HAL
open science

OPTIMISATION CONJOINTE DE LA PLANIFICATION DE LA PRODUCTION D'ENERGIE, DE LA MAINTENANCE ET DES PIECES DE RECHANGE D'UN PARC EOLIEN

Faker Abderrahmane, Salim Bouslikhane, Zied Hajej

To cite this version:

Faker Abderrahmane, Salim Bouslikhane, Zied Hajej. OPTIMISATION CONJOINTE DE LA PLANIFICATION DE LA PRODUCTION D'ENERGIE, DE LA MAINTENANCE ET DES PIECES DE RECHANGE D'UN PARC EOLIEN. 13ème CONFERENCE INTERNATIONALE DE MODELISATION, OPTIMISATION ET SIMULATION (MOSIM2020), 12-14 Nov 2020, AGADIR, Maroc, Nov 2020, AGADIR, Maroc. hal-03177560

HAL Id: hal-03177560

https://hal.science/hal-03177560

Submitted on 23 Mar 2021

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

OPTIMISATION CONJOINTE DE LA PLANIFICATION DE LA PRODUCTION D'ENERGIE, DE LA MAINTENANCE ET DES PIECES DE RECHANGE D'UN PARC EOLIEN

FAKER Abderrahmane, BOUSLIKHANE Salim

Universiapolis Bab Al Madina Quartier Tilila
Agadir, Morocco
abderrahmane.faker@e-polytechnique.ma,
bouslikhane.salim@gmail.com

HAJEJ Zied

LGIPM University of Lorraine
Metz, France
zied.hajej@univ-lorraine.fr

RESUME : *Dans ce travail, on cherche à optimiser conjointement la planification de la production, la maintenance et la gestion des pièces de rechange. L'objectif de notre modèle est de déterminer, pour chaque période de production, le nombre optimal d'éoliennes à faire fonctionner, ainsi que le taux de production d'énergie et le niveau de stock. En outre, notre modèle permet de planifier des actions de maintenance préventives durant un horizon donné a fin de réduire le taux de défaillances des éoliennes et en même temps d'optimiser les pièces de rechange en tenant compte de la croissance de dégradation des éoliennes en fonction de leurs taux de production et du temps.*

MOTS-CLES : Politiques de maintenance, Fiabilité des systèmes, Gestion de production, pièces de rechange, fonctionnement de l'éolienne.

1 INTRODUCTION

Améliorer la situation des parcs éoliens, nécessite de minimiser les coûts et maximiser la satisfaction de la clientèle. Ces deux objectifs ne peuvent être atteints sans une bonne gestion.

Dans ce contexte, de nombreuses recherches ont été menées dans le domaine industriel sur les pièces de rechange et l'optimisation de la planification de la maintenance comme solution pour minimiser les coûts et se prémunir contre une importante compétitivité. Dellagi et al (2020) ont développé un modèle d'analyse afin de déterminer un plan de maintenance intégré optimal et une gestion des pièces de rechange pour un système de fabrication constitué d'une seule machine. Huang et al 2008 ont proposé un modèle de politique de remplacement par blocs et d'examen périodique des stocks de pièces de rechange où le délai d'approvisionnement est aléatoire. Une telle optimisation peut être plus efficace si l'on considère la dégradation des machines dans le temps tout en planifiant des actions de maintenance. Pour l'énergie éolienne, Hajej et al 2017 ont effectué une maintenance intégrée liée aux éoliennes " production d'énergie ".

Pour L'interaction production/maintenance diverses recherches ont été effectuées pour traiter le problème de l'optimisation de la production conjointe et de la maintenance en considérant le cas de nombreuses machines. Dans ce contexte, on peut mentionner le travail de abdelrahim et vizvari (2016) qu'il était basée sur l'optimisation simultanée du flux de la production et de la maintenance préventive. Ce travail prend en compte l'interaction entre les deux services.

Dans notre cas, nous avons développé des stratégies de la maintenance intégrée à la production et de la gestion des piéces de rechange d'un parc eolien. Le principal résultat de notre modèle est qu'il permet de déterminer, pour chaque période de production, le nombre d'éoliennes fonctionnelles, la répartition de la production sur les machines nécessaires ainsi que le niveau des stocks. En outre, notre modèle permet de planifier la gestion des pièces de rechange et les actions préventives dans le temps et de se prémunir contre les défaillances imprévues, et ce en tenant compte de la dégradation des machines.

2 PROBLEMATIQUE ET DESCRIPTION GENERAL

Dans ce travail, nous soulevons le problème de l'optimisation conjointe de la planification de la production d'énergie et de la maintenance des parcs éoliens. Qui sont considérés comme des sites de production sensibles car leur production dépend principalement de la vitesse du vent qui est considérée comme une variable aléatoire. Par conséquent, la fiabilité de chaque éolienne est un facteur déterminant pour le succès de l'investissement dans l'énergie éolienne. Notre objectif est de satisfaire une demande d'électricité aléatoire sous un taux de service donné où tous les coûts de production, de stockage et de maintenance sont minimisés.

Il convient également de mentionner que le système est composé de nombreuses éoliennes identiques montées en parallèle. Le nombre d'éoliennes à utiliser pendant chaque période de production n'est pas le même, il représente donc une variable de décision notée M_k à déterminer.

L'idée générale de notre problématique consiste à déterminer les meilleures stratégies de production, de gestion des pièces de rechange et de maintenance. Pour réaliser cette optimisation conjointe, nous utilisons une méthode de résolution séquentielle. Sinon, après avoir formulé le problème du système de production et déterminé ses variables de décision, nous incluons les valeurs optimales

dans le modèle de maintenance afin de déterminer la stratégie optimale de maintenance caractérisée par la quantité des pièces de rechange le nombre optimal des actions de maintenance préventives.

3 NOTATION

3.1 Production

- Variables temporelles
  H : nombre de périodes de production.
  Δt : durée de chaque période de production (toutes les périodes de production sont égales).
  k : indice se référant à un numéro de période de production où k=1, 2..., H.
- La demande aléatoire
  D_k: Demande aléatoire pour la période k.
  μ^d : moyenne de la demande gaussienne.
  σ_d : Variance de la demande gaussienne.
- La variable de la décision
  M_k : Nombre d'éoliennes pendant la période k.
  P_k : Niveau de production global au cours du période k.
  $P_{j,k}$: Énergie produite par l'éolienne J pendant période k.
  S_k: Quantité d'énergie stockée pendant la période k.
- Les caractéristiques de vent :
  υci: la vitesse du vent minimale de foncionnement;
  υco: la vitesse du vent maximale de foncionnement;
  υr: Vitesse nominale du vent;
  υ: La vitesse du vent;
  a: Paramètres de forme du vent;
  c: Paramètres de l'échelle du vent;
- Les constantes :
  - P max: Puissance maximale de l'éolienne;
  - P_r: Puissance nominale de l'éolienne;
  - Θ: Taux de niveau de service;
  - $a1 + a2\ D_k$: Stock net optimal;
  - Cp: Coût de production de 1 kW;
  - Cs: Coût de stockage de 1 kW

3.2 Maintenance

- N: Nombre d'opérations de maintenance préventive sur l'horizon de planification;
- N*: Nombre optimal d'opérations de maintenance préventive sur l'horizon de planification ;
- T: Période de la maintenance préventive;
- T*: Période optimale de la maintenance préventive;
- H.Δt: Horizon de planification;
- $\lambda_{j,k}$: Taux de défaillance de la j^{éme} éolienne pendant la période k;
- $\lambda_{j,0}$: Taux de défaillance initiale de la j^{ème} éolienne;
- $\lambda_n(t)$: Taux de défaillance de l'éolienne dans les conditions nominales;
- $P_{j,k}$: Représente la cadence de production de la j^{éme} éolienne pendant la période k;
- $Pmax$: Représente le taux de production maximal de l'éolienne;
- β: Shape parameter of the wind turbine;
- η: Paramètre d'échelle de l'éolienne;
- MC_j: Coût d'entretien de la j^{éme} éolienne du parc éolien;
- MC: Coût d'entretien du parc éolien;
- Ccm: Coût de maintenance corrective (um);
- Cpm: Coût de maintenance préventive (um);
- $\bar{Y}j$: Nombre moyen de défaillances de la j^{éme} éolienne en fonction de sa production.

3.3 Les Pièce des Rechange

- *nrpp*: Nombre de pièces de rechange utilisées pour une maintenance préventive parfaite.
- *nrc*: Nombre moyenne des pièces de rechange utilisées pour une maintenance corrective.
- *De* (*P*,*Nb*) : Demande totale de pièces de rechange pour les actions de maintenance sur $H\Delta t$ en considérant la variation du taux de production à chaque période de production $[k\Delta t, (k+1)\Delta t]$
- *Cc*: Coût de passation d'une commande.
- *Cpos*: Coût de possession d'une pièce de rechange sur $H\Delta t$.
- *Ca*: le coût d'achat de la pièce de rechange unitaire.
- *C*(*Q*, *De*(*P*,*Nb*)): le coût total de la gestion des pièces de rechange (stockage, commande et achat)
- *CTT*: Coût total incluant les coûts de maintenance et de gestion des pièces de rechange.

4 ÉTUDE ANALYTIQUE

4.1 Production

La production d'énergie éolienne n'est pas une activité simple puisqu'elle dépend de la disponibilité du vent qui est considérée comme une variable aléatoire. Par conséquent, la production d'énergie éolienne est une tâche difficile qui nécessite une compréhension de la fonctionnalité et de la disponibilité des éoliennes afin d'assurer la satisfaction du client. Sachant que la vitesse du vent varie selon la distribution de Weibull (Carta et al, 2009) où sa fonction de distribution de probabilité (pdf) est exprimée comme suit :

$$f(\upsilon) = \frac{a}{c}\left(\frac{v}{c}\right)^{a-1}\exp\left(-\left(\frac{v}{c}\right)^{a}\right) \qquad (1)$$

De nombreux chercheurs ont travaillé sur la détermination de l'énergie de sortie de l'éolienne, Aghazzaf and Najid 2008 ont estimé la puissance éolienne disponible Pwind,j de la j^{eme} éolienne qui s'exprime comme suit:

$$P_{j,k} = \int_{\upsilon c}^{\upsilon r}\left(\frac{a}{c}\left(\frac{\upsilon}{c}\right)^{a-1}\exp\left(-\left(\frac{\upsilon}{c}\right)^{a}\right)\times P_{r,j}\times\frac{(\upsilon^a-\upsilon_c^a)}{(\upsilon_c^a-\upsilon_r^a)}\right)+$$
$$\int_{\upsilon r}^{\upsilon f}\left(\frac{a}{c}\left(\frac{\upsilon}{c}\right)^{a-1}\exp\left(-\left(\frac{\upsilon}{c}\right)^{a}\right)\times P_{r,j}\right)dv \qquad (2)$$

Où l'énergie globale produite pendant la période k est exprimée comme suit :

$$P_k = \sum_{j=1}^{M_k} P_{j,k} \qquad (3)$$

L'objectif du plan de production est de déterminer la meilleure combinaison d'éoliennes fonctionnelles au cours de chaque période, le niveau de production et les niveaux de stock qui minimisent les coûts totaux moyens sur un horizon temporel limité et ce en tenant compte de la nécessité de satisfaire la demande fluctuante.

- Fonction objective :
est de trouver Mk, Pjk et Sk pour minimiser

$$\mathrm{CT} = \sum_{K=1}^{H}(\mathrm{Cs} \times [\mathrm{S_K} - (\mathrm{a_1} + \mathrm{a_2} \times \mathrm{D_K}]^2) + \sum_{K=1}^{H-1} \mathrm{Cp} \times (\sum_{j=1}^{M_k} \mathrm{P_{jk}})^2 \quad (4)$$

Nos principales contraintes peuvent être données par :

$$m \leq Mk \leq M \quad (5)$$

$$Sk = Sk - 1 + Pk - Dk \quad (6)$$

$$Prob(Sk \geq 0) \geq \theta \quad (7)$$

L'algorithme de la méthode de résolution a été développé sur MATLAB

4.2 Stratégie de la maintenance intégrée à la gestion des pièces de rechange

Inspirés notamment des travaux de HAJEJ et al 2010, nous prenons en compte la dégradation des machines tout en prévoyant les actions de maintenance. Ainsi, la stratégie de maintenance dépend fortement de la planification de la production préalablement étudiée qui est en accord avec le principe de planification conjointe de la production et de la maintenance et la méthode intégrée adoptée.

Dans cette section, nous supposons que les actions préventives doivent être programmées à la fin d'une période de production.

nous nous sommes inspirés des recherches de HAJEJ 2017 où l'auteur ne traitait que d'une seule machine sur un horizon temporel fini, c'est pourquoi nous proposons l'expression suivante pour décrire la fonction de taux de défaillance adoptée en considérant une machine j à une période de production k:

$$\lambda_{j,k}(t) = \lambda_{j,k-1}(\Delta t) + \frac{P_{j,k}}{Pmax}\ \lambda n(t)\ ; t \in [0, \Delta t] \quad (8)$$

$\lambda n(t)$: Représente le taux de défaillance pour les conditions nominales qui correspond au taux de défaillance avec le taux de production maximal qui est modélisé avec la distribution de Weibull comme suit :

$$\lambda n(t) = \frac{\beta}{\eta}(\frac{t}{\eta})^{\beta-1} \quad (9)$$

En général, le coût de maintenance de la j^éme^ éolienne est formulé comme suit :

$$MCj = Cpm(Nj - 1) + Ccm\,\bar{Y}j(Pjk, Nj) \quad (10)$$

L'expression de la demande totale de pièces de rechange s'exprime comme suit:

$$De = nrp \times Nb + nrc \times \bar{Y}_j(P, Nb) \quad (11)$$

Où:

$$\bar{Y}j(\mathrm{Pj, Nj}) = \sum_{j=0}^{Nb-1}\left(int\left((j+1) \times \frac{T}{\Delta t}\right) - int\left(j \times \frac{T}{\Delta t}\right) \times \Delta t \times \lambda_0(t_0) + \sum_{i=int\left(j\times\frac{T}{\Delta t}\right)+1}^{int\left((j+1)\times\frac{T}{\Delta t}\right)} \int_0^{\Delta t} \sum_{l=1}^{i-1} \frac{P_l}{P_{max}} \times \lambda_n(\Delta t)dt + \sum_{i=int\left(j\times\frac{T}{\Delta t}\right)+1}^{int\left((j+1)\times\frac{T}{\Delta t}\right)} \int_0^{\Delta t} \frac{P_i}{P_{max}} \times \lambda_n(\Delta t)dt + \int_0^{(j+1)\times T - int\left((j+1)\times\frac{T}{\Delta t}\right)\times\Delta t} \left(\sum_{l=1}^{int\left((j+1)\times\frac{T}{\Delta t}\right)} \frac{P_l}{P_{max}} \times \lambda_n(\Delta t)\right) dt + \int_0^{(j+1)\times T - \left(int\left((j+1)\times\frac{T}{\Delta t}\right)+1\right)\times\Delta t} \left(\frac{P_{int\left((j+1)\times\frac{T}{\Delta t}\right)+1}}{P_{max}} \times \lambda_n(t)\right) dt + \frac{P_{int\left((j+1)\times\frac{T}{\Delta t}\right)}}{P_{max}} \times \int_{int\left((j+1)\times\frac{T}{\Delta t}\right)\times\Delta t}^{(j+1)\times T} \lambda_n(t)dt\right) \quad (12)$$

nrc est le nombre moyen de pièces de rechange nécessaires pour une maintenance corrective. Ce nombre moyen est aléatoire et nous l'avons déterminé selon les conditions suivantes :

- Le nombre de pièces de rechange nécessaires pour chaque nrci de maintenance minimale (variable aléatoire) suit une distribution de Poisson avec une moyenne de M_D.
- Nous prenons en considération le nombre moyen de défaillances entre [0, T], $\bar{Y}j(\mathrm{Pj,Nj})$.
- nrc et nrci sont des entiers.

$$nrc = \frac{\sum_{i=1}^{\bar{Y}j(\mathrm{Pj,Nj})} nrc_i}{\bar{Y}j(\mathrm{Pj,Nj})} \quad (13)$$

Inspiré du modèle de Wilson, la quantité Q économique ordonnée à une périodicité fixe est:

$$Q = \sqrt{\frac{2 \times C_c \times D_e}{C_{pos}}} \quad (14)$$

Ainsi, le coût total de la gestion des pièces de rechange est:

$$C\big(Q, (P, Np)\big) = C_a \times D_e(P, Nb) + C_c \times \left(\frac{D_e(P,Nb)}{Q}\right) + C_{pos} \times \left(\frac{Q}{2}\right) \quad (15)$$

Le coût total de la maintenance et de la gestion des pièces de rechange de la j^éme^ éolienne :

$$MCT_j = \frac{\left(C_a \times D_e(P,Nb) + C_c \times \left(\frac{D_e(P,Nb)}{Q}\right) + C_{pos} \times \left(\frac{Q}{2}\right)\right)}{H \times \Delta t} + \frac{(Nb \times Mp) + (\bar{Y}j(\mathrm{Pj,Nj}) \times Mc)}{H \times \Delta t} \quad (16)$$

Le coût total des pièces de rechange et de la maintenance du parc éolien :

$$MC = \sum_{j=1}^{M_k} MCT_j \quad (17)$$

Nous calculerons le coût de maintenance correspondant à N ∈ {1...12}et Q. Le M*= (N*, Q*) correspondra au coût de maintenance et de gestion des pièces de rechange le moins cher MC*.

5 ÉTUDE DE CAS

5.1 Production

- En ce qui concerne la période de production Δt et le temps à horizon fini:

Δt =1 mois; H=60 mois;

- les coûts de stockage et de production:

C_s=6 um; C_p=3 um;

- pour a1 et a2:

a1=20;a2=0;

- Le nombre de éoliennes:

m=3; M=6;

- Paramètres de Weibull du vent:

a=2; c=10;

- Caractéristiques de l'éolienne:

Pmx=20kW; Pr=10 kW; vc=3 m/s; vf =26 m/s;
vr =10 m/s ;Hub height =15 m; Rotor diameters=8m;

- Pour le taux de service, nous effectuons ce test en considérant que Θ=90% et comme niveau de stock initial nous supposons que S0=0;

Puisque nous supposons que la demande est aléatoire et qu'elle est gaussienne avec écart-type
σ_d= 1.1 and mean μ_d=50;

- Résultats:

Après avoir effectué des tests différents et successifs avec les mêmes entrées, nous remarquons qu'en moyenne le résultat est le suivant :

Coût total			1971123 um	
K	M_k(kw)	S_k(kw)	P_k(kw)	D_k(kw)
1	6	9.98	59.98	50.04
2	5	10.88	50.89	47.78
3	6	22.60	61.73	52.82
4	4	14.62	42.02	50.57
5	6	22.14	57.52	47.78
6	3	2.89	30.75	48.84
7	6	13.46	60.57	51.87
8	5	15.11	51.65	51.24
9	6	23.87	58.76	49.86
10	4	11.50	37.63	50.50
11	5	9.97	48.48	50.47
12	6	16.57	56.60	50.27
13	4	6.17	39.60	50.41
14	5	4.35	48.18	47.80
15	5	3.01	48.66	49.49
16	6	14.20	61.19	49.60
17	6	24.51	60.32	49.88
18	6	36.13	61.62	48.08
19	3	16.45	30.32	49.44
20	6	27.95	61.50	48.72
21	6	37.71	59.76	50.65
22	6	48.81	61.10	49.61
23	5	47.50	48.69	50.31
24	4	38.59	41.09	49.12
25	6	47.41	58.81	49.91
26	6	59.16	61.75	50.70
27	6	67.82	58.66	50.33
28	4	57.71	39.89	48.25
29	3	36.62	28.91	51.25
30	6	46.27	59.65	49.34
31	5	44.24	47.97	51.32
32	6	54.65	60.40	48.27
33	4	44.27	39.63	49.54
34	6	53.53	59.26	50.23
35	6	61.97	58.44	50.82
36	6	72.18	60.21	51.43
37	5	71.67	49.49	48.42
38	5	73.92	52.25	50.38
39	5	72.11	48.20	50.24
40	6	80.20	58.09	51.26
41	3	60.62	30.42	51.95
42	4	51.17	40.55	51.28
43	6	61.81	60.64	51.45
44	6	72.79	60.98	51.01
45	4	63.83	41.04	49.30
46	4	52.71	38.88	49.85
47	5	53.34	50.63	50.07
48	4	43.42	40.08	50.62
49	6	52.02	58.60	49.00
50	6	62.43	60.41	51.46
51	6	73.79	61.36	50.79
52	6	82.61	58.81	49.91
53	6	94.31	61.71	51.48
54	6	103.80	59.49	49.52
55	5	102.41	48.61	50.81
56	5	100.12	47.71	50.00
57	4	89.40	39.27	49.55
58	3	68.49	29.09	50.67
59	4	58.03	39.54	48.67
60	6	68.35	60.32	50.41

Tableau 1:Solution approximative compte tenu des paramètres ci-dessus.

-Le coût total est relativement élevé. Cela s'explique tout d'abord par l'importance de la demande que nous avons prise en compte.
-Nous remarquons que le niveau des stocks est relativement important. Cela est lié à la contrainte du taux de service

Le tableau suivant représente l'énergie produite par chaque éolienne au cours de chaque période.(en KW) :

K	E1	E2	E3	E4	E5	E6
1	10.28	10.07	9.06	9.09	10.65	10.84
2	10.25	10.97	10.31	9.67	9.69	0.00
3	9.24	10.49	10.16	10.99	10.05	10.79
4	10.55	10.94	10.39	10.14	0.00	0.00
5	9.24	9.77	9.61	10.39	9.13	9.37

6	10.47	9.43	10.85	0.00	0.00	0.00
7	10.20	9.43	10.33	10.09	10.93	9.60
8	9.86	9.51	10.95	10.72	10.62	0.00
9	9.09	9.09	9.72	10.82	10.18	9.86
10	9.27	9.99	9.16	9.21	0.00	0.00
11	9.21	9.20	10.16	9.09	10.82	0.00
12	9.45	9.07	9.58	9.53	9.50	9.47
13	9.68	9.33	10.38	10.21	0.00	0.00
14	9.68	9.27	9.58	10.02	9.62	0.00
15	9.36	10.67	9.42	9.37	9.84	0.00
16	10.63	10.55	10.79	9.10	10.93	9.18
17	9.85	10.00	10.39	10.52	9.13	10.42
18	10.42	9.54	10.60	10.89	9.56	10.61
19	10.48	10.80	9.04	0.00	0.00	0.00
20	9.94	10.24	10.93	10.48	9.09	10.81
21	9.18	9.75	10.88	9.37	10.31	10.26
22	9.96	10.09	10.74	9.84	10.39	10.08
23	10.58	10.51	9.34	9.02	9.25	0.00
24	10.94	10.29	9.09	10.77	0.00	0.00
25	10.08	10.67	9.76	9.88	9.30	9.13
26	9.24	10.95	9.95	10.46	10.78	10.37
27	9.08	9.84	10.30	9.44	9.40	10.60
28	10.39	9.03	10.54	9.93	0.00	0.00
29	9.63	9.68	9.59	0.00	0.00	0.00
30	10.89	9.37	10.61	9.03	9.20	10.56
31	9.01	9.07	9.21	10.68	9.99	0.00
32	9.74	9.50	10.52	10.38	9.77	10.49
33	9.36	9.70	10.78	9.79	0.00	0.00
34	10.61	9.33	9.56	9.60	9.48	10.67
35	9.89	9.69	9.62	10.03	9.79	9.41
36	9.77	9.97	9.01	10.89	10.83	9.75
37	9.35	9.96	10.48	9.90	9.80	0.00
38	10.74	10.62	10.29	9.95	10.65	0.00
39	9.66	9.98	9.10	9.26	10.20	0.00
40	9.92	9.52	9.04	10.96	9.39	9.25
41	10.79	10.07	9.56	0.00	0.00	0.00
42	10.24	9.97	10.17	10.17	0.00	0.00
43	10.52	9.55	9.11	10.91	10.11	10.43
44	9.79	9.86	9.58	10.57	10.69	10.50
45	10.69	9.95	9.78	10.62	0.00	0.00
46	9.15	9.87	10.55	9.31	0.00	0.00
47	9.86	10.94	10.25	9.07	10.51	0.00
48	9.83	10.96	10.04	9.26	0.00	0.00
49	10.94	9.02	9.13	10.37	9.86	9.28
50	9.63	9.11	10.87	10.88	10.73	9.19
51	10.72	10.20	10.85	9.80	9.61	10.17
52	9.24	9.27	10.68	10.10	10.18	9.34
53	10.86	9.58	10.68	10.29	10.63	9.66
54	10.29	9.57	10.89	9.87	9.09	9.79
55	9.66	9.69	9.20	10.25	9.81	0.00
56	9.01	10.09	9.99	9.23	9.39	0.00
57	9.63	9.21	10.27	10.17	0.00	0.00
58	9.24	10.49	9.36	0.00	0.00	0.00
59	9.03	9.28	10.77	10.46	0.00	0.00
60	9.27	9.96	10.16	9.96	10.07	10.91

Tableau 2 : Énergie produite par chaque éolienne.

5.2 Maintenance

Les données d'entrée *:*

Input data			
Cmp=100 mu;	**Nrp=40;**	**B=100;**	**Cc=50 mu;**
Ccm=2500mu;	**Nrc=20;**	**α=2;**	**Cpos=10 mu;**
λ_0=0 ;	**Ca=5 mu;**	*T*= H/N ;	

Tableau 3 :Données numériques

L'énergie produite par chaque éolienne de chaque période (Pj,k) est indiquée dans le tableau 2.

- Résultats:

	MC*	N*	Q*	De
Éolienne1	10185.57	4	42	167
Éolienne2	10187.3	4	41	168
Éolienne3	10183.8	4	41	167
Éolienne4	10202.9	4	40	166
Éolienne5	9774.61	3	36	127
Éolienne6	9500.76	2	29	86

Tableau 4 :Planification de la maintenance

6 CONCLUSION

Améliorer la rentabilité des parcs éoliens et assurer leur durabilité dans le temps est l'objectif principal dans un marché croissant qui devient de plus en plus exigeant et compétitif. Tout en s'efforçant d'atteindre ces objectifs au moindre coût, les gestionnaires ont toujours été confrontés à divers problèmes, qu'il s'agisse de problèmes de planification ou de gestion des ressources.

Nous commençons par proposer une solution pour optimiser les coûts de production sous des contraintes liées notamment au taux de service. Pour ce faire, nous développons avec Matlab un algorithme basé sur le principe de la méthode d'exploration aléatoire. Cette combinaison obtenue a ensuite été considérée comme une donnée d'entrée pour effectuer la maintenance et la gestion des pièces de

rechange. Pour ce faire, nous proposons un algorithme développé sur Mathematica pour organiser les actions de maintenance sur un horizon temporel fini, en tenant compte de la dégradation de chaque machine dans le temps et le taux de production.
Pour poursuivre ce travail et l'améliorer, nous pouvons supposer que des actions préventives peuvent être menées au milieu d'une période de production et pas seulement à la fin. De plus, nous pouvons utiliser la maintenance mixte pour avoir une optimisation entre le coût des maintenances et la disponibilité de nos éoliennes.

REFERENCES

Aghazzaf and Najid (2008*). Integrated production and preventive maintenance in production systems subject to random failures*. European journal of operational research, 178:3382-3392.

Abdelrahim, E. H., & Vizvári, B. (2016). Simultaneous Scheduling of Production and Preventive Maintenance on a Single Machine. Arabian Journal for Science and Engineering, 42(7), 2867–2883. doi:10.1007/s13369-016-2290-4.

Carta, J.; Ramłrez, P.; Velzquez, S. A review of wind speed probability distributions used in wind energy analysis: Case studies in the canary islands. Renew. Sustain. Energy Rev. 2009, 13, 933–955.

Dellagi, S., Trabelsi, W., Hajej, Z., & Rezg, N. (2020). Integrated maintenance/spare parts management for manufacturing system according to variable production rate impacting the system degradation. Concurrent Engineering, 1063293X1989873. doi:10.1177/1063293x19898734

Hajej (2010*). Contribution to the development of integrated maintenance policies with consideration of the right of retraction and remanufacturing*. PhD thesis, Paul Verlaine University-Metz.

Hajej et al (2017). *An integrated maintenance strategy for a power generation system in the event of a change in the failure rate (case of a wind turbine)*. Conference: 2017 IEEE 6th International Conference on Renewable Energy Research and Applications (ICRERA) DOI: 10.1109/ICRERA.2017.8191175.

Huang et al (2008). *Modeling and analyzing a joint optimization policy of block replacement and spare inventory with random lead time*, IEEE Transactions on Reliability, 57(1), 113-124.