

# ***Introduction au plan d'expériences***

- ❑ Un plan d'expériences est une suite d'essais organisée à l'avance de manière à déterminer en un minimum d'essais et avec un maximum de précision l'influence de multiple paramètres sur une ou plusieurs réponses
  - ❑ Un ensemble systématique d'expériences qui nous permettent d'évaluer l'effet d'un ou plusieurs facteurs sans se soucier de variables extérieures ni d'opinions subjectives.
  - ❑ Elle conduit souvent à d'autres expériences par la suite.
  - ❑ Elle constitue un véhicule de la méthode scientifique, donnant des résultats sans ambiguïté qui peuvent être utilisés pour des déductions de cause à effet.
- 
- Quantifier et hiérarchiser l'influence de plusieurs paramètres et de leurs actions combinées afin d'optimiser efficacement la performance étudiée
  - Organiser et estimer la durée et le coût des essais
  - Les conclusions sont fiables et reproductibles (traçabilité des essais)
  - Acquérir un savoir faire dont la diffusion est simplifiée

# Exemple avec données d'arrivée quantitatives

- Un golfeur est très intéressé par les facteurs qui aident à améliorer ses scores en augmentant la distance d'envoi de la balle:
- 1) Deux clubs de jeux: Ping & Callaway
  - 2) Deux types balles de golf : Titleist & Pinnacle
  - 3) On joue généralement sur deux terrains et chacun présente des conditions différentes du point de vue du vent. Sur le terrain A, il n'y a presque jamais de vent et il est entouré de montagnes. Le terrain B est en général battu des vents et situé en rase campagne.

**Tentons une expérience . . .**

- **Quel est le problème pratique?**
- **Quel est l'élément de la réponse (output)?**
- **Quel sont les facteurs?**
- **Quels sont les facteurs contrôlables?**
- **Quels sont les facteurs incontrôlables?**
- **Quel sont les niveaux des facteurs?**
- **Quel sont les modèles d'expériences?**
- **Comment on va modéliser le problème?**

# Rappelons la Stratégie (1)

## ***Définir le problème:***

**La distance parcourue par la balle n'est pas assez longue.**

## ***Etablir l'objectif:***

**Augmenter la distance que je fais parcourir à la balle sur le fairway.**

## ***Sélectionner la réponse (donnée d'arrivée):***

**Distance, mesurée du tee jusqu'à l'endroit où elle s'immobilise sur le fairway, mesurée en mètres.**



**La distance (Y) est une donnée du type quantitatif**

- **Sélectionner les facteurs de départ contrôlables:**
  - Clubs de golf
  - Balles de golf
  - Vent
  
- **Identifier les facteurs incontrôlables:**
  - Température
  - Humidité
  - Hauteur de l'herbe
  - Bonne santé du joueur
  - Fatigue



# Rappelons la Stratégie (3)

***Choisir les niveaux des facteurs:***

<u>Facteurs</u>	<u>Niveau 1</u>	<u>Niveau 2</u>
Clubs	Ping	Callaway
Balle de golf	Titleist	Pinnacle
Vent	Grand vent	Pas de vent

***Sélectionner la conception d'expérience: Comment dois-je réaliser ?***

**Option 1 : OFAT - Un facteur à la fois**

A. Clubs Ping	Type de balles ???	Vent ???
B. Clubs Callaway	Type de balles ???	Vent ???

**Inconvénients: renseignements très réduits**

**Sélectionner la conception d'expérience**

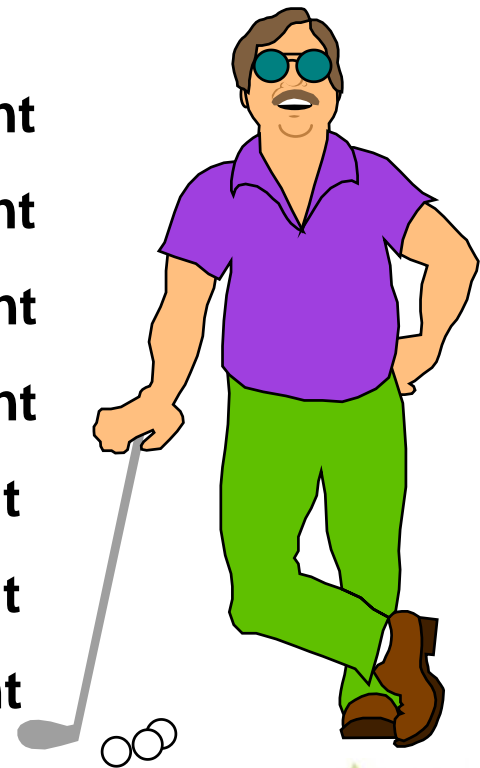
**Option 2 : tous les facteurs**

**Quelles sont toutes les combinaisons possibles?**

**A. Clubs Ping**  
**B. Clubs Callaway**  
**C. Clubs Ping**  
**D. Clubs Callaway**  
**E. Clubs Ping**  
**F. Clubs Callaway**  
**G. Clubs Ping**  
**H. Clubs Callaway**

**Balles Titleist**  
**Balles Titleist**  
**Balles Pinnacle**  
**Balles Pinnacle**  
**Balles Titleist**  
**Balles Titleist**  
**Balles Pinnacle**  
**Balles Pinnacle**

**Pas de vent**  
**Pas de vent**  
**Pas de vent**  
**Pas de vent**  
**Grand vent**  
**Grand vent**  
**Grand vent**  
**Grand vent**





# Vocabulaire du plan d'expériences

- **Plan d'expériences** : Le plan "officiel" utilisé pour piloter l'expérience est appelé "plan d'expériences" (ou modèle d'expériences). Il comprend les choix des réponses, facteurs, niveaux, blocs et traitements ainsi que l'utilisation de certains outils appelés regroupement planifié, distribution aléatoire, répétition et/ou réplication.
- **Facteur** : Un facteur (ou entrée) est l'une des variables contrôlées ou non dont l'influence sur une réponse (sortie) est étudiée pendant l'expérience. Un facteur peut être continu ou catégorique.
- **Niveau** : Les "niveaux" d'un facteur sont les valeurs du facteur qui sont étudiées pendant l'expérience (par exemple : 200F et 250F, avant et après une procédure d'exploitation standard).
- **Factoriel  $k_1 \times k_2 \times k_3 \dots$**  : Description du plan de base. Le nombre de "k" est le nombre de facteurs. La valeur de chaque "k" est le nombre de niveaux d'intérêt pour ce facteur ( $2 \times 3 \times 3$  : le plan a trois facteurs, un avec 2 niveaux et deux avec 3 niveaux).
- **Factoriel  $2^k$**  : Type de plan d'expériences très courant dans lequel il y a toujours 2 niveaux pour chaque facteur.  $2^3 = \underline{2} \times \underline{2} \times \underline{2}$ , de même  $2^2 = \underline{2} \times \underline{2}$ , etc...

- **Combinaison de traitement** : Essai utilisant un jeu des niveaux spécifiques de chaque variable d'entrée. Le nombre des combinaisons de traitement d'une expérience complète est le produit du nombre de niveaux pour chaque facteur. Dans le cas d'un plan  $2 \times 3 \times 3$ , il y aurait 18 combinaisons de traitement possibles pour l'expérience.
- **Essais** : Une seule combinaison des niveaux du facteur donnant une ou plusieurs observations de la variable de sortie. Avant tout synonyme de combinaison de traitement.
- **Répétition** : Lancement de plusieurs essais consécutifs utilisant la même combinaison de traitement.
- **Réplication** : Réplication de l'expérience complète. Répliquer entièrement une expérience permet de la remettre à plat et de reconfigurer la même combinaison de traitement.
- **Plan équilibré** : Plan dans lequel chaque niveau expérimental est répété pour chaque facteur le même nombre de fois dans toutes les combinaisons possibles tout en impliquant les niveaux des autres facteurs. Peut être vérifié via la corrélation.
- **Plan non équilibré** : Plan dans lequel chaque niveau expérimental N'est PAS répété pour chaque facteur le même nombre de fois dans les combinaisons impliquant les niveaux des autres facteurs.

# Vocabulaire du plan d'expériences

- **Points centraux** : Essai(s) sur le point central de tous les niveaux du facteur. Les points centraux peuvent souvent représenter les niveaux des paramètres du procédé dans leurs conditions de fonctionnement actuelles. Ces points nous permettent de vérifier la précision de l'ajustement linéaire.
- **Courbure** : La sortie du procédé n'agit pas linéairement sur les points centraux.
- **Variable de bloc** : Un facteur qui, dans une expérience, a une influence indésirable en tant que source de variabilité est appelé un “bloc.” Un bloc est un jeu de conditions qui pourrait produire des essais plus homogènes au sein du bloc qu'entre les blocs. Par exemple, des pièces provenant d'un même lot seront probablement plus uniformes que des pièces provenant de différents lots. Le lot de matériau serait considéré comme une variable de bloc.
- **Bloc** : Groupe d'essais homogènes.
- **Erreur expérimentale** : La variation des données (somme des carrés) restant après toutes les sources de variabilité significatives n'a pas été oubliée.

# Vocabulaire du plan d'expériences

- **Facteur fixe** : Facteur dont les niveaux ont spécialement été choisis. La détermination de l' EFFET du facteur sur la sortie est intéressante (fournisseur A contre B).
- **Facteur aléatoire** : Facteur dont les niveaux sont sélectionnés *de façon aléatoire* parmi une population de valeurs. La détermination de la contribution de la COMPOSANTE DE LA VARIANCE du facteur est intéressante (2 machines choisies de façon aléatoire parmi 30 machines possibles).
- **Interaction facteur K** : Interaction entre K variables d'entrée différentes. L'effet total est plus important que la somme des effets des facteurs individuels.
- **Effet principal** : Variation de la réponse moyenne (sortie) observée pendant le passage d'un niveau à un autre pour un seul facteur (entrée).
- **Interaction** : Effet combiné de deux facteurs observé en plus de l'effet principal (ou singulier) de chaque facteur.
- **Confusion** : Un effet ou plus qui ne peut pas être attribué sans ambiguïté à un seul facteur ou interaction.

- **Problème pratique : L'équipe voudrait examiner la taille des pépites de soudure en faisant varier deux facteurs (la température de la machine à souder et le temps de cycle de la soudure). Par le passé, la température était toujours réglée à 250°C. À des fins d'expérimentation, l'équipe veut examiner les plages au-dessus et en-dessous de cette valeur, en particulier 240 et 260°C. Les différents techniciens utilisent différents temps de cycle pour la soudure : 7 et 9 cycles. L'équipe décide d'expérimenter autour de ces niveaux, tout spécialement 5, 8 et 11 cycles.**
- **Question 1 : Quels sont les facteurs ? Quels sont les niveaux de chaque facteur ?**
- **Question 2 : Quelle est la description factorielle de cette expérience (k1 x k2) ?**
- **Question 3 : Combien de combinaisons de traitement sont nécessaires pour effectuer entièrement cette expérience ?**
- **Question 4 : Les plans ci-dessous sont-ils équilibrés ?**

Temp	CycTime	NugSize
240	5	6.2
240	8	5.1
240	11	4.6
260	5	5.4
260	8	5.2
260	11	4.7

Temp	CycTime	NugSize
240	5	6.2
240	5	5.1
240	8	4.6
260	8	5.4
260	11	5.2
260	11	4.7

# Menaces pour la validité des statistiques

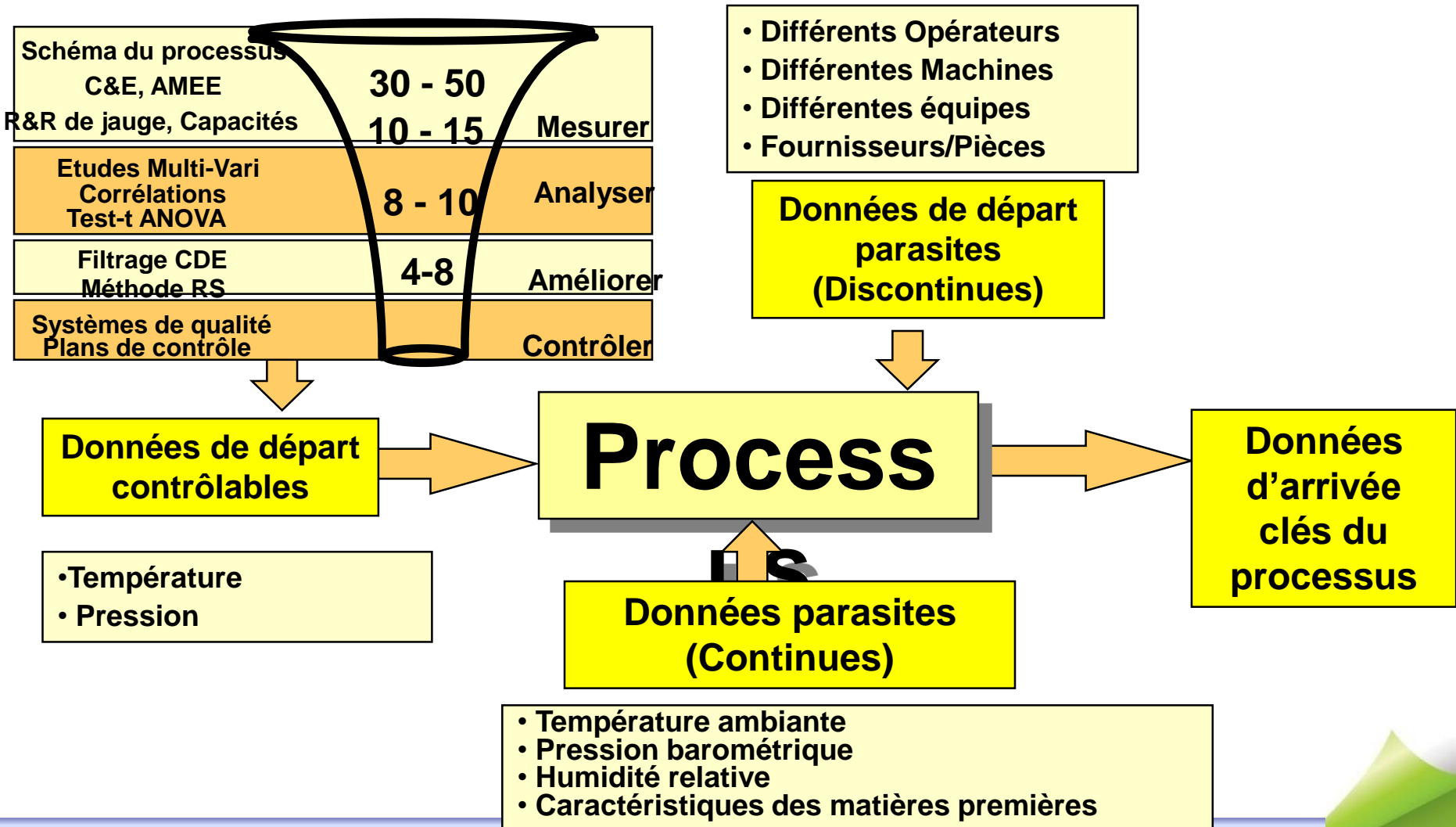
- **Taille de l'échantillon trop petite (répétitions / répliques)**
- **Systèmes de mesure peu rigoureux - augmente la variabilité des mesures (R&R des instruments de mesure)**
- **Variation dans les réglages de l'expérience - augmente la variabilité des mesures**

## Solution

- **Une distribution aléatoire et une taille correcte de l'échantillon évitent les problèmes**

- Définir le problème
- Déterminer les objectifs
- Sélectionner les variables de réponse
- Sélectionner les variables d'entrée indépendantes
- Choisir les niveaux des variables d'entrée
- Sélectionner le plan d'expériences
- Collecter les données
- Analyser les données
- Tirer les conclusions statistiques
- Tirer les Conclusions pratiques
- Refaire l'expérience pour mettre à l'épreuve.
- Chercher des solutions pratiques
- Mettre en place les solutions

# Choix des données de départ (X) & d'arrivée (Y)





# Choix des niveaux des variables d'entrée

- **Objectif : Déterminer les quelques entrées vitales parmi un grand nombre de variables (filtrage)**
  - But : Si nous faisons varier l'entrée aux extrémités, nous serons sûr de voir un effet sur la sortie, s'il y en a un
- **Objectif : Mieux comprendre les interactions des facteurs (relation mathématique)**
  - Une fois que les entrées critiques sont identifiées, on utilise un écart réduit des niveaux pour identifier les interactions parmi les entrées
- **Objectif : Identifier l'étendue d'exploitation d'un jeu de variables d'entrée (optimisation du procédé)**
  - Des réglages similaires sont de nouveau utilisés.
  - On a également recours à une expérimentation séquentielle.

# Sélection du plan d'expériences

## ➤ Filtrage de l'expérience

- Les plans factoriels fractionnaires utilisent bien moins d'essais mais ont un pouvoir statistique moins important

## ➤ Modélisation mathématique

- Les plans factoriels complets et les plans factoriels  $2^k$  ont un 'bon' pouvoir statistique

## ➤ Optimisation - réglage fin

- Méthodologie de surface de réponse
- OPTimisation EVolutionnaire (OPEV)

# Pourquoi utiliser des expériences factorielles $2^K$ ?

- Les expériences factorielles  $2^K$  examinent de multiples facteurs où chaque facteur est étudié sur deux niveaux seulement.
- L'OBJECTIF est d'obtenir une équation de prédiction qui caractérise :  
→  $Y = F(x_1, x_2, x_3, \dots)$ .
- L'équation de prédiction nous permet non seulement d'identifier les *facteurs critiques* mais aussi les *meilleurs niveaux* pour ces facteurs.
- Les expériences factorielles  $2^K$  nous permettent d'examiner plusieurs facteurs simultanément avec relativement peu d'essais par rapport aux plans factoriels complets.
- Finalement, les plans  $2^K$  sont le plus souvent utilisés dans les applications DOE industrielles parce qu'ils sont très faciles à analyser et qu'ils se prêtent bien aux études séquentielles.

- **Plus d'une observation par combinaison de traitement (connues en tant que répétitions ou réplifications)**
  - Basé sur le nombre de facteurs
  - Meilleure estimation des erreurs
  - Meilleur pouvoir statistique
  - Peut quand même lancer des modèles abrégés (plans factoriel fractionnaires)

**Pour les plans factoriels  $2^k$  le nombre de répétitions (répétitions) est**

<b>K =</b>	<b>Nbre de Répét. =</b>
<b>2</b>	<b>9</b>
<b>3</b>	<b>5</b>
<b>4</b>	<b>3</b>
<b>5</b>	<b>3 pour une demi fraction</b>
<b>6 à 8</b>	<b>3 pour fractionnaire de 16 essais</b>

# Ordre standard des plans $2^k$

- Les plans factoriels  $2^k$  se réfèrent aux facteurs  $k$ , avec 2 niveaux chacun. Un plan factoriel  $2^2$  est un plan factoriel  $2 \times 2$ . Le plan a deux facteurs de deux niveaux et peut être exécuté en seulement  $2 \times 2$  ou 4 essais. De même, un plan factoriel  $2^3$  a 3 facteurs, avec 2 niveaux chacun. Cette expérience peut être faite en  $2 \times 2 \times 2$  ou 8 essais.
- La matrice des plans factoriels  $2^k$  est généralement affichée dans un ordre standard. Le niveau bas d'un facteur est représenté par un “-” ou -1 et le niveau haut par un “+” ou +1. Un exemple de matrice du plan pour

Factoriel  $2^2$

Temp	Conc
-1	-1
1	-1
-1	1
1	1



Factoriel  $2^3$

Temp	Conc	Catalyst
-1	-1	-1
1	-1	-1
-1	1	-1
1	1	-1
-1	-1	1
1	-1	1
-1	1	1
1	1	1

## Exercice :

- 1) Créez la matrice d'un plan factoriel  $2^4$ .
- 2) Quel est le nombre minimum d'essais nécessaires ?

- L'équipe des produits fluorescents est en train de mettre au point une nouvelle lampe.
- Le chef des produits indique que le flux lumineux est d'une importance critique pour le client et que celui-ci veut une lampe ayant un flux lumineux supérieur de 10% à celui du modèle actuel.
- L'ingénieur des techniques fluorescentes a 4 types de phosphore à tester. Il sait par expérience que la température du four pendant la production est aussi d'une importance critique pour le flux lumineux et décide de tester les 4 phosphores à trois températures de four différentes.
- Comment se présenterait une expérience factorielle complète pour cet exemple ? Concevez l'expérience.

## ➤ Définir le problème:

- Mettre au point une nouvelle lampe ayant un flux lumineux supérieur de 10% à celui du produit actuel (2650 lumens).

## ➤ Etablir l'objectif:

- Déterminer quel phosphore et quelle température de four donneront le flux lumineux le plus élevé.

## ➤ Sélectionner la réponse (données d'arrivée):

- Flux lumineux à 100 heures, mesuré en laboratoire homologué.

**Le flux lumineux (Y) est une donnée de type quantitative**

***Sélectionner les facteurs de départ contrôlables:***

**Type de phosphore & Température du four**

***Choisir les niveaux des facteurs:***

**Facteur**

**Type de phosphore: 4 niveaux**

**151      161      171      181**

**Température du four: 3 niveaux**

**570      600      630**



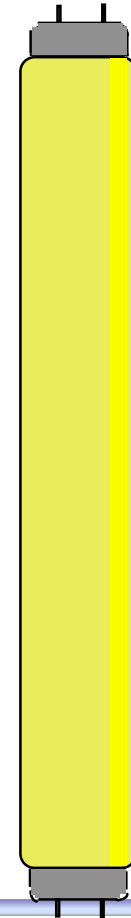


**Sélectionner la conception d'expérience**

**Factorielle complète**

**Quelles sont toutes les combinaisons possibles?**

A.	Phosphor 151	Lehr Temp 570
B.	Phosphor 151	Lehr Temp 600
C.	Phosphor 151	Lehr Temp 630
D.	Phosphor 161	Lehr Temp 570
E.	Phosphor 161	Lehr Temp 600
F.	Phosphor 161	Lehr Temp 630
G.	Phosphor 171	Lehr Temp 570
H.	Phosphor 171	Lehr Temp 600
I.	Phosphor 171	Lehr Temp 630
J.	Phosphor 181	Lehr Temp 570
K.	Phosphor 181	Lehr Temp 600
L.	Phosphor 181	Lehr Temp 630



**Ceci est une expérience factorielle complète 4 x 3**

- **Rassembler la documentation sur les renseignements initiaux**
- **Vérifier les systèmes de mesure**
- **S'assurer que les conditions de base sont représentées dans l'expérience**
- **S'assurer que les responsabilités quant à la collecte des données soient clairement réparties**
- **Toujours effectuer un essai pilote pour vérifier et améliorer les procédures de collecte des données !**
- **Détecter et enregistrer toutes les sources étrangères de variation éventuelles**
- **Analyser rapidement et en profondeur les données**
  - Graphiques
  - Descriptives
  - D'inférence
- **Toujours effectuer une ou plusieurs vérifications pour confirmer vos résultats (passer de l'inférence étroite à l'inférence large)**

# Conseils d'ordre général

- La feuille de planning peut être plus importante que la réalisation de l'expérience proprement dite.
- Assurez-vous que vous avez fait le lien entre vos résultats commerciaux potentiels et votre projet.
- Concentrez-vous sur une seule expérience à la fois.
- N'essayez pas de répondre à toutes les questions dans une seule étude, remettez-vous en à plusieurs études.
- Utilisez les conceptions à deux niveaux à un stade précoce.
- Dépensez moins de 25% du budget sur la première expérience.
- Toujours vérifier les résultats en effectuant une étude de suivi.
- Il n'est pas impossible d'abandonner l'expérience.
- Un rapport final est obligatoire !
- Enfin, essayez d'aller toujours plus loin, avec des niveaux plus robustes, mais pensez à la sécurité du personnel et des matériels.

# Questions?