

M1

Des essais au modèle

Plans d'expériences — Séance 1 — 4 heures — « Pourquoi toutes les expériences ne se valent-elles pas ? »

Livret de l'étudiant — tableaux, codage, prévisions et matrices

Nom :

Équipe : Laboratoire (A ou B) :

Nous allons choisir des expériences pour comprendre un procédé, puis comparer ce que nos stratégies permettent de connaître. Les équations viendront ensuite pour écrire les raisonnements. Chaque activité comporte un exemple, un temps de recherche court et une mise en commun.

- Fondamentaux et petits exercices, puis enquête expérimentale.
- Balances : information, bruit et précision.
- Missions A, B, C et D, avec une pause après A.
- Synthèse et ticket de sortie.

Ce livret est utilisable sur papier ou en PDF remplissable. Pour conserver vos réponses, enregistrez une copie du PDF sur votre ordinateur. F0 et F1 servent de ressources ; leurs développements mathématiques seront repris progressivement.

Avant de choisir : décrire le problème

Une expérience applique un protocole à des conditions définies et observe une réponse. Ici : extraire un pesticide, régler température et durée, puis mesurer le rendement récupéré en pourcentage.

Facteur : grandeur susceptible d'influencer la réponse. Un facteur contrôlé est réglé par l'expérimentateur. Un **niveau** est une valeur choisie : 40 °C est un niveau de température. Le **domaine** contient tous les couples autorisés : 40–60 °C et 1–2 h, pas seulement les points effectivement testés.

Parasite possible : lot de solvant, humidité, opérateur ou dérive. Ce n'est pas le facteur étudié, mais il peut influencer le rendement. Maintenir ce qui peut l'être et consigner les changements.

Objectif	Question
Mesurer	Quelle réponse observons-nous à ces réglages ?
Expliquer	Quel changement de réglage modifie la réponse ?
Prévoir	Quelle réponse attendre à une condition non mesurée ?
Optimiser	Quels réglages choisir selon l'objectif et les contraintes ?

Identifier avant de concevoir

Laboratoire, parcours Enquête, étape 1. Notez les deux facteurs et un niveau pour chacun, la réponse et son unité, un parasite possible et une précaution.

Facteurs, niveaux, réponse, parasite et précaution

Notre question : choisir quatre expériences pour comprendre les contributions des réglages, sans prétendre démontrer un optimum. Le nombre d'essais seul ne dit pas quelles comparaisons seront possibles.

Petits exercices — Lire avant de concevoir

Une archive fictive donne : température 60 °C, durée 1 h, rendement 34 %. Ce jeu d'introduction est indépendant des cas A et B.

Seul, puis à deux

Quels nombres sont des réglages ? Lequel est une mesure ? Décrivez l'essai en une phrase. Un essai à 45 °C pendant 2,5 h appartient-il au domaine 40–60 °C et 1–2 h ? Justifiez pour chacun des deux facteurs.

Lecture de la ligne ; niveaux ; réponse ; appartenance au domaine

Laboratoire : parcours Enquête, étapes 1 et 2. Consignez votre réponse avant de révéler l'explication. Le codage sera introduit après votre proposition de plan, lorsqu'il devient utile de comparer les échelles.

Notre correction et la difficulté restante

Enquête — Comment choisir les expériences ?

Un atelier cherche à comprendre l'extraction d'un pesticide. Deux réglages possibles : température entre 40 et 60 °C, durée entre 1 et 2 h. Le rendement récupéré (%) est mesuré après chaque extraction. Budget : quatre essais nouveaux. Question : chauffer davantage améliore-t-il le rendement, et ce gain change-t-il avec la durée ?

Proposer un plan

Choisissez quatre conditions. Dessinez-les dans le domaine température–durée. Une répétition est autorisée si vous la justifiez. Aucune réponse n'est encore mesurée.

Essai	Température (°C)	Durée (h)	Rendement
1			à mesurer
2			à mesurer
3			à mesurer
4			à mesurer

Notre dessin, la comparaison visée et la justification du plan

Mettre en commun

Laboratoire : parcours **Enquête**, étape 3, modifiez les quatre conditions. Les facteurs sont les réglages choisis ; la réponse est le rendement mesuré ; le domaine fixe les conditions autorisées.

Une question à laquelle notre plan ne répondra pas

Enquête — Comparer nos plans, puis coder

Comparez votre plan à celui d'une autre équipe : que permet-il de séparer, que laisse-t-il incertain ? Consignez votre décision ci-dessous. Pour comparer des facteurs d'unités différentes, donnons-leur des repères communs. Coder signifie donner un autre nom au même réglage : 40 degrés devient -1 , 50 devient 0, 60 devient $+1$. La machine reste réglée en degrés. Il ne change ni les conditions physiques ni les mesures.

Niveau	Température	Code x_1	Durée	Code x_2
Bas	40 °C	-1	1 h	-1
Centre	50 °C	0	1,5 h	0
Haut	60 °C	$+1$	2 h	$+1$

Comparaison des stratégies et choix conservé

1. Donner du sens

Placez ces valeurs sur deux axes, avec les unités réelles au-dessus et les codes au-dessous. Que signifie $x_1 = 0$? Pourquoi $x_1 = -1$ ne signifie-t-il pas une température négative ?

Axes et explication

2. Pratiquer dans les deux sens

- (60 °C ; 1 h) correspond à $(x_1, x_2) =$.
- $(-1, +1)$ correspond à la température et la durée .
- À 55 °C, $x_1 =$.
- Pour $x_2 = -0,5$, la durée vaut .

3. Écrire la règle

Le pas est la distance entre le centre et le niveau haut : 10 °C pour la température et 0,5 h pour la durée.

$$x = \frac{\text{valeur réelle} - \text{centre}}{\text{pas}}, \quad \text{valeur réelle} = \text{centre} + x \times \text{pas}.$$

Vérifiez la règle avec 40 degrés, puis avec une durée de 2 heures

Avant de poursuivre : faites valider une conversion dans chaque sens.

Enquête — Une prédiction demande un modèle

Nous recevons deux mesures d'archives fictives, indépendantes des cas A et B et du budget de nouveaux essais à durée fixée à 1 h : 20 % mesurés à 40 °C et 34 % à 60 °C.

1. Une première idée

Que prévoyez-vous à 50 °C ? Expliquez avec une phrase ou un dessin.

Prévision et raisonnement

2. Faire apparaître l'hypothèse

Le changement de température vaut degrés ; le gain mesuré vaut points. Partager ces changements en deux suppose quoi sur le gain entre les deux températures ?

Notre hypothèse

3. Écrire notre règle

Une règle qui calcule une prévision à partir d'un réglage est un **modèle**. L'enseignant écrit d'abord la règle en mots, puis avec $\hat{y} = 20 + 0,7(T - 40)$. À 50 degrés : $20 + 0,7 \times 10 = 27$. Le nombre 0,7 représente le gain supposé par degré.

La règle en mots, la formule et le sens du coefficient b

4. Vérifier avec une nouvelle mesure

Nouvelle mesure à 50 °C : %. Écart à notre prévision : points. Pour cet exemple, l'écart-type de répétabilité est d'environ un point.

Que faut-il vérifier ? Que nous apprend cet écart sur notre hypothèse ?

À retenir : une droite est une hypothèse simple que l'on peut vérifier. Deux points suffisent pour la tracer, mais pas pour vérifier qu'elle décrit le phénomène entre ces points.

Mission balances — Trois masses inconnues, une balance imparfaite

Comment choisir les pesées pour retrouver toutes les masses ? Balance tarée avec un bruit de mesure de 2 g d'écart-type ; un exemplaire de chaque objet. Trois pesées au maximum.

Proposer puis peser

En groupes de 3 ou 4, ouvrez le laboratoire, parcourez **Balances : trois masses inconnues**. Cochez les objets à peser ensemble. Choisissez les combinaisons et dites ce qui est mesuré : une masse ou une somme. Aucune masse numérique n'est à deviner. Le mode sans bruit peut ensuite servir à expliquer les équations. Ne révélez pas encore les équations.

Pesée	Objets présents	Information attendue	Total (g)
1			
2			
3			

Comparer avant de calculer

Que pouvez-vous retrouver ? Une pesée différente apporte-t-elle forcément une information indépendante ? Quelle combinaison changeriez-vous ?

Notre conclusion et une stratégie différente

Passer aux équations

Cliquez sur « Passer aux équations et au rang ». Un 1 indique un objet présent, un 0 son absence. Chaque pesée devient une ligne ; chaque masse inconnue une colonne. Écrivez une de vos équations.

Une équation ; rang observé ; masses identifiables ou information manquante

À retenir : le nombre de pesées ne suffit pas. Il faut des équations indépendantes pour identifier les inconnues du modèle. La tare connue explique l'absence de constante ici. Dans le procédé, les colonnes représenteront des termes du modèle choisi, pas des objets.

Balances — Phase 2 : la même masse, plusieurs lectures

Les premières lectures sont déjà bruitées. Ouvrez directement « Phase 2 : Répéter » en haut du laboratoire pour observer plusieurs lectures de la même combinaison. La balance ajoute un bruit aléatoire de répétabilité, d'écart-type $\sigma = 2$ g. Elle est d'abord correctement tarée.

Prédire puis répéter

Une pesée de A+B donnera-t-elle toujours le même nombre ? Que changera une moyenne de plusieurs pesées ? Discutez de ce qui pourrait varier, puis pesez au moins trois fois et au plus douze fois la même combinaison.

Notre prédiction ; les premières observations en grammes

Révélez l'explication seulement après l'observation. La masse vraie reste fixe ; chaque observation contient une erreur différente. Relevez : moyenne g ; variance corrigée s^2 g² ; écart-type s g.

$$\bar{y} = \frac{1}{n} \sum_i y_i, \quad s^2 = \frac{1}{n-1} \sum_i (y_i - \bar{y})^2, \quad s = \sqrt{s^2}.$$

La variance décrit des écarts au carré ; l'écart-type retrouve l'unité des mesures. Avec peu de répétitions, s ne vaut pas exactement le σ utilisé par le simulateur.

Distinguer bruit et biais

Comparez les mêmes tirages avec et sans défaut de tare de +2 g. La dispersion change-t-elle ? La moyenne se décale-t-elle ?

Ce que les répétitions réduisent ; ce qu'elles ne corrigent pas

À retenir : sous erreurs indépendantes de variance commune, l'écart-type de la moyenne est $\sigma/\sqrt{n}$. Répéter A+B stabilise la somme sans séparer A et B (rang 1). Un biais de tare ne disparaît pas en répétant.

Balances — Phase 3 : six pesées par stratégie

Même budget pour toutes les équipes : six pesées, $\sigma = 2$ g par pesée, erreurs indépendantes, tare connue et sans biais.

Ouvrez « Phase 3 : Comparer les stratégies », accessible directement en haut du laboratoire. Commencez par « Chaque objet deux fois », puis essayez « Chaque paire deux fois ». Vous pouvez ensuite choisir vos six compositions dans « Notre plan ». Comparez avec une autre équipe, puis essayez une seconde stratégie. Une seule campagne ne suffit pas à classer la précision.

Notre plan de six compositions ; justification et prédiction

Observer puis comparer

Relevez une estimation. Révélez ensuite les 200 campagnes virtuelles : chaque point représente une estimation de la masse A issue de six pesées, et non une lecture de balance.

Stratégie	Rang	Estimation de A (g)	Écart-type de A estimée (g)
Notre choix			
Autre choix			

Quelle stratégie identifie les masses ? Laquelle les stabilise davantage ? Une limite de la comparaison

Synthèse accompagnée : $\mathbf{y} = \mathbf{X}\boldsymbol{\beta} + \boldsymbol{\varepsilon}$. Ici, $\mathbf{y}$ contient les masses observées, $\mathbf{X}$ les compositions, $\boldsymbol{\beta}$ les trois masses inconnues, et $\boldsymbol{\varepsilon}$ les erreurs. Le rang concerne l'identifiabilité ; la dispersion de $\hat{\boldsymbol{\beta}}$ concerne la précision. Après l'explication des matrices, relisez $\text{Cov}(\hat{\boldsymbol{\beta}}) = \sigma^2(\mathbf{X}^\top \mathbf{X})^{-1}$: diagonale = variances des estimations. Hypothèses : modèle correct, erreurs centrées non corrélées de variance commune, $\mathbf{X}$ connu de rang complet. La normalité n'est pas nécessaire ; un biais de tare n'est pas corrigé par cette formule. F0, sections 7–9, conserve les démonstrations.

Mission A — Peut-on additionner les gains ?

Deux facteurs peuvent modifier le rendement d'extraction d'un pesticide : la température et la durée. Votre laboratoire doit proposer des conditions opératoires avec quatre essais au maximum.

Facteur	Niveau bas (−1)	Niveau haut (+1)
Température x_1	40 °C	60 °C
Durée x_2	1 h	2 h

Les cas A et B représentent deux laboratoires traitant des échantillons différents. Ils fournissent deux jeux de résultats. Le laboratoire numérique est l'outil du site qui permet de simuler les essais. Chaque essai occupe l'extracteur une demi-journée. L'écart-type de répétabilité est d'environ 1,5 point de rendement.

1. Choisir une première stratégie

Préférez-vous trois essais depuis la base (40 °C, 1 h), en changeant un facteur à la fois, ou les quatre combinaisons ? Justifiez en une phrase.

2. Préparer avec votre fiche

Votre fiche « Trois essais : un facteur à la fois » ou « Quatre essais : toutes les combinaisons » vous donne une stratégie à examiner. Dessinez les quatre combinaisons. Entourez les points mesurés par cette stratégie. Quel résultat faudra-t-il prévoir sans l'avoir mesuré ? Préparez un avantage et une limite.

Le dessin, un avantage, une limite

3. Comparer les propositions

Échangez avec le groupe qui examine l'autre stratégie dans votre laboratoire. Quelle hypothèse permettrait d'économiser le quatrième essai ?

Notre hypothèse et une objection

Mission A — Prévoir, vérifier, expliquer

Les deux groupes ouvrent d'abord les trois premiers résultats. Gardez le quatrième volet fermé jusqu'à ce que votre prévision soit écrite et que l'enseignant vous demande de l'ouvrir.

4. Calculer une prévision

Essai	Code (x_1, x_2)	Rendement de notre laboratoire	
40 °C ; 1 h	$(-1, -1)$		%
60 °C ; 1 h	$(+1, -1)$		%
40 °C ; 2 h	$(-1, +1)$		%

Calculez le gain de température à 1 h, puis celui de durée à 40 °C. Prévoyez le quatrième résultat en additionnant ces gains à la valeur de départ.

Départ + gain température + gain durée : calcul et prévision

5. Vérifier le quatrième résultat

Ouvrez le volet à 60 °C pendant 2 h. Mesure : %. Écart à la prévision : points.

Gain en passant de 40 à 60 degrés	À 1 heure	À 2 heures
Notre laboratoire		
Autre laboratoire		

Le gain est-il le même aux deux durées ? Expliquez la différence entre les laboratoires

Interaction : l'effet d'un facteur dépend du niveau de l'autre.

Mission A — Mettre en mots, puis en équation

Une équation écrit de manière compacte les hypothèses que nous venons d'examiner.

6. D'abord les mots

Si les contributions s'ajoutent, on écrit : prévision = valeur de départ + contribution température + contribution durée.

$$\hat{y} = b_0 + b_1x_1 + b_2x_2.$$

Dans ce modèle, b_0 est la prévision au centre et b_1 , b_2 expriment les contributions par unité codée. Si une contribution dépend de l'autre réglage, on peut ajouter un terme d'interaction :

$$\hat{y} = b_0 + b_1x_1 + b_2x_2 + b_{12}x_1x_2.$$

Nous construirons la colonne x_1x_2 plus tard. Aucun calcul de coefficients n'est demandé maintenant.

Expliquez en une phrase pourquoi additionner deux gains peut échouer

Votre recommandation dans votre laboratoire, parmi les quatre conditions testées, et une limite de votre conclusion

Attention : le meilleur point mesuré n'est pas forcément le meilleur de tout le domaine. Une interaction faible n'est pas une preuve de validité du modèle.

Pause

Mission B — Peut-on séparer les effets ?

Un journal contient six lots. On veut prévoir le rendement à 60 °C pendant 1 h. Température et durée ont toujours augmenté ensemble.

Lot	Température	Durée	Rendement	(x_1, x_2)
1	40	1	22,8	$(-1, -1)$
2	45	1,25	30,3	
3	50	1,5	39,5	$(0, 0)$
4	50	1,5	38,7	$(0, 0)$
5	55	1,75	48,4	
6	60	2	57,5	$(+1, +1)$

Unités : degrés Celsius, heures, pourcentages.

1. Examiner les comparaisons

Complétez les codes des lots 2 et 5. Peut-on comparer deux températures à durée constante ? Le doublon au centre aide-t-il à séparer les effets ?

2. Simplifier ensemble

Dans le journal, les colonnes x_1 et x_2 sont identiques. Dans $\hat{y} = b_0 + b_1x_1 + b_2x_2$, remplacez x_2 par x_1 .

La formule simplifiée ; ce que l'on peut connaître et ce que l'on ne peut pas séparer

Ressource facultative (mode libre) : laboratoire, préréglage B-JOURNAL, code JOURNAL.

Mission B — Choisir une nouvelle information

Les coefficients suivants sont fournis : il n'est pas demandé de les calculer. Les trois modèles décrivent aussi bien le journal.

Hypothèse	b_0	b_1	b_2
Tout attribuer à la température	39,53	17,5	0
Tout attribuer à la durée	39,53	0	17,5
Partager également	39,53	8,75	8,75

3. Calculer une prévision

À 60 °C pendant 1 h, $(x_1, x_2) = (+1, -1)$. Utilisez une ligne du tableau pour calculer $b_0 + b_1 - b_2$. Comparez ensuite les trois prévisions présentées par l'enseignant.

Notre calcul ; pourquoi les données du journal ne départagent pas ces modèles

4. Proposer puis vérifier

Proposez un essai où $x_1 \neq x_2$, en unités réelles. Quelle comparaison ajoute-t-il ?

Réglages et justification

Mesure révélée à 60 °C pendant 1 h : %.

Le journal seul répond-il à la demande ? Que change cet essai, et que ne vérifie-t-il pas à lui seul ?

Conclusion : sous le modèle additif, l'essai découpé permet de séparer les contributions. Il ne suffit pas à vérifier toutes les hypothèses du modèle.

Mission C — Construire la matrice du modèle

Nous savons lire les essais et le modèle. Nous allons maintenant regrouper les calculs de prévision, sans apprendre une nouvelle règle physique.

1. Une colonne par terme

Pour $\hat{y} = b_0 + b_1x_1 + b_2x_2$, chaque ligne de $\mathbf{X}$ contient $(1, x_1, x_2)$. La colonne de 1 multiplie b_0 . Les rendements mesurés restent dans un autre tableau, le vecteur $\mathbf{y}$.

Essai	Pour b_0	Pour b_1x_1	Pour b_2x_2
40 °C ; 1 h	1	-1	-1
60 °C ; 1 h			
40 °C ; 2 h			
60 °C ; 2 h			

2. Appliquer des coefficients fournis

Exemple additif d'entraînement : $b_0 = 40$, $b_1 = 8$, $b_2 = 10$. La première ligne donne $1 \times 40 - 1 \times 8 - 1 \times 10 = 22$. Calculez les trois autres prévisions.

Les trois calculs et leurs résultats

Dimensions : $\mathbf{X}$ a lignes et colonnes ; le vecteur des coefficients a lignes et une colonne ; le vecteur des prévisions a lignes et une colonne.

3. Écrire les mêmes opérations en une fois

$$\hat{\mathbf{y}} = \mathbf{X}\boldsymbol{\beta}, \quad \boldsymbol{\beta} = (b_0, b_1, b_2)^\top.$$

Expliquez pourquoi la première colonne contient des 1

Mission C — Retrouver la règle à partir des mesures

Avant, les coefficients étaient fournis pour prévoir. Maintenant les mesures sont connues et nous cherchons les coefficients : c'est la régression.

$$\underbrace{\begin{pmatrix} 23 \\ 37 \\ 41 \\ 59 \end{pmatrix}}_{\text{mesures } \mathbf{y}} = \underbrace{\begin{pmatrix} 1 & -1 & -1 \\ 1 & 1 & -1 \\ 1 & -1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 \end{pmatrix}}_{\text{réglages } \mathbf{X}} \underbrace{\begin{pmatrix} b_0 \\ b_1 \\ b_2 \end{pmatrix}}_{\text{coefficients cherchés}} + \boldsymbol{\varepsilon}.$$

La première ligne signifie $23 = b_0 - b_1 - b_2 + \varepsilon_1$. Chaque autre ligne décrit un autre essai. La régression cherche les coefficients qui rendent la somme des carrés des écarts aussi petite que possible.

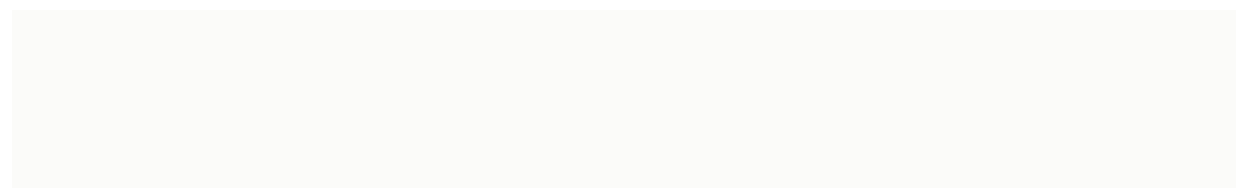
$$\hat{\boldsymbol{\beta}} = (\mathbf{X}^\top \mathbf{X})^{-1} \mathbf{X}^\top \mathbf{y}, \quad \hat{\mathbf{y}} = \mathbf{X} \hat{\boldsymbol{\beta}}, \quad \mathbf{r} = \mathbf{y} - \hat{\mathbf{y}}.$$

La première formule demande des colonnes indépendantes. Le laboratoire effectue le calcul : aucune inversion manuelle n'est demandée. Ici $\mathbf{X}^\top \mathbf{X} = 4I_3$ et $\mathbf{X}^\top \mathbf{y} = (160, 32, 40)^\top$.

Au laboratoire

Ouvrez le lien du repère 28, qui arrive directement à l'étape 3 : parcours guidé **C : écrire et estimer le modèle**. Les étapes 1 et 2 ont été travaillées avec les premières prévisions. À l'étape 3, révélez la régression sur 23,37,41,59. Relevez les coefficients et comparez mesure et prévision pour l'essai 1. Revenez aux slides après l'étape 3 ; l'étape 4 sur le rang sera reprise ensuite.

Coefficients trouvés ; mesure, prévision et résidu du premier essai ; somme des carrés des résidus



À retenir : un résidu est un écart observé. Même sans bruit ajouté, un modèle peut laisser des écarts parce qu'un terme manque.

Mission C — Le modèle détermine les colonnes

Avec les mêmes essais, ajouter un terme au modèle ajoute une colonne à $\mathbf{X}$.

4. Construire l'interaction

Complétez le produit des deux codes, ligne par ligne.

Essai	1	x_1	x_2	x_1x_2
1	1	-1	-1	
2	1	+1	-1	
3	1	-1	+1	
4	1	+1	+1	

Avec interaction, $\mathbf{X}$ a lignes et colonnes. Combien de coefficients faut-il déterminer ? .

Avec les coefficients fournis (40, 8, 10, 1), calculez la prévision de la première ligne

5. Revenir au journal de B

Le **rang** compte les colonnes indépendantes. Si deux colonnes sont identiques, on ne peut pas déterminer séparément leurs deux coefficients.

Modèle additif	Nombre de lignes	Nombre de colonnes	Rang
Journal (C-P1)			
Quatre combinaisons (C-P4)			

Pourquoi six lignes ne suffisent-elles pas dans le journal, alors que quatre combinaisons suffisent pour ce modèle ?

Laboratoire : parcours guidé C, étape 4, comparaison des deux matrices $\mathbf{X}$. Les colonnes indépendantes permettent de déterminer les coefficients ; sinon, la formule avec l'inverse ne s'applique pas.

Mission D — Répéter ou ajouter une combinaison ?

P2 contient les trois coins $(-1, -1)$, $(+1, -1)$, $(-1, +1)$. P4 ajoute le quatrième coin $(+1, +1)$. P3 répète deux fois les essais de P2 ; P5 répète deux fois ceux de P4.

1. Compter et comparer

Plan	Total d'essais	Conditions différentes	Répétitions ?
P2			
P3			
P4			
P5			

Quel plan permet d'étudier l'interaction ? D'observer la dispersion à réglages identiques ? De faire les deux ?

2. Vérifier au laboratoire

Parcours guidé D : comparez les plans à l'étape 1, puis révélez leurs rangs à l'étape 2. À l'étape 3, refaites des extractions aux mêmes réglages pour observer la dispersion. Le mode libre conserve les préréglages C-P2 à C-P5. Comparez le rang de P3 et P4. Répéter les mêmes lignes ajoute-t-il une colonne indépendante ?

Les deux rangs, et ce que les répétitions apportent réellement

3. Décider

Vous disposez de quatre essais et voulez étudier l'interaction température–durée. Proposez les réglages et indiquez une limite de votre conclusion.

Synthèse et ticket de sortie

D'abord, synthèse collective : tableau d'essais, codage, modèle, matrice $\mathbf{X}$, choix des essais.

Puis un ticket individuel

1. Décodez $(+1, -1)$ en unités réelles, puis écrivez la ligne de $\mathbf{X}$ pour le modèle $b_0 + b_1x_1 + b_2x_2$.

2. Une prévision de modèle est-elle une mesure ? Expliquez.

3. Pourquoi répéter les lots du journal ne sépare-t-il pas les contributions de température et durée ?

Une question qui me reste

Pour terminer : collecte et bilan.

À reprendre avant la séance 2

Codez $(45\text{ °C}, 2\text{ h})$; décodez $(0, -1)$. Pour chacun de ces deux essais, écrivez la ligne de $\mathbf{X}$ avec puis sans interaction. Vérifiez vos conversions avec les formules de codage de l'enquête.

Préparation