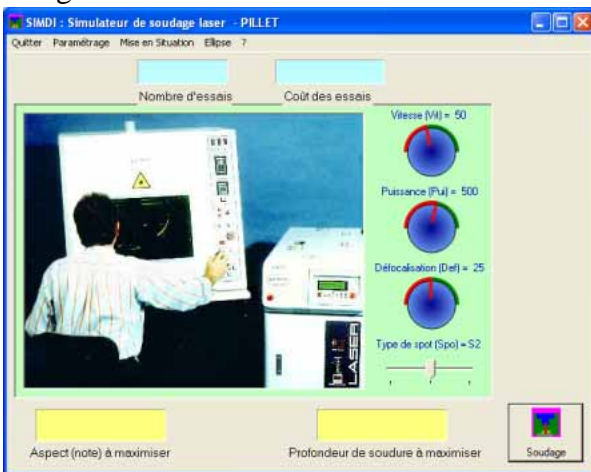


SIMDI - Laser

« 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 antagonistes.



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 :

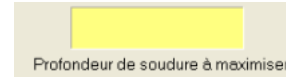
Facteurs	actuel	mini	maxi
Vitesse	50	20	80
Puissance	500	300	700
défocalisation	25	17	33

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

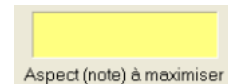
Fonctionnalités principales de SIMDI Laser



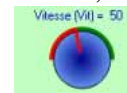
Ce bouton permet de lancer une simulation de soudure. A chaque simulation, le coût des essais augmente de 80 Euros.



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.

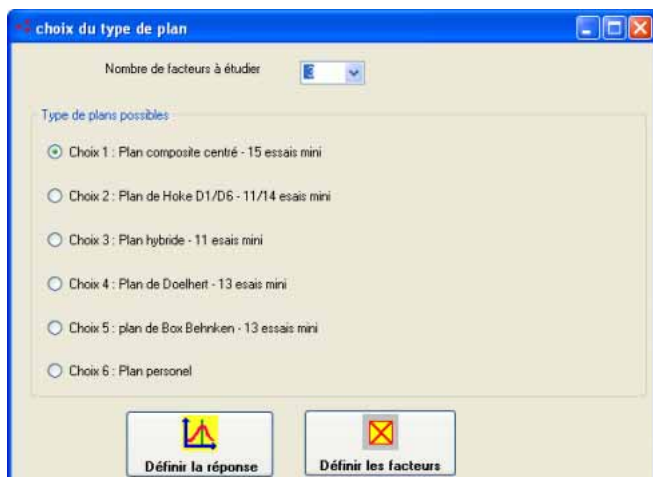
Construction du plan en surface de réponse

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)

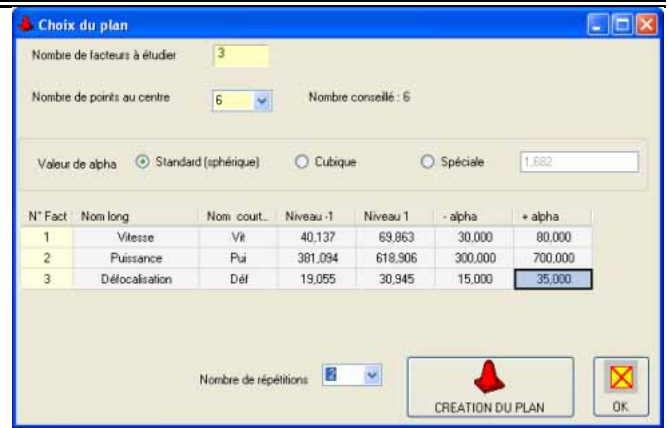
Les différents plans disponibles sont les suivants :

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
Réseau 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 cours 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 :

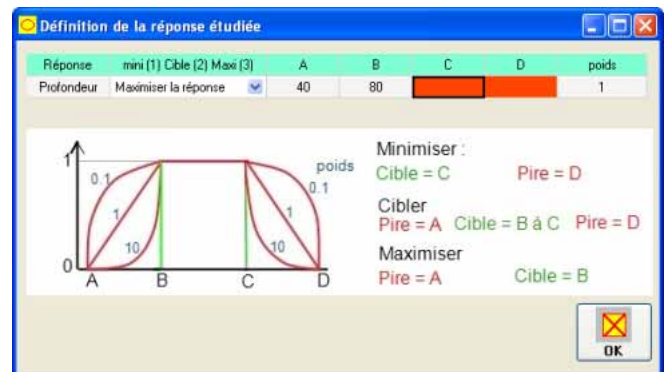


Pour définir le plan, on saisit :

- 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 modifiées (arrondies) dans la saisie des réponses pour correspondre aux vraies valeurs testées.

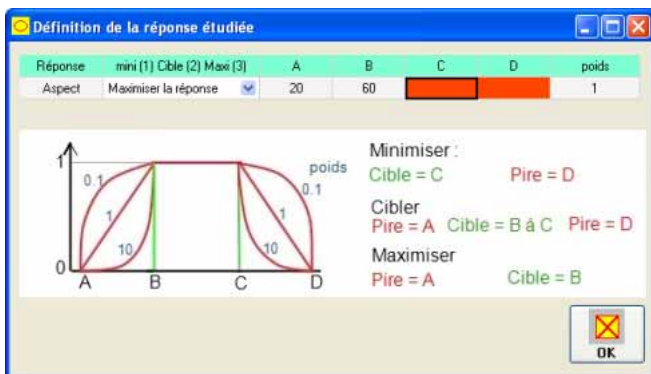
Saisie exemple SR Laser profondeur.pex

	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
Déf	-13,59206	6,901	0,895	7,709	0,000	Très	cliquer
Vte*Pui	0,00204	-3,656	0,871	-4,195	0,000	Très	cliquer
Vte*Déf	-0,00133	-4,125	1,170	-3,526	0,001	Très	cliquer
Vte*Déf	-0,00458	-0,750	1,170	-0,641	0,526	Non	cliquer
Pui*Déf	-0,00056	-8,251	0,871	-9,469	0,000	Très	cliquer
Pui*Déf	0,00080	0,125	1,170	0,107	0,916	Non	cliquer
Déf	0,29264	10,041	0,871	11,523	0,000	Très	cliquer

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

Modèle
 termes quadratiques
 termes d'interaction

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 réinitialisée.

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 :

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

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
Déf	-13,51246	6,901	0,873	7,906	0,000	Très	cliquer
Vte*Pui	0,00201	-3,656	0,850	-4,303	0,000	Très	cliquer
Vte*Déf	-0,00145	-4,125	1,141	-3,617	0,001	Très	cliquer
Pui*Déf	-0,00056	-8,251	0,850	-9,711	0,000	Très	cliquer
Déf	0,29379	10,041	0,850	11,818	0,000	Très	cliquer

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

Modèle
 termes quadratiques
 termes d'interaction

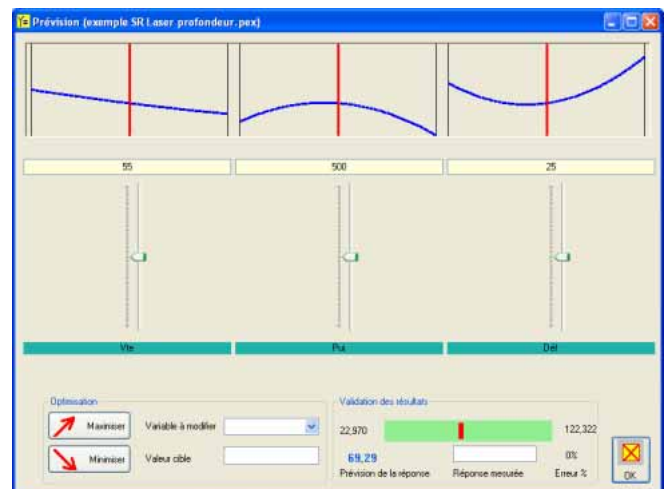
Analyse automatique en supprimant les facteurs les moins significatifs par ordre décroissant

Graphe des effets

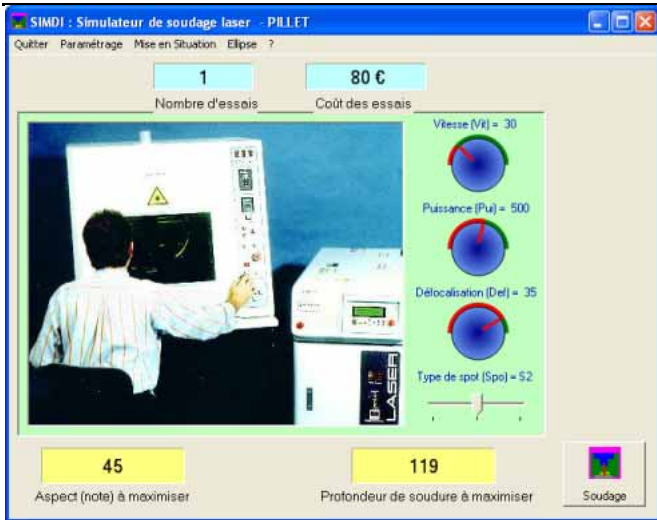
Menu prévision / Prévision sur la réponse



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 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.

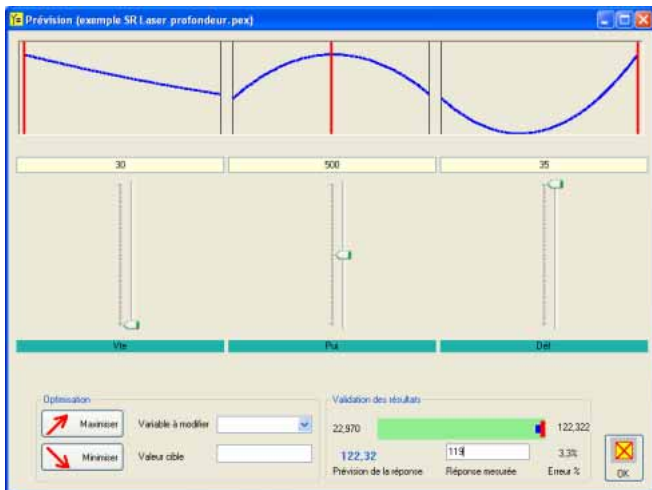
En aspect

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

Action	Coef réel	Coef red	Sigma	T	Proba p	Signif	éliminer
Cte	112,31933	35,500	0,739	48,017	0,000	Très	clicquer
Vte	-0,31003	-4,263	0,578	-7,378	0,000	Très	clicquer
Pui	-0,30454	-3,975	0,578	-6,860	0,000	Très	clicquer
Del	0,89974	5,004	0,578	10,045	0,000	Très	clicquer
Vte²	-0,00003	-2,158	0,560	-3,856	0,000	Très	clicquer
Vte*Pui							clicquer
Vte*Del							clicquer
Pui²	0,00027	3,586	0,560	6,408	0,000	Très	clicquer
Pui*Del							clicquer
Del²							clicquer

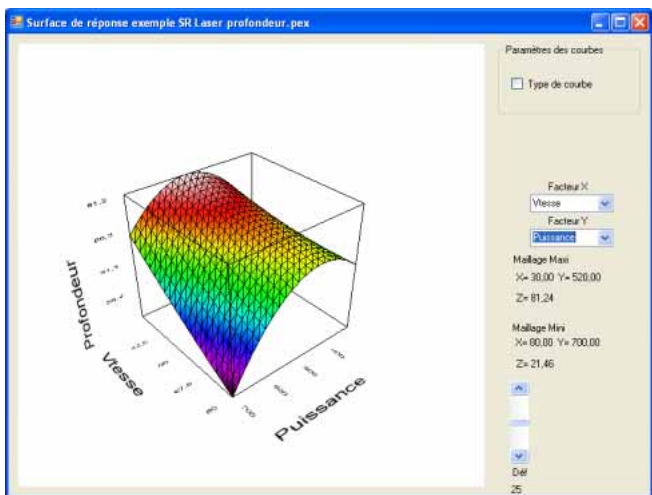
Paramètre	S	R²	R² Ajusté
Valeur	3,0201	88,6%	86,9%

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

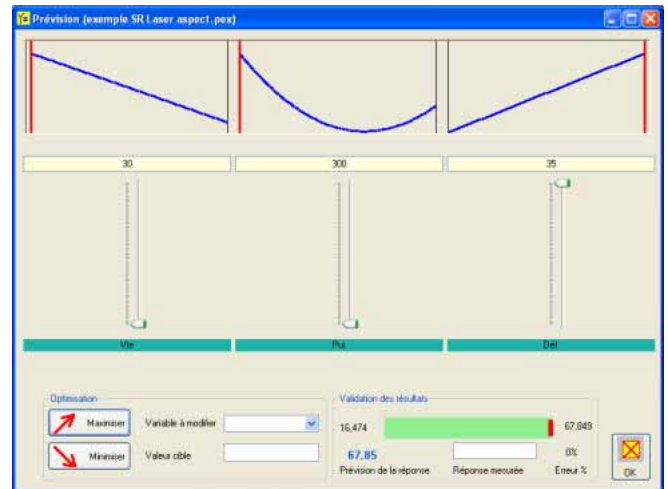


Ici l'erreur est de 3%, notons que cet essai ne fait pas partie des essais du plan d'expériences, une erreur inférieure à 10% est tout à fait satisfaisante.

Visualisation en 3D de la surface



Et comme configuration donnant la valeur maximum :



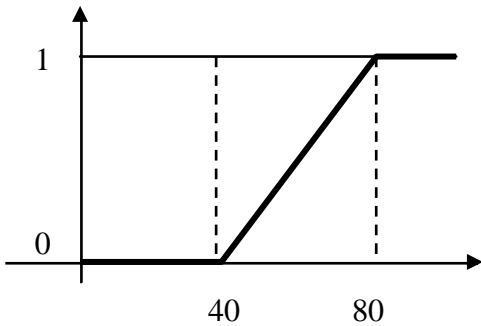
Qui ne donne pas le même résultat que pour la profondeur. Le bon résultat doit donc donner un bon compromis entre ces deux résultats.

Une première solution consiste à bouger les curseurs pour trouver par tâtonnement un résultats satisfaisant les deux objectifs. La seconde solution consiste à utiliser la désirabilité.

Optimisation de deux réponses par la désirabilité

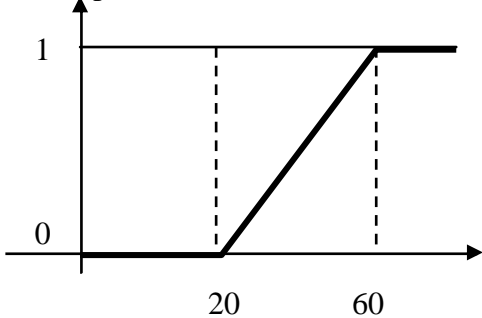
La désirabilité consiste à utiliser une réponse unique qui ferait directement l'optimum entre les deux réponses. Pour cela, il faut ramener les deux valeurs à une réponse entre zéro et 1. On parle alors de désirabilité

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 progression linéaire

Pour l'aspect



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

$$D_{\text{globale}} = \left(D_{\text{prof}}^{\text{Poids}_{\text{prof}}} \cdot D_{\text{asp}}^{\text{Poids}_{\text{asp}}} \right)^{\frac{1}{\sum \text{Poids}}}$$

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.

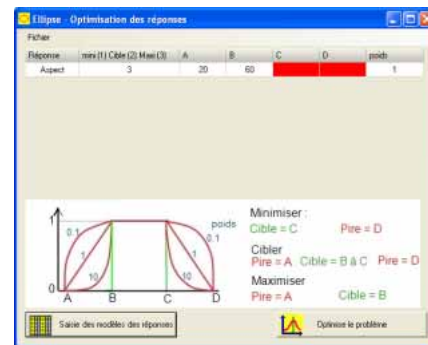
Pour pouvoir faire cette optimisation, on active le module d'optimisation de ellipse. Pour cela il faut préalablement sauver les modèles polynomiaux des surface de réponses (Fenêtre Principale/menu Fichiers/exporter le modèle)

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

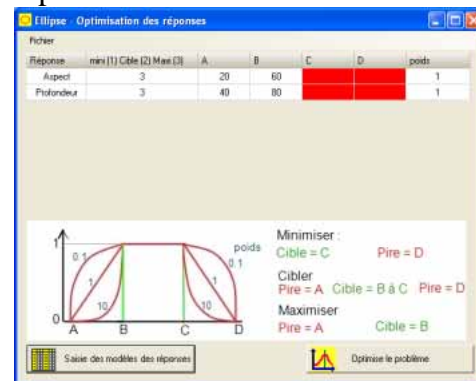
Utilisation du module d'optimisation



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

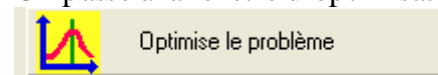


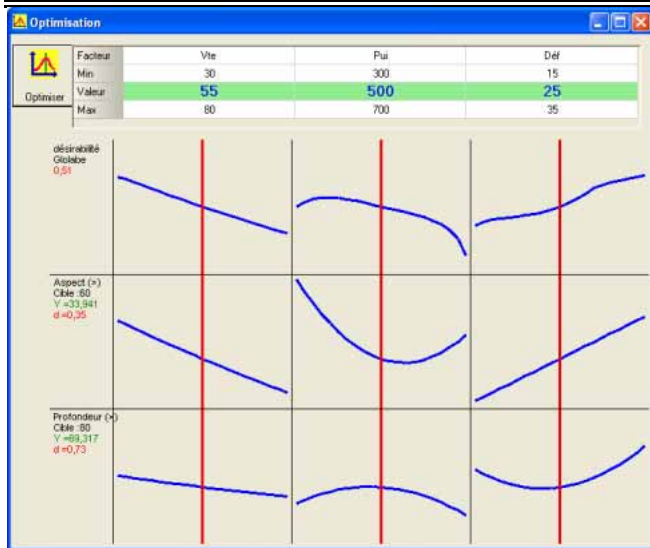
Et par le menu fichier on importe la seconde réponse.



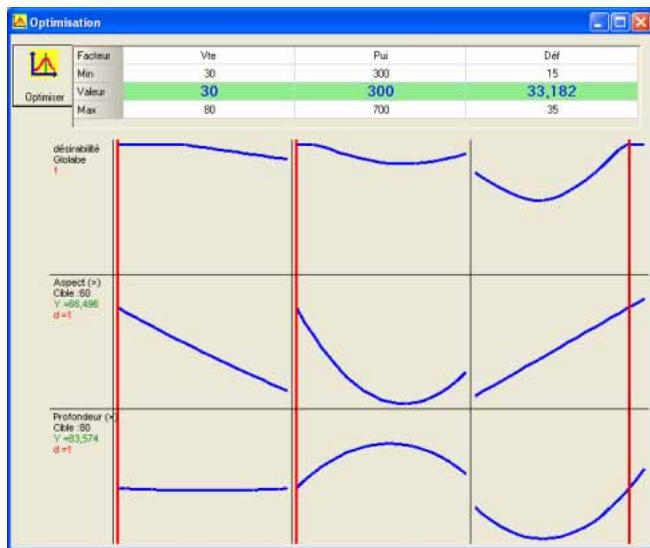
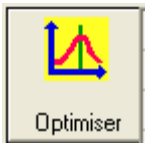
On a ainsi les deux réponses à optimiser avec la définition de leur désirabilité.

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

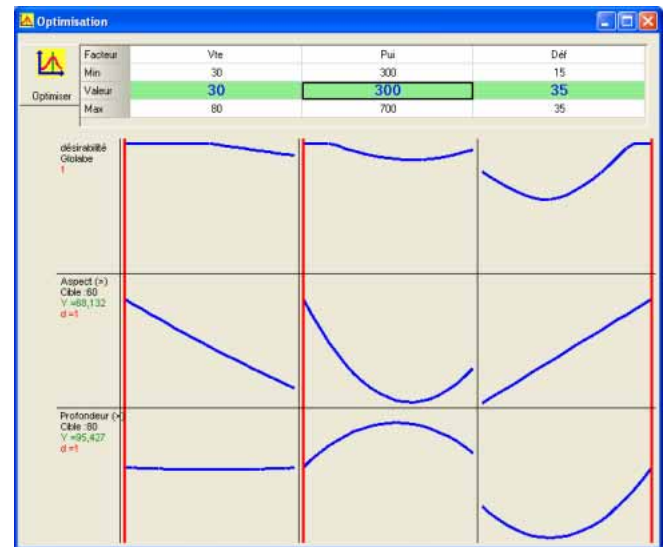
La réponse en aspect

La desirabilité globale que l'on cherche à avoir à 1 : solution qui satisfait à la fois les deux exigences.

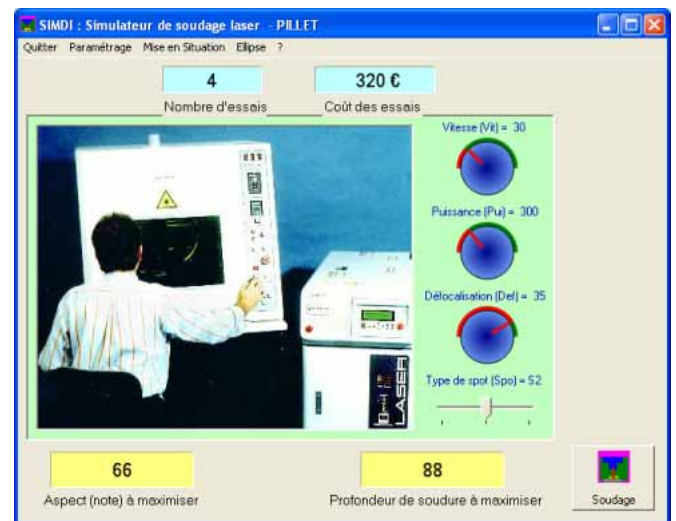
En cliquant directement sur le graphique ou en saisissant les valeurs des facteurs dans le tableau, on peut réaliser une optimisation manuelle.

Par exemple, même si la solution proposée par ellipse donne une desirabilité 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 résultats 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 :

Choix du plan exemple SR Laser aspect 4 facteurs.pex

Nombre de facteurs à étudier : 4

Nombre de points au centre : 7 (Nombre conseillé : 7)

Valeur de alpha : Standard (sphérique) Cubique Spéciale (2.000)

N° Fact	Nom long	Nom court	Niveau -1	Niveau 1	-alpha	+alpha
1	Vitesse	Vte	42,5	67,5	30	80
2	Puissance	Pui	400	600	300	700
3	Défocalisation	Déf	20	30	15	35
4	Type de spot	Typ	1	3	0,000	4,000

Nombre de répétitions : 2

CREATION DU PLAN

OK

Le plan généré est le suivant

Saisie exemple SR Laser aspect 4 facteurs.pex

	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

OK

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

Saisie exemple SR Laser aspect 4 facteurs.pex

	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

OK

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 hybride 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)

Choix du plan exemple SR Laser aspect 4 facteurs .pex



Nombre de facteurs à étudier : Nombre de points au centre :

Choix du plan

Hoke 11 essais D1 Hoke 14 essais D6


N° Fact	Nom long	Nom court...	Mini	Maxi
1	Vitesse	Vte	30,000	80,000
2	Puissance	Pui	300,000	700,000
3	Défocalisation	Déf	15,000	35,000

Nombre de répétitions :

 CREATION DU PLAN 

Saisie exemple SR Laser aspect 4 facteurs .pex

	Vte	Pui	Déf	Rep 1	Rep 2
1	30	300	15	0	0
2	80	500	25	0	0
3	55	700	25	0	0
4	55	500	35	0	0
5	80	700	15	0	0
6	80	300	35	0	0
7	30	700	35	0	0
8	80	300	15	0	0
9	30	700	15	0	0
10	30	300	35	0	0
11	55	500	25	0	0



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