Analyse de Variance et Tests d'hypothèses (Séance 3)

GSF-6053: Économétrie Financière

Simon-Pierre Boucher[1]

[1]Département de finance, assurance et immobilier
Faculté des sciences de l'administration
Université Laval

28 Janvier 2025

Références

Obligatoires:

- **Woolridge:** chapitres 2 à 7

Complémentaires:

- **Gujarati et Porter:** chapitres 1 à 9.
- **Greene:** chapitres 2, 3, 4, 5, 9, 14, 20, appendices C et D

Plan de la séance

- Analyse de Variance
- Coefficient de détermination (R^2)
- Coefficient de détermination ajusté (R^2 ajusté)
- Test d'hypothèse
- Les contraintes linéaires
- Test de Wald
- Ratio de vraisemblance (LR)
- Multiplicateur de Lagrange
- Lien entre les Statistiques F, WALD, LR et LM

Analyse de Variance

Coefficient de détermination (R^2)

Coefficient de détermination ajusté (R^2 ajusté)

Test d'hypothèse

Les contraintes linéaires

Test de Wald

Ratio de vraisemblance (LR)

Multiplicateur de Lagrange

Lien entre les Statistiques F, WALD, LR et LM

Analyse de Variance

- Variation dans la variable expliquée **(Y)**

$$Y_t = \hat{Y}_t + \hat{u}_t$$

- Composantes de la variation de **Y**
  - $\hat{Y}_t$ est la variation due à la partie expliquée
  - $\hat{u}_t$ est induite par la partie de **Y** non expliquée

Analyse de Variance

- Variation totale de **Y**

$$SS_{tot} = \sum_{t=1}^{T} (Y_t - \overline{Y})^2$$

- Variation partie expliquée de **Y**

$$SS_{reg} = \sum_{t=1}^{T} (\hat{Y}_t - \overline{Y})^2$$

- Variation non expliquée de **Y** ou Résidus

$$SS_{err} = \sum_{t=1}^{T} (Y_t - \hat{Y}_t)^2 = \sum_{t=1}^{T} \hat{u}_t^2$$

Analyse de Variance

- À l'aide des 3 dernières définitions, soit SS_{tot}, SS_{reg} et SS_{err}, nous allons maintenant prouver l'équation suivante:

$$SS_{tot} = SS_{reg} + SS_{err}$$

- On pose la définition de SS_{tot} qu'on sait déja:

$$SS_{tot} = \sum_{t=1}^{T} (Y_t - \overline{Y})^2$$

Sachant $Y_t = \hat{Y}_t + \hat{u}_t$

$$SS_{tot} = \sum_{t=1}^{T} (\hat{Y}_t + \hat{u}_t - \overline{Y})^2$$

Analyse de Variance

- Afin d'éliminer et de transformer certains termes, il nous faut distribuer les termes de notre parenthèse élevé au carré.

$$SS_{tot} = \sum_{t=1}^{T} (\hat{Y}_t + \hat{u}_t - \overline{Y}) \times (\hat{Y}_t + \hat{u}_t - \overline{Y})$$

$$= \sum_{t=1}^{T} \left[\hat{Y}_t^2 + \hat{Y}_t \hat{u}_t - \hat{Y}_t \overline{Y} + \hat{u}_t \hat{Y}_t + \hat{u}_t^2 - \hat{u}_t \overline{Y} - \overline{Y} \hat{Y}_t - \overline{Y} \hat{u}_t + \overline{Y}^2 \right]$$

Analyse de Variance

- Nous allons maintenant simplifier notre équation SS_{tot}, en utilisant l'identité remarquable.
  - Rappel: Si nous avons $(a^2 + 2ab + b^2)$, alors on peut écrire les 3 termes sous une forme polynomial $(a + b)^2$
- Dans le cas qui nous interesse, notre indentité remarquable sera composé de $\hat{Y}_t$ et $\overline{Y}$. On peut donc isoler, dans notre dernière équation les termes nécessaires:

$$SS_{tot} = \sum_{t=1}^{T} \left[(\hat{Y}_t^2 + \overline{Y}^2 - 2\hat{Y}_t\overline{Y}) + 2\hat{Y}_t\hat{u}_t + \hat{u}_t^2 - 2\hat{u}_t\overline{Y} \right]$$

Sachant que selon l'identité remarquable $(\hat{Y}_t^2 + \overline{Y}^2 - 2\hat{Y}_t\overline{Y}) = (\hat{Y}_t - \overline{Y})^2$

$$SS_{tot} = \sum_{t=1}^{T} \left[(\hat{Y}_t - \overline{Y})^2 + 2\hat{Y}_t\hat{u}_t + \hat{u}_t^2 - 2\hat{u}_t\overline{Y} \right]$$

Analyse de Variance

- On doit maintenant distribuer notre opérateur sommation à tous les termes de l'équation exprimant SS_{tot}.

$$SS_{tot} = \sum_{t=1}^{T}(\hat{Y}_t - \overline{Y})^2 + \sum_{t=1}^{T}\hat{u}_t^2 + 2\sum_{t=1}^{T}\hat{Y}_t\hat{u}_t - 2\overline{Y}\sum_{t=1}^{T}\hat{u}_t$$

  Sachant:
  - $SS_{reg} = \sum_{t=1}^{T}(\hat{Y}_t - \overline{Y})^2$
  - $SS_{err} = \sum_{t=1}^{T}\hat{u}_t^2$
- Alors on peut écrire l'équation exprimant SS_{tot} comme suit:

$$SS_{tot} = SS_{reg} + SS_{err} + 2\sum_{t=1}^{T}\hat{Y}_t\hat{u}_t - 2\overline{Y}\sum_{t=1}^{T}\hat{u}_t$$

Analyse de Variance

- Les résidus sont orthogonaux au sous-espace engendré par les colonnes de X

$$2\sum_{t=1}^{T}\hat{Y}_t\hat{u}_t = 0$$

- La somme des résidus est nulle

$$2\overline{Y}\sum_{t=1}^{T}\hat{u}_t = 0$$

- Avec les deux dernières propriétés on très bien que dans l'éuation du SS_{tot}, les deux derniers termes s'annulent:

$$SS_{tot} = SS_{reg} + SS_{err}$$

Coefficient de détermination (R^2)

- Indique le pouvoir explicatif de la régression
- Proportion des variations de Y expliquées par les régresseurs du modèle par rapport aux variations total.
- On peut donc exprimer le R^2 comme étant le ratio entre la somme des résidus au carrés et somme des variations total au carrés.

$$R^2 = \frac{SS_{reg}}{SS_{tot}} = 1 - \frac{SS_{err}}{SS_{tot}}$$

- On voit clairement que notre R^2 sera compris entre 0 et 1

$$0 \leq R^2 \leq 1$$

Coefficient de détermination ajusté (R^2 ajusté)

- Contrairement au R^2 standard, le R^2 ajusté vient pénélisé l'ajout de variables explicatives inutiles.
- $R^2 \rightarrow$ Si on ajoute un variable explicative à note modèle, il augmentera forcément
- R^2 ajusté $\rightarrow$ Si on ajoute un variable explicative à note modèle, il peut augmenté, mais si l'ajout de cette variable est inutile il pourra également diminuer.

Coefficient de détermination ajusté (R^2 ajusté)

- L'équation exprimant le R^2 ajusté contient comme pour le R^2, le SS_{err} et le SS_{tot}.
- Cependant afin de tenir compte du nombre de régresseurs ajoutés au modèle, on aura besoin de la constante k, étant le nombre de variable indépendantes.
- Nous aurons également besoin du nombres d'observation dans notre échantillons, représenté par n.

Coefficient de détermination ajusté (R^2 ajusté)

- **Équation exprimation le R^2 ajusté:**

$$R^2_{ADJ} = 1 - \frac{\left(\frac{SS_{err}}{n-k}\right)}{\left(\frac{SS_{tot}}{n-1}\right)}$$
$$= 1 - \frac{SS_{err}(n-1)}{SS_{tot}(n-k)}$$

Ou **k** représente le nombre de régresseurs

Coefficient de détermination ajusté (R^2 ajusté)

- On peut également montrer qu'il est possible d'exprimer le R^2 ajusté en fonction du R^2 standard
- Si $\frac{SS_{reg}}{SS_{tot}} = R^2$ alors $\frac{SS_{err}}{SS_{tot}} = 1 - R^2$ Comme montré ci-haut, le R^2 ajusté peut être exprimé comme suit:

$$R^2_{ADJ} = 1 - \frac{SS_{err}}{SS_{tot}} \times \frac{(n-1)}{n-k}$$

Sachant $\frac{SS_{err}}{SS_{tot}} = 1 - R^2$, on peut écrire à nouveau le R^2 ajusté en fonction du R^2

$$R^2_{ADJ} = 1 - (1 - R^2) \times \frac{(n-1)}{n-k}$$

Coefficient de détermination ajusté (R^2 ajusté)

Coefficient de détermination ajusté:

- Si nous avons uniquement 1 variables explicatives dans notre modèle, alors le R^2 sera égale au R^2_{ADJ}.
  - Dans ce cas, nous avons 1 régresseur, soit $k = 1$

$$
\begin{aligned}
R^2_{ADJ} &= 1 - (1 - R^2) \times \frac{(n-1)}{n-k} \\
&= 1 - (1 - R^2) \times \frac{(n-1)}{n-1} \\
&= 1 - (1 - R^2) \\
&= R^2
\end{aligned}
$$

Coefficient de détermination ajusté (R^2 ajusté)

Coefficient de détermination ajusté:

- Si nous avons uniquement plusieurs variables explicatives dans notre modèle, alors le R^2 sera plus grand ou égale au R^2_{ADJ}.
  - Dans ce cas, nous avons 2 régresseur et plus, soit $k \geq 2$
- S'il y a plusieurs variables explicatives alors

$$n - 1 > n - k$$

  De facon équivalente:

$$\frac{(n-1)}{n-k} > 1$$

- Le terme $\frac{(n-1)}{n-k}$ supérieurs à 1 est multiplié à ce qui n'est pas expliqué par le modèle $(1 - R^2)$

Ce qui nous permet d'affirmer:

$$R^2_{ADJ} \leq R^2 \textbf{ et } R^2_{ADJ} \leq 1$$

Test d'hypothèse

Un test d'hypothese sur les parametres d'un modele econometrique requiert les etapes suivantes:

- **Étape 1:**
  - Ecrire l'hypothese nulle (H_0) et l'alternative (H_1).
  - La plupart du temps, H_0 est l'hypothese que l'on veut rejeter.
  - Par exemple, qu'un parametre est non significatif ou egal a une certaine valeur.
  - L'hypothese alternative peut etre unilaterale ($<$ et $>$) ou bilaterale ($\neq$).

Test d'hypothèse

- **Étape 2:**
  - Definir la statistique de test (student, F, Wald, LR, LM etc..)
  - Determiner si possible, la distribution loi de cette statistique sous H_0.
- **Étape 3:**
  - Choisir le niveau de significativite du test α.
  - On fixe donc la possibilite d'erreur de type 1 soit la probabilite de rejeter H_0 lorsque celle-ci est vraie.
  - Generalement, on fixe le niveau a 5 % ou 1 % et plus rarement a 10 %.

Test d'hypothèse

- **Étape 4:**
  - Determiner la regle de decision du test avec la region critique de confiance CR_α.
  - La plupart du temps, cela demande de savoir la distribution de la statistique sous H_0.
  - Lorsque la valeur calculee pour la statistique de test se trouve dans la region critique: on rejette H_0 en faveur de H_1 au seuil de confiance α.
- **Étape 5:**
  - Utiliser les valeurs obtenues de la regression pour calculer la statistique de test.
- **Étape 6:**
  - Appliquer la regle de decision vue dans l'étape 4.

Test d'hypothèse

Note sur la p-value

- Parfois, on regarde la p-value au lieu de comparer CR_α a la valeur de la statistique.
- P-value : C'est le plus petit niveau auquel on petit rejeter l'hypothese nulle.
- En d'autres mots, c'est la probabilite d'avoir un evenement aussi extreme que celle observee en assumant que H_0 est vraie.
- Plus la p-value est faible, plus la probabilite que l'evenement observe soit faible, etant donne l'hypothese nulle.
  - plus il y a de chances que l'hypothese nulle est rejetee.

Test d'hypothèse

Test de significativité:

Significativité individuelle d'un paramètre

- On regarde si le régresseur est statistiquement non nul
- Utilise le test de student

Significativité conjointe des paramètres

- On regarde si au moins un des régresseurs est statistiquement non nul (un effet)
- Utilise le F-test

Test d'hypothèse

Test de Student:

Two-tailed test

- Hypothèse nulle est la non-significativité du coefficient de régression
- Hypothèses:
  - $H_0 : \beta_k = 0 \rightarrow$ **Hypothèse nule**
  - $H_1 : \beta_k \neq 0 \rightarrow$ **Hypothèse alternative**
- Règle de décision: Rejeter H_0 si:

$$t = \frac{\mid \hat{\beta}_k - \beta_0 \mid}{SE_{\hat{\beta}_k}} > t_{n-k,\alpha/2}$$

  - Ou β_0 est la valeur du coefficient sous l'hypothèse nulle, soit 0
  - $SE_{\hat{\beta}_k}$ est l'écart-type associé à l'estimation de $\hat{\beta}_k$

Test d'hypothèse

Test de Student:

Right-tailed test

- Hypothèses:
  - $H_0 : \beta_k \leq 0 \rightarrow$ **Hypothèse nule**
  - $H_1 : \beta_k > 0 \rightarrow$ **Hypothèse alternative**
- Règle de décision: Rejeter H_0 si:

$$t = \frac{\hat{\beta}_k - \beta_0}{SE_{\hat{\beta}_k}} > t_{n-k,\alpha}$$

  - Ou β_0 est la valeur du coefficient sous l'hypothèse nulle, soit 0
  - $SE_{\hat{\beta}_k}$ est l'écart-type associé à l'estimation de $\hat{\beta}_k$

Test d'hypothèse

Test de Student:

Left-tailed test

- Hypothèses:
  - $H_0 : \beta_k \geq 0 \rightarrow$ **Hypothèse nule**
  - $H_1 : \beta_k < 0 \rightarrow$ **Hypothèse alternative**
- Règle de décision: Rejeter H_0 si:

$$t = \frac{\hat{\beta}_k - \beta_0}{SE_{\hat{\beta}_k}} < -t_{n-k,\alpha}$$

  - Ou β_0 est la valeur du coefficient sous l'hypothèse nulle, soit 0
  - $SE_{\hat{\beta}_k}$ est l'écart-type associé à l'estimation de $\hat{\beta}_k$

Test d'hypothèse

F-test (significativité conjointe)

- Comparer la différence entre les résidus au carrés d'un modèle contraint et d'un modèle non contraint.
  - Si la différence est grande
  - Plus les résidus du modèle contraint sont grand par rapport au modèle contraint
  - Plus la contrainte coûte cher à appliquer en terme de performance
  - Plus la statistique F est grande
  - Passé un certain coût critique $\rightarrow$ rejette H_0

Test d'hypothèse

F-test (significativité conjointe)

Hypothèses:

- $H_0 : \beta_2 = \beta_3 = ... = \beta_k = 0$
- $H_1 : \beta_2 \neq 0$ et $\beta_3 \neq 0$ et ... et/ou $\beta_k \neq 0$

Statistique de test:

- Modèle non contraint $\rightarrow (\hat{u}'\hat{u})$
- Modèle contraint $\rightarrow (\hat{u}_0'\hat{u}_0)$

$$F = \frac{\hat{u}_0'\hat{u}_0 - \hat{u}'\hat{u}}{\hat{u}'\hat{u}} \times \frac{t-k}{q} \sim (q, t-k)$$

Test d'hypothèse

F-test (significativité conjointe)

Décision:

On rejette H_0 à un seuil de α si

$$F = \frac{\hat{u}_0'\hat{u}_0 - \hat{u}'\hat{u}}{\hat{u}'\hat{u}} \times \frac{t-k}{q} > F(q, t-k; \alpha)$$

Les contraintes linéaires

Format général:

$$H_0 : R\beta = r$$

- $R =$ matrice de sélection contenant une ligne pour chaque contrainte non redondante q
- Vecteur de réel constants

Les contraintes linéaires

- On cherche à maximiser notre log-vraisemblance afin de trouver une solution pour β, tout en respectant une contrainte linéaire.
- Il s'agit essentiellement d'une optimization sous contrainte à l'aide d'un multiplicateur de lagrange.
- On représente l'estimateur β obtenus avec la méthode des moindres carrés ordinaire est représenté par β^{OLS}.
- L'estimateur β obtenus sous une contrainte linéaire est représenté par β^{LC}

Les contraintes linéaires

- Nous voulons minimiser la somme des carrés des résidus, mais cette fois, nous posons la contrainte : $R\beta = r$
- Cela conduit à la fonction de Lagrange suivante:

$$\begin{aligned} L(\beta, \lambda) &= (Y - X\beta)'(Y - X\beta) + 2\lambda'(R\beta - r) \\ &= Y'Y - 2Y'X\beta + \beta'X'X\beta + 2\lambda'R\beta - 2\lambda'r \end{aligned}$$

- On dérive ensuite la fonction $L(\beta, \lambda)$ par rapport à β et λ

Les contraintes linéaires

- **Dérivé par rapport à** β

$$\frac{\partial L(\beta,\lambda)}{\partial \beta} = -2X'Y + 2X'X\beta + 2\lambda' R = 0$$

$$X'X\beta + R'\lambda = X'Y$$

- **Dérivé par rapport à** λ

$$\frac{\partial L(\beta,\lambda)}{\partial \lambda} = 2R\beta - 2r = 0$$

$$R\beta = r$$

Les contraintes linéaires

Format matricielle

- Équation 1:

$$X'X \times {\color{red}\beta} + R' \times {\color{red}\lambda} = X'Y$$

- Équation 2:

$$R \times {\color{red}\beta} + 0 \times {\color{red}\lambda} = r$$

Ce qui nous permet d'obtenir la représentation suivante:

$$\begin{bmatrix} X'X & R' \\ R & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} {\color{red}\beta} \\ {\color{red}\lambda} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} X'Y \\ r \end{bmatrix}$$

Les contraintes linéaires

- On peut ensuite obtenir une solution pour β et λ

$$\begin{bmatrix} \beta \\ \lambda \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} X'X & R' \\ R & 0 \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} X'Y \\ r \end{bmatrix}$$

- Pour obtenir une solution de β^{LC}, il nous suffit de trouver la solution pour β dans l'équation 1.

$$X'X\beta^{LC} + R'\lambda = X'Y$$

$$X'X\beta^{LC} = X'Y - R'\lambda$$

$$\beta^{LC} = (X'X)^{-1}X'Y - (X'X)^{-1}R'\lambda$$

Les contraintes linéaires

Estimateur sous contrainte linéaire (β^{LC})

$$\beta^{LC} = (X'X)^{-1}X'Y - (X'X)^{-1}R'\lambda$$

Estimateur OLS (β^{OLS})

$$\beta^{OLS} = (X'X)^{-1}X'Y$$

On voit donc facilement qu'il nous est possible d'exprimer l'estimateur β^{LC} en fonction de l'estimateur β^{OLS}

$$\beta^{LC} = \beta^{OLS} - (X'X)^{-1}R'\lambda$$

Les contraintes linéaires

- On doit également trouver une solution pour λ afin de pouvoir l'incorporer dans la solution de β^{LC}
- On commence par multiplier chaque coté l'équation de la solution de β^{LC} par R

$$R\beta^{LC} = R\beta^{OLS} - R(X'X)^{-1}R'\lambda$$

- On sait déja que $R\beta^{LC} = r$, étant donné la contrainte linéaire posée

$$r = R\beta^{OLS} - R(X'X)^{-1}R'\lambda$$

- Pour finalement isoler β^{OLS}

$$\lambda = (R(X'X)^{-1}R')^{-1}(R\beta^{OLS} - r)$$

Les contraintes linéaires

- On substitut la solution de λ dans l'équation de la solution de β^{LC}

$$\beta^{LC} = \beta^{OLS} - (X'X)^{-1}R'(R(X'X)^{-1}R')^{-1}(R\beta^{OLS} - r)$$

- On voit que β^{LC} (Contraint) est exprimé en fonction de β^{OLS} (Non-Contraint).
- Le test de Fisher (F-Test) est une spécification d'un contrainte linéaire.
  - Le modèle non-contraint est le modèle que nous souhaitons estimer et vérifier la significativité.
  - Le modèle contraint est simplement un modèle dans lequel nous allons contraindre tous les coefficients d'être égale à 0.

Les contraintes linéaires

Représentation du F-test sous le format de contrainte linéaire

- On suppose un modèle avec un intercept β_0 et une pente β_1.
- On cherche à tester une contrainte linéaire ayant le format $R\beta = r$
- La matrice R:

$$R = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}$$

- La matrice β:

$$\beta = \begin{bmatrix} \beta_0 \\ \beta_1 \end{bmatrix}$$

Les contraintes linéaires

Représentation du F-test sous le format de contrainte linéaire

- La matrice r

$$r = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \end{bmatrix}$$

- Ce qui nous donne la contrainte linéaire ($R\beta = r$) dans le cas du F-Test:

$$\begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \beta_0 \\ \beta_1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \end{bmatrix}$$

Les contraintes linéaires

- Nous regardons maintenant trois classes de tests qui peuvent être utilisées dans des contextes plus généraux:
  - Test d'hypothèse de restrictions non linéaires sur les paramètres
  - Test d'hypothèse sur la matrice de variance-covariance
  - Tests dans des modèles sans normalités des erreurs
- Les tests présentés sont
  - Multiplicateur de Lagrange (LM)
  - Test de Wald
  - Ratio de vraisemblance (LR)

Test de Wald

- Le test de Wald est une forme quadratique basé sur la distance entre $(R\beta - r)$ et zéro.
- C'est-à-dire si l'estimé non contraint vérifie la contrainte.
- On rejette l'hypothèse nulle si la statistique est suffisamment grande.

Hypothèses

- $H_0 : R\beta = r$
- $H_1 : R\beta \neq r$

Statistique W

$$W = (R\beta - r)'[V(R\beta - r)]^{-1}(R\beta - r)$$

Où $V(R\beta - r)$ est la variance entre les deux termes.

Test de Wald

Statistique W

- En décomposant la variance, on trouve une solution pour la statistique de Wald.

$$W = \frac{1}{\hat{\sigma}^2}(R\beta - r)'[R(X'X)^{-1}R']^{-1}(R\beta - r)$$

- Sous l'hypothèse nulle, W suit aussi une khi carré (q).
- Le Wald est intéressant, car tous les estimés nécessaires sont non contraints.
- On ne fait pas d'estimation contrainte, car on s'intéresse à savoir si le modèle non contraint rejette l'hypothèse nulle d'être assez prêt de la contrainte.

Ratio de vraisemblance (LR)

- **Intuition:** comparer la valeur de la vraisemblance aux maximum contraint et non contraint.
- Si ces deux valeurs sont proches l'une de l'autre, cela implique que la contrainte est aisément satisfaite par les observations et non couteuse en termes de maximisation de la vraisemblance.
- La vraissemblance du modèle non-contraint est représenté par $\hat{L}$, alors que la vraissemblance du modèle contraint est représenté par $\hat{L}_c$
- L'estimateur $\hat{L}$ sera une fonction des estimateurs $\hat{\beta}$ et $\hat{\sigma}^2$ du modèle non contraint $\rightarrow \hat{L}(\hat{\beta}, \hat{\sigma}^2)$
- L'estimateur $\hat{L}_c$ sera une fonction des estimateurs $\hat{\beta}_c$ et $\hat{\sigma}_c^2$ du modèle non contraint $\rightarrow \hat{L}_c(\hat{\beta}_c, \hat{\sigma}_c^2)$

Ratio de vraisemblance (LR)

- Afin de pouvoir simplifier la vraissemblance, nous poserons l'hypothèse de normalité des résidus.

$$
\begin{aligned}
\hat{L} &= -\frac{T}{2}\log(2\pi) - \frac{T}{2}\log(\hat{\sigma}^2) - \frac{1}{2} \times \frac{(Y - X\hat{\beta})'(Y - X\hat{\beta})}{\hat{\sigma}^2} \\
&= -\frac{T}{2}\log(2\pi) - \frac{T}{2}\log(\hat{\sigma}^2) - \frac{1}{2} \times \frac{\hat{u}'\hat{u}}{\hat{\sigma}^2} \\
&= -\frac{T}{2}\log(2\pi) - \frac{T}{2}\log(\hat{\sigma}^2) - \frac{1}{2} \times \frac{T\hat{\sigma}^2}{\hat{\sigma}^2} \\
&= -\frac{T}{2}\log(2\pi) - \frac{T}{2}\log(\hat{\sigma}^2) - \frac{T}{2}
\end{aligned}
$$

Ratio de vraisemblance (LR)

Vraissemblance du modèle non-contraint

$$\hat{L} = -\frac{T}{2}\log(2\pi) - \frac{T}{2}\log(\hat{\sigma}^2) - \frac{T}{2}$$

Vraissemblance du modèle contraint

$$\hat{L}_c = -\frac{T}{2}\log(2\pi) - \frac{T}{2}\log(\hat{\sigma}_c^2) - \frac{T}{2}$$

Ratio de vraisemblance (LR)

- On veut comparer la valeur de la vraisemblance $\hat{L}$ et $\hat{L}_c$
- La statistique LR s'écrit donc comme la différence entre les estimés contraints et non-contraints de σ^2

$$\begin{aligned}
LR &= 2[\hat{L} - \hat{L}_c] \\
&= 2\left[-\frac{T}{2}\log(2\pi) - \frac{T}{2}\log(\hat{\sigma}^2) - \frac{T}{2}\right] \\
&- 2\left[-\frac{T}{2}\log(2\pi) - \frac{T}{2}\log(\hat{\sigma}_c^2) - \frac{T}{2}\right] \\
&= T\log(\hat{\sigma}_c^2) - T\log(\hat{\sigma}^2) \\
&= T\log\left(\frac{\hat{\sigma}_c^2}{\hat{\sigma}^2}\right) = T\log\left(\frac{\hat{u}_c^{'}\hat{u}_c}{\hat{u}^{'}\hat{u}}\right)
\end{aligned}$$

- La statistique suit donc une loi Khi carré (q) asymptotiquement

Multiplicateur de Lagrange

- Il s'agit d'une régression auxiliaire.
- La statistique de test sera : $T \times R^2$
- Cette statistique suit alors une khi-carré avec q degré de liberté.
- Intuition de ce test : vérifier si le score (la dérivé première du Lagrangien en fonction des paramètres) est proche de zéro évalué en $\hat{\beta}_c$.
- Si oui, la contrainte n'est pas très couteuse en termes d'optimisation et il est probable que les paramètres prennent les valeurs définies par l'hypothèse nulle.

Multiplicateur de Lagrange

Statistique LM

$$LM = \left[\frac{\partial L}{\partial \beta}(\hat{\beta}_c)\right]' \left[V\frac{\partial L}{\partial \beta}(\hat{\beta}_c)\right]^{-1} \left[\frac{\partial L}{\partial \beta}(\hat{\beta}_c)\right]$$

En effectuant les dérivés premières et quelques manipulations, on obtient la solution pour la statistique LM.

$$LM = \frac{1}{\sigma^2}(\hat{\beta} - \hat{\beta}_c)'R'CR(\hat{\beta} - \hat{\beta}_c)$$

Multiplicateur de Lagrange

Statistique LM

- On peut aussi réécrire cette statistique comme une fonction des résidus contraints et non contraints.

$$LM = \frac{\hat{u}_c^{'}\hat{u}_c - \hat{u}^{'}\hat{u}}{\frac{\hat{u}_c^{'}\hat{u}_c}{T}}$$

- Cette statistique suit une loi Chi carré avec q degré de liberté asymptotiquement sous l'hypothèse nulle.
- Le LM exploite le fait que la maximisation du log vraisemblance sous la contrainte de l'hypothèse nulle revient à maximiser sans contrainte la fonction Lagrangienne associée.
- Le test est alors basé sur le fait que si la contrainte sous H_0 est respectée par les données, le vecteur de Lagrange devrait être nul.

Lien entre les Statistiques F, WALD, LR et LM

- Toutes ces statistiques se calculent à partir de la somme des résidus au carré.
- Il est possible d'exprimer les trois statistiques présentées comme une transformation de la statistique F dans le cas de contraintes linéaires et du modèle linéaire simple.

Statistique F

$$F = \frac{\hat{u}_0'\hat{u}_0 - \hat{u}'\hat{u}}{\hat{u}'\hat{u}} \times \frac{t-k}{q} > F(q, t-k; \alpha)$$

- On rejette H_0 si la statistique de test est plus grande que le point critique associé

Lien entre les Statistiques F, WALD, LR et LM

- **Statistique Wald**

$$Wald = T\frac{\hat{u}_c'\hat{u}_c - \hat{u}'\hat{u}}{\hat{u}'\hat{u}} = \frac{Tq}{T-K}F$$

- **Statistique LR**

$$LR = T\log\left[\frac{\hat{u}_c'\hat{u}_c}{\hat{u}'\hat{u}}\right] = T\log\left[F\frac{q}{T-K} + 1\right]$$

- **Statistique LM**

$$LM = \frac{\hat{u}_c'\hat{u}_c - \hat{u}'\hat{u}}{\frac{\hat{u}_c'\hat{u}_c}{T}} = \frac{T}{\left[\frac{1}{F}\right]\left[\frac{T-K}{q}\right] + 1}$$

Lien entre les Statistiques F, WALD, LR et LM

- Rejette si la statistique de test est plus grande que le point critique d'une Chi-carré avec q degrés de liberté.
- Bien que toutes ses statistiques soient maintenant exprimées en fonction des résidus contraints et non contraints, elles ne donnent pas la même valeur.
- L'inférence pourrait donc potentiellement être différente.