

INFLUENCE DE L'EMPLACEMENT D'UNE FERME EOLIENNE SUR LE DISPATCHING ECONOMIQUE ENVIRONNEMENTAL

Lahouaria Benasla

Université des Sciences et de la Technologie d'Oran-Algérie, Département d'Electrotechnique

Abderrahim Belmadani

Université des Sciences et de la Technologie d'Oran-Algérie, Département d'Informatique

Mostefa Rahli

Université des Sciences et de la Technologie d'Oran-Algérie, Département d'Electrotechnique

RESUME: Aujourd'hui, l'énergie éolienne est devenue une réalité mondiale incontournable. L'évolution de la capacité de production d'électricité par éoliennes n'a pas cessé d'augmenter depuis 1980. L'industrie éolienne est en mesure de devenir une industrie énergétique mondiale si on se base sur l'accélération des installations dans la dernière décennie. L'énergie éolienne, dont la production ne s'accompagne pas d'émission de gaz à effet de serre, est une solution intéressante pour remplacer les combustibles fossiles tels que le pétrole.

Dans cet article, nous étudions l'effet de l'emplacement et de l'incorporation d'une ferme éolienne dans un réseau d'énergie électrique sur le Dispatching Economique Environnemental (DEE) en appliquant « Fast Harmony Search Algorithm » (FHSA). Les simulations sont faites en considérant en premier lieu le réseau tel qu'il est (sans ferme éolienne) ensuite avec l'incorporation d'une ferme éolienne. Les résultats sont comparés en termes de coût de production et d'émissions de gaz à effet de serre.

MOTSCLES: Dispatching Economique Environnemental, FHSA, ferme éolienne, emplacement optimal.

1. INTRODUCTION

L'importance de la protection de l'environnement et la diminution progressive des sources d'énergie fossile ont favorisé l'intégration des énergies renouvelables dans les réseaux électriques existants [CHC08]. Due au développement industriel et l'épanouissement de l'économie mondiale, la demande en électricité a considérablement augmenté, ce qui fait de l'énergie éolienne, sous forme de parc ou ferme, une candidate de plus en plus populaire. En effet, elle a l'avantage de réduire les émissions de gaz polluants et la conservation des réserves irremplaçables de fuel [WL07].

Le problème du dispatching économique environnemental consiste à déterminer les niveaux de production de l'ensemble des générateurs qui garantissent l'équilibre production-consommation au moindre coût et à faibles émissions. Le

développement rapide de la technique du calcul numérique a permis de maîtriser ce problème en élaborant plusieurs algorithmes de calcul permettant de déterminer la quantité d'énergie à générer par les centrales et à transférer à travers chaque nœud afin de répondre aux exigences des consommateurs aussi économiquement que possible [BR00], tout en respectant les contraintes du système et de toutes les centrales. La puissance générée par une centrale éolienne n'est pas maniable de la même manière que celle générée par des centrales conventionnelles, parce qu'elle dépend de la vitesse du vent qui est liée à des paramètres climatiques et micro météorologiques [BC09].

Dans cet article nous étudions l'effet de l'emplacement d'une ferme éolienne dans le réseau IEEE 9 bus sur le coût et l'environnement en appliquant FHSA [BBR11]. Les résultats de simulation sont comparés avec ceux obtenus en appliquant le logiciel Matpower [ZMG].

2. ENERGIE EOLIENNE

Le principe de conversion de l'énergie cinétique du vent en énergie électrique et la description détaillée des différents types d'aérogénérateurs sont présentés dans plusieurs références ([BC09, R+06, M+04]). La puissance mécanique qui peut être extraite du vent se détermine au moyen de la fonction suivante :

$$P_v = \begin{cases} 0 & V_v < V_d \\ \frac{1}{2} C_p \cdot \rho \cdot \pi \cdot R_p^2 \cdot V_v^3 & V_d \leq V_v < V_n \\ P_N & V_n \leq V_v < V_M \\ 0 & V_v \geq V_M \end{cases} \quad (1)$$

Où C_p est le coefficient de puissance aérodynamique, ρ la masse volumique de l'air ($1,225 \text{ kg/m}^3$), R_p le

rayon de la surface active de l'éolienne et V_v la vitesse du vent. V_d , V_n et V_M sont respectivement la vitesse de déclenchement, la vitesse nominale et la vitesse d'arrêt de la turbine. Le coefficient C_p ne peut théoriquement pas dépasser la limite de Betz ($C_{p_limite} = 0.593$) [Abd07].

La puissance extraite par une éolienne est représentée par la figure 1. La courbe représente la caractéristique d'exploitation de l'éolienne. Il existe quatre zones principales qui sont:

La zone I où la vitesse du vent est inférieure à la vitesse de démarrage V_d de l'éolienne. Dans ce cas, la turbine ne fonctionne pas et ne produit donc pas d'énergie.

La zone II dans laquelle la vitesse du vent est comprise dans le domaine $[V_d, V_n]$ correspond à la zone où il est possible d'optimiser la conversion d'énergie éolienne. C'est dans cette zone qu'il est intéressant de faire varier la vitesse de rotation. La puissance récupérée est alors variable.

La zone III où la puissance développée par l'éolienne est limitée à la puissance nominale P_n .

La zone IV lorsque la vitesse du vent dépasse la vitesse maximale admissible par l'éolienne V_M . Dans ce cas, la turbine est arrêtée par le système d'arrêt d'urgence afin de protéger la partie mécanique de l'éolienne et d'éviter son endommagement.

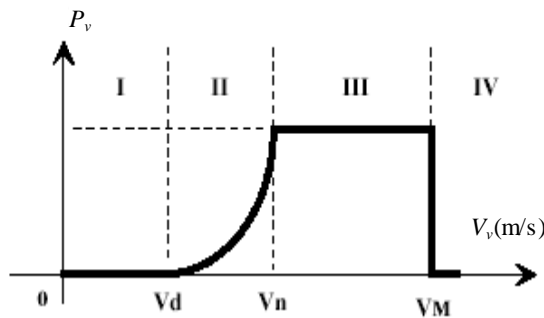


Fig. 1. Puissance extraite par une éolienne en fonction de la vitesse du vent

3. FORMULATION DU PROBLEME DU DISPATCHING ECONOMIQUE ENVIRONNEMENTAL

3.1 Dispatching économique

1. Coût de la production thermique

Les producteurs d'énergie électrique déterminent expérimentalement les courbes donnant le coût de production de chaque groupe en fonction de la puissance qu'il débite. La fonction associée à ces courbes est un polynôme de degré «n». En pratique, le plus souvent, elle est présentée sous forme d'un polynôme de deuxième degré [Wal86]:

$$F_{thi}(P_{Gi}) = a_i P_{Gi}^2 + b_i P_{Gi} + c_i \text{ (\$/h)} \quad i = 1, 2, \dots, n_g \quad (2)$$

$F_{thi}(P_{Gi})$ est la fonction du coût du combustible, P_{Gi} est la puissance générée, a_i , b_i et c_i sont les coefficients de coût propres à chaque unité de production d'énergie électrique et n_g nombre total de générateurs.

2. Coût de la production par éolienne

La fonction du coût d'une centrale éolienne peut être représentée par la fonction linéaire suivante [Pho11]:

$$F_{vj}(P_{vj}) = d_j P_{vj} \text{ (\$/h)} \quad j = 1, 2, \dots, n_f \quad (3)$$

$F_{vj}(P_{vj})$ est la fonction du coût de la ferme éolienne, P_{vj} est la puissance générée par la ferme au nœud j , d_j est le coefficient de coût propre à la ferme éolienne et n_f nombre total de fermes éoliennes.

La minimisation de la fonction du coût total de production thermique et éolienne est une tâche qui se présente de la manière suivante :

$$\text{Min} \left\{ F = \sum_{i=1}^{n_g} F_{thi}(P_{Gi}) + \sum_{j=1}^{n_f} F_{vj}(P_{vj}) \right\} \quad (4)$$

Sous les contraintes :

$$\sum_{i=1}^{n_g} P_{Gi} + \sum_{j=1}^{n_f} P_{wj} - P_d - P_L = 0 \quad (5)$$

$$P_{Gimin} \leq P_{Gi} \leq P_{Gimax} \quad i = 1, \dots, n_g \quad (6)$$

$$0 \leq P_{wj} \leq P_{wjmax} \quad j = 1, \dots, n_f \quad (7)$$

P_d : Puissance active de charge totale.

P_L : Pertes actives totales dans le réseau.

P_{Gimin} : Puissance minimale active du générateur.

P_{Gimax} : Puissance maximale active du générateur.

3.2 Dispatching environnemental

Le problème du dispatching environnemental consiste à minimiser la fonction des émissions des gaz provenant des centrales de production. Il peut être décrit de la manière suivante [Gue04]:

$$\text{Min} \left\{ E = \sum_{i=1}^{n_g} E_i(P_{Gi}) \right\} \quad (8)$$

Où $E_i(P_{Gi}) = \alpha_i P_{Gi}^2 + \beta_i P_{Gi} + \delta_i$ (Ton/h)

Sous les contraintes données par les équations (5) à (7).

Les études du dispatching économique-environnemental consistent donc à chercher la minimisation simultanée de deux fonctions décrites par les mêmes variables objets, nous disons que le problème d'optimisation représente un problème bi-objectifs ou bi-critères. La difficulté principale d'un tel problème d'optimisation est liée à la présence de conflits entre les deux fonctions. Pour cela, nous avons transformé ce problème en un problème d'optimisation mono-objectif, en introduisant un facteur de pénalité des prix F_p (\$/ton) dont l'expression est donnée par [VGN03]:

$$F_{pi} = \frac{F_{thi}(P_{Gimax})}{E_i(P_{Gimax})} \text{ (\$/ton)} \quad (9)$$

Pour déterminer le facteur de pénalité des prix F_p lié à une charge donnée, il faut:

– Calculer le rapport $\frac{F_{thi}(P_{Gimax})}{E_i(P_{Gimax})}$ pour chaque générateur.

– Classer les valeurs des facteurs trouvées par ordre croissant.

– Ajouter la puissance générée maximale de chaque unité (P_{Gimax}) une par une, en commençant par la puissance de la centrale ayant le plus petit

facteur. Une fois $\sum P_{Gimax} \geq P_{ch}$, on arrête le calcul.

– A ce stade, F_p lié à la dernière unité dans le processus de sommation est le facteur de pénalité des prix correspondant à la charge donnée.

Le problème d'optimisation mono-objectif se présente de la manière suivante :

$$\text{Min} \left[\Psi = \sum_{j=1}^{n_f} F_{wj}(P_{wj}) + \sum_{i=1}^{n_g} F_{thi}(P_{Gi}) + F_p \cdot \sum_{i=1}^{n_g} E_i(P_{Gi}) \right] \text{ (\$/h)} \quad (10)$$

L'équation (13) peut être réécrite en fonction des coefficients et des puissances générées :

$$\text{Min} \left\{ \Psi = \sum_{j=1}^{n_f} F_{wj}(P_{wj}) + \sum_{i=1}^{n_g} A_i P_{Gi}^2 + B_i P_{Gi} + C_i \right\} \text{ (\$/h)} \quad (11)$$

Avec $A_i = a_i + F_p \alpha_i$, $B_i = b_i + F_p \beta_i$ et $C_i = c_i + F_p \delta_i$

4. FAST HARMONY SEARCH ALGORITHM

L'algorithme de la recherche d'harmonie HSA (Harmony Search Algorithm) a été conçu en

s'inspirant du processus musical de la recherche d'un état parfait de l'harmonie. Les performances musicales cherchent à trouver une harmonie plaisante (L'état parfait) définie par un standard esthétique de la même manière que les processus d'optimisation cherchent à trouver une solution globale (l'état parfait) définie par une fonction objectif. Le ton de chaque instrument de musique détermine la qualité esthétique de la même manière que la valeur de la fonction objectif est déterminée par les valeurs prises par chaque variable de décision.

En musique, chaque musicien joue un ton dans l'intervalle des tons possibles ce qui donne un vecteur d'harmonie. Si le résultat obtenu est une bonne harmonie, l'expérience est « sauvegardée » dans la mémoire de chaque musicien ce qui augmente la possibilité d'obtenir une bonne harmonie à la prochaine improvisation.

De façon similaire, en ingénierie, chaque variable de décision prend une valeur dans l'intervalle des valeurs possibles ce qui donne un vecteur d'une solution. Si toutes les valeurs des variables de décision représentent une bonne solution, l'expérience est sauvegardée en mémoire de chaque variable ce qui augmente la possibilité d'obtenir une bonne solution à l'itération suivante.

La modélisation du processus d'improvisation d'un ensemble de musiciens se base sur les règles qui dirigent chaque interprète dans l'élaboration de l'harmonie. En effet, lorsqu'un musicien improvise un ton, le plus souvent, il suit l'une des trois règles:

- a. jouer un ton de sa mémoire,
- b. jouer un ton adjacent au ton de sa mémoire,
- c. jouer un ton totalement aléatoire dans

l'ensemble des sons possibles.

Par analogie, quand HSA affecte une valeur à une variable de décision, il suit l'une des trois règles [BBR09]:

le choix d'une valeur quelconque de la Mémoire des Harmonies (Harmony Memory : HM) :

« considération de la mémoire »,

le choix d'une valeur adjacente à la valeur de HM :

« ajustement du ton »,

le choix d'une valeur totalement aléatoire dans l'intervalle des valeurs possibles : « randomisation ».

Ces trois règles de HSA sont dirigées en utilisant deux paramètres, qui sont :

✓ le taux de considération de la mémoire HM (Harmony Memory Considering Rate : HMCR)

✓ le taux d'ajustement du ton (Pitch Adjusting Rate : PAR).

La procédure d'optimisation de HSA est constituée des 5 étapes suivantes ([ZMG, PKK09]):

Étape 1: Initialisation des paramètres de l'algorithme HSA (HMCR, PAR, ...):

Il faut noter que le problème d'optimisation spécifiquement résolu par HSA est sous la forme:

$$\begin{cases} \text{Min } f(x) \\ \text{avec } x^t = (x_1, x_2, \dots, x_i, \dots, x_N) \\ \text{et } x_i^{MIN} \leq x_i \leq x_i^{MAX} \quad \forall i = 1..N \end{cases} \quad (12)$$

$f(x)$ est la fonction objectif, x est le vecteur solution du problème, x_i est la valeur possible de la $i^{\text{ème}}$ variable de décision. Cette valeur bornée par x_i^{MIN} et x_i^{MAX} . N est le nombre de variables de décision.

Dans cette étape, les paramètres suivants sont définis :
Le taux de considération de la mémoire d'harmonie : Harmony Memory Considering Rate (HMCR).

Le taux d'ajustement du ton : Pitch Adjusting Rate (PAR).

Le critère d'arrêt qui n'est autre que le nombre d'itération de l'algorithme

La taille du vecteur mémoire contenant les solutions candidates et la valeur de la fonction objectif correspondante. Ce paramètre, appelé HMS (Harmony Memory Size), représente la modélisation de la capacité (taille) de la mémoire des musiciens.

Etape 2: Initialisation de HM:

HM est une matrice décrite par l'équation (13). Cette matrice est remplie initialement par des solutions générées aléatoirement selon la formule de génération (14).

$$HM = \begin{bmatrix} f(x^1) & x^1 \\ \vdots & \vdots \\ f(x^j) & x^j \\ \vdots & \vdots \\ f(x^{HMS}) & x^{HMS} \end{bmatrix} \quad (13)$$

$$x^j = \begin{pmatrix} x_1^j \\ \vdots \\ x_i^j \\ \vdots \\ x_N^j \end{pmatrix} \quad x_i^j = x_i^{MIN} + r \times (x_i^{MAX} - x_i^{MIN}) \quad (14)$$

r étant un nombre aléatoire dans l'intervalle $[0, 1]$.

Etape 3: Improviser une nouvelle harmonie selon le principe suivant:

L'improvisation d'une nouvelle harmonie se fait variable par variable. La valeur de chaque variable de décision x_i^j est choisie dans HM selon une forte probabilité HMCR sinon elle peut être générée aléatoirement (14) selon la probabilité $(1-HMCR)$. Ceci indique que le rôle de HMCR est décisif. En effet, si ce taux est trop petit, la sélection de HM ne se fera que pour une faible population de variables et

l'algorithme risque de ne pas converger rapidement. Par contre, si HMCR est trop grand (proche de 1), c'est la génération de nouvelles variables qui sera limitée et donc l'exploration risque d'en souffrir. Pour ces raisons, la valeur typique de HMCR est généralement prise dans l'intervalle $[0.7, 0.95]$ [Gee09].

Toute variable sélectionnée dans HM avec une probabilité HMCR est ajustée selon la probabilité PAR. Cet ajustement (15) consiste à remplacer la valeur de la variable courante par une autre valeur de son voisinage.

$$x_i^j = \begin{cases} x_i^j \pm bw & \text{avec une probabilité } PAR \\ x_i^j & \text{avec une probabilité } (1-PAR) \end{cases} \quad (15)$$

bw (bandwidth) est un autre paramètre de l'algorithme à définir. En fait, ce paramètre représente le pas de variation de chaque variable de décision dans son voisinage.

Notons, finalement, que pour toute nouvelle improvisation, chaque variable de décision va se trouver dans l'un des trois cas suivants:

- ✓ Générée aléatoirement selon l'équation (14).
- ✓ Sélectionnée dans HM et gardée inchangée.
- ✓ Sélectionnée dans HM et ajustée selon l'équation (15).

Etape 4: Mise à jour de HM:

Si la nouvelle harmonie obtenue à l'étape 3 réalise une meilleure optimisation de la fonction objectif, HM est mis à jour en remplaçant la plus mauvaise harmonie qu'il contient par cette nouvelle.

Etape 5: Répétition jusqu'à satisfaction du critère d'arrêt:

Répéter les étapes 3 et 4 jusqu'à ce que le nombre d'itérations maximum prédéfini soit atteint.

Dans notre version nommée FHSA (Fast Harmony Search Algorithm), nous apportons une nouvelle modification de la version initiale de HSA. Cette modification est inspirée des concepts de la recherche réactive (Reactive Search) [BBM07] où la mise à jour (l'accord) des paramètres qui nécessite souvent un superviseur devient une partie intégrante de l'algorithme de recherche. Ceci permet d'assurer une flexibilité sans l'intervention humaine (non supervisée). Ce composant d'apprentissage implanté dans l'algorithme utilise l'historique de la recherche pour augmenter son efficacité et ses performances.

FHSA introduit une nouvelle étape entre l'étape 4 et l'étape 5 de HSA. Cette étape consiste à définir une zone de prohibition de l'espace de recherche de la solution. Cette prohibition consiste à ajuster automatiquement les bornes inférieures et supérieures de chaque variable de décision afin de ne pas perdre du temps à chercher la solution optimale dans des régions déjà explorées et « jugées » non intéressantes.

Pour ce faire, nous introduisons un nouveau paramètre appelé « pas d'ajustement ». Ce paramètre est un nombre réel assez petit δ . L'étape ainsi ajoutée consiste à effectuer les tests suivants :

Pour $i=1$ à N faire

Si $f(x_i + \delta) < f(x_i)$ Alors $x_i^{MIN} = x_i + \delta$

Sinon

Si $f(x_i - \delta) < f(x_i)$ Alors $x_i^{MAX} = x_i - \delta$

Sinon

$x_i^{MAX} = x_i$ et $x_i^{MIN} = x_i$

Fin de Si

Fait

Ce pseudo code montre que l'espace de recherche est réduit à chaque itération de FHSA ce qui augmente considérablement la probabilité de trouver la solution optimale et réduit ainsi le temps nécessaire à la recherche de cette solution.

Un autre point de HSA modifié dans FHSA est le critère d'arrêt. Celui-ci qui était le nombre d'itérations dans HSA devient dans notre algorithme l'obtention d'un espace de recherche irréductible. En somme le critère d'arrêt devient sous la forme :

Si $(x_i^{MAX} - x_i^{MIN}) \leq \varepsilon$ $i = 1, \dots, N$ Alors STOP Fin de Si

Où ε est un terme de précision généralement très petit.

Une dernière conséquence de la réduction de l'espace de recherche est le paramètre de voisinage (bandwidth bw). Celui-ci est ajusté pour chaque variable de décision en fonction de son espace de variation selon l'équation (16).

$$bw = \frac{(x_i^{MAX} - x_i^{MIN})}{c} \quad (16)$$

Où c est un entier naturel que nous prenons généralement comme multiple de 10.

5. APPLICATION

Le réseau investi lors de cette étude est un réseau à courant alternatif à 9 nœuds comprenant 3 nœuds producteurs (Fig. 2).

Les caractéristiques du réseau et les valeurs planifiées des puissances sont données en référence [AF94].

La charge totale est de 315 MW pour une puissance de base égale à 100 MVA. Dans ce système, le générateur 1 est une centrale hydroélectrique et les générateurs 2 et 3 sont de type thermique.

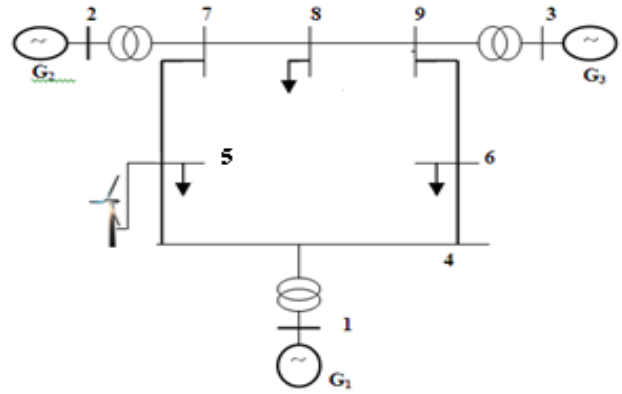


Fig. 2. Réseau IEEE 9-nœuds

Les valeurs des coefficients des fonctions coût des trois générateurs et les limites sur les puissances générées sont regroupées dans le tableau 1 [BBR08].

Tableau 1. Coefficients de coût et limites des puissances générées

Nœud	P_{Gmin} (MW)	P_{Gmax} (MW)	$F(P_{Gi}) = a_i P_{Gi}^2 + b_i P_{Gi} + c_i$ (\$/h)		
			a_i (\$/MW ² h)	b_i (\$/MWh)	c_i (\$/h)
1	10	250	0.11	5	150
2	10	300	0.085	1.2	600
3	10	270	0.1225	1	335

Les valeurs des coefficients des émissions des gaz [MY06] sont regroupées dans le tableau 2.

Tableau 2. Coefficients caractéristiques des émissions de NOx

Nœud	$E(P_{Gi}) = \alpha_i P_{Gi}^2 + \beta_i P_{Gi} + \gamma_i$ (ton/h)		
	α_i (ton/MW ² h)	β_i (ton/MWh)	γ_i (ton/h)
1	-	-	-
2	$6.49 \cdot 10^{-6}$	$-5.554 \cdot 10^{-4}$	$4.091 \cdot 10^{-2}$
3	$3.38 \cdot 10^{-6}$	$-3.550 \cdot 10^{-4}$	$5.326 \cdot 10^{-2}$

Le facteur de pénalité de prix est évalué à 46606 \$/ton.

Les paramètres de l'algorithme FHSA sont pris comme suit:

HMCr = 0.95, PAR = 0.7,

HMS = 2, $bw = \frac{P_{Gmax} - P_{Gmin}}{50}$, $\delta = 10^{-10}$ and $\varepsilon = 10^{-6}$.

Dans cette étude, nous supposons que tous les sites sont ventés avec les mêmes vitesses de vent approchant les 9m/s. Pour produire une puissance maximale de 110 MW, la ferme éolienne est supposée composée de 60 éoliennes identiques avec des pales de 40 mètres. Le coefficient de coût propre à la ferme éolienne est pris égal à zéro.

Pour mettre en évidence l'influence de la présence et l'emplacement de la ferme sur le (DEE), nous avons considéré le réseau sans et avec ferme éolienne.

5.1. Cas 1 : Réseau sans ferme éolienne

Cas 1.1: Minimisation du coût de production: Dispatching Economique (D_ECO).

Cas 1.2: Minimisation des émissions: Dispatching Environnemental (D_ENV).

Cas 1.3: Minimisation simultanée du coût de production et des émissions : Dispatching Economique-Environnemental Combiné (DEEC).

5.1.1 Cas 1.1 : D_ECO et cas 1.2 : D_ENV

Nous avons optimisé les deux fonctions (fonction coût de production et la fonction émissions) séparément. Les résultats optimaux des puissances générées, des pertes de transmission, du coût de production et des émissions des gaz sont regroupés dans le tableau 3.

Tableau 3. Résultats optimaux (cas 1.1 et cas 1.2).

	D_ECO	D_ENV
P_{G1opt} (MW)	87.98	211
P_{G2opt} (MW)	135.51	46.50
P_{G3opt} (MW)	95.29	60.85
Pertes de transmission (MW)	3.788	3.365
Coût de production (\$/h)	5307.42	7791.31
Emissions de NO _x (ton/h)	0.13495	0.07329

D'après les résultats, on en déduit que la minimisation du coût de production et celle des émissions sont des objectifs contradictoires. Les émissions sont maximales lorsque le coût de production est minimal. Les variations du coût de production (cas 1.1) et des émissions de NO_x (cas 1.2) en fonction du nombre d'itérations sont représentées sur la figure 3.

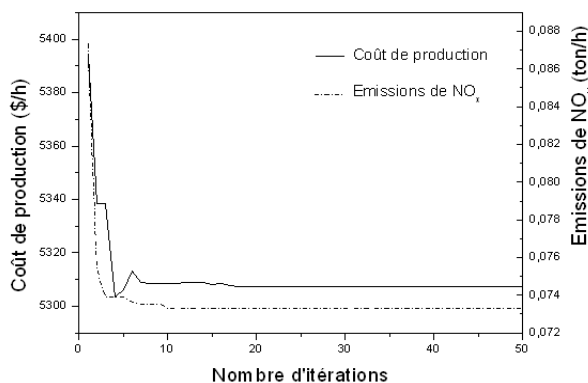


Fig. 3. Convergence du coût de production (cas 1.1) et des émissions (cas 1.2)

Ces deux courbes montrent clairement que FHSA converge rapidement vers la solution optimale.

5.1.2 Cas 1.3 : DEEC

Pour le DEEC, le coût de production et les émissions de NO_x sont minimisées simultanément sous les contraintes imposées.

Les résultats optimaux des puissances générées, du coût de production, des émissions de NO_x, des pertes de transmission et du coût total sont regroupés dans le tableau 4.

Tableau 4. Résultats optimaux (cas 1.3)

P_{G1opt} (MW)	144.79
P_{G2opt} (MW)	79.23
P_{G3opt} (MW)	93.69
Coût de production (\$/h)	5912.49
Emissions de NO _x (ton/h)	0.08732
Pertes de transmission (MW)	2.71
Coût total (\$/h)	9981.96

Relativement au cas 1.1, le coût de production et les émissions ont subi respectivement une augmentation de 605 \$/h et une diminution de 47.63 kg/h.

Relativement au cas 1.2, le coût de production et les émissions ont subi respectivement une diminution de 1878 \$/h et une augmentation 14.03 kg/h.

Les variations du coût total (coût de production + coût des émissions) en fonction du nombre d'itérations sont représentées sur la figure 4.

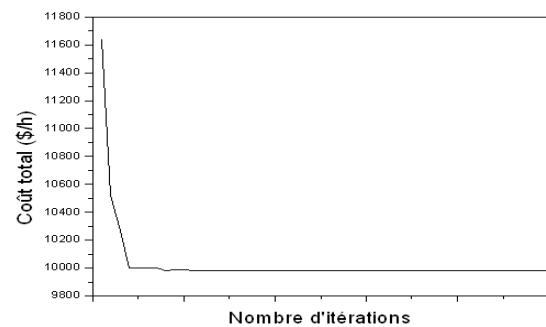


Fig. 4. Variation du coût total en fonction du nombre d'itérations (cas 1.3)

Le graphe montre clairement que FHSA converge rapidement vers la solution optimale.

5.2. Cas 2 : Réseau avec ferme éolienne

Afin de mettre en évidence l'influence de l'emplacement de la ferme éolienne sur le (DEEC), nous avons placé la ferme aux différents nœuds.

Les résultats de simulation concernant les emplacements alloués à la ferme sont reportés sous forme de tableau (Tableau 5) et de graphes sur les figures 5 à 8.

La figure 5 montre les variations du coût total en fonction de l'emplacement de la ferme éolienne.

Tableau 5. Résultats optimaux

	Nœud 4	Nœud 5	Nœud 6	Nœud 7	Nœud 8	Nœud 9
P_{G1opt} (MW)	76.75	76.16	76.43	78.03	77.67	77.57
P_{G2opt} (MW)	60.36	59.99	60.08	60.45	60.35	60.64
P_{G3opt} (MW)	70.75	70.36	70.42	70.71	70.55	71.77
P_{wopt} (MW)	110	110	110	110	110	110
Coût de production (\$/h)	3182.67	3158.45	3166.56	3211.28	3199.23	3222.87
Emissions totales (ton/h)	0.07609	0.07596	0.07599	0.07611	0.07607	0.07629
Pertes transmises (MW)	2.854	1.504	1.934	4.192	3.572	4.981
Coût total (\$/h)	6729.03	6698.70	6708.20	6758.46	6744.43	6778.30

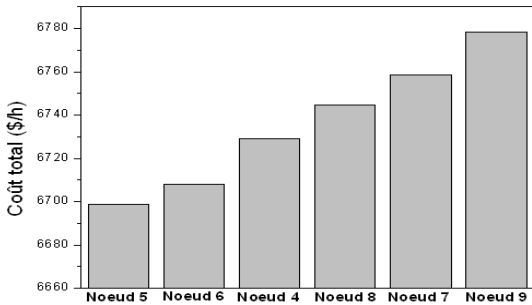


Fig. 5. Variation du coût total

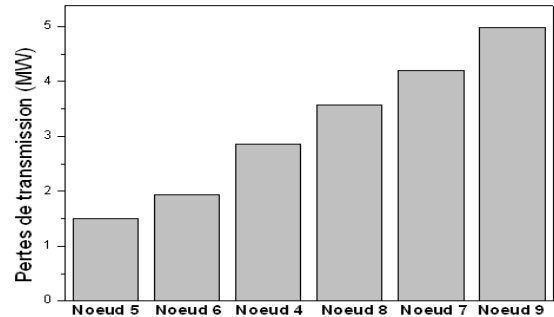


Fig. 8 Variation des pertes transmises

Les variations du coût de production thermique en fonction de l'emplacement de la ferme éolienne sont représentées sur la figure 6.

Les variations des émissions en fonction de l'emplacement de la ferme éolienne sont montrées par le graphe présenté sur la figure 7.

La figure 8 illustre les variations des pertes de transmission en fonction de l'emplacement de la ferme éolienne.

Comme nous pouvons le constater tout de suite à travers les graphes, nous pouvons affirmer que l'emplacement de la ferme au nœud n° 5 donne les meilleurs résultats. C'est l'emplacement optimal.

Afin de mettre en évidence que le nœud 5 est l'emplacement optimal pour l'installation de la ferme éolienne, une comparaison est faite entre FHSA et le logiciel Matpower (figure 9).

Les résultats de simulation obtenus par Matpower en fonction des emplacements alloués à la ferme éolienne, sont regroupés dans le tableau 6.

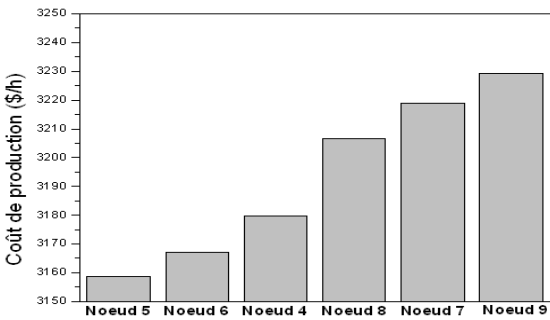


Fig. 6. Variation du coût de production

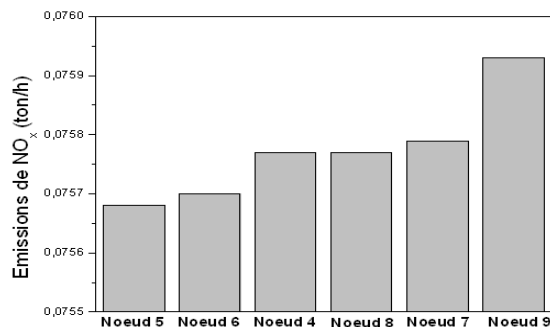


Fig. 7. Variation des émissions

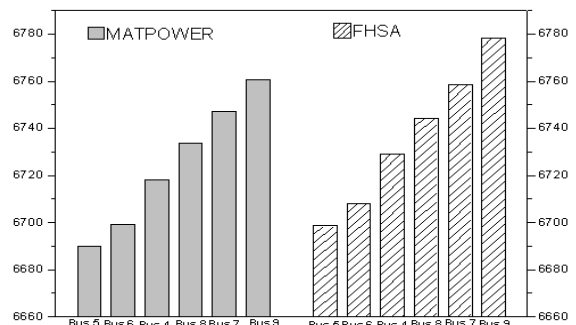


Fig. 9. Coût total obtenu par FHSA et Matpower

Ces résultats montrent une similitude dans le meilleur emplacement de la ferme éolienne. L'emplacement optimal trouvé en appliquant Matpower est aussi le nœud 5.

Tableau 6. Résultats optimaux obtenus par Matpower (DEEC)

	Nœud 4	Nœud 5	Nœud 6	Nœud 7	Nœud 8	Nœud 9
P_{G1opt} (MW)	78.54	78.23	78.63	81.06	80.80	81.64
P_{G2opt} (MW)	61.00	60.55	60.70	60.24	60.33	60.80
P_{G3opt} (MW)	67.97	67.47	67.34	67.47	67.05	66.93
P_{wopt} (MW)	110	110	110	110	110	110
Coût de production (\$/h)	3179.63	3158.75	3167.10	3218.94	3206.69	3229.22
Emissions totales (ton/h)	0.07593	0.07577	0.07579	0.0757	0.07568	0.07577
Pertes de transmission (MW)	2.506	1.251	1.668	3.773	3.175	4.366
Coût total (\$/h)	6718.15	6690.09	6699.37	6747.00	6733.59	6760.65

Ces résultats montrent une similitude dans le meilleur emplacement de la ferme éolienne. L'emplacement optimal trouvé en appliquant Matpower est aussi le nœud 5.

5.3 Comparaison des résultats

Nous allons comparer maintenant les résultats obtenus avec ferme éolienne installée au nœud 5 et sans ferme éolienne afin de se prononcer sur les efficacités de son incorporation dans le réseau d'énergie électrique.

Cas 1.3 : Réseau sans ferme éolienne(DEEC).

Cas 2 : Réseau avec ferme éolienne au nœud 5 (DEEC).

Les valeurs optimales sont reportées dans le tableau 7.

Tableau 7. Comparaison des résultats optimaux

	Cas 1.3	Cas 2
P_{G1opt} (MW)	144.79	76.16
P_{G2opt} (MW)	79.23	59.99
P_{G3opt} (MW)	93.69	70.36
P_{wopt} (MW)	0	110
Coût de production (\$/h)	5912.49	3158.45
Emissions de NO_x (ton/h)	0.08732	0.7596
Pertes transmises (MW)	2.71	1.504
Coût total (\$/h)	9981.97	6698.70

A travers les résultats trouvés, si on analyse les deux cas, nous pouvons dire qu'il y'a un écart entre le coût total, le coût de production thermique, les émissions des gaz et les pertes de transmission.

Les pertes de transmission sont minimisées de 1.206 MW, ce qui implique un gain des pertes égal à 45.5 %.

Les émissions journalière de NO_x pour le cas 1 sont environ 2095 kg/jour et pour le cas 2 autour de 1823 kg/jour. Nous avons donc réalisé, en considérant le cas 2, une diminution de 272 Kg/jour (13 %) de gaz toxique émis dans l'atmosphère.

Le coût total pour le premier cas est 9981\$/h et autour de 6698 \$/h pour le deuxième cas, ce qui représente une différence de 3283 \$/h (32.9%).

CONCLUSION

Dans cet article, nous avons étudié l'effet de l'incorporation et l'emplacement d'une ferme éolienne dans le réseau IEEE 9 nœuds sur le coût et sur l'environnement en appliquant l'algorithme FHSA. Celui-ci est une méta-heuristique utilisant une recherche stochastique aléatoire, faible en paramètres et facile à implémenter. En plus, il ne nécessite aucun calcul de dérivées.

Les résultats de simulation sont très probants, puisque nous avons montré qu'une ferme éolienne, relativement petite, permet de limiter les émissions de NO_x d'une quantité annuelle de l'ordre de 99 tonnes.

REFERENCES

- [Abd07] **A. Abdelli** – *Optimisation multicritère d'une chaîne éolienne passive*, thèse de doctorat en génie électrique de l'institut national polytechnique de Toulouse, 2007.
- [AF94] **P.M. Anderson, A.A. Fouad** – *Power system control and stability*, IEEE Press, Marketing, 1994.
- [BC09] **R. Boqiang, J.A. Chuanwen** – *Review on the economic dispatch and risk management considering wind power in the power market*, Renewable and Sustainable Energy Reviews 13: 2169–2174, 2009.
- [BR00] **L. Benasla, M. Rahli** – *Optimisation des puissances actives par la méthode S.U.M.T avec minimisation des pertes de transmission*, Deuxième Conférence Internationale sur l'Electrotechnique, Oran, Algérie: 13-15, 2000.
- [BBM07] **R. Battiti, M. Brunato, F.Mascia** – *Reactive Search and Intelligent Optimization*, Technical Report

- Università di Trento DIT-07-049, 2007
<http://reactive-search.org>.
- [BBR08] **L. Benasla, A. Belmadani, M. Rahli** – *Hooke-Jeeves' method applied to a new economic dispatch problem formulation*, Journal of Information Science and Engineering (JISE), Vol.24 No. 3, 2008.
- [BBR09] **A. Belmadani, L. Benasla, M. Rahli** – *Etude d'un Dispatching Economique-Environnemental par la méthode Harmony Search*, ACTA Electrotehnica, 50, N° 1: 44-48, 2009.
- [BBR11] **A. Belmadani, L. Benasla, M. Rahli** – *A Fast Harmony Search Algorithm for Unimodal Optimization with application to power system Economic Dispatch*, chapter16, Search Algorithms and Applications, Published by InTech, 2011, ISBN 978-953-307-156-5.
- [CHC06] **C.L. Chen, D.S. Hwang, Y.T. Cheng** – *Effects of Wind Energy Supplied by Independent Power Producers on the Generation Dispatch of Electric Power Utilities*, Electrical Power and Energy Systems, Vol. 30: 553-561, 2008.
- [Gee09] **Z.W. Geem** – *Music-Inspired Harmony Search Algorithm, Theory and applications*, Springer-Verlag Berlin Heidelberg, Studies in Computational Intelligence, Volume 191, ISBN 978-3-642-00184-0, 2009.
- [Gue04] **R.P. Guerrero** – *Differential evolution based power dispatch algorithms*, Thesis of Master of Science, University of Puerto Rico, Mayaguez Campus, 2004.
- [MY06] **R. Ma, H. Yan** – *Multi-objective Optimal Block Transaction model based Transient Stability Evaluation*, Proceedings of the 5th WSEAS International Conference on Applied Computer Science, Hangzhou, China, April 16-18, 2006, pp. 907-911, 2006.
- [M+04] **B. Multon, X. Roboam, B. Dakyo, C. Nichita, O. Gergaud, H. Ben Ahmed** – *Aérogénérateurs électriques, Techniques de l'ingénieur*, D3960, 2004.
- [Pho11] **P. Phonrattanasak** – *Optimal Placement of Wind Farm on the Power System Using Multiobjective Bees Algorithm*, Proceedings of the World Congress on Engineering, 2011.
- [PKK09] **A. Parizad, A. Khazali, M.Kalantar** – *Application of HSA and GA in Optimal Placement of Facts Devices Considering voltage stability and losses*, Word Academy of Science, Engineering and Technology 56, 2009.
- [R+06] **B. Robyns, A. Davigny, C. Saudemont, A. Ansel, V. Courtecuisse, B. Francois, S. Plumel, J. Deuse** – *Impact de l'éolien sur le réseau de transport et la qualité de l'énergie*, Proceedings of the Meeting of the Electro Club EEA, Competition in Electricity Markets, Gif-sur-Yvette:15-16, 2006.
- [VGN03] **P. Venkatesh, R. Gnanadass, P.P. Narayana** – *Comparaison and application of evolutionary programming techniques to combined economic emission dispatch with line flow constraints*, IEEE Transactions on Power Systems, vol. 18, n° 2: 688-697, 2003.
- [Wal86] **Y. Wallach** – *Calculations and programs for power systems network*, Prentice-Hall, Englewood Cliffs, 1986.
- [WL07] **J.Wu, Y Lin** – *Economic Dispatch Including Wind Farm Power Injection*, Proceedings of ISES Solar World Congress: Solar and Human Settlement, 2007.
- [ZMG] **R. D. Zimmerman, C.E. Murillo-Sánchez, D. Gan** – *MATPOWER, Matlabpower system simulation package," Version 2.0:* <http://www.pserc.cornell.edu/matpower/>.