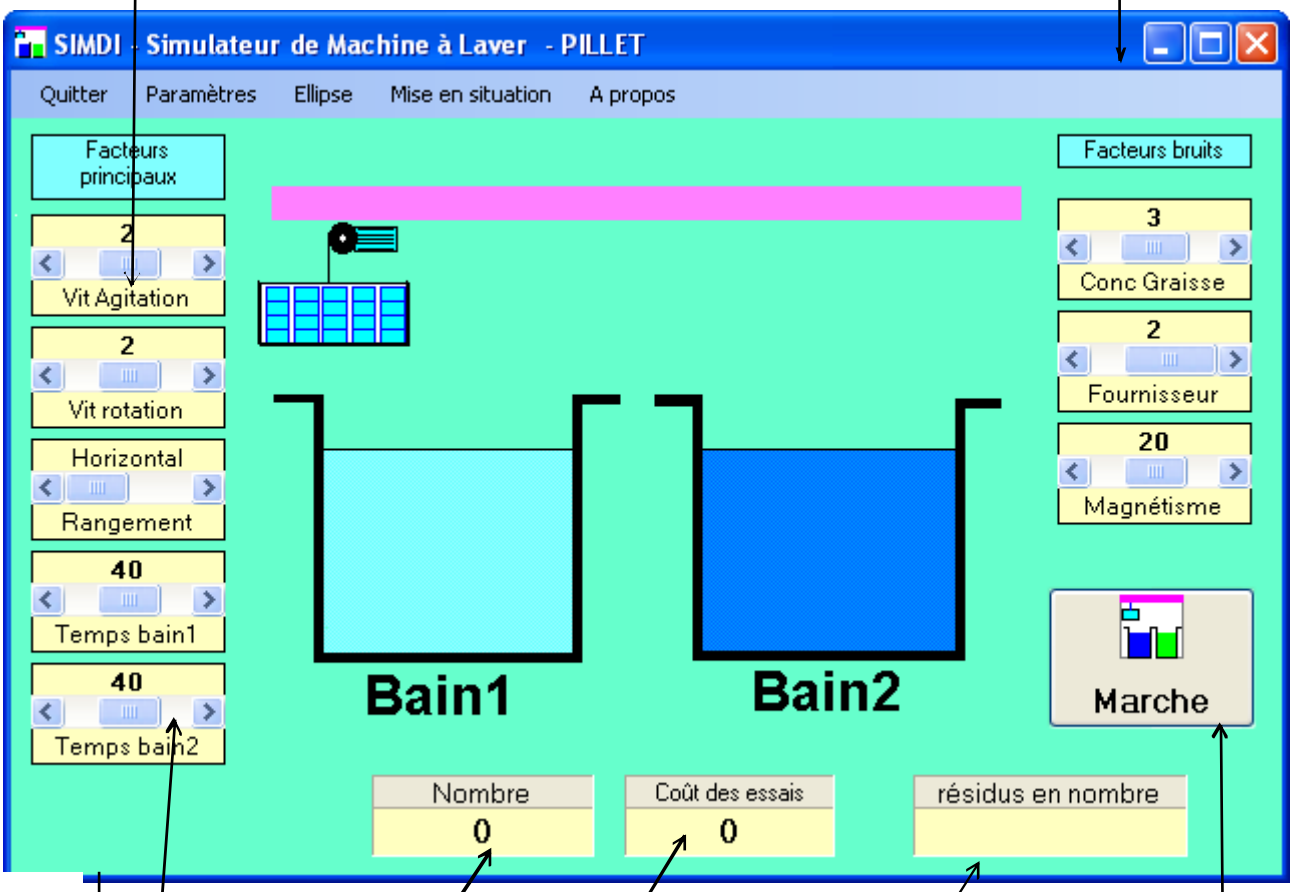
Fonctionnalités de l'écran

Facteurs principaux :

- vitesse d'agitation du bain ;
- vitesse de rotation du bain ;
- rangement des pièces dans le panier ;
- temps dans le bain 1 (à minimiser) ;
- temps dans le bain 2 (à minimiser).

Facteurs bruits :

- concentration graisseuse, indique le pourcentage d'huile de coupe résiduelle présente dans les paniers avant lavage ;
- fournisseur, il y a deux fournisseurs différents pour cette matière ;
- magnétisme résiduel de la matière.



net de modifier le
au des facteurs

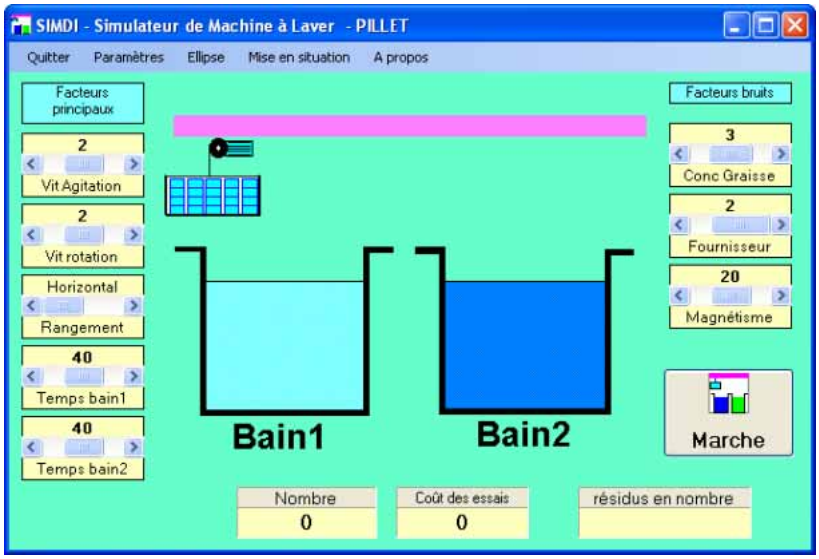
Nombre d'essais réalisés

Coût total des essais

Donne le nombre des résidus de lavage après filtration des pièces lavées

Mise en marc
de lavage

SIMDI MAL - FICHE d'informations



Objectifs de l'expérimentation

Vous êtes responsable du secteur lavage dans l'entreprise SIMDI. L'objectif de la machine à laver est de dégraisser complètement les pièces contenues dans un panier, et d'enlever tous les micro-copeaux qui restent accrochés aux pièces après l'usinage.

Les réglages actuels de la machine à laver sont ceux indiqué lors du lancement de SIMDI.

- Vitesse d'agitation = 2
- Vitesse de rotation = 2
- Type de rangement des pièces dans le panier = 1
- Temps de passage dans les bains = 40 secondes

Pour vérifier la propreté des pièces après lavage, on opère un nettoyage manuel des pièces dans un produit décapant, et on filtre le produit de nettoyage. Le résultat est le poids de particules résiduelles enlevées par le lavage manuel.

Les paniers se présentent dans des conditions très différentes selon les lots :

- la concentration graisseuse des pièces est variable en fonction du temps d'égouttage qui s'est écoulé entre l'usinage des pièces et le lavage ;
- le magnétisme des pièces varie en fonction des lots, et a tendance à retenir les micro copeaux ;
- la matière peut provenir de deux fournisseurs différents.

Un bon lavage doit être capable de laver correctement tous les types de pièces, même les plus sales, et évidemment ne pas polluer des pièces propres au départ. On considère que si les résidus de lavage sont inférieurs à 3, le lavage est correct.

Pour améliorer les conditions de fonctionnement de cette machine, on veut réaliser un plan d'expériences sachant que :

- l'agitation du bain semble nécessaire, mais on se demande si dans le cas de pièces propres, elle ne pollue pas le bain en maintenant des particules en suspension ;
- on ignore la réelle efficacité de la rotation ;
- on propose un autre type de rangement des pièces dans le panier ;
- on cherche à minimiser les temps dans la machine à laver afin de gagner en productivité.

SIMDI Machine à laver - Fiche de calculs

Détermination d'un plan d'expériences principal

Facteurs		Difficultés	Symbole
A			
B			
C			
D			
E			

Interactions supposées

Graphe associé

Graphe de Taguchi Table .....

Affectation des colonnes

Facteurs	colonnes
A	
B	
C	
D	
E	

Détermination d'un plan d'expériences bruit

Facteurs		Difficultés	Symbole
S			
T			
U			

Interaction supposée

Graphe associé

Graphe de Taguchi table .....

Affectation des colonnes

Facteurs	colonnes
S	
T	
U	

1. Réalisation du plan d'expériences

					S T U		
N°	A	B	C	D	E		S/N
1							
2							
3							
4							
5							
6							
7							
8							
9							
10							
11							
12							
13							
14							
15							
16							
				Total			

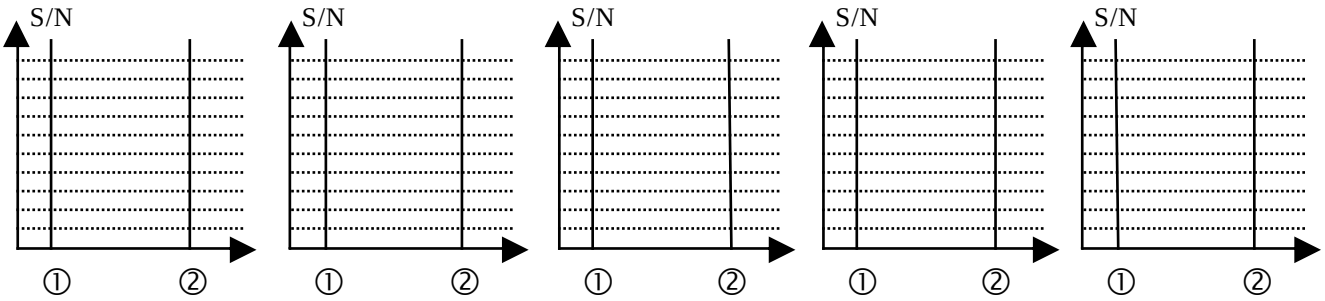
2. Interprétation du plan

Tableaux des moyennes

Moyenne générale de tous les essais : .....

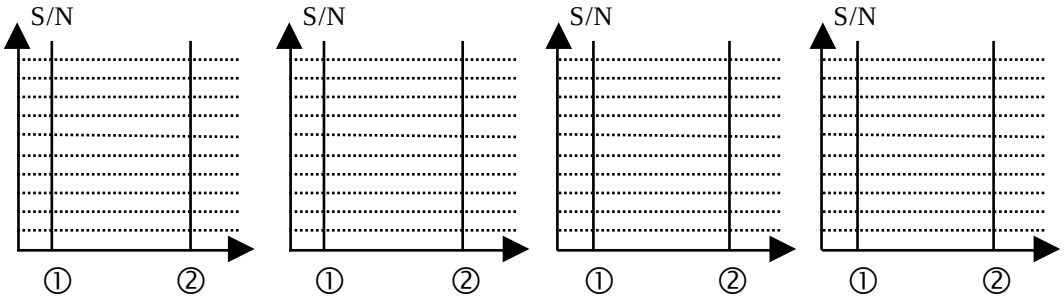
N 1					
N 2					

Graphe des effets



Effet de Effet de Effet de Effet de Effet de

Graphe des interactions significatives



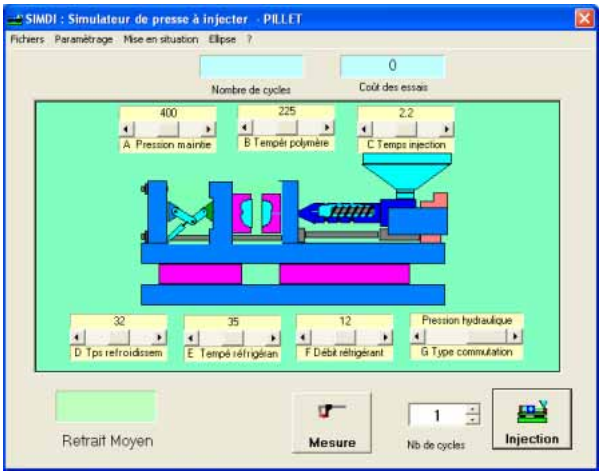
Interaction Interaction Interaction Interaction

Modèle matriciel

Solution optimale

SIMDI - Presse à injecter

« Les élèves apprennent à réaliser un plan d'expériences portant sur de nombreux facteurs»



Objectifs du simulateur

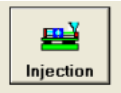
Simuler les différentes étapes de la construction, de la réalisation, et de l'interprétation d'un plan d'expériences dans le cas où de nombreux facteurs interviennent.
Dans ce problème, on cherche à :

- Hierarchiser l'influence relative des facteurs sur le retrait de la matière plastique après injection.
- Trouver la configuration qui donne le moins de retrait sans trop perdre en productivité (Temps de cycle)

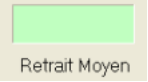
Apport pédagogique de la séquence de formation

- Mise en place d'un plan d'expériences sur un processus comportant de nombreux facteurs

Fonctionnalités du logiciel



Lance un cycle d'injection pour fabriquer une pièce. A la fin de la simulation, le pourcentage de retrait apparaît dasn le cadre

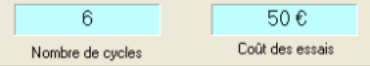


Deux injections consécutives avec le même configuration des facteurs ne donne pas forcément le même résultat.

Nombre de cycles de production lancés

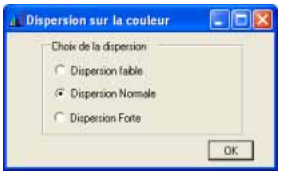
Mesure des cotes sur les pièces fabriquées

Permet de modifier le niveau du facteur. Dans cette simulation, les extrême possible sont des extrêmes réalistes. On peut donc se placer au mini ou au maxi des plages possibles.



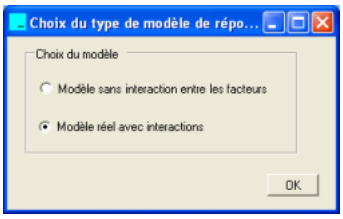
Compteur indiquant le nombre d'essais, et le coût total en fonction du nombre d'injections

Menu Paramétrage/Dispersion



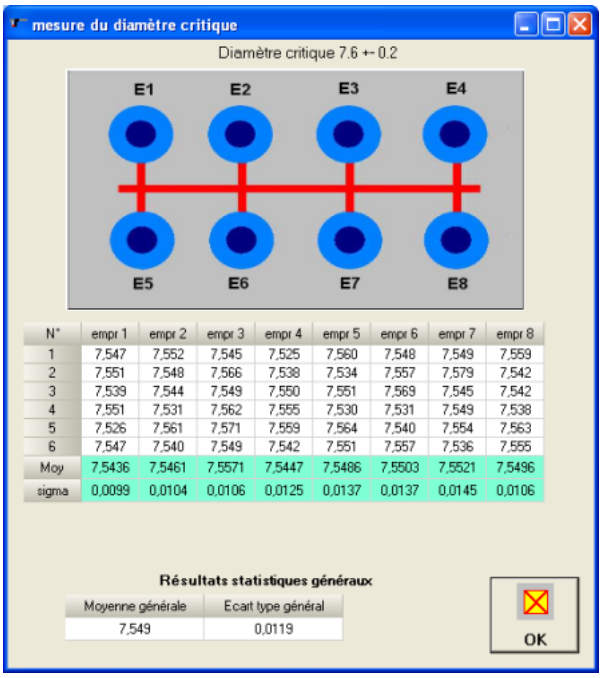
Par défaut, le modèle comporte les interactions rencontrées dans ce type de problème. On peut les supprimer en sélectionnant la puce correspondante.

Menu Paramétrage/Modèle



Cette fonctionnalité permet de sélectionner l'imposrtance de la dispersion dans les réponses. Par défaut, la dispersion est conforme à la dispersion observée sur ce type de procédé.

Mesure des caractéristiques



N°	empr 1	empr 2	empr 3	empr 4	empr 5	empr 6	empr 7	empr 8
1	7,547	7,552	7,545	7,525	7,560	7,548	7,549	7,559
2	7,551	7,548	7,566	7,538	7,534	7,557	7,579	7,542
3	7,539	7,544	7,549	7,550	7,551	7,569	7,545	7,542
4	7,551	7,531	7,562	7,555	7,530	7,531	7,549	7,538
5	7,526	7,561	7,571	7,559	7,564	7,540	7,554	7,563
6	7,547	7,540	7,549	7,542	7,551	7,557	7,536	7,555
Moy	7,5436	7,5461	7,5571	7,5447	7,5486	7,5503	7,5521	7,5496
sigma	0,0099	0,0104	0,0106	0,0125	0,0137	0,0137	0,0145	0,0106

Après injection outre le retrait, on peut mesurer sur chacune des 8 empreintes une caractéristique dimensionnelle dont la cote est de 7.6±0.2.

Exemple de TP à réaliser avec presse

1. Réalisation d'un plan de balayage pour hierarchiser l'influence des différents paramètres sur le retrait
2. Plan d'expérience complet sur les trois premiers facteurs dans le but d'une initiation aux plans complet
3. Modélisation du comportement de l'ensemble des facteurs avec une table L16 à 2 niveaux en résolution IV (colonnes impaires de la table L16 de Taguchi)
4. Rechercher à améliorer la capabilité sur la caractéristique mesurée en regardant l'influence sur la moyenne et sur la dispersion de l'ensemble des facteurs
5. Réalisation d'un plan produit de Taguchi pour réduire la perte sur la variable mesurée.

Nous donnons en exemple les deux premiers type de TP que l'on peut réaliser.

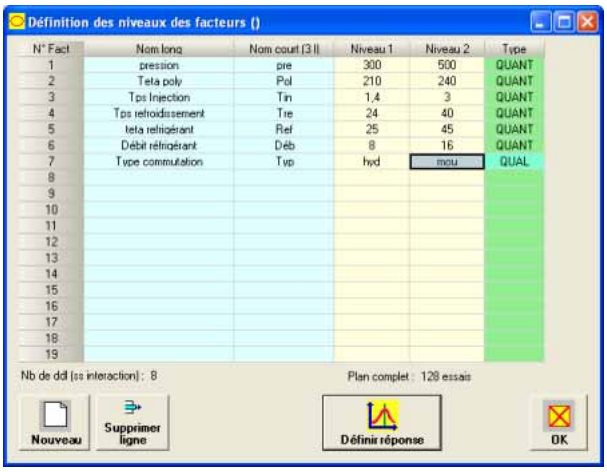
Menu ELLIPSE

Ce menu permet d'accéder au logiciel de traitement des plans d'expériences ELLIPSE Plan Taguchi.

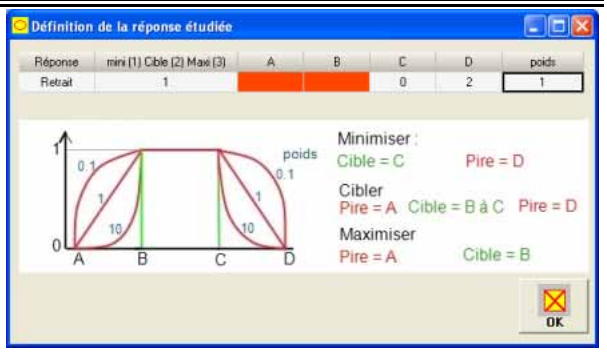
Pour plus de détail sur ELLIPSE, On se réferrera à sa documentation.

Un des plans intéressant à traiter avec ce simulateur est le plan de balayage de Taguchi, la table L12 soit un plan factoriel à 2 niveaux.

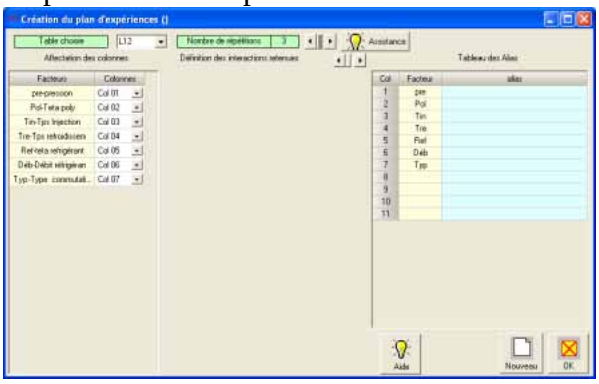
On défini les facteurs de la façon suivante :



Et la réponse

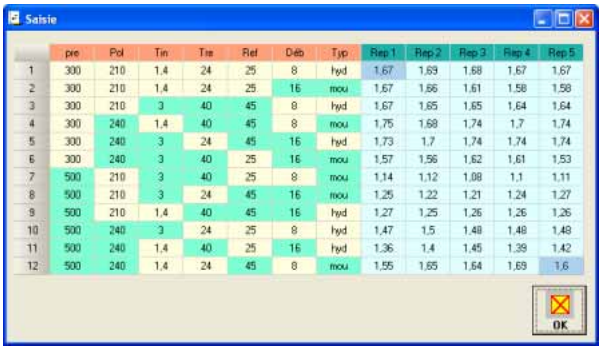


Le plan est définit par :

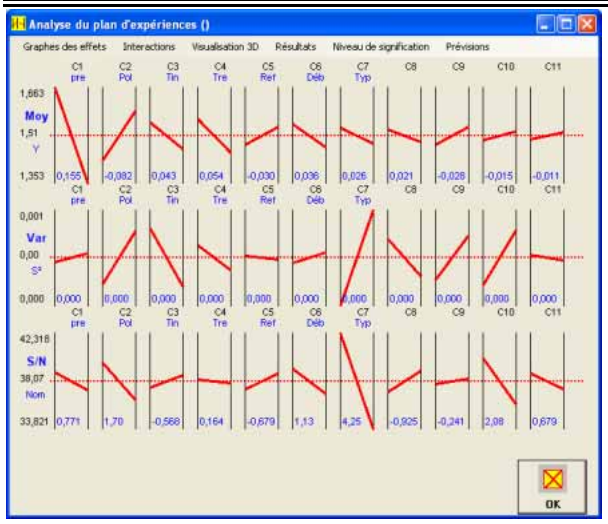


On fait 3 répétitions pour optimiser à la fois la moyenne du retrait, mais également la variance (optimisation double en moyenne et en variance de Taguchi)

Conduite des Essais



Dépouillement et interprétation :



On sort le graphe des effets en moyenne, en variance, et en S/N (ratio Signal/Bruit) de Taguchi.

On note que les colonnes 8, 9, 10 ou il n'y a aucun facteur sont néanmoins très actives. Il est délicat d'interpréter le sens de ces colonnes.

On note que les facteur Pression de Maintien et température du polymère agissent sur la moyenne du retrait, par contre le choix de la pression de commutation influe sur la variance. Il faut donc placer ce facteur prioritairement sur le niveau 1 : « Hydraulique »

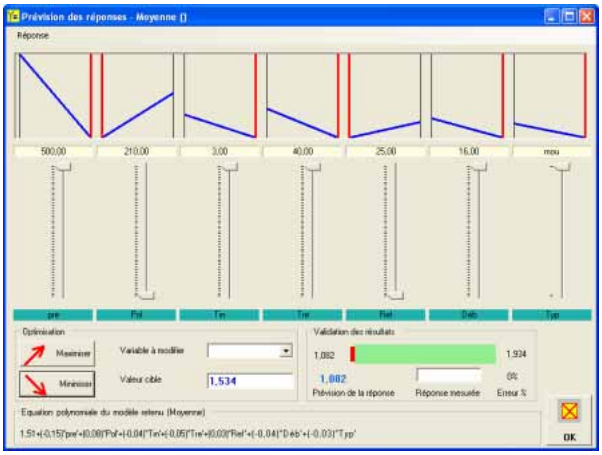
Analyse de la variance

N° col	Action	retenue	S²	ddl	Var	F exp	F limite	Risque	Signif ?	Contrib
1	pre	OUI	1,44	1	1,44	557,15	4,01	0,000	Très	58,5%
2	Pol	OUI	0,41	1	0,41	157,88	4,01	0,000	Très	16,7%
3	Tin	OUI	0,11	1	0,11	43,73	4,01	0,000	Très	4,6%
4	Tre	OUI	0,17	1	0,17	67,92	4,01	0,000	Très	7,2%
5	Ref	OUI	0,05	1	0,05	20,50	4,01	0,000	Très	2,2%
6	Déb	OUI	0,08	1	0,08	30,75	4,01	0,000	Très	3,3%
7	Typ	OUI	0,04	1	0,04	15,34	4,01	0,000	Très	1,6%
8		NON	0,03	1	0,03					
9		NON	0,05	1	0,05					
10		NON	0,01	1	0,01					
11		NON	0,01	1	0,01					
12	Résidus		0,134	52	0,003					5,5%
12	Totale		2,44	59	0,04					

L'analyse de la variance montre que toutes les colonnes sont significatives ! Mêmes celle qui ne comportent aucun facteurs. Cela signifie qu'ils y a des interactions non prisent en compte dans le modèle qui qui on un impact dilué dans les colonnes vides… mais également dans les colonnes ou il y a des facteurs.

Optimisation du plan d'expériences

Supposons que l'optimum consiste à minimiser le retrait en minimisant la variance : On trouve :



On place manuellement la commutation sur « Hydraulique ». Cet essai n'a pas été réalisé dans le plan d'expériences.
On réalise l'essai de confirmation :
1.07 ; 1.06 ; 1.07 ; 1.09 ; 1.03

Ce qui donne une moyenne de 1.06 très légèrement différente de 1.13 prévu, mais qui est effectivement l'essai donnant le plus faible retrait.

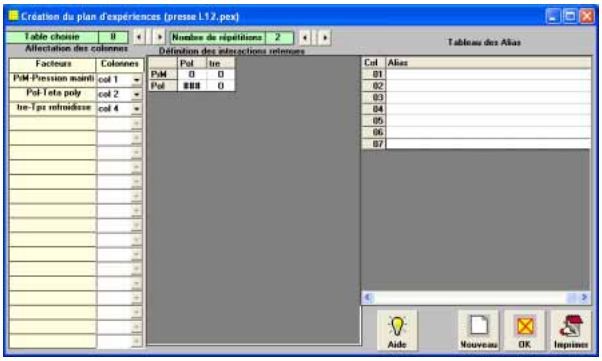
Plan d'expériences complet

Le plan d'expériences L12 a montré qu'il existait sans doute des interactions.

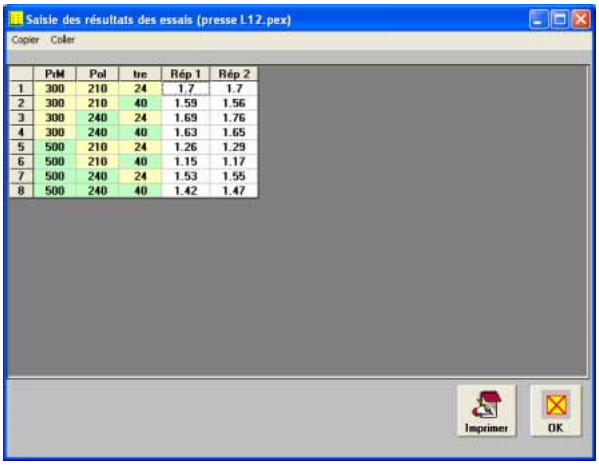
Si on applique le principe d'hérédité : « Les interactions sont souvent le fait de facteurs eux même très actifs », on recherchera en priorité ces interactions entre les effets les plus forts :

- Pression de maintien
- Température du polymère
- Temps de refroidissement

Pour cela une table L8 en plan complet est idéale.

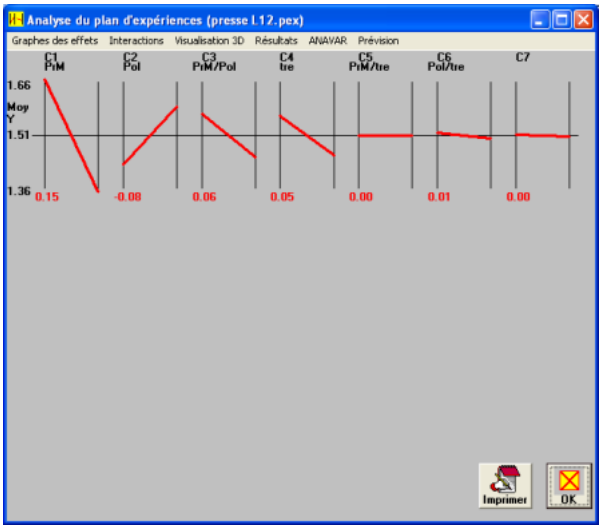


Ce qui donne comme plan d'expériences :

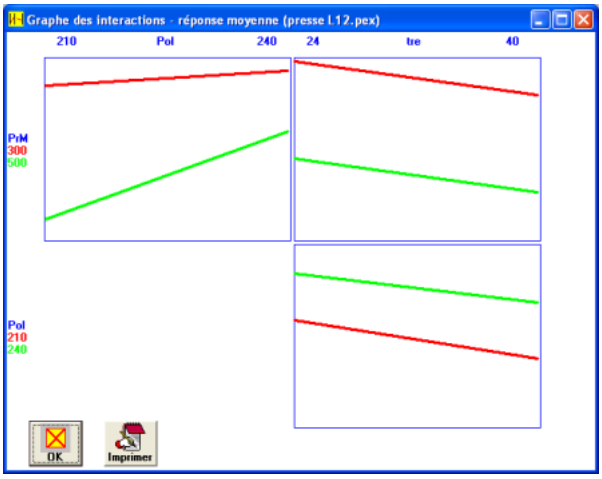


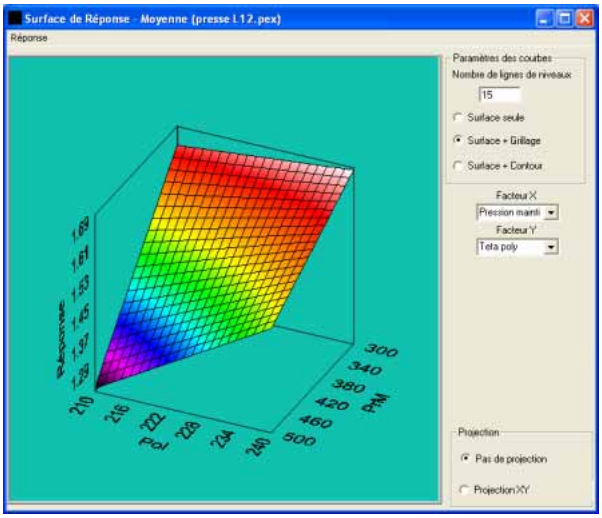
	PrM	Pol	tre	Rép 1	Rép 2
1	300	210	24	1.7	1.7
2	300	210	40	1.59	1.56
3	300	240	24	1.69	1.76
4	300	240	40	1.63	1.65
5	500	210	24	1.26	1.29
6	500	210	40	1.15	1.17
7	500	240	24	1.53	1.55
8	500	240	40	1.42	1.47

Le graphe des essais donne le graphe suivant avec une interaction assez forte entre la pression de maintien et la température du polymère.



Cette interaction peut se visualiser selon deux graphiques :

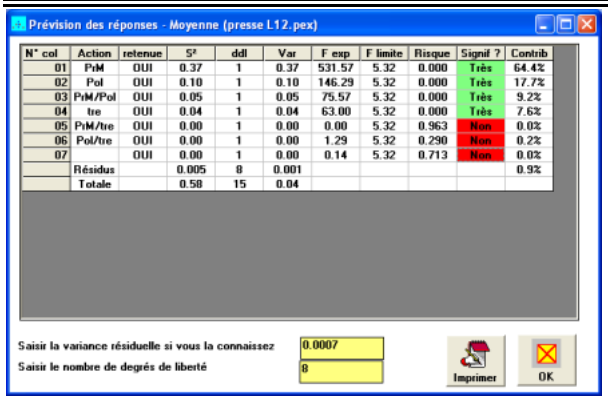




Le graphique en surface de réponse est particulièrement parlant :

L'interaction amplifie l'effet cumulé des deux facteurs. Le point le plus faible se trouve pour la pression de maintien à 500 et la température du polymère de 210.

L'analyse de la variance confirme le résultat.



Prévision des réponses - Moyenne (presse L12.pex)

N° col	Action	retenue	S²	ddl	Var	F exp	F limite	Risque	Signif ?	Contrib
01	PrM	OUI	0.37	1	0.37	531.57	5.32	0.000	Très	64.4%
02	Pol	OUI	0.10	1	0.10	146.29	5.32	0.000	Très	17.7%
03	PrM/Pol	OUI	0.05	1	0.05	75.57	5.32	0.000	Très	9.2%
04	tre	OUI	0.04	1	0.04	63.00	5.32	0.000	Très	7.6%
05	PrM/tre	OUI	0.00	1	0.00	0.00	5.32	0.963	Non	0.0%
06	Pol/tre	OUI	0.00	1	0.00	1.29	5.32	0.290	Non	0.2%
07		OUI	0.00	1	0.00	0.14	5.32	0.713	Non	0.0%
	Résidus		0.005	8	0.001					0.9%
	Totale		0.58	15	0.04					

Saisir la variance résiduelle si vous la connaissez 0.0007

Saisir le nombre de degrés de liberté 8

Imprimer OK

Guide de mise en place du travail pratique

Le TP tel qu'il est présenté dans cette fiche se déroule sur une période de quatre heures.

Choix du plan d'expériences

Le groupe de stagiaires analyse les facteurs présents sur le simulateur et recherche la meilleure stratégie possible pour minimiser le pourcentage de retrait.

Deux solutions sont possibles selon le niveau de connaissances des stagiaires sur les presses à injecter.

Connaissances du groupe nulles

Dans ce cas de figure, compte tenu de l'impossibilité d'éliminer des facteurs et de faire des hypothèses sur les interactions, le choix optimum est de faire un plan fractionnaire à interactions diluées. La table L_{12} est la meilleure des solutions.

Connaissances du groupe faibles

On peut bien sûr faire une table L_{12}, mais en faisant quelques hypothèses sur les interactions, on peut réaliser un plan fractionnaire de résolution IV sur les huit facteurs. On utilise pour cela les colonnes impaires de la table L_{16}. On consultera utilement l'ouvrage de référence au chapitre 4 pour plus de renseignements sur les plans de résolution IV.

Connaissances du groupe fortes

On peut alors éliminer un certain nombre de facteurs :

- soit parce qu'on les suppose peu influents ;
- soit parce qu'on connaît déjà leur influence et qu'il est inutile de faire un plan d'expériences pour connaître ce que l'on connaît déjà.

On peut alors réaliser un plan très fractionnaire de type L_8.

L'intérêt de ce simulateur est justement de susciter le débat sur le choix du plan d'expériences et de proposer une approche synthétique des différents simulateurs. Dans tous les cas, on a intérêt à répéter plusieurs fois les essais pour étudier les réponses en moyenne et en dispersion.

Interactions programmées

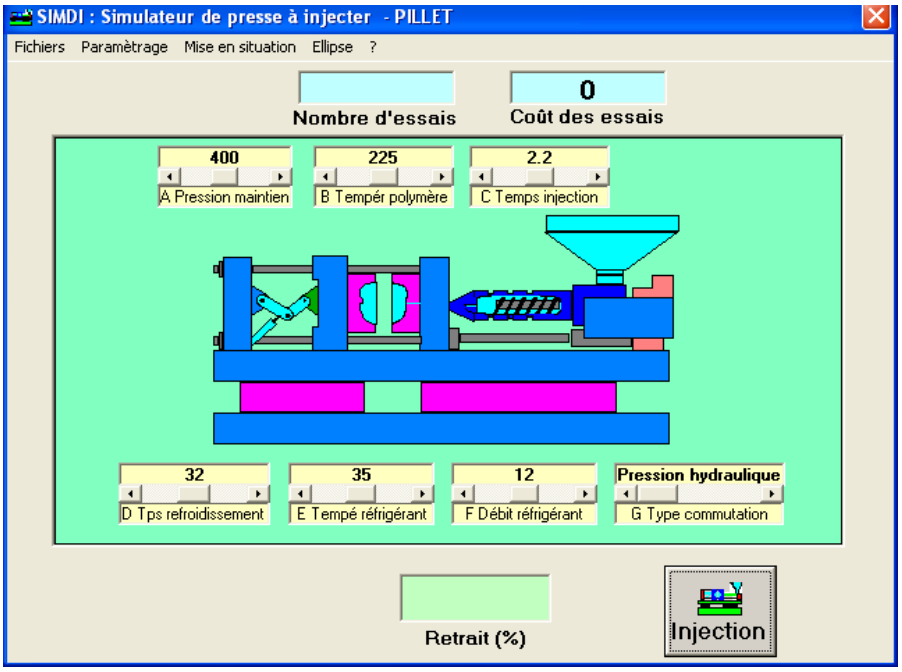
Phase 1

Pas d'interaction programmée, le type de commutation joue principalement sur la dispersion.

Phase 2

Pression/Tempé polymère
Pression/Tps injection
Tempé polymère/Tps injection
Temps de refroidissement/Température réfrigérant

SIMDI Presse - Fiche d'informations



Objectifs de l'expérimentation

Vous êtes responsable du secteur injection dans l'entreprise SIMDI. Un des problèmes qualité que l'on rencontre sur une presse est lié au pourcentage de retrait (différence entre les cotes en sortie de moule et après refroidissement). Vous décidez de réaliser une étude par plan d'expériences pour minimiser ce retrait.

Les facteurs sont les suivants :

Pression de maintien	Pression à laquelle on maintient le vérin pendant le refroidissement après le cycle d'injection
Temps d'injection	Détermine la vitesse de sortie du vérin pendant le cycle d'injection
Température du polymère	Température du plastique dans le collier chauffant avant le cycle d'injection
Temps de refroidissement	Temps de refroidissement de la matière dans le moule
Température du réfrigérant moule	Température de l'eau qui circule dans le moule pour le refroidir
Débit réfrigérant	Débit de la circulation de l'eau
Type de commutation	Valeur sur laquelle on s'aligne pour changer de type d'asservissement pendant l'injection. On passe d'un asservissement en vitesse à un asservissement en pression

Choisir le plan le plus adapté pour minimiser ce retrait en faisant les hypothèses nécessaires sur les facteurs à retenir et sur les interactions supposées.

On cherchera à minimiser le retrait, et à minimiser la dispersion sur ce retrait.

Les extrêmes possibles proposés par le simulateur sont des extrêmes réalistes.

SIMDI Presse - Fiche de calcul

Détermination d'un plan d'expériences :

Facteurs		Difficultés	Symbole
A	Pression de maintien		
B	Température du polymère		
C	Temps d'injection		
D	Temps de refroidissement		
E	Température réfrigérant		
F	Débit réfrigérant		
G	Type de commutation		

Interactions supposées

Graphe associé

Graphe de Taguchi Table .....

Affectation des colonnes

Facteurs	colonnes
A	
B	
C	
D	
E	
F	
G	

Réalisation du plan d'expériences

N°	A	B	C	D	E	F	G	R1	R2	R3
1										
2										
3										
4										
5										
6										
7										
8										
9										
10										
11										
12										
13										
14										
15										

16		
17		
18		

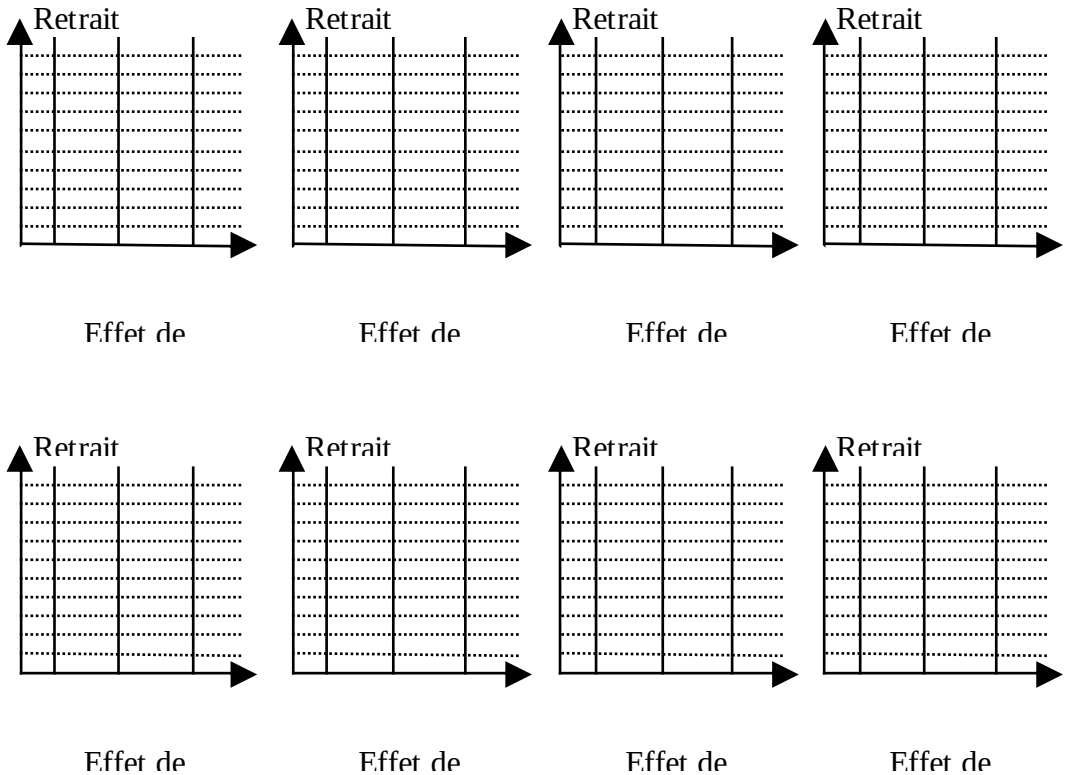
2. Interprétation du plan

Tableaux des moyennes

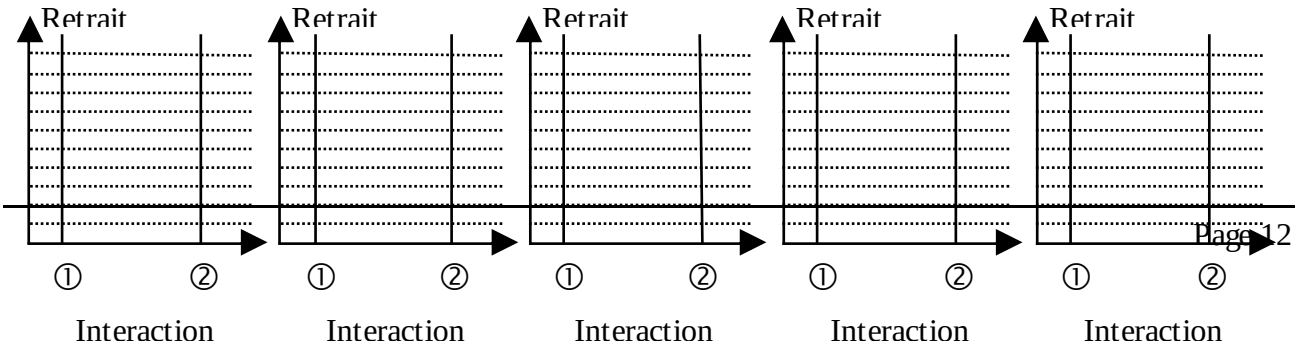
Moyenne générale de tous les essais : .....

	A	B	C	D	E	F	G
N 1							
N 2							

Graphe des effets



Graphe des interactions significatives



Calcul des actions

Effet de A :

Effet de B :

Effet de C :

Effet de D :

Effet de F :

Effet de G :

Effet de H :

Modèle matriciel

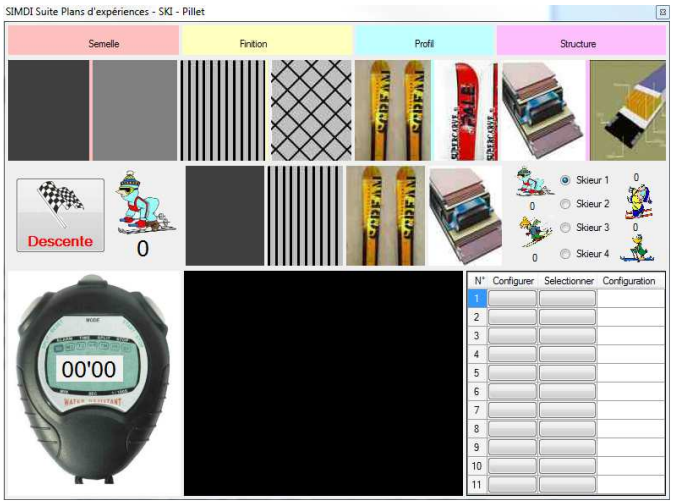
Conclusion sur le modèle

SIMDI - Ski

« Les élèves apprennent à réaliser un plan d'expériences»

Objectifs du simulateur

Simuler une démarche expérimentale dans des conditions ou la réponse étudiée peut évoluer au cours des essais. La particularité de ce simulateur est aussi de prendre un exemple d'utilisation des plans d'expériences en conception, alors que les autres simulateurs sont plutôt en production.
On voit avec ce simulateur comment préparer un plan d'expériences à partir de prototypes.



Apport pédagogique de la séquence de formation

- Voir un exemple de plan d'expériences en conception
- Comprendre comment on peut éliminer ou se protéger contre un dérive de la réponse au cours des essais
- Comprendre qu'avec un plan d'expériences, on peut faire apparaitre des effets d'un ordre de grandeur plus petit que la variabilité naturelle de la mesure
- Apprendre à construire un plan d'essais

But du simulateur

Le but de la simulation est de comprendre l'influence de différents facteurs intervenant dans la construction d'un ski sur sa performance dans un parcours chronométré.
Le problème dans ce type d'étude réside dans la variabilité de la mesure. D'une part, il y a une forte variabilité dans la répétabilité d'un même déscendeur avec les mêmes skis, mais en plus il y a des écarts entre les skieurs, l'état de la piste évolue… et le skieur se fatigue, ce qui fait qu'il peut difficilement faire plus de huit descentes dans une séance de chronométrage.
La réponse mesurée est le temps de parcours sur un slaloom

Les facteurs étudiés sont :

- La matière de la semelle (2 niveaux)
- Le type de finition de la semelle (2 niveaux)
- Le profil du ski
- Les éléments de structure du ski

Fonctionnalités principales de SIMDI Ski

Ce bouton permet de lancer une simulation de descente. A chaque simulation, le skieur sélectionné avec la configuration de ski sélectionnée effectue un chronométrage.

Après la simulation, apparaît dans ce cadre la moyenne le temps de la descente

Montre la configuration en cours de test. Pour changer un élément de la configuration, il suffit de cliquer sur la modalité du facteur choisi. Par exemple en cliquant sur la semelle grise on sélectionne cette semelle.

Montre le skieur sélectionné ainsi que le nombre de descentes déjà réalisées par chacun des skieurs

N°	Configurer	Selectionner	Configuration
1	OK		1 1 1 1
2	OK		1 2 2 1
3	OK		2 1 2 1
4	OK		2 2 2 2
5	OK		1 2 1 2
6			
7			
8			
9			
10			
11			

Permet de préparer les prototypes de ski. Si on clique sur le bouton « Configurer », on mémorise une combinaison de facteurs. Par exemple la configuration 1 est réalisée avec une semelle 1 (Noire) une finition 1 (droite) un profil 1 (Jaune) et une structure 1.

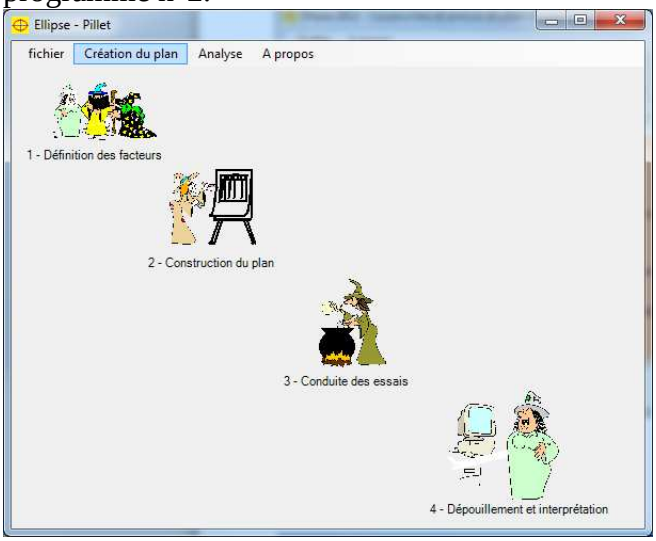
En cliquant sur « Sélectionner » on rappelle directement la configuration.

Cela revient à préparer les skis en production dans un premier temps et à les numéroter. Lorsque l'on fait les essais il suffira de choisir le bon ski en fonction de l'essais à réaliser.

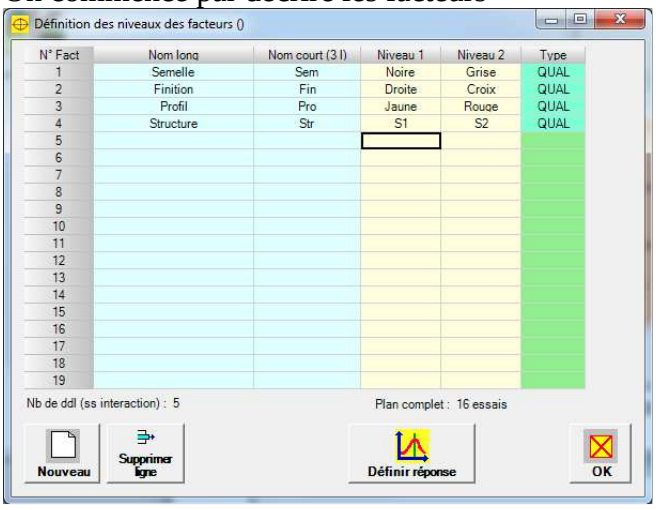
Exemple d'utilisation

Pour étudier les 4 facteurs, on doit commencer à construire le plan avec ellipse

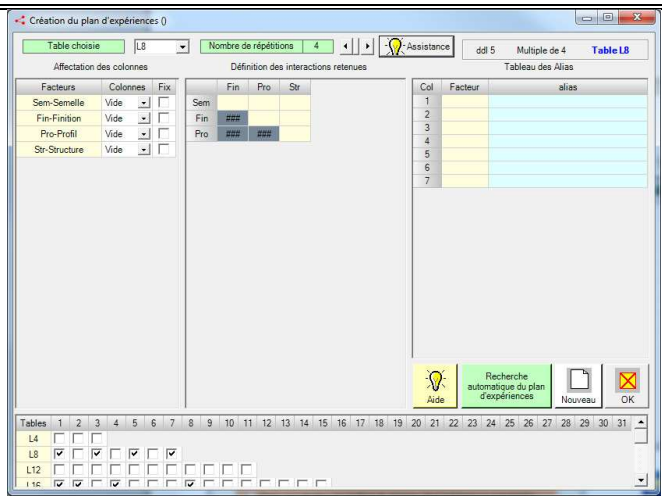
Les facteurs étant à 2 niveaux on choisi le programme n°2.



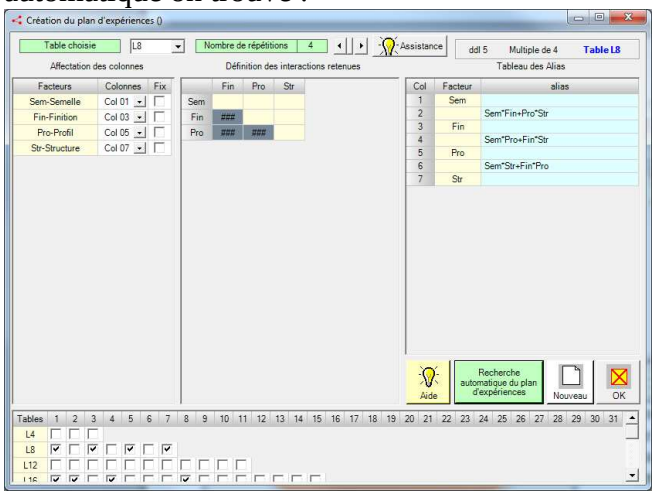
On commence par décrire les facteurs



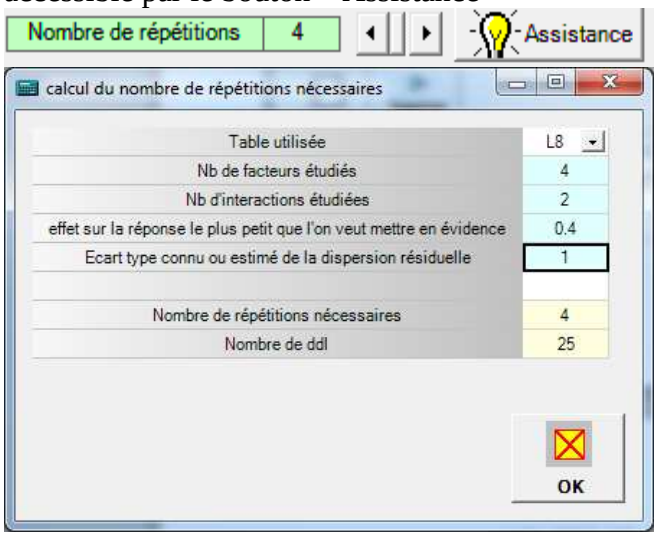
Puis on construit le plan d'essais



Pour chercher le plan on peut demander à Ellipse de rechercher le meilleur plan possible. Le calcul du nombre de degrés de liberté (5 ddl) et de la structure (dans un premier temps sans interaction) permet de dire que le plan est possible avec 8 essais. En cliquant sur le bouton recherche automatique on trouve :



Reste à calculer le nombre de répétitions à réaliser. Pour cela on utilise le petit utilitaire accessible par le bouton « Assistance »



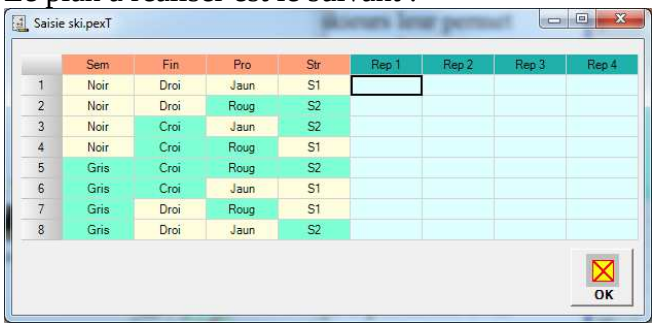
On donne le nombre de facteur étudiés (4) le nombre d'interaction étudiées (on peut en redouter 2 par exemple)
Il faut également donner le plus petit effet qui nous intéresse. Dans ce cas un progrès de 0.4 est très intéressant. Mais on a besoin également de connaitre la dispersion de répétition.
On sait que la répétabilité des skieurs leur permet d'avoir une répétabilité de 4 secondes, ce qui permet d'estimer l'écart type à 1 seconde. (On considère que ce que l'on a en tête comme dispersion représente 4 écart types)

Dans un premier temps on ne met pas les interactions. Ellipse a généré le meilleur plan possible avec une résolution IV. Les facteurs ne sont pas confondus avec les interactions, on pourra déterminer les interactions a postériori avec le principe d'hérédité.

On enregistre le fichier sous le nom « ski» par exemple.

Conduite des essais

Le plan à réaliser est le suivant :



	Sem	Fin	Pro	Str	Rep 1	Rep 2	Rep 3	Rep 4
1	Noir	Droi	Jaun	S1				
2	Noir	Droi	Roug	S2				
3	Noir	Croi	Jaun	S2				
4	Noir	Croi	Roug	S1				
5	Gris	Croi	Roug	S2				
6	Gris	Croi	Jaun	S1				
7	Gris	Droi	Roug	S1				
8	Gris	Droi	Jaun	S2				

Mais on ne peut pas le faire n'importe comment car il faut éviter d'avoir un biais dans les essais :

- Parce qu'un skieur ne peut pas faire plus de huit essais, il faudra donc 4 skieurs
- À cause des écarts entre les skieurs
- À cause de la fatigue des skieurs
- À cause de l'évolution de la piste au cours des essais

Avec une contrainte : dans la même descente 2 skieurs ne peuvent pas utiliser le même ski !
De plus pour simplifier la réalisation des essais, il faut les réaliser dans un ordre logique. Soit en incrémentant le n° de ski, soit en diminuant ce n°

La table ci-dessous permet de respecter ces conditions

N° ski	Skieur 1	Skieur 2	Skieur 3	Skieur 4	rang moyen
1	8	1	5	4	4.5
2	7	2	6	3	4.5
3	6	3	7	2	4.5
4	5	4	8	1	4.5
5	4	5	1	8	4.5
6	3	6	2	7	4.5
7	2	7	3	6	4.5
8	1	8	4	5	4.5

Le skieur 1 va commencer avec le ski n° 8 puis le 7, 6, … en décrémentant
Le skieur 2 va commencer par le ski n° 1 puis le 2 puis le 3… en incrémentant.
Si on calcul le rang moyen de chaque ski , alors on trouve ce rang constant et égal à 4.5. Cela permet de s'affranchir en partie de la fatigue des skieurs et de l'évolution de la piste.

Ce tableau peut également s'écrire sous la forme

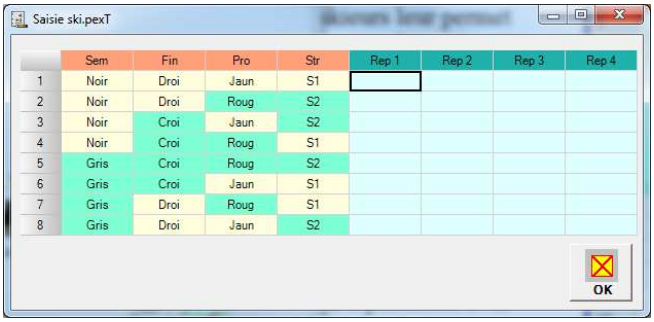
	N° du ski	N° du ski	N° du ski	N° du ski
N° de test	Essayeur 1	Essayeur 2	Essayeur 3	Essayeur 4
1	8	1	5	4
2	7	2	6	3
3	6	3	7	2
4	5	4	8	1
5	4	5	1	8
6	3	6	2	7
7	2	7	3	6
8	1	8	4	5

Mais pour aléariser encore un peu plus les dérives, il est préférable de ne pas faire partir toujours le skieur 1 en premier mais de faire tourner le premier de la série. Cela donne comme ordre d'essais :

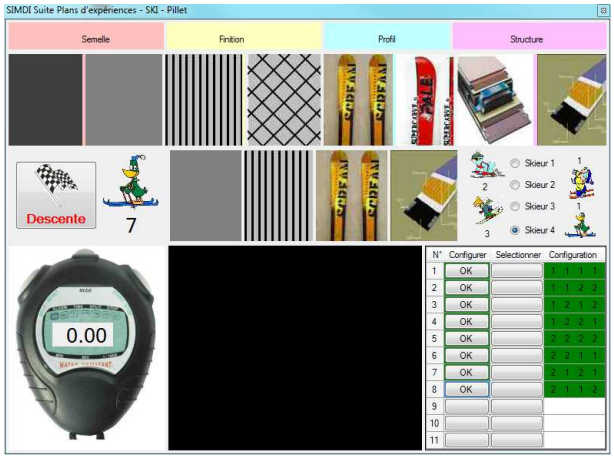
N° de test	Skieur	Ski	N° de test	Skieur	Ski
1	1	8	17	1	4
2	2	1	18	2	5
3	3	5	19	3	1
4	4	4	20	4	8
5	2	2	21	2	6
6	3	6	22	3	2
7	4	3	23	4	7
8	1	7	24	1	3
9	3	7	25	3	3
10	4	2	26	4	6
11	1	6	27	1	2
12	2	3	28	2	7
13	4	1	29	4	5
14	1	5	30	1	1
15	2	4	31	2	8
16	3	8	32	3	4

Il reste à préparer les 8 configurations de skis à tester.

Pour cela on regarde le plan d'expériences :



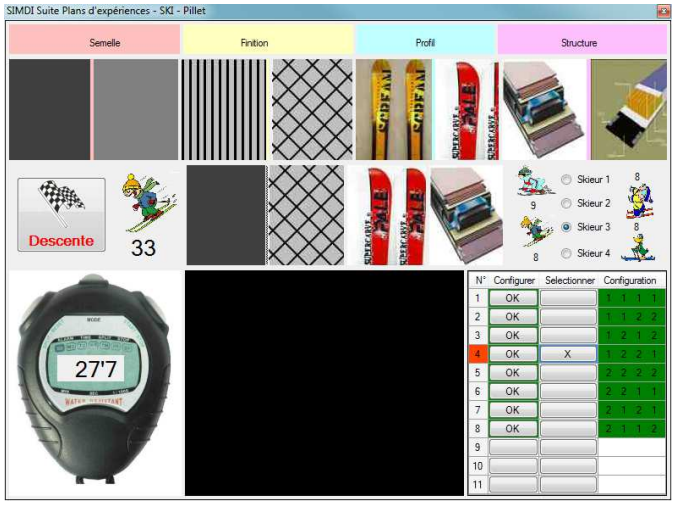
Et on réalise la configuration correspondante :



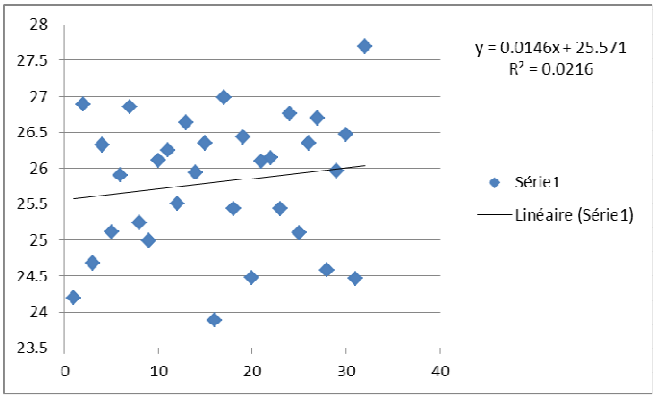
Reste à réaliser les 32 essais

N°	Skieur	Ski	Temps	N°	Skieur	Ski	Temps
1	1	8	24.2	17	1	4	26.99
2	2	1	26.89	18	2	5	25.44
3	3	5	24.68	19	3	1	26.43
4	4	4	26.33	20	4	8	24.48
5	2	2	25.11	21	2	6	26.10
6	3	6	25.9	22	3	2	26.15
7	4	3	26.85	23	4	7	25.44
8	1	7	25.24	24	1	3	26.76
9	3	7	24.99	25	3	3	25.10
10	4	2	26.11	26	4	6	26.35
11	1	6	26.25	27	1	2	26.7
12	2	3	25.51	28	2	7	24.58
13	4	1	26.64	29	4	5	25.96
14	1	5	25.94	30	1	1	26.47
15	2	4	26.35	31	2	8	24.46
16	3	8	23.89	32	3	4	27.7

Exemple de l'essai n° 32



On peut vérifier l'absence de dérive dans les essais en traçant la droite de corrélation en fonction de l'ordre des essais :

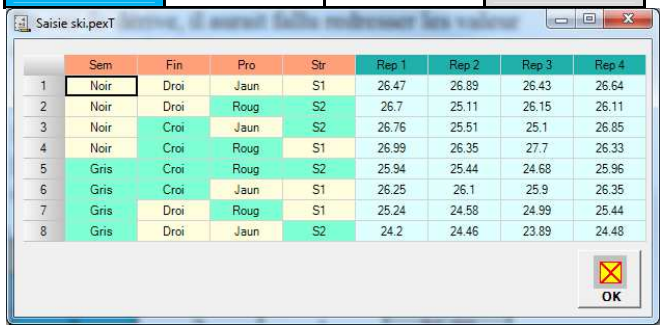


En cas de dérive, il aurait fallu redresser les valeurs en éliminant la dérive.

Pour pouvoir remettre les données dans ellipse, Il faut réorganiser sous Excel par exemple ce tableau pour retrouver la place dans les répétitions

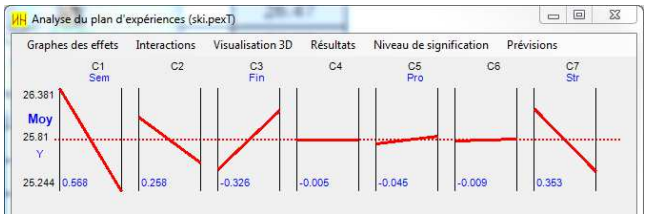
On obtient :

N°	Skieur	Ski	Temps
30	1	1	26.47
2	2	1	26.89
19	3	1	26.43
13	4	1	26.64
27	1	2	26.7
5	2	2	25.11
22	3	2	26.15
10	4	2	26.11
24	1	3	26.76
12	2	3	25.51
25	3	3	25.1
7	4	3	26.85
17	1	4	26.99
15	2	4	26.35
32	3	4	27.7
4	4	4	26.33
14	1	5	25.94
18	2	5	25.44
3	3	5	24.68
29	4	5	25.96
11	1	6	26.25
21	2	6	26.1
6	3	6	25.9
26	4	6	26.35
8	1	7	25.24
28	2	7	24.58
9	3	7	24.99
23	4	7	25.44
1	1	8	24.2
31	2	8	24.46
16	3	8	23.89
20	4	8	24.48

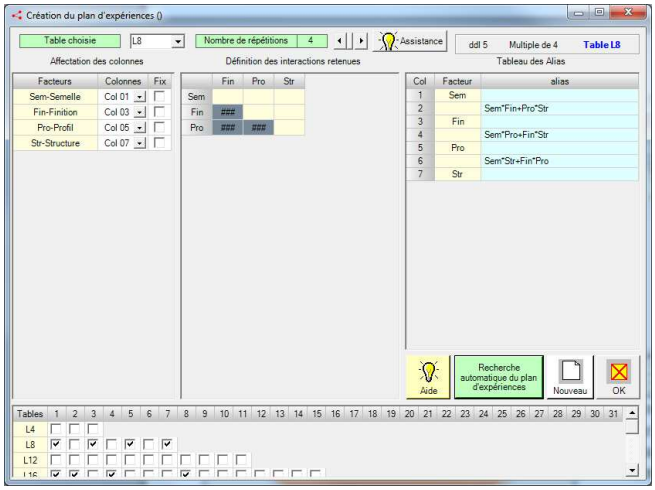


	Sem	Fin	Pro	Str	Rep 1	Rep 2	Rep 3	Rep 4
1	Noir	Droi	Jaun	S1	26.47	26.89	26.43	26.64
2	Noir	Droi	Roug	S2	26.7	25.11	26.15	26.11
3	Noir	Croi	Jaun	S2	26.76	25.51	25.1	26.85
4	Noir	Croi	Roug	S1	26.99	26.35	27.7	26.33
5	Gris	Croi	Roug	S2	25.94	25.44	24.68	25.96
6	Gris	Croi	Jaun	S1	26.25	26.1	25.9	26.35
7	Gris	Droi	Roug	S1	25.24	24.58	24.99	25.44
8	Gris	Droi	Jaun	S2	24.2	24.46	23.89	24.48

Le traitement des données donne :

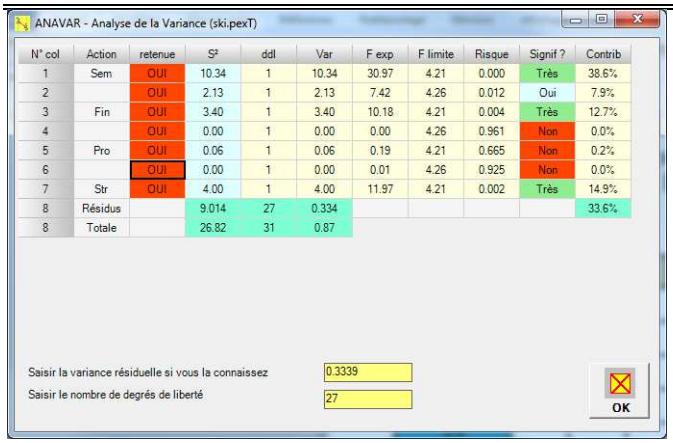


On constate en colonne 2 un effet assez important. qui est une interaction comme indiqué dans le tableau d'alias ci-dessous :



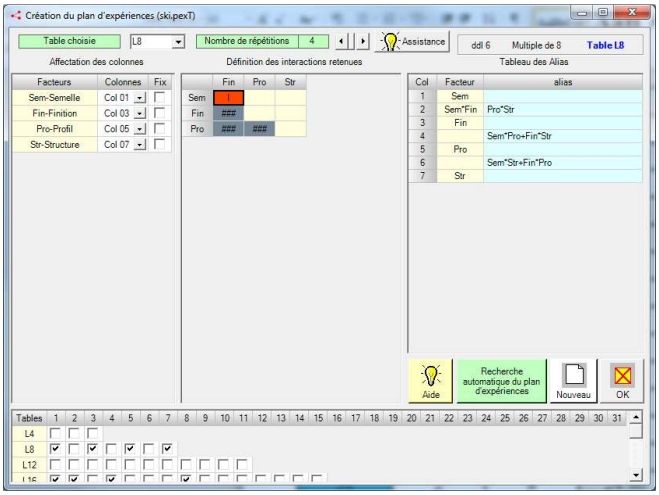
Cette interaction est soit l'interation Semelle *Finition soit Profil * Structure

L'analyse de la variance nous confirme que cette interaction est en effet significative

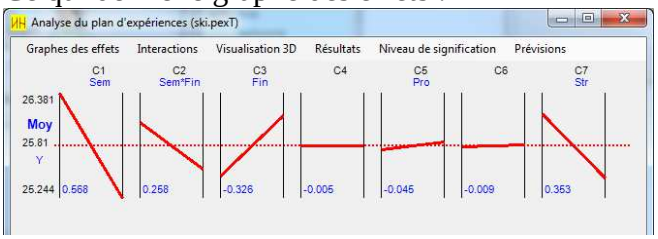


N° col	Action	retenue	S²	ddl	Var	F exp	F limite	Risque	Signif ?	Contrib
1	Sem	OUI	10.34	1	10.34	30.97	4.21	0.000	Très	38.6%
2		OUI	2.13	1	2.13	7.42	4.26	0.012	Oui	7.9%
3	Fin	OUI	3.40	1	3.40	10.18	4.21	0.004	Très	12.7%
4		OUI	0.00	1	0.00	0.00	4.26	0.961	Non	0.0%
5	Pro	OUI	0.06	1	0.06	0.19	4.21	0.665	Non	0.2%
6		OUI	0.00	1	0.00	0.01	4.26	0.925	Non	0.0%
7	Str	OUI	4.00	1	4.00	11.97	4.21	0.002	Très	14.9%
8	Résidus		9.014	27	0.334					33.6%
8	Totale		26.82	31	0.87					

Les deux effets les plus forts étant la Semelle et la finition, on applique le principe d'hérédité pour affecter cette interaction à Sem*Fin



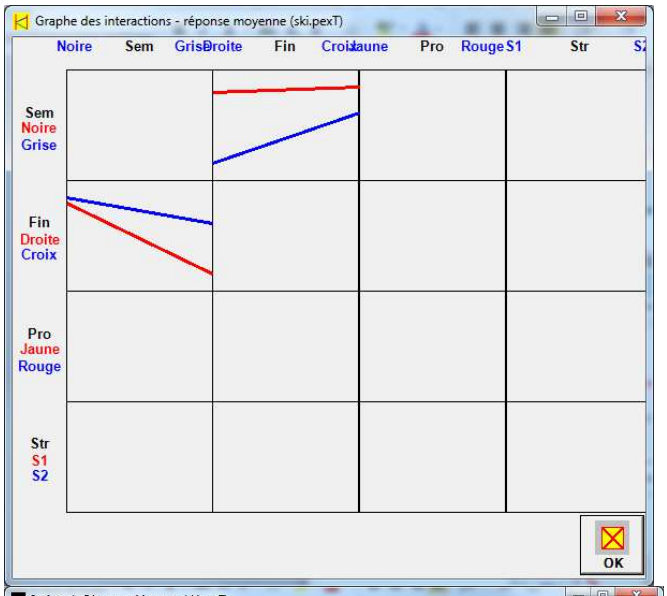
Ce qui donne le graphe des effets :

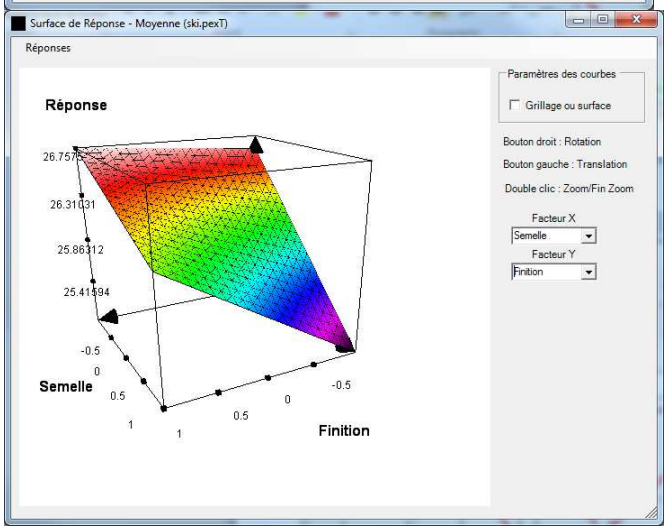


Remarque : Comme prévu à la construction du plan, on ne passe pas à coté d'un effet de l'ordre de 0.4 grace aux répétitions que l'on a calculé.

On a réussi avec le plan d'expériences à mettre en évidence des effet de 0.25 avec des variabilités de près de 2 sec dans certains esssais… c'est bien l'intérêt de la démarche.

Et le graphe des interactions suivant (2D et 3D)



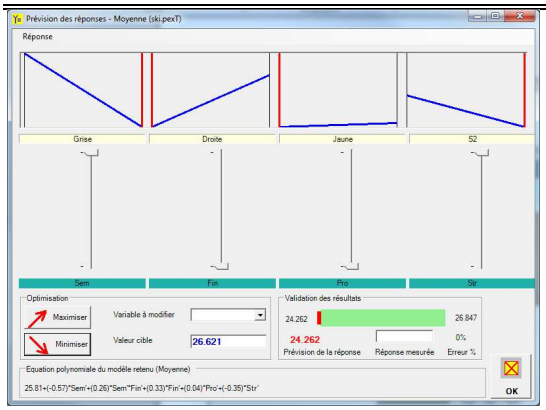


On interpréte ces schémas en disant que la finition droite est intéressante surtout avec la semelle grise. Les meilleurs temps sont obtenus en combinant la semelle grise et la finition droite.

Le profil n'a pas d'effet significatif

La structure 2 est nettement meilleure que la 1.

Pour optimiser on demande à Ellipse la configuration la meilleure :



Cet essais a déjà été réalisé, c'est l'essai n° 8

On peut vérifier que l'essais identique avec le profil 2 doit donner également de bons résultats :

Skieur 1 : 23.75
Skieur 2 : 24.78
Skieur 1 : 24.90
Skieur 1 : 24.62

Ce qui confirme les résultats du plan d'expériences.

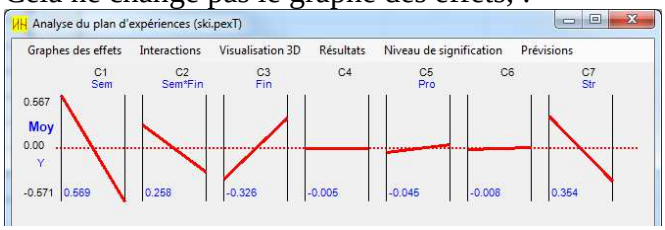
Nota : Pour améliorer l'analyse de la variance, il serait possible d'éliminer l'influence des skieurs en retranchant à chaque colonne la moyenne des temps de chaque Skieur. Cela donnerait comme moyenne :

Skieur 1	Skieur 2	Skieur 3	Skieur 4
26.47	26.89	26.43	26.64
26.7	25.11	26.15	26.11
26.76	25.51	25.1	26.85
26.99	26.35	27.7	26.33
25.94	25.44	24.68	25.96
26.25	26.1	25.9	26.35
25.24	24.58	24.99	25.44
24.2	24.46	23.89	24.48
26.06875	25.555	25.605	26.02

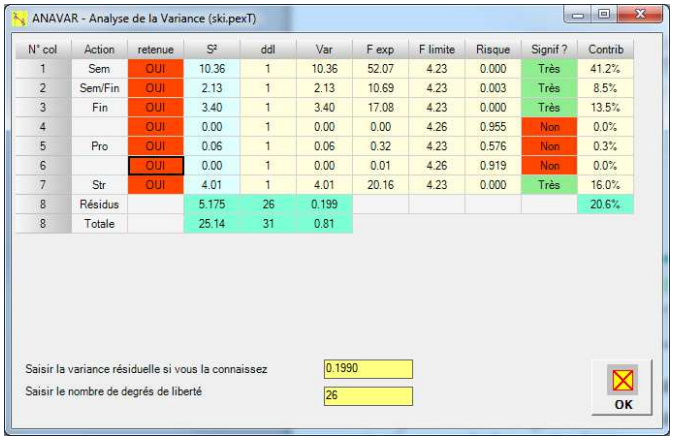
Et comme temps à traiter

Skieur 1	Skieur 2	Skieur 3	Skieur 4
0.40	1.34	0.82	0.62
0.63	-0.45	0.54	0.09
0.69	-0.05	-0.51	0.83
0.92	0.79	2.10	0.31
-0.13	-0.12	-0.93	-0.06
0.18	0.54	0.29	0.33
-0.83	-0.98	-0.62	-0.58
-1.87	-1.10	-1.72	-1.54

Cela ne change pas le graphe des effets, :



Mais change l'analyse de la variance avec des contributions des facteurs qui augmentent un peu (20% de résidus à la place de 32%), l'interaction passe de peu significative à très significative.



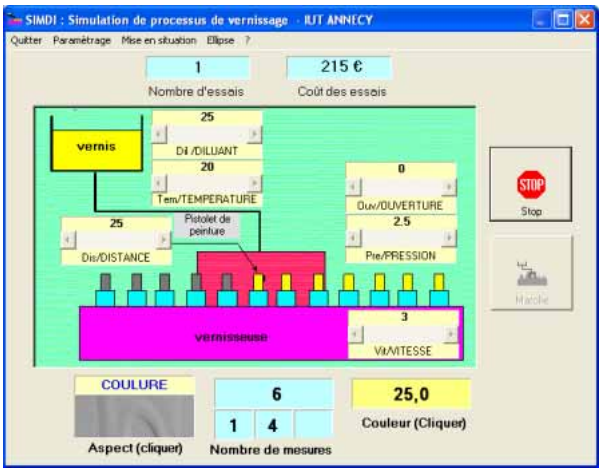
N° col	Action	retenue	S²	ddl	Var	F exp	F limite	Risque	Signif ?	Contrib
1	Sem	OUI	10.36	1	10.36	52.07	4.23	0.000	Très	41.2%
2	Sem/Fin	OUI	2.13	1	2.13	10.69	4.23	0.003	Très	8.5%
3	Fin	OUI	3.40	1	3.40	17.08	4.23	0.000	Très	13.5%
4		OUI	0.00	1	0.00	0.00	4.26	0.955	Non	0.0%
5	Pro	OUI	0.06	1	0.06	0.32	4.23	0.576	Non	0.3%
6		OUI	0.00	1	0.00	0.01	4.26	0.919	Non	0.0%
7	Str	OUI	4.01	1	4.01	20.16	4.23	0.000	Très	16.0%
8	Résidus		5.175	26	0.199					20.6%
8	Totale		25.14	31	0.81					

SIMDI - Peinture

« Les élèves apprennent à réaliser un plan d'expériences»

Objectifs du simulateur

Simuler les différentes étapes de la construction, de la réalisation, et de l'interprétation d'un plan d'expériences.



Apport pédagogique de la séquence de formation

- Développer la compréhension de l'intérêt de réaliser un plan d'expériences pour étudier simultanément plusieurs facteurs
- Compréhension de la notion d'interaction
- Intérêt de réaliser un plan fractionnaire
- Optimisation de réponses quantitatives et qualitatives

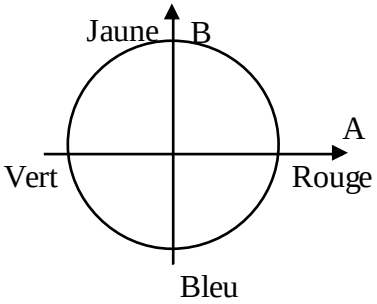
Bibliographie utile :

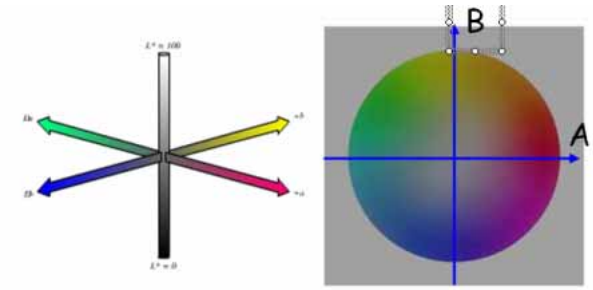
« Les plans d'expériences par la méthode Taguchi » - Maurice PILLET - - Editions d'organisation

But du simulateur

L'objectif de cette ligne est de déposer un film de vernis sur des objets en plastique recouvert d'une couche d'aluminium par anodisation. Le but de ce film plastique est de donner l'aspect d'un objet doré. Plusieurs objets courants sont taités de cette manière, on peut citer par exemple certains étuis de rouge à lèvre, des capuchons de facons de parfum…

La réponse mesurée est la couleur de l'objet après vernissage par une mesure LAB. Le cercle LAB donne toutes les couleurs sur un cercle. Le centre est noir, l'axe A est l'axe VERT/ROUGE, l'axe B est l'axe BLEU/JAUNE. La réponse donnée est mesurée sur l'axe des jaunes (B) et peut théoriquement aller de 0 à 60.



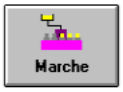


Chaque client de l'entreprise demande un jaune particulier, et il faut être capable de

s'adapter très vite à différentes couleurs pour passer d'une pièce à l'autre.

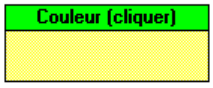
Pour limiter les temps de changement de série, on voudrait réaliser l'ensemble de la production avec un seul vernis, et disposer d'un modèle capable de trouver très rapidement le réglage à réaliser pour obtenir une couleur donnée. Les commandes des clients vont habituellement d'un jaune de 13 à 38.

Fonctionnalités principales de SIMDI Peinture

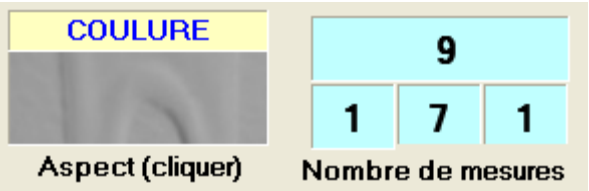


Ce bouton permet la simulation du fonctionnement du simulateur. Pendant la simulation, on ne peut plus modifier de facteur. On peut par contre mesurer les réponses quantitatives (couleur obtenue) ou qualitatives (aspect de la peinture). A chaque simulation, le coût des essais augmente de 1000 Euros.

Arrêt de la simulation, on peut modifier les niveaux des facteurs.



Mesure de la couleur d'un produit à chaque fois que l'on clique sur la zone jaune. Le coût augmente de 50 Euros à chaque mesure. En cliquant plusieurs fois, on a plusieurs pièces mesurées. Il y a de la dispersion. Cette dispersion peut être paramétrée par le menu "Paramétrage".



En cliquant dans cette zone, on a la qualité d'aspect d'un produit :

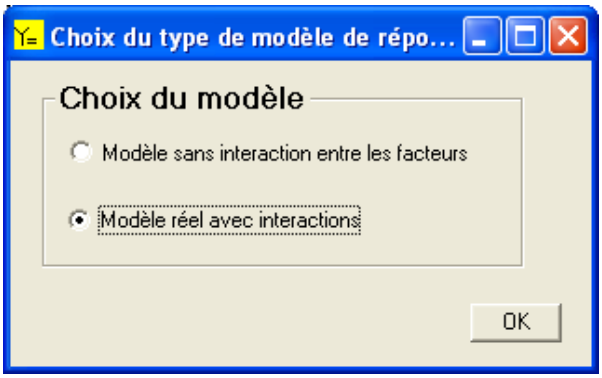
- Tendu ;
- peau d'orange ;
- coulure ;

Le nombre de mesure, avec la répartition dans les 3 catégories s'affiche a coté de la zone.

Permet de modifier le niveau des facteurs. Dans cette simulation, les extrêmes possibles de la simulation restent raisonnables. Il est donc possible de se placer à ces extrêmes.

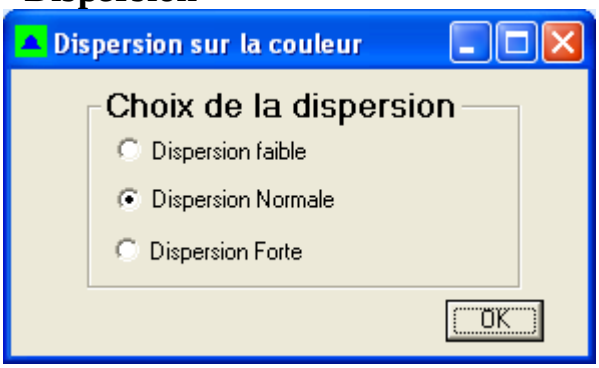
Menu "paramétrage"

"Modèle"



Cette fonctionnalité permet de choisir le type de modèle. Par défaut le modèle est le modèle réel, avec interaction. Il est possible de mettre un modèle sans interaction en sélectionnant la puce correspondante.

"Dispersion"



Cette fonctionnalité permet de choisir l'importance des dispersions dans les réponses "Couleur". Par défaut la dispersion est la dispersion normale sur ce type de procédé.

"Sons"

Permet de désactiver les bips émis à chaque mesure.

Fonctionnalités principales de ELLIPSE Peinture

Il est conseillé pour une première approche des plans d'expériences avec des stagiaires de faire réaliser les calculs de façon manuelle. L'expérience montre que l'exercice manuel donne une meilleure compréhension que l'assistance totale par informatique.

Lorsque le stagiaire sera habitué avec la logique des plans d'expériences, il sera alors intéressant d'utiliser une assistance informatique sur les calculs afin de se concentrer sur l'essentiel, la construction des plans et l'interprétation des résultats.

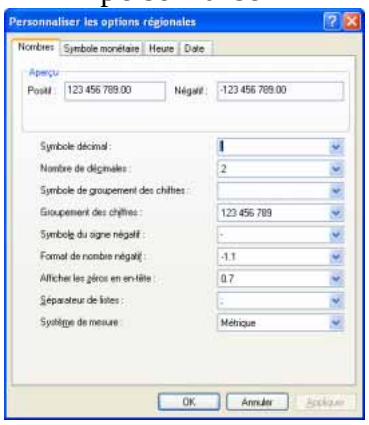
Pour réaliser cette étape, SIMDI Peinture est livré avec la version complète de ELLIPSE Taguchi, logiciel de construction et d'interprétation de plans d'expériences factoriels à 2 niveaux.

Pour accéder aux fonctionnalités d'ELLIPSE, par le menu Ellipse
Pour plus de détail sur Ellipse, on consultera la notice de Ellipse.

Attention Ellipse nécessite d'être en mode point décimal et non virgule.

Pour cela activer
Démarrer
    Panneau de configuration
        Option régionales
            Modifier le format des nombres

personnaliser



Et mettre un point comme symbole décimale.

1. Premier plan d'expérience : plan d'expériences complet deux facteurs à 2 niveaux

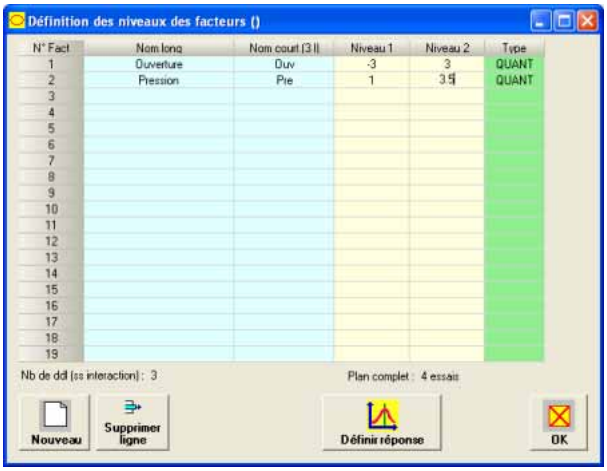
SIMDI suite PE Peinture permet de faire des plans fractionnaire, mais il est préférable de commencer par un plan simple tel qu'une table L4 de 2 facteurs à 2 niveaux.

Cela permet aux étudiants de s'initier à la fois à la logique des plans d'expériences et à Ellipse (le logiciel de traitement des plans d'expériences).

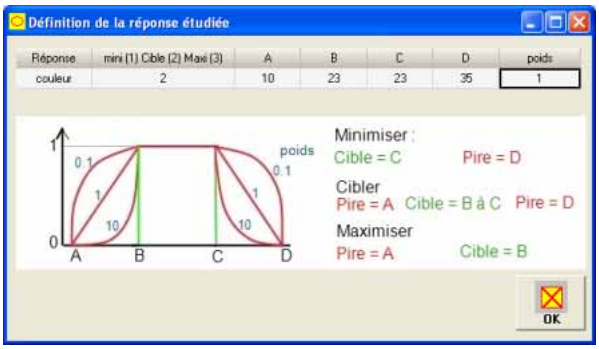
Les deux facteurs les plus intéressants à étudier pour cette première partie sont les facteurs pression d'air comprimé et ouverture du diamètre de buse.

On accède au programme Ellipse par le menu « Ellipse » de la fenêtre principale.

On définit les facteurs à étudier :

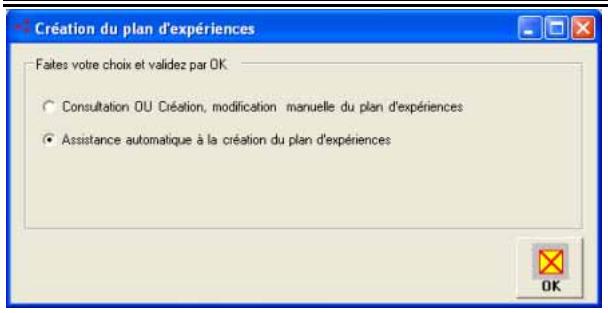


Et la réponse que l'on souhaite, par exemple une couleur de 23 en cliquant sur le bouton « réponse »

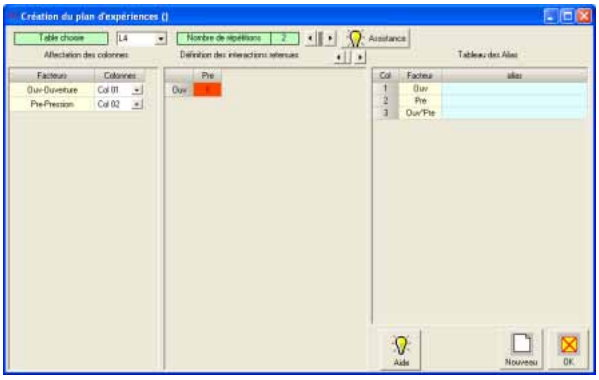


Dans notre cas, l'objectif est de cibler une réponse sur 23 (désirabilité à 1) dans une plage qui va de 10 à 35 (désirabilité nulle)

Après avoir défini les facteur et la réponse, on construit le plan en cliquant sur la seconde étape dans la fenêtre principale.

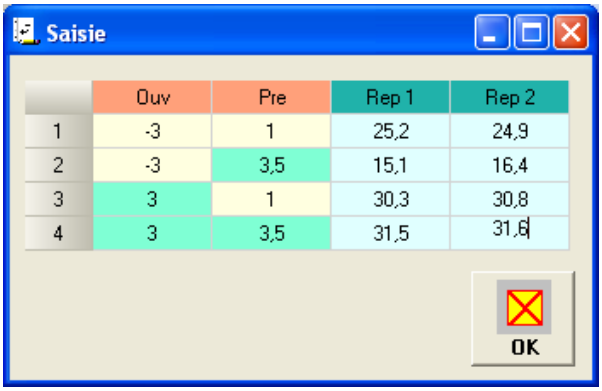


Dans un premier temps on a intérêt de demander une assistance à la création du plan d'expérience. On a le plan suivant :



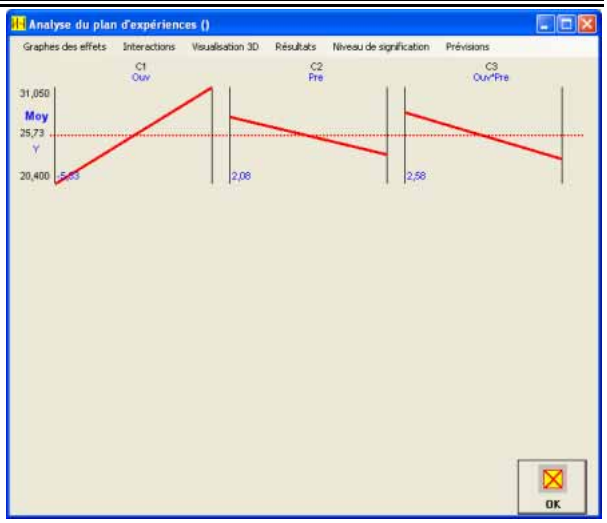
La table choisie est la table L4 (plan complet) les facteurs sont placés dans les colonnes 1 et 2, l'interaction se trouve dans la colonne 3.
Pour plus de précision on demande 2 répétitions.

On réalise les essais avec le simulateur de peinture.



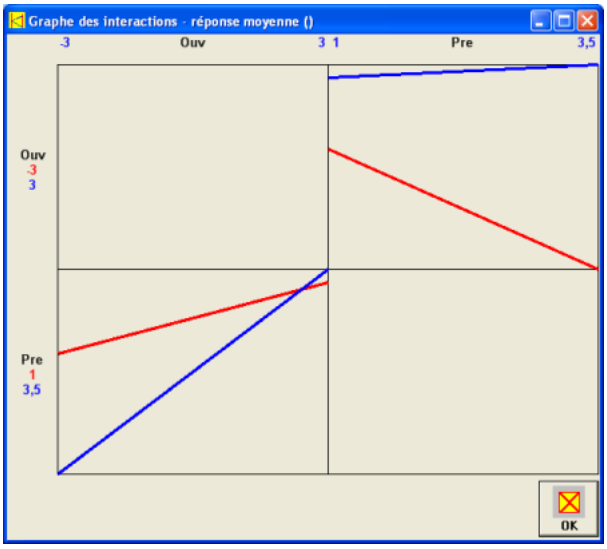
	Ouv	Pre	Rep 1	Rep 2
1	-3	1	25,2	24,9
2	-3	3,5	15,1	16,4
3	3	1	30,3	30,8
4	3	3,5	31,5	31,6

Puis on dépouille les résultats :

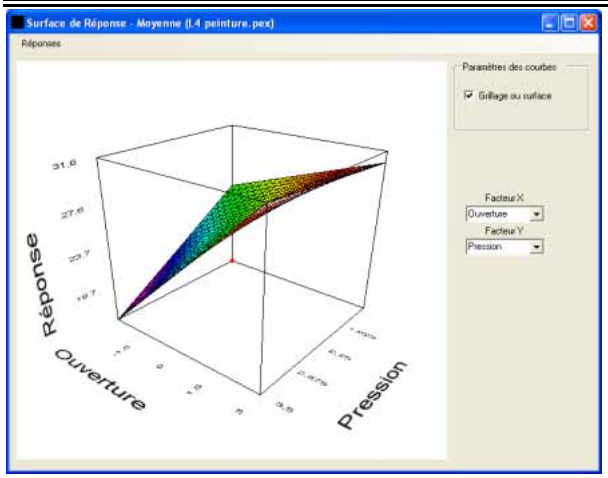


La fenètre d'analyse donne le graphe des effets

On peut avoir les graphes des interactions à partir du menu.



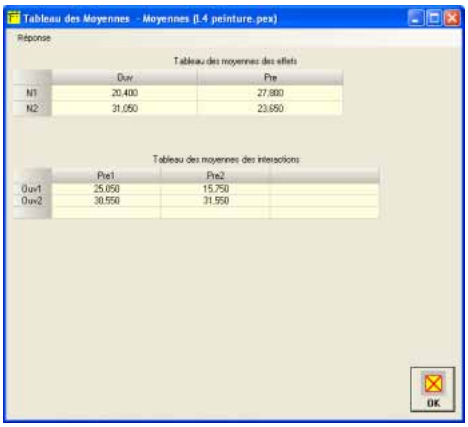
On peut également avoir une visualisation 3D par le menu



La surface peut être tournée avec le bouton gauche de la souris. En maintenant le bouton droit de la souris appuyé on peut faire un zoom.

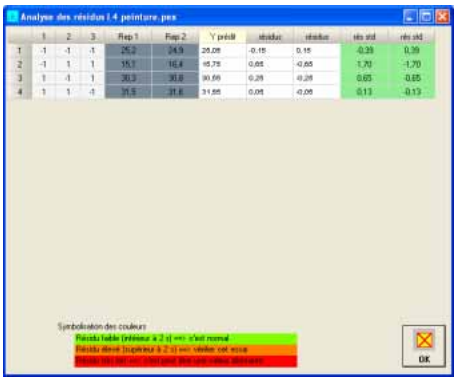
Différents résultats peuvent être affichés comme :

Le tableau des moyennes



L'ensemble des résultats statistiques

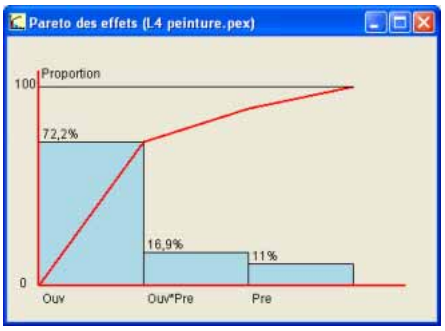
L'analyse des résidus



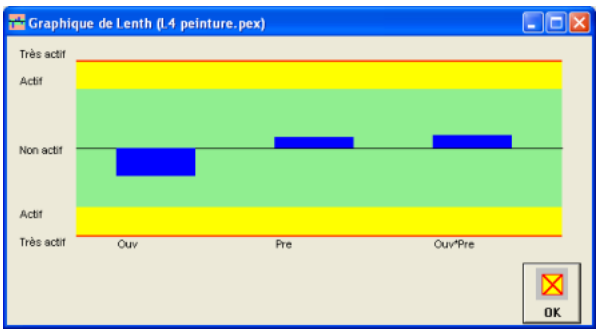
L'analyse de signification des facteurs peut être faite de trois manières différentes :

Par l'analyse de la variance :

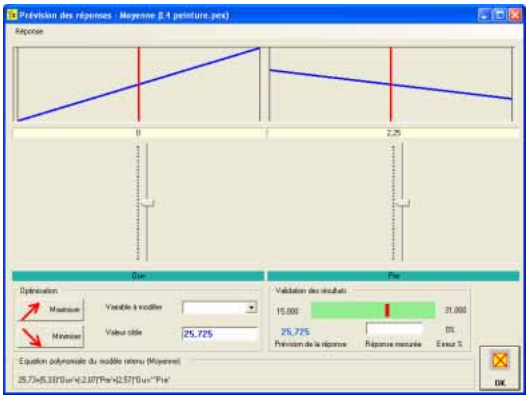
Le pareto des effets



Le graphique de Lenth

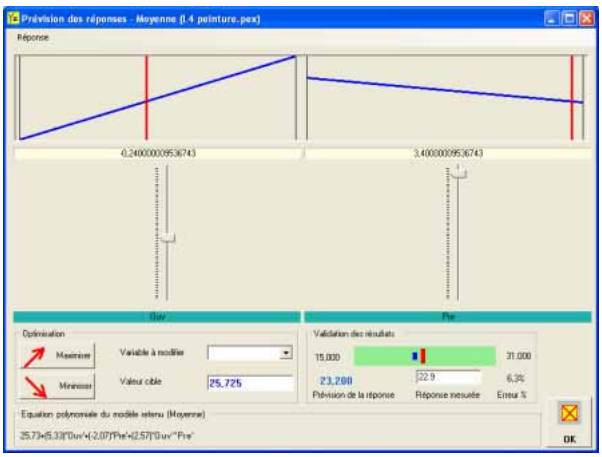


Enfin un module très complet d'analyse des résultats et de prévision des réponses est proposé :

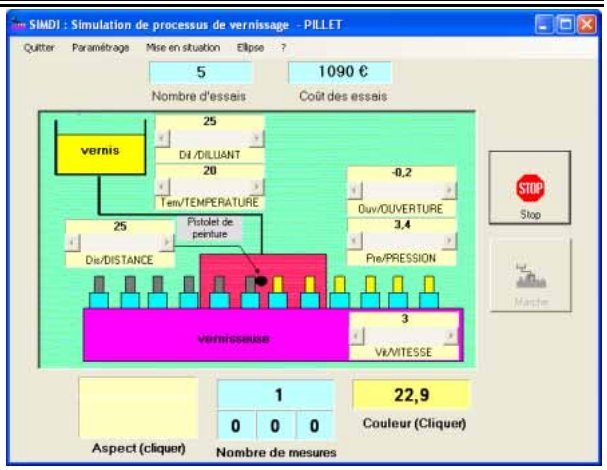


Si on veut maximiser ou minimiser les résultats, les boutons nous donne directement les configurations optimums.

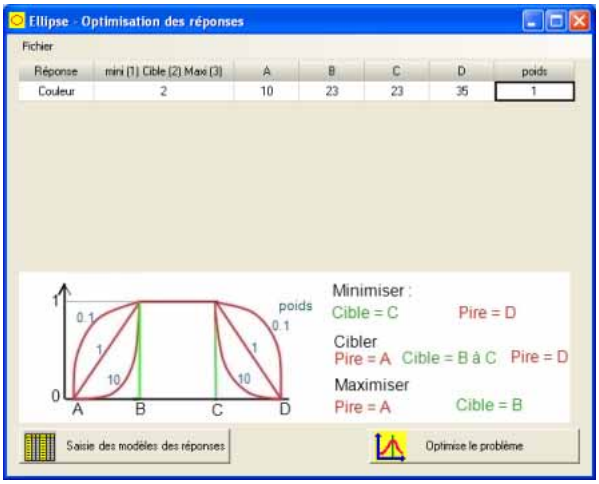
En bougeant les curseurs on peut modifier les valeurs des facteurs, la prévision de la réponse s'affiche. Et le curseur rouge dans la zone verte (plage min max possible) donne la position de cette réponse. Les courbes donnent l'effet du facteur considéré lorsque les autres facteurs sont figées dans cet état. Les pentes peuvent donc varier s'il y a interaction.



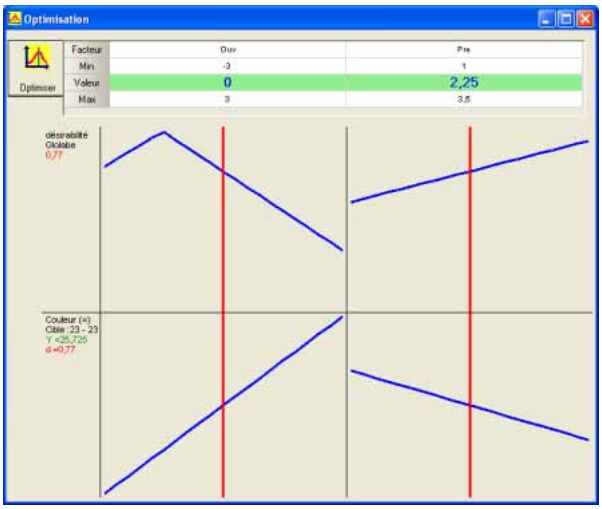
Si on saisit la valeur testée (voir simulateur ci-dessous) alors Ellipse affiche l'erreur de prédiction en pourcentage.



Un autre façon d'optimiser le résultat consiste à utiliser l'optimisation

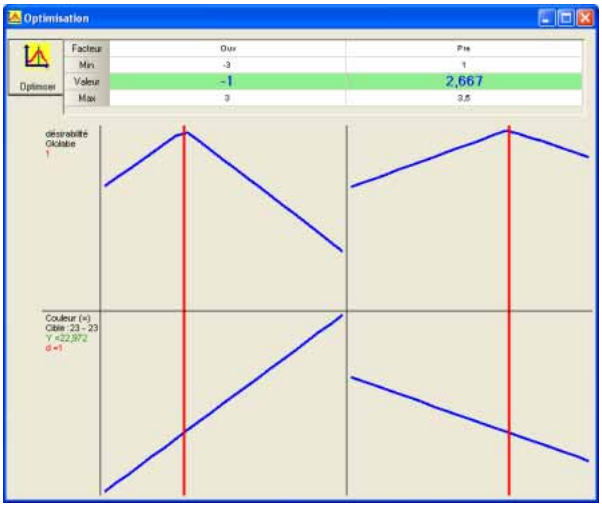


En cliquant sur optimiser on accède à la fenêtre suivante



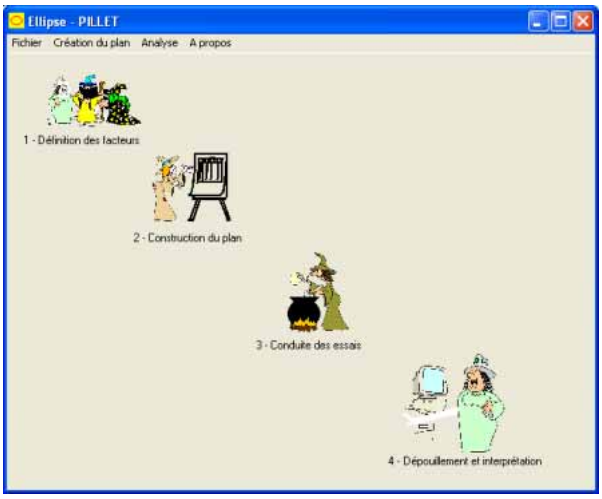
Qui donne le graphe des effet et le graphe de la désirabilité (dans notre exemple la désirabilité est maximale si on a une couleur de 23)

En cliquant sur le bouton optimiser de cette fenêtre, on obtient directement une solution.

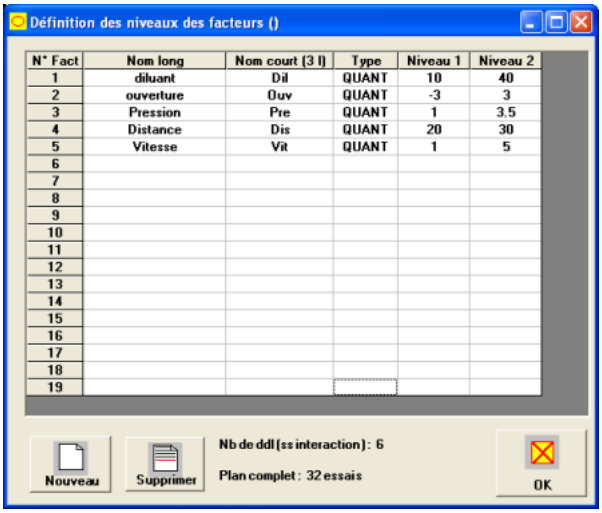


En cliquant dans la zone de dessin, on peut positionner les facteurs dans une position particulière.

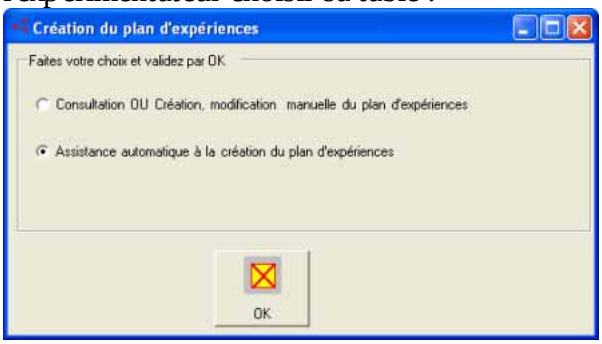
2. Construction d'un Plan factoriel fractionnaire



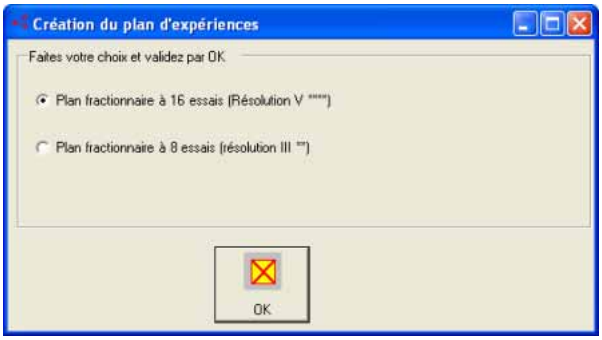
Pour construire le plan d'expériences, on doit d'abord définir les facteurs en leur donnant un nom, un nom court et les niveaux ou ils sont étudiés.



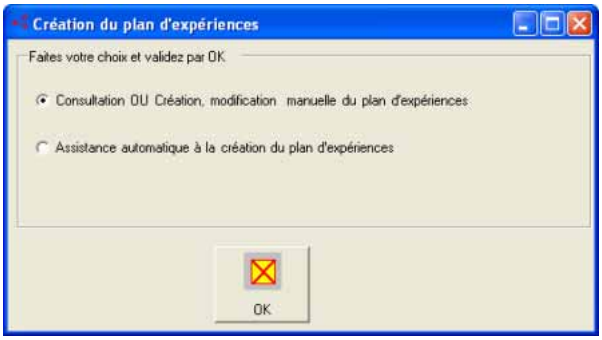
La seconde étape consiste à choisir une table. Ellipse permet soit de proposer directement une table adaptée soit de laisser l'expérimentateur choisir sa table :



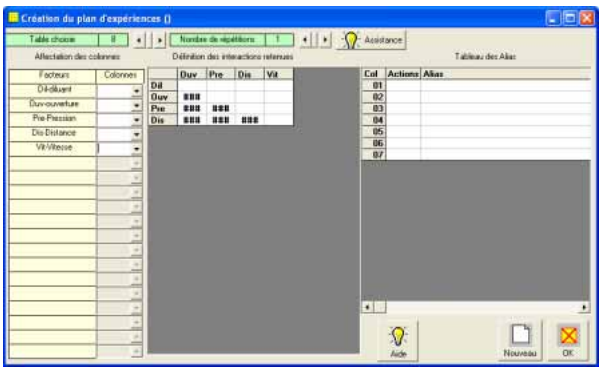
Dans ce cas Ellipse propose deux solutions :



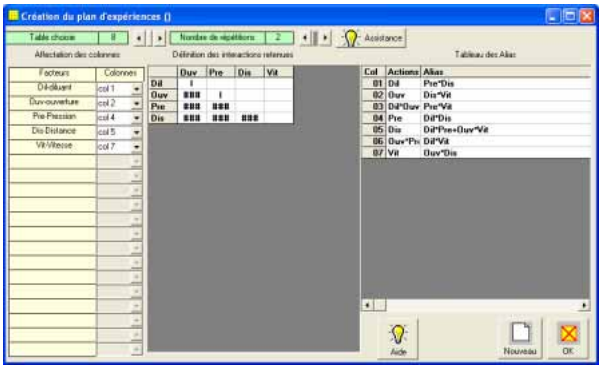
Si on choisit la solution manuelle



Ellipse affiche alors le tableau suivant qu'il suffit de remplir



En saisissant : la table choisie, les numéros des colonnes affectés aux facteurs, et le nombre de répétition, ici 2 par exemple.



On valide le plan en cliquant sur OK

Choix des colonnes pour les facteurs

Pour chaque facteur, on définit la colonne dans laquelle on souhaite affecter le facteur. Un récapitulatif du contenu de chaque colonne est affiché dans le cadre "Tableau des Alias".

Choix des colonnes pour les interactions

Pour sélectionner une interaction que l'on souhaite retenir, on clique avec la souris dans le tableau des interactions. Un "I" s'affiche. Pour éliminer une sélection, on clique une nouvelle fois sur l'interaction. Dans le cas où la colonne dans laquelle se trouve l'interaction sélectionnée est déjà réservée pour un facteur ou pour une autre interaction, un message d'alerte s'affiche.

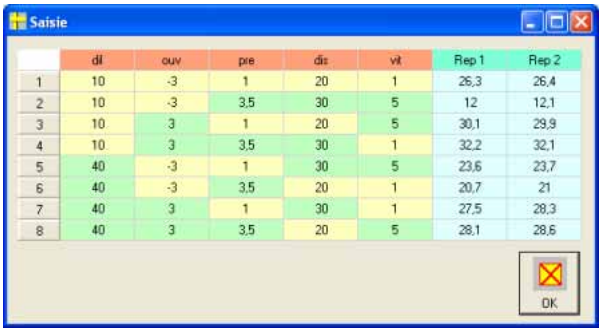
Le "tableau des Alias" donne, outre les facteurs et les interactions retenues, toutes les interactions de second ordre et les colonnes correspondantes. On peut ainsi facilement visualiser les risques que l'on prend en réalisant le plan choisi.

On cherche toujours dans un plan d'expériences de manière à avoir la meilleure résolution possible, c'est à dire à avoir le moins d'alias possible. On pourra se référer à la documentation spécialisée pour le choix optimum des colonnes.

2. Conduite des essais

La conduite des essais consiste à saisir le résultat du plan d'expériences. Le nombre de colonnes disponibles pour la saisie des

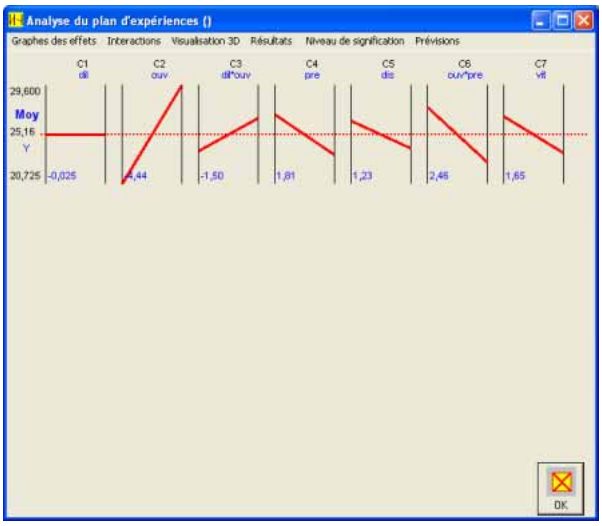
réponses est égal au nombre de répétitions qui ont été déclarées dans la phase de construction du plan.



	dil	ouv	pre	dis	vit	Rep 1	Rep 2
1	10	-3	1	20	1	26,3	26,4
2	10	-3	3,5	30	5	12	12,1
3	10	3	1	20	5	30,1	29,9
4	10	3	3,5	30	1	32,2	32,1
5	40	-3	1	30	5	23,6	23,7
6	40	-3	3,5	20	1	20,7	21
7	40	3	1	30	1	27,5	28,3
8	40	3	3,5	20	5	28,1	28,6

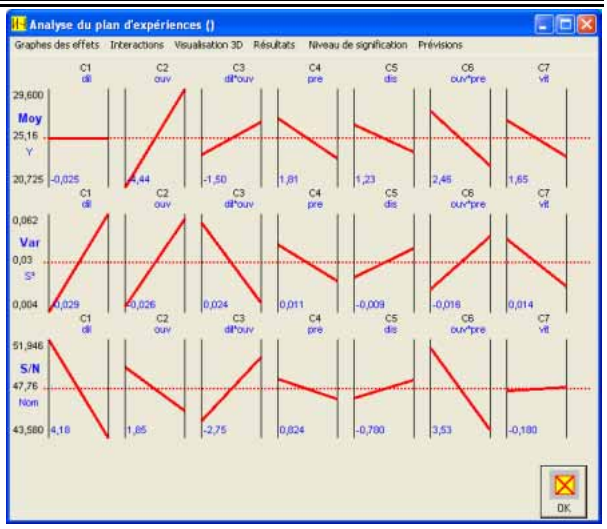
3. Analyse du plan

Menu "Graphe des effets"



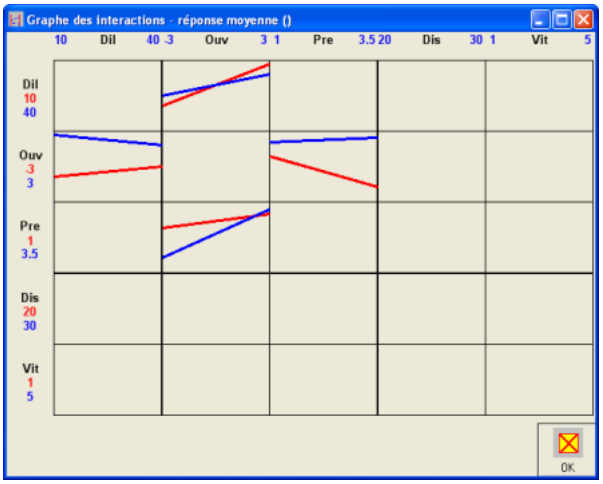
Par défaut, Ellipse affiche le graphe des effets sur la moyenne des réponses saisies dans la phase "essais"

Dans le cas où plusieurs réponses ont été saisies, notamment dans le cas de "plans produits de Taguchi", il est possible de faire afficher trois réponses à l'écran en utilisant le menu "Graphe des effets".

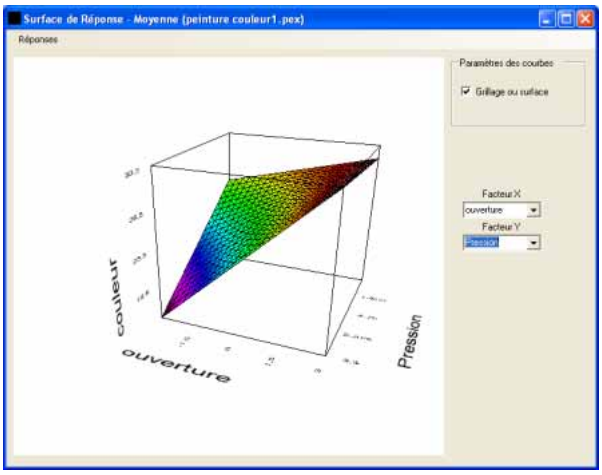


Menu interactions

Le menu "Interactions" permet d'afficher le graphe des interactions retenues dans le plan d'expériences. Dans notre exemple, nous avons retenu les interactions Dil/Ouv et Ouv/pres

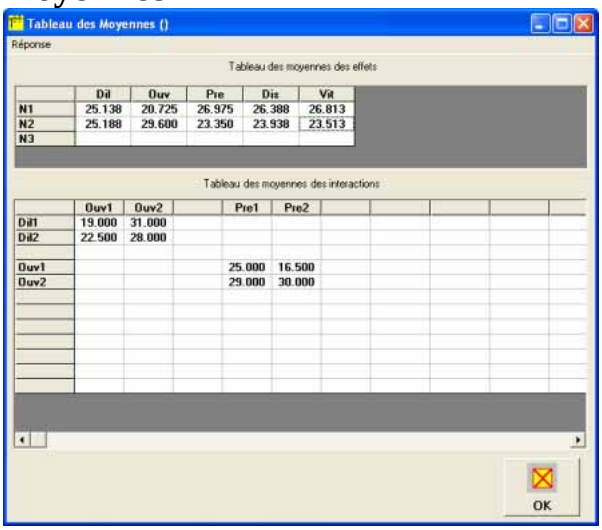


Menu Visualisation 3D



Permet de voir en 3 dimensions, l'influence de deux facteurs par rapport à la réponse étudiée. On choisit les facteur avec les boîtes déroulantes. La figure 3D peut être orientée dans toutes les directions avec la souris.

Menu "Résultat" "Tableau des moyennes"

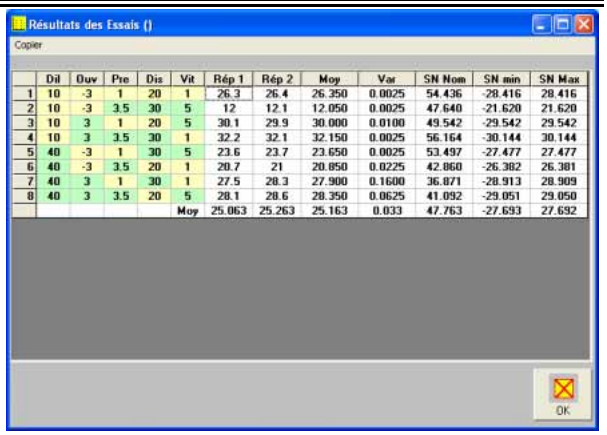


	Dil	Ouv	Pre	Dis	Vit
N1	25.138	20.725	26.975	26.388	26.813
N2	25.188	29.600	23.350	23.938	23.513
N3					

	Ouv1	Ouv2	Pre1	Pre2
Dil1	19.000	31.000		
Dil2	22.500	28.000		
Ouv1			25.000	16.500
Ouv2			29.000	30.000

Ce tableau affiche le résultat des calculs des effets des facteurs et des interactions. On trouve les moyennes lorsque chaque facteur est au niveau 1 et au niveau 2. On trouve également les moyennes pour chacune des combinaisons des interactions retenues.

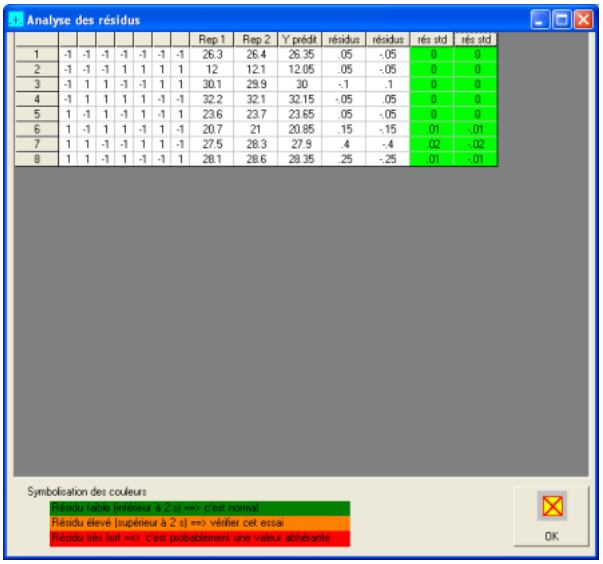
Menu "Résultat" "Essais"



	Dil	Ouv	Pre	Dis	Vit	Rép 1	Rép 2	Moy	Var	SN Nom	SN min	SN Max
1	10	-3	1	20	1	26.3	26.4	26.350	0.0025	54.436	-28.416	28.416
2	10	-3	3.5	30	5	12	12.1	12.050	0.0025	47.640	-21.620	21.620
3	10	3	1	20	5	30.1	29.9	30.000	0.0100	49.542	-29.542	29.542
4	10	3	3.5	30	1	32.2	32.1	32.150	0.0025	56.164	-30.144	30.144
5	40	-3	1	30	5	23.6	23.7	23.650	0.0025	53.497	-27.477	27.477
6	40	-3	3.5	20	1	20.7	21	20.850	0.0225	42.860	-26.382	26.381
7	40	3	1	30	1	27.5	28.3	27.900	0.1600	36.871	-28.913	28.909
8	40	3	3.5	20	5	28.1	28.6	28.350	0.0625	41.092	-29.051	29.050
					Moy	25.063	25.263	25.163	0.033	47.763	-27.693	27.692

Ce tableau affiche le résultat des essais, ainsi que la moyenne, la variance, les signaux S/N de Taguchi de chacun des essais du plan.

Menu "Résultat" "Résidus"

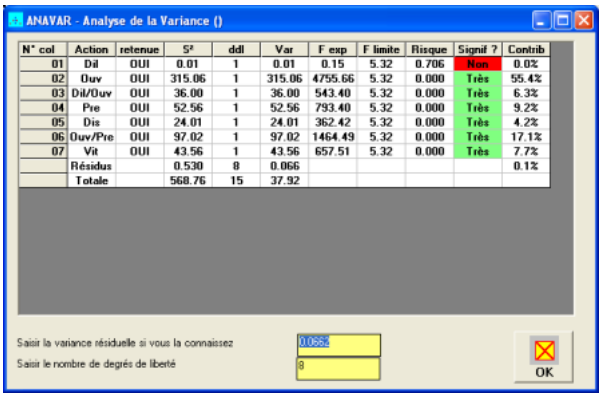


							Rep 1	Rep 2	Y prédit	résidus	résidus	rés std	rés std
1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	26.3	26.4	26.35	.05	-.05	0	0
2	-1	-1	-1	1	1	1	12	12.1	12.05	.05	-.05	0	0
3	-1	1	1	-1	-1	1	30.1	29.9	30	-.1	.1	0	0
4	-1	1	1	1	1	-1	32.2	32.1	32.15	-.05	.05	0	0
5	1	-1	1	-1	1	1	23.6	23.7	23.65	.05	-.05	0	0
6	1	-1	1	1	-1	-1	20.7	21	20.85	.15	-.15	.01	-.01
7	1	1	-1	-1	1	-1	27.5	28.3	27.9	.4	-.4	.02	-.02
8	1	1	-1	1	-1	1	28.1	28.6	28.35	.25	-.25	.01	-.01

Ce menu fait l'analyse statistique des résidus (écart entre la valeur de la régression et la valeur de l'essai) pour l'ensemble des essais.

Menu "Niveau de Signification"

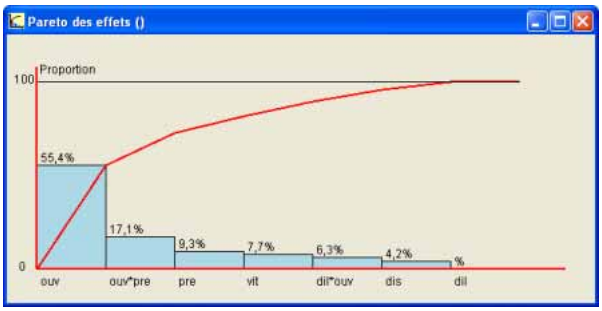
ANAVAR



N° col	Action	retenue	S²	ddl	Var	F exp	F limite	Risque	Signif ?	Contrib
01	Dil	OUI	0.01	1	0.01	0.15	5.32	0.706	Non	0.0%
02	Ouv	OUI	315.06	1	315.06	4755.66	5.32	0.000	Très	55.4%
03	Dil/Ouv	OUI	36.00	1	36.00	543.40	5.32	0.000	Très	6.3%
04	Pre	OUI	52.56	1	52.56	793.40	5.32	0.000	Très	9.2%
05	Dis	OUI	24.01	1	24.01	362.42	5.32	0.000	Très	4.2%
06	Ouv/Pre	OUI	97.02	1	97.02	1464.49	5.32	0.000	Très	17.1%
07	Vit	OUI	43.56	1	43.56	657.51	5.32	0.000	Très	7.7%
	Résidus		0.530	8	0.066					0.1%
	Totale		568.76	15	37.92					

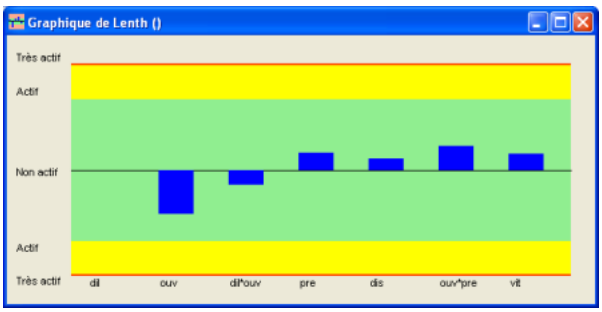
Dans le cas ou plusieurs répétitions ont été réalisées, il est possible de faire l'analyse de la variance sur la réponse en moyenne. On montre dans cet exemple que le diluant n'est pas significatif – Mais l'interaction diluant/ouverture est significative.

PARETO



Ce graphique classe les effets par importance

Graphe de lenth

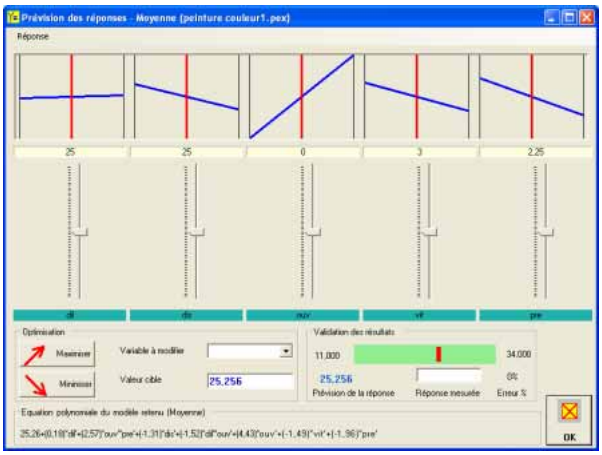


Ce graphique sert surtout dans le cas de plans de débroussaillage (L12 ou L20) pour déterminer les facteurs actifs en l'absence de répétition.

Dans le cas de répétitions, on lui préfère l'analyse de la variance.

Menu Prévision

Prévision

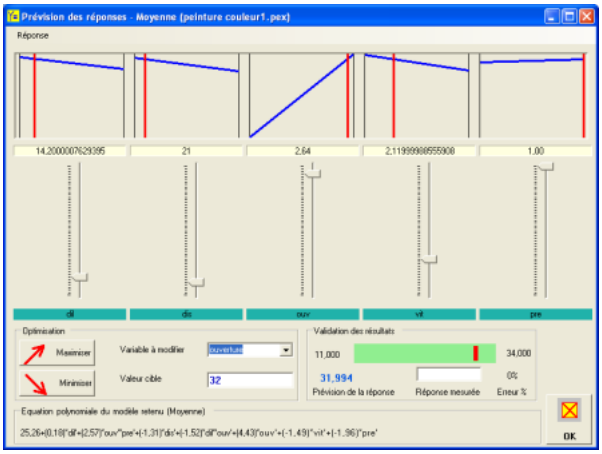


Cette fonctionnalité permet à Ellipse de :

- calculer la réponse prédite pour une configuration des facteurs ;
- trouver le niveau d'un facteur pour obtenir une réponse donnée.

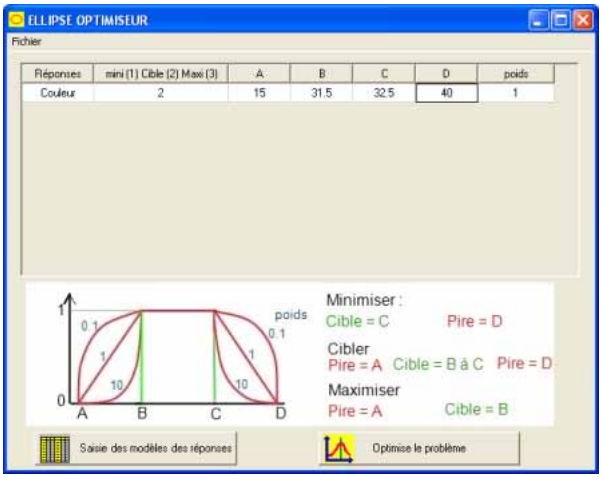
Si l'on veut maximiser la réponse, on clique sur "Maximiser" et ellipse donne mmédiatement la configuration qui maximise le résultat.

Si l'on veut obtenir la valeur de 32 (par exemple) en changeant l'ouverture, on saisie dans le cadre optimisation la valeur visée (32) et le facteur (Ouverture)



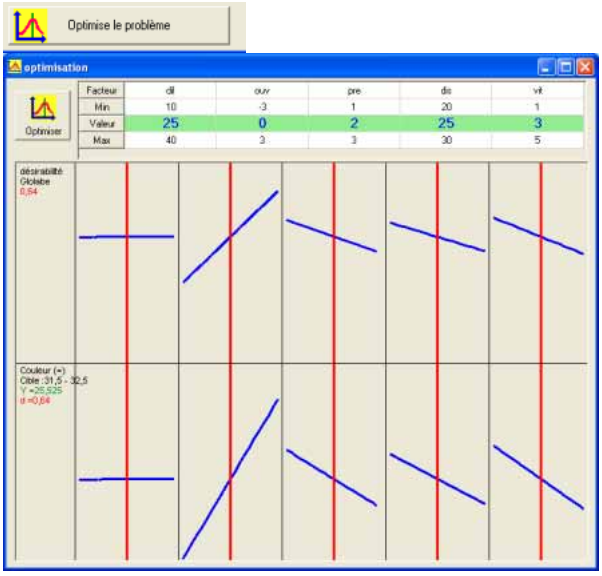
Optimisation

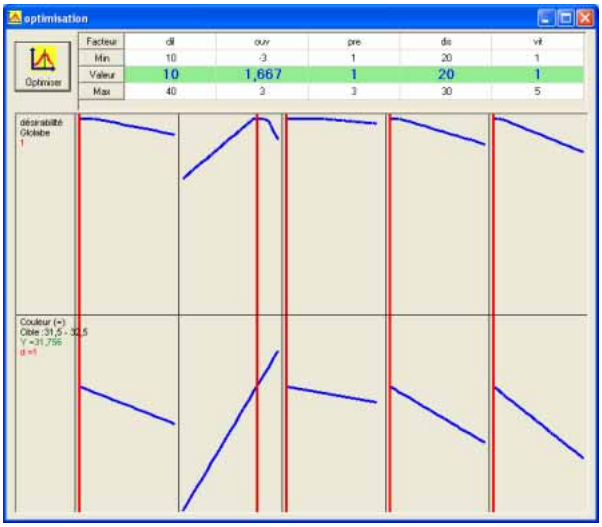
Cette fonctionnalité permet d'optimiser en utilisant la fonction de désirabilité.



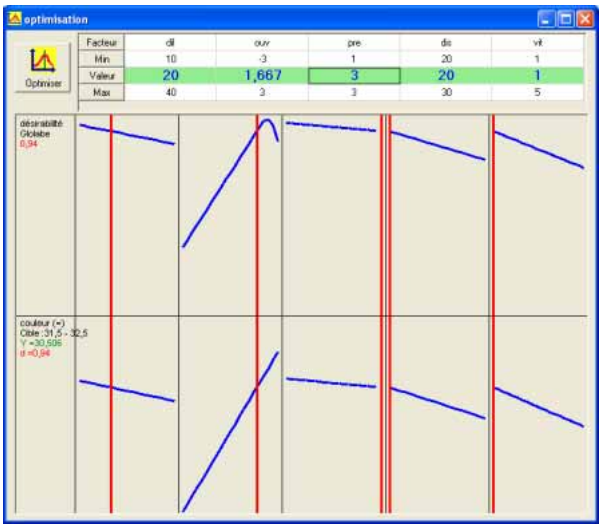
On défini dans un premier temps ce que l'on désire (désirabilité). Dans notre cas, une couleur comprise par exemple entre 31.5 et 32.5. Notre objectif est donc une cible

- la désirabilité sera de 1 si la réponse est entre 31.5 et 32.5
- la désirabilité sera égale à 0 si la réponse est inférieure à 15
- la désirabilité sera égale à 0 si la réponse est supérieure à 40
- dans les zone intermédiaires la désirabilité augmentera de 0 à 1 de façon linéaire.





L'optimisation nous donne directement une solution. Si on veut imposer des conditions, on rentre les valeurs imposées (exemple diluant = 20 et pression = 3, l'optimiseur nous indique immédiatement la solution pour maximiser la désirabilité



Que l'on peut obtenir en cliquant directement sur la fenêtre graphique à la position de l'ouverture qui maximise la fonction désirabilité.

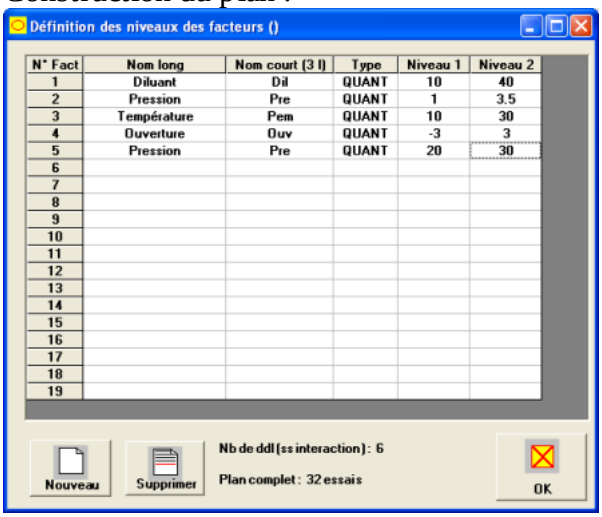
Optimisation de l'aspect acec ELLIPSE

Les plans d'expériences on besoin de résultats numériques pour pouvoir être traités.

Dans le cas de l'aspect, les résultats sont par nature non mesurable. Pour pouvoir les traiter, on peut utiliser l'artifice suivant. Pour chaque configuration, on mesure 30 produits et on note le nombre de produit "tendus", "peau d'orange", "Coulure".
L'optimisation consiste alors à maximiser la réponse "Bien tendu"

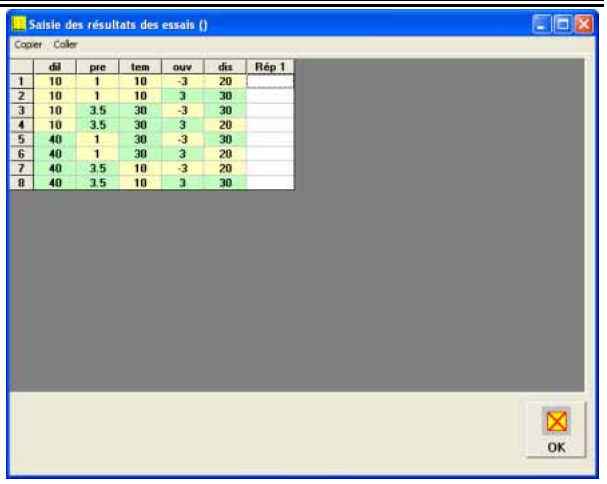
Correction de l'aspect avec ellipse

Construction du plan :



Essais :

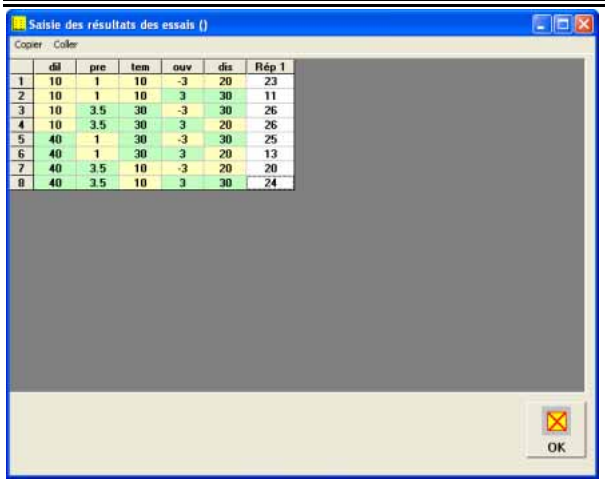
Ellipse génère le plan d'essais suivant :



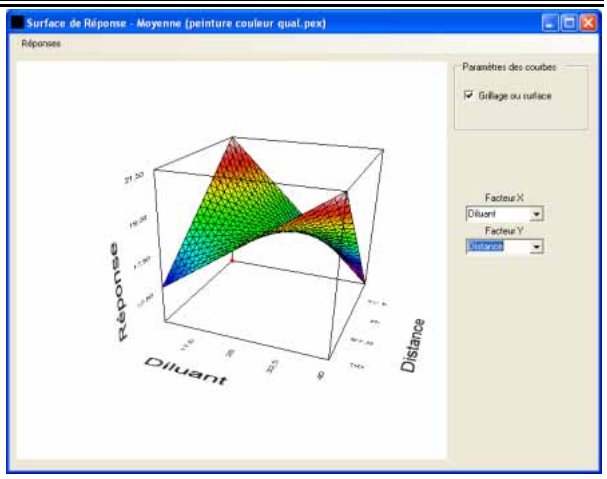
On réalise les essais en notant l'ensemble des réponses : Tendus, coulure, orange.

	dil	pre	tem	ouv	dis	coul	tend	PO	Tot
1	10	1	10	-3	20	7	23	0	30
2	10	1	10	3	30	16	11	3	30
3	10	3.5	30	-3	30	1	26	3	30
4	10	3.5	30	3	20	4	26	0	30
5	40	1	30	-3	30	4	25	1	30
6	40	1	30	3	20	16	13	1	30
7	40	3.5	10	-3	20	2	20	8	30
8	40	3.5	10	3	30	6	24	0	30

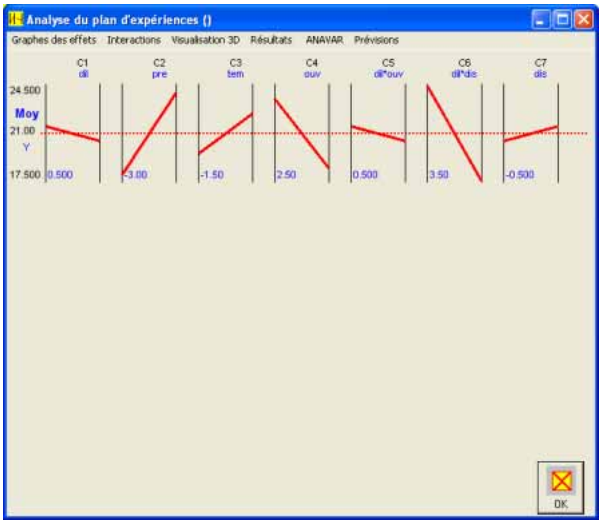
On saisie dans ellipse la colonne des "tendus", ce qui donne :

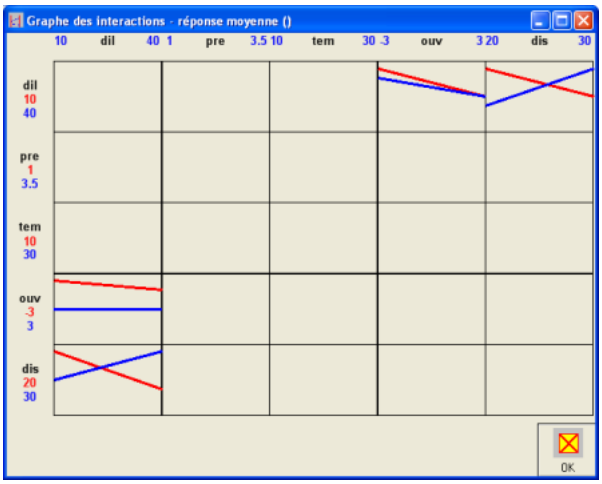


	dil	pre	tem	ouv	dis	Rép 1
1	10	1	10	-3	20	23
2	10	1	10	3	30	11
3	10	3.5	30	-3	30	26
4	10	3.5	30	3	20	26
5	40	1	30	-3	30	25
6	40	1	30	3	20	13
7	40	3.5	10	-3	20	20
8	40	3.5	10	3	30	24



L'interprétation donne :

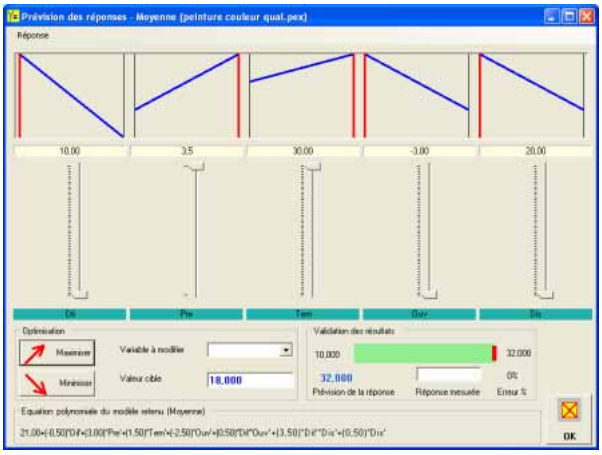




On note une très forte interaction entre la distance et le diluant qui se visualise en 3 D.

Pour avoir une couleur bien tendu il faut donc avoie soit une distance courte avec peu de diluant, soit une distance éloigné avec beaucoup de diluant. La proportion de diluant doit être proportionnelle à la distance. Le diluant sert à transporter le vernis, idéalement il doit être évaporé en arrivant sur la surface.

L'optimisation est immédiate avec ellipse, cela consiste à afficher la fenêtre prévision et à maximiser le résultat



Cette configuration n'est pas testée dans le plan d'expériences, on vérifie sur le simulateur qu'elle est bien celle qui donne 100% (ou presque) de produits tendus.

Si l'on veut analyser les coulures ou les peaux d'orange, on saisie la réponse correspondante dans ellipse.

Guide de mise en place du travail pratique

Le TP tel qu'il est présenté dans cette fiche se déroule sur une période de quatre à huit heures selon les compétences préalables des stagiaires. L'utilisation de ELLIPSE simplifie la phase de calcul. On peut alors travailler la partie stragégie de construction.

Etape 1

Recherche d'un modèle de comportement par la démarche traditionnelle

Le simulateur s'utilise en mettant plusieurs stagiaires (deux ou trois) devant le même ordinateur pour stimuler les commentaires et réflexions des stagiaires.

Après avoir expliqué aux stagiaires le fonctionnement du simulateur de peinture, on leur propose de comprendre par une démarche expérimentale l'influence des différents facteurs par une méthode de leur choix. On prévient les stagiaires que l'objectif est de minimiser le nombre d'essais et le nombre de mesures afin d'obtenir un coût minimum.

Pour lancer la première simulation, on distribue la fiche information 1. L'objectif demandé d'une couleur de 38 est impossible à obtenir, mais les stagiaires ne doivent pas le savoir. A la fin de cette étape, chaque groupe donne les résultats obtenus ainsi que la stratégie choisie pour obtenir ces résultats. On commente les résultats et le nombre d'essais nécessaires pour les obtenir.

Etape 2

Recherche d'un modèle de comportement par plans d'expériences

Pour faire la seconde partie, on distribue la fiche d'information 2. Compte-tenu des interactions qui sont retenues par les spécialistes, on construit facilement un plan d'expériences à huit essais pour chacune des réponses. On peut également réaliser l'étude des deux réponses en un seul plan à partir de la table $L_{16,}$ mais cela n'est pas souhaitable d'un point de vue pédagogique s'il s'agit d'une première expérience des élèves.

Pour le plan couleur : on prend par exemple :

Facteurs retenus	Dil	Ouv	Press	Dist	Vit
Colonnes table L_8	1	2	4	7	5

Un ou deux produits par ligne suffisent en mesure.

Pour le plan aspect : on prend par exemple :

Facteurs retenus	Dil	Dist	Ouv	Press	Temp
Colonnes table L_8	1	7	4	2	3

Il faut réaliser 25 produits par lignes pour pouvoir traiter ce problème en aspect.

Les plages de variations des facteurs sont :

Sym	Facteur	Mini	Maxi	Incrément
Dil	Pourcentage de diluant	10 %	40 %	1
Tem	Température du vernis	10 °	30 °	1
Dis	Distance pistolet/pièces	20 cm	30 cm	1
Ouv	Ouverture du pistolet	-3	+3	1
Pre	Pression de l'air comprimé	1 b	3,5 b	0,1
vit	Vitesse de déplacement des pièces	1	5	1

Les extrêmes permis par le logiciel sont des extrêmes réalistes pour donner une production acceptable.

Réponses

Couleur de la pièce - valeur qui peut aller de 0 à 60. Recherche de nominale.
Aspect de la pièce - Peut prendre trois aspects (bien tendu, peau d'orange, coulure).

Etape 3
Stratégies et résultats

Cette étape a pour objectif de montrer comment réaliser un plan d'expériences sous différentes stratégies, et de montrer les résultats que l'on obtient.

Exemple de stratégies intéressantes de tester avec la réponse "couleur".

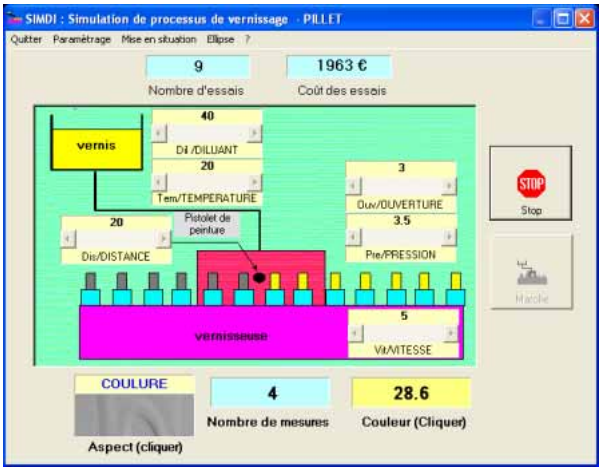
Prendre tous les facteurs et utiliser la table L8. Il y a de nombreux Alias (confusion d'actions) et l'interprétation de la table donne des résultats faux. On peut montrer comment désaliasser ce plan d'expériences en passant à la table L16 en utilisant les colonnes impaires.

Prendre tous les facteurs et utiliser uniquement les colonnes impaires de la table L16. On est alors en résolution IV, et on peut déterminer les interactions a posteriori sans trop de difficulté.

Prendre tous les facteurs et utiliser la table L12. On voit le rôle de la table L12 qui est de hiérarchiser les différents facteurs, mais qui ne donne pas d'information sur les interactions.

Pour cette dernière étape, on utilisera l'assistance informatique du logiciel ELLIPSE

SIMDI PEINTURE - FICHE d'informations 1



Objectifs de l'expérimentation

Vous êtes responsable de la cellule de vernissage d'objets en plastique dans l'entreprise SIMDI. L'objectif de cette ligne est de déposer un film de vernis sur des objets en plastique recouvert d'une couche d'aluminium par anodisation. Le but de ce film plastique est de donner l'aspect d'un objet doré. La réponse mesurée est la couleur de l'objet après vernissage par une mesure LAB. La réponse donnée est mesurée sur l'axe des jaunes et peut théoriquement aller de 0 à 60.

Chaque client de l'entreprise demande un jaune particulier, et il faut être capable de s'adapter très vite à différentes couleurs pour passer d'une pièce à l'autre. Le vernis qui sera utilisé pour les essais est celui qui est le plus couramment utilisé par l'entreprise. Cependant, l'entreprise utilise parfois des vernis plus ou moins colorés.

Pour limiter les temps de changement de série, on voudrait réaliser l'ensemble de la production avec un seul vernis, et disposer d'un modèle capable de trouver très rapidement le réglage à réaliser pour obtenir une couleur donnée. Les commandes des clients vont habituellement d'un jaune de 13 à 38.

Pour être capable de répondre à ces objectifs, vous devez, à partir d'une démarche expérimentale de votre choix :

- chiffrer le sens et l'importance de l'influence des différents facteurs sur la couleur ;
- déterminer s'il y a des interactions entre les différents facteurs ;
- déterminer la couleur mini et le maxi qu'il est possible d'atteindre avec ce vernis ;
- déterminer un modèle qui permette de prévoir une couleur pour une configuration de facteur ;
- déterminer une méthode qui permette de régler très rapidement les facteurs pour obtenir une couleur donnée.

Votre objectif de coût :

Evidemment, on cherchera à atteindre ces objectifs pour un coût minimum sachant que :

- le coût d'un essai (mise en marche en cliquant sur « MARCHE »):
  1 000 Euros
- le coût d'une mesure de couleur :
  50 Euros
- le coût d'une mesure d'aspect
  5 Euros

SIMDI PEINTURE - FICHE d'informations 2

Une réunion avec les spécialistes de l'atelier de peinture a permis de mettre en évidence les paramètres a priori les plus influents sur la réponse, ainsi que les interactions susceptibles d'être recherchées.

Pour la réponse couleur :

Facteurs		Difficultés	Symbole
A	Diluant	Très difficile	
C	Distance	Assez difficile	
D	Ouverture	Facile	
E	Pression	Facile	
F	Vitesse	Facile	

Interactions supposées

entre A et D
entre D et E

Graphe associé

Graphe de Taguchi

Affectation des colonnes

Facteurs	colonnes
A	
C	
D	
E	
F	

Pour la réponse aspect :

Facteurs		Difficultés	Symbole
A	Diluant	Très difficile	
B	Température	Difficile	
C	Distance	Assez difficile	
D	Ouverture	Facile	
E	Pression	Facile	

Interactions supposées

entre A et C
entre A et D

Graphe associé

Graphe de Taguchi

Affectation des colonnes

Facteurs	colonnes
A	
B	
C	
D	
E	

Fiche de calcul plan d'expériences couleur

Réalisation du plan :

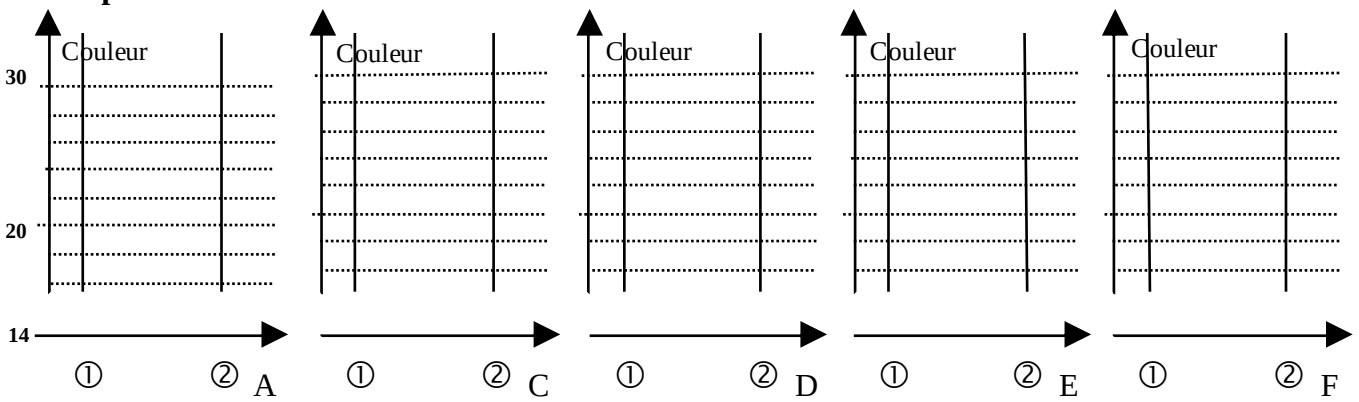
N°	A	C	D	E	F	Couleur
1						
2						
3						
4						
5						
6						
7						

Moyenne générale des essais : .....

Tableau des moyennes :

	A	C	D	E	F
1					
2					

Graphe des effets :

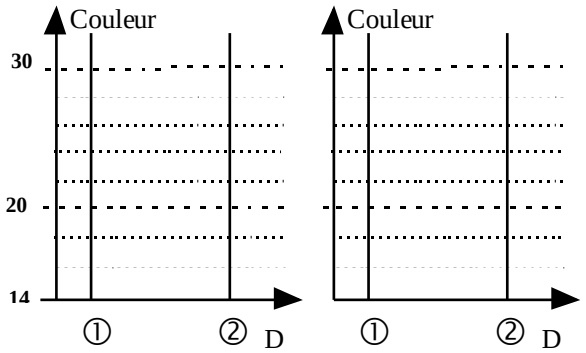


Effet de A Effet de C

Tableau des interactions

		D 1	D 2
A	1		
	2		

		D 1	D 2
E	1		
	2		



Interaction AD Interaction DE

Modèle du système :

.....

Fiche de calcul plan d'expériences aspect

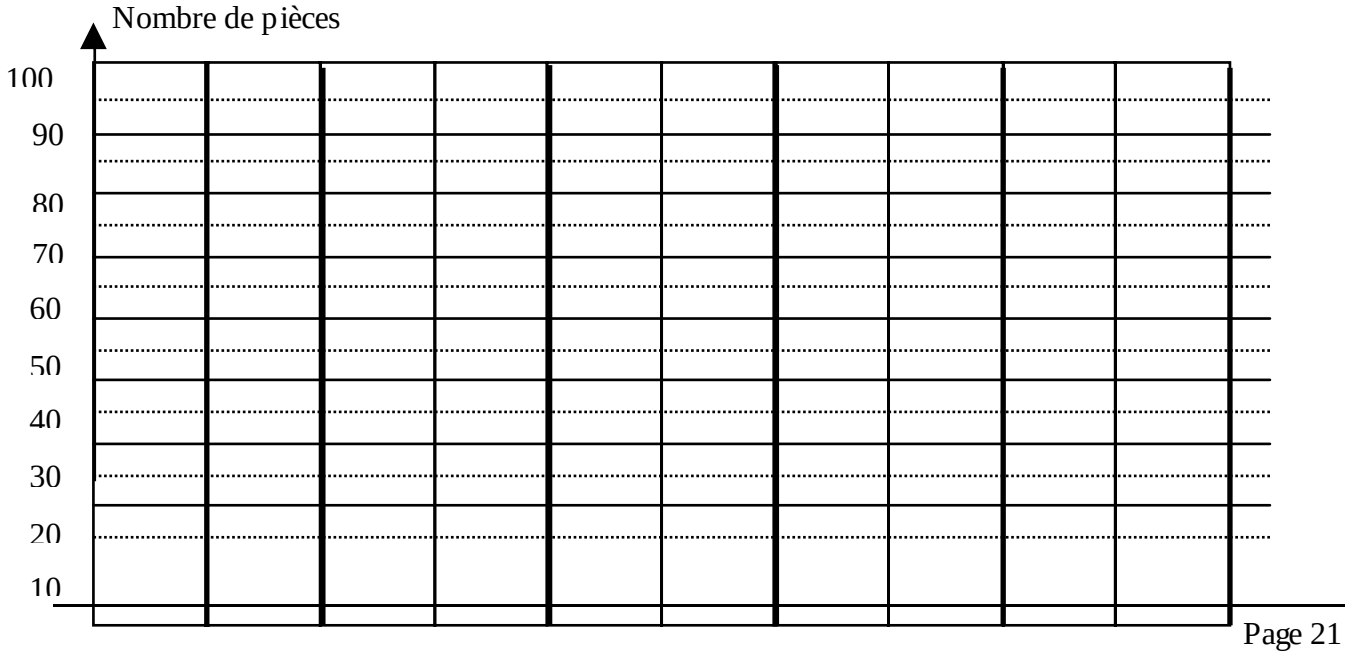
Réalisation du plan :

N°	A	B	C	D	E	Nombre de coulure	Nombre de bien tendu	Nombre de peau d'orange	Total
1									25
2									25
3									25
4									25
5									25
6									25
7									25
8									25

Tableau des totaux des effets principaux

	A			B			C			D			E		
Niveau 1															
Niveau 2															

Graphique des effets :



A1 A2 B1 B2 C1 C2 D1 D2 E1 E2

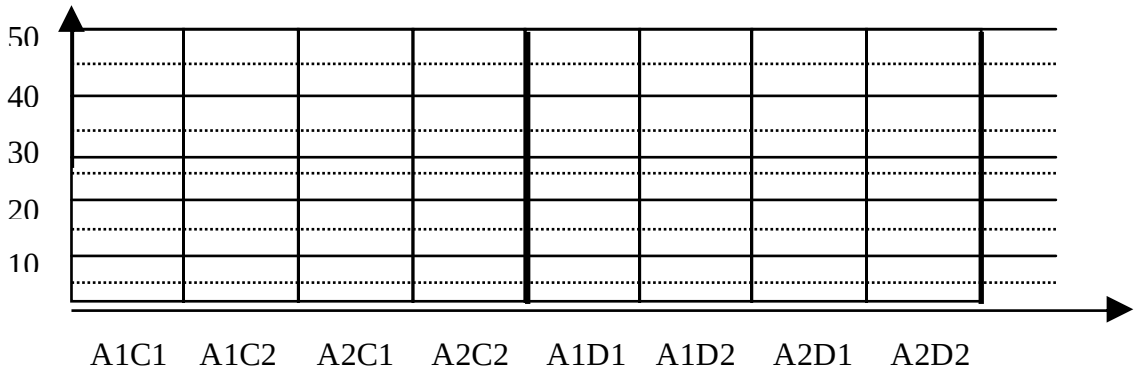
Tableau des totaux des interactions

	A1			A2		
C1						
C2						

	A1			A2		
D1						
D2						

Tableau des interactions

Nombre de pièces



Configurations optimales (Minimisation des peaux d'orange et des coulures)

	A	B	C	D	E
Configuration					
Configuration					