

Application de la méthode hybride RT/RS au problème d'engagement des turbines "Unit Commitment"

R. D. MOHAMMEDI

S. ARIF

A. HELLAL

*Laboratoire d'Analyse et de Commande des Systèmes
d'Énergie et Réseaux Électriques, université Amar Telidji de Laghouat, BP-37G-03000 Laghouat, Algérie.*

Emails: ridha_djamel@yahoo.fr; s.arif@mail.lagh-univ.dz ; a.hellal@mail.lagh-univ.dz

Résumé - Le problème d'établir un programme "allumage/extinction" optimal pour des centrales électriques dans un système de production d'énergie s'appelle le problème d'engagement des turbines ou en Anglais unit commitment problem « UCP ». Un sous problème de l'UCP doit trouver la production optimale pour une combinaison donnée des unités en marche. Ce sous problème s'appelle le problème de répartition économique ou en Anglais economic dispatch problem « EDP ».

Cet article propose une nouvelle approche méta heuristique hybride recherche tabou - recuit simulé pour résoudre le problème de l'UCP. Pour valider l'algorithme élaboré, plusieurs tests sur des réseaux modèles de différentes tailles ont été établis. Les résultats de simulation sont comparés à ceux obtenus par plusieurs références récentes.

Mot Clés : Unit commitment, Economic dispatch, Recherche tabou, Recuit simulé.

NOMENCLATURE

F_T	Coût total de production [€].
$P_i(t)$	Puissance produite par l'unité i à l'instant t [MW].
N_t	Nombre total d'heures.
N	Nombre total d'unités.
$U_i(t)$	État de l'unité i à l'instant t (1 ou 0).
a_i	Coût à vide de l'unité i [€].
b_i	Coefficient du coût linéaire de l'unité i [€/MW].
c_i	Coefficient du coût quadratique de l'unité i [€/MW ²].
$S_i(t)$	Coût total de redémarrage de l'unité i à l'instant t [€].
$P_D(t)$	Puissance demandée par la charge à l'instant t .
P_i^{\max}	Puissance maximale de l'unité i .
P_i^{\min}	Puissance minimale de l'unité i [MW].
$P_R(t)$	Réserve tournante nécessaire à l'instant t [MW].
CSC_i	Coût de redémarrage à froid de l'unité i « cold Start cost » [€].
$ST_i(t)$	Coût de redémarrage de l'unité i à l'instant t « start up cost » [€].
HSC_i	Coût de redémarrage à chaud de l'unité i « hot start cost » [€].
SC_i	Durée de redémarrage à froid de l'unité i « cold start » [heures].
$DC_i(t)$	Coût d'extinction de l'unité i à l'instant t « shut down Cost » [€].
X_i^{ON}	Temps durant lequel l'unité i est allumée [heures].
X_i^{OFF}	Temps durant lequel l'unité i est éteinte [heures].

UR_i Élévation maximale de la puissance pour l'unité i [MW].

DR_i Chute maximale de la puissance pour l'unité i [MW].

I. INTRODUCTION

Le problème d'engagement des turbines (UCP) consiste à choisir les unités de production qui seront opérationnelles sur une échelle de temps discrétisée, de manière à minimiser le coût total de production. Les unités doivent satisfaire la charge ainsi que la réserve tournante. De plus, chaque unité possède ses propres limites de production et un temps minimal de redémarrage et d'arrêt. Il s'agit, donc, d'un problème d'optimisation complexe mixte, combinatoire et non linéaire.

On peut grouper les méthodes de résolution de ce problème en trois classes :

- Méthodes déterministes.
- Méthodes méta heuristiques.
- Méthodes hybrides (déterministe - méta heuristique) ou (méta heuristique – méta heuristique).

Parmi les méthodes déterministes, on trouve la méthode de la liste de priorité qui est simple et rapide. Mais, la solution trouvée n'est pas toujours une solution faisable [1].

La programmation dynamique est une méthode d'optimisation déterministe opérant par phases (ou séquences). Elle se repose sur le principe d'optimalité de Bellman : toute politique optimale est composée de sous-politiques optimales [2].

Une autre méthode déterministe est celle de relaxation Lagrangienne qui se base sur l'équation du Lagrange de la fonction coût totale. Elle consiste à trouver les multiplicateurs de Lagrange (λ_i et μ_i) maximisant la fonction duale qui constitue la borne inférieure du problème primal. Cette méthode itérative est plus rapide que la programmation dynamique. Cependant, la solution trouvée est loin d'être optimale [3].

Les méthodes déterministes assurent une solution optimale ou proche de la solution optimale avec un temps acceptable pour les systèmes de petite taille. Par contre, pour les systèmes de grande taille (plus de 10 unités) ces méthodes souffrent d'un temps de calcul de plus en plus long.

Récemment, pour surmonter ce problème, quelques méthodes se basant sur l'intelligence artificielle telles que les méta heuristiques ont été appliquées.

En fait, les méta heuristiques ont pour objectif de trouver une solution optimale ou proche de la solution optimale pour les systèmes de grande taille avec un temps de calcul acceptable. Dans cet article, nous proposons une méthode hybride dite recherche tabou et recuit simulé (RT/RS) pour résoudre le problème de l'UCP. L'algorithme proposé a été testé avec succès sur plusieurs réseaux modèles de différentes tailles. Les résultats de simulation ont été comparés à ceux trouvés par les méthodes classiques (et une autre méthode méta heuristique présentée et discutée dans une littérature très récente [8].

II. FORMULATION DU PROBLEME

1. Fonction objective

L'objectif de l'UCP consiste à la minimisation de la fonction coût total de production :

$$\min_{P_i(t), U_i(t)} \left[F_T = \sum_{t=1}^N \sum_{i=1}^N [F_i(P_i(t))U_i(t) + ST_i(t)U_i(t) + DC_i(t)(1 - U_i(t))U_i(t-1)] \right] \quad (1)$$

Avec :

$$F_i(P_i(t)) = a_i + b_i P_i(t) + c_i P_i^2(t) \quad i = 1, \dots, N \quad t = 1, \dots, N_t \quad (2)$$

$$ST_i(t) = \begin{cases} HSC_i, & \text{Si } MDT_i \leq X_i^{OFF} \leq MDT_i + SC_i \\ CSC_i, & \text{Si } X_i^{OFF} > MDT_i + SC_i \end{cases}$$

2. Contraintes

Les contraintes de l'UCP sont :

i. Contraintes du système

➤ Demande à satisfaire

$$\sum_{i=1}^N P_i(t)U_i(t) = P_D(t) \quad t = 1, \dots, N_t \quad (3)$$

➤ Réserve à garantir

$$\sum_{i=1}^N P_i^{max}(t)U_i(t) = P_D(t) + P_R(t) \quad t = 1, \dots, N_t \quad (4)$$

ii. Contraintes des unités

➤ Puissance bornée

$$P_i^{min} \leq P_i(t) \leq P_i^{max} \quad t = 1, \dots, N_t \quad (5)$$

➤ Temps minimal d'allumage

$$MUT_i \leq X_i^{ON} \quad i = 1, \dots, N \quad (6)$$

➤ Temps minimal d'extinction

$$MDT_i \leq X_i^{OFF} \quad i = 1, \dots, N \quad (7)$$

➤ Élévation maximale de la puissance

$$\begin{aligned} P_i(t) &\leq \min(P_i^{max}, P_i(t-1) + UR_i) \quad \text{Si} \\ U_i(t-1) &= 1 \quad \& \quad U_i(t) = 1 \\ i &= 1, \dots, N \quad \& \quad t = 1, \dots, N_t \end{aligned} \quad (8)$$

➤ Chute maximale de la puissance

$$\begin{aligned} P_i(t) &\geq \max(P_i^{min}, P_i(t-1) - DR_i) \quad \text{Si} \\ U_i(t-1) &= 1 \quad \& \quad U_i(t) = 1 \\ i &= 1, \dots, N \quad \& \quad t = 1, \dots, N_t \end{aligned} \quad (9)$$

➤ Autres contraintes

Il existe d'autres contraintes tels que : l'état initial des unités, les puissances initiales délivrées par les unités, la contrainte d'équipement, et le fonctionnement obligatoire de certaines unités « must – run »).

III. APPROCHE PROPOSEE

L'approche proposée est une hybridation entre le recuit simulé (RS) et la recherche taboue (RT). Cette hybridation nous permettra de profiter de l'avantage de la méthode du RS: Acceptation de « mauvaises » solutions. Ceci permet, alors, d'explorer une plus grande partie de l'espace de recherche et tend à éviter de s'enfermer trop vite dans la recherche d'un optimum local. Par contre, l'avantage de la RT consiste à interdire (d'où le nom de *tabou*) de revenir sur les dernières positions explorées puisque ces dernières sont conservées dans une *liste taboue* d'une taille donnée qui est un paramètre ajustable de l'heuristique.

1. Codage de la solution

La solution est représentée par une matrice de dimension [$N \times N_t$],

$$S = \begin{pmatrix} U_1(1) & U_1(2) & \dots & U_1(t) & \dots & U_1(N_t) \\ U_2(1) & U_2(2) & \dots & U_2(t) & \dots & U_2(N_t) \\ \vdots & \vdots & \dots & \vdots & \dots & \vdots \\ U_i(1) & U_i(2) & \dots & U_i(t) & \dots & U_i(N_t) \\ \vdots & \vdots & \dots & \vdots & \dots & \vdots \\ U_N(1) & U_N(2) & \dots & U_N(t) & \dots & U_N(N_t) \end{pmatrix}$$

Avec $U_i(t)$ est l'état de l'unité i à l'instant t : Le zéro signifie que la centrale est à l'arrêt et le 1 caractérise son fonctionnement.

2. Création de la solution initiale

Les méthodes de parcours commencent toujours par le calcul d'une solution initiale. Cette solution est, souvent, aléatoire. Pour ce faire, nous avons utilisé une technique basée sur la liste de priorité [1]. Cette technique assure de commencer, toujours, par la même solution initiale. Ceci réduit, considérablement, l'écart entre les résultats. De plus, cette solution est faisable et proche de la solution optimale.

3. Diversification ou perturbation aléatoire

➤ Phase I : Perturbation

La section suivante présente comment effectuer une perturbation aléatoire sur la solution actuelle S . Cette technique nous assure la *diversification* sur l'espace de recherche [4].

```

Début
Choisir unité  $\sim U(1...N)$ , et temps  $\sim t(1...N_t)$ 
Si  $S(\text{unité}, \text{temps}) = 0$  alors
    Trouver quand l'unité a été éteinte  $t_{OFF}$ 
    Trouver quand l'unité a été redémarrée  $t_{ON}$ 
    Durée =  $t_{OFF} - t_{ON}$ 
    Si Durée =  $MDT_{\text{unité}}$  alors
        Pour  $t = t_{OFF}$  jusqu'à  $t_{ON} - 1$ 
             $S(\text{unité}, t) = 1$ 
        FinPour
    Sinon
        Si rand < 0.5 alors
             $S(\text{unité}, t_{OFF}) = 1$ 
        Sinon  $S(\text{unité}, t_{OFF}) = 0$ 
        FinSi
        Pour  $t = t_{OFF} + 1$  jusqu'à  $t_{ON} - 1$ 
            Si  $S(\text{unité}, t-1) = 1$  et  $X_i^{OFF} \geq MUT_{\text{unité}}$ 
                Si rand < 0.5 alors
                     $S(\text{unité}, t) = 1$ 
                Sinon
                    Si  $t \leq t_{ON} - MDT_{\text{unité}}$ 
                         $S(\text{unité}, t) = 0$ 
                    Sinon
                         $S(\text{unité}, t) = 1$ 
                    FinSi
                FinSi
            Sinon  $S(\text{unité}, t-1) = 0$ 
            FinSi
        FinPour
    FinSi
    Si  $S(\text{unité}, t-1) = 0$  et  $X_i^{OFF} \geq MDT_{\text{unité}}$ 
        Si rand < 0.5 alors
             $S(\text{unité}, t) = 1$ 
        Sinon  $S(\text{unité}, t) = 0$ 
        FinSi
    Sinon  $S(\text{unité}, t-1) = 0$ 
    FinSi
    FinSi

```

(rand génère un nombre aléatoire inclus entre 0 et 1)

Pour $S(\text{unité}, \text{temps}) = 1$, on applique le même algorithme avec un changement de 0 par 1, MDT par MUT , X^{OFF} par X^{ON}etc.

La figure 1 présente un exemple d'une perturbation aléatoire effectuée sur la solution initiale avec $MDT_i = 2$ [heures] et $MUT_i = 2$ [heures].

Unité	Temps							
					t			
i	0	1	1	1	1	1	1	0
i	0	1	1	0	0	0	1	0

Fig. 1. Exemple d'une perturbation

➤ Phase II : Réparation

Après avoir effectué une perturbation sur la solution initiale, la nouvelle solution peut violer quelques contraintes. Il faut, donc, rendre cette solution faisable (réparation). Par exemple, si la contrainte (2) est violée (figure 2), c'est-à-dire qu'à l'instant t , la puissance maximale des unités allumées à cette heure est inférieure à la somme de la charge et de la réserve. Dans ce cas, on aura besoin d'allumer plus d'unités à cette heure et le choix des unités à allumer est déterminé suivant la liste de priorité.

Unité	Temps							
		$t-2$	$t-1$	t	$t+1$			
i	0	0	1	1	1	0	0	
j	0	0	0	0	1	1	1	
i	0	0	1	1	1	0	0	
j	0	0	0	1	1	1	1	

Fig. 2. Exemple de réparation de la contrainte (2)

De plus, après avoir effectué la phase I et la réparation précédente, les contraintes (4) et (5) peuvent être violées. Il faut aussi les réparer. La figure 3 et la figure 4 illustrent des exemples de réparation de ces contraintes avec $MUT_i = 3$ [heures] et $MDT_i = 3$ [heures].

4. Intensification ou recherche locale

Le voisinage d'une solution est un sous-ensemble de solutions qu'il est possible d'atteindre par une série de transformations données [4]. Dans ce cas, la recherche locale consiste à déterminer à partir de cette sous ensemble la meilleure solution (optimum local). Dans cette section, nous allons présenter la procédure suivie pour la recherche locale pour assurer une convergence plus rapide.

La procédure de la recherche locale (voisinage) proposée suit presque le même algorithme proposé dans la référence [4]. La seule différence est que le choix de l'unité à éteindre est déterminé suivant la liste de priorité des unités $PL(t)$ tandis

que le choix du temps est fait suivant la liste de priorité des charges P_{charge} . L'algorithme suivant présente la procédure suivie pour l'intensification dans l'approche proposée :

1. Début
2. Initialiser $t=1, i=1$
3. $t = Pcharge(t), i=PL(i)$
4. Si $S(i,t)=1$ alors
5. $S(i,t)=0$
6. Si les contraintes (2), (4), (5), (6) et (7) violées alors
7. Redémarrer l'unité $S(i,t)=1$ Aller à 15
8. Sinon
 - Comparer la réduction du coût de production à l'heure t due à l'extinction de l'unité $i : \Delta C_1$, et l'augmentation du coût ΔC_2 due à l'allumage de l'unité i à cette heure.
9. Si $\Delta C_2 > \Delta C_1$ alors
10. Restaurer l'unité i $S(i,t)=1$
11. Sinon
12. Aller à 15
13. FinSi
14. FinSi
15. Si $i < Taille(PL(t))$ alors $i=i+1$ retourner à 3
16. Sinon Aller à 17 FinSi
17. Si $t < N_t$ alors $t=t+1, i=1$ retourner à 3
18. Sinon Aller à 19 FinSi
19. Fin

Cette méthode progresse itérativement et alternativement entre les phases de diversification, d'intensification et d'apprentissage. Ce processus peut être schématisé par la figure 3. L'algorithme général de recherche est présenté dans la figure 4.

IV. APPLICATIONS NUMERIQUES

Pour résoudre le problème d'engagement des turbines « UCP » dans un réseau d'énergie électrique, en utilisant la modélisation et les méthodes mathématiques présentées auparavant, nous avons élaboré un programme sous MATLAB 7.1. Pour valider ce programme, nous l'avons appliqué sur des réseaux modèles de différentes tailles. Pour voir l'apport de la technique proposée, les résultats de simulation ont été comparés à ceux obtenus dans la littérature les méthodes classiques (et une autre méthode méta heuristique présentée et discutée dans une littérature très récente [8].

5. Exemple 1: Le système Sishaj06 de 10 générateurs

Les caractéristiques des générateurs ainsi que les charges et les réserves durant les 24 heures de ce système sont présentées dans la référence [5]. Afin de montrer l'efficacité de l'algorithme, une comparaison en terme de coût total de production et en temps de calcul a été effectuée avec la méthode de programmation dynamique et autres techniques présentées dans la littérature à savoir la méthode de la recherche arborescente en Anglais *Branch and Bound* « B&B » et l'optimisation par colonie des fourmis « ACO » [5]. Le tableau 1 résume les résultats obtenus. On constate bien que l'approche hybride proposée RT/RS a donné le meilleur résultat, comparativement, aux autres techniques.

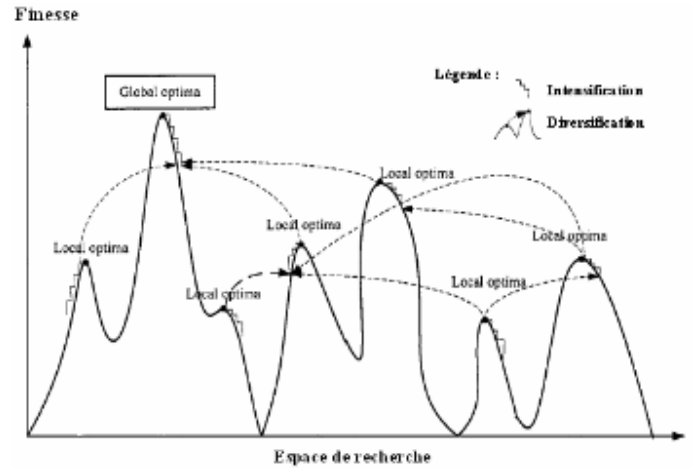


Fig. 3. Processus de recherche « RT/RS »

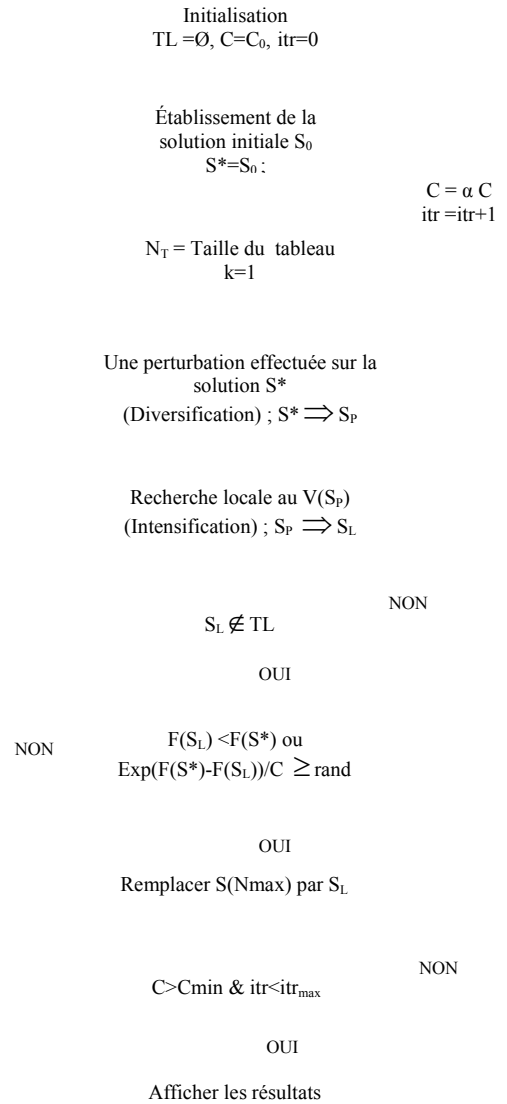


Fig. 4. Algorithme de la méthode hybride RT/RS

6. Exemple 2: Le système IEEE 118 noeuds avec 54 générateurs

Les caractéristiques des générateurs ainsi que les charges et les réserves peuvent être trouvées dans la référence [7]. Le coût minimal de production obtenu par la technique d'hybridation RT/RS appliquée à ce réseau est comparé à celui de la technique SFA « straight forward algorithm » trouvée dans la littérature (Tab. 3). Il est clair que notre approche donne le meilleur résultat. D'après la figure 5, trois cent itérations ont été suffisantes pour atteindre le coût minimal de production pour ce réseau ayant 54 unités. Le temps d'exécution moyen est autour de 170 [s].

V. CONCLUSIONS

Unités	Heures																							
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24
1	200	200	200	200	200	200	200	200	200	200	200	200	200	200	200	200	200	200	200	200	200	200	200	200
2	145.83	138.4	145.77	176.24	202.61	232.27	254.55	270	320	320	300	270	254.55	145.83	138.4	145.77	176.24	202.61	232.27	254.55	270	320	320	300
3	150	150	150	150	150	150	150	150	150	150	150	150	150	150	150	150	150	150	150	150	150	150	150	150
4	280.23	263.32	280.1	349.45	409.45	476.95	520	520	520	520	520	520	520	280.23	263.32	280.1	349.45	409.45	476.95	520	520	520	520	520
5	145.05	136.83	144.99	178.73	207.93	240.78	265.45	280	280	280	280	280	265.45	145.05	136.83	144.99	178.73	207.93	240.78	265.45	280	280	280	280
6	0	123.64	133.69	150	150	150	150	150	150	150	150	150	150	0	123.64	133.69	150	150	150	150	150	150	150	150
7	92.562	86.942	92.521	115.57	120	120	120	120	120	120	120	120	120	92.562	86.942	92.521	115.57	120	120	120	120	120	120	120
8	96.333	90.87	96.293	110	110	110	110	110	110	110	110	110	110	96.333	90.87	96.293	110	110	110	110	110	110	110	110
9	0	0	76.624	80	80	80	80	80	80	80	80	80	80	0	0	76.624	80	80	80	80	80	80	80	80
10	60	60	60	60	60	60	60	60	60	60	60	60	60	60	60	60	60	60	60	60	60	60	60	60
Coût total de production																						83338.249 3 [\$]		
Temps de calcul																						28.32 [s]		

TAB.1. MEILLEURE PLANIFICATION DU SYSTEME SISHAJ06 COMPRENANT 10 UNITES

	Algorithmes	
	SFA [8]	RT/RS
Coût de production total [\$]	1643818	1643515

TAB. 2. COMPARAISON ENTRE LA METHODE RT/RS ET LE SFA

REFERENCES

- [1] A.J. Wood, B.F. Wollenberg, "Power Generation, Operation & Control", second ed., John Wiley & Sons Ltd., New York, (1996).
- [2] R. Bellman, "Dynamic Programming", Princeton University Press, Mathematical Reviews, Vol. 43, pp. 927-930, U. K, August 1957. Disponible sur le lien: www.pnas.org/cgi/reprint/43/10/927.pdf
- [3] J. F. Bard, "Short-Term Scheduling of Thermal-Electric Generators Using Lagrangian Relaxation", Operation Research, Vol. 36, No. 5, pp. 756-766, USA, September 1988.
- [4] G. K. Purushothama and L. Jenkins, "Simulated annealing with local search : A hybrid algorithm for unit commitment", IEEE Trans. on Power Systems, Vol. 18, No. 1, pp. 273-278, February 2003.
- [5] P. Sishaj. Simon, N. Padhy, R. S. Anand , "An ant colony system approach for unit commitment problem", Electric Power Systems Research, Vol. 28, No. 5, pp. 315-323 , USA, June 2006.
- [6] S. A. Kazarlis, A. G. Bakirtzis, and V. Petridis, "A Genetic Algorithm Solution to the Unit Commitment Problem", IEEE Trans. on Power Systems, Vol. 11, No. 1, pp. 83-92, February 1996.
- [7] Les données du système IEEE 118 jeux de barres avec 54 générateurs, Disponible sur le lien http://ee.sharif.edu/IEEE_118_BUS.doc.
- [8] S. H Hosseini, A. Khodaei, F. Aminifar, "A Novel Straightforward Unit Commitment Method for Large-Scale Power Systems", IEEE Trans. on Power Systems, pp. 2134-2143, Vol. 22, No. 4, November 2007.

Cet article a présenté l'application de la méthode hybride recherche du tabou et recuit simulé pour résoudre le problème de l'UC. L'approche proposée nous a permis de profiter de l'avantage de la méthode du recuit simulé : l'acceptation des « mauvaises » solutions. Ceci permet alors d'explorer une plus grande partie de l'espace de recherche.

L'avantage de la recherche du tabou consiste à interdire de revenir sur les dernières positions explorées.

Cette méthode a été testée avec succès sur plusieurs réseaux modèles de différentes tailles présentés dans la littérature. Elle a donné des résultats satisfaisants avec un temps de calcul raisonnable. L'utilisation de la méthode RT/RS dans le problème de l'UC peut constituer une alternative intéressante lorsque les méthodes d'optimisation traditionnelles ne parviennent pas à fournir efficacement les résultats fiables.

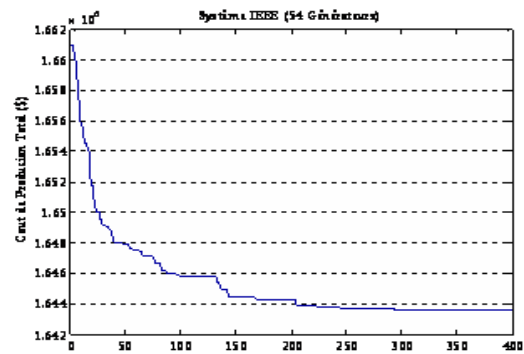


Fig. 5. Variation du coût de production en fonction du nombre d'itérations