



**CaravelCut**  
Explorer l'usinage

Texte de la présentation à la FSRM  
Fédération Suisse Recherche en Microtechnique  
Journée. « Optimisation des paramètres de coupe »

# Plans d'expériences

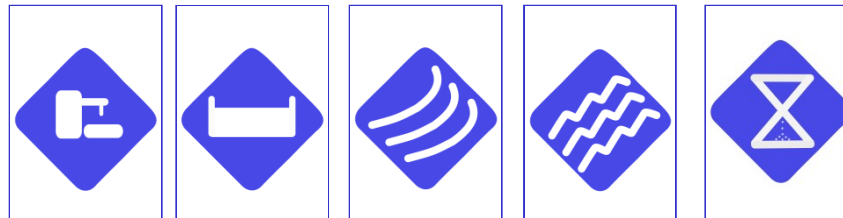
Dans le domaine de l'usinage  
par enlèvement de copeau

Le site [www.caravelcut.com](http://www.caravelcut.com)

Vous accompagne pas à pas à réaliser  
des plans d'expériences pour améliorer  
votre usinage, à travers les services:

Leonello Zaquini

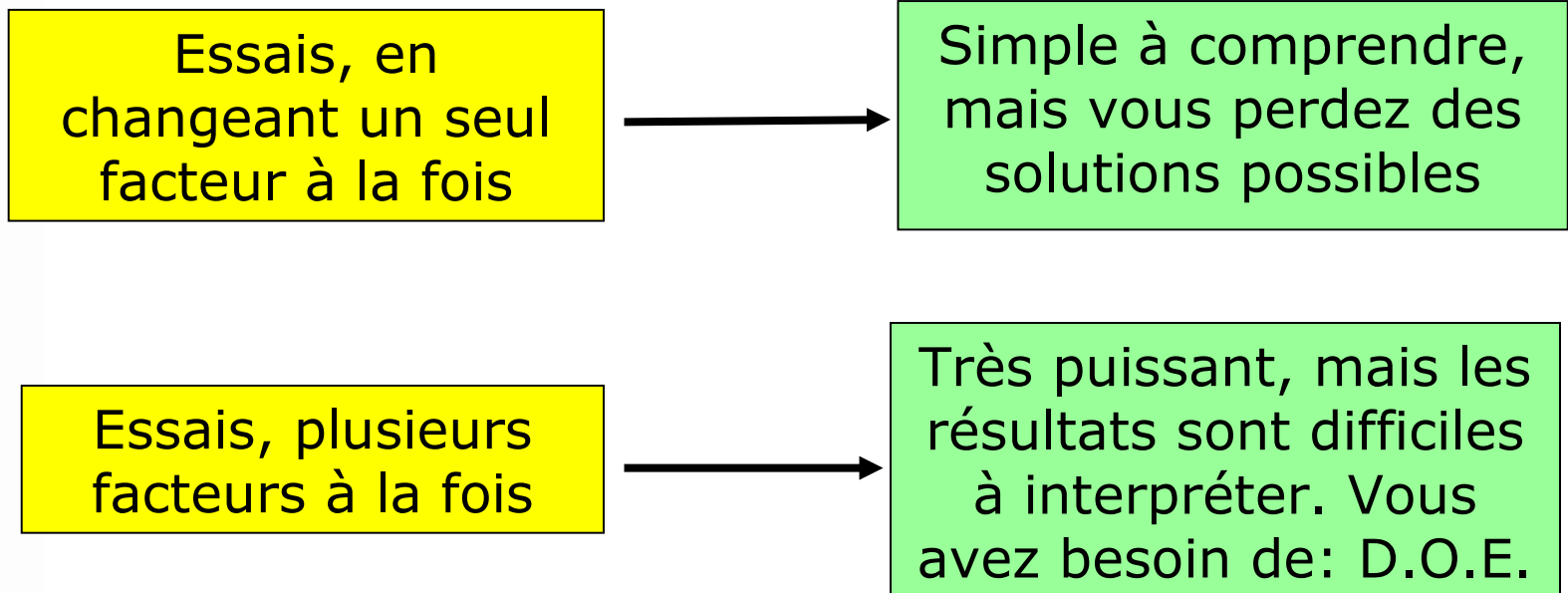
Fondateur de CaravelCut





## Pourquoi les plans d'expériences? (Design Of Experiments – D.O.E.)

Pour comprendre l'origine  
d'un problème :





**CaravelCut**  
Explorer l'usinage

## Pourquoi les plans d'expériences? (Design Of Experiments – D.O.E.)

Pourquoi parfois est difficile résoudre certains problèmes techniques ?

La méthode "un facteur à la fois" semble « naturelle », mais elle cache les interactions entre les facteurs et peut rendre impossible la solution.

Pour comprendre l'effet de chaque facteur et des interactions entre les facteurs sur le résultat, il faut utiliser la méthode dite des « plans d'expériences » (D.O.E.)



**CaravelCut**  
Explorer l'usinage

www.caravelcut.com

## Les origines de la méthode



**Ronald Aylmer Fisher** (1890-1962), génétiste et mathématicien, en 1925 développa une méthode pour conduire les essais. Le domaine d'application était: l'agriculture.

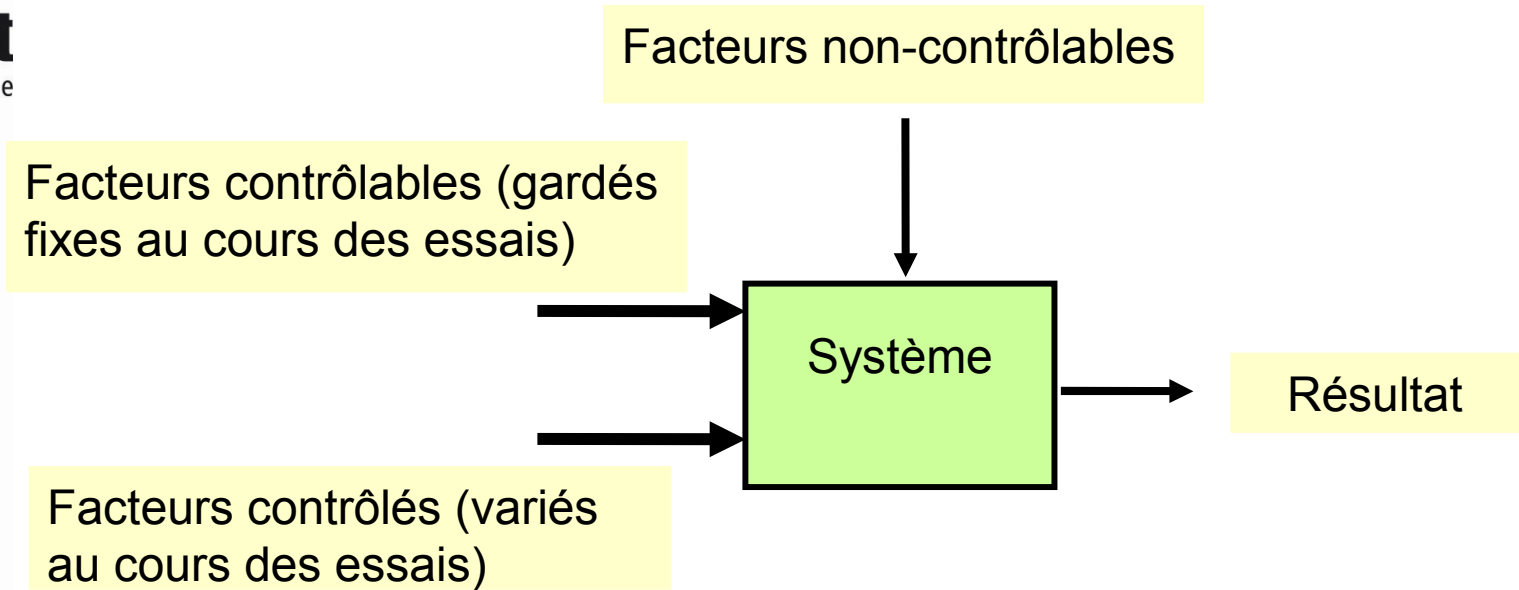
**Genichi Taguchi** (1924 - ) ingénieur et statisticien développe ultérieurement la méthode.



**CaravelCut**  
Explorer l'usinage

www.caravelcut.com

## Définitions



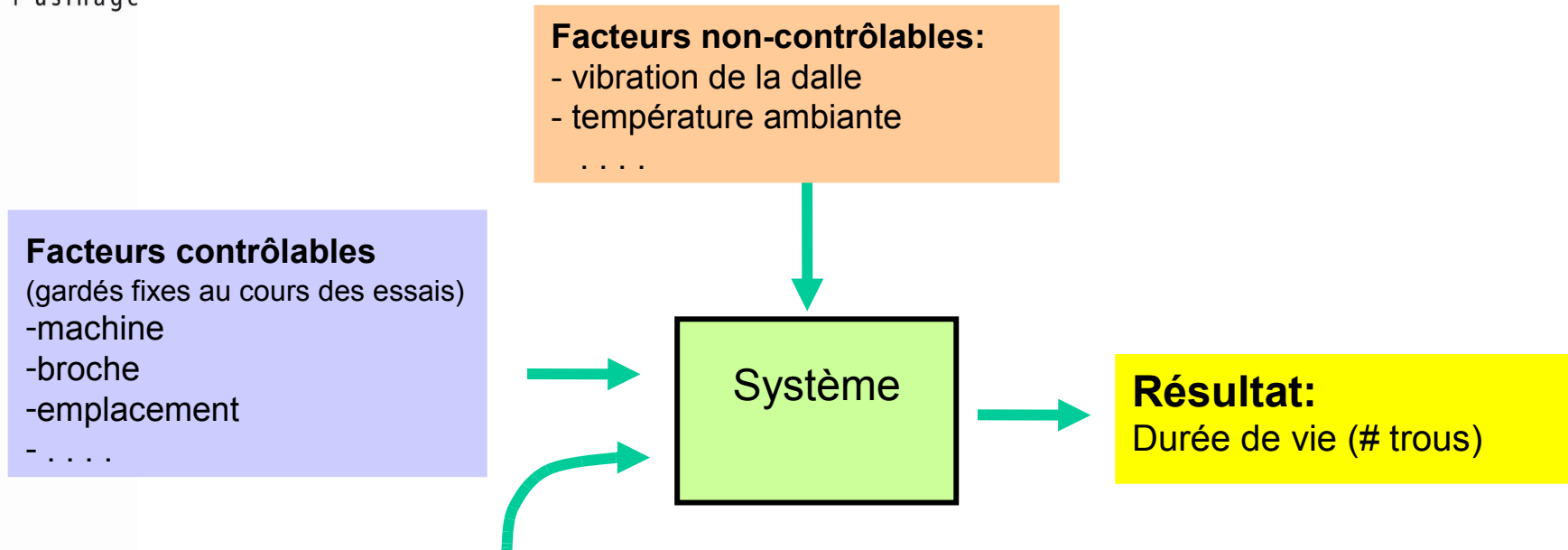
### Nomenclature:

- Les « facteurs » sont les éléments qui influencent le résultat ».
- Les « niveaux » sont les valeurs des facteurs.



Un exemple: Taraudage de trous (0,8mm).

Problème: casse précoce du taraud



**Facteurs:**

- T, pause de l'avance au fond du trous
- n, vitesse de rotation de la broche

**Niveaux:**

- 0 – 1 s
- 400 – 600 rpm



## Un simple plan à deux facteurs et deux niveaux

### L' exemple:

on a un système de 2 facteurs (pause « T » et rotation de la broche « n ») sur deux niveaux (1 et 2). Si nous essayons toutes les combinaisons ( $2^2 = 4$  essais) nous avons réalisé un « Plan factoriel complet ».

Réaliser un plan à 4 essais ▼

N° essai	Facteur 1	Facteur 2
1	1	1
2	1	2
3	2	1
4	2	2

Le plan des essais:

N° Essai	T [s]	n [rpm]
1	0.1	400
2	0.1	600
3	5	400
4	5	600

(tableau généré par le site  
[www. caravelcut . Com](http://www.caravelcut.com) »

L4



**CaravelCut**  
Explorer l'usage

www.caravelcut.com

## Calcul des effets

Essai	Facteur 1	Facteur 2	Moyenne des resultats
1°	1	1	Y1
2°	1	2	Y2
3°	2	1	Y3
4°	2	2	Y4

$$M_{Gen} = \frac{Y_1 + Y_2 + Y_3 + Y_4}{4}$$

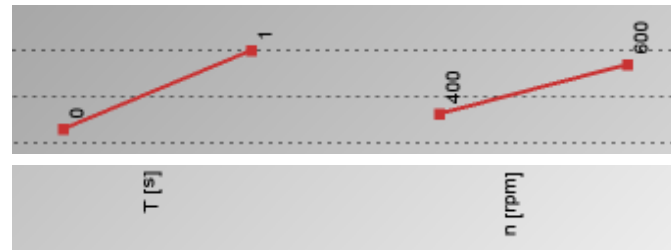
$$E_{F1} = \frac{Y_1 + Y_2}{2} - M_{Gen}$$

$$E_{F2} = \frac{Y_1 + Y_3}{2} - M_{Gen}$$

Moyenne générale

Effet du Facteur 1

Effet du Facteur 2



**Premier but du D.O.E.: La visualisation des effets.**

Les graphiques des effets donnent immédiatement l'information sur les facteurs qui ont plus d'importance.





# Calcul des interactions

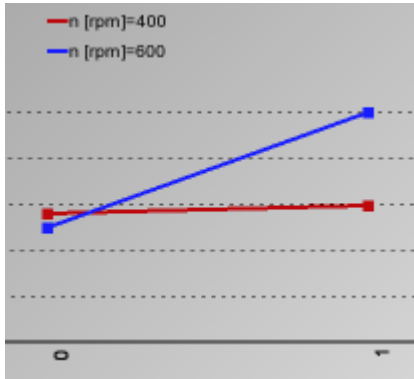
Essai	Facteur 1	Facteur 2	Moyenne des resultats
1°	1	1	Y1
2°	1	2	Y2
3°	2	1	Y3
4°	2	2	Y4

## Interaction

$$I_{F1F2} = \frac{Y_1 + Y_4}{2} - M_{Gen}$$

Le interactions entre les facteurs sont interprétées comme des facteurs additionnels

**2° but du D.O.E.: prise en compte des interactions.**





## Possibilité de créer un modèle mathématique

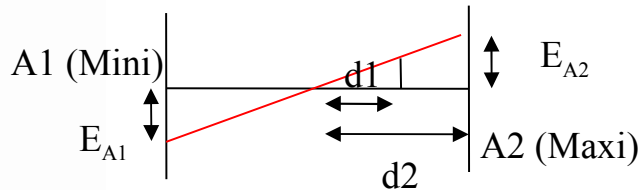
La prédiction du résultat (Y) dans certaines conditions non testées peut être obtenu comme le résultat d'un polynôme du type :

$$Y \cong M_{gen} + E_{F1} \cdot F1 + E_{F2} \cdot F2 + E_{F3} \cdot F3 + \dots I_{F1F2} \cdot F1F2 + I_{F1F3} \cdot F1F3 + I_{F2F3} \cdot F2F3 + \dots$$

Remarque:

Les facteurs peuvent être exprimés de manière « normalisée » entre -1 et +1

$$Y = \bar{X} + E_{A2} \cdot A' + E_{B2} \cdot B' + \dots + I_{A1B2} \cdot A' \cdot B' + I_{A2C1} \cdot A' \cdot C' + \dots$$



$$A' = \frac{d1}{d2}$$

$$A' = 2 \cdot \frac{A - \frac{A1 + A2}{2}}{A2 - A1}$$

A est la valeur du facteur (compris entre mini et maxi, -1 +1)

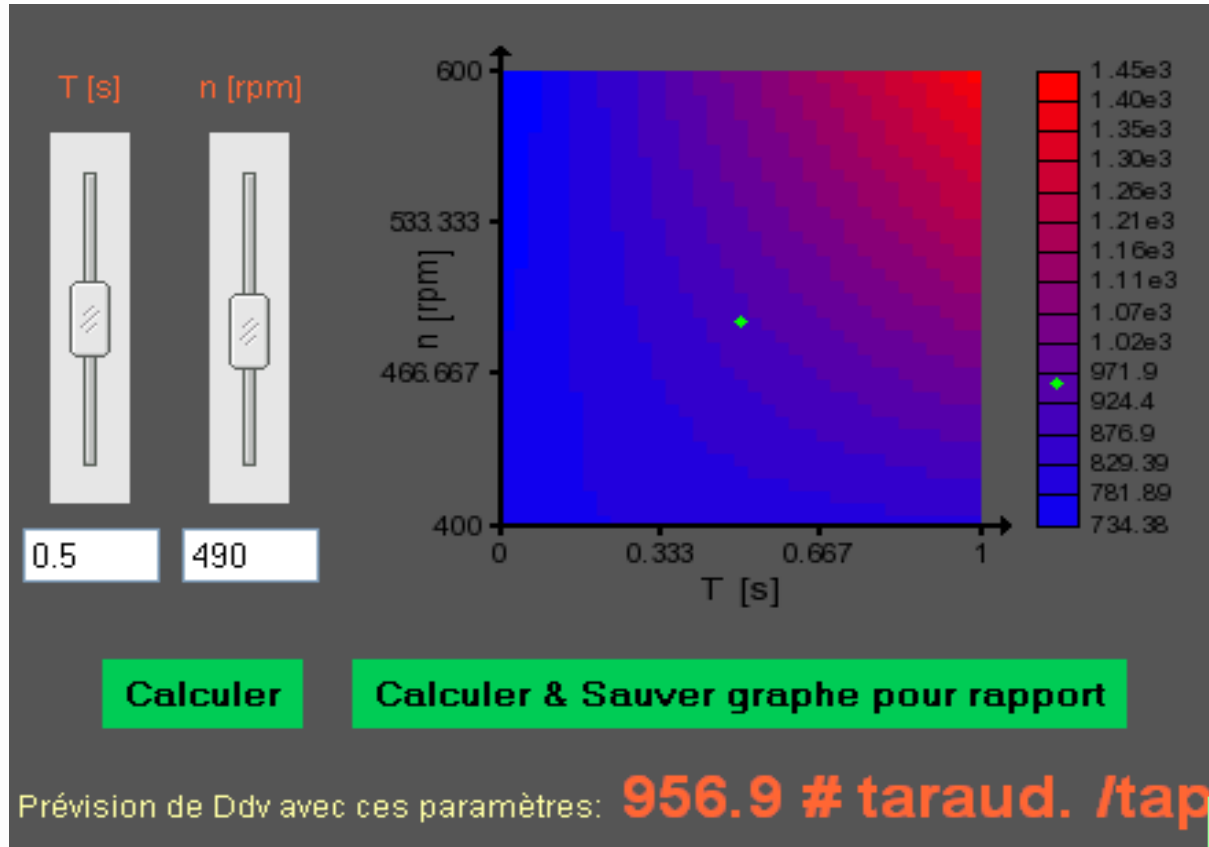
**3° but du D.O.E.: création d'un modèle empirique mathématique**



## Exemple: le modèle mathématique dans le cas de taraudage

**CaravelCut**  
Explorer l'usinage

www.caravelcut.com



Le modèle mathématique empirique permet la prévision du résultat pour n'importe quelles combinaisons des valeurs des facteurs .  
**(les essais peuvent continuer sur le modèle).**

Visualisation du modèle par le site  
[www. caravelcut . Com](http://www.caravelcut.com)



**CaravelCut**  
Explorer l'usinage

www.caravelcut.com

## Calcul de la significativité statistique

Si il y a au moins une répétition des essais (deux mesures pour chaque essai), il sera possible de calculer la significativité statistique des effets des facteurs. Sur la base du calcul statistique, dit de Fisher, on est en condition d'établir la probabilité (en %) que la phrase « le facteur a un effet sur le résultat » soit vraie.

Facteur	Pourcentage	Significatif
pause [s]	99.4	oui
Vc [m/min]	97.7	oui

(Exemple de Visualisation par le site  
**www. caravelcut . Com**

Les facteurs sont retenu comme  
significatifs si la probabilité est majeure  
que 95%)

**4° but du D.O.E.: calcul de la significativité des effets des facteurs**



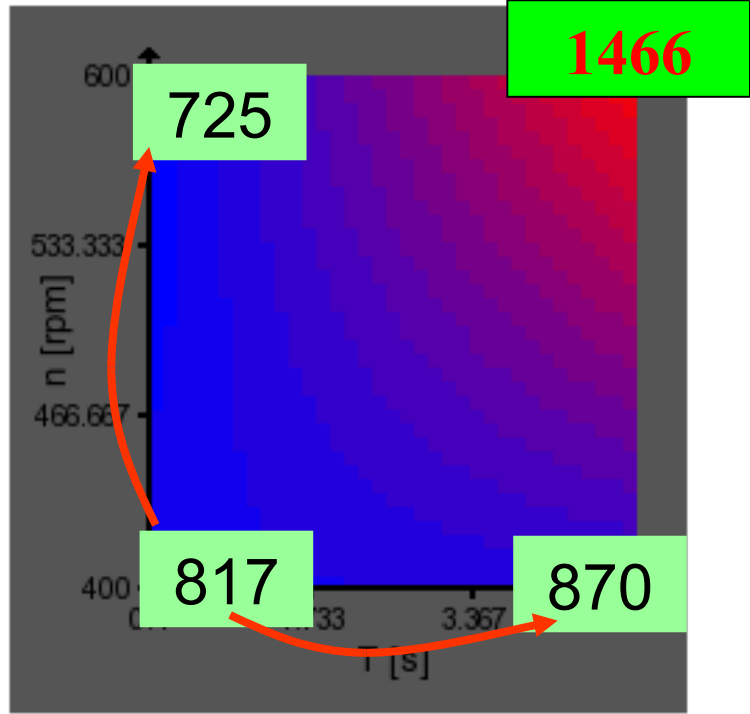
# D.O.E. avantages: 1°, identifier les « interactions »

**CaravelCut**  
Explorer l'usinage

www.caravelcut.com

En cas d'essais « un facteur à la fois »:

T	n	Y <sub>moy</sub>
0	400	817
1	400	870
0	600	725
1	600	1466



Dans le cas de l'exemple, la méthode « une facteur à la fois » aurait caché la solution

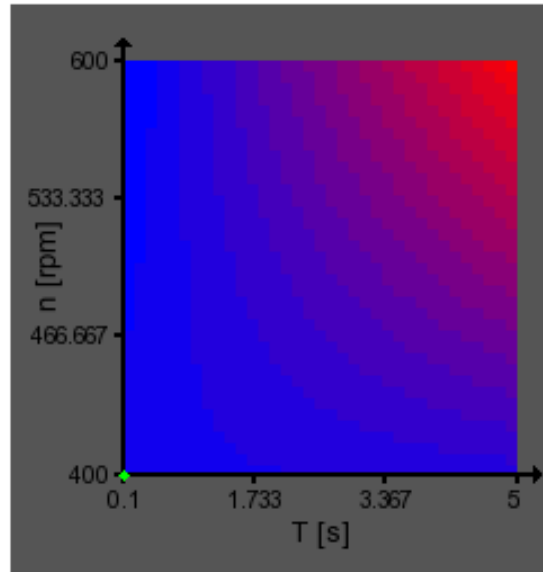


**CaravelCut**  
Explorer l'usinage

www.caravelcut.com

D.O.E. avantages: 2°, la création d'un modèle

$$Y \cong M_{gen} + E_{F1} \cdot F1 + E_{F2} \cdot F2 + \dots I_{F1F2} \cdot F1F2 + \dots$$



Permet de conduire des essais « virtuels »

(sans utilisation de machine et sans gaspillage de temps et matière)



**CaravelCut**  
Explorer l'usinage

www.caravelcut.com

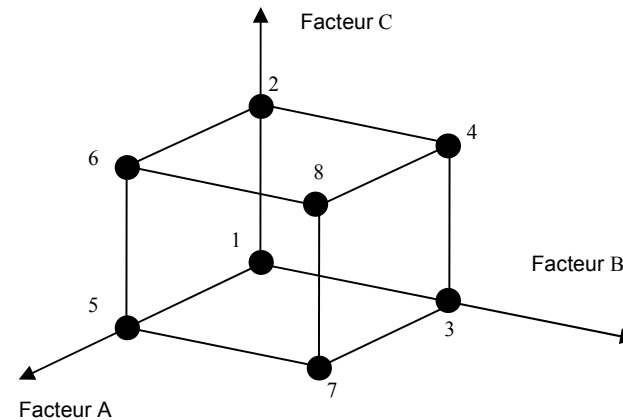
## Les différents plans d'expériences

Plusieurs plans d'expériences sont possibles

### Plans complets

Si on a un système de 3 facteurs (A, B, C) sur deux niveaux (1 et 2). Si nous essayons toutes les combinaisons ( $2^3 = 8$  essais) vous avons réalisé un « Plan factoriel complet ».

Essais	Facteurs			Résultat
	A	B	C	
1	1	1	1	Y1
2	1	1	2	Y2
3	1	2	1	Y3
4	1	2	2	Y4
5	2	1	1	Y5
6	2	1	2	Y6
7	2	2	1	Y7
8	2	2	2	Y8





**CaravelCut**  
Explorer l'usinage

www.caravelcut.com

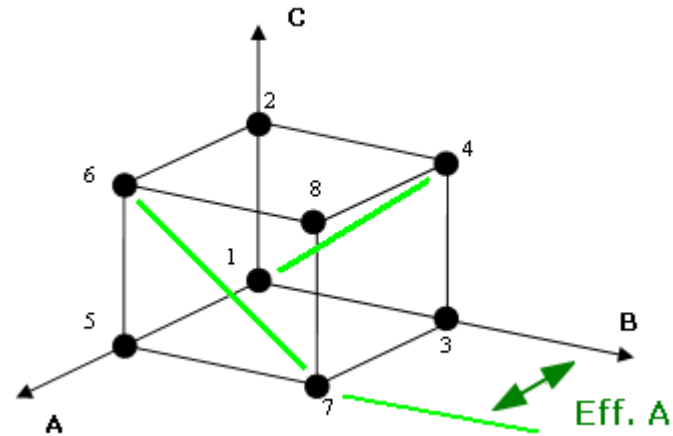
# Plans fractionnaires

Si dans le cas précédent j'élimine les essais 2-3-5-8, j'obtiens un sous-ensemble de seulement 4 essais qui ont les caractéristiques suivantes :

- Les niveaux des facteurs apparaissent tous le même nombre de fois.
- Pour chaque niveau de chaque facteur, les autres apparaissent le même nombre de fois.

En ce cas, ce Plan d'essais est dit: ORTOGONAL

Test	Factors			Result
	A	B	C	
1	1	1	1	Y1
<del>2</del>	<del>1</del>	<del>1</del>	<del>2</del>	<del>Y2</del>
<del>3</del>	<del>1</del>	<del>2</del>	<del>1</del>	<del>Y3</del>
4	1	2	2	Y4
<del>5</del>	<del>2</del>	<del>1</del>	<del>1</del>	<del>Y5</del>
6	2	1	2	Y6
7	2	2	1	Y7
<del>8</del>	<del>2</del>	<del>2</del>	<del>2</del>	<del>Y8</del>



Avec un plan d'essais fractionnaire (pour autant qu'il soit ORTOGONAL) je peux déduire correctement l'influence de chaque facteur parce que l'influence des autres facteurs s'annule et s'équilibre. ATTENTION: JE PERDS LA POSSIBILITE' DE DETECTER CERTAINES INTERACTIONS





# Les plans d'expérience plus fréquent:

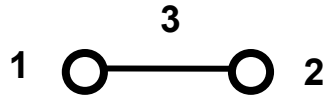
**CaravelCut**

Explorer l'usinage

www.caravelcut.com

Experiment Number	1	2	3
1	1	1	1
2	1	2	2
3	2	1	2
4	2	2	1

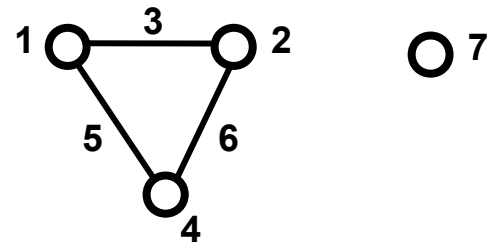
L4



○ facteur  
 — interaction

Experiment Number	1	2	3	4	5	6	7
1	1	1	1	1	1	1	1
2	1	1	1	2	2	2	2
3	1	2	2	1	1	2	2
4	1	2	2	2	2	1	1
5	2	1	2	1	2	1	2
6	2	1	2	2	1	2	1
7	2	2	1	1	2	2	1
8	2	2	1	2	1	1	2

L8



La colonne 7 contient une interaction de 3eme ordre. On assume qu'elle est négligeable (risque) et on y charge un facteur dont on perd les interactions.



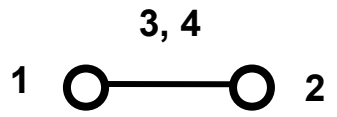
# Les plans d'expérience plus fréquent:

**CaravelCut**  
Explorer l'usinage

www.caravelcut.com

L9

Experiment Number	1	Column 2	3	4
1	1	1	1	1
2	1	2	2	2
3	1	3	3	3
4	2	1	2	3
5	2	2	3	1
6	2	3	1	2
7	3	1	3	2
8	3	2	1	3
9	3	3	2	1



2 facteurs à 3 niveaux et leurs interactions

L12

Experiment Number	1	2	3	4	Column 5	6	7	8	9	10	11
1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
2	1	1	1	1	1	2	2	2	2	2	2
3	1	1	2	2	2	1	1	1	2	2	2
4	1	2	1	2	2	1	2	2	1	1	2
5	1	2	2	1	2	2	1	2	1	2	1
6	1	2	2	2	1	2	2	1	2	1	1
7	2	1	2	2	1	1	2	2	1	2	1
8	2	1	2	1	2	2	2	1	1	1	2
9	2	1	1	2	2	2	1	2	2	1	1
10	2	2	2	1	1	1	1	2	2	1	2
11	2	2	1	2	1	2	1	1	1	2	2
12	2	2	1	1	2	1	2	1	2	2	1

Plan d'expériences sans interactions (convient en cas de toute première exploration d'un phénomène inconnu)



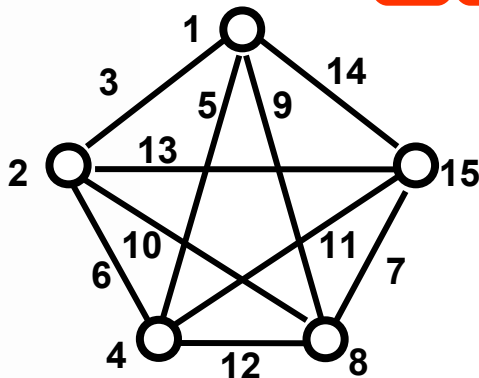
# Les plans d'expérience plus fréquent:

**CaravelCut**  
Explorer l'usage

www.caravelcut.com

Experiment Number	Column														
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
2	1	1	1	1	1	1	1	2	2	2	2	2	2	2	2
3	1	1	1	2	2	2	2	1	1	1	1	2	2	2	2
4	1	1	1	2	2	2	2	2	2	2	2	1	1	1	1
5	1	2	2	1	1	2	2	1	1	2	2	1	1	2	2
6	1	2	2	1	1	2	2	2	2	1	1	2	2	1	1
7	1	2	2	1	1	2	2	2	2	1	1	2	2	1	1
8	1	2	2	2	2	1	1	2	2	1	1	1	1	2	2
9	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2
10	2	1	2	1	2	1	2	2	1	2	1	2	1	2	1
11	2	1	2	2	1	2	1	1	2	1	2	2	1	2	1
12	2	1	2	2	1	2	1	2	1	2	1	1	2	1	2
13	2	2	1	1	2	2	1	1	2	2	1	1	2	2	1
14	2	2	1	1	2	2	1	2	1	1	2	2	1	1	2
15	2	2	1	2	1	1	2	1	2	2	1	2	1	1	2
16	2	2	1	2	1	1	2	2	1	1	2	1	2	2	1

L16



5 facteurs à 2 niveaux et leurs interactions.

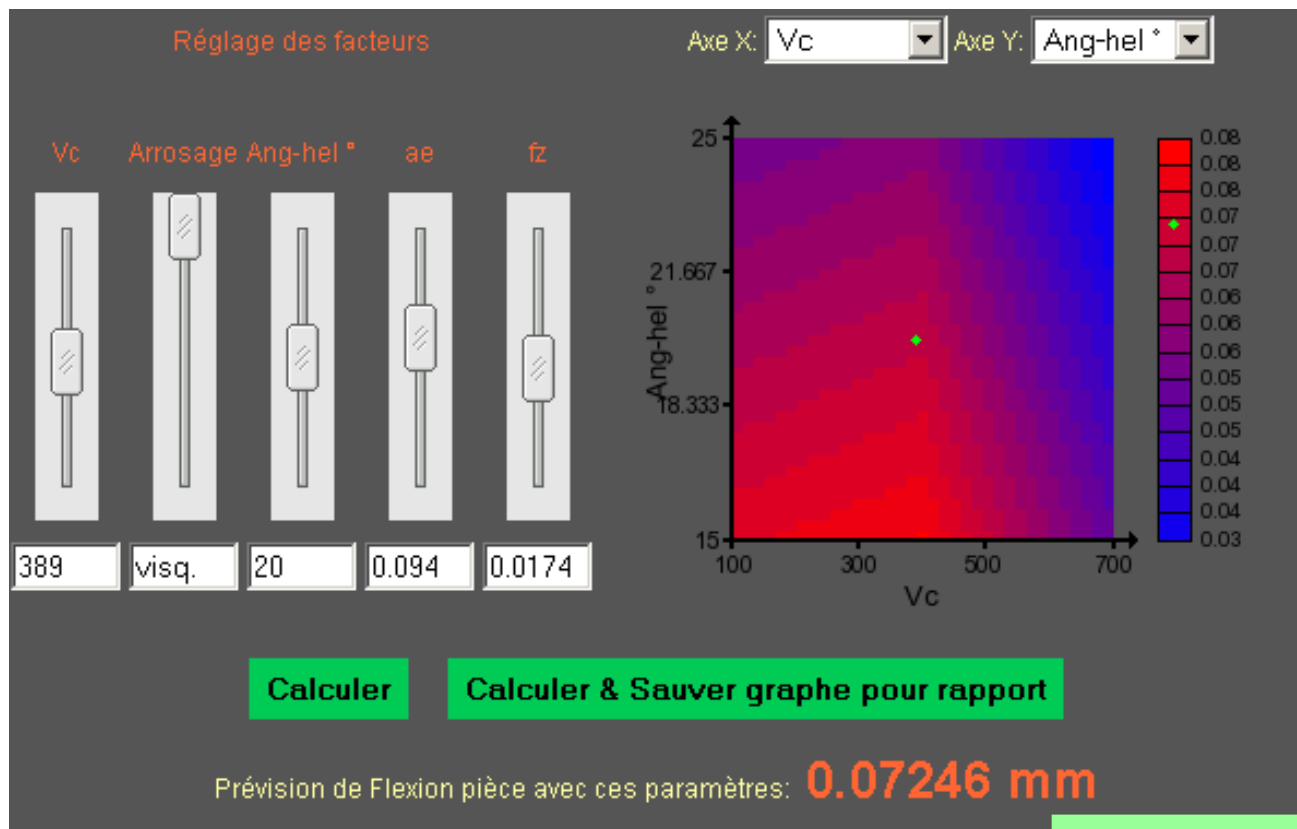
Il existent aussi des plans d'expériences plus complexes, par contre nous déconseillons des plans plus complexe du L16 dans le cadre d'un atelier de production.



**CaravelCut**  
Explorer l'usinage

www.caravelcut.com

## Un cas plus complexe



Visualisation du modèle par le site

[www.caravelcut.com](http://www.caravelcut.com)

Validez votre modèle (avec un essai additionnel) et cherchez votre optimum.

Méthodes pour l'optimisation des paramètres de coupe



**CaravelCut**  
Explorer l'usinage

L'enlèvement de copeaux est un procédé complexe, les plans des expériences donnent des réponses efficaces à vos problèmes d'usinage

Bavures

Précisions



Casses

Rugosité

Durée de vie

Torsion des  
pièces

www.caravelcut.com



**CaravelCut**  
Explorer l'usinage

www.caravelcut.com

## Plan d'expériences

La méthode (bien connue dans plusieurs domaines d'applications) est basée sur le choix des « facteurs » dont on veut connaître l'influence sur la « réponse ».

### Avantages

Méthode assez flexible et très générale.  
Les « facteurs » comme les « réponses » peuvent être choisis selon les intérêts et les besoins.  
Si le plan est bien fait, il donne des réponses fiables.

### Désavantages

Une erreur dans la conduite d'un essai peut fausser le résultat du plan.  
Méthode relativement complexe (mais CaravelCut met à disposition un site qui rend très simple la tâche).

Le site **www. caravelcut . com**

Vous accompagne pas à pas à réaliser des plans d' expériences



**CaravelCut**  
Explorer l'usinage

## Conclusions

La méthode des « Plans d'Expériences »

Permettent:

- 1) Une optimisation efficace de n'importe quel élément de la coupe.
- 2) Une visualisation intuitive des effets
- 3) Une prise en compte des interactions
- 4) La réalisation d'un modèle mathématique-empirique du système

Il est aussi possible d'estimer la validité des essais par le biais de l'analyse de la variance (ANOVA).