

Chapitre 4

Applications et simulations à l'énergie photovoltaïque

Sommaire

4.1 Ensemble de données utiles	43
4.2 Etude prévisionnelle de la centrale photovoltaïque	44
4.2.1 Régression linéaire par la méthode des moindres carrés	45
4.2.2 Prévion par le modèle ARMAX	52
4.2.3 Comparaison et interprétation des résultats	57

4.1 Ensemble de données utiles

Les données sur lesquelles reposent nos études sont les suivantes :

la série temporelle du rayonnement solaire global notée *IRA* exprimé en Watts par mètre carré ($W.m^{-2}$) qui représente l'évolution du rayonnement solaire sur une période allant du 07h 30mn à 18h 30mn avec un pas de temps de 15 (900 secondes) minutes .

Donc, la série comportera 45 observations ; la série temporelle de production d'électricité photovoltaïque correspondante s'exprimant en Volts (V) notée *PV*, qui représente l'évolution de la production d'électricité photovoltaïque sur une période allant du 07h 30mn à 18h 30mn avec un pas de temps de 15 minutes (900 secondes).

La série comportera également 45 observations.

La source de données est le résultats obtenues en une journée de la météorologie Malagasy le 15 Avril 2016.

Quart d'heure	07:30:00	07:45:00	08:00:00	08:15:00	08:30:00	08:45:00	09:00:00	09:15:00	09:30:00	09:45:00	10:00:00	10:15:00	10:30:00
Valeurs réelles de rayonnement	131,65	158,14	284,62	349,06	439,14	259,80	586,57	623,21	681,11	788,83	761,28	814,45	874,90
Valeurs réelles de production	1,30	2,30	3,50	5,10	6,30	3,70	9,00	9,70	10,70	11,50	12,00	13,30	13,80
Quart d'heure	10:45:00	11:00:00	11:15:00	11:30:00	11:45:00	12:00:00	12:15:00	12:30:00	12:45:00	13:00:00	13:15:00	13:30:00	13:45:00
Valeurs réelles de rayonnement	901,35	982,80	944,07	972,34	993,61	1011,97	1025,15	1035,42	1415,51	926,71	701,38	704,38	644,48
Valeurs réelles de production	14,30	14,80	15,10	15,14	15,70	16,10	16,30	16,60	17,80	14,70	11,00	11,00	10,00
Quart d'heure	14:00:00	14:15:00	14:30:00	14:45:00	15:00:00	15:15:00	15:30:00	15:45:00	16:00:00	16:15:00	16:30:00	16:45:00	17:00:00
Valeurs réelles de rayonnement	1045,24	957,07	955,70	971,61	868,81	893,17	781,64	883,45	846,45	740,92	688,02	636,39	562,30
Valeurs réelles de production	16,40	15,10	15,80	15,70	13,70	14,10	12,40	13,30	13,30	11,60	16,60	9,90	8,70
Quart d'heure	17:15:00	17:30:00	17:45:00	18:00:00	18:15:00	18:30:00							
Valeurs réelles de rayonnement	482,68	413,05	327,52	245,62	167,45	133,90							
Valeurs réelles de production	6,90	6,20	4,50	3,50	2,20	1,60							

4.2 Etude prévisionnelle de la centrale photovoltaïque

Nous allons illustrer dans ce chapitre une étude prévisionniste de production électrique de centrales photovoltaïques. Et avant de commencer l'application, les packages du logiciel R suivants doivent être installés : " caschnono, car, chrono, des, forecast ".

L'objectif visé ici porte sur l'étude de la dépendance de la production d'électricité de type photovoltaïque sur la variable décrivant l'irradiation solaire. La série IRA représente l'évolution d'irradiation sur une période de (11 heures (allant du 07 h 30 mn jusqu'au 18 h 30 mn) avec un pas de temps de 15 minutes, soit 900 secondes). Donc, la série étudiée comportera 45 observations. La série PV représente l'évolution de la production électrique photovoltaïque sur la même période (11 heures (allant du 07 h 30 mn jusqu'au 18 h 30 mn)) avec un pas de temps de 15 minutes, soit 900 secondes.

Les scripts ci-dessous donnent respectivement les graphiques de la série temporelle des valeurs du rayonnement solaire et celle de la production photovoltaïque entre 07 h 30 mn jusqu'au 18 h 30 mn (soit pendant 39600 secondes) :

```
> IRA<-c(131.65,158.14,284.62,349.06,439.14,259.8,586.57,623.21,681.11,788.83,761.28,814.45,874.90,901.35,982.80,944.07,972.34,993.61,1011.97,1025.15,1035.42,1415.51,926.71,701.38,704.38,644.48,1045.24,957.07,955.70,971.61,868.81,893.17,781.64,883.45,846.45,740.92,688.02,636.39,562.30,482.68,413.05,327.52,245.62,167.45,133.90)
> Rayonnement <- ts(data = IRA, start = 0, end = 39600, frequency = 1/900)
> PV<-c(1.3,2.3,3.5,5.1,6.3,3.7,9.9,9.7,10.7,11.5,12.13,13.3,13.8,14.3,14.8,15.1,15.14,15.7,16.1,16.3,16.6,17.8,14.7,11,11,10,16.4,15.1,15.8,15.7,13.7,14.1,12.4,13.3,13.3,11.6,10.6,9.9,8.7,6.9,6.2,4.5,3.5,2.2,1.6)
> Electricité <- ts(data = PV, start = 0, end = 39600, frequency = 1/900)
> plot(Rayonnement,col="red")
> plot(Electricité,col="blue")
```

FIGURE 4.1 – Script des allures des deux séries

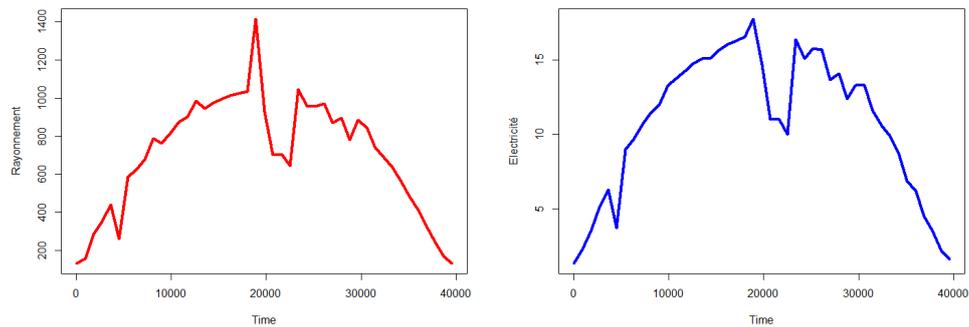


FIGURE 4.2 – Allures du rayonnement et de l'électricité

Les graphiques montrent que les deux séries ont presque la même allure, ce qui montre l'influence du rayonnement solaire sur la production d'électricité photovoltaïque.

4.2.1 Régression linéaire par la méthode des moindres carrés

Nous allons constater à partir de la commande suivante le nuage de points de la production de l'électricité photovoltaïque en fonction du rayonnement solaire.

```
> plot(IRA,PV,pch=1,cex=3,lwd=2,col="red")
```

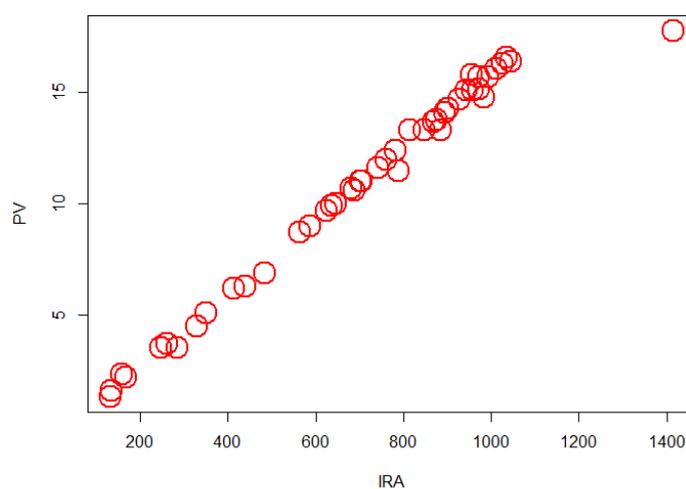


FIGURE 4.3 – Nuage de points de la production électrique en fonction du rayonnement solaire

Interprétation

D'après le graphe de nuage de point de la figure qui suit, on constate intuitivement une forte corrélation entre la production d'électricité et le rayonnement solaire. Nous allons modéliser cette corrélation par un modèle linéaire de la forme :

$$PV_t = a + b * IRA_t + \mu_t \quad (4.1)$$

Estimation des paramètres du modèle

L'estimation des paramètres du modèle est basée sur la méthode des moindres carrés ordinaires (MCO), elle est obtenue par la fonction `lm()` fournit par le logiciel R.

Les résultats de l'estimation sont :

```
> lm(formula = Electricité ~ Rayonnement)

Call:
lm(formula = Electricité ~ Rayonnement)

Coefficients:
(Intercept) Rayonnement
  -0.21020    0.01568
```

Interprétation

La sortie R ci-dessus fournit les estimations par moindres carrés de a et de b. On trouve dans le cas ci-dessus $a = -0.21020$ et $b = 0.01568$.

En portant les résultats obtenus dans l'équation ci-dessus, le modèle de régression s'écrit comme suit :

$$PV_t = -0.21020 + 0.01568 * IRA_t + \mu_t \quad (4.2)$$

Test des résidus*-Graphiques des résidus*

La commande suivante permet d'illustrer les graphiques de la moyenne des résidus

```
> modE = lm(Electricité~Rayonnement)
> μ = ts(residuals(modE), start = 0, end = 39600, frequency = 1/900)
```

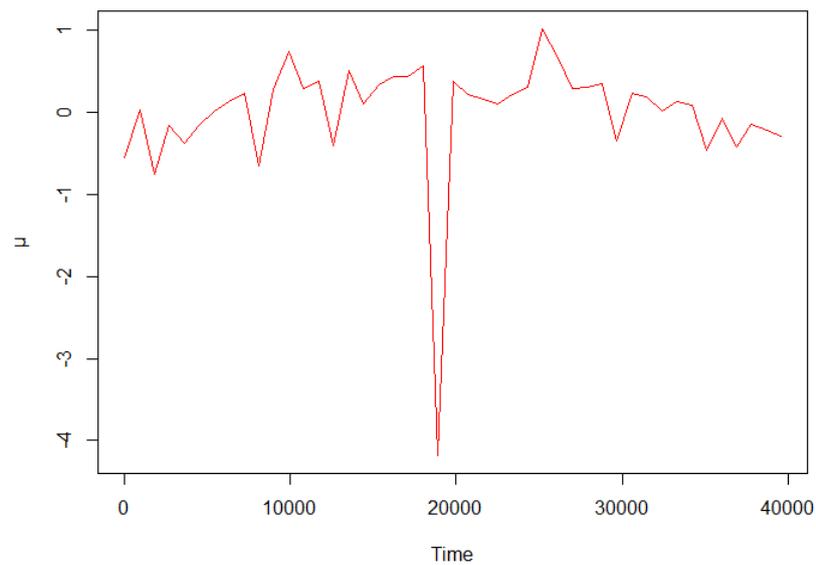


FIGURE 4.4 – Graphique des résidus

Le calcul de la moyenne des résidus s'obtient par la commande suivante

```
> moyen = mean(μ)
> moyen
[1] -6.283554e-18
```

Interprétation

Nous déduisons de la représentation graphique des résidus ci-dessus ainsi que les résultats fournis par le logiciel R que les résidus sont centrés.

-lag plot des résidus

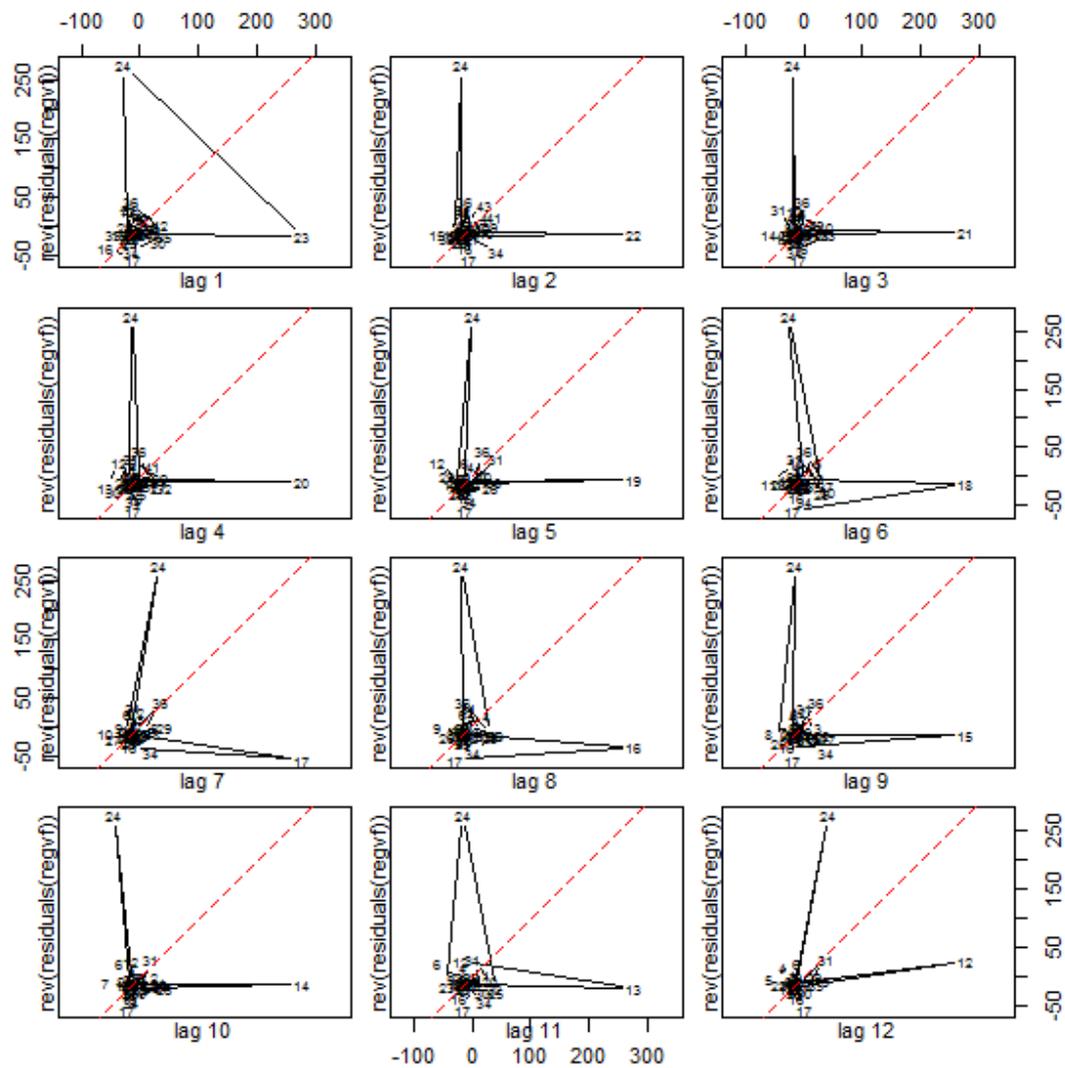


FIGURE 4.5 – Lag plot des résidus

Interprétation

Les résidus montrent une forte corrélation aux différents retards de 1 jusqu'à 12, donc la présupposée P3 (la non corrélation des résidus) ne tient pas mais nous poursuivons la démarche de régression comme si tous les présupposées étaient vérifiées.

-Test de normalité des résidus

La commande suivante fournit le Q-Q plot de normalité des résidus.

```
> plot(modRE,which = 2, col = "red")
```

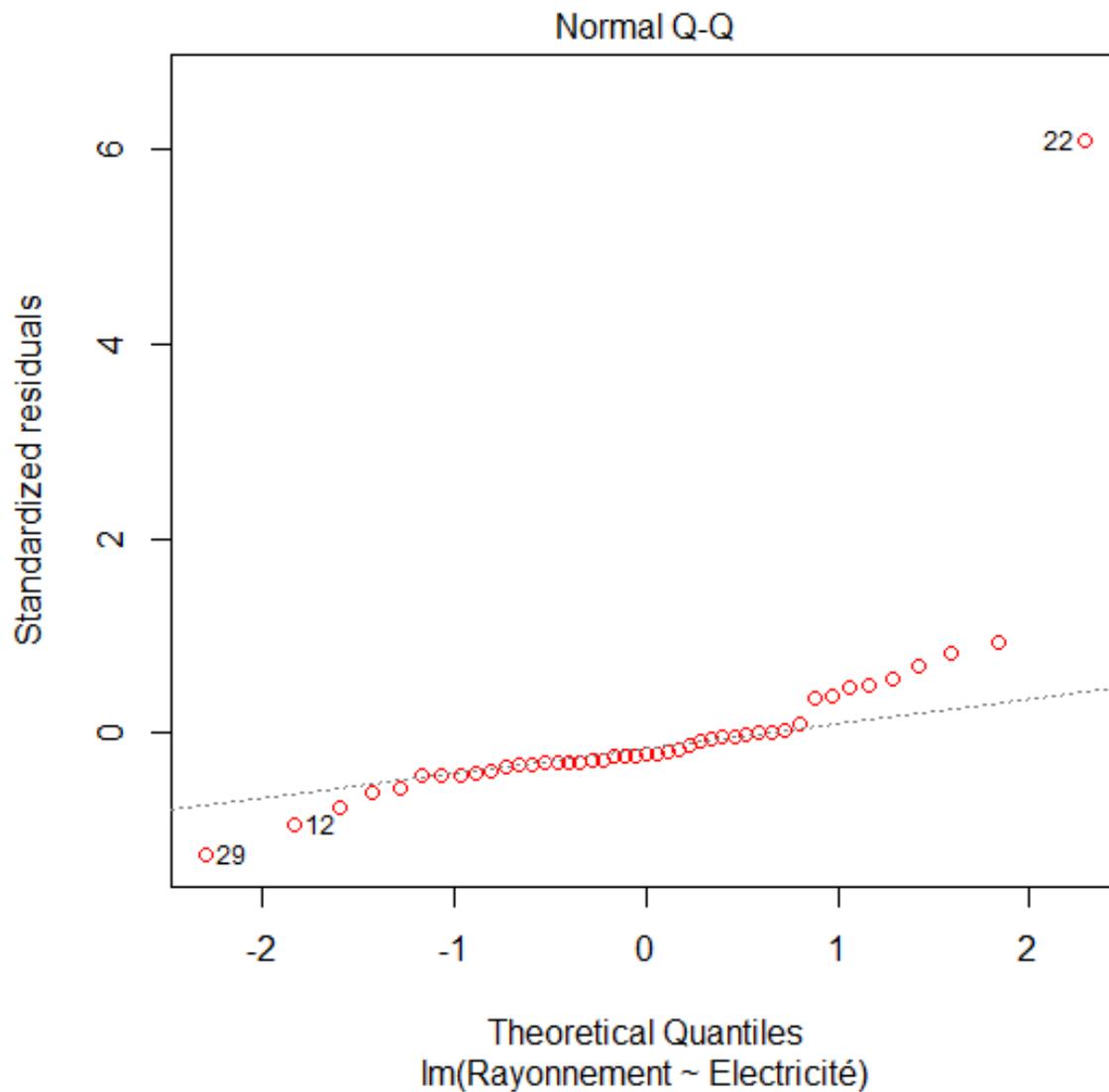


FIGURE 4.6 – Q-Q plot de normalité

Interprétation

La représentation Q-Q plot nous indique qu'effectivement les résidus sont distribués normalement.

-Significativité du modèle

Rappelons que la forme générale du modèle s'écrit comme suit :

$$PV_t = a + b * IRA_t + \mu_t$$

Les résultats de l'estimation des paramètres du modèle sont donnés par la commande qui suit

```

> modRE = lm(formula = Electricité ~ Rayonnement)
> summary(modRE)

Call:
lm(formula = Electricité ~ Rayonnement)

Residuals:
    Min       1Q   Median       3Q      Max
-4.1854 -0.1635  0.1381  0.3051  1.0246

Coefficients:
            Estimate Std. Error t value Pr(>|t|)
(Intercept) -0.2101960  0.2851638  -0.737   0.465
Rayonnement  0.0156803  0.0003735  41.985 <2e-16 ***
---
Signif. codes:  0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1

Residual standard error: 0.7494 on 43 degrees of freedom
Multiple R-squared:  0.9762, Adjusted R-squared:  0.9756
F-statistic: 1763 on 1 and 43 DF, p-value: < 2.2e-16

```

Interprétation

La description des différentes informations contenues dans la sortie est interprétée ci-dessous.

Call : un rappel de la formule utilisée dans le modèle.

Residuals : une analyse descriptive des résidus

Coefficients : ce tableau comprend quatre colonnes :

- Estimate correspond aux estimations des paramètres de la droite de régression ;
- Std. Error correspond à l'estimation de l'écart type des estimateurs de la droite de régression ;
- t value correspond à la réalisation de la statistique du test de Student associé aux hypothèses H_0 et H_1 ;
- $\Pr(>|t|)$ correspond à la valeur-p du test de Student.

Signif. codes : symboles de niveau de significativité.

Residual standard error : une estimation de l'écart type du bruit est fournie ainsi que le degré de liberté associé.

Multiple R-squared : valeur du coefficient de détermination (pourcentage de variance expliqué par la régression).

Adjusted R-squared : R^2 ajusté (qui n'a pas grand intérêt en régression linéaire simple).

F-statistic : correspond à la réalisation du test de Fisher associé aux hypothèses H_0 et H_1 . Nous y trouvons les degrés de liberté associés ainsi que la valeur-p.

Significativité des paramètres

De plus le coefficient de détermination $R^2 = 0,97$ donc le modèle est significatif, on peut l'écrire comme suit :

$$PV_t = -0.21020 + 0.01568 * IRA_t + \mu_t \quad (4.3)$$

qui est le modèle de prévision.

Prévision

A partir de l'équation ci-dessus, nous allons faire des prévisions à court terme pour 11 heures.

Le tableau suivant représente les valeurs réelles et prédites de la production électrique photovoltaïque par la méthode des moindres carrés ordinaires, ainsi que les écarts relatifs.

La première colonne donne les temps d'observation au pas de quart d'heure (soit 900 secondes) ;

La seconde colonne présente les valeurs réelles du rayonnement solaire exprimé en W/m^2 ;

La troisième et quatrième colonne montrent respectivement les valeurs de prédiction et les données réelles en Volts de la production électrique.

La dernière colonne présente les écarts entre les prédictions et les valeurs réelles.

Quart d'heure	valeurs réelles de rayonnement	valeurs de production prédites	Valeurs de production réelles	Ecart
07:30:00	131.65	1,85	1,30	0,55
07:45:00	158.14	2,27	2,30	-0,03
08:00:00	284.62	4,25	3,50	0,75
08:15:00	349.06	5,26	5,10	0,16
08:30:00	439.14	6,68	6,30	0,38
08:45:00	259.8	3,86	3,70	0,16
09:00:00	586.57	8,99	9,00	-0,01
09:15:00	623.21	9,56	9,70	-0,14
09:30:00	681.11	10,47	10,70	-0,23
09:45:00	788.83	12,16	11,50	0,66
10:00:00	761.28	11,73	12,00	-0,27
10:15:00	814.45	12,56	13,30	-0,74
10:30:00	874.90	13,51	13,80	-0,29
10:45:00	901.35	13,92	14,30	-0,38
11:00:00	982.80	15,20	14,80	0,40
11:15:00	944.07	14,59	15,10	-0,51
11:30:00	972.34	15,04	15,14	-0,10
11:45:00	993.61	15,37	15,70	-0,33
12:00:00	1011.97	15,66	16,10	-0,44
12:15:00	1025.15	15,86	16,30	-0,44
12:30:00	1035.42	16,03	16,60	-0,57
12:45:00	1415.51	21,99	17,80	4,19
13:00:00	926.71	14,32	14,70	-0,38
13:15:00	701.38	10,79	11,00	-0,21
13:30:00	704.38	10,83	11,00	-0,17
13:45:00	644.48	9,90	10,00	-0,10
14:00:00	1045.24	16,18	16,40	-0,22
14:15:00	957.07	14,80	15,10	-0,30
14:30:00	955.70	14,78	15,80	-1,02
14:45:00	971.61	15,02	15,70	-0,68
15:00:00	868.81	13,41	13,70	-0,29
15:15:00	893.17	13,79	14,10	-0,31
15:30:00	781.64	12,05	12,40	-0,35
15:45:00	883.45	13,64	13,30	0,34
16:00:00	846.45	13,06	13,30	-0,24
16:15:00	740.92	11,41	11,60	-0,19
16:30:00	688.02	10,58	10,60	-0,02
16:45:00	636.39	9,77	9,90	-0,13
17:00:00	562.30	8,61	8,70	-0,09
17:15:00	482.68	7,36	6,90	0,46
17:30:00	413.05	6,27	6,20	0,07
17:45:00	327.52	4,93	4,50	0,43
18:00:00	245.62	3,64	3,50	0,14
18:15:00	167.45	2,42	2,20	0,22
18:30:00	133.90	1,89	1,60	0,29

FIGURE 4.7 – Résultats des prévisions par MCO

4.2.2 Prédiction par le modèle ARMAX

On va modéliser l'influence de la série IRA_t sur la série PV_t par un modèle ARMAX. Comme on vient de développer au chapitre précédent, l'estimation d'un modèle ARMAX se fait en deux étapes, la première consiste à faire une régression MCO de la série PV_t sur

la variable explicative IRA_t et la deuxième se réalise en identifiant le modèle des résidus.

Identification de la série des résidus par la méthode des moindres carrées ordinaires MCO

Le modèle que nous avons retenu pour expliquer la production d'électricité par la variable rayonnement est :

$$PV_t = -0.21020 + 0.01568 * IRA_t + \mu_t \quad (4.4)$$

```
> modE = lm(Electricité~Rayonnement)
> mu = ts(residuals(modE), start = 0, end = 39600, frequency = 1/900)
```

Les résidus μ_t montraient une autocorrélation significative, nous allons identifier leur modèle, mais tout d'abord on doit les récupérer et les transformer en série temporelle.

Modélisation des résidus par un modèle ARIMA

L'analyse de graphe de la fonction d'autocorrélation (ACF) et celui de la fonction d'autocorrélation partielle (PACF) nous permet de déterminer les ordres (p; d; q) du modèle. Les graphiques sont donnés par la commande

```
> acf(mu)
> pacf(mu)
```

