Évaluation de l'interaction

Michel Beaudouin-Lafon
Université Paris-Saclay
mbl@lisn.fr
http://ex-situ.lri.fr

Plan

Du moins formel vers le plus formel

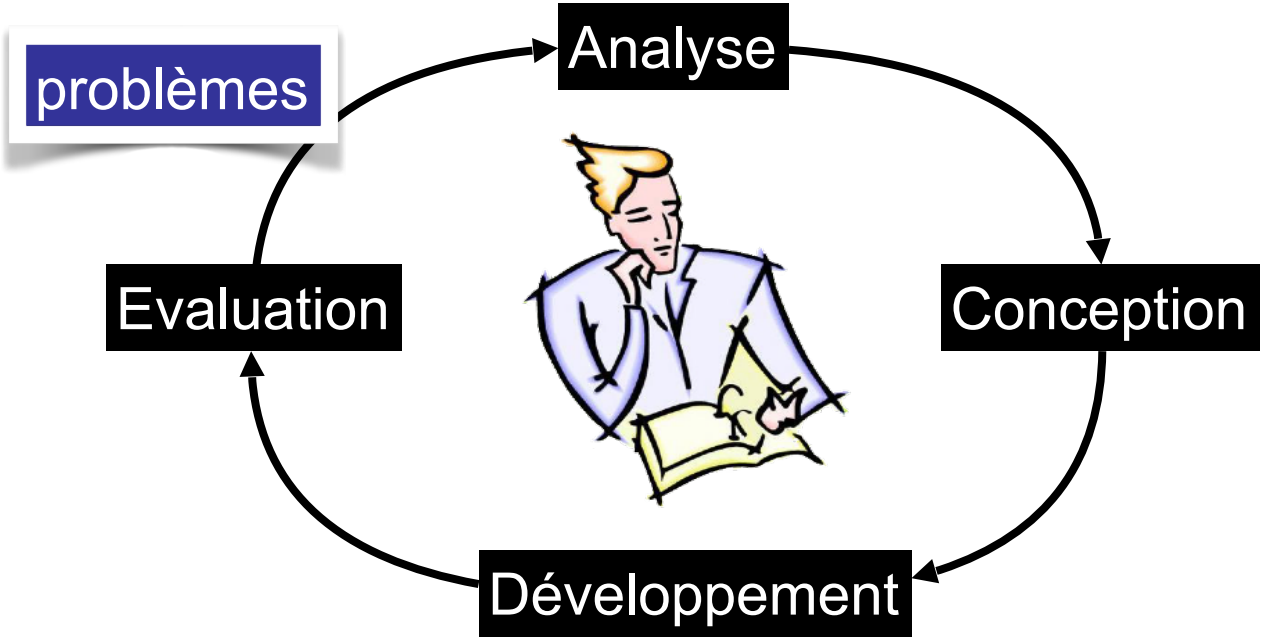
« Walkthrough » - revue de conception

GOMS KLM

Test A/B

Expérimentation contrôlée

Cycle de conception d'un système interactif



Walkthrough (revue de conception)

Walkthrough (revue de conception)

Evaluation pas à pas d'une interface pour identifier des problèmes
But : **identifier un maximum de problèmes**

La revue peut concerner :

- Une table d'interaction
- Un prototype non fonctionnel
- Un logiciel fonctionnel
- Le code du logiciel

Types de problèmes recherchés :

- Bugs
- Performance
- Utilisabilité : simplicité, cohérence, etc.
- Fonctionnalité manquante

Walkthrough : procédure

Petit groupe (4-8 personnes)

Définir l'objet évalué (design, prototype, logiciel, …)

Etablir une **liste de procédures** à passer en revue

- Centrée sur l'usage : tâches à effectuer ou scénarios d'usage
- Centrée sur les fonctionnalités : liste de fonctions

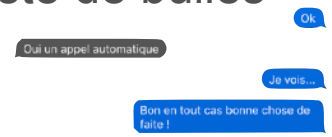
Etablir une **liste de critères** d'évaluation

Pour chaque procédure :

- Une personne la présente, puis chacun fait part des problèmes
- **Pas de jugement** : on note tout
- **Pas de discussion** : on ne cherche pas de solution (ni d'excuse)

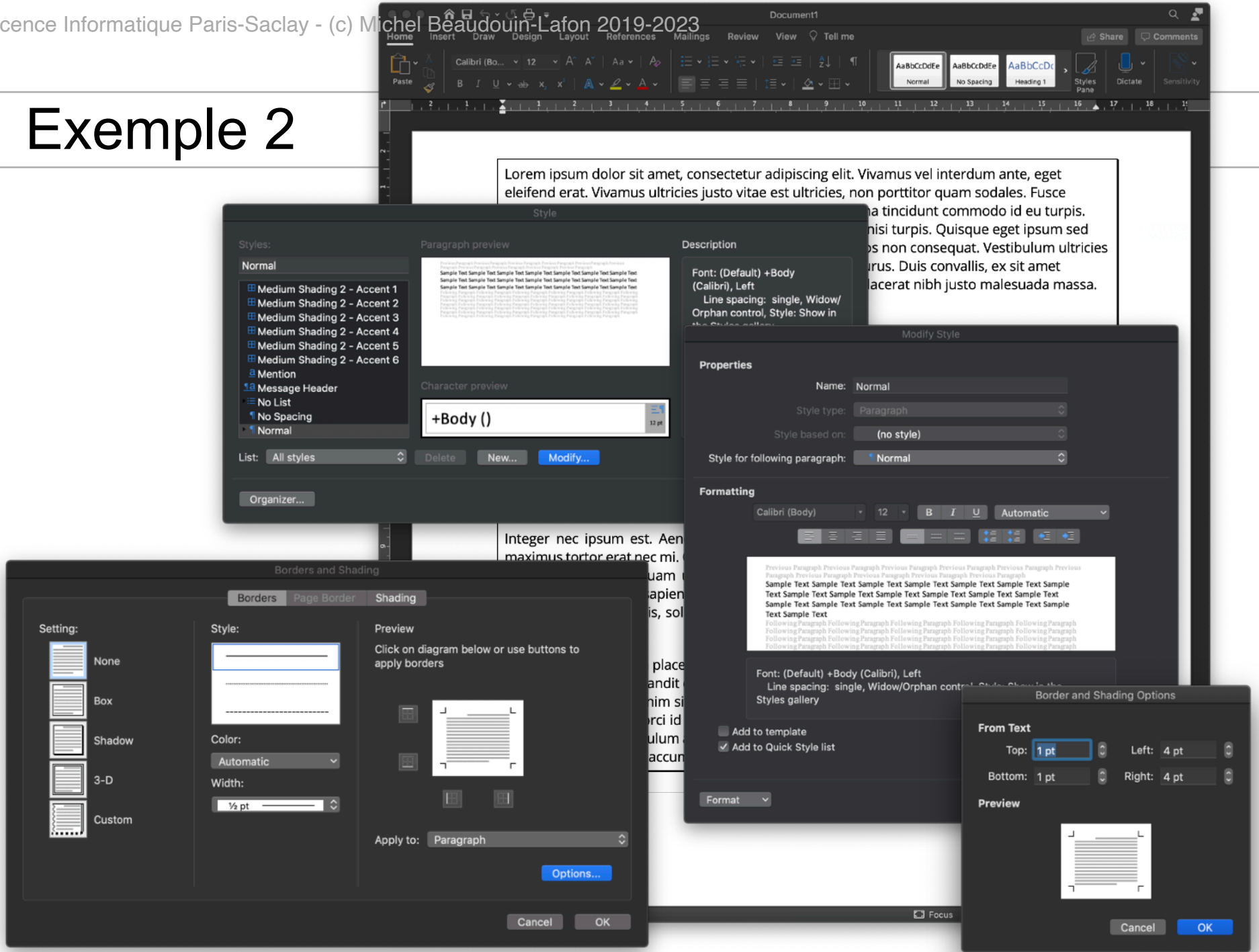
On peut passer les critères un par un,
ou bien chaque personne est en charge d'un ou deux critères,
ou bien tout le monde évalue tous les critères

Walkthrough : exemple 1

Objets	Représentations	Propriétés	Opérations
Message	Bulle 	Contenu Date	Envoyer Editer
Conversation	Liste de bulles 	Participants Liste de messages	Créer Supprimer

Opérations	Commandes	Feedback	Réponses
Envoyer un message	Entrer texte dans zone de saisie + bouton envoyer	Affichage du texte lors de la saisie	Apparition d'une bulle avec le message
Editer un message	Double-click sur la bulle, édition du texte, validation	Curseur d'édition de texte, bouton de validation	Texte modifié dans la bulle (animation)
Créer une conversation	Bouton [+] Participants ?		Affiche la nouvelle conversation

Exemple 2


Document1
Home Insert Draw Design Layout References Mailings Review View Tell me
Share Comments
Paste
Normal No Spacing Heading 1
Styles Pane Dictate Sensitivity
Lorem ipsum dolor sit amet, consectetur adipiscing elit. Vivamus vel interdum ante, eget eleifend erat. Vivamus ultricies justo vitae est ultricies, non porttitor quam sodales. Fusce
Style
Styles:
Normal
Medium Shading 2 - Accent 1
Medium Shading 2 - Accent 2
Medium Shading 2 - Accent 3
Medium Shading 2 - Accent 4
Medium Shading 2 - Accent 5
Medium Shading 2 - Accent 6
Mention
Message Header
No List
No Spacing
Normal
Paragraph preview
Description
Font: (Default) +Body (Calibri), Left
Line spacing: single, Widow/ Orphan control, Style: Show in
Character preview
+Body ()
List: All styles
Delete
New...
Modify...
Organizer...
Modify Style
Properties
Name: Normal
Style type: Paragraph
Style based on: (no style)
Style for following paragraph: Normal
Formatting
Calibri (Body) 12 B I U Automatic
Font: (Default) +Body (Calibri), Left
Line spacing: single, Widow/Orphan control
Styles gallery
Add to template
Add to Quick Style list
Format
Integer nec ipsum est. Aen
Borders and Shading
Borders Page Border Shading
Setting:
None
Box
Shadow
3-D
Custom
Style:
Color:
Automatic
Width:
½ pt
Preview
Click on diagram below or use buttons to apply borders
Apply to: Paragraph
Options...
Cancel OK
Border and Shading Options
From Text
Top: 1 pt
Bottom: 1 pt
Left: 4 pt
Right: 4 pt
Preview
Cancel OK
Focus

Walkthrough : recommandations

Types de commentaires :

- Se concentrer sur l'**objet évalué**, pas sur les auteurs
- Faire des commentaires **constructifs**, pas destructifs
- Faire des commentaires **spécifiques**, pas généraux
- Se concentrer sur les **problèmes**,
  puis les **questions** et enfin les **suggestions**

Exemples :

- "Le texte est trop petit pour être lisible"
- "On ne voit pas comment changer ce réglage"
- "Il faut quatre étapes pour cette opération"

Trouver le maximum de problèmes,
ne pas discuter des solutions possibles, ni des problèmes

Walkthrough : après la session

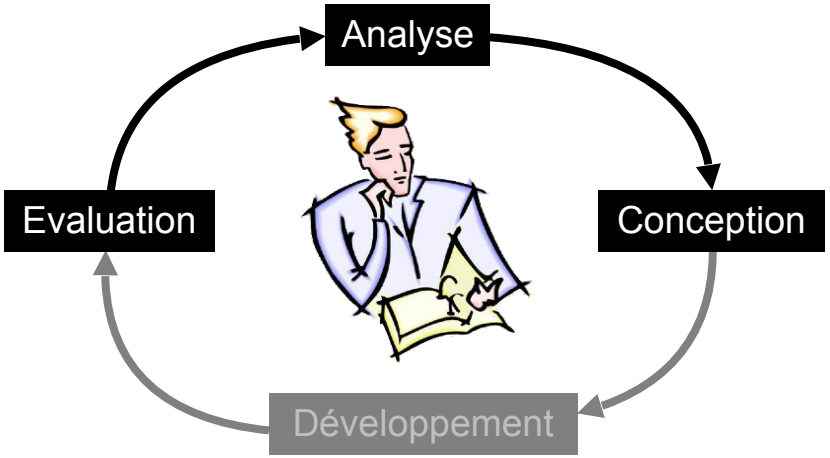
Rassembler les problèmes par catégories

- Selon les tâches / fonctionnalités examinées
- Selon les critères utilisés

Repasser les problèmes en revue

Les classer par importance (du point de vue de l'utilisateur)

Ces listes classées vont servir à la prochaine étape d'analyse/conception



GOMS KLM

USE-CTRL-W-METHOD		USE-CLOSE-METHOD	
H[to kbd]	0.40	P[to menu]	1.1
M	1.35	B[LEFT down]	0.1
K[ctrlW key]	0.28	M	1.35
		P[to option]	1.1
		B[LEFT up]	0.1
Total	**2.03 s**	**Total**	**3.75 s**

GOMS KLM : évaluation prédictive

GOMS = **G**oals **O**perators **M**ethods **S**election rules

Ensemble de modèles pour décrire et évaluer l'interaction

Buts : ce que veut faire l'utilisateur

Opérateurs : actions de l'utilisateur reconnues par le système

Méthodes : séquences de sous-buts et d'opérateurs pour atteindre un but

Règles de sélection : règles de l'utilisateur pour choisir une méthode

KLM = Keystroke-Level Model

Description détaillée des actions de l'utilisateur

À chaque opérateur est associé un temps d'exécution

Evaluation prédictive du temps pour effectuer une tâche

Comparaison de différentes interfaces ou différentes méthodes

GOMS KLM : exemple

But :

effacer un fichier

Opérateurs :

P : pointer = déplacer le curseur sur une cible (1,1s)

B : appuyer ou relâche le bouton de la souris (0,1s)

K : taper au clavier (0,5s pour une lettre au hasard,
0,1s à 0,3s pour une personne qui tape couramment du texte)

H : déplacer la main entre le clavier et la souris (0,4s)

M : activité mentale de l'utilisateur (1,35s)

Méthodes :

Cliquer-tirer l'icône du fichier vers l'icône de la poubelle

Sélectionner l'icône du fichier et taper Command-Delete

GOMS KLM : exemple

Evaluation de la **méthode 1** :

Identifier l'icône du fichier : M (1,35s)
Pointer l'icône : P (1,1s)
Appuyer sur le bouton de la souris : B (0,1s)
Déplacer l'icône jusqu'à la poubelle : P (1,1s)
Relâcher le bouton de la souris : B (0,1s)
Revenir à la position initiale : P (1,1s) **Total = 4,85s**

Evaluation de la **méthode 2** :

Identifier l'icône du fichier : M (1,35s)
Pointer l'icône et la sélectionner (clic) : P B B (1,1s + 0,1s + 0,1s)
Déplacer la main de la souris vers le clavier : H (0,4s)
Taper Command-Delete : K K (0,5s + 0,5s)
Ramener la main sur la souris : H (0,4s) **Total = 4,45s**

GOMS KLM : précision

Les prédictions de KLM ne sont **pas très précises** :

- Difficulté à placer l'opérateur M
  - dépend de l'expertise de l'utilisateur
  - **Novice** : M avant chaque pointage+clic
  - **Expert** : M avant chaque "chunk"
  - => on peut faire deux évaluations
    - Si méthode 1 > méthode 2 pour les novices,
    - mais méthode 2 > méthode 1 pour les experts,
    - il faut essayer d'offrir les deux méthodes

GOMS KLM : précision

Les prédictions de KLM ne sont **pas très précises** :

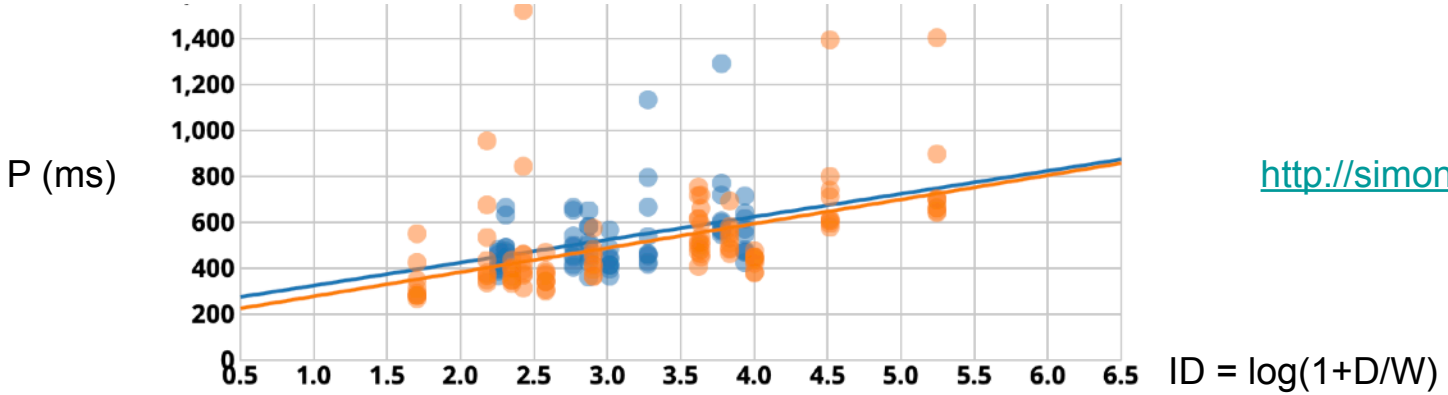
Difficulté à placer l'opérateur M

Évaluation grossière du temps de pointage (P = 1,1s)

peut être affiné avec la **Loi de Fitts**

$P = 0{,}2 + 0{,}1 \log_2(1 + D/W)$

où D est la distance à la cible et W sa taille ("width")



http://simonwallner.at/ext/fitts/

GOMS KLM : précision et validité

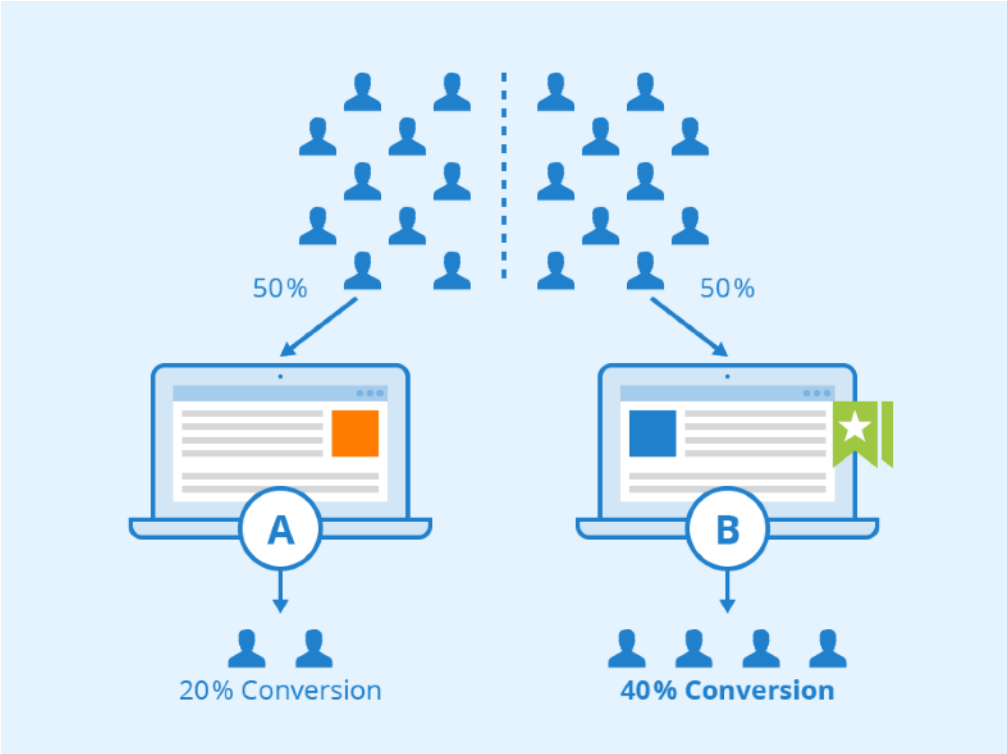
Les prédictions de KLM ne sont **pas très précises** :

- Difficulté à placer l'opérateur M
- Evaluation grossière du temps de pointage (P = 1,1s)

Les comparaisons sont cependant en général **valides** :

- Si l'écart entre les temps prédits est important,
  il y a une vraie différence même si les temps prédits sont surévalués
- *Exemple précédent* :
  - 4.45s vs 4.85s, écart de 9%
  - En pratique les temps d'exécution sont probablement plus courts
    mais la différence subsiste
- Une *expérimentation contrôlée* permet de valider les résultats
  - mais cela prend du temps…

Test A/B



Test A/B

Comparer deux versions d'une interface

Utilisé à grande échelle par Google, Microsoft, Facebook

- Exemple : la couleur de fond des publicités affecte le nombre de clics

Principe :

- Réaliser deux versions d'une interface (souvent un site web)
- Etablir une mesure de performance binaire
  - cliquer ou non sur une publicité
  - convertir ou non une visite en achat
  - etc.

Test A/B : un exemple

Prenons l'exemple de l'effet de la couleur sur le taux de clic d'une publicité

Publicité

Publicité

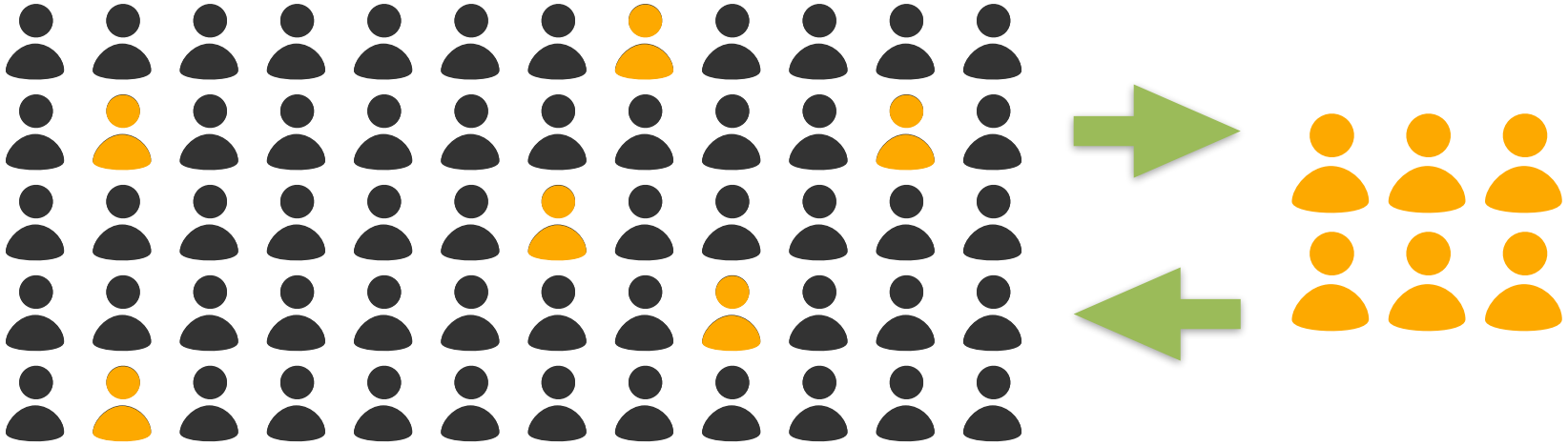
1000 utilisateurs voient la publicité sur fond jaune
12 cliquent dessus, soit 1,2%
1000 utilisateurs voient la publicité sur fond bleu
15 cliquent dessus, soit 1,5%

La différence est-elle suffisante pour dire que le fond bleu est plus efficace ?
=> Test d'hypothèse nulle
Hypothèse nulle = il n'y a pas de différence
On essaie de montrer que cette hypothèse est fausse

Test d'hypothèse nulle

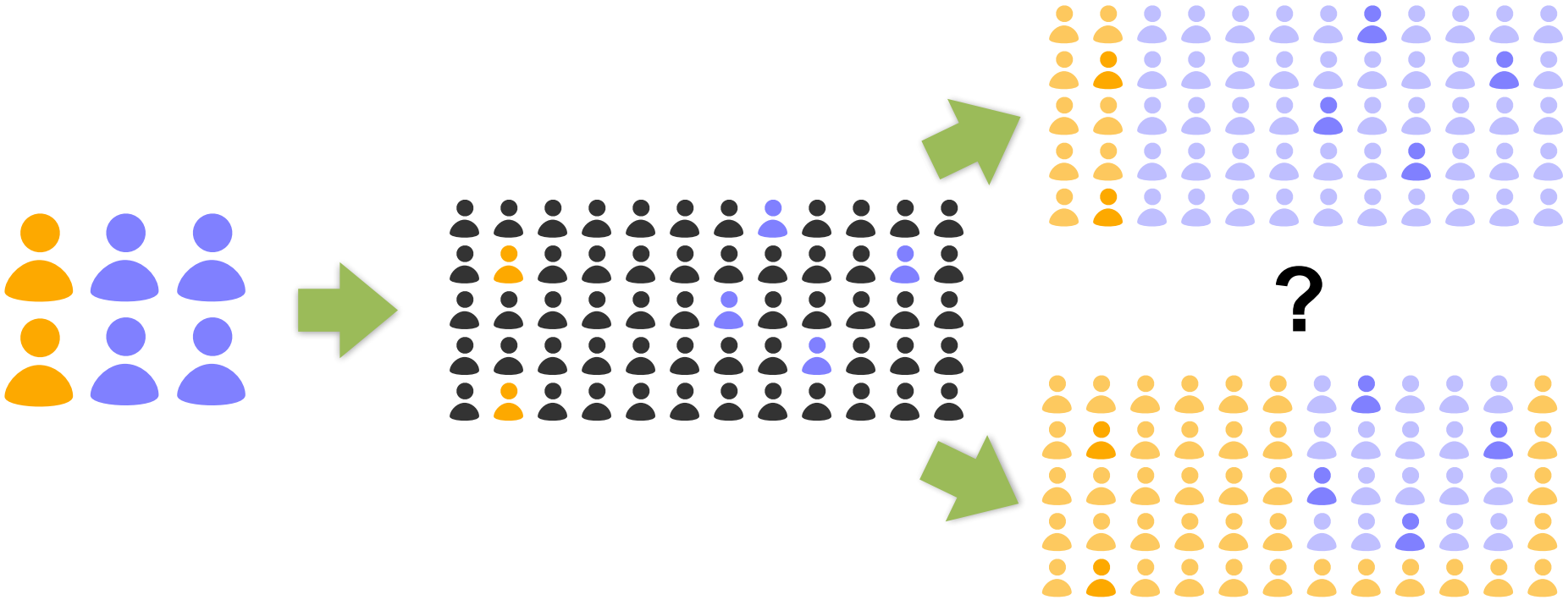
"Null Hypothesis Significance Testing" ou NHST

On teste un échantillon de la population,
et on veut inférer un résultat sur l'ensemble de la population



Test d'hypothèse nulle

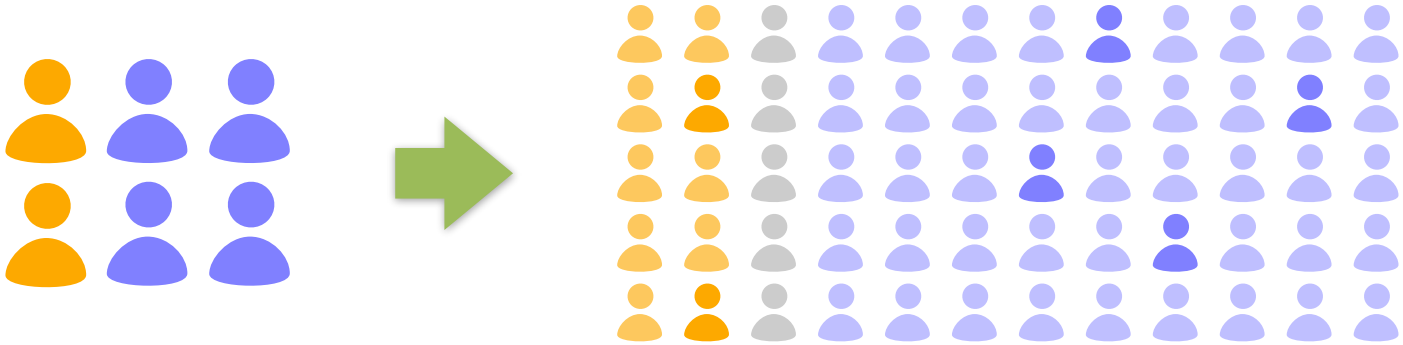
On veut savoir si la différence observée entre deux conditions est ***statistiquement significative***, c'est-à-dire si l'on a une bonne chance qu'elle ne soit pas l'effet du hasard (dans le choix de l'échantillon)



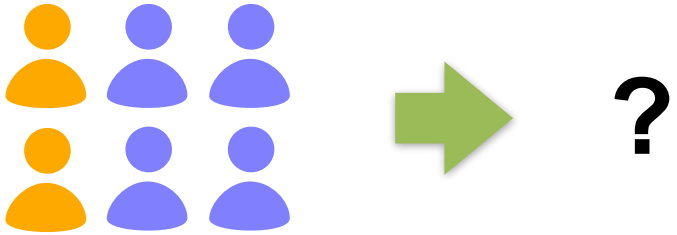
Test d'hypothèse nulle

En pratique on se donne un seuil de confiance de 95% :
on effectue un test statistique, destiné à rejeter l'hypothèse nulle :

s'il est **positif**, on est sûr à 95% que la différence existe bien dans la population



s'il est **négatif**, on ne peut **rien** dire : il y a peut-être une différence, mais le test n'a pas permis de la déceler
On ne PEUT PAS dire qu'il n'y a pas de différence



Test du Chi-2 : observations

Observations	Jaune	Bleu	Total
Clic	12	15	
Pas de clic			
Total	1000	1000	

Test du Chi-2 : compléter la table

Observations	Jaune	Bleu	Total
Clic	12	15	27
Pas de clic	988	985	1973
Total	1000	1000	2000

Test du Chi-2 : hypothèse nulle

Observations	**Jaune**	**Bleu**	**Total**
Clic	12	15	27
Pas de clic	988	985	1973
Total	1000	1000	2000
Hypothèse nulle	**Jaune**	**Bleu**	**Total**
Clic			27
Pas de clic			1973
Total	1000	1000	2000

Test du Chi-2 : hypothèse nulle

Observations	Jaune	Bleu	Total
Clic	12	15	27
Pas de clic	988	985	1973
Total	1000	1000	2000
Hypothèse nulle	Jaune	Bleu	Total
Clic	13,5		27
Pas de clic			1973
Total	1000	1000	2000

Calculer les proportions dans l'hypothèse où il n'y a pas de différence

Clic jaune = total clic * total jaune / total

Test du Chi-2 : hypothèse nulle

Observations	Jaune	Bleu	Total
Clic	12	15	27
Pas de clic	988	985	1973
Total	1000	1000	2000
Hypothèse nulle	Jaune	Bleu	Total
Clic	13,5	13,5	27
Pas de clic	986,5	986,5	1973
Total	1000	1000	2000

Calculer les proportions dans l'hypothèse où il n'y a pas de différence

Clic jaune = total clic * total jaune / total

Clic bleu = total clic * total bleu / total

Pas de clic jaune = total pas de clic * total jaune / total

Pas de clic bleu = total pas de clic * total bleu / total

Test du Chi-2 : calcul du Chi-2

Observations	Jaune	Bleu	Total
Clic	12	15	27
Pas de clic	988	985	1973
Total	1000	1000	2000
Hypothèse nulle	**Jaune**	**Bleu**	**Total**
Clic	13,5	13,5	27
Pas de clic	986,5	986,5	1973
Total	1000	1000	2000
Chi-2	**Jaune**	**Bleu**	**Total**
Clic	0,167		
Pas de clic			
Total			

Chi2 = (valeur observée - valeur attendue)^2 / valeur attendue

Test du Chi-2 : résultat

Observations	Jaune	Bleu	Total
Clic	12	15	27
Pas de clic	988	985	1973
Total	1000	1000	2000
Hypothèse nulle	**Jaune**	**Bleu**	**Total**
Clic	13,5	13,5	27
Pas de clic	986,5	986,5	1973
Total	1000	1000	2000
Chi-2	**Jaune**	**Bleu**	**Total**
Clic	0,167	0,167	0,333
Pas de clic	0,002	0,002	0,005
Total	0,169	0,169	0,338

Test : si Chi-2 > 3,84 alors 95% de chance que la différence soit significative

Test du Chi-2 : résultat avec plus grand échantillon

Observations	Jaune	Bleu	Total
Clic	120	150	270
Pas de clic	9880	9850	19730
Total	10000	10000	20000
Hypothèse nulle	**Jaune**	**Bleu**	**Total**
Clic	135	135	270
Pas de clic	9865	9865	19730
Total	10000	10000	20000
Chi-2	**Jaune**	**Bleu**	**Total**
Clic	1,67	1,67	3,33
Pas de clic	0,02	0,02	0,05
Total	1,69	1,69	3,38

Echantillon **10 fois plus grand** (même taux de clic) : résultat **non significatif**

Test du Chi-2 : résultat avec très grand échantillon

Observations	Jaune	Bleu	Total
Clic	1200	1500	2700
Pas de clic	98800	98500	197300
Total	100000	100000	200000
Hypothèse nulle	**Jaune**	**Bleu**	**Total**
Clic	1350	1350	2700
Pas de clic	98650	98650	197300
Total	100000	100000	200000
Chi-2	**Jaune**	**Bleu**	**Total**
Clic	16,67	16,67	33,33
Pas de clic	0,23	0,23	0,46
Total	16,89	16,89	33,79

Echantillon **100 fois plus grand** (même taux de clic) : résultat **significatif**

Test A/B : estimer le nombre d'observations

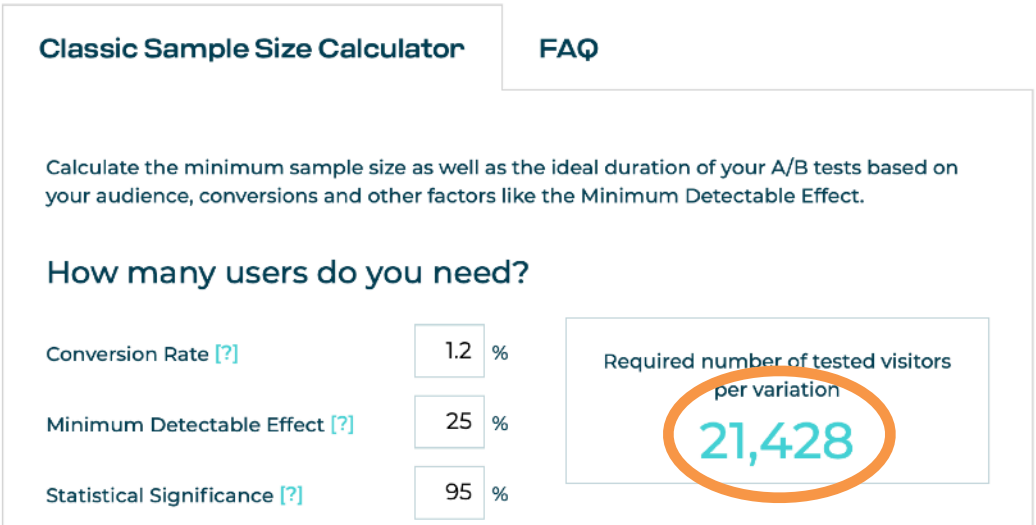
Lorsque les différences sont faibles, il faut un grand nombre d'observations pour obtenir un résultat statistiquement significatif

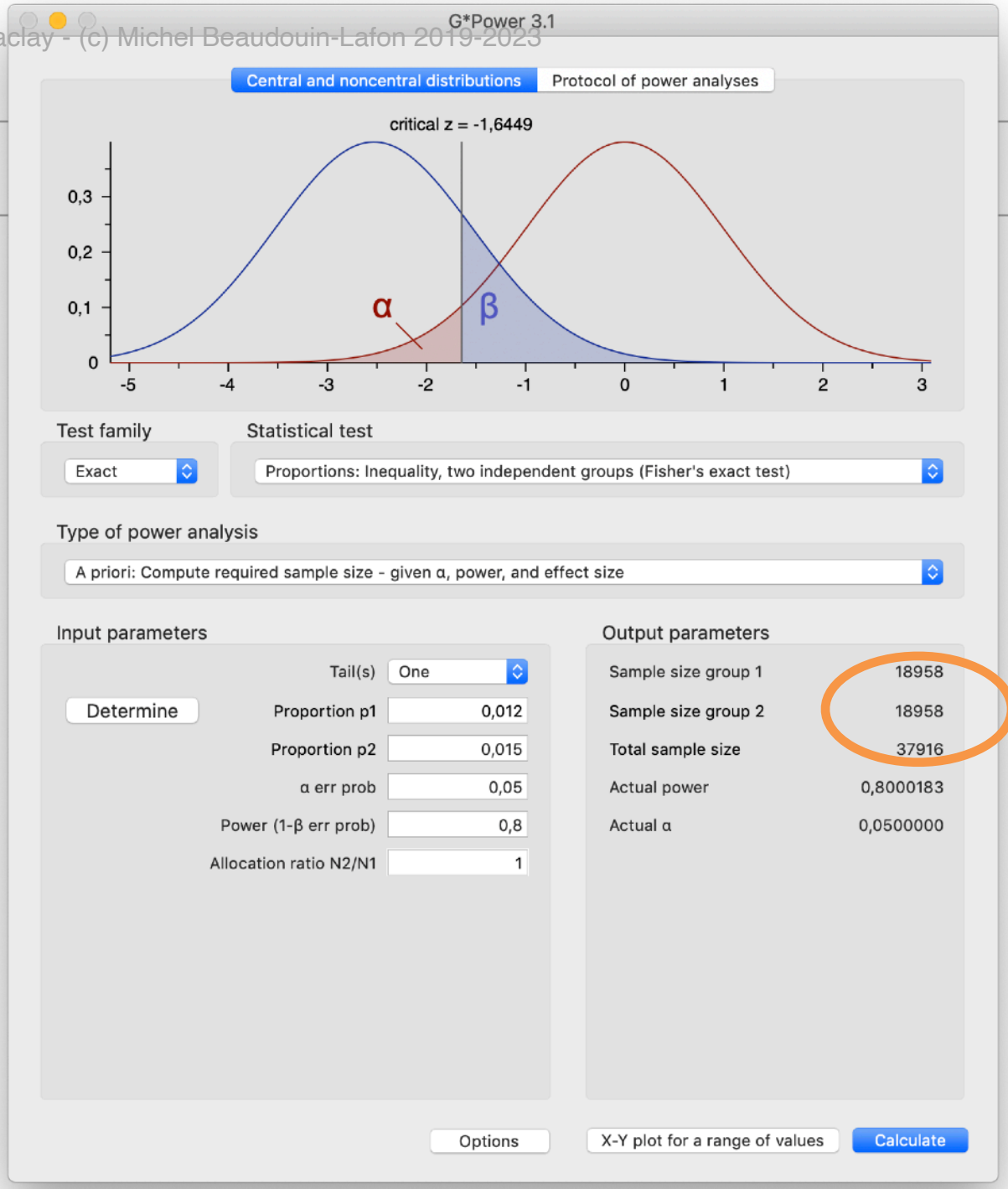
Comment estimer le nombre d'observations nécessaires ?

=> estimer la différence minimale que l'on souhaite observer

par exemple : une augmentation de 25% du taux de clic

=> Utiliser un calculateur, par exemple G*Power, ou https://www.abtasty.com/sample-size-calculator/




G*Power 3.1
Central and noncentral distributions
Protocol of power analyses
critical z = -1,6449
0,3
0,2
0,1
0
α
β
-5
-4
-3
-2
-1
0
1
2
3
Test family
Exact
Statistical test
Proportions: Inequality, two independent groups (Fisher's exact test)
Type of power analysis
A priori: Compute required sample size - given α, power, and effect size
Input parameters
Tail(s)
One
Determine
Proportion p1
0,012
Proportion p2
0,015
α err prob
0,05
Power (1-β err prob)
0,8
Allocation ratio N2/N1
1
Output parameters
Sample size group 1
18958
Sample size group 2
18958
Total sample size
37916
Actual power
0,8000183
Actual α
0,0500000
Options
X-Y plot for a range of values
Calculate

Test A/B : conclusion

Test le plus simple :

- 2 conditions, en général interface actuelle et amélioration espérée
- Mesure binaire : clic ou pas clic

Tests plus avancés :

- Plus de 2 conditions, pour tester plusieurs alternatives
- Mesures ordinales :
  - exemple : réponses à un questionnaire de type
    pas du tout d'accord, plutôt pas d'accord, neutre, plutôt d'accord, tout à fait d'accord
- Mesures numériques :
  - exemples : temps passé sur une page Web
- => différents types de tests statistiques

Nécessitent souvent un grand nombre d'observations

Taille de l'effet vs. taille de l'échantillon

ATTENTION :

Ne pas confondre la taille de l'effet (la différence entre les moyennes)
avec le fait que le test statistique est significatif ou non

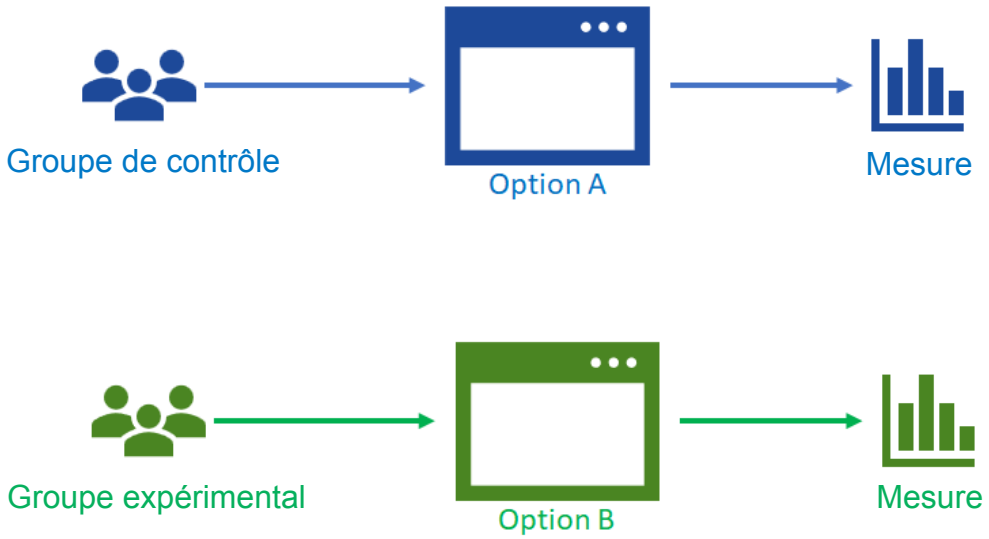
La différence entre clics sur publicité jaune (1,2%) et bleue (1,5%)
est de 0,3% : c'est la taille de l'effet

Si la différence est statistiquement significative,
est-ce qu'elle est pour autant importante ?

Par exemple, pour des publicités :
économiquement importante en terme de revenus publicitaires ?

Pour une technique d'interaction :
gain de temps de 100ms ?
taux d'erreur réduit de 5% ?

Expérimentation contrôlée



Expérimentation contrôlée

Test effectué en laboratoire, avec un nombre faible de participants (~30)

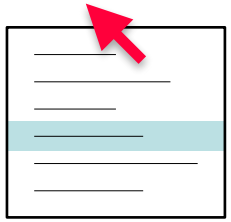
Même principe de test d'hypothèse nulle que le test A/B
MAIS

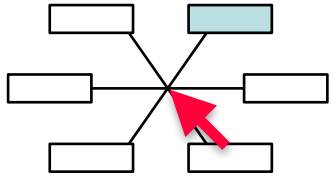
- Souvent avec une combinaison de variables
- Souvent avec un plan d'expérience intra-participants :
  - chaque participant teste les différentes possibilités
  - => permet des tests plus robustes avec moins de participants
- Analyses statistiques plus approfondies

Exemple : comparer menu linéaire et menu radial

Exemple : comparaison de menus

Variable principale : type de menu





Autres **variables** :

taille du menu : 4, 6, 8, 12 items

item à sélectionner : 1er, 2nd, …, dernier

Hypothèse nulle :

Il n'y a pas de différence entre les deux types de menus quels que soient le nombre d'items et le rang de l'item sélectionné

Exemple : comparaison de menus

24 **conditions** : 2 types de menus x 4 tailles x 3 rangs (début/milieu/fin)
Chaque participant verra chaque condition 5 fois => 5 * 24 = 120 essais

Pour chaque **essai** on **mesure** :

- le temps d'exécution
- le succès / échec

Pour éviter les **effets d'ordre**, chaque participant verra les conditions dans un ordre différent => au minimum 24 ordres, donc 24 participants

Parfois on complète les mesures objectives avec un **questionnaire**

Exemple : comparaison de menus

On collecte une **table de données**

Participant	Menu	Taille	Item	Essai	Temps	Succès
P1	Radial	4	début	1	0,45	oui
P1	Radial	4	début	2	0,34	oui
P1	Radial	4	fin	1	0,20	non
P1	Radial	4	milieu	1	0,39	oui
P1	Radial	4	début	3	0,29	oui
P1	Linéaire	12	milieu	1	1,23	oui
P1	Linéaire	12	milieu	2	1,18	non
P1	Linéaire	12	fin	3	2,11	non
P1	Linéaire	12	début	1	0,98	oui
P1	Linéaire	12	début	1	1,03	oui
…	…	…	…	…	…	…

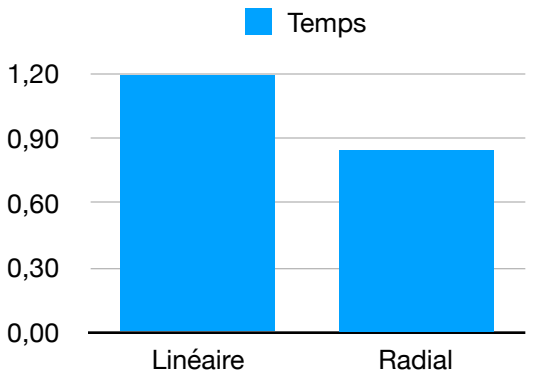
Exemple : comparaison de menus

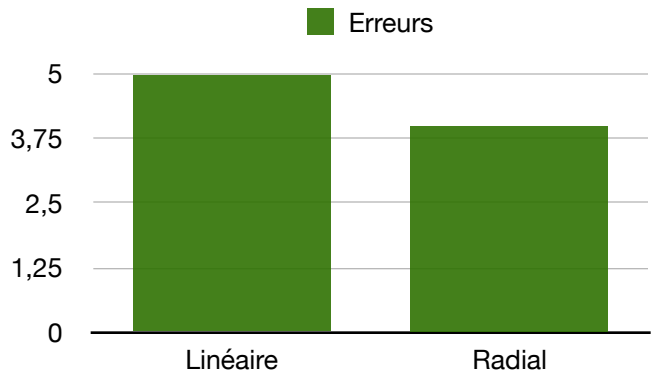
Analyser les mesures en fonctions de variables

Analyse de variance (ANOVA - ANalysis Of VAriance)

Permet de détecter des **effets principaux** :

le type de menu affecte le temps de sélection et le taux d'erreur





Le test indique si la différence observée est statistiquement significative

Exemple : comparaison de menus

Analyser les mesures en fonctions de variables

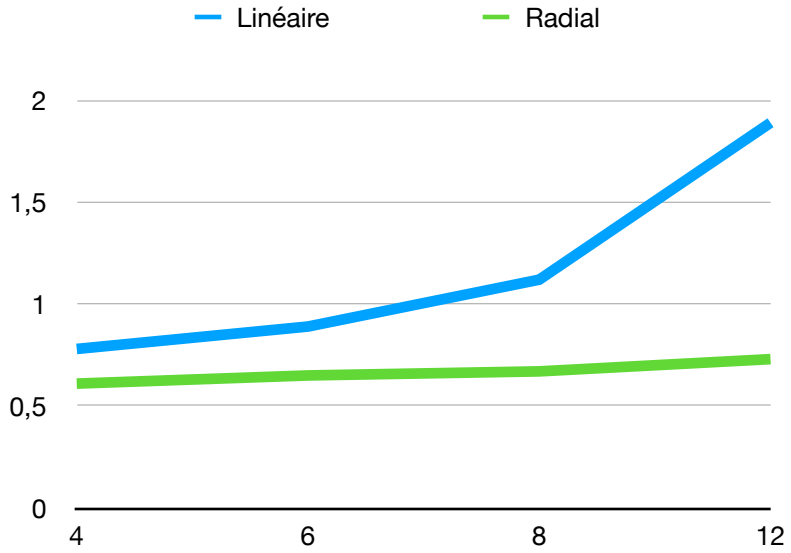
Analyse de variance (ANOVA - ANalysis Of VAriance)

Permet de détecter des **effets principaux** :

le type de menu affecte le temps de sélection et le taux d'erreur

Et des **interactions** :

le temps moyen de sélection augmente avec la taille du menu pour les menus linéaires mais pas les menus radiaux



Conclusion

L'évaluation des interfaces fait appel à des méthodes empiriques :

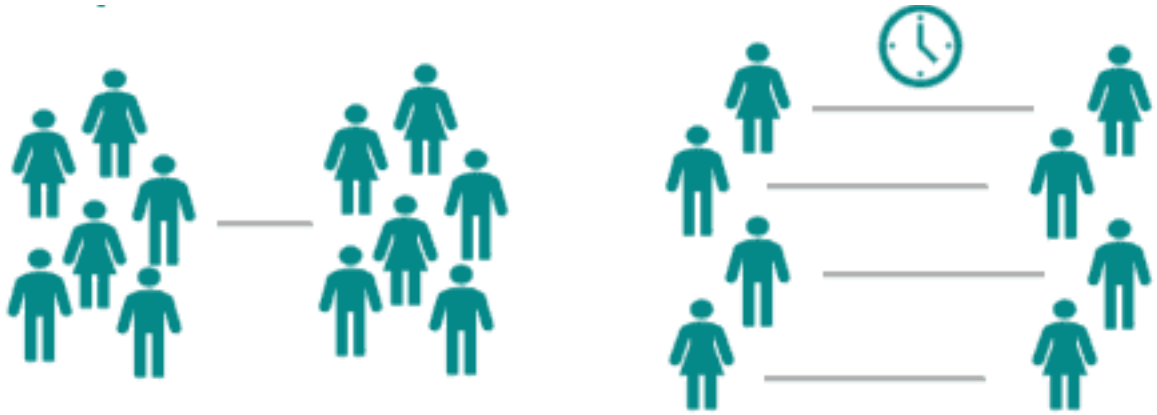
- **Analyse qualitative** (walkthrough, observation)
- **Analyse quantitative** (test A/B, expérimentations contrôlées)

Les **méthodes prédictives** (GOMS KLM) sont utiles mais insuffisantes :

- Prédit uniquement les temps d'exécution
- Prédictions approximatives
- Fastidieux à utiliser systématiquement

L'évaluation est indispensable dans le cycle de conception itératif

Complément : t-test



Un peu de statistiques : lancer de pièce

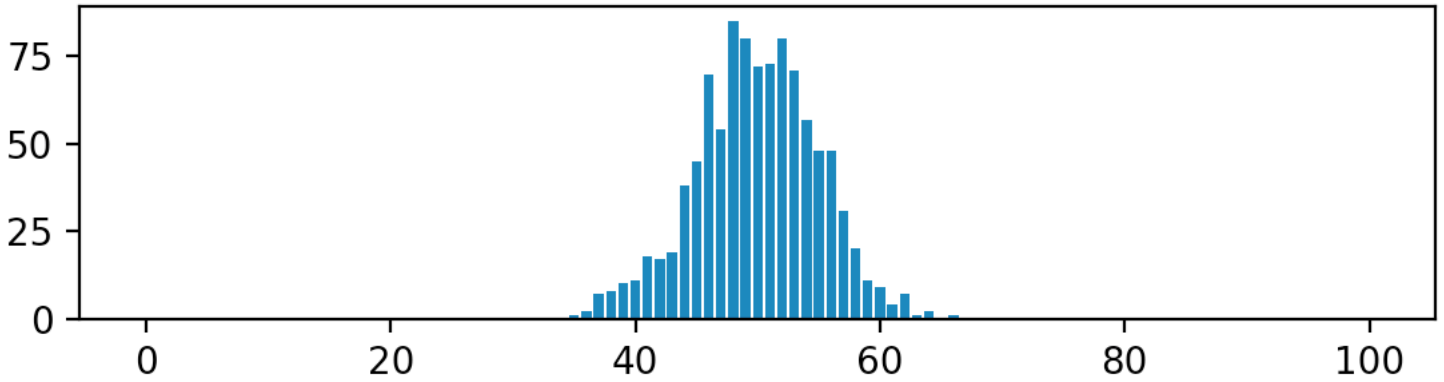
Supposons que l'on a une pièce que l'on tire à pile ou face 100 fois

Combien de fois va-t-on tirer pile ?

Cela dépend…

- Les chances d'avoir 100 pile et 0 face sont très, très, très faibles
- Les chances d'avoir 50 pile et 50 face sont assez élevées
- Mais on peut aussi avoir 51 pile et 49 face, etc.

Si l'on fait un grand nombre de séries de 100 lancers et que l'on compte le nombre de pile, on obtient une courbe comme celle-ci (1000 séries) :



Un peu de statistiques : lancer de pièce

Supposons que l'on a une pièce que l'on tire à pile ou face 100 fois

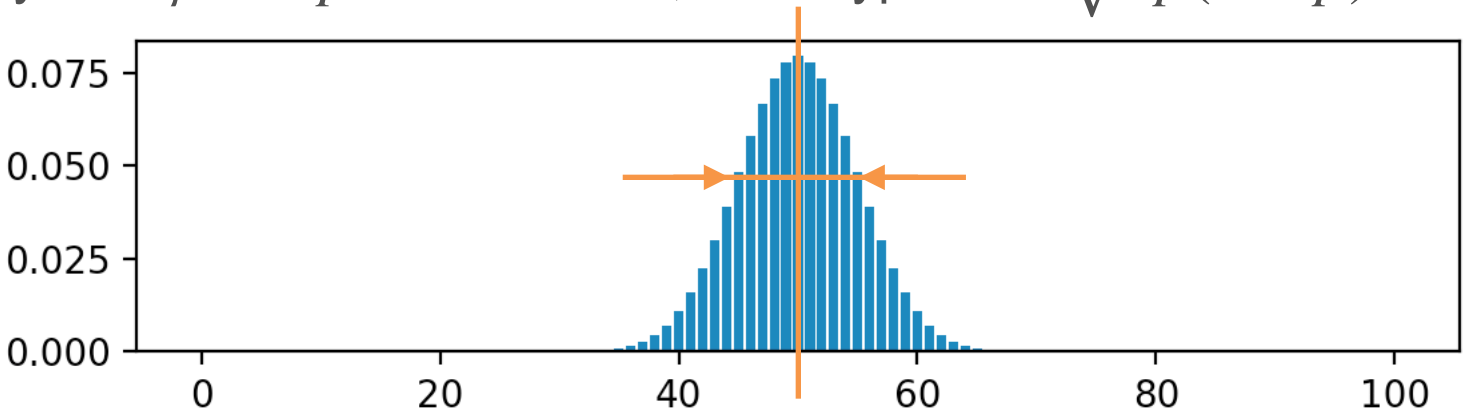
Combien de fois va-t-on tirer pile ?

Cela dépend…

- Les chances d'avoir 100 pile et 0 face sont très, très, très faibles
- Les chances d'avoir 50 pile et 50 face sont assez élevées
- Mais on peut aussi avoir 51 pile et 49 face, etc.

Cette distribution est modélisée par une loi binomiale de probabilité $p = 0.5$

moyenne $\mu = np = n/2 = 50$, écart-type $\sigma = \sqrt{np(1-p)} = \sqrt{n}/2 = 5$

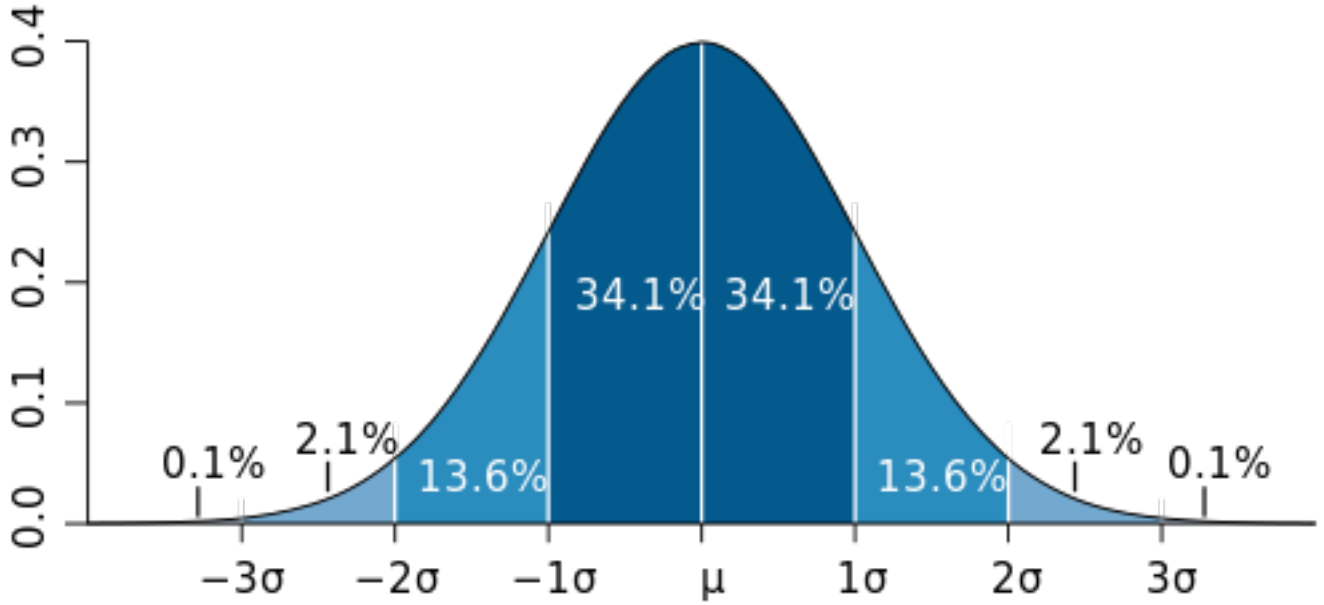


Un peu de statistiques : la loi normale

Pour un grand nombre de lancers, cette courbe approche la **loi normale**

$$\frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma^2}} exp(-\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2})$$

μ = moyenne, σ = écart-type

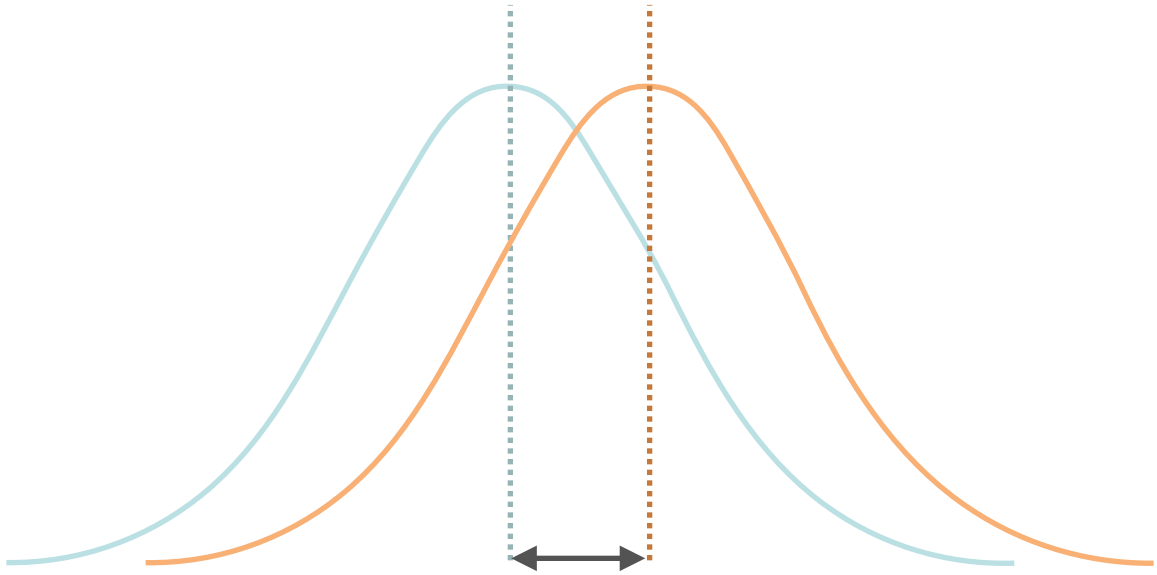


Un peu de statistiques : détecter une fausse pièce

Comment savoir si la pièce que l'on lance est bien équilibrée ?

Comparer les distributions

Quelle différence est suffisante pour conclure ?



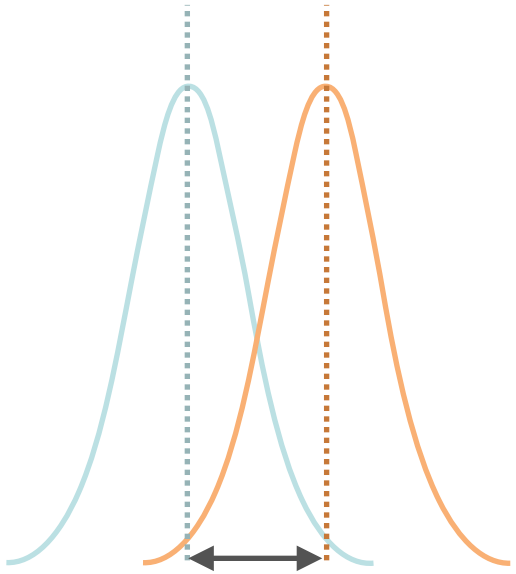
Cela dépend de la **différence entre les moyennes**

Un peu de statistiques : détecter une fausse pièce

Comment savoir si la pièce que l'on lance est bien équilibrée ?

Comparer les distributions

Quelle différence est suffisante pour conclure ?



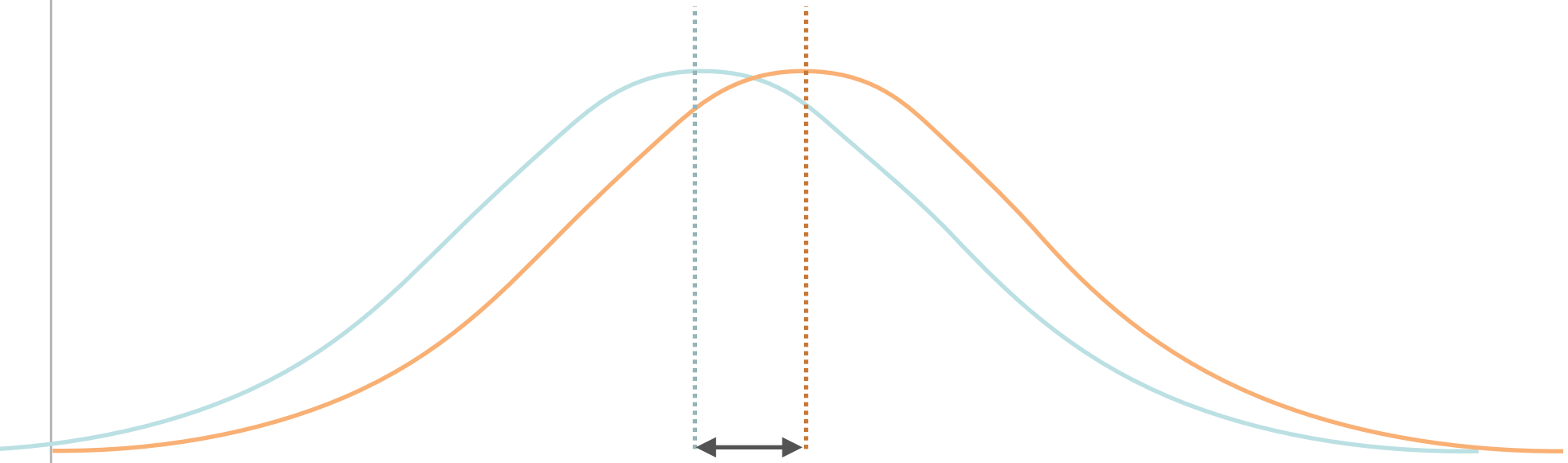
Mais cela dépend aussi de **l'écart-type**

Un peu de statistiques : détecter une fausse pièce

Comment savoir si la pièce que l'on lance est bien équilibrée ?

Comparer les distributions

Quelle différence est suffisante pour conclure ?



Mais cela dépend aussi de **l'écart-type**

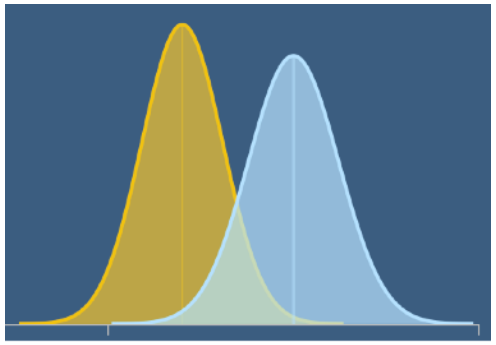
Un peu de statistiques : le t-test

On calcule le **rapport signal / bruit**, appelé *t* :

signal = différence entre les moyennes (ce qui nous intéresse)

bruit = variabilité (ce qui nous embête)

$$t = \frac{\mu_2 - \mu_1}{\sqrt{\frac{\sigma_2^2}{n_2} + \frac{\sigma_1^2}{n_1}}}$$



Comment interpréter *t* ?

Dans le cas qui nous intéresse, si **|t| > 2**,

alors on est sûr à environ 95% que la différence est « réelle »

(On dit qu'elle est **statistiquement significative**)

Plus les écarts-types sont grands (plus les courbes sont plates),
plus la différence des moyennes doit être importante

Application

Collecter un ensemble de mesures d'une valeur numérique

exemple : temps passé à visiter une page, ou à effectuer une tâche

On dispose de $\mathbf{n_1}$ mesures dans la condition de référence

et de $\mathbf{n_2}$ mesures dans la condition expérimentale

Analyse des données :

On vérifie que les données sont distribuées selon une loi normale

(test de Kolmogorov-Smirnov)

On calcule la moyenne et l'écart-type de chaque série de mesures

$$\mu = \frac{1}{n}\sum m_i \qquad \sigma^2 = \frac{1}{n-1}\sum (m_i - \mu)^2$$

On calcule la valeur de *t*

On conclut sur la validité (on non) de l'hypothèse nulle

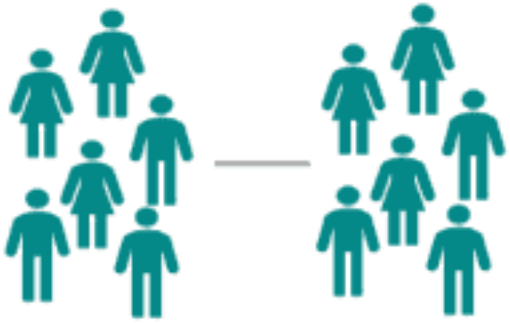
t-test non apparié / apparié

t-test non apparié :

Plan **inter**-participants

On compare les moyennes de **deux groupes**

et on veut voir s'il y a une différence



$$t = \frac{\mu_2 - \mu_1}{\sqrt{\frac{\sigma_2^2}{n_2} + \frac{\sigma_1^2}{n_1}}}$$

différence des moyennes

t-test apparié :

Plan **intra**-participants

On réalise deux mesures pour **chaque participant**

et on veut voir s'il y a une différence

$$t = \frac{\mu_d}{\frac{\sigma}{\sqrt{n}}}$$

moyenne des différences