

# Analyse de la variance à trois facteurs

Effets combinés de l'origine géographique, du traitement thermique et de la concentration en  $\text{CO}_2$  sur l'absorption chez les plantes

**Réalisé et présenté par :**

DAHOUI Pinel Baudelaire

CIPMA CHAIRE-UNESCO

Master Recherche Statistiques Appliquées aux vivants

Chargé du cours: Dr Nicodème ATCHADE

17 Avril 2025



# Plan de la présentation

- 1 Introduction
- 2 Méthodologie
- 3 Résultats
- 4 Conclusion

## Importance de l'étude

- La fixation du  $\text{CO}_2$  est un processus clé de la photosynthèse
- Comprendre les facteurs d'influence aide à prédire les réponses aux changements climatiques
- Données  $\text{CO}_2$  : mesures standardisées pour la recherche

## Variables étudiées

- **Origine géographique :**
  - Québec (froid)
  - Mississippi (chaud)

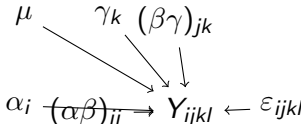
- **Traitement thermique :**
  - Nonchilled ( $25^\circ\text{C}$ )
  - Chilled ( $7^\circ\text{C}$ )
- **Concentration  $\text{CO}_2$  :**
  - 7 niveaux (95-1000 mL/L)

## Questions de recherche

- Comment l'origine géographique influence-t-elle la réponse au froid ?
- La concentration en  $\text{CO}_2$  module-t-elle l'effet du stress thermique ?
- Existe-t-il des interactions complexes entre ces trois facteurs ?

## Hypothèses

- Les plantes du Québec résistent mieux au froid
- L'effet du froid est atténué à haute concentration de  $\text{CO}_2$
- Interaction triple significative entre les facteurs



The diagram illustrates the decomposition of the response variable  $Y_{ijkl}$  into its components. Arrows point from the following terms to  $Y_{ijkl}$ :

- $\mu$  (overall mean)
- $\alpha_i$  (main effect of Type)
- $\beta_j$  (main effect of Treatment)
- $\gamma_k$  (main effect of concentration)
- $(\alpha\beta)_{ij}$  (interaction between Type and Treatment)
- $(\alpha\gamma)_{ik}$  (interaction between Type and concentration)
- $(\beta\gamma)_{jk}$  (interaction between Treatment and concentration)
- $(\alpha\beta\gamma)_{ijk}$  (three-way interaction)
- $\varepsilon_{ijkl}$  (error term)

$$Y_{ijkl} = \mu + \alpha_i + \beta_j + \gamma_k + (\alpha\beta)_{ij} + (\alpha\gamma)_{ik} + (\beta\gamma)_{jk} + (\alpha\beta\gamma)_{ijk} + \varepsilon_{ijkl}$$

- $\mu$  : moyenne générale
- $\alpha_i$  : effet principal du Type ( $i=1,2$ )
- $\beta_j$  : effet principal du Treatment ( $j=1,2$ )
- $\gamma_k$  : effet principal de la concentration ( $k=1..7$ )
- Termes d'interaction : 3 doubles + 1 triple

# Plan expérimental

## Structure factorielle

- Plan complet équilibré
- $2 \times 2 \times 7 = 28$  combinaisons
- 3 répétitions par combinaison
- $N = 84$  observations

## Variables

- VD : uptake ( $\mu\text{mol}/\text{m}^2\text{s}$ )
- VI : Type, Treatment, conc

## Exemple de combinaisons

Type	Treatment	conc
Québec	nonchilled	95 mL/L
Québec	chilled	250 mL/L
Mississippi	nonchilled	500 mL/L

## Analyse

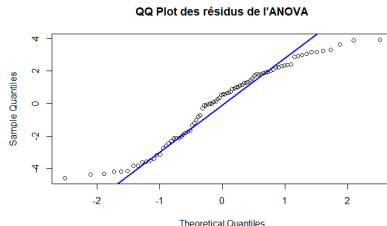
- ANOVA à trois facteurs
- Comparaisons post-hoc
- Visualisations interactives

## Homogénéité des variances

- Test de Levene
- $p = 1 > 0.05$
- Hypothèse validée

## Normalité des résidus

- Test de Shapiro-Wilk
- $W = 0.947, p = 0.0017$
- Légère déviation



ANOVA robuste à cette légère non-normalité grâce à :

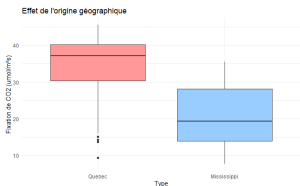
- Effectifs modérés
- Plan équilibré

Source	ddl	SC	CM	F	p
Type (A)	1	3366	3366	399.76	<0.001
Treatment (B)	1	988	988	117.37	<0.001
conc (C)	6	4069	678	80.55	<0.001
A×B	1	226	226	26.81	<0.001
A×C	6	374	62	7.41	<0.001
B×C	6	101	17	2.00	0.081
A×B×C	6	112	19	2.22	0.055
Résidus	56	471	8		

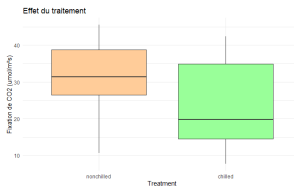
- Effets principaux tous significatifs ( $p < 0.001$ )
- Interactions A×B et A×C très significatives
- Interaction triple marginalement significative ( $p = 0.055$ )



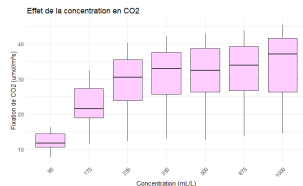
# Effets principaux



**Origine géographique**  
 $F = 399.76$ ,  $p < 0.001$   
 $\Delta = 10.6 \mu\text{mol}/\text{m}^2\text{s}$

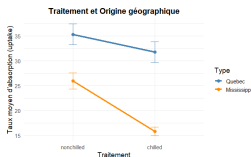


**Traitement thermique**  
 $F = 117.37$ ,  $p < 0.001$   
 $\Delta = 6.9 \mu\text{mol}/\text{m}^2\text{s}$



**Concentration CO<sub>2</sub>**  
 $F = 80.55$ ,  $p < 0.001$   
Relation dose-réponse

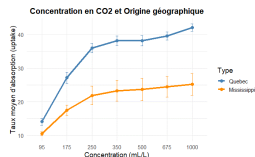
# Interactions significatives



**Type × Treatment**

$F = 26.81, p < 0.001$

Effet du froid plus marqué au  
Mississippi

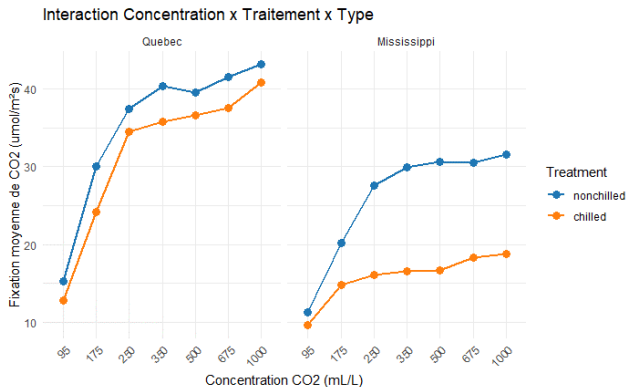


**Type × Concentration**

$F = 7.41, p < 0.001$

Plantes du Québec profitent plus  
du CO<sub>2</sub>

# Interaction triple



- Pattern complexe ( $p = 0.055$ )
- Québec : Effet modéré du froid, surtout aux concentrations moyennes
- Mississippi : Fort effet du froid à toutes concentrations
- Nonchilled : Performance similaire aux hautes concentrations

# Comparaisons post-hoc

## Origine géographique

Condition	$\Delta$	p
nonchilled	+9.4	<0.001
chilled	+15.9	<0.001

## Traitement thermique

Région	$\Delta$	p
Québec	+3.5	0.002
Mississippi	+10.2	<0.001

## Interprétation

- Avantage Québec dans les deux conditions
- Écart amplifié sous stress froid

## Concentration

- Différences significatives entre 95-250 vs 350-1000 mL/L
- Plateau à partir de 350 mL/L

# Synthèse des résultats

## Principaux résultats

- **Origine géographique** : effet majeur ( $F=399.8$ )
- **Traitement** : réduction de 22% sous froid
- **CO<sub>2</sub>** : réponse saturante à  $>350$  mL/L
- **Interactions** :
  - Origine  $\times$  Traitement
  - Origine  $\times$  Concentration
  - Interaction triple marginale

## Implications

- Adaptation des plantes du Québec au froid
- Sensibilité accrue du Mississippi
- Seuil critique à 350 mL/L

## Validation des hypothèses

- Hypothèses 1 et 2 confirmées
- Hypothèse 3 partiellement validée ( $p=0.055$ )

## Limitations

- Données de laboratoire
- Une seule espèce végétale
- Concentrations discrètes

## Pistes futures

- Étendre à d'autres espèces
- Mesures physiologiques complémentaires
- Études in situ
- Modélisation prédictive

# Merci pour votre attention !

Questions et discussions

## Code R utilisé

```
Vérification des hypothèses library(car)
leveneTest(uptake ~ Type*Treatment*conc, data = C02)
shapiro.test(residuals(model))
Analyses post-hoc library(emmeans) emmeans(model, pairwise
Type | Treatment) emmeans(model, pairwise ~ Type | conc)
emmip(model, Treatment ~ conc | Type, CIs = TRUE)
```



# Références bibliographiques



Maxwell, S. E., & Delaney, H. D. (2004). *Designing Experiments and Analyzing Data : A Model Comparison Perspective*. Lawrence Erlbaum Associates.



Lenth, R. V. (2021). *emmeans : Estimated Marginal Means, aka Least-Squares Means*. R package version 1.6.2-1.



R Core Team (2021). *R : A language and environment for statistical computing*. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria.



Cotton, P. A. (2003). *Analyse de variance à plusieurs facteurs*. Presses Universitaires de France.