

**EXEMPLE QUI ILLUSTRE LE COURS  
« CHOIX DU MODÈLE »**

FRÉDÉRIC BERTRAND & MYRIAM MAUMY-BERTRAND

*Nous allons traiter cet exemple issu du livre « Analyse de régression appliquée » de Yadolah Dodge, Édition Dunod.*

Pour illustrer la procédure exhaustive, considérons les données du tableau suivant relatives dans les quartiers de Chicago, où *FIRE* correspond aux nombres d'incendies pour 1 000 ménages par quartier  $i$  de Chicago en 1975. La variable  $Y$  correspond au logarithme de *FIRE* et  $X_1$ ,  $X_2$  et  $X_3$  correspondent respectivement à la proportion d'habitations construites avant 1940, au nombre de vols et au revenu médian pour le quartier  $i$ .

Quartier $i$	$FIRE$	$X_1$ $x_{i1}$	$X_2$ $x_{i2}$	$X_3$ $x_{i3}$	$Y$ $y_i$
1	6, 2	0, 604	29	11, 744	1, 825
2	9, 5	0, 765	44	9, 323	2, 251
3	10, 5	0, 735	36	9, 948	2, 351
4	7, 7	0, 669	37	10, 656	2, 041
5	8, 6	0, 814	53	9, 730	2, 152
6	34, 1	0, 526	68	8, 231	3, 529
7	11, 0	0, 426	75	21, 480	2, 398
8	6, 9	0, 735	18	11, 104	1, 932
9	7, 3	0, 901	31	10, 694	1, 988
10	15, 1	0, 898	25	9, 631	2, 715
11	29, 1	0, 827	34	7, 995	3, 371
12	2, 2	0, 402	14	13, 722	0, 788
13	5, 7	0, 279	11	16, 250	1, 740
14	2, 0	0, 077	11	13, 686	0, 693
15	2, 5	0, 638	22	12, 405	0, 916
16	7, 7	0, 669	37	10, 656	2, 041
17	8, 6	0, 814	53	9, 730	2, 152
18	34, 1	0, 526	68	8, 231	3, 529
19	11, 0	0, 426	75	21, 480	2, 398
20	6, 9	0, 735	18	11, 104	1, 932
21	7, 3	0, 901	31	10, 694	1, 988
22	15, 1	0, 898	25	9, 631	2, 715
23	29, 1	0, 827	34	7, 995	3, 371
24	2, 2	0, 402	14	13, 722	0, 788
25	18, 5	0, 783	22	8, 014	2, 918
26	23, 3	0, 790	29	8, 177	3, 148
27	12, 2	0, 480	46	8, 212	2, 501
28	5, 6	0, 715	23	11, 230	1, 723
29	21, 8	0, 731	4	8, 330	3, 082
30	21, 6	0, 650	31	5, 583	3, 073
31	9, 0	0, 754	39	8, 564	2, 197
32	3, 6	0, 208	15	12, 102	1, 281
33	5, 0	0, 618	32	11, 876	1, 609
34	28, 6	0, 781	27	9, 742	3, 353
35	17, 4	0, 686	32	7, 520	2, 856
36	11, 3	0, 734	34	7, 388	2, 425
37	3, 4	0, 020	17	13, 842	1, 224
38	11, 9	0, 570	46	11, 040	2, 477
39	10, 5	0, 559	42	10, 332	2, 351
40	10, 7	0, 675	43	10, 908	2, 370
41	10, 8	0, 580	34	11, 156	2, 380
42	4, 8	0, 152	19	13, 323	1, 569
43	10, 4	0, 408	25	12, 960	2, 342
44	15, 6	0, 578	28	11, 260	2, 747
45	7, 0	0, 144	3	10, 080	1, 946
46	7, 1	0, 492	23	11, 428	1, 960
47	4, 9	0, 466	27	13, 731	1, 589

### Indications de choix de modèle

Comme il y a trois variables explicatives ( $X_1$ ,  $X_2$  et  $X_3$ ), nous avons  $2^3 = 8$  modèles possibles. Appliquons à présent la procédure présentée dans le cours.

Répartissons pour cela ces huit équations en quatre ensembles :

- **Premier ensemble : l'ensemble A.** Il contient l'unique équation sans variable explicative, c'est-à-dire :

$$Y = \beta_0 + \varepsilon.$$

- **Deuxième ensemble : l'ensemble B.** Il contient les trois équations avec une seule variable explicative, c'est-à-dire :

$$Y = \beta_0 + \beta_1 X_1 + \varepsilon$$

$$Y = \beta_0 + \beta_2 X_2 + \varepsilon$$

$$Y = \beta_0 + \beta_3 X_3 + \varepsilon.$$

- **Troisième ensemble : l'ensemble C.** Il contient les trois équations avec deux variables explicatives, c'est-à-dire :

$$Y = \beta_0 + \beta_1 X_1 + \beta_2 X_2 + \varepsilon$$

$$Y = \beta_0 + \beta_1 X_1 + \beta_3 X_3 + \varepsilon$$

$$Y = \beta_0 + \beta_2 X_2 + \beta_3 X_3 + \varepsilon.$$

- **Quatrième ensemble : l'ensemble D.** Il contient l'unique équation avec trois variables explicatives, c'est-à-dire le modèle complet :

$$Y = \beta_0 + \beta_1 X_1 + \beta_2 X_2 + \beta_3 X_3 + \varepsilon.$$

### Critère du coefficient de détermination multiple $R^2$

Ordonnons les équations à l'intérieur des ensembles B et C selon la valeur du coefficient de détermination multiple  $R^2$ .

1. Ensemble B :

$$Y = \beta_0 + \beta_2 X_2 + \varepsilon \quad R^2 = 19, 38\%$$

$$Y = \beta_0 + \beta_3 X_3 + \varepsilon \quad R^2 = 25, 83\%$$

$$Y = \beta_0 + \beta_1 X_1 + \varepsilon \quad R^2 = 26, 23\%.$$

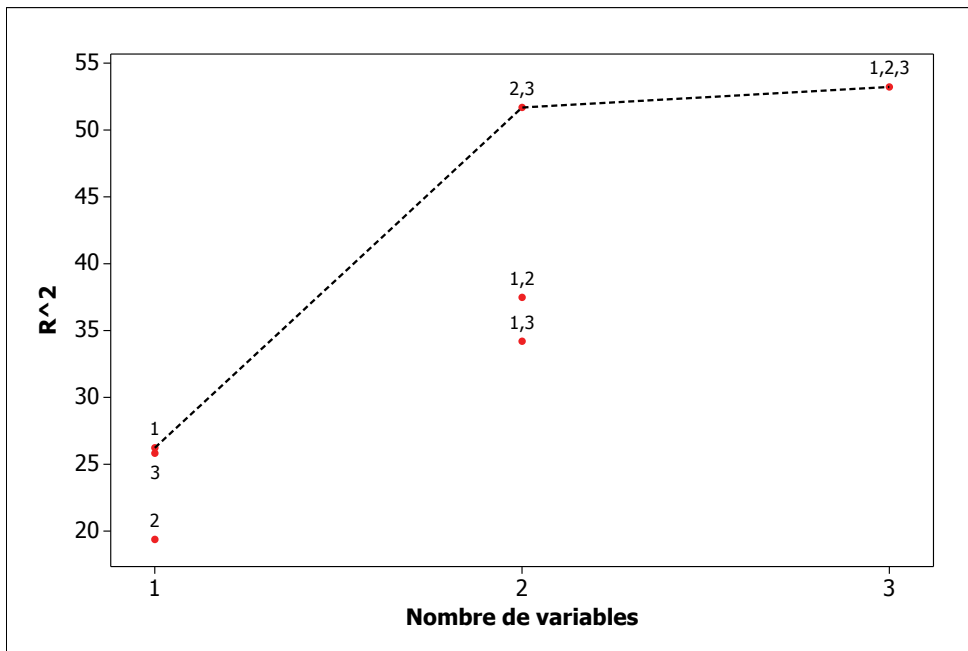
2. Ensemble C :

$$Y = \beta_0 + \beta_1 X_1 + \beta_3 X_3 + \varepsilon \quad R^2 = 34, 20\%$$

$$Y = \beta_0 + \beta_1 X_1 + \beta_2 X_2 + \varepsilon \quad R^2 = 37, 48\%$$

$$Y = \beta_0 + \beta_2 X_2 + \beta_3 X_3 + \varepsilon \quad R^2 = 51, 68\%.$$

Notons en outre que pour le modèle complet, nous avons un coefficient de détermination multiple  $R^2 = 53, 22\%$  (alors que pour le modèle constant, nous avons évidemment un coefficient de détermination multiple  $R^2 = 0\%$ ). L'introduction de la seule variable  $X_1$  permet d'obtenir un coefficient de détermination multiple  $R^2 = 26, 23\%$ . Par ailleurs, le fait d'avoir dans le modèle

FIGURE 1. Graphique des  $R^2$ 

simultanément  $X_2$  et  $X_3$  nous donne un coefficient de détermination multiple  $R^2 = 51,68\%$  proche du coefficient de détermination multiple  $R^2$  du modèle complet. L'introduction supplémentaire de  $X_1$  ne permet donc pas au coefficient de détermination multiple  $R^2$  de s'améliorer notablement puisque le coefficient de détermination multiple  $R^2$  passe seulement de  $51,68\%$  à  $53,22\%$ . Par conséquent, l'ajout de la variable  $X_1$  quand  $X_2$  et  $X_3$  sont déjà incluses dans l'équation de régression n'améliore guère le modèle. Ceci est illustré par la figure ci-dessous où le nombre de variables  $p$  est représenté en abscisse et la valeur du coefficient de détermination multiple  $R^2$  en ordonnée. Les points représentent le modèle. Les chiffres à côté de chaque point correspondent aux variables incluses dans le modèle. Cette approche graphique est pratique pour visualiser les résultats.

En observant la position des points sur le graphique 1, nous remarquons que le modèle à une variable explicative ( $p = 1$ ) qui explique le mieux  $Y$ , est le modèle :

$$Y = \beta_0 + \beta_1 X_1.$$

L'introduction de  $X_2$  dans le modèle comprenant déjà  $X_1$  entraîne une hausse du coefficient de détermination multiple  $R^2$  pour l'amener à  $37,48\%$  mais celui-ci n'est pas le plus élevé puisque le modèle qui a le coefficient de détermination multiple  $R^2$  le plus élevé est le modèle où il y a les variables  $X_2$

et  $X_3$ . Ce gain s'exprime sur le graphe par une pente élevée pour la droite en pointillé entre le modèle symbolisé par **1** (pour  $X_1$ ) et celui symbolisé par **23** (pour  $X_2$  et  $X_3$ ). Le passage du modèle **23** au modèle complet symbolisé par **123** n'apporte pratiquement aucune contribution supplémentaire au coefficient de détermination multiple  $R^2$ . En effet, la droite entre **23** et **123** présente une pente relativement faible.

Par conséquent, en se basant sur le critère du coefficient de détermination multiple  $R^2$ , l'équation comprenant les variables  $X_2$  et  $X_3$  s'avère être la meilleure, compte tenu de l'ensemble des variables considérées.

### Critère du $R^2$ ajusté

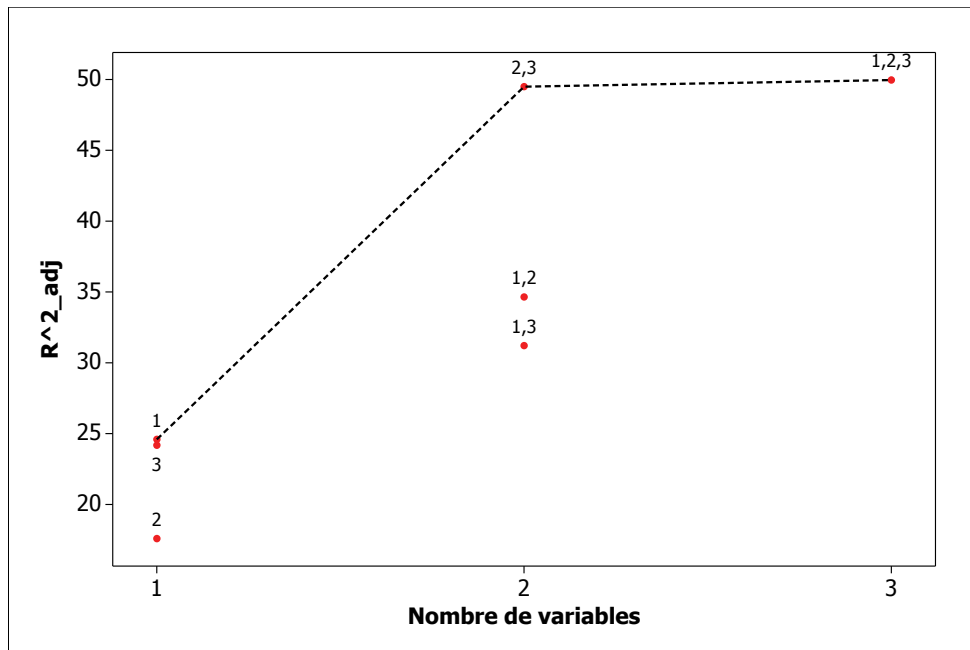
Le tableau ci-dessous donne le coefficient de détermination multiple  $R^2$  et le coefficient de détermination multiple ajusté  $R^2$  pour tous les modèles possibles (les modèles sont symbolisés de la même manière que ci-dessus)

Tableau présentant le  $R^2$  et le  $R^2$  ajusté.

Modèle	$R^2$	$R_{aj}^2$
<b>1</b>	0.2623	0.2459
<b>3</b>	0.2583	0.2418
<b>2</b>	0.1938	0.1759
<b>23</b>	0.5168	0.4949
<b>12</b>	0.3748	0.3464
<b>13</b>	0.3420	0.3121
<b>123</b>	0.5322	0.4996

Pour chaque modèle, nous remarquons que la valeur du coefficient de détermination multiple ajusté  $R_{aj}^2$  ne diffère que faiblement de celle du coefficient de détermination multiple  $R^2$ . De plus, nous constatons que le passage d'une équation comprenant un seul terme explicatif à une équation en comprenant deux, entraîne un accroissement non négligeable de la valeur de  $R_{aj}^2$ . En appliquant strictement le critère du  $R_{aj}^2$ , nous sommes orientés vers le modèle complet pour lequel nous avons un  $R_{aj}^2$  maximal de 49,96%.

Nous résumons ces informations dans le graphique 2.

FIGURE 2. Graphique des  $R^2$  ajustés

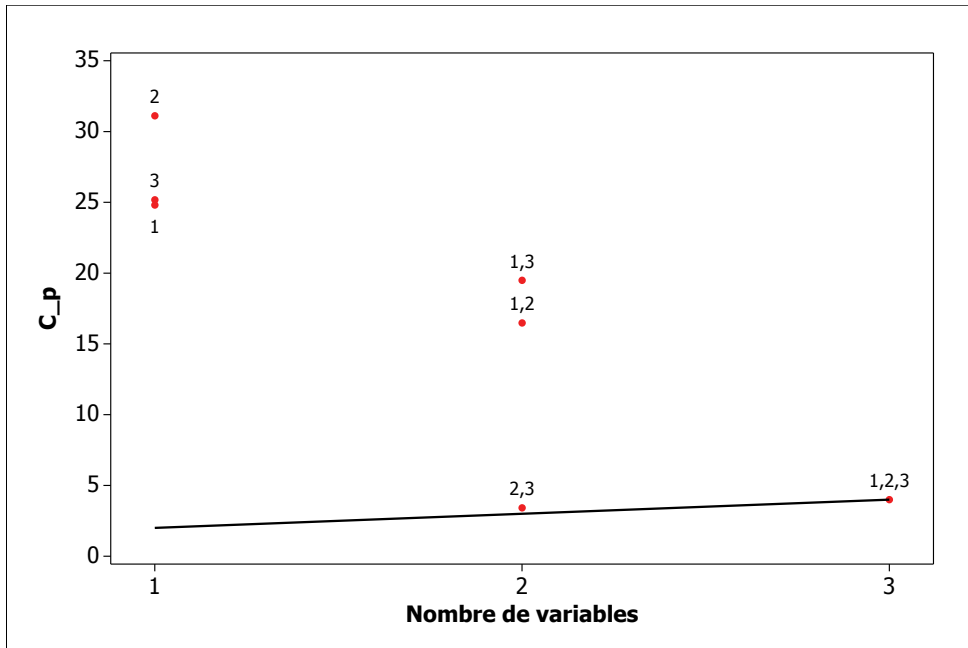
### Critère du $C_p$ de Mallows

Le troisième critère, le  $C_p$  de Mallows, permet de sélectionner la meilleure équation en fonction du biais du modèle. On a le tableau suivant :

Tableau présentant le  $R^2$ , le  $R^2$  ajusté et le  $C_p$  de Mallows.

Modèle	$R^2$	$R^2_{aj}$	$C_p$
<b>1</b>	0.2623	0.2459	24,8118
<b>3</b>	0.2583	0.2418	25,1799
<b>2</b>	0.1938	0.1759	31,1135
<b>23</b>	0.5168	0.4949	3,4171
<b>12</b>	0.3748	0.3464	16,4750
<b>13</b>	0.3420	0.3121	19,4891
<b>123</b>	0.5322	0.4996	4,000

Dans un modèle comprenant une seule variable explicative, deux paramètres sont à estimer. De ce fait  $C_p$  devrait approcher la valeur de  $p = 2$  ce qui n'est pas le cas dans notre exemple. Un modèle comprenant deux variables explicatives devrait restituer un  $C_p$  proche de 3. En se référant au tableau ci-dessus, nous obtenons une valeur proche de 3 pour le modèle symbolisé par **23**. La valeur de  $C_p = 4$  obtenue pour le

FIGURE 3. Graphique des  $C_p$ 

modèle complet n'est pas intéressante puisque le critère de sélection associé au  $C_p$  ne s'applique pas au modèle complet. Nous traçons alors sur un même graphique, le graphique 3, la droite  $C_p = p$  et les différentes valeurs de  $C_p$  obtenues pour les modèles **1**, **2**, **3**, **12**, **13**, **23** et **123**. Nous remarquons alors que le modèle sélectionné par le critère du  $C_p$  est le modèle **23**.