

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE  
MINISTERE DE L 'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR  
ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE



N° d'ordre :.....

Série :.....

**Université Mohammed Seddik**

**BENYAHIA - Jijel**

**Faculté des Sciences et de la Technologie**

**Département : Electronique**

**Thèse Présentée**

Pour l'obtention du Diplôme de Doctorat en Sciences

Spécialité : Electronique

**Par : Amel TERKI**

**Thème :**

**Contribution aux algorithmes d'optimisation intelligente:  
Application au problème d'engagement des unités de production  
de l'énergie électrique**

Soutenue le **:21/10/2021** , Devant le Jury composé de :

M. Salim LABIOD	Professeur	U. de Jijel	Président
M. Hamid BOUBERTAKH	Professeur	U. de Jijel	Rapporteur
M. Adel MELLIT	Professeur	U. de Jijel	Examineur
M. Youcef ZENNIR	Professeur	U. de Skikda	Examineur
M. Mouloud BOUCHOUCHA	DPDSDVT	EMP d'Alger	Examineur
M. Hocine LEHOUCHE	MCA	U. de Bejaia	Examineur

## **Remerciements**

Tout d'abord Je tiens à exprimer en tout premier lieu ma profonde gratitude à mon directeur de thèse, Monsieur Hamid Boubertakh, Professeur à l'université de Jijel pour m'avoir encadré, orienté et guidé afin de réaliser ce travail.

Je remercie Monsieur Salim Labiod, Professeur à l'université de Jijel de nous avoir fait l'honneur de présider le jury de ce travail.

J'adresse mes vifs remerciements à : Monsieur Zennir Youcef, Professeur à l'université de Skikda, Monsieur Mellit Adel, Professeur à l'université de Jijel, Monsieur Bouchoucha Mouloud DPDSVDT à l'Ecole Militaire Polytechnique d'Alger , et Monsieur Lehouche Hocine, Maître de Conférences classe A à l'université de Bejaia, membres du jury pour l'intérêt qu'ils ont portés à ce travail en acceptant de l'examiner et de l'évaluer.

Enfin, mes profonds remerciements vont à toute ma famille, qui m'a accompagné tout au long de mes études par son amour inconditionnel et son soutien constant.

# *Dédicace*

*Je dédie ce modeste travail*

*à la mémoire de mon cher père*

*à ma très chère mère*

*à mon mari*

*à mes enfants*

*à toute ma famille*

# Résumé

Le problème d'engagement des unités de production de l'énergie électrique « Unit Commitment Problem, UCP » est l'un des plus grands défis de l'industrie de l'énergie. Il consiste en la recherche de la politique optimale des états Marche/Arrêt des unités de production sur un horizon de planification dans le but de minimiser le coût de la production de l'énergie électrique tout en satisfaisant la demande, la réserve tournante et plusieurs contraintes techniques et opérationnelles.

Dans cette thèse, nous avons exploré le champ des méthodes d'optimisation intelligente dans le but de trouver les approches les plus adaptées à la résolution du problème UCP. Nous avons opté pour l'hybridation de ces techniques pour combiner leurs avantages et aboutir au meilleur résultat possible. En effet, nous avons proposé trois approches ; la première approche est un algorithme hybride PSO-ACO (Particle Swarm Optimization-Ant Colony Optimization) dans lequel l'ACO bien adapté aux problèmes d'optimisation combinatoire, est appliqué pour déterminer la meilleure politique des états Marche/Arrêt des unités dans l'horizon de planification, alors que l'algorithme PSO continu par nature est utilisé pour déterminer la puissance générée par les unités engagées. Pareil, pour la même raison, dans la deuxième approche, les deux versions binaire et réelle de l'algorithme CS sont hybridées pour donner une algorithme nommée « Binary-reel coded Cuckou Search, BCS ». La troisième approche est un algorithme hybride CS-TS (Cuckoo Search -Tabu Search) dans lequel l'algorithme CS est utilisé dans la recherche globale et le TS est utilisé pour la recherche locale. Les trois méthodes proposées sont appliquées avec succès au problème UCP standard et au problème d'engagement des unités de productions avec V2G (UC-V2G) avec la prise en compte dans la fonction objective la minimisation de l'émission polluante. Une étude comparative montre la supériorité de la méthode CS-TS.

**Mots clés:** Systèmes électriques, Energies renouvelables, Problème d'engagement des unités (UCP), véhicule-réseau (V2G), Algorithme de recherche coucou (CS), Algorithme de recherche Tabu (TS), Optimisation par essaims de particules (PSO), optimisation par colonies de fourmis (ACO).

# Abstract

The unit commitment problem (UCP) is one of the big challenges of the power industry. It consists of finding the optimal policy of On/Off status of the generating units over the scheduling horizon in order to minimize the power generation cost to meet the forecasted demand and spinning reserve under a large set of technical and operating constraints.

In this thesis, we have explored the field of the intelligent optimization methods in order to find the most suitable approaches to solving the UCP. We have opted for the hybridization of these techniques in order to combine their advantages to achieve the best possible result. In fact, we have proposed three approaches; the first one is a hybrid PSO-ACO (Particle Swarm Optimization-Ant Colony Optimization) algorithm where the ACO well suited to combinatorial optimization problems, is applied to determine the best policy of the On/Off status of the units over the planning horizon, while the PSO algorithm which is continuous in nature, is used to determine the power generated by the units. Similarly, for the same sake, in the second approach both the binary and real versions of the CS algorithm are hybridized to give an algorithm called "Binary-reel coded Cuckoo Search, BCS". The third approach is a hybrid CS-TS (Cuckoo Search -Tabu Search) algorithm where the CS algorithm is used for the global search and the TS is used for the local search. All the proposed methods are successfully applied to the standard UCP and to the unit commitment problem with V2G (UC-V2G) combined with minimization of the polluting emissions. A comparative study shows the superiority of the CS-TS method.

**Keywords:** Power Systems, Renewable Energy, Unit Commitment Problem (UCP), Vehicle to Grid (V2G), Cuckoo Search Algorithm (CS), Tabu Search Algorithm (TS), Particle Swarm Optimization (PSO), Ant Colony Optimization (ACO).

## ملخص

إن مشكلة التزام الوحدة « Unit Commitment Problem, UCP » من بين أكبر التحديات التي تواجهها إنتاج الطاقة الكهربائية. و هي تتمثل في البحث عن السياسة المثلى لحالات (التشغيل / الإيقاف) لوحدات الإنتاج على مدى أفق تخطيطي وذلك من أجل تقليل تكلفة إنتاج الطاقة الكهربائية مع تلبية الطلب والاحتياطي الدوراني والعديد من القيود التقنية والتشغيلية .

في هذه الأطروحة ، بحثنا بتوسع في مجال طرق التحسين الذكية من أجل إيجاد أنسب الطرق لحل مشكلة UCP. لقد اخترنا تهجين هذه التقنيات لدمج مزاياها وتحقيق أفضل نتيجة ممكنة. في الواقع ، لقد اقترحنا ثلاث مقاربات ؛ المقاربة الأولى عبارة عن خوارزمية هجينة PSO-ACO (تحسين سرب الجسيمات - تحسين مستعمرة النمل) حيث يتم تطبيق ACO المناسب تمامًا لمشاكل التحسين التوافقي ، لتحديد أفضل سياسة لحالات ( التشغيل / الإيقاف) للوحدات في أفق التخطيط ، بينما يتم استخدام خوارزمية PSO المستمرة بطبيعتها لتحديد الطاقة التي تولدها الوحدات المشاركة. في النهج الثاني ، يتم تهجين الإصدارين الثنائي والحقيقي من خوارزمية CS لإعطاء خوارزمية تسمى (مشفرة ثنائي-حقيقي بحث الوقواق BCS)المقاربة الثالثة هي هجين خوارزمية CS-TS (بحث الوقواق- بحث التابو) حيث يتم استخدام خوارزمية CS في البحث الشامل ويتم استخدام TS للبحث المحلي. لقد تم تطبيق الطرق الثلاثة المقترحة بنجاح على مشكلة UCP الأساسية ومشكلة إشراك وحدات الإنتاج مع مركبة الشبكة (V2G) مع مراعاة تقليل الانبعاثات الملوثة . اظهرت الدراسة المقارنة تفوق طريقة CS-TS.

**الكلمات الرئيسية:** أنظمة الطاقة ، الطاقة المتجددة ، مشكلة التزام الوحدة (UCP) ، مركبة الشبكة (V2G) ، خوارزمية بحث الوقواق (CS) ، خوارزمية بحث التابو(TS) ، تحسين سرب الجسيمات (PSO) ، تحسين مستعمرة النمل (ACO).

## **Liste des travaux scientifiques réalisés**

**A.Terki, H. Boubertakh**, "A New Hybrid Binary-Real Coded Cuckoo Search and Tabu Search Algorithm for Solving the Unit-Commitment Problem" International Journal of Energy Optimization and Engineering (IJEEO) Volume 10, Issue 2, April 2021.

**A.Terki, H. Boubertakh, N. Mansouri**, "Synchronization of chaotic systems using genetic and particle swarms algorithms:Acomparative study". the 8th international Conference on Modelling,Identification and Control 15-17 November 2016,Algiers,Algeria.

**A.Terki, H. Boubertakh**, " A New Approach for Solving the Unit Commitment Problem by Hybrid PSO-ACO ". CEIT 2018 the 6th international Conference on Control Engineering & Information Technology 25-27 October 2018, Istanbul, Turkey.

**A.Terki, H. Boubertakh**, " Application of a Binary-Real Coded Cuckoo Search Algorithm for Solving Unit Commitment Problem". International Conference on Advanced Electrical Engineering ICAEE'19 , November 19-22,2019, Algiers. Algeria

**A.Terki, H. Boubertakh**, " Cuckoo Search Algorithm for Solving Unit-Commitment with Vehicle-to-Grid". The 4th International Conference on Electrical Engineering and Control Applications. ICEECA'2019, December 17-19 , 2019. Algeria.

## Table des matières

---

<b>Table des matières</b> .....	1
<b>Liste des figures</b> .....	5
<b>Liste des algorithmes</b> .....	6
<b>Liste des tableaux</b> .....	7
<b>Liste des abréviations</b> .....	8
<b>Introduction générale</b> .....	10
<b>Chapitre 1 : Industrie de production de l'énergie électrique</b>	
1.1 Introduction.....	13
1.2 Composition du secteur de l'industrie de l'énergie électrique.....	13
1.2.1 La production.....	14
1.2.1.1 Les centrales thermiques.....	16
a) Les centrales thermiques à vapeur.....	16
b) Les centrales à gaz.....	17
1.2.1.2 Les centrales nucléaires.....	19
1.2.1.3 Les centrales hydrauliques.....	20
1.2.1.4 Les centrales photovoltaïques.....	22
1.2.1.5 Les centrales éoliennes.....	24
1.2.2 Le transport.....	25
1.2.3 La distribution.....	26
1.2.4 La consommation.....	26
1.2.4.1 Fluctuations de la consommation.....	26
1.2.4.2 Les prévisions de la consommation.....	28
1.3 Stratégie de fonctionnement des centrales électriques.....	29
1) Unités de charge de base.....	31
2) Unités de production intermédiaires.....	31
3) Unités de production de pointe.....	31
4) Unité de réserve : Reserve tournante.....	31
1.4 Impact du secteur électrique sur l'environnement.....	32
1.5 Les réseaux électriques intelligent « Smart grid » .....	33
1.6 Stratégie de planification.....	34
1.7 Conclusion .....	35
<b>Chapitre 2 : Problème d'engagement des unités de production de l'énergie électrique</b>	
1.2 Introduction.....	36

## Table des matières

---

2.2	Caractéristiques des unités de production électrique.....	36
2.3	Formulation du Problème d'engagement des unités de production	
	"Unité Commitment problème (UCP)" .....	38
2.3.1	Fonction objectif de l'UC.....	39
2.3.2	Contraintes du problème d'engagement des unités de production.....	41
2.3.2.1	Contraintes du Système.....	41
	a) La contrainte d'équilibre des puissances (Power balance constraint) .....	41
	b) La contrainte de la réserve tournante (Spinning Reserve Constraints)....	41
2.3.2.2	Contraintes des unités.....	41
	a) Limite de production de puissance (Power generating limit) .....	41
	b) Temps minimal d'allumage et d'extinction (Minimum up/down time)...	41
	c) Contraintes de vitesse de rampe (Ramp rate Constraints) .....	42
3.3.2.2	Minimisation des émissions de polluants.....	42
2.5	État de l'art sur les différentes techniques de résolution de l'UCP.....	43
2.2	Conclusion .....	47
<b>Chapitre 3 : Algorithmes d'optimisation intelligente</b>		
3.2	Introduction .....	48
3.1	Méthodes intelligentes.....	48
3.1.1	Les méthodes intelligentes à base de solution unique.....	48
3.2.1.1	Le recuit simulé.....	49
3.2.1.2	La recherche tabou.....	49
3.2.2	Les méthodes intelligentes à base de population de solutions.....	51
3.2.2.1	Les algorithmes évolutionnaires.....	51
3.2.2.2	Intelligence des essaims.....	55
	1) Algorithme d'Optimisation par Essaim Particulaire (OEP) .....	56
	2) Le système immunitaire artificiel (SIA) .....	59
	3) Algorithme de colonies de fourmis.....	60
	4) Algorithme de colonies d'abeilles artificielles.....	62
	5) Algorithme de la recherche coucou.....	64
	a) Modèle biologique.....	64
	b) Modèle mathématique.....	65
	c) Le vol de Lévy (Lévy flight) .....	66
	d) Principe de la recherche coucou.....	67

## Table des matières

e) La version binaire de la recherche coucou (BCS) .....	68
3.3 Conclusion .....	69
<b>Chapitre 4 : Résolution de l'UCP par des méthodes d'optimisation intelligente</b>	
4.1 Introduction .....	70
4.2 Gestion des contraintes de L'UC.....	70
4.2.1 Réparation de la contrainte de réserve tournante (Spinning Reserve Constraint Repairing) .....	71
4.2.2 Réparation de la contrainte du temps minimal d'allumage et d'extinction (Minimum up/down time Constraints Repairing).....	71
4.2.3 Désengagement des unités excédentaires (De-commitment of excess units)...	72
4.2.4 Réparation de la contrainte d'équilibre de puissance (Power balance constraint repairing) .....	73
4.3 Première approche: l'algorithme hybride de l'optimisation par essaim particulaire (PSO) et l'algorithme d'optimisation par colonie de fourmis (ACO).....	74
4.4 Deuxième approche: recherche coucou codée en binaire- réel "binary-real coded Cuckoo Search" (BCS) .....	75
4.5 Troisième approche: l'algorithme hybride de la recherche coucou et la recherche tabou "hybrid Cuckoo Search-Tabu Search algorithm" (CS-TS) .....	75
4.6 Application des algorithmes proposés pour résoudre le problème de l'UC.....	77
4.6.1 Résultat de simulation d'un système à 10 unités.....	77
4.6.2 Application des algorithmes proposés à des systèmes à grande échelle.....	80
4.6.3 Etude comparative.....	84
4.7 Conclusion .....	85
<b>Chapitre 5 : Application des méthodes d'optimisation intelligente au problème UC     avec V2G pour la minimisation du coût et de l'émission</b>	
5.1 Introduction.....	86
5.2 Véhicule au réseau (Vehicle to Grid "V2G").....	86
5.3 Formulation du Problème de l'UC-V2G.....	87
5.3.1 Fonction objectif de l'UC-V2G avec minimisation d'émission polluante.....	87
5.3.2 Contraintes du problème de l'UC-V2G.....	88
5.3.2.2 Contraintes du Système.....	88
a) La contrainte d'équilibre des puissances (Power balance constraint) ...	88
b) La contrainte de la réserve tournante (Spinning Reserve Constraints) ...	88

## Table des matières

---

5.3.2.2	Contraintes des unités.....	88
5.3.2.3	Contraintes des V2G. ....	88
a)	Équilibre des véhicules en grille en V2G (Gridable vehicle balance in V2G).....	88
b)	Limites de stationnement des véhicules (Vehicle parking limits) .....	89
c)	Fréquence de charge/décharge (Charging-discharging frequency) .....	89
d)	État de charge ( <i>Soc</i> ) .....	89
e)	Efficacité ( <i>Effi</i> ).....	89
f)	Puissance des véhicules.....	89
5.4	Application des algorithmes proposés pour résoudre le problème de l'UC-V2G.....	89
5.5	Résultat de simulation d'un système à 10 unités.....	90
5.6	Conclusion .....	96
<b>Conclusion générale</b> .....		97
<b>Bibliographie</b> .....		100

Liste des figures

**Figure. 1.1.** Illustration de la constitution d'un réseau électrique..... 13

**Figure. 1.2.** Groupes turbo-alternateur..... 14

**Figure. 1.3.** Répartition mondial des modes de production d'électricité. .... 15

**Figure. 1.4.** Principe de fonctionnement d'une centrale thermique à vapeur..... 17

**Figure. 1.5.** Principe de fonctionnement d'une centrale à gaz..... 18

**Figure. 1.6.** Principe de fonctionnement d'une centrale nucléaire..... 19

**Figure. 1.7.** Principe de fonctionnement d'une centrale hydraulique..... 21

**Figure. 1.8.** Centrale photovoltaïques..... 23

**Figure. 1.9.** Une installation éolienne..... 24

**Figure 1.10.** Courbe de charge de l'Algérie ; fluctuations journalières ..... 27

**Figure. 1.11.** Courbe de charge de l'Algérie ; fluctuations hebdomadaires..... 28

**Figure. 1.12.** Courbe de charge de l'Algérie, fluctuations saisonnières..... 28

**Figure. 1.13.** Stratégie de génération d'une société d'électricité..... 30

**Figure. 2.1.** Caractéristique entrée-sortie d'une unité de production..... 39

**Figure. 3.1.** Structure générale de l'algorithme génétique..... 55

**Figure. 3.2.** Nuage d'oiseaux ..... 56

**Figure. 3.3.** Bancs de poissons..... 56

**Figure. 3.4.** Déplacement d'une particule..... 57

**Figure. 3.5.** La danse en ronde de l'abeille découvreuse..... 63

**Figure. 3.6.** La danse frétilante ou danse de huit..... 63

**Figure. 3.7.** Oiseau de coucou..... 65

**Figure. 3.8.** Œuf de coucou (gris) mouchet ..... 65

**Figure. 4.1.** Organigramme de désengagement des unités excédentaires..... 73

**Figure. 4.2.** La Demande de charge  $D_t$  pendant 24 heures..... 78

**Figure. 4.3.** Evolution de la fonction coût en fonction des itérations avec les trois approches (PSO-ACO, BCS et CS-TS) pour le système à 10 unités..... 80

## Liste des algorithmes

<b>Algorithme 3.1.</b> Le recuit simulé.....	49
<b>Algorithme 3.2.</b> La recherche tabou.....	51
<b>Algorithme 3.3.</b> Optimisation par essaim de particules.....	59
<b>Algorithme 3.4.</b> Algorithme de colonies de fourmis pour le TSP.....	62
<b>Algorithme 3.5.</b> Algorithme de colonies d'abeilles artificielles.....	64
<b>Algorithme 3.6.</b> Algorithme de la recherche coucou CS.....	68
<b>Algorithme 4.1.</b> (Minimum up/down time).....	72
<b>Algorithme 4.2.</b> L'algorithme hybride (PSO-ACO) pour l'UCP.....	74
<b>Algorithme 4.3.</b> La recherche coucou codée en binaire- réel (BCS) pour l'UCP.....	75
<b>Algorithme 4.4.</b> L'algorithme hybride (CS-TR) pour l'UCP.....	76

## Liste des tableaux

<b>Tableau. 4.1</b> : Les propriétés du système de base des 10 unités.....	77
<b>Tableau. 4.2</b> : La demande de charge $D_t$ des 10 unités sur un horizon temporel de 24h...	78
<b>Tableau. 4.3</b> : Valeurs spécifiques des algorithmes proposés.....	79
<b>Tableau. 4.4</b> : La meilleure solution trouvée avec un système à 10 unités de l’algorithme (PSO-ACO) .....	81
<b>Tableau. 4.5</b> : La meilleure solution trouvée avec un système à 10 unités de l’algorithme (BCS) .....	82
<b>Tableau. 4.6</b> : La meilleure solution trouvée avec un système à 10 unités de l’algorithme (CS_TS) .....	83
<b>Tableau. 4.7</b> : Comparaison des résultats obtenus par les algorithmes proposés avec des systèmes de 10 à 100 unités.....	84
<b>Tableau. 4.8</b> : Comparaison entre le CS-TS et d'autres algorithmes avec des systèmes de 10 à 100 unités.....	85
<b>Tableau. 5.1</b> : Valeurs spécifiques des algorithmes proposés.....	90
<b>Tableau. 5.2</b> : Coefficients d'émission des unités.....	91
<b>Tableau. 5.3</b> : Emission et réserve des 10 unités de production sans V2G de l’algorithme (CS-TS) .....	92
<b>Tableau. 5.4</b> : Emission et réserve des 10 unités de production avec V2G de l’algorithme (CS-TS) .....	93
<b>Tableau. 5.5</b> : Les meilleures solutions trouvées avec et sans V2G d’un système à 10 unités de l’algorithme (CS_TS) .....	94
<b>Tableau. 5.6</b> : Les solutions optimales trouvées avec les algorithmes proposés d’un système de 10 unités pour 50.000 véhicules connectés au réseau.....	94
<b>Tableau. 5.7</b> : Puissance des unités pendant 24 heures pour 50.000 véhicules connectés au réseau avec CS_TS.....	95

## Liste des abréviations

<b>ACO</b>	L'optimisation par colonies de fourmis (Ant Colony Optimization)
<b>BCS</b>	L'algorithme binaire de la recherche coucou (Binary Cuckoo Search)
<b>CS</b>	La recherche coucou (Cuckoo Search)
<b>CS-TS</b>	L'algorithme hybride de CS et la Recherche Tabou
<b>DE</b>	La répartition économique (Dispatching Economique)
<b>TS</b>	La Recherche Tabou (Tabou Search)
<b>PSO</b>	L'optimisation par essaim de particules (Particle Swarm Optimization)
<b>PSO-ACO</b>	L'algorithme hybride de PSO et de l'ACO
<b>UC</b>	Engagement des unités (Unit Commitment)
<b>UCP</b>	Problème d'engagement des unités de production (Unit Commitment Problem)
<b>V2G</b>	Le véhicule au réseau (Vehicle-to-Grid)
<b>UC-V2G</b>	Engagement des unités avec le véhicule au réseau (Vehicle to Grid)

## Table des matières

Paramètre	Signification
$N$	Nombre total d'unités de production
$T$	Période de planification
$u_{i,t}$	État de l'unité $i$ à l'heure $t$ (On = 1, Off = 0)
$P_{i,t}$	Puissance de sortie de production de l'unité $i$ à l'heure $t$
$P_i^{max}$	Puissance de sortie maximale de l'unité $i$
$P_i^{min}$	Puissance de sortie minimale de l'unité $i$
$D_t$	Demande de charge du système à l'heure $t$
$R_t$	Réserve tournante du système à l'heure $t$
$f_i$	Heure de démarrage à froid de l'unité $i$
$e_i$	Coût de démarrage à froid de l'unité $i$
$d_i$	Coût de démarrage à chaud de l'unité $i$
$C_{it}(P_{it})$	Coût du carburant <b>Coût(C)</b> de l'unité $i$ à l'heure $t$
$ST_{it}$	Coût de démarrage de l'unité $i$ à l'heure $t$
$\Gamma_i^{down}$	Temps d'arrêt minimal de l'unité $i$
$\Gamma_i^{up}$	Temps de fonctionnement minimal de l'unité $i$
$\tau_{i,t}^{on}$	Durée de marche continu de l'unité $i$ à l'heure $t$
$\tau_{i,t}^{off}$	Durée de l'arrêt continue de l'unité $i$ à l'heure $t$
$\sigma_i$	État initial de l'unité $i$

## Introduction générale

Le processus de production de l'électricité passe par quatre étapes ; la production, le transport, la distribution et la consommation. L'électricité est d'abord produite dans des usines appelées "centrales". Celles-ci transforment l'énergie primaire (thermique, nucléaire, hydraulique, éolien,...) en énergie électrique. Les statistiques montrent que 63,9 % la production mondiale d'électricité en 2018 provient des combustibles fossiles, 10,1 % du nucléaire et 25,5 % des énergies renouvelables (hydroélectricité 16,2 %, éolien 4,8 %, solaire 2,1 %, biomasse 1,9 %, géothermie 0,3 %). Dans la deuxième étape l'électricité est acheminée via un réseau de câbles de très haute tension vers les agglomérations de consommateurs. Dans la troisième étape, au moyen de ligne de basse et moyenne tension elle est distribuée aux clients selon leurs besoins, ces derniers seront facturés selon leurs taux de consommation dans la dernière étape.

Une industrie d'électricité fiable et bon marché exige une planification opérationnelle économique du système électrique tout en respectant les diverses contraintes pour transférer l'énergie électrique des centrales aux consommateurs avec la sécurité des personnes et des équipements. Cet objectif est atteint en résolvant un problème d'optimisation connu sous le nom du problème d'engagement des unités de production de l'énergie électrique "Unit Commitment Problem (UCP)".

L'UCP consiste à identifier une planification des unités à connecter afin de minimiser le coût de la connexion et la déconnexion des unités et la répartition économique « Economic Dispatch (ED) » tout en satisfaisant la demande, la réserve tournante et plusieurs contraintes techniques et opérationnels. Ce problème a été toujours un défi des chercheurs; c'est un problème à nombres entiers mixte de grande dimension et à fonction objectif non linéaire. En effet, trouver une solution optimale où même une bonne solution sous-optimale et un grand challenge qui a le potentiel d'économiser beaucoup d'argent. L'UCP est divisé en deux sous-problèmes ; le premier consiste en la programmation Marche/Arrêt des unités de production de l'énergie électrique pour chaque période de temps sur un horizon de planification, tandis que le second consiste à la répartition économique de la charge sur les unités en marche. L'objectif est de minimiser le coût la production c.-à-d. maximiser le profit tout en satisfaisant la demande et certains critères techniques et opérationnels pour garantir la fiabilité du système.

Ces dernières années, les facteurs environnementaux ont été de plus en plus un des préoccupations de tous les gouvernements des pays du monde. Des efforts ont été menés, et

des recommandations ont été données pour la diminution des émissions polluantes par le protocole de Kyoto en 2005 et plus récemment l'accord de Paris en 2015. L'industrie de production de l'énergie électrique responsable d'un grand pourcentage d'émission de CO<sub>2</sub>, (environ 45% en 2019 [Combe, 2019]) se retrouve contrainte à s'impliquer dans cette cause en donnant plus d'attention à ce sujet. En effet, ce problème a été résolu par la reformulation du problème de l'UC en intégrant dans la fonction objectif la minimisation des déchets polluants. Il s'agit donc de rechercher la solution qui réalise un bon compromis entre le coût et l'émission polluante.

Par ailleurs, le développement de nouvelles technologies dans le cadre des réseaux intelligents (Smart Grid) dans le but de rationaliser l'exploitation des ressources d'énergie renouvelables est susceptible de diminuer le coût de production et réduire le taux des émissions polluantes. Parmi ces technologies, l'intégration des véhicules électriques rechargeables dans le réseau « Vehicle-to-Grid (V2G) ». Les véhicules V2G peuvent être vus comme des petites unités capables d'alimenter le réseau électrique. Un V2G a le potentiel de stocker le surplus des énergies renouvelables quand la demande est faible et le restitué aux moments de forte demande de charge. Ainsi, d'une part, le V2G peut substituer aux petites unités coûteuses et permet donc de diminuer les coûts d'exploitation et d'autre part il permet de réduire les émissions de gaz polluants si les véhicules sont chargés par des sources d'énergie renouvelables. Une planification optimale des unités de production classiques et des véhicules électrique V2G peut être obtenue par la résolution du problème UC avec V2G (UC-V2G) où le nombre d'unités augmente de façon exponentielle ce qui rend ce dernier plus complexe que le problème standard. Dans ce problème l'objectif est de minimiser à la fois le coût et l'émission polluante tout en respectant les contraintes des unités et du V2G.

Plusieurs méthodes ont été proposées dans la littérature pour résoudre l'UCP. Parmi ces méthodes, on trouve des approches d'optimisation intelligentes inspirées de certains phénomènes naturels et du comportement de certains animaux et insectes qui ont une tendance très active cette dernière décennie. Parmi ces approches on trouve les algorithmes génétiques « Genetic Algorithms (GA) », l'optimisation par essaim de particules « Particle Swarm Optimization (PSO) », l'algorithme de colonies de fourmis « Ant Colony Optimisation (ACO) », l'algorithme de colonies d'abeilles « Bees Algorithm (BA) » et la recherche coucou « Cuckoo Search (CS) »...etc. Chacune de ces méthodes se caractérise par des points forts et des points faibles.

Les travaux de notre thèse visent à développer de nouvelles approches d'optimisation intelligente hybrides qui combinent les avantages des méthodes standards pour la résolution de l'UCP conventionnel et du problème UC-V2G.

La thèse est organisée en cinq chapitres.

**Le premier chapitre** présente les différentes étapes du processus de l'industrie de production de l'énergie électrique, les différents types de centrales électriques et leurs caractéristiques.

**Le deuxième chapitre** est consacré à la formulation du problème d'engagement des unités de production de l'énergie électriques UCP. Ainsi, la définition du problème standard est présentée en premier avec sa fonction objective et ses contraintes. A la fin du chapitre un état de l'art sur les méthodes utilisées pour la résolution du problème est donné.

**Le troisième chapitre** est une synthèse des méthodes d'optimisation intelligentes. Chaque approche est présentée de façon succincte.

Les deux derniers chapitres (**chapitre 4** et **chapitre 5**) présentent les principales contributions de notre travail. Dans le quatrième chapitre nous proposons trois algorithmes d'optimisation intelligente pour résoudre l'UCP. Le première algorithme est basée sur l'algorithme de la recherche coucou codée en binaire- réel "Binary-real coded Cuckoo Search (BCS)", le deuxième algorithme est une hybridation de l'algorithme de la recherche coucou et la recherche tabou "hybrid Cuckoo Search-Tabu Search algorithm (CS-TS) " et le troisième algorithme est une hybridation de l'algorithmes d'optimisation par essaim particulaire et l'algorithme d'optimisation par colonie de fourmis "hybrid Particle Swarm Optimization-Ant Colony Optimization (PSO-ACO) ". Dans le cinquième chapitre, nous appliquons les algorithmes proposés à la résolution du problème de l'UC avec V2G pour l'optimisation du coût total de production et les émissions de gaz polluant.

A la fin de cette thèse, nous présentons une conclusion générale et des perspectives de nouvelles directions de recherche.

# **CHAPITRE 1**

---

## **Industrie de production de l'énergie électrique**

---

### **Sommaire**

---

<b>1.1 Introduction.....</b>	<b>13</b>
<b>1.2 Composition du secteur de l'industrie de l'énergie électrique.....</b>	<b>13</b>
<b>1.3 Stratégie de fonctionnement des Centrales électriques.....</b>	<b>29</b>
<b>1.4 Impact du secteur électrique sur l'environnement.....</b>	<b>32</b>
<b>1.5 Les réseaux électriques intelligent « Smart grid » .....</b>	<b>33</b>
<b>1.6 Stratégie de planification.....</b>	<b>34</b>
<b>1.7 Conclusion.....</b>	<b>35</b>

---

## 1.1 Introduction

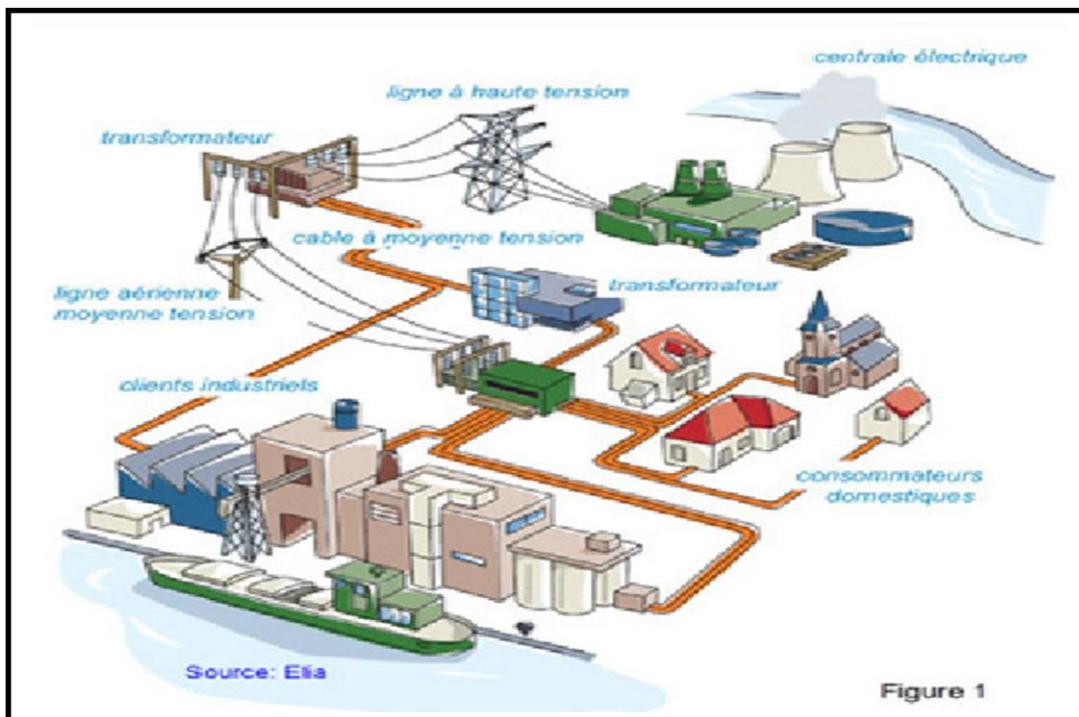
L'industrie de l'énergie électrique comprend toutes les entreprises impliquées dans la production, le transport, la distribution et la commercialisation de l'électricité. Son rôle est d'assurer en tout temps et en tout lieu la production correspondante à la demande des consommateurs.

Dans ce chapitre, nous allons présenter les différents constituants de l'industrie de production de l'énergie électrique. Nous allons commencer par la description des différents types d'unités de production. Nous allons en particulier souligner les avantages et les inconvénients de chaque type. Nous allons ensuite discuter des différentes fluctuations que peut avoir la demande de charge et la stratégie globale de gestion des centrales électrique en fonction de la consommation.

## 1.2 Composition du secteur de l'industrie de l'énergie électrique

L'industrie de l'électricité peut être subdivisée en quatre fonctions : la production, le transport, la distribution et la consommation. Pour assurer ces objectifs le processus fait appel à un ensemble de systèmes interconnectés.

Il existe entre ces fonctions des différences technologiques et économiques [Steiner, 2001]. La figure 1.1 présente la constitution d'un réseau électrique [Jomaux, 2015].



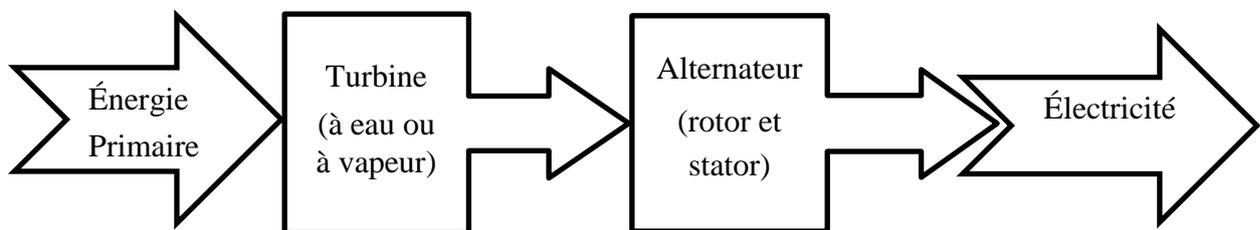
**Figure 1.1.** Illustration de la constitution d'un réseau électrique [Jomaux, 2015].

Chaque système assure une ou plusieurs fonctions bien définies. Le réseau électrique est l'ensemble des infrastructures permettant d'acheminer l'énergie électrique des centres de production (centrales électriques), vers les consommateurs d'électricité. Le but principal d'un réseau électrique est de pouvoir alimenter la demande des consommateurs.

Les réseaux électriques présentent des caractéristiques spécifiques de fonctionnement, différentes des autres types d'industries. Ces caractéristiques sont propres à la technologie actuelle de l'industrie électrique et indépendante des formes institutionnelles d'organisation (le monopole ou la concurrence). Le réseau est décomposé de sous-système. Les sous-systèmes sont décomposés en composants bien déterminés. En règle générale et en pratique ce sont sur ces composants que l'on effectuera de la maintenance et non sur le système. Chaque composant peut être ensuite décomposé en pièce élémentaire qui est en général l'élément qui fera l'objet d'un échange standard. Pour satisfaire les besoins décrits précédemment, la chaîne énergétique doit avoir une description qui représente précisément son fonctionnement, ses associations et ses priorités. De façon très générique un réseau électrique est toujours composé de quatre grandes parties [Fateh Amir, 2012]:

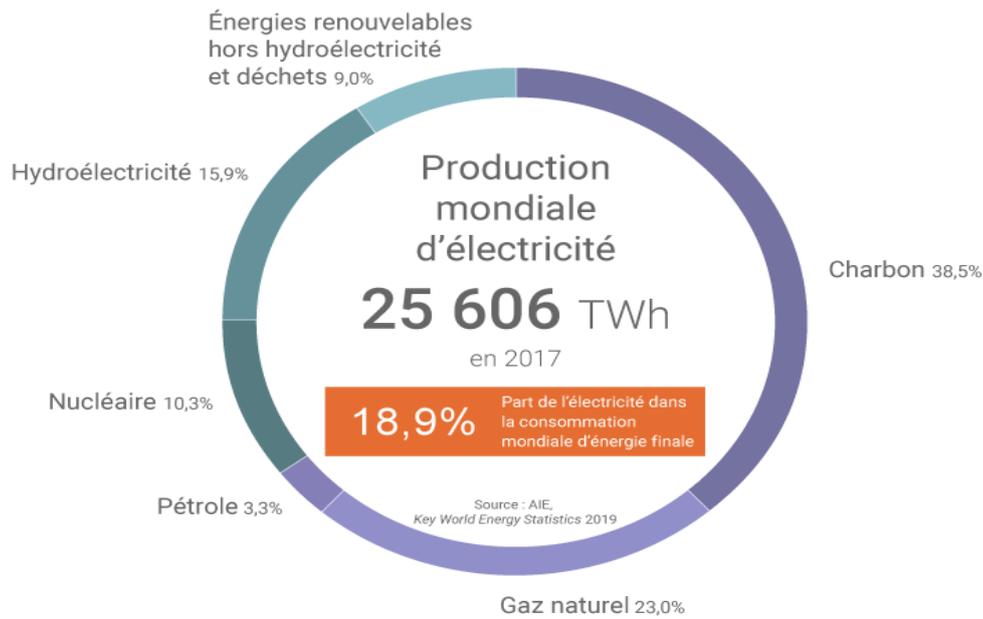
### 1.2.1 La production

C'est la génération de l'ensemble des puissances consommées par le réseau entier, en grande majorité les tensions produites sous la forme de système triphasé par l'intermédiaire d'alternateurs entraînés à partir de divers types de sources d'énergie dite primaires. Un moyen de production d'énergie électrique est défini comme toute installation capable de convertir une source d'énergie primaire en énergie électrique pouvant être injectée sur un réseau (centrale électrique). Dans les centrales électriques, l'électricité est fournie par les groupes "turbo-alternateur" qui transforment l'énergie primaire (thermique, nucléaire, hydraulique, éolien) en énergie électrique comme le montre la figure 1.2.



**Figure 1.2.** Groupes turbo-alternateur

Les centrales de production électriques utilisent d'une façon générale : le charbon, le pétrole et le gaz (centrales thermiques classiques) ou de l'uranium enrichi (centrales nucléaires) pour produire la chaleur initiale, comme il existe des centrales qui utilisent les énergies renouvelables (photovoltaïque, éolienne,...). La répartition au niveau mondial de l'utilisation d'énergies primaires pour la production d'électricité en 2017 est illustrée par la figure 1.3 [L'EIA, 2019].



**Figure 1.3.** Répartition mondiale des modes de production d'électricité [L'EIA, 2019].

En 2017, les centrales à charbon ont produit davantage d'électricité dans le monde que l'ensemble des filières renouvelables et nucléaire. L'électricité a compté pour 18,9% de la consommation finale d'énergie dans le monde. Le mix de production électrique au niveau mondial reste encore largement dominé par le charbon (38,5%). La production des filières dites « décarbonées » progresse mais ces dernières restent pour l'heure minoritaires dans le mix électrique mondial environ (35%) de la production [L'EIA, 2019].

L'Algérie se repose presque exclusivement sur les combustibles fossiles (99,2 %) pour répondre aux besoins croissants d'électricité de sa population. Les énergies renouvelables n'occupent donc qu'une faible part du mix électrique national (0,8%), et leur production est partagée entre la filière hydraulique qui a généré en 2013, 389 GWh, soit (0,7%) du totale, et la filières solaires photovoltaïque (11GWh) et thermodynamique (58 GWh) qui représentent (0,1%) du bilan [Inventaire, 2013].

Les différentes techniques de production se distinguent par leur structure de coûts. En fait Les principales composantes du coût de la production de l'électricité sont les prix des

combustibles (livrés), les coûts en capital et les coûts d'exploitation et de maintenance. Ces coûts varient également avec les performances de la technologie de production (facteur de charge, rendement thermique et durée de vie de l'installation) [Saguan, 2007].

La centrale est donc l'élément de base de l'organisation des moyens de production d'électricité. Elle peut regrouper sur un même site plusieurs unités de production, souvent de même technologie et de même puissance. Chaque unité de production est composée d'une turbine (ou en général un moteur) et d'un alternateur pour produire de l'énergie électrique à courant alternatif. Les turbines peuvent être entraînées par différentes sources d'énergie primaires. Les centrales de production électriques utilisent d'une façon générale : le charbon, le pétrole et le gaz (centrales thermiques classiques) ou de l'uranium enrichi (centrales nucléaires) pour produire la chaleur initiale. La plupart ont une capacité comprise entre 200MW et 2000 MW afin de réaliser les économies des grosses installations. En Algérie le groupe le plus puissant est à cycle combiné au niveau de la centrale SKS d'une puissance de 825 MW se trouvant à Skikda [Saguan, 2007; Fateh Amir, 2012; Operateur]. Il existe plusieurs types des centrales de production.

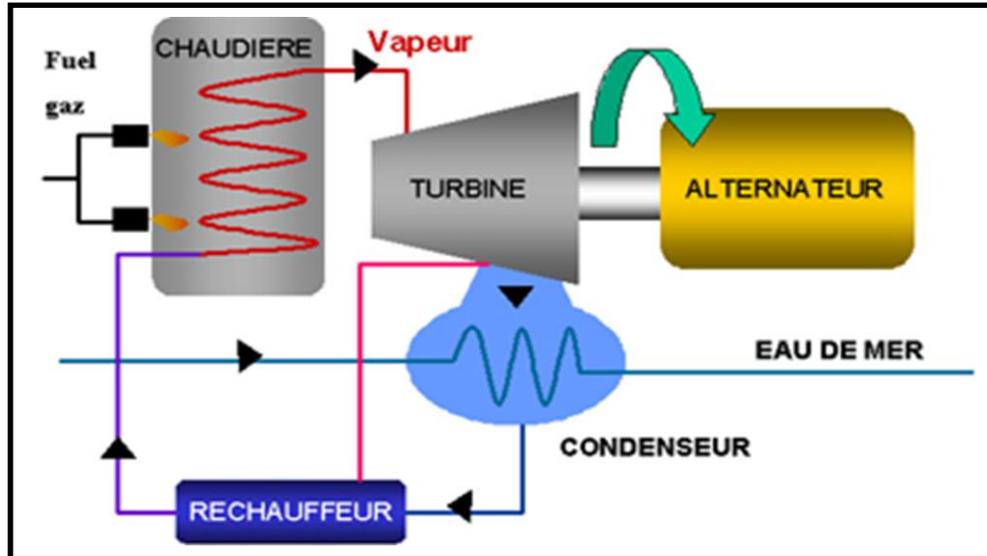
### **1.2.1.1 Les centrales thermiques**

La centrale thermique est une centrale électrique qui produit de l'électricité à partir d'une source de chaleur (charbon, gaz, fioul, biomasse ou déchets municipaux). La source de chaleur chauffe un fluide (souvent de l'eau) qui passe de l'état liquide à l'état gazeux (vapeur). Cette vapeur entraîne une turbine couplée à un alternateur qui transforme l'énergie cinétique contenue dans la vapeur en énergie mécanique de rotation, puis en énergie électrique grâce à une génératrice de courant [Zouglami et Daghboudj, 2011]. Il existe différents types de centrales thermiques (centrale à vapeur, centrale à flamme, centrale à cycles combinés, centrale à gaz...etc.)

#### **a) Les Centrales Thermiques à vapeur**

Les centrales thermiques produisent l'électricité à partir de la chaleur qui se dégage de la combustion du charbon, du fuel ou du gaz naturel. Le principe des centrales thermiques à vapeur est le même que ce soit le carburant : du gaz, charbon ou fuel, l'énergie thermique est transformée en énergie mécanique puis électrique, passant par plusieurs étapes commençant par la chambre de combustion (générateur de vapeur) arrivant à l'alternateur, en se basant au niveau de la chambre de combustion sur le principe de triangle du feu : l'étincelle, le carburant et l'air. À la sortie de la chambre de combustion, une énergie thermique très intense fait tourner les ailettes de la turbine à plusieurs corps : haute, basse et moyenne pression qui fait tourner au

même temps l'arbre de l'alternateur et ainsi l'alternateur à une vitesse de 1500 tr/min en produisant de l'électricité. À la sortie de la turbine la vapeur est condensée et transformée en eau réutilisée comme source d'eau pour un deuxième cycle. Le principe de fonctionnement d'une centrale thermique à vapeur est présenté dans la figure 1.4 [Labeled, 2013].



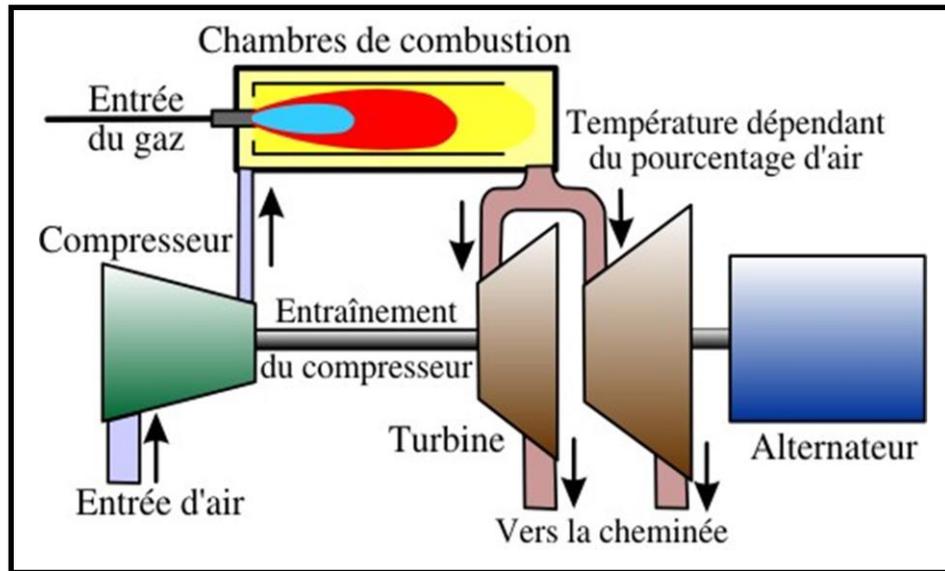
**Figure 1.4.** Principe de fonctionnement d'une centrale thermique à vapeur [Labeled, 2013].

### b) Les centrales à gaz

Les turbines à gaz fonctionnent de façon similaire aux turbines à vapeur sauf que les gaz de combustion sont utilisés pour activer les aubes de turbine au lieu de la vapeur. Outre l'alternateur, la turbine commande également un compresseur tournant pour comprimer l'air, qui est ensuite mélangé aux combustibles gazeux ou liquides dans une chambre de combustion. Plus la compression est importante, plus la température et le rendement atteint dans une turbine à gaz sont élevés. Les gaz d'échappement de la turbine sont émis à l'atmosphère. Contrairement à la turbine à vapeur, la turbine à gaz ne dispose pas de système de récupération de la chaleur perdue (le réchauffeur d'air rotatif, surchauffeur, resurchauffeur), ce qui influence directement sur le rendement et les coûts d'investissement. L'utilisation des turbines à gaz est souvent lors des périodes de pointe vue que son temps de réponse est très court. Le rendement des turbines à gaz est de l'ordre de 38 %. Le principe de fonctionnement d'une centrale à gaz est présenté dans la figure 1.5 [Labeled, 2013].

Les prix des combustibles représentent une bonne part des coûts de la production d'électricité dans des centrales au charbon, au fioul et au gaz naturel de sorte que les coûts variables de la production thermique (prix du pétrole sont réputés fluctuants et aléatoires, et les prix du charbon sont susceptibles d'augmenter avec les restrictions qui seront imposées à la

consommation de charbon pour protéger l'environnement) dépassent ceux de la production nucléaire [Steiner, 2001].



**Figure 1.5.** Principe de fonctionnement d'une centrale à gaz [Steiner, 2001].

### Avantages

- Energie rentable à la production avec un prix modeste sur le marché mondial.
- Disponibilité, facilité d'exploitation et de transport.
- Moyen de production d'électricité « dispatchable » pour répondre aux variations de la demande
- Autonomie (dépendant de l'approvisionnement et du stock de combustible).
- Longue durée de vie (30 à 40 ans).

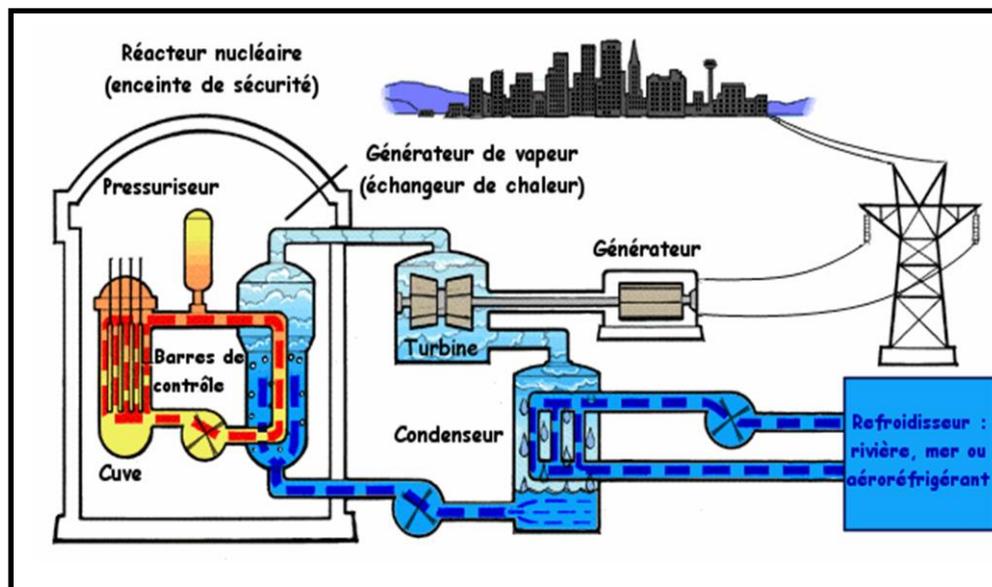
### Inconvénients

- Impacts sur l'environnement par l'émission de gaz à effet de serre et d'éléments polluants.
- Géostratégie des ressources et prix fluctuants.
- Il faut un plan d'eau à proximité.
- Les usines possédant un circuit de refroidissement à circuit ouvert, peuvent avoir des problèmes écologiques dus au réchauffement des rivières.
- Réactivité faible au démarrage (plus d'1h pour atteindre la puissance max).

### 1.2.1.2 Les centrales nucléaires

Le principe de fonctionnement de la centrale nucléaire est de générer la chaleur par la fission nucléaire d'uranium. La chaleur produite est utilisée pour faire réchauffer de l'eau et avoir de la vapeur qui est ensuite acheminée dans une turbine composée d'un corps haute pression et de plusieurs corps basse pression la quelle actionne un alternateur. Le refroidissement du circuit de la vapeur peut avoir lieu directement, par de l'eau du lac, du fleuve ou dans un circuit via une tour de refroidissement. Ces centrales utilisent également des cycles de conversion thermodynamique, néanmoins leur chaudière est un réacteur nucléaire. L'énergie nucléaire obtenue à la suite de réactions de fission de l'uranium et du plutonium est la source de chaleur utilisée. Elles produisent environ 15% de l'électricité mondiale. Une centrale nucléaire est identique à une centrale thermique, sauf que la chaudière brûlant le combustible fossile est remplacée par un réacteur contenant le combustible nucléaire en fission. Son principe de fonctionnement est présenté dans la figure 1.6 [Besson, 2008].

Dans le cas du nucléaire, l'opposition du public à la technologie et au stockage des déchets peut également entraîner d'importantes charges fixes. En fait la production nucléaire se caractérise par de forts coûts en capital, dus en partie aux délais de construction très longs (frais financiers) et aux coûts du déclassement (coût de la mise hors service de l'installation à la fin de sa durée de vie). En revanche, les coûts du combustible et les coûts d'exploitation (coûts variables) des installations nucléaires sont faibles et sont assez stables sur toute la durée de vie d'une centrale [Steiner, 2001].



**Figure 1.6.** Principe de fonctionnement d'une centrale nucléaire [Steiner, 2001].

**Avantages**

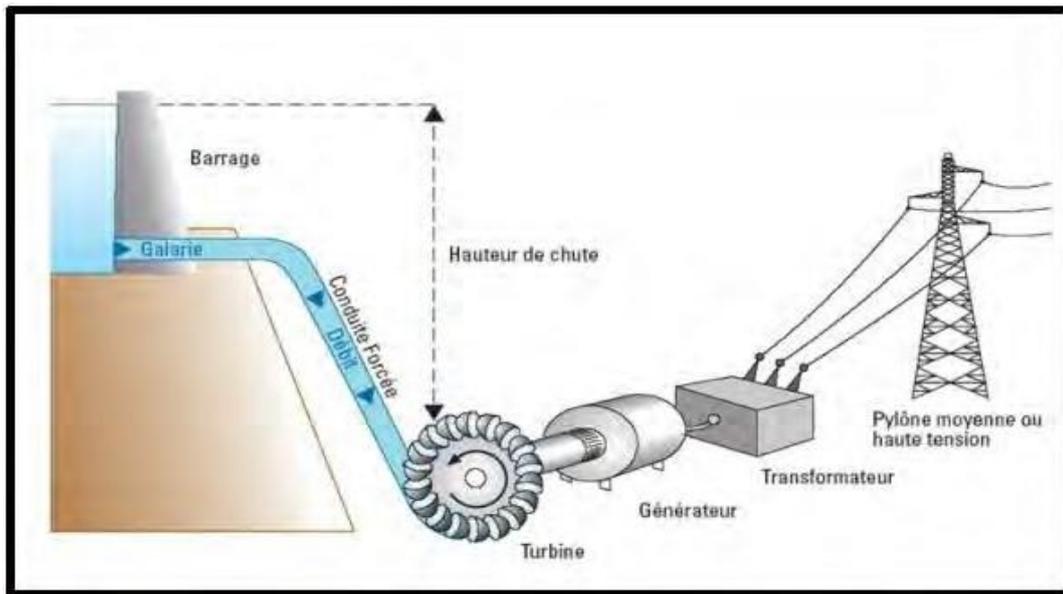
- Adapté à la production de masse
- Disponibilité élevée et stabilité des coûts
- Longue durée de vie (40 à 60) ans
- Pas d'émission de gaz à effet de serre
- Coût relativement faible de combustible
- Forte densité énergétique

**Inconvénients**

- Des tonnes de déchets sont produisent chaque année par les tranches nucléaires.
- Augmentation du niveau de pollution par le stockage des déchets
- Lourds investissements et risque industriel
- Nécessite un niveau de technologie élevé
- Complexité de l'acceptation du public et de la gestion de la fin de vie des centrales
- Le risque d'accident (26 avril 1986 à l'usine de Tchernobyl).

**1.2.1.3 Les centrales hydrauliques**

L'énergie potentielle de gravité de l'eau est utilisée pour produire de l'électricité .On distingue deux principaux types de centrales hydrauliques ; les centrales hydrauliques au fil de l'eau et les centrales à réservoir. Dans le premier type, l'eau est turbinée au fil du courant des cours d'eau. On dit que cette production est « fatale » ; si cette énergie ne sert pas à produire de l'électricité, elle sert à rien donc elle est perdue. Dans le deuxième type, l'eau est stockée dans des réservoirs (barrages) .L'énergie hydraulique est convertie en électricité par le passage de l'eau dans une turbine reliée à un alternateur. La puissance de la centrale dépend également du débit d'eau. Etant donné qu'elles ont aussi des caractéristiques de souplesse extraordinaires, elles sont utilisées en grande partie pour suivre les fluctuations brusques de la consommation, elles peuvent être couplées au réseau dans 3 à 5 minutes. Son principe de fonctionnement est présenté dans la figure 1.7 [Bencherif et Chabouni, 2011].



**Figure 1.7.** Principe de fonctionnement d'une centrale hydraulique [Bencherif et Chabouni, 2011].

Les coûts de la production hydraulique dépendent en grande partie de la géographie et du climat. Cette technique possède de faibles coûts variables [Steiner, 2001]. Les centrales hydrauliques qui existe en Algérie sont celle de : Darguina (Bejaia) d'une puissance totale de 71 .5MW et Ziama El Mensuriya d'une puissance de 100MW [Saguan, 2007; Fateh Amir, 2012; Operateur].

On distingue différents types de centrales hydroélectriques suivant la hauteur de chute [Tebani, 2020] :

- **Les centrales de haute chute** (hauteur de chute  $> 200$  m)

Les centrales de haute chute sont alimentées par des barrages appelés "réservoirs de lac" ou "réservoirs saisonniers". Elles sont équipées de turbines Pelton.

- **Les centrales de moyenne chute** ( $30 \text{ m} < \text{hauteur de chute} < 200 \text{ m}$ )

Les centrales de moyenne chute sont alimentées par des barrages appelés "réservoirs d'écluse". Elles se trouvent sur le cours des fleuves dans les régions de plaine ou de bas-relief.

- **Les centrales de basse chute** (hauteur de chute  $< 30$  m)

Ces centrales, encore appelées usines « au fil de l'eau », sont caractérisées par l'absence de réserve. Leur capacité de production ne dépend que du débit du cours d'eau.

**Avantages**

- Souplesse d'utilisation et possibilité de stocker de l'électricité pour le turbinage
- Faible coût du KWh pour le gros hydraulique
- Longue durée de vie (plus de 50 ans)
- Usage de ressources renouvelables, sans émission de gaz à effet de serre.
- Tant que le cours d'eau n'est pas à sec, l'énergie est disponible. C'est donc une source d'énergie assez disponible (sauf en cas de sécheresse persistante).

**Inconvénients**

- Contrainte géographique et aléas climatiques (sécheresse)
- Impacts sur l'environnement à la construction
- L'inondation de certains reliefs lors de la construction de barrages.
- Le lâché d'eau (et plus exceptionnellement la rupture d'un barrage) peuvent provoquer des dégâts considérables en aval du barrage (raz-de-marée).
- Les barrages peuvent s'envaser car ils réduisent l'écoulement de l'eau mais aussi de tous les éléments charriés par les cours d'eau.

**1.2.1.4 Les centrales photovoltaïques**

Ces centrales produisent de l'électricité directement par la transformation du rayonnement solaire au niveau des panneaux photovoltaïques par des cellules à base de silicium ou autre matériau ayant des propriétés de conversion lumière/électricité. Ce phénomène physique est appelé effet photovoltaïque qui consiste à produire une force électromotrice lorsque la surface de cette cellule est exposée à la lumière, le courant résultant est continu ce qui exige une intégration des onduleurs pour avoir un courant alternatif ainsi des batteries d'accumulation pour emmagasiner l'énergie électrique. Cette technologie pratiquement n'existe plus en Algérie à l'exception de quelques recherches au niveau des universités ou des centres de recherche. La figure 1.8 présente une centrale photovoltaïque.

La stratégie énergétique de l'Algérie repose sur l'accélération du développement de l'énergie solaire. Le gouvernement prévoit le lancement de plusieurs projets solaires photovoltaïques d'une capacité totale d'environ 800 MWc d'ici 2020. D'autres projets d'une capacité de 200 MWc par an devraient être réalisés sur la période 2021-2030 [Youb, 2020].



**Figure 1.8.** Centrale photovoltaïques [Youb, 2020].

### **Avantages**

- Ressource disponible partout à la surface de notre planète, surtout dans les zones tempérées, tropicales et équatoriales.
- Réduit la vulnérabilité aux pannes d'électricité.
- Adapté aux pays chauds et aux sites isolés
- L'énergie photovoltaïque est une énergie propre et non-polluante.
- Énergie maîtrisable et adaptable aux situations de toutes les régions.
- Les panneaux photovoltaïques s'intègrent particulièrement bien aux toitures et peuvent ainsi produire une partie de l'électricité nécessaire à une habitation sans occuper inutilement l'espace.

### **Inconvénients**

- Énergie renouvelable non stockable dépendante du temps qu'il fait. La production électrique est donc aléatoire.
- Les rendements des panneaux photovoltaïques sont encore faibles.
- La fabrication des panneaux photovoltaïques relève de la haute technologie et donc des investissements coûteux.

### 1.2.1.5 Les centrales éoliennes

Le procédé de conversion d'énergie par éolienne convertit l'énergie cinétique de la masse d'air mise en mouvement par le vent en énergie électrique. Une éolienne se compose essentiellement de 4 éléments : le rotor, le freinage et la régulation de la vitesse, le mat ou tour, la nacelle et l'alternateur. Sous l'effet du vent l'hélice de l'éolienne (appelée aérogénérateur dans d'autres documentations) se met en rotation. À l'intérieur de la nacelle sur l'axe existe un multiplicateur de vitesse qui a pour but d'augmenter la vitesse de rotation disponible pour l'alternateur. La figure 1.9 présente une centrale éolienne.

À l'échelle mondiale, l'énergie éolienne a connu une croissance importante de 30% par an. L'Europe, principalement sous l'impulsion allemande, scandinave et espagnole, comptait environ 15000 MW de puissance installée en 2000. Ce chiffre a presque doublé en 2003, soit environ 27000 MW pour 40000 MW de puissance installée dans le monde [Fateh Amir, 2012]. Le programme des énergies renouvelables algérien prévoit dans un premier temps, sur la période 2011-2013, l'installation de la première ferme éolienne d'une puissance de 10 MW à Adrar. Entre 2014 et 2015, deux fermes éoliennes de 20 MW chacune devraient être réalisées. Des études seront menées pour détecter les emplacements favorables afin de réaliser d'autres projets sur la période 2016-2030 pour une puissance d'environ 1 700 MW [Tebani, 2020]



**Figure 1.9.** Une installation éolienne [Tebani, 2020]

**Avantages**

- Energie disponible un peu partout à la surface de notre planète, surtout dans les zones côtières, les plaines et les zones de collines.
- Usage de ressources renouvelables, sans émissions de gaz à effet de serre.
- L'énergie éolienne est propre et peut être associée à des panneaux de photopiles et à une batterie d'accumulateur afin d'optimiser une fourniture d'électricité.
- Nécessite une faible emprise au sol.
- Coût marginal de production d'électricité très faible.

**Inconvénients**

- Contraintes géographiques sur les sites éligibles (topographie, obstacles, etc.).
- Energie dépendante du vent, il faut donc prévoir un système de batterie de stockage de l'électricité pour les journées sans vent.
- Les aérogénérateurs engendrent une pollution acoustique due à la notation des pâles qui engendrent une dégradation du paysage.
- Difficultés de raccordement au réseau.

La diversification du parc de production apporte des bénéfices d'efficacité. L'ordre d'efficacité économique, avec ces bénéfices associés, devrait aussi entraîner des baisses des prix de l'électricité. La diversité des techniques de production et des structures de coûts est à l'origine de l'ordre d'efficacité économique, à savoir le principe qui consiste à démarrer les différents types de groupes de production en fonction de leurs coûts variables. Les centrales nucléaires et, souvent, les centrales hydrauliques et au charbon, sont utilisées en base, tandis que les autres centrales thermiques assurent la semi-base ou les pointes. Parce qu'elle permet de réduire la puissance à conserver en réserve et facilite l'équilibrage de l'offre et de la demande d'électricité en temps réel [Steiner, 2001].

**1.2.2 Le transport**

Le transport recouvre l'acheminement à haute tension de l'électricité produite par les unités de production auprès des points de consommation. Toutefois, cette fonction ne se limite pas au transport et comporte la gestion de groupes de production éparpillés sur un réseau de façon à maintenir la tension et la fréquence nécessaires et à éviter l'écroulement du système [Steiner, 2001]. Les réseaux de transport d'électricité sont composés de lignes (ou de couloirs de lignes) reliant les différents jeux de barres ou nœuds. D'une façon générale, ils ont une topologie maillée pour offrir une multiplicité de possibilité d'aller d'un nœud à un autre du réseau. Le rôle principal du réseau de transport est la liaison entre les grands centres de

consommation et les moyens de production. Ce rôle est particulièrement important car on ne peut pas stocker l'énergie électrique à grande échelle à l'heure actuelle. Un réseau de transport doit être exploité d'une manière particulière: il doit être exploité dans les limites de fonctionnement autorisées. Ces limites ou contraintes du réseau sont exprimées par des valeurs maximales ou minimales sur certaines variables du réseau (fréquence, écoulement de puissance sur les lignes ou transformateurs, niveau de tension, etc.). Si ces limites sont dépassées, le réseau risque de devenir instable [Saguan, 2007].

### **1.2.3 La distribution**

Les réseaux de distribution sont destinés à acheminer l'électricité à basse tension à l'échelle locale, c'est-à-dire directement vers les consommateurs. La distribution est assurée en moyenne tension et en basse tension. Elle est adaptée selon le type de consommation que ce soit des très grandes usines qui peuvent être alimentées carrément du réseau haute tension selon la puissance maximale demandée ou des immeubles d'habitats ,des écoles .. ect. en basse tension. De gros industriels sont alimentés directement par le réseau de transport, avec un niveau de tension adapté à la puissance électrique dont ils ont besoin (le cas du barrage Bni Haroun en Algérie alimenté par le réseau 60 KV, sa puissance maximale demandée est de 100MW ) [Bouri, 2007].

### **1.2.4 La consommation**

C'est le point d'arrivée dans un réseau électrique, La consommation d'électricité correspond à un appel de puissance active sur le réseau pour une période de temps bien déterminée ; cela correspond à une consommation d'énergie. L'électricité est consommée par des différents types de consommateurs (résidentiels, commerciaux et industriels). La consommation d'électricité se caractérise par :

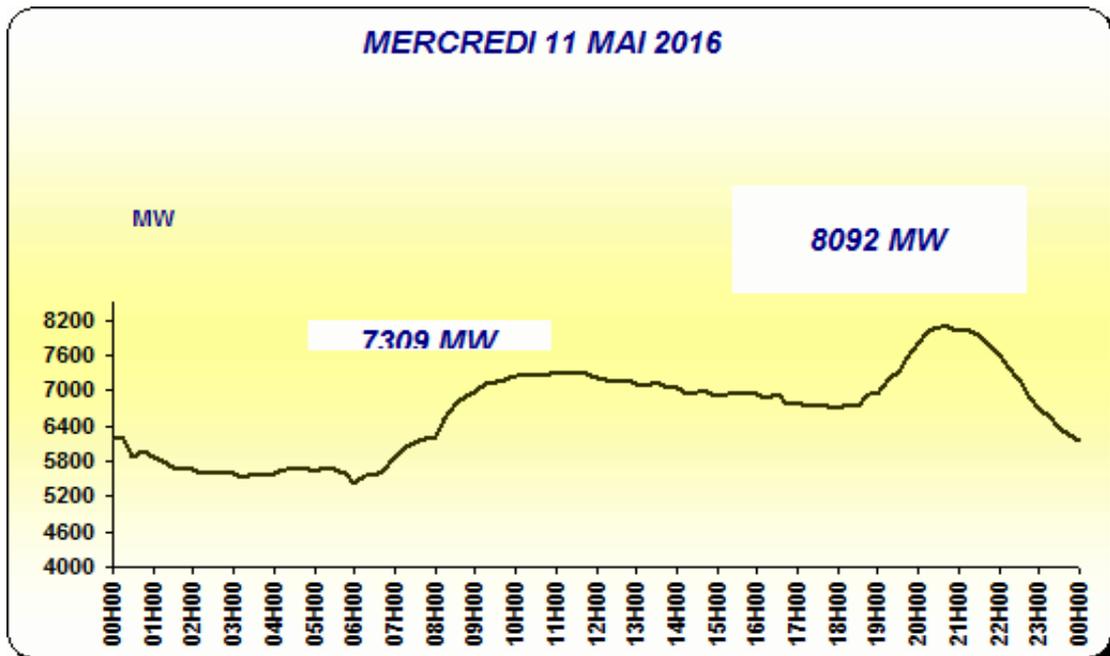
- Ses fortes fluctuations.
- La difficulté de la prévoir de manière exacte.

#### **1.2.4.1 Fluctuations de la consommation**

Les profils de consommation d'électricité suivent une trame globalement périodique avec un pas journalier, hebdomadaire ou saisonnier. En fait, La consommation d'électricité varie en permanence: au cours des saisons, au cours d'une journée, en suivant le rythme de l'activité quotidienne et économique et en temps réel en fonction de la météo du moment. Les différentes utilisations individuelles de l'énergie électrique, à chaque moment, se traduisent par de fortes fluctuations de la consommation dans le temps. Ces fluctuations ont un certain caractère

cyclique au cours de la journée, de la semaine, et de l'année en créant une saisonnalité. Cette saisonnalité est constatée à trois niveaux :

- **Fluctuations infra journalières** : durant une journée, la consommation d'électricité peut fluctuer d'une façon importante qui peut atteindre les 25 % de la consommation maximale de l'année. Ces fluctuations infra journalières sont récurrentes le long de l'année. Les fluctuations journalières sont illustrées par la figure 1.10 [Operateur].



**Figure 1.10.** Courbe de charge de l'Algérie ; fluctuations journalières

- **Fluctuations hebdomadaires** : Jour ouvrable / week-end : les différences entre les consommations maximales entre un jour ouvrable et un jour du week-end du même mois peuvent aller jusqu'à 10 % de la demande maximale de l'année. Les fluctuations hebdomadaires sont illustrées par la figure 1.11. [Operateur].

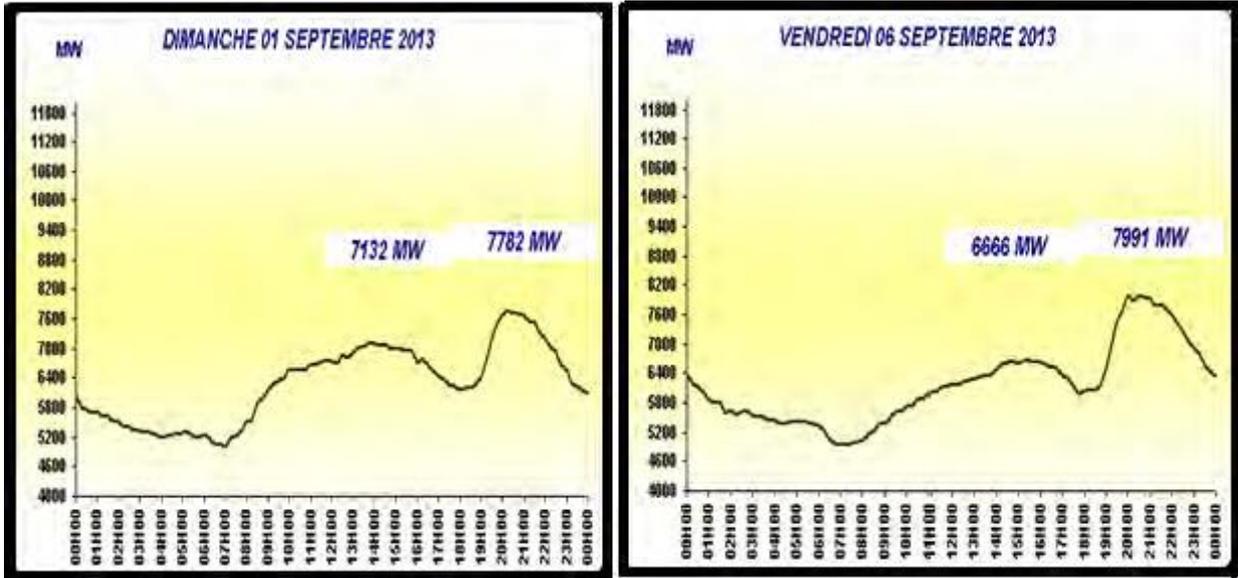


Figure 1.11. Courbe de charge de l'Algérie ; fluctuations hebdomadaires [Operateur].

- **Fluctuations saisonnières** : jour été / jour hiver : les différences entre les consommations (maximales et minimales) entre un jour ouvrable en été et un jour ouvrable en hiver peuvent aller jusqu'à plus de 20 % de la consommation maximale. Les fluctuations saisonnières sont illustrées par la figure 1.12 [Operateur].

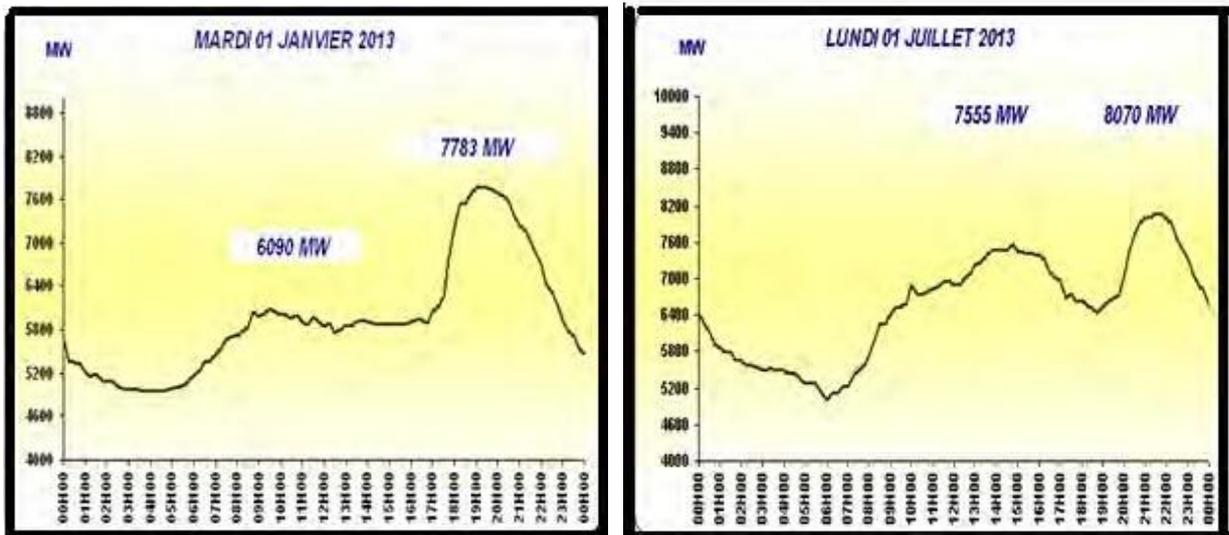


Figure 1.12. Courbe de charge de l'Algérie, fluctuations saisonnières [Operateur].

#### 1.2.4.2 Les prévisions de la consommation

Connaître la consommation de l'électricité d'une période future est important pour l'exploitation du système électrique. Pour ce faire, une multitude de variables sont

traditionnellement utilisées pour expliquer et prédire le niveau de consommation d'électricité parmi lesquels : la température, l'heure de la journée, le jour de la semaine (jour ouvrable, week-end), le prix, etc. L'impact de la plupart de ces variables est lié aux conditions climatiques, aux habitudes de consommation, aux rythmes de vie et au pays considéré. En fait, plus la prévision est réalisée en avance par rapport au moment de la consommation, moins elle est précise, Bien que la prévision de la consommation s'affine lorsque l'on s'approche de la période prévue, il existe encore des écarts entre les prévisions faites la veille et la consommation réelle. Ces écarts, peuvent conduire à des erreurs de prévision [RTE, 2003]. Donc une actualisation en permanence à fin que les erreurs soient le plus minimum possible, pour ce faire les prévisions sont divisées en trois parties [Saguan, 2007]:

- **Journalières** : pendant toute la semaine (Le jour : j+1 jusqu'à J+7) en s'appuyant sur les statistiques faites, les conditions météorologiques, les jours fériés, les weekends, les vacances, les événements qui peuvent y avoir (grèves, événements sportifs, etc).
- **Hebdomadaires** : autrement dit la semaine s+1, en tenant compte des programmes de démarrage et marche des centrales, la réserve, l'interconnexion internationale.
- **Annuelles** : pour l'année n+1, détermination du calendrier de production et des besoins en combustibles, maintenance et entretien des moyens de production et des ouvrages de transport.

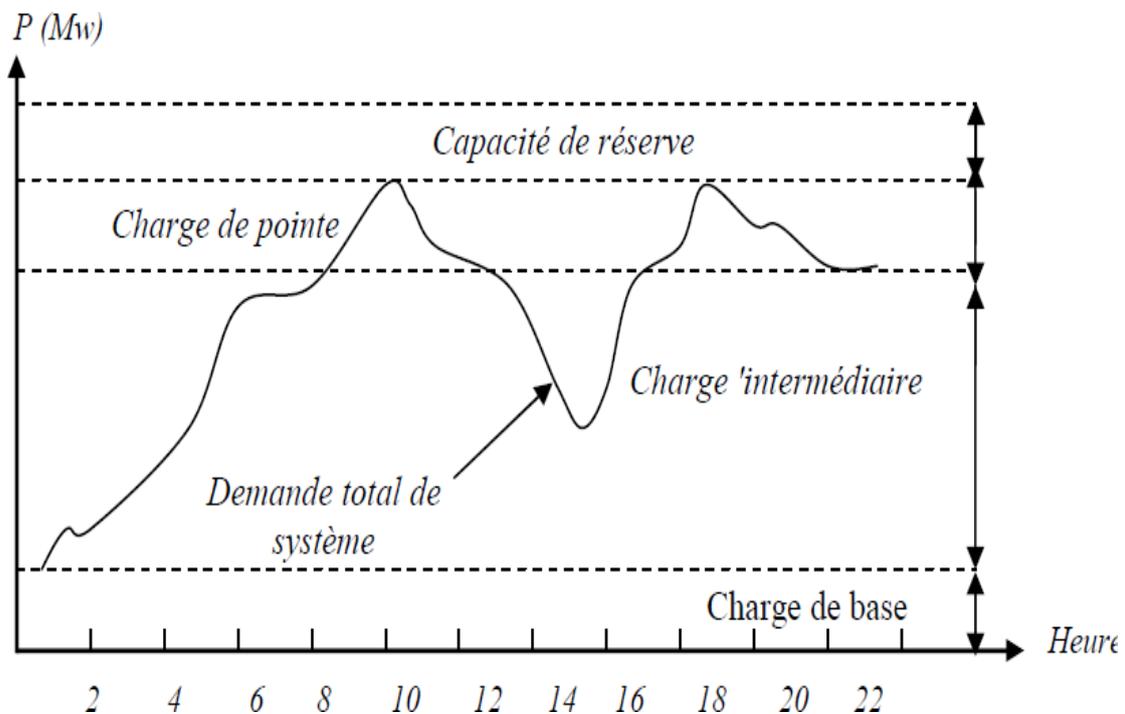
### 1.3 Stratégie de fonctionnement des centrales électriques

Les caractéristiques technico-économiques des centrales électriques sont déterminantes pour leurs exploitations. Trois types de caractéristiques ont une influence pour l'exploitation d'une centrale électrique à court terme: son coût de production; ses contraintes techniques et sa fiabilité. Le plus important de ces trois caractéristiques est le coût variable de production. Pour les centrales thermiques, il reflète principalement le coût du combustible utilisé et les autres coûts d'exploitation et de maintenance de la centrale. Par conséquent le coût du combustible est évalué en utilisant des valeurs de consommation spécifiques de chaleur (une quantité d'énergie thermique nécessaire pour produire de l'électricité) de la centrale et le prix du combustible. La valeur de consommation spécifique de chaleur est proportionnelle à l'inverse du rendement énergétique: plus la consommation spécifique de chaleur est grande, moins la centrale est performante.

Les systèmes d'électricité ont été conçus dans le but de veille à [Saguan, 2007]:

- La fiabilité de la fourniture de l'énergie électrique. Les réseaux relient entre elles, toutes les unités production et visent à assurer une fonction de secours en cas de panne ou de défaillances.
- L'optimisation de la disponibilité de l'énergie électrique aux consommateurs.
- Permettent d'acheminer l'énergie produite par des sources délocalisées vers les points de consommations.
- La continuité d'alimentation, maintien de l'outil de production, productivité et confort des consommateurs.

Pour satisfaire la demande en énergie électrique, les centres de conduite suivent un principe de fonctionnement bien étudié en désignant à chaque centrale électrique sa tâche : les puissances spécifiques, la période de fonctionnement car chacune présente des capacités et des temps de réaction très divers. Il existe un nombre infini des formes de fonctionnement pour assurer un chargement précis d'un système. Des générateurs qui fonctionnent à 100 % de leurs capacités pendant 24 heures supportent la charge de base. Des générateurs intermédiaires commandés fonctionnent la plupart du temps mais pas nécessairement sous une charge totale. On procède au couplage des unités des pointes à la ligne pendant des heures chaque jour. On a besoin d'une capacité de réserve pour affronter les cas d'urgences, la figure 1.13 montre la stratégie de génération d'une société d'électricité [Mazouz et Manseur, 2013].



**Figure 1.13.** Stratégie de génération d'une société d'électricité

Plusieurs types de centrales existent pour satisfaire la demande en énergie électrique:

### **1) Unités de charge de base**

On les appelle aussi les centrales de production de masse, leur tâche est de produire la partie importante de la puissance demandée par le réseau. Ces unités de production sont généralement thermiques et nucléaires (en Algérie, les unités de charge de base sont les centrales à vapeur) [Fateh Amir, 2012; RTE, 2003]. Les unités nucléaires sont généralement rangées dans cette catégorie à cause du besoin de conservation de l'équilibre thermique entre le réacteur atomique et le générateur de vapeur.

### **2) Unités de production intermédiaires**

Leur capacité de production est moindre (Inférieure à 1GW), leur utilité réside dans l'ajustement de production, généralement elles permettent dans certains pays un meilleur équilibrage des sources d'énergie primaire, ces unités sont généralement des centrales thermiques, (pétrole, charbon, gaz), mais certains pays utilisent les éoliennes et les centrales hydrauliques pour la production intermédiaire [Fateh Amir, 2012; RTE, 2003].

### **3) Unités de production de pointe**

Ces unités sont caractérisées par des temps très brefs de mise en fonctionnement (quelques minutes ou dizaines de minutes) permettant une réaction rapide par rapport aux fluctuations de la consommation, ces unités sont principalement des centrales hydrauliques, dont leurs puissances ne dépassent pas les 100 MW. En Algérie : les centrales à gaz sont les plus utilisées on peut les coupler au réseau pendant 15min, aussi les centrales hydrauliques qui peuvent être couplées pendant 3 min [Fateh Amir, 2012; RTE, 2003].

Les centrales de pointes doivent être mise en marche dans un délai très court, elle utilise donc des moteurs à diesel, des turbines à gaz, des moteur à air comprimé ou des turbines hydrauliques à réserve pompé. Remarquons que la période d'amorçage est de 4 à 8 heures pour les centrales thermiques et de quelques jours pour les centrales nucléaires. Il n'est donc pas économique d'utiliser ces centrales pour fournir la puissance de pointe [Mazouz et Manseur, 2013].

### **4) Unités de réserve : réserve tournante**

La gamme des générateurs demandés pour assurer la réserve tournante peut être constituée de générateurs conservés à la sortie partielle (capacité de réserve) ou des générateurs intermédiaires à des degrés différents de disposition. Il est primordial pour n'importe qu'elle entreprise de production d'énergie électrique de conserver les unités mixtes convenables et cela ne soit pas due seulement à la variation de l'énergie demandée par heure, mais il est obligatoire de procéder régulièrement à la maintenance de toutes les centrales électriques.

Généralement la réserve tournante est la somme des réserves des générateurs producteurs de façon que leurs sommes soient égales à celle du groupe le plus puissant dans le réseau électrique. En Algérie est fixée à 412.5 kW c'est la puissance du groupe le plus puissant dans la centrale à cycle combiné de Skikda SKS. Cette quantité en puissance est conçue pour satisfaire un surplus de puissance demandée par rapport à celle prévue [Operateur ; Aguet et Morf, 2013].

#### **1.4 Impact du secteur électrique sur l'environnement**

La production, le transport et l'utilisation de l'énergie électrique produit des déchets, des rejets et de multiples pollutions dans l'air, l'eau et le sol. La production d'électricité est responsable de 33% des émissions de CO<sub>2</sub> liées à l'activité humaine dans le monde [Charlotte, 2019]. Pour évaluer l'impact environnemental des énergies, il faut s'intéresser au taux d'émission de CO<sub>2</sub> lors de la production d'électricité dans les centrales, mais également lors de la construction et du démantèlement de celles-ci. L'analyse du cycle de vie s'intéresse aux impacts environnementaux d'un produit ou d'un service sur l'ensemble de son cycle de vie. Cela signifie comprend l'extraction et le traitement des matières premières, les processus de fabrication, de transport et de distribution, l'utilisation et de la réutilisation du produit fini et, finalement, le recyclage et la gestion des déchets en fin de vie [Jomaux, 2015]. L'électricité produite à partir d'énergies fossiles (charbon, gaz ou fioul) génère beaucoup d'émissions de gaz à effet de serre. L'analyse du cycle de vie de l'énergie au charbon affiche 1060 g CO<sub>2</sub>/kWh. Cela équivaut à émettre 85 fois plus de gaz à effet de serre dans l'atmosphère que l'électricité éolienne, et 19 fois plus que l'électricité produite par le photovoltaïque [Charlotte, 2019]. En outre la production d'électricité issue de la filière éolienne est l'une des plus « vertes » du mix électrique. En effet, elle n'émet pas de CO<sub>2</sub> directement, le bilan carbone de son cycle de vie est de 12,7g CO<sub>2</sub>/kWh. Ce taux varie évidemment en fonction de la localisation du parc éolien et de la technologie utilisée. Cependant, à cause de l'occupation des sols ou l'utilisation de matériaux rares dont l'extraction consomme une énergie souvent très carbonée, plus les processus de fabrication complexes. Le photovoltaïque n'est toutefois pas le moins impactant avec un taux d'émission s'élevant à 55g CO<sub>2</sub>/kWh [Charlotte, 2019]. L'analyse du cycle de vie et de l'extraction de la matière première au stockage des déchets d'une centrale nucléaire démontre un bilan carbone de 6g CO<sub>2</sub>/kWh, car elle n'émet pas de CO<sub>2</sub> en production, ce qui peut sembler avantageux. Cependant, il n'en reste pas moins producteur de déchets nucléaires, très difficiles à recycler et dangereux.

L'impact du secteur électrique peut être très différent en fonction du pays. Prenons deux exemples distincts : la France et la Chine. La France a une émission de 0,071 kg de CO<sub>2</sub>/kWh et une production totale de 564.275 GWh en 2012. La Chine, par contre à une émission de 0,973 kg de CO<sub>2</sub>/kWh et une production totale de 4.994.072 GWh. Ceci s'explique par le fait que la Chine se base sur le charbon, source la plus polluante alors que la France est fortement nucléarisée. Le mix énergétique est important pour évaluer les émissions mais il ne fait pas tout, les économies d'énergie ou la diminution de la consommation sont également importantes pour réduire les émissions [Jomaux, 2015]. La dé-carbonisation du secteur électrique semble donc une condition nécessaire afin d'atteindre les objectifs de développement durable et ce compris pour des secteurs qui ne sont pas encore actuellement électrifiés. Par conséquent il faut penser à d'autre source d'énergie non conventionnelle comme la technologie véhicule au réseau « Vehicle-to-Grid » ou (V2G), qui peut réduire la dépendance vis-à-vis de petites unités coûteuses dans les systèmes d'alimentation existants, ce qui se traduit par une réduction des coûts d'exploitation et des émissions de gaz polluant.

### **1.5 Les réseaux électriques intelligent « Smart grid »**

Après plusieurs décennies de lente évolution, les réseaux électriques, sont en train de connaître un grand développement avec l'apparition des énergies renouvelables et la multiplication des acteurs issue de la libéralisation des marchés de l'énergie. La complexité croissante de leur fonctionnement va conduire à l'introduction massive d'intelligence qui entraînera le concept de « Smart grid ».

On peut trouver plusieurs définitions et visions décrivant le réseau électrique intelligent. Il est défini comme un réseau d'électricité, qui intègre intelligemment les actions des producteurs et des consommateurs qui y sont connectés, afin d'offrir un approvisionnement en électricité efficace, durable et économique en toute sécurité [Bosse, 2016]. Bien qu'il existe d'autres définitions, le concept du réseau électrique intelligent peut se résumer comme une intégration et une convergence de l'infrastructure électrique avec de l'intelligence embarquée (logiciels, automatismes, traitement de l'information) et des moyens fiables de communication. Cette intelligence peut être déployée à divers niveaux du réseau (production, matériel réseau, consommation, dispositifs de surveillance et de contrôle) [Hadjsaid et Sabonnadiere, 2018]. Ce développement va très probablement induire des ajustements majeurs qui feront évoluer les métiers et les missions des différents acteurs du système électrique notamment les gestionnaires de réseau de distribution à travers la modification du mode de livraison de l'électricité à sens unique en une gestion active des flux du réseau et de l'information.

Le réseau électrique intelligent est encore un concept en cours d'évolution, Bien qu'il utilise non seulement les produits et les services innovants mais aussi le contrôle intelligent, la communication et les technologies d'autoréparation afin de [Harrabi, 2014] :

- faciliter la connexion et le fonctionnement des technologies et des générateurs de toutes tailles.
- permettre aux consommateurs de jouer un rôle dans l'optimisation du fonctionnement du système.
- Accommoder la production intermittente et les options de stockage.
- intégrer les véhicules électriques dans le réseau de distribution d'électricité.
- fournir une qualité de puissance pour les besoins d'une économie numérique.
- anticiper et réagir d'une manière d'autoréparation.
- fournir de l'information et un grand choix de services aux consommateurs.
- offrir des niveaux accrus de fiabilité et de sécurité pour le système électrique.

## 1.6 Stratégie de planification

La planification et la gestion optimale des réseaux électriques est un problème multi objective complexe qui nécessite des méthodes d'optimisation robuste et dynamique à savoir [Draïdi, 2010]:

- 1) Minimisation du coût de production d'énergie électrique, connu sous le nom dispatching économique statique ou dynamique.
- 2) Minimisation de l'émission des gazes toxiques
- 3) Minimisation des pertes de transport
- 4) Minimisation de la déviation de tension
- 5) Amélioration de la stabilité de tension
- 6) Amélioration de la stabilité transitoire des réseaux électriques
- 7) Optimisation de placement et le control des systèmes de transmission flexibles en courant alternatif.
- 8) Coordination du système de protection avec considération des énergies renouvelables
- 9) Coordination du système de protection avec considération des systèmes de compensation dynamique.

Il faut noter que ces fonctions objectives sont à minimiser ou à maximiser individuellement ou simultanément

## 1.7 Conclusion

Dans ce chapitre nous avons présenté les différents types de centrales de production de l'énergie électrique. On constate que plus de deux tiers de de la production provient de la transformation des combustibles fossiles, le reste provient des centrales nucléaires et centrales à énergies renouvelables. Nous avons mis le point sur les avantages et les inconvénients de chaque type d'unité, notamment les centrales thermiques sont bon marché mais trop polluante et les centrales à énergie renouvelables fournissent une électricité propre mais de façon discontinue. Nous avons ensuite discuté des fluctuations possibles de la demande de charge et nous avons souligné les effets néfastes de l'industrie de l'électricité sur l'environnement. Nous avons aussi introduit en bref le concept des réseaux intelligents et la technologie V2G. Enfin, nous avons présenté la stratégie globale de gestion des centrales électrique en fonction de la demande.

Dans le chapitre suivant, nous allons présenter le problème d'engagement des unités de production « Unit Commitment Problem (UCP) ».

## **CHAPITRE 2**

---

### **Problème d'engagement des unités de production de l'énergie électrique**

---

#### **Sommaire**

---

<b>2.1 Introduction .....</b>	<b>36</b>
<b>2.2 Caractéristiques des unités de production électrique.....</b>	<b>36</b>
<b>2.3 Formulation du Problème de l'engagement des unités de production.....</b>	<b>38</b>
<b>2.4 Minimisation des émissions de polluants.....</b>	<b>42</b>
<b>2.5 État de l'art sur les différentes techniques de résolution de l'UCP.....</b>	<b>43</b>
<b>2.6 Conclusion .....</b>	<b>47</b>

---

## 2.1 Introduction

La planification opérationnelle des systèmes électriques implique la meilleure utilisation des ressources énergétiques disponibles. Ces ressources sont soumises à diverses contraintes pour transférer l'énergie électrique des centrales aux consommateurs avec une sécurité maximale des personnes et des équipements avec un coût minimal. L'engagement des Unités "Unit Commitment" (UC) est crucial pour atteindre cet objectif. Une planification optimale des unités de production a le potentiel d'économiser beaucoup d'argent.

En général, le problème de l'UC peut être formulé comme un problème d'optimisation combinatoire non linéaire, à grande échelle, à nombres entiers mixtes avec des variables à la fois binaires (variable d'état de l'unité) et réel (puissance de sortie de l'unité).

Dans l'industrie de l'électricité les facteurs environnementaux ont acquis une importance croissante, pour cette raison l'industrie porte son attention sur les émissions de polluants causée par les centrales thermiques, dont beaucoup proviennent de combustibles fossiles. Par conséquent la limitation des émissions de polluants est devenue un enjeu capital dans le problème de l'UC.

L'objectif de ce présent chapitre est de présenter en détail le problème de l'UC avec ces différentes contraintes. Nous allons ensuite introduire le problème des émissions de polluants, et en fin nous parlons sur les différentes techniques de résolution du problème de l'UC.

## 2.2 Caractéristiques des unités de production électrique

Parmi les caractéristiques spécifiques des unités de productions qui sont importantes à mentionner pour la production d'électricité, sont :

- **Coût de démarrage et d'arrêt :** le coût de démarrage correspond au coût de l'énergie nécessaire pour mettre en fonctionnement toutes les installations permettant la production d'électricité (chaudières, pompes, etc.). Ce coût dépend normalement de l'état de l'unité de production au moment de l'appel à démarrer (démarrage à froid ou à chaud) [Park et al, 2014].
- **Capacité minimale et maximale de production :** généralement, l'unité de production ne peut fonctionner de manière stable qu'à partir d'un niveau de production minimal (capacité minimale de production) et jusqu'à un niveau maximal de production (capacité maximale de production).

- **Contrainte de rampe :** l'inertie propre des moyens de production limite la vitesse à laquelle les unités de production peuvent changer leur niveau de production [Ebrahimi et al, 2011]. La vitesse maximale de changement du niveau de production pour une période de temps donné est appelée contrainte de rampe [Wang et Shahidehpour, 1993 ; Svoboda et al, 1996].
- **Temps de démarrage :** il existe un temps minimal pour le démarrage des unités appelé temps de démarrage.
- **Fiabilité de l'unité :** les unités de production présentent différents degrés de fiabilité et d'incertitude. Ce degré de fiabilité peut être interprété comme le degré de précision dans la prévision de la capacité de production d'une centrale. Les erreurs de prévision de capacité peuvent venir du manque de prévision sur la force motrice (par exemple, courant d'eau ou vitesse du vent). L'exemple le plus typique est ici la production éolienne, dont le niveau de production dépend de la vitesse du vent. Cette vitesse est un phénomène climatique qui dépend de plusieurs variables, et qui est très difficile à prévoir avec exactitude. Les erreurs de prévision peuvent venir aussi de la défaillance forcée d'une unité de production ou d'autres facteurs qui l'empêchent d'atteindre leur niveau normal de production. Le cas le plus extrême est quand l'unité n'arrive pas à démarrer comme prévu, ou qu'elle doit être arrêtée complètement pour des problèmes techniques [Abookazemi et al, 2009].
- **Flexibilité :** le caractère de flexibilité ou de souplesse des unités de production à court terme représente la vitesse à laquelle chaque unité de production peut changer le niveau de sa production après un signal donné. Nous trouvons des moyens de production plus flexibles, comme les centrales hydrauliques (avec réservoir) et les centrales à combustion ou les moteurs diesel (avec des temps de démarrage faibles et des contraintes faibles de rampe). Par opposition, les centrales nucléaires et les centrales thermiques sont des moyens de production peu flexibles. Certains moyens de production peuvent avoir un caractère flexible mais nécessitent plus de temps pour préparer cette vitesse de changement. Par exemple, certaines centrales nucléaires peuvent être programmées la veille pour réaliser des variations assez grandes de production, mais, à une échelle de temps plus proche du temps réel, les variations de production possibles pour ces centrales sont beaucoup moins élevées [Abookazemi et al, 2009].

---

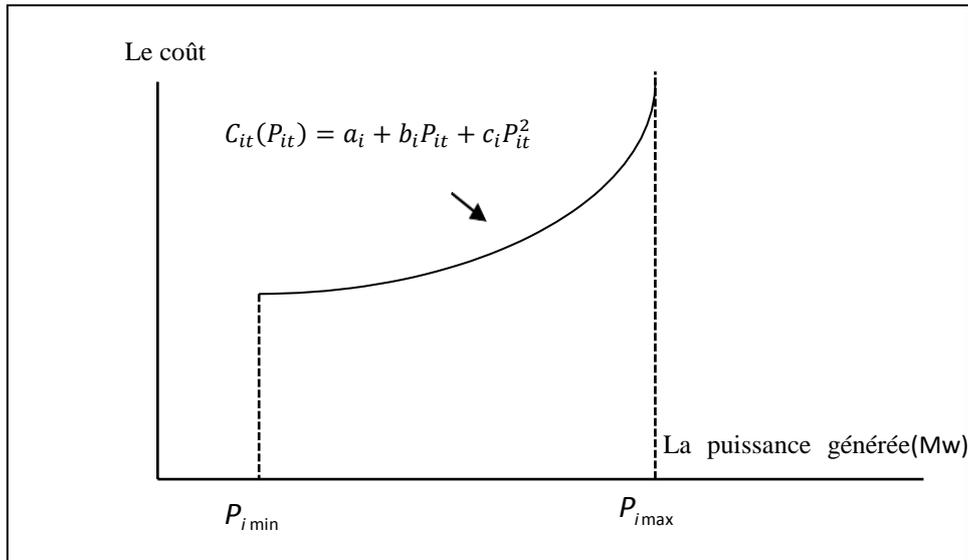
---

### 2.3 Formulation du problème d'engagement des unités de production "Unit Commitment Problem (UCP)"

Le problème d'engagement des unités "Unit Commitment Problem (UCP)" est l'un des problèmes d'optimisation les plus complexes, qui joue un rôle essentiel dans l'industrie électrique [Wood, 1984]. En fait, il s'agit d'un problème complexe qui est étudié depuis longtemps. Dès 1990, Sheble [Sheble, 1990] propose déjà une amélioration sur un algorithme de résolution pour le cas d'une centrale thermique. L'UCP concerne à déterminer le calendrier des unités de production (l'état marche/arrêt) sur une période spécifique à court terme afin de minimiser le coût total de production tout en satisfaisant un certain nombre de contraintes [Abookazemi et al, 2009].

L'UCP est un problème généralement difficile à résoudre, ainsi que le démontrent Bendotti et al [Bendotti et al. 2019] dans son étude sur des certains aspects combinatoires de l'UC comme la contrainte du temps de montée /descente minimal (Minimum up/down time) des unités. Aujourd'hui, avec l'augmentation des capacités de résolution, la possibilité de résoudre des modèles plus complexes apparaît. Pour cette raison, les contraintes sur les unités individuelles deviennent plus précises et les modèles deviennent plus complexes. La résolution des systèmes hybrides, par exemple celle proposée par [Zhao et al. 2018], devient possible, ce qui apporte une intégration plus réaliste de l'UC par rapport à la pratique effective.

Dans l'UCP l'élément fondamental du fonctionnement économique d'une unité est ses caractéristiques de performance qui décrivent la relation entre les entrées et les sorties de l'unité. Cette caractéristique spécifie le taux d'énergie d'entrée ou le coût du combustible utilisé par heure en fonction de la puissance de sortie du générateur. La caractéristique d'entrée-sortie de l'unité de production est appelée « courbe de coût » (figure 2.1) [Zhu, 2009].



**Figure 2.1.** Le coût de carburant en fonction de la puissance générée [Zhu, 2009].

### 2.3.1 Fonction objectif de l'UC

Dans une unité de production 3 types de coûts existent: les coûts du combustible, les coûts de démarrage et les coûts d'arrêt.

- **Coût du combustible :** il est évalué en se servant de la notion des valeurs de consommation spécifiques de chaleur (c'est la quantité d'énergie thermique nécessaire pour produire de l'électricité). Cette valeur est proportionnelle à l'inverse du rendement énergétique : plus la quantité est grande, moins la centrale est performante
- **Coûts de démarrage :** le coût de démarrage correspond au coût de l'énergie nécessaire pour mettre en fonctionnement toutes les installations permettant la production d'électricité (chaudières, pompes, etc.). Ce coût dépend normalement de l'état de l'unité de production au moment de l'appel à démarrer (démarrage à froid ou à chaud). Si la chaudière de l'unité est autorisée à refroidir, puis à se chauffer à la température de fonctionnement lors de la mise de l'unité sous tension, cela s'appelle refroidissement et le coût correspondant appelé le coût de démarrage à froid. D'autre part, si la chaudière est alimentée en énergie suffisante pour simplement maintenir la température de fonctionnement jusqu'à ce que l'unité soit de nouveau mise en ligne, ce coût impliqué est appelé coût de démarrage à chaud. Ce coût de démarrage à chaud varie directement avec la durée de la mise hors ligne de l'unité.

- **Coûts d'arrêt:** Le coût d'arrêt d'une unité thermique est normalement faible par rapport à son coût de démarrage. Il est généralement considéré comme une valeur constante et souvent ignorés car ils peuvent être inclus dans les coûts de démarrage.

Ces coûts (du combustible, de démarrage et d'arrêt) sont supportés par chaque unité de production à chaque période.

L'objectif du problème de l'engagement des unités de production est la minimisation de la fonction coût totale de production  $F$  qui comprend les coûts du carburant  $C_{it}(P_{it})$  des unités de productions (fuel cost) et les coûts de démarrage des unités engagées (start-up cost)  $ST_{it}$  pendant l'horizon de planification des unités.

$$F = \sum_{t=1}^T \sum_{i=1}^N [C_{it}(P_{it}) + ST_{it}(1 - u_{i,t-1})] u_{it} \quad (2.1)$$

Avec :

$u_{it}$  : est l'état de l'unité  $i$  ( $i = 1, \dots, N$ ) à l'instant  $t$ , un zéro signifie que la centrale est à l'arrêt, un 1 signifie que la centrale est en fonctionnement.

$N$ : Nombre d'unités,  $T$ : l'horizon temporel (Période d'ordonnancement)

Généralement, le coût du carburant  $C_{it}(P_{it})$ , de l'unité est fonction de la puissance de sortie du générateur. La fonction du coût la plus fréquemment utilisée est sous la forme suivant :

$$C_{it}(P_{it}) = a_i + b_i P_{it} + c_i P_{it}^2 \quad (2.2)$$

Où  $a_i$ ,  $b_i$  et  $c_i$  sont des coefficients constants propres au générateur  $i$ .

La constante  $a$  est appelée coût de marche à vide, elle représente le coût pour maintenir la marche d'une unité de production à production nulle.

Le coût de démarrage  $ST_{it}$  de l'unité  $i$  à l'instant  $t$  dépend de la durée de l'arrêt de l'unité avant le démarrage. La fonction de coût de démarrage est donnée par:

$$ST_{it} = \begin{cases} d_i & \text{si } \Gamma_i^{down} \leq \tau_i^{off} \leq \Gamma_i^{down} + f_i \\ e_i & \text{si } \tau_i^{off} > \Gamma_i^{down} + f_i \end{cases} \quad (2.3)$$

Avec :

$d_i$ : Coût de redémarrage à chaud de l'unité  $i$  (Hot startup cost).

$e_i$  : Coût de redémarrage à froid de l'unité  $i$  (Cold startup cost).

$f_i$  : Heure de démarrage à froid de l'unité  $i$ .

$\Gamma_i^{down}$  : Temps d'arrêt minimal de l'unité  $i$

$\tau_i^{off}$  : Durée de l'arrêt continue de l'unité  $i$  à l'heure  $t$

### 2.3.2 Contraintes du problème d'engagement des unités de production

Le problème d'engagement des unités de production a deux types de contraintes :

#### 2.3.2.1 Contraintes du Système

On peut représenter ces contraintes comme suit :

##### a) La contrainte d'équilibre des puissances (Power balance constraint)

La puissance délivrée par les unités allumées doit être égale à la somme de la charge totale:

$$\sum_{i=1}^N P_{i,t} u_{i,t} = D_t \quad t = 1, \dots, T \quad (2.4)$$

$D_t$  : Puissance demandée par la charge à l'instant  $t$ .

##### b) La contrainte de la réserve tournante (Spinning Reserve Constraint)

Une notion très importante est celle de la sécurité. En effet, on n'est jamais à l'abri d'une défaillance technique, et on ne peut tolérer le fait de couper l'électricité dans tout un secteur dès qu'une unité est forcée de déclencher. Il faut donc une certaine quantité de réserves tournantes à chaque instant  $t$  notée  $R_t$ . On considère généralement que la réserve doit assurer 10% de la demande :

$$\sum_{i=1}^N P_i^{max} u_{i,t} \geq D_t + R_t \quad t = 1, \dots, T \quad (2.5)$$

Avec :

$P_i^{max}$  : Puissance maximale de l'unité  $i$ .  $R_t$  : Réserve tournante du système à l'heure  $t$ .

#### 2.3.2.2 Contraintes des unités

Ces contraintes sont données comme suit :

##### a) Limite de production de puissance (Power generating limit)

Généralement, l'unité de production ne peut fonctionner de manière stable qu'à partir d'un niveau de production minimal (capacité minimale de production) et jusqu'à un niveau maximal de production (capacité maximale de production). Pour chaque unité allumée, la puissance délivrée doit être incluse entre la limite minimale et la limite maximale de génération :

$$P_i^{min} \leq P_{it} \leq P_i^{max} \quad (2.6)$$

$P_i^{min}$  : Puissance de sortie minimale de l'unité  $i$ .

$P_i^{max}$  : Puissance de sortie maximale de l'unité  $i$ .

**b) Temps minimal d'allumage et d'extinction (Minimum up/down time)**

L'unité ne peut pas être allumée ou éteinte instantanément une fois qu'elle est engagée ou désengagée. Les contraintes de temps minimal d'allumage et d'extinction imposent un nombre minimum de temps qui doivent s'écouler avant que l'unité puisse changer son état. La formule des temps minimal d'allumage et d'extinction est donnée par :

$$(\tau_{i,t-1}^{on} - \Gamma_i^{up})(u_{i,t-1} - u_{it}) \geq 0 \quad (2.7)$$

$$(\tau_{i,t-1}^{off} - \Gamma_i^{down})(u_{it} - u_{i,t-1}) \geq 0$$

Avec :

$\tau_{i,t}^{on}$  : Durée de marche continu de l'unité  $i$  à l'heure  $t$ .

$\Gamma_i^{up}$  : Temps de fonctionnement minimal de l'unité  $i$ .

**c) Contraintes de vitesse de rampe (Ramp rate Constraints):**

En raison des limites des contraintes thermiques et des caractéristiques mécaniques, les niveaux de variation de sortie de chaque unité en ligne sont limités par des limites de vitesse de rampe. Ceux-ci représentent la plage de variation de la production sur une unité de temps utilisée pour éviter les effets indésirables sur les unités de production en raison de changements rapides de charge. Lorsque l'unité est en phase de démarrage, un processus de préchauffage doit être introduit afin d'éviter une rupture fragile, en particulier lorsque le démarrage de l'unité est un processus long. En raison des limitations physiques de l'unité, la capacité de génération de l'unité augmente en tant que fonction de rampe [Simopoulos et Kavatza, 2005 ; Wang et Shahidehpour, 1993]. De même, lorsque l'unité est en phase d'arrêt, la turbine met un certain temps à se refroidir. Avant que la capacité de production de l'unité ne diminue jusqu'à sa limite inférieure, l'énergie résiduelle doit être utilisée pour répondre à la demande de charge. Pour chaque unité  $i$ , on exige une élévation maximale de production  $UR_i$  et une chute maximale de production  $DR_i$  ce qui ajoute les deux contraintes suivantes :

- **Élévation maximale de la puissance :**

$$P_i^{max}(t) = \min(P_i^{max}, P_i(t-1) + UR_i) \quad (2.8)$$

- **Chute maximale de la puissance :**

$$P_i^{min}(t) = \max(P_i^{min}, P_i(t-1) - DR_i) \quad (2.9)$$

## 2.4 Minimisation des émissions de polluants

L'industrie de l'énergie est l'une des plus grandes sources d'émissions de polluants, près de 40% du ( $CO_2$ ) étant émis par la combustion de combustibles fossiles. Avec l'augmentation de la demande d'énergie, il est nécessaire de développer des politiques d'émissions, des technologies et des opérations dans les systèmes électriques qui contribuent à la réduction des émissions totales de polluants. En plus en raison des préoccupations croissantes concernant les considérations environnementales, la société exige une électricité adéquate et sûre, c'est-à-dire non seulement au prix le plus bas possible, mais aussi à un niveau de pollution minimal. Dans ce cas, deux objectifs contradictoires, à savoir les coûts opérationnels et les émissions de polluants, devraient être minimisés simultanément [Basu, 2008 ; Basu, 2010].

Les émissions polluantes sont modélisées par différentes fonctions en fonction de l'état des groupes électrogènes. La pollution atmosphérique telle que l'oxyde de soufre ( $SO_x$ ), l'oxyde d'azote ( $NO_x$ ), et le dioxyde de carbone ( $CO_2$ ), causée par les unités de production alimentées en combustible fossiles est généralement modélisée par une fonction quadratique [Venkatesh et al, 2003].

$$EC_{it}(P_{it}) = \alpha_i + \beta_i P_{it} + \gamma_i P_{it}^2 \quad (2.10)$$

Avec:  $\alpha_i, \beta_i, \gamma_i$  sont les coefficients d'émissions de l'unité  $i$

## 2.5 État de l'art sur les différentes techniques de résolution de l'UCP

Plusieurs méthodes ont été proposées dans la littérature pour résoudre le problème de l'UC, parmi ces méthodes, on trouve :

**1) Les méthodes d'optimisation classiques :** la programmation dynamique "Dynamic Programming" (DP) [Pang et al, 1981; Snyder et al, 1987]. L'avantage de cette méthode réside dans sa simplicité, est sa capacité à maintenir la faisabilité de la solution. Par contre l'inconvénient de la DP est le problème de la dimensionnalité, qui peut entraîner des exigences de temps de calcul et de mémoire saturé. Elle souffre d'un long temps de traitement qui augmente de manière exponentielle avec la taille du problème, d'où seuls les problèmes de petite taille peuvent être résolus. Plus récemment, d'autres méthodes approchées basées sur la DP ont été proposées pour le problème de l'UC. Par exemple, les auteurs dans [Rong et al, 2008] ont proposé un algorithme de la DP basé sur la relaxation linéaire de l'état marche / arrêt des unités et sur l'engagement séquentiel des unités dans la planification de la production sur plusieurs périodes. Dans [Patra et al, 2009], une technique a été proposée de la DP avec une procédure de sélection d'unité basée sur le floue et le recuit simulé. Par conséquent les exigences de calcul sont réduites en minimisant le nombre de chemins de solution potentiels à

chaque étape de la procédure de recherche grâce à l'utilisation d'heuristiques, telles que l'ordre de priorité des unités, le regroupement d'unités et le dispatching économique basé sur l'ordre de priorité.

Pour réduire le problème de la dimension de nombreuses stratégies heuristiques ont été introduites, la méthode la plus largement utilisée est basée sur une liste de priorités "Priority List" (PL), la liste est généralement formée en classant les unités en fonction de leur coût de production marginal d'énergie ou de l'indice de coût moyen à pleine charge [Sen et Kothari, 1998]. D'autre part dans [Govardhan, 2016], trois approches de l'PL différentes sont envisagées, à savoir la priorité de coût, la priorité de puissance et la priorité hybride pour obtenir une solution optimale sur une période d'ordonnancement pour un système standard IEEE à 10 unités.

La méthode de La relaxation lagrangienne "Lagrangian Relaxation"(LR) est capable de résoudre rapidement des problèmes de l'UC à grande échelle, mais les solutions obtenues sont généralement sous-optimales. LR a été appliqué dans [Muckstadt et Koenig, 1977] pour résoudre le problème de l'UC sans tenir compte des contraintes de rampe. Dans [Bard, 1988] l'auteur utilise l'LR pour décomposer le modèle en sous-problèmes distincts, un pour chaque unité. Il teste la méthode sur un système à 10 unités avec des coûts de démarrage exponentiels. Dans [Frangioni et al, 2008] une approche efficace de l'LR a été proposée pour résoudre le problème de l'UC. Cette approche repose sur un algorithme exact pour résoudre le problème d'engagement mono-unité (single-unit commitment). Plus récemment, dans [Fan et al, 2012] deux méthodes de l'LR sont proposées: l'une basée sur l'optimisation de sous-gradients et l'autre basée sur des plans de coupe. Ils ont été testés sur plusieurs instances de problèmes avec une fonction de coût plus simple et linéaire. D'après les tests effectués, la méthode des sous-gradients donne de meilleurs résultats.

Généralement les méthodes approchées se caractérisent par une représentation simple et une convergence rapide, mais malheureusement la qualité de la solution n'est pas garantie et elles sont souvent piégées dans des optima locaux, en particulier lors de la manipulation de problème à grande échelle.

**2) Les méthodes d'optimisation intelligente :** de nombreuses approches ont été proposées pour résoudre le problème de l'UC, les méthodes qui sont basées sur les méta-heuristique comme ; la programmation évolutionnaire "EvolutionaryProgramming" (EP) [Juste et al, 1999], l'optimisation par les essaims de particules "Particle Swarm Optimization"

---

(PSO) [Kumar et Singh, 2017 ; Zhao et al, 2006], l'optimisation par les colonies de fourmis "Ant Colony Optimization" (ACO) [Zand et al, 2016], les algorithmes quantiques évolutionnaires "Quantum Evolutionary Algorithms" (QEA) [Jeong et al, 2009a ; Lau et al, 2009], les algorithmes mémétiques "Memetic Algorithm" (MA) [Valenzuela et Smith, 2002] et les algorithmes génétiques "Genetic Algorithm" (GA) [Damousis et al, 2004; Dudek, 2013; Farag et al, 2015, Swarup et Yamashiro, 2002], [Sun et al, 2006, Dang et Li, 2007]. Dans [Juste et al, 1999] les auteurs utilisent une programmation évolutive "Evolutionary Programming" (EP) dans laquelle les populations d'individus évoluent par des changements aléatoires, la compétition et la sélection. Le problème de l'UC est codé sous la forme d'une chaîne de symboles, et il est considéré comme un candidat pour la reproduction. Les populations initiales de ces candidats sont produites au hasard pour former la base des générations suivantes. De leur part [Kumar et Singh, 2017] présente la solution du problème de l'UC à court terme (un jour) avec succès. Le problème est résolu à l'aide de l'algorithme de PSO pour un système composé de 6 unités de production. [Zhao et al, 2006] introduisent une optimisation améliorée des essaims de particules avec l'adoption de la conception orthogonale pour la population initiale dispersée uniformément sur un espace de solution réalisable. Cette méthode a donné de bons résultats. Dans [Zand et al, 2016] une version modifiée de l'optimisation des colonies de fourmis (MACO) est introduite pour résoudre le problème de l'UC. L'efficacité de la méthode proposée dans deux systèmes d'alimentation contenant 4 et 10 unités génératrices est indiquée. Dans ces travaux [Jeong et al, 2009a ; Lau et al, 2009] des algorithmes évolutifs d'inspiration quantique (QEA) sont proposés. Le QEA est basé sur le concept et les principes de l'informatique quantique, tels que les bits quantiques, les portes quantiques et la superposition d'états. QEA utilise une représentation de bits quantiques, qui présente une meilleure diversité de population par rapport aux autres représentations utilisées dans les algorithmes évolutifs, il utilise des portes quantiques pour conduire la population vers la meilleure solution. Dans cette étude ils divisent le problème de l'UC en deux sous-problèmes: planifier l'état marche / arrêt des unités et déterminer la puissance de sortie des unités engagées. Dans les deux travaux, des mécanismes de réparation sont utilisés pour accélérer la qualité de la solution et pour s'assurer que les plannings unitaires générés par l'QEA sont réalisables.

[Damousis et al, 2004], présente une nouvelle solution au problème de l'engagement d'unité thermique qui utilise un algorithme génétique basée sur un codage entier. Le codage proposé permet une réduction importante de la taille des chromosomes par rapport au codage

binaire habituel. En conséquence, la robustesse de l'algorithme et le temps d'exécution sont améliorés. Par contre [Dudek, 2013] présente une nouvelle approche pour résoudre le problème de l'UC basée sur un algorithme génétique avec une représentation binaire du temps de démarrage et d'arrêt de l'unité. La méthode proposée réduit l'espace de solution et le temps de calcul par rapport à l'approche d'algorithme génétique classique. [Frag et al, 2015] présente un nouvel algorithme génétique codé en binaire et en réel basé sur la technique de k-means clustering. Dans leur étude l'AG codé en binaire est utilisé pour obtenir un calendrier d'engagement réalisable pour chaque unité de production, tandis que les puissances générées par les unités engagées sont déterminées en utilisant un codage réel. Les performances de l'algorithme proposé sont assez satisfaisantes par rapport aux résultats précédemment rapportés. [Dang et Li, 2007] décomposent le problème de l'UC en un problème de planification et un autre de répartition. Le premier est résolu par un AG utilisant une représentation chromosomique à point flottant. La production de chaque unité en ligne est déterminée par la méthode de l'LR. Dans [Sun et al, 2006] la solution proposée par l'algorithme est représentée par une matrice de nombres réels représentant le calendrier de génération de chaque unité à chaque période de temps. Un mécanisme de réparation est utilisé pour garantir que le calendrier de production satisfait les contraintes du système d'un problème de 38 unités.

L'algorithme de compétition impérialiste "Imperialistic Competition Algorithm"(ICA), a été appliqué au problème de l'UC dans [Hadji et Vahidi, 2012]. Les auteurs ont testé leur méthodologie sur les problèmes de référence les plus couramment utilisés. Cependant, comme il est montré dans la section des résultats, les méthodes proposées n'améliorent que les résultats du problème avec 10 unités. Il existe plusieurs d'autres algorithmes qui ont été proposées pour résoudre le problème de l'UC telle que l'algorithme de recherche gravitationnelle "Gravitational Search Algorithm" (GSA) [Yuan et al, 2014] et l'algorithme de recherche Harmony "Harmony Search Algorithm" (HSA) [Pourjamal et Ravadanegh, 2013]. L'avantage de toutes ces méthodes réside dans leur efficacité en particulier lors de la manipulation de problème à grande échelle. Ces méthodes peuvent gérer des contraintes non linéaires complexes et fournir des solutions de haute qualité. Cependant, ces méthodes souffrent du problème de la dimensionnalité.

**3) Les méthodes d'optimisation hybrides :** afin de combiner les avantages des méthodes classiques et intelligentes, des approches hybrides ont été proposées dans la

littérature, on mentionne ; hybride PSO et ACO [Terki et Boubertakh, 2018], CS et TS [Terki et Boubertakh, 2021], GA et PSO (GA-PSO) [Archana, 2015], GA basé sur PL (GABPL) [Sarjiya et al, 2015], hybride PSO et GWO "Grey wolf Optimizer" (PSO – GWO) [Kamboj, 2015]. Dans [Valenzuela et Smith, 2002] un algorithme mémétique (MA) et un algorithme génétique (GA) utilisant la recherche locale combinée à la relaxation lagrangienne sont présentés. Les résultats montrent que cette approche hybride peut produire des calendriers raisonnables à des temps de calcul satisfaisants.

Ces dernières années, une nouvelle méthode d'optimisation méta-heuristique est développée par Yang et Deb en 2009 [Yang et Deb, 2009] appelée l'algorithme de la recherche coucou "Cuckoo Search" (CS), inspiré du comportement naturel des coucous. La simplicité de sa mise en œuvre a attiré de nombreux chercheurs dans différents domaines pour prouver son efficacité dans les différents problèmes d'optimisation. Dans [Intissar et al, 2018 ; Chitra et Ravichandran, 2014a] CS est utilisé pour résoudre le problème de la répartition économique, et en particulier le problème de l'UC [Chitra et Ravichandran, 2014a, 2014b ; Chandrasekaran et Sishaj, 2012 ; Sharma et al, 2015 ; Liu et al, 2018a]. Dans [Chitra et Ravichandran, 2014a, 2014b], les auteurs ont proposé le statut On / Off d'une unité sur la base d'une représentation entière signée. Dans [Chandrasekaran et Simon, 2012], les auteurs ont développé un algorithme intégré de la recherche coucou et lagrangien (BCSL). Dans [Sharma et al, 2015], un algorithme de recherche de coucou basé sur un modèle de poids est utilisé pour les systèmes à 3 et 6 unités. Dans [Terki et Boubertakh, 2019a] un algorithme de recherche de coucou binaire est appliqué pour résoudre un système à 10 unités.

Dans [Liu et al, 2018b], un algorithme de recherche de coucou binaire amélioré avec une nouvelle méthode de recherche heuristique de la liste de priorités (IBCS) est appliqué pour résoudre un système à 4 unités.

## 2.6 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons exposé des notions de base ainsi que la formulation mathématique du problème de l'engagement des unités de production UCP. Ensuite nous avons présenté le problème d'émission de polluant. Une fois que toutes ces notions sont introduites, nous avons discuté sur les différentes techniques utilisées pour la résolution de l'UCP.

Dans le chapitre suivant, nous présentons notre contribution qui consiste à proposer trois algorithmes d'optimisation intelligente pour la résolution du problème de l'UC.

## **CHAPITRE 3**

---

### **Algorithmes d'optimisation intelligente**

---

#### **Sommaire**

---

<b>3.1 Introduction .....</b>	<b>48</b>
<b>3.2 Méthodes intelligentes.....</b>	<b>48</b>
<b>3.2.1 Les méthodes intelligentes à base de solution unique.....</b>	<b>48</b>
<b>3.2.2 Les méthodes intelligentes à base de population de solution.....</b>	<b>51</b>
<b>3.3 Conclusion .....</b>	<b>69</b>

---

### 3.1 Introduction

De nos jours l'optimisation intelligente est devenue une branche très importante pour résoudre plusieurs problèmes d'optimisation combinatoire dans différents domaines tels que l'industrie, la finance et d'autres secteurs.

L'optimisation intelligente regroupe toutes les méthodes inspirées, des systèmes naturels et des systèmes écologiques ainsi que du comportement de reproduction et de vie des animaux et des insectes. De nombreuses techniques d'optimisation intelligente ont été proposées dans la littérature, nous pouvons citer à titre d'exemple : les algorithmes évolutionnaires et les algorithmes génétiques qui sont inspirés des principes de l'évolution Darwinienne et de la biologie, le recuit simulé qui est inspiré d'un processus physique, la recherche tabou qui s'inspire de la mémoire des êtres humains, les algorithmes basés sur l'intelligence en essaim comme l'algorithme d'optimisation par essaim de particules, l'algorithme de colonies d'abeilles, l'algorithme de colonies de fourmis, la recherche coucou qui s'inspirent du comportement social de certaines espèces évoluant en groupe. Ces algorithmes ont attiré l'attention des chercheurs dans des différents domaines à cause de leurs mécanismes de recherche parallèle et de leurs approches qui offre le meilleur moyen de rechercher l'optimum global [Vasant et al, 2020, 2019].

Ce chapitre s'efforce de présenter un état de l'art sur les méthodes les plus connu de l'optimisation intelligente.

### 3.2 Méthodes intelligentes

Les méthodes intelligentes représentent une alternative pour résoudre les problèmes d'optimisation de grande taille lorsque les méthodes exactes échouent. Elles permettent d'obtenir des solutions de bonne qualité en un temps de calcul réduit, On distingue deux catégories de méthodes intelligentes:

#### 3.2.1 Les méthodes intelligentes à base de solution unique

Les méthodes intelligentes à base de solution unique aussi appelées méthodes de trajectoire commencent la recherche avec une seule solution initiale et s'en éloignent progressivement, en construisant une trajectoire dans l'espace de recherche. Elles se basent sur la notion du voisinage pour améliorer progressivement la qualité de la solution courante au cours des différentes itérations. Ces méthodes englobent essentiellement, la méthode du recuit simulé, la recherche tabou, la méthode GRASP, la recherche à voisinage variable la recherche locale guidée ...etc.

### 3.2.1.1 Le recuit simulé

La méthode du Recuit Simulé (RS) a été proposée par Kirkpatrick, Gelatt et Vecchi [Kirkpatrick et al, 1983], Son principe est inspiré du processus de recuit physique utilisé en métallurgie. Il consiste à effectuer des cycles de refroidissement lent et de réchauffage d'un matériau afin de minimiser son énergie. L'idée prise en considération par les métallurgistes qui savent que si le métal refroidit trop vite, il contiendra beaucoup de défauts microscopiques et s'il refroidit lentement ils obtiendront une structure bien ordonnée. Lors de la recherche de l'optimum la température diminue, l'algorithme commence par une marche aléatoire, puis les mauvaises solutions sont de moins en moins souvent acceptées. En fait, l'idée est de diminuer petit à petit la chance d'accepter des solutions qui dégradent la fonction objectif.

Le fonctionnement de cet algorithme est présenté dans l'algorithme 3.1.

#### Algorithme 3.1. Le recuit simulé

##### Début

Construire une solution initiale  $x$  ; Calculer la fitness  $f(x)$  de  $x$  ;

Initialiser une valeur de la température  $T$  ;

Générer un nombre aléatoire  $r \in [0,1]$  ;  $xbest = x$  ;

**Tant que** la condition d'arrêt n'est pas vérifiée **faire**

    Générer une solution  $x'$  voisine de  $x$ ,

    Calculer  $f(x')$  ;

    Calculer  $\Delta(f) = f(x') - f(x)$

**Si**  $\Delta(f) \geq 0$  **alors** (maximisation)

$xbest = x'$  ;

$x = x'$  ;

**Sinon Si**  $r < e^{-\frac{\Delta(f)}{T}}$  **alors**

$x = x'$  ;

**Fin Si**

    Décroître la température  $T$  ;

**Fin Tant que**

Retourner  $xbest$  ;

**Fin**

### 3.2.1.2 La recherche tabou

La méthode de la Recherche Tabou (RT), (Tabu Search "TS") été formalisée par Fred Glover en 1986 [Glover, 1986]. C'est une technique d'optimisation combinatoire que certains présentent comme une alternative au recuit simulé. La recherche tabou est une méthode de recherche locale avancée, elle fait appel à un ensemble de règles et de mécanismes généraux

pour guider la recherche de manière intelligente [Glover et Laguna, 1997]. Inspirés de la mémoire humaine la RT utilise explicitement l'historique de la recherche, à la fois pour échapper aux minima locaux et pour mettre en œuvre une stratégie d'exploration.

La RT est une procédure itérative qui commence par une solution initiale qui est générée aléatoirement, tente de converger vers la solution optimale en exécutant, à chaque pas, un mouvement (processus de génération des solutions d'essais) dans l'espace de recherche. Chaque pas consiste d'abord à engendrer un ensemble de solutions voisines de la solution courante pour ensuite en choisir la meilleure solution et mémoriser la solution précédente. Toutefois, pour palier l'inconvénient majeur des méthodes de recherche locale, la RT a pour but d'améliorer à chaque étape, la valeur de la fonction objective, en utilisant une mémoire afin de conserver les informations sur les solutions déjà visitées et par lesquelles il est interdit de repasser. Cette mémoire est appelée « liste tabou », son objectif est d'empêcher l'algorithme d'être piégé dans un optimum local et tomber dans le problème du cyclage répétitif. Pour éviter le risque d'éliminer certains mouvements particulièrement utiles qui possèdent des solutions tabou, une technique appelée « critère d'aspiration » permette de lever l'interdiction de l'utilisation d'un mouvement si ce dernier conduit à une meilleure solution.

La liste tabou demande une gestion soignée de sa taille et de ce qu'elle doit contenir comme informations sur les solutions trouvées car elle contrôle la mémoire du processus de recherche. En effet, si la mémoire est faible alors elle va favoriser l'intensification, car un nombre de solutions restreint seront interdites. Cependant, plus la taille de la mémoire augmente, et plus la diversification est favorisée, car l'algorithme pourra de moins en moins visiter les régions précédentes qui ont de grandes chances d'être voisines à la solution actuelle.

La RT a été largement utilisée pour la résolution de problèmes d'optimisation difficiles comme: les problèmes de routage, d'ordonnancement, le problème du voyageur de commerce, les problèmes du sac à dos, .. etc. C'est une méthode facile à mettre en œuvre, rapide, donne souvent de bons résultats et permet de se sauver du premier optimum local rencontré.

L'algorithme 3.2 représente un schéma général de l'algorithme de la recherche tabou.

**Algorithme 3.2. La recherche tabou****Début**

Construire une solution initiale  $x$  ;

Calculer la fitness  $f(x)$  de  $x$  ;

Initialiser une liste tabou  $T = \emptyset$ ;

$x_{best} = x$ ;

**Tant que** la condition d'arrêt n'est pas vérifiée **faire**

Générer  $x'$  solution voisine de  $x$ ,

Calculer  $f(x')$  ; mettre à jour  $T$

**Si**  $f(x')$  est meilleure que  $f(x)$  **alors**

$x_{best} = x'$ ;

$x = x'$ ;

**Fin Si**

Mettre à jour  $T$ ;

**Fin Tant que**

Retourner  $x_{best}$  ;

**Fin**

**3.2.2 Les méthodes intelligentes à base de population de solutions**

Les méthodes intelligentes à base de population de solutions, font évoluer simultanément un ensemble de solutions dans l'espace de recherche. L'idée d'utiliser un ensemble de solutions au lieu d'une seule solution renforce la diversité de la recherche et augmente la possibilité d'apparition de solutions de bonne qualité. Ces méthodes, regroupent deux grandes classes sont: les algorithmes évolutionnaires inspirés de la théorie de l'évolution de Darwin [Darwin, 1859] (les stratégies d'évolution, les algorithmes génétiques,...) et les algorithmes d'intelligence en essaim inspirés de biologie ou de l'éthologie [Bonabeau et al, 1999] (l'algorithme d'optimisation par essaim de particules, l'algorithme de colonies de fourmis, l'algorithme de colonies d'abeilles, l'algorithme de la recherche coucou, ...). Ces algorithmes ont connus une exploration importante ces deux dernières décennies.

**3.2.2.1 Les algorithmes évolutionnaires**

Les Algorithmes Evolutionnaires (AE) sont des méthodes stochastiques d'optimisation globale s'inspirant de la théorie de l'évolution « Darwinienne » des espèces biologiques. Selon la théorie de Charles Darwin [Darwin, 1859], qui se base sur le principe de la sélection naturelle, les individus bien adaptés à l'environnement ont plus de chances de se reproduire et de survivre que les autres individus. En fait, la combinaison des caractéristiques des individus peut former au fil des générations de nouveaux individus de plus en plus mieux adaptés à leur

environnement et qui peuvent avoir plus de chances de survivre que leurs parents. Les (AE) utilisent à la fois les principes de la survie des individus les mieux adaptées et ceux de la propagation du patrimoine génétique qui s'inspirent des mécanismes de sélection naturelle et des phénomènes génétiques tel que des mécanismes d'évolution de la nature : croisements, mutations, sélections, ...etc.

- **La Sélection:** Cette opération s'intervient dans deux phases. Elle est appliquée au premier lieu pour choisir les meilleurs individus parents qui vont se reproduire pour construire de nouveaux individus enfants. Ensuite, elle est appliquée à la fin de chaque itération pour opter pour les individus qui vont survivre et construire la nouvelle population.
- **La reproduction:** Cette opération est en général composée de deux autres opérations: le croisement et la mutation. Elle permet la génération de nouveaux individus en combinant (phase de croisement) les caractéristiques des individus sélectionnés puis en appliquant quelques modifications de certains individus (phase de mutation) pour améliorer leurs qualités.
- **L'évaluation:** Cette opération consiste à mesurer la qualité de chaque individu (calculer la fitness des individus).

Les algorithmes évolutionnaires englobent quatre grandes familles d'algorithmes évolutionnaires, la programmation évolutionnaire, les algorithmes génétiques et la programmation génétique [Dupas, 2004; Nabonne, 2004].

- **Les Stratégies d'Evolution :** (SE), développés par [Rechenberg, 1965, 1973]. Elles ont été développées pour résoudre des problèmes d'optimisation à variables réelles posés au milieu industriels et pour les quels n'existe pas de fonction objectif analytique; le contexte étant l'optimisation paramétrique. La SE utilise le principe de mutation sur les réels du modèle de la programmation évolutive avec un taux de mutation plus grand. Si la proportion de mutation réussie est élevée, l'espace de recherche exploré est limité autour d'un optimum local; il faut donc diversifier la population en augmentant le taux de mutation. Ces approches utilisent un opérateur de sélection de type déterministe, les solutions dont la fonction d'adaptation est mauvaise sont éliminées de la population.
- **Programmation Evolutionnaire :** (PE), développés par [Fogel et al, 1966]. Ce modèle évolutionnaire s'appuie sur la mutation et n'utilise pas dans sa version originale la recombinaison des individus par croisement. Développé à l'origine pour

l'évolution des automates à état fini, ce modèle est souvent appliqué à la résolution de problèmes d'optimisation à variables réelles dans des espaces de recherche très variés. L'idée consiste à faire subir des mutations importantes aux mauvais individus et des mutations faibles aux bons individus. L'opérateur de sélection est de type probabiliste.

- **Programmation Génétique** :(PG), développés par [Koza, 1992]. Apparue initialement comme une extension du modèle d'apprentissage des algorithmes génétiques. La PG permet de générer des fonctions informatiques à partir des principes évolutionnaires, la population est un ensemble de codes de base de programmes informatiques. La spécificité des PG est l'espace de recherche, Les individus formant une population sont donc des programmes candidats à la résolution d'un problème. Ces programmes sont exprimés sous la forme d'arbres sur lesquels les opérateurs génétiques produisent des transformations en vue d'obtenir un programme satisfaisant la résolution du problème choisi [Dupas, 2004; Lutton, 2004].

Ces différentes classes d'algorithmes évolutionnaires ne diffèrent que sur les détails d'implantation des opérateurs et sur les procédures de sélection et remplacement de la population. Les méthodes les plus répandues sont les algorithmes génétiques.

- **Algorithme Génétique**

L'Algorithme Génétique (AG) est fondé sur les mécanismes de la sélection naturelle et de la génétique, utilisant les principes de la survie des structures les mieux adaptées. Il a été proposé par Jhon Holland en 1975 [Holland, 1975]. Leur principe s'inspire des mécanismes biologiques tels que les lois de Mendel et la théorie de l'évolution proposée par Charles Darwin [Darwin, 1859]. La mise en œuvre des algorithmes génétiques nécessite donc les étapes suivantes :

- 1) Initialisation de la population**

La génération de la population initiale peut se faire en prenant des individus régulièrement répartis dans l'espace. Le choix de la population initiale peut conditionner fortement la rapidité de l'algorithme. Il est essentiel que la population initiale soit assez bien répartie sur tout le domaine de recherche.

- 2) Codage des variables**

Chaque individu est représenté par un ensemble de chromosomes. Il doit permettre de coder toutes les solutions et permettre la mise en œuvre des opérateurs de reproduction. Plusieurs type de codages sont utilisés, on citera à titre d'exemple: codage réel, codage binaire, Gray.

### 3) Fonction d'évaluation

La fonction d'adaptation doit exprimer le plus fidèlement possible, la problématique posée sous forme mathématique. Cette procédure permet de s'assurer que les individus performants seront conservés, alors que les individus peu adaptés seront progressivement éliminés [Vallé et Yıldızoğlu, 2001].

### 4) La sélection

La sélection intervient au début et à la fin de chaque itération, elle permet d'identifier statistiquement les individus de la population courante qui seront autorisés à se reproduire. Il existe différentes méthodes de sélection, la sélection par roulette ou proportionnelle, la sélection par tournoi, La sélection par le rang, la sélection uniforme... etc.

### 5) La recombinaison génétique

Pour créer un nouvel individu à partir des meilleures solutions précédemment sélectionnées, une étape d'identification et de sélection est donc nécessaire pour que chaque individu ait une chance proportionnelle à son adaptation de devenir parent. On distingue deux opérateurs principaux :

#### a) Le croisement

Le phénomène de croisement est une propriété naturelle de l'ADN. C'est l'échange d'un certain nombre de bits entre deux chromosomes représentant deux individus de la population pour donner deux nouveaux chromosomes d'individus (descendants). Il a pour but d'enrichir la diversité de la population est d'explorer l'ensemble des solutions possibles. De nombreux types de croisement existent dans la littérature. Les deux types essentiels d'opérateurs de croisement sont le croisement n-point et le croisement uniforme.

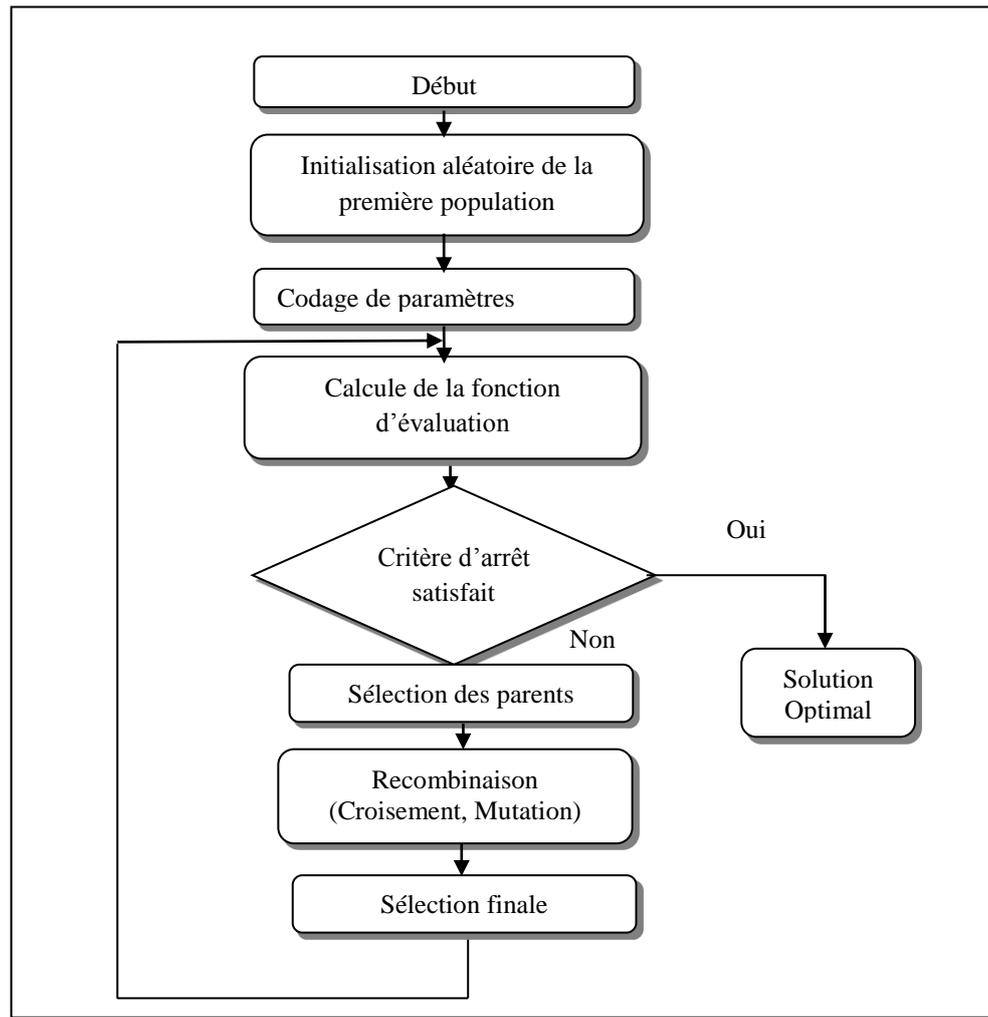
#### b) La mutation

La mutation est un changement aléatoire selon une certaine règle probabiliste qui entraîne que quelques modifications sur un nombre limité d'individus [Vallé et Yıldızoğlu, 2001]. La mutation a pour rôle de maintenir une certaine diversité dans la population et protège les individus contre une perte des informations essentielle contenues dans leurs gènes.

### 6) La sélection des individus d'une nouvelle génération (Le remplacement)

La sélection revient à choisir les meilleurs individus pour former la nouvelle génération, c'est à dire éliminer  $N$  individu parmi les  $2N$  individus ( $N$  parents et  $N$  enfants). Plusieurs méthodes sont proposées, la sélection par descendance, La sélection par compétition, la sélection élitiste... etc.

L'organigramme fonctionnel présenté dans la figure 3.1 [Michalewicz, 1994] illustre la structure générale de l'algorithme génétique.



**Figure 3.1.** Structure générale de l'algorithme génétique [Michalewicz, 1994].

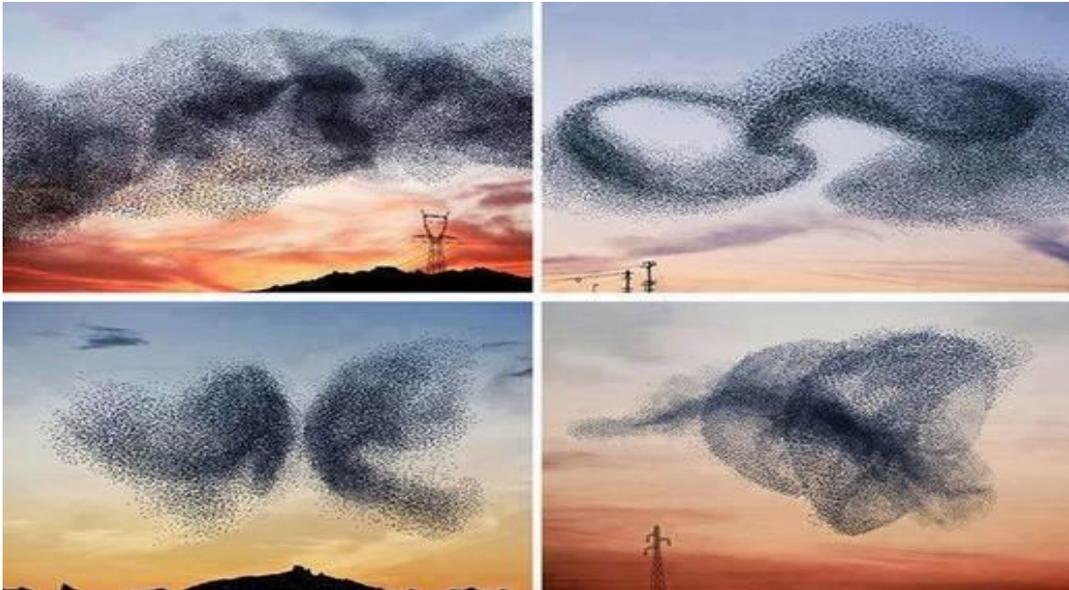
### 3.2.2.2 Intelligence des essaims

La recherche sur le comportement collectif des insectes sociaux et des phénomènes naturels a fourni aux informaticiens des méthodes puissantes pour la conception d'algorithmes d'optimisation. Une nouvelle voie scientifique apparaisse appeler « L'intelligence en essaim », (Swarm Intelligence (SI)) est né de la modélisation mathématique et informatique des phénomènes biologiques rencontrés en éthologie [Bonabeau et al, 1999]. Le mot « essaim » est généralement utilisé pour désigner un ensemble fini de particules ou d'agents interactifs. Les oiseaux évoluant en groupes, les bancs de poissons, les colonies de fourmis, les colonies d'abeilles et même les systèmes immunitaires sont des exemples d'essaim. Plusieurs algorithmes ont été proposés ces dernières décennies comme: L'optimisation par essaim de particules, le système immunitaire artificiel, les colonies de fourmis artificielles, les colonies d'abeilles artificielles, la recherche coucou,...etc.

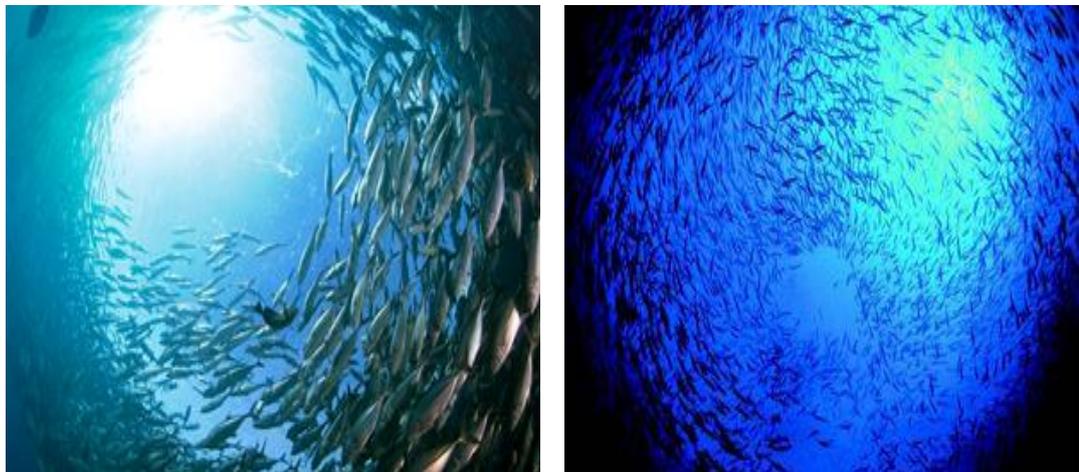
Ces techniques sont aujourd'hui appliquées à tout un ensemble de problèmes scientifiques et techniques.

### 1) Algorithme d'Optimisation par Essaim Particulaire

La méthode d'Optimisation par Essaim Particulaire (OEP) a été proposée en 1995, par James Kennedy et Russel Eberhart [Kennedy et Eberhart, 1995]. Ils se sont basés sur les idées et les études de Reeves [Reeves, 1983] et Reynolds [Reynolds, 1987] et surtout des résultats de Heppner et Grenander [Heppner et Grenander, 1990] afin de comprendre la stratégie de recherche de nourriture et d'affrontement des prédateurs que l'on retrouve chez les groupes d'animaux. L'optimisation par essaim de particules (Particle Swarm Optimization "PSO") est une méthode d'optimisation qui s'inspire du comportement social des nuées d'oiseaux (Figure 3.2) ou des bancs de poissons (Figure 3.3).



**Figure 3.2.** Nuage d'oiseaux



**Figure 3.3.** Bancs de poissons



Le processus de recherche de chaque particule suit les règles suivantes [Clerc et al, 2002] :

- Chaque particule est dotée d'une mémoire qui lui permet de mémoriser le meilleur point par lequel elle est déjà passée et elle a tendance à retourner vers ce point.
- Chaque particule appartient à un voisinage. Ce dernier a une influence sur son comportement. Cela signifie qu'une particule sera affectée par le meilleur point trouvé par n'importe quel membre de son voisinage topologique.

Chaque particule  $i$  de l'essaim est caractérisée à la fois par sa position  $X_i$  et par un vecteur de changement de position (vitesse)  $V_i$ . A chaque itération, chaque particule se déplace en prenant en compte sa meilleure position  $P_{best}$  ainsi que la meilleure position connue de son voisinage  $g_{best}$ . À chaque itération, le déplacement de chaque particule suit un vecteur, calculé comme somme pondérée des vecteurs représentant sa vitesse courante  $V_i$ , ainsi que sa  $P_{best}$  et sa  $g_{best}$ . La nouvelle position sera déterminée par la somme de la position précédente et la nouvelle vitesse comme le montre l'équation suivante:

$$V_i(t + 1) = w * V_i(t) + c_1 * R_1 * (P_{best}(t) - X_i(t)) + c_2 * R_2 * (g_{best}(t) - X_i(t)) \quad (3.1)$$

Où ( $i = 1, 2, \dots, N$ ), et  $N$  est le nombre de particules,  $w$  est le coefficient d'inertie permet de contrôler l'influence de la vitesse obtenue au pas précédent,  $X$  est la position (solution) actuelle,  $c_1$  et  $c_2$  sont deux constantes appelées coefficients d'accélération,  $R_1$  et  $R_2$  sont deux nombres aléatoires tirés uniformément dans l'intervalle  $[0,1]$ . Pour éviter que les particules se déplacent trop rapidement d'une région à une autre dans l'espace de recherche, la vitesse de déplacement pendant une itération est serrée dans l'intervalle  $[-V_{max}, V_{max}]$  donnée par l'équation (3.2) et de même pour son déplacement donné par l'équation (3.3) [Clerc et Kennedy, 2002].

$$V(t) = \text{sing}(V(t)).\min(|V(t)|, V_{max}) \quad (3.2)$$

$$X(t) = \text{sing}(X(t)).\min(|X(t)|, X_{max}) \quad (3.3)$$

La position de chaque particule est également mise à jour à chaque itération comme suit :

$$X(t + 1) = X(t) + V(t + 1) \quad (3.4)$$

Le PSO commence la recherche par une initialisation aléatoire de l'essaim dans l'espace de recherche, il affecte à chaque particule une position et une vitesse initiales ainsi que les  $P_{best}$ . La meilleure position trouvée par l'essaim  $g_{best}$  est calculé à partir de la fitness des

particules. A chaque itération de l'algorithme, chaque particule est déplacée suivant (3.1) et (3.4). Une fois le déplacement des particules effectué, les nouvelles positions sont évaluées. Les  $P_{best}$  ainsi que  $g_{best}$  sont alors mis à jour.

L'algorithme 3.3 présente le fonctionnement du PSO.

**Algorithme 3.3. Optimisation par essaim de particules**

**Début**

Initialisation aléatoire des positions et des vitesses de chaque particule,

Pour chaque particule,  $P_{besti} = X_i$

Calculer  $f(X_i)$  de chaque particule;

Calculer  $g_{best}$  et  $P_{best}$

**Tant que** la condition d'arrêt n'est pas vérifiée **faire**

**Pour**  $i = 1$  à  $N$  faire

    Calculer la nouvelle vitesse à l'aide de l'équation (3.1) ;

    Trouver la nouvelle position à l'aide de l'équation (3.4) ;

    Evaluation des positions ;

**Si**  $f(X_i) < f(P_{besti})$

$P_{besti} = X_i$  ;

**Fin Si**

$g_{best} = P_{besti}$

**Fin Si**

**Fin Pour**

## 2) Le système immunitaire artificiel

Les systèmes immunitaires artificiels (SIA) (Artificial Immune Systems "AIS") [Hunt et Cooke, 1996] sont des méthodes intelligente inspirées des systèmes immunitaires naturels dont la fonction la plus importante est de protéger le corps contre les pathogènes (micro-organismes nuisibles tels que les bactéries et les virus). Les principes tirés des systèmes immunitaires, comprenant la sélection clonale, la reconnaissance de motifs, l'hyper mutation, la théorie des réseaux immunitaires, la théorie du danger, et bien d'autres, ont inspiré beaucoup de chercheurs dans la conception d'outils d'ingénierie pour résoudre des problèmes complexes. Plusieurs modèles de systèmes immunitaire artificiels ont été proposés pour résoudre de nombreux problèmes : reconnaissance de caractères, alignement d'image, alignement multiple de séquences [Meshoul et al, 2005 ; Bendiab et al, 2003 ; Layeb et al, 2007], sécurité des réseaux [Dasgupta et Gonzalez, 2002]. On distingue quatre types

d'algorithmes de la famille des (SIA): les réseaux immunitaires artificiels [Jerne, 1973], les algorithmes de sélection négatifs [Forrest et al, 1994], la théorie du danger [Aikelin et Cayzer, 2002], les algorithmes de sélection clonale [De Castro et Von Zuben, 2002] ; et les algorithmes de cellules dendritiques [Greensmith et al, 2005]

### 3) Algorithme de colonies de fourmis

L'optimisation par colonie de fourmis (Ant Colony Optimization "ACO") a été initialement introduite par Marco Dorigo et ses collègues [Dorigo et al, 1991; Dorigo, 1992; Dorigo et Maniezzo, 1996]. Elle s'inspire comme son nom l'indique du comportement des fourmis lorsque celles-ci cherchent de la nourriture et optimisent le chemin entre leur nid et la nourriture trouvée [Deneubourg et al, 1990]. Le comportement des fourmis artificielles est inspiré des fourmis réelles dont l'objectif, est de collecter la nourriture sans perdre le chemin menant à leur nid. Les fourmis explorent d'abord les environs de leur nid en effectuant une marche aléatoire. Le long de leur chemin entre la source de nourriture et le nid, elles déposent sur le sol une substance chimique volatile appelée phéromone afin de marquer certains chemins favorables qui devraient guider leurs congénères à la source de nourriture [Dorigo et Blum, 2005]. Plus le chemin est court, plus la quantité de phéromones y est déposée est élevée, car les fourmis ont tendance de suivre le chemin de plus forte intensité de phéromones. En fait plus l'intensité de phéromones est grande, plus le nombre de fourmis utilisant ce passage augmente. Par conséquent, le chemin le plus long sera abandonné car l'intensité de phéromones y compris est petite et s'évapore rapidement.

Ces caractéristiques du comportement des fourmis artificielles définissent la "méta-heuristique d'optimisation par une colonie de fourmis". Cette méta-heuristique a permis de résoudre différents problèmes d'optimisation combinatoire, comme le problème de routage de véhicules [Bullnheimer et al, 1999], le problème d'affectation quadratique [Gambardella et al, 1999], et d'autre problème mais cette algorithme a été proposé pour la première fois pour résoudre le problème du voyageur de commerce ("Travelling Salesman Problem", TSP), le "Ant System" (AS) il se base sur trois phases essentielles [Colorni et al, 1992]:

- La construction du trajet de chaque fourmi.
- La distribution de phéromones sur le trajet de chaque fourmi.
- Evaporation des pistes de phéromones.

Pour chaque fourmi, le trajet entre une ville  $i$  et une ville  $j$  dépend de [Manoj et Kranthi, 2012] :

- La liste des villes déjà visitées, qui définit les mouvements possibles à chaque pas, quand la fourmi  $k$  est sur la ville  $i : J_i^k$ ;
- La visibilité qui est l'inverse de la distance entre deux villes :

$$\eta_{ij} = \frac{1}{d_{ij}} \quad (3.5)$$

Cette information "statique" est utilisée pour diriger le choix des fourmis vers des villes proches, et éviter les villes trop lointaines ;

- L'intensité de la piste  $\tau_{ij}(t)$  qui est la quantité de phéromone déposée sur l'arrêt reliant les deux villes. La règle de déplacement (appelée "règle aléatoire de transition proportionnelle" par les auteurs [Bonabeau et al, 1999] est la suivante :

$$P_{ij}^k = \begin{cases} \frac{(\tau_{ij}(t))^\alpha \cdot (\eta_{ij})^\beta}{\sum_{l \in J_i^k} (\tau_{il}(t))^\alpha \cdot (\eta_{il})^\beta} & \text{si } j \in J_i^k \\ 0 & \text{si } j \notin J_i^k \end{cases} \quad (3.6)$$

Où  $\alpha$  et  $\beta$  sont deux paramètres qui contrôlent l'importance relative entre phéromones et visibilité. Ainsi si  $\alpha$  est égal à 0, le choix se fera uniquement en fonction de la visibilité (si  $\beta$  est différent de zero).

Après un tour complet, chaque fourmi laisse une certaine quantité de phéromone  $\Delta\tau_{ij}^k(t)$  sur l'ensemble de son parcours, Cette quantité dépend de la qualité de la solution trouvée:

$$\Delta\tau_{ij}^k(t) = \begin{cases} \frac{Q}{L^k(t)} & \text{si } (i, j) \in T^k(t) \\ 0 & \text{si } (i, j) \notin T^k(t) \end{cases} \quad (3.7)$$

Où  $T^k(t)$  est le trajet effectué par la fourmi  $k$  à l'itération  $t$ ,  $L^k(t)$  la longueur de la tournée et  $Q$  un paramètre fixé.

La mise à jour des phéromones est effectuée une fois que toutes les fourmis sont passées par toutes les villes :

$$\tau_{ij}(t+1) = (1 - \rho) \cdot \tau_{ij}(t) + \Delta\tau_{ij}^k(t) \quad (3.8)$$

Où  $m$  est le nombre de fourmis et  $\rho$  le taux d'évaporation.

L'algorithme 3.4 donne la structure générale de l'algorithme de colonies de fourmis pour le TSP pour le (TSP)

**Algorithme 3.4. Algorithme de colonies de fourmis pour le TSP****Début**

Initialiser une population de  $m$  fourmis placées aléatoirement sur une ville.

Evaluer les  $m$  fourm

**Tant que** la condition d'arrêt n'est pas vérifiée **faire**

**Pour**  $i = 1$  à  $m$  faire

        Construire le trajet de la fourmi  $i$ ;

        Déposer des phéromones sur le trajet de la fourmi  $i$ ;

**Fin pour**

        Evaluer les  $m$  fourmis;

        Mettre à jour les traces de phéromones;

**Fin Tant que**

Retourner la ou les meilleures solutions ;

**Fin**

**4) Algorithme de colonies d'abeilles artificielles**

L'optimisation par colonies d'abeilles artificielles (Artificial Bee Colony "ABC") a été introduite par Dervis Karaboga [Karaboga, 2005]. C'est une nouvelle méta-heuristique qui a enrichi le nombre des méthodes d'optimisation basées sur l'intelligence en essaim. Elle et développé depuis 2005 par Karaboga et Basturk [Karaboga et Basturk, 2008] pour les problèmes d'optimisation continue. L'ABC s'inspire du modèle naturel du comportement des abeilles mellifères lors de la recherche de leur nourriture. Le processus de recherche est fondé sur un mécanisme de déplacement qui leur permet d'attirer l'attention d'autres abeilles de la colonie aux sources alimentaires, pour collecter les diverses ressources trouvées. Les abeilles utilisent un ensemble de danses frétilantes comme moyen de communication entres elles figurent dans la figure 3.5 et 3.6. [Raihani, 2015]. Ces danses permettent aux abeilles de partager des informations sur la direction, la distance et la quantité du nectar avec ses congénères.

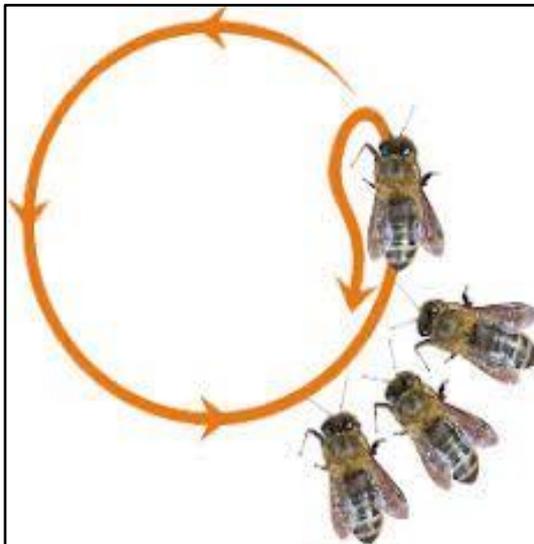
Des études sur le comportement de danses frétilantes des abeilles ont montré [Chan et Tiwari, 2007]:

- La direction des abeilles indique la direction de la source de nourriture par rapport au soleil.
- L'intensité de la danse indique la distance de la source de nourriture.

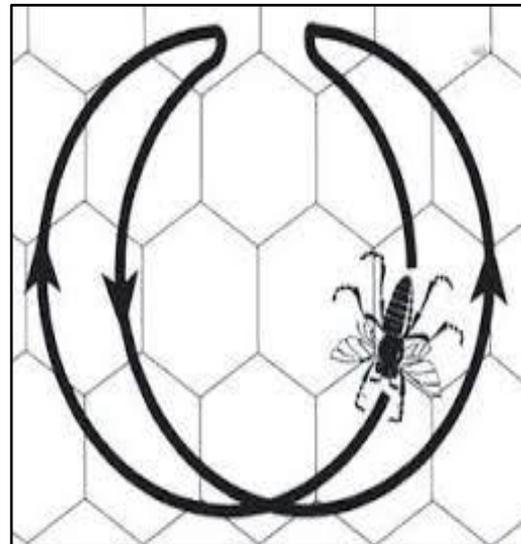
- La durée de la danse indique la quantité du nectar dans la source de nourriture trouvée.

La colonie d'abeilles artificielle est composée de trois types d'abeilles: les ouvrières, les spectatrices et les scoutes.

- L'ouvrière exploite la source de nourriture trouvée. Elle se base sur sa mémoire et essaye d'apporter des modifications à sa position (solution) actuelle pour découvrir une nouvelle position (i.e. source de nourriture).
- La spectatrice attend le retour des ouvrières au champ de danse pour observer leurs danses et recueillir des informations sur les sources de nectar qu'elles ont trouvées.
- L'abeille scoute exploite l'espace de recherche en lançant une recherche aléatoire d'une nouvelle source de nourriture.



**Figure 3.5.** La danse en ronde de l'abeille découvreuse [Raihani, 2015]



**Figure 3.6.** La danse frétilante ou danse de huit [Raihani, 2015]

Dans un algorithme d'optimisation par colonies d'abeilles, une source de nectar correspond à une solution possible au problème à traiter. Une abeille ouvrière est assignée à chaque source de nourriture. La taille de la population de la colonie est égale au nombre des abeilles ouvrières et la quantité du nectar dans une source de nourriture correspond à la qualité (fitness) de la solution proposée.

L'algorithme 3.5 représente un pseudo code de l'algorithme de colonies d'abeilles.

**Algorithme 3.5. Algorithme de colonies d'abeilles artificielles****Début**

Initialiser une population de  $N$  solution aléatoirement

Evaluer la fitness de la population ;

**Tant que** la condition d'arrêt n'est pas vérifiée **faire**

Recruter des abeilles (Rechercher de nouvelles solutions).

Evaluer la fitness de la population.

**Si** (un membre de la population ne s'est pas amélioré) **faire**

Enregistrer la solution et remplacer la par une solution aléatoire

Trouver  $S$  solutions aléatoires et remplacer les  $S$  membres de la population qui ont la mauvaise fitness.

**Fin Si****Fin Tant que**

**Retourner** la meilleure solution.

**Fin****5) Algorithme de la recherche coucou****a) Modèle biologique**

Inspirés du comportement de reproduction et de vie d'une espèce spéciale d'oiseaux parasites nommés « Coucous » (figure 3.7), et en se basant sur leur comportement ainsi que sur leur mode de vie et de reproduction, une variante très récente du PSO a été proposées dans la littérature: l'algorithme de la recherche coucou (RC).

La recherche coucou (Cuckoo Search "CS") est une très récente méta-heuristique. Elle a été proposée en 2009 par Yang et Deb [Yang et Deb, 2009; Yang et Deb, 2010]. L'algorithme CS est inspirés du comportement de reproduction parasitaire de quelques espèces de coucous qui pondent leurs œufs dans les nids des autres espèces en confiant la responsabilité d'incubation, de nourriture et d'élevage de leurs poussins aux oiseaux hôtes (figure 3.8). Ces derniers peuvent détecter les œufs coucou dans leurs nids, dans ce cas-là l'oiseau hôte va ou bien éjecter l'œuf coucou hors son nid ou abandonner son propre nid et construire un autre dans un autre emplacement.



**Figure 3.7.** Oiseau de coucou



**Figure 3.8.** Œuf de coucou (gris)  
mouchet

### b) Modèle mathématique

La recherche coucou est une méta-heuristique récente, l'apparition de l'algorithme a précédé celle de l'algorithme ACO par deux ans. Dès son apparition, l'algorithme CS a ouvert une nouvelle porte d'investigation dans le domaine de méthodes intelligente de résolution de problèmes d'optimisation. Cette méta-heuristique est donc basée sur ce comportement parasite des espèces de coucous associé à une logique de déplacement de type « Levy flight». Yang et Deb se sont basés sur ce comportement parasitaire des coucous et sur le mécanisme du vol de Lévy qui permet la modélisation mathématique des déplacements aléatoires. L'algorithme de la recherche coucou utilise deux mécanismes fondamentaux:

- L'intensification, en se référant à l'exploitation dans le voisinage de la meilleure solution trouvée.
- La diversification, en se référant à une exploration efficace de l'ensemble du domaine de recherche.

Malgré le nombre limité des travaux d'applications du CS pour la résolution des problèmes d'optimisation, les résultats obtenus sont prometteurs en termes de performance et d'efficacité. En fait, il est très facile à mettre en œuvre car il y a un seul paramètre à contrôler dans le CS (en dehors de la taille de la population). Il a reçu beaucoup d'attention et il y a beaucoup d'études récentes utilisant la recherche coucou avec une gamme diverse d'applications. Le CS a été appliquée avec succès à divers problèmes d'optimisation [Jiang et al 2016 ; Svetlana et al, 2018 ; Taranjit et Harvinder, 2014 ; Feng et al, 2018 ; Akhdiyatul et

Erick, 2017 ; Intissar et al, 2018 ; Andrés et al, 2018 ; Liu et al, 2018a ; Zhao et Wang, 2017 ; Feng et al, 2018].

### c) Le vol de Lévy (Lévy flight)

Des études expérimentales sur le comportement de certains animaux et insectes ont montré que leur comportement peut être modélisé par un schéma mathématique nommé vol de Lévy (Lévy flight) [Brown et al 2007]. Le vol de Lévy a été proposé par le mathématicien français Paul Pierre Lévy, un des fondateurs de la théorie moderne de probabilités. Depuis sa création, le vol de Lévy a donné des interprétations théoriques à plusieurs phénomènes physiques, chimiques biologiques et naturels. En fait, le vol de Lévy permet de modéliser des marches aléatoires composées d'un grand nombre de pas où les transitions sont basées sur des probabilités. En terminologie mathématique, le vol de Lévy est une marche aléatoire (en anglais, Random walk: une formalisation mathématique d'une trajectoire composée d'un ensemble de pas aléatoires) dans laquelle la distance entre les pas à une distribution probabilitaire à queue-lourde dont les queues ne sont pas bornées de façon exponentielle [Shlesinger et al, 1995].

Plusieurs études récentes montrent qu'une panoplie de phénomènes dans différents domaines peuvent être modélisés par le vol de Lévy: Le déplacement des mouches [Reynolds et Frye, 2007], Les mouvements des organismes biologiques [Viswanathana et al, 2002], la recherche aléatoire des objets [Viswanathana et al, 2000] et le domaine d'optimisation et la recherche optimale où les études expérimentales ont montré des résultats encourageants [Shlesinger, 2006 ; Pavlyukevich, 2007]. Yang et Deb [Yang et Deb, 2009] ont intégré de leur part le vol de Lévy dans leur récente méta-heuristique la recherche coucou pour générer de nouvelles solutions autour de la meilleure solution obtenue, ce qui accélère la recherche globale.

Le Levy Flight est une classe de marche aléatoire dans laquelle les sauts sont distribués selon la distribution de Levy qui consiste une loi en puissance à variance et moyenne infinies du type :

$$Lévy \sim u = t^{-\lambda}, \quad (1 < \lambda \leq 3) \quad (3.9)$$

D'un point de vue implémentation, la génération d'un nombre aléatoire avec le Levy Flight suit deux étapes : le choix d'une direction aléatoire et la génération du pas qui doit obéir à la distribution de Levy. La génération d'une direction peut être réalisée à partir d'une distribution uniforme, alors que la génération des pas est plus délicate. Il y a plusieurs

méthodes pour y parvenir mais une des plus simples et des plus efficaces consiste à employer les formules de Mantegna pour déterminer le pas  $S$  :

$$S = \frac{u}{|v|^{1/\beta}} \quad (3.10)$$

Où  $u$  et  $v$  sont des distributions gaussiennes centrées telles que :

$$u = N(0, \sigma_u^2), \quad v = N(0, \sigma_v^2) \quad (3.11)$$

Où

$$\sigma_u = \left\{ \frac{\Gamma(1+\beta) \sin(\frac{\pi\beta}{2})}{\Gamma[\frac{1+\beta}{2}] \beta 2^{(\beta-1)/2}} \right\}^{1/\beta}, \quad \sigma_v = 1 \quad (3.12)$$

Où  $\Gamma$  est la fonction Gamma

#### d) Principe de la recherche coucou

En s'inspirant du comportement des coucous dans leur reproduction, Yang et Deb se sont basés sur trois principes pour proposer leur nouvelle méta-heuristique [Yang et Deb, 2010]:

- Chaque coucou pond un œuf à la fois et le place dans un nid choisi au hasard. Cette intensification se fait en avançant une solution au moyen d'une marche aléatoire locale dans laquelle la longueur de pas est tirée d'une distribution Lévy. Cela s'avère être plus efficace que les longueurs des pas ordinaires gaussiennes.
- Les meilleurs nids avec des œufs (solutions) de haute qualité sont conservés pour les prochaines générations.
- Le nombre de nids hôtes est fixé et l'œuf pondu par un coucou peut être découvert par l'espèce hôte avec une probabilité  $P_a \in [0,1]$ . Dans ce cas, l'oiseau hôte peut soit se débarrasser de l'œuf ou abandonner le nid et construire un nid complètement nouveau. Pour simplifier, cette dernière hypothèse peut être approchée par le remplacement d'une fraction  $P_a$  de  $N$  nids d'hôtes par des nouveaux (des nouvelles solutions aléatoires dans de nouvelles positions dans l'espace de recherche).

Afin de générer une nouvelle solution  $x_i(t+1)$  pour un coucou  $i$ , Yang et Deb ont intégré le vol de Lévy de la manière suivante :

$$x_i(t+1) = x_i(t) + \alpha \oplus Lévy(\lambda) \quad (3.13)$$

Où  $\alpha > 0$  est la taille du pas, elle est liée au problème traité.

Le produit  $\oplus$  représente le produit matriciel.

La nouvelle solution sera donc générée en fonction de deux facteurs indispensables:

- La position actuelle du coucou.
- La nouvelle direction mesurée par le vol de Lévy.

Les nouveaux œufs de coucous ont une probabilité  $P_a$  d'être découvert. Si c'est le cas, de nouveaux œufs sont générés. Plusieurs méthodes peuvent être envisagées pour cela.

L'algorithme de la recherche coucou se base sur deux principes: une recherche locale et une autre globale. L'exploration de l'espace de recherche par la création aléatoire de nouvelles solutions en utilisant le vol de Lévy. L'exploitation de la solution par la recherche locale aléatoire.

L'algorithme 3.6 résume les étapes générales de l'algorithme CS.

**Algorithme 3.6. Algorithme de la recherche coucou CS**

**Début**

Initialiser une population de  $N$  coucous ( $x_i$  solutions);  
 Evaluer la fitness de la population et trouver la meilleure solution  $x^{(best)}$ .

**Tant que** la condition d'arrêt n'est pas vérifiée faire

**Pour** chaque coucou  $x_i (i = 1 \text{ à } N)$  faire

Générer une nouvelle solution  $x_i^{(new)}$  par Lévy flight

Calculer leur fitness

**Si**  $f(x_i^{(new)}) < f(x_i^{(t)})$

$x_i^{(t+1)} = x_i^{(new)}$

**Fin Si**

**Fin Pour**

Modifier une fraction  $P_a$  de son contenu pour obtenir des nouvelles solutions  $x_i^{(pa)}$

**Pour** ( $i = 1 \text{ à } N$ ) faire

Evaluer la fitness de  $x_i^{(pa)}$

**Si**  $f(x_i^{(pa)}) < f(x_i^{(t)})$

$x_i^{(t+1)} = x_i^{(pa)}$

**Fin Si**

**Fin Pour**

Trouver la meilleure solution  $x^{(best)}$ ;

**Fin tant que**

**Fin**

#### e) La version binaire de la recherche coucou (BCS)

La version originale de l'algorithme de la recherche coucou est basée sur le mécanisme du vol de Lévy. En effet, elle opère dans des espaces de recherche continus et permet

d'aboutir à des solutions de type réel. Cependant, les problèmes d'optimisation binaires nécessitent des solutions de type binaire.

La version binaire de l'algorithme de la recherche coucou "Binary Cuckoo Search" (BCS) est proposé par [Rodrigues et al, 2013] dont lequel l'espace de recherche est défini comme une chaîne binaire de  $n$  bits. L'objectif principal de l'algorithme BCS est de faire face aux problèmes qui peuvent être représentés par des structures binaires. Il permet la transformation de la solution  $x_i$  d'un espace de recherche réel vers un espace de recherche binaire.

L'algorithme BCS représente chaque nid comme un vecteur binaire. Les équations (3.14) et (3.15) représente la probabilité de transformation de la valeur réelle vers une valeur binaire sont utilisées pour construire des vecteurs binaires. Dans l'étude du problème de l'engagement des unités nous adoptons l'algorithme BCS pour déterminer les variables binaires qui représente l'état (On / Off) des unités  $u_{it}$  de production pendant chaque intervalle de la période d'ordonnancement avec des variables de décision (0/1), où  $u_{it}$  est attribuée la valeur de 0 ou 1 avec des probabilités égaux [Rodrigues et al, 2013].

$$S(x_i^{(t)}) = \frac{1}{(1+e^{-x_i^{(t)}})} \quad (3.14)$$

$$x_i^{(t+1)} = \begin{cases} 1 & \text{if } S(x_i^{(t)}) > \sigma \\ 0 & \text{sinon} \end{cases} \quad (3.15)$$

Ou,  $\sigma \sim U(0, 1)$  et  $x_i^{(t+1)}$  représente les nouveaux œufs.

### 3.3 Conclusion

Dans ce chapitre nous avons essayé de présenter un état de l'art sur les méthodes d'optimisation intelligente présentées dans la littérature. Ces méthodes ont construit une tendance très active ces dernières décennies. Grâce à la simplicité et la souplesse de leurs principes, ils peuvent être un outil d'optimisation des systèmes de contrôle des processus complexes.

Dans le chapitre suivant, nous présentons notre contribution qui consiste à proposer des algorithmes d'optimisation intelligente pour résoudre le problème d'engagement des unités de productions UCP.

## CHAPITRE 4

---

### Résolution de l'UCP par des méthodes d'optimisation intelligente

---

#### Sommaire

---

4.1 Introduction .....	70
4.2 Gestion des contraintes de L'UC.....	70
4.3 Première approche: l'algorithme hybride de l'optimisation par essaim particulaire (PSO) et l'algorithme d'optimisation par colonie de fourmis (ACO) .....	74
4.4 Deuxième approche: recherche coucou codée en binaire- réel "binary-real coded Cuckoo Search" (BCS) .....	75
4.5 Troisième approche: l'algorithme hybride de la recherche coucou et la recherche tabou "hybrid Cuckoo Search-Tabu Search algorithm" (CS-TS)..	75
4.6 Application des algorithmes proposés pour résoudre le problème de l'UC.....	77
4.7 Conclusion .....	85

---

---

## 4.1 Introduction

Le problème de l'UC peut être considéré comme deux sous-problèmes corrélés; le premier appartient à la classe des problèmes de programmation non linéaire à nombres entiers mixtes. Il consiste à déterminer la meilleure stratégie d'état Marche/Arrêt des groupes électrogènes dans un horizon de planification spécifique. Le second, appartient à la classe des problèmes d'optimisation de la programmation quadratique, consiste à trouver le dispatching optimal pour répondre à la demande de charge prévue parmi les unités engagées pendant la période d'ordonnancement [Ebrahimi et al, 2011; Simopoulos et al, 2006].

Dans ce chapitre, nous proposons trois approches d'optimisation intelligente pour la résolution du problème UC. La première approche est une hybridation de l'optimisation par essaim particulaire et l'algorithme d'optimisation par colonie de fourmis "hybrid Particle Swarm Optimization-Ant Colony Optimization (PSO-ACO)". La seconde approche est basée sur l'algorithme de la recherche coucou codée en binaire-réel "Binary-real coded Cuckoo Search (BCS)" et la troisième approche est une hybridation de l'algorithme de la recherche coucou et la recherche tabou "hybrid Cuckoo Search-Tabu Search algorithm" (CS-TS).

## 4.2 Gestion des contraintes de l'UCP

Dans le problème de l'UC et avec le nombre croissant des unités d'engagement la taille de l'espace de recherche du problème augmente de façon exponentielle, par conséquent le problème de l'UC devient un problème d'optimisation très complexe ce qui nécessite l'utilisation de certains mécanismes pour satisfaire les contraintes du problème.

Dans la littérature, les contraintes sont gérées avec trois méthodes; la méthode de rejet, la méthode de pénalité et la méthode de réparation. La technique de rejet consiste à rejeter tous les solutions non réalisables et les remplacés par de nouvelles solutions réalisables qui sont tirées au hasard, tandis que la technique de pénalité transforme le problème d'optimisation avec contraintes en un problème sans contraintes en pénalisant les solutions irréalisables. La technique de réparation consiste à prendre une solution non réalisable et de générer une solution réalisable grâce à une procédure de réparation [Xing et Wu, 2002].

Lors de la résolution du problème de l'UC, les algorithmes proposés ne peuvent pas satisfaire tous les problèmes des contraintes. Des méthodes de réparation sont appliquées à cet effet.

### 4.2.1 Réparation de la contrainte de réserve tournante (Spinning Reserve Constraint Repairing)

Pour satisfaire la contrainte de réserve tournante, une méthode de réparation heuristique est appliquée, par laquelle les unités désengagées sont engagées dans un ordre croissant de leurs coûts moyens de pleine charge  $\alpha_i$ , ( $i = 1, 2, \dots, N$ ); jusqu'à ce que la contrainte de réserve tournante soit satisfaite [Datta, 2013]. Le coût moyen à pleine charge  $\alpha_i$ , est simplement le rapport du coût du carburant de chaque unité de puissance et sa capacité maximale, il est généralement inférieur à toute autre niveau de production d'électricité. Par conséquent, le coût moyen à pleine charge  $\alpha_i$  de l'unité  $i$ , peut être exprimé comme suit:

$$\alpha_i = \frac{C_{it}(P_{it})}{P_i^{max}} = \frac{a_i + b_i P_{it} + c_i P_{it}^2}{P_i^{max}} \quad (4.1)$$

Avec :

$C_{it}(P_{it})$  : coût du carburant.

$a_i$ ,  $b_i$  et  $c_i$  : des coefficients constants propres au générateur  $i$ .

Dans le processus de réparation proposé, les unités désengagées sont forcées de s'allumer jusqu'à ce que la contrainte de réserve tournante soit satisfaite.

### 4.2.2 Réparation de la contrainte du temps minimal d'allumage et d'extinction (Minimum up/down time Constraints Repairing)

La contrainte du temps minimal d'allumage et d'extinction (Minimum up/down time) impose un temps minimal qui doit s'écouler avant que l'unité puisse changer son état comme le montre l'équation (4.2).

$$\tau_{i,t}^{on} = \begin{cases} \tau_{i,t-1}^{on} + 1 & \text{si } u_{i,t} = 1 \\ 0 & \text{sinon} \end{cases} \quad (4.2)$$

$$\tau_{i,t}^{off} = \begin{cases} \tau_{i,t-1}^{off} + 1 & \text{si } u_{i,t} = 0 \\ 0 & \text{sinon} \end{cases}$$

Pour satisfaire le temps minimal d'allumage et d'extinction, un nouveau mécanisme de réparation basé sur une technique heuristique est adopté. Ce mécanisme peut faire face aux contraintes du système et de l'unité. La procédure est résumée dans le pseudo-code donné par l'algorithme 4.1 [Yuan et al, 2009].

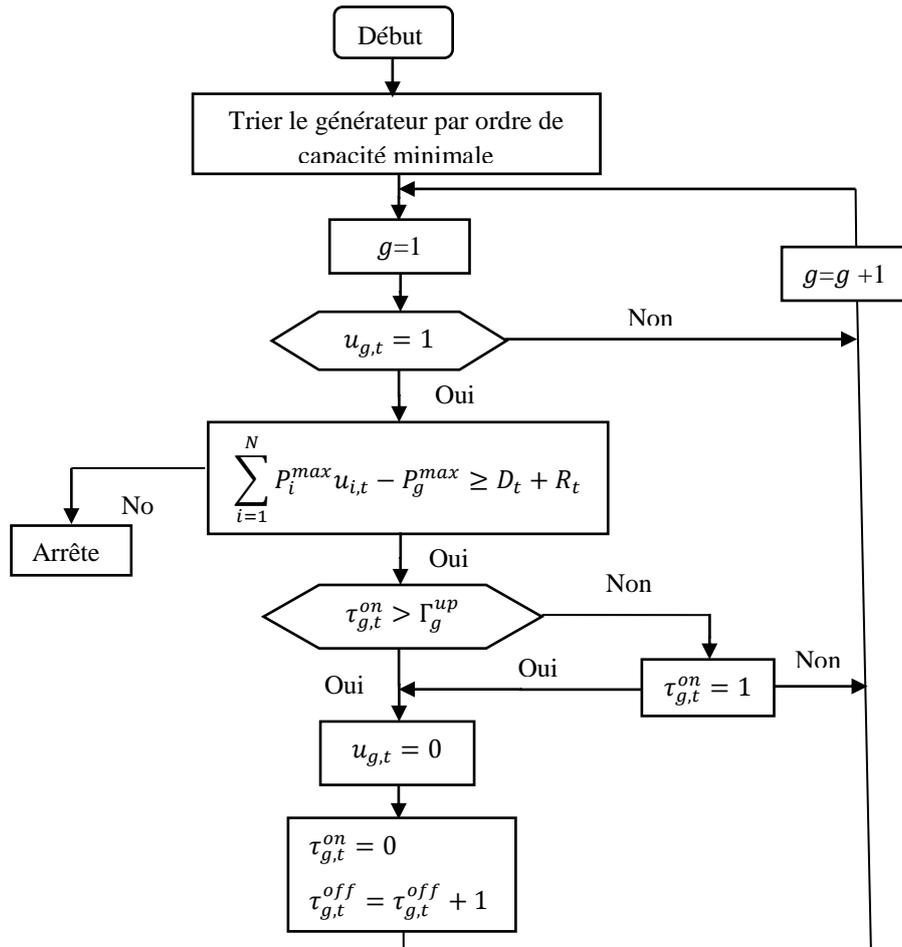
```

Algorithme 4.1. (Minimum up/down time)
Début
Pour ( $i = 1$  à  $N$ ) faire
  Pour ( $j = 1$  à  $T$ ) faire
    Si  $u_{i,j} = 1$ 
      Si  $u_{i,j-1} = 0$ 
        Si  $\tau_{i,j-1}^{off} < \Gamma_i^{down}$  alors  $u_{i,j} = 0$ 
        Sinon si  $\tau_{i,j-1}^{off} \geq \Gamma_i^{down}$  alors  $u_{i,j} = 1$ 
        Fin si
      Sinon si  $u_{i,j-1} = 1$  alors  $u_{i,j} = 1$ 
      Fin si
    Sinon si  $u_{i,j} = 0$ 
      Si  $u_{i,j-1} = 1$ 
        Si  $\tau_{i,j-1}^{on} < \Gamma_i^{up}$  alors  $u_{i,j} = 1$ 
        Sinon si  $\tau_{i,j-1}^{on} \geq \Gamma_i^{up}$  alors  $u_{i,j} = 0$ 
        Finsi
      Sinon si  $u_{i,j-1} = 0$  alors  $u_{i,j} = 0$ 
      Finsi
    Finsi
  Finsi
Fin Pour
Fin Pour
Fin

```

### 4.2.3 Désengagement des unités excédentaires (De-commitment of excess units)

La réparation des contraintes de temps minimal d'allumage et d'extinction (Minimum up/down time) conduit à des réserves tournantes excessives (excessive spinning reserves), ce qui n'est pas souhaitable en raison du coût de fonctionnement élevé. Nous utilisons un algorithme heuristique basé sur une liste de priorités pour désengager certaines unités dans l'ordre décroissant de leurs coûts moyens à pleine charge  $\alpha_i$ , une par une, jusqu'à ce que la contrainte de réserve tournantes soit simplement satisfaite [Yuan et al, 2009 ; Yuan et al, 2011]. L'algorithme détermine les unités qui peuvent être désengagées sans violer le temps minimal d'allumage et d'extinction ainsi que les contraintes de réserve tournantes. L'algorithme est bien détaillé dans l'organigramme de la figure 4.1 [Jeong et al, 2009b].



**Figure 4.1.** Organigramme de désengagement des unités excédentaires [Jeong et al, 2009b]

#### 4.2.4 Réparation de la contrainte d'équilibre de puissance (Power balance constraint repairing)

Chaque unité doit produire de l'énergie dans l'intervalle donné par l'équation (2.6), mais cela conduira à des coûts de production plus élevés et mettra en engagement plusieurs unités pour répondre à l'équation (2.4). La quantité de divergence de la puissance générée par rapport à la demande est donné par:

$$E_t = \sum_{i=1}^N P_{it} u_{i,t} - D_t \quad t = 1, \dots, T \quad (4.3)$$

L'algorithme de réparation est appliqué aux deux cas suivants [Datta, 2013]:

**Cas 1 :** si  $E_t > 0$ , les unités engagées sont prises dans l'ordre décroissant de leurs coûts moyens à pleine charge  $\alpha_i$ . Les puissances générées par les unités sont réduites à leurs limites inférieures ( $P_i^{min}$ ) jusqu'à que  $E_t$  devienne nulle ( $E_t = 0$ ).

**Cas 2 :** si  $E_t < 0$ , les unités engagées sont prises dans l'ordre croissant de leurs coûts moyens à pleine charge  $\alpha_i$ . Les puissances générées par les unités sont augmentées à leurs limites supérieures ( $P_i^{max}$ ) jusqu'à que  $E_t$  devienne nulle ( $E_t = 0$ ).

### 4.3 Première approche: l'algorithme hybride de l'optimisation par essaim particulaire (PSO) et l'algorithme d'optimisation par colonie de fourmis (ACO)

Cette approche est une hybridation entre l'optimisation par essaim particulaire (PSO) et l'algorithme d'optimisation par colonie de fourmis (ACO) que l'on appelle (PSO-ACO) pour la résolution du problème de l'UC. L'ACO est une méthode d'optimisation puissante bien adapté aux problèmes d'optimisation combinatoire, l'algorithme est appliqué pour déterminer le statut des unités (états marche/arrêt) dans l'horizon temporel de planification. En outre, l'algorithme continu du PSO est utilisé pour déterminer la puissance générée par les unités engagées (variables réelles). L'approche PSO-ACO proposée pour résoudre le problème de l'UC est illustrée par l'algorithme 4.2.

#### Algorithme 4.2. L'algorithme hybride (PSO-ACO) pour l'UC

**Début:**

**L'algorithme PSO**

Définir  $c_1, c_2, r_1, r_2, w$ ,

Générer une population aléatoire de  $(N \times T)$  solution réelle de particules  $P_{i,t}$  et les vitesses de chaque particule, pour chaque particule,  $P_{i,best} = P_{i,t}$  ;

**L'algorithme ACO**

Générer une population  $u_{i,t}$  de  $(N \times T)$  de fourmis placées aléatoirement ; initialiser la phéromone ; les algorithmes de réparation: (réserve tournante, temps minimal d'allumage et d'extinction, désengagement des unités excédentaires et l'équilibre de puissance des unités) ;

**L'algorithme PSO**

Evaluer la fonction objectif  $F(UC_i^{(t)})$  via (2.1) de chaque particule; Calculer  $g_{best}$  ; // la meilleure  $P_{i,best}$

**Tant que**( $t < \text{iter\_max}$ )

**Pour**  $i=1:(N \times T)$

Calculer la nouvelle vitesse via (3.1) ; Trouver la nouvelle position  $P_{i,t}$  via (3.4) ;

**Fin pour**

**L'algorithme ACO**

**Tant que** ( $\text{nombre} \leq \text{nombre\_max}$ )

**Pour**  $i=1:(N \times T)$

Calculer  $u_{i,new}$  via (3.6) ; Gestion des contraintes par les algorithmes de réparation ;

Mettre à jour les traces de phéromones via (3.8);

**Fin pour**

**Fin Tant que**

Evaluer la fonction objectif  $F(P_{i,t})$

**Si**  $F(P_{i,t}) < F(P_{i,best})$

$P_{i,best} = P_{i,t}$

**Fin Si**

**Si**  $F(P_{i,best}) < F(g_{best})$

$g_{best} = P_{i,best}$

**Fin si**

**Fin tant que**

Mettre à jour  $g_{best}$

**Fin**

#### 4.4 Deuxième approche: recherche coucou codée en binaire- réel "Binary-real coded Cuckoo Search" (BCS)

Dans cette approche d'une part la version réelle de l'algorithme CS est utilisée pour déterminer la puissance générée par les unités engagées. De l'autre part, la version binaire de l'algorithme CS est utilisée pour déterminer le statut des unités (états marche/arrêt) dans l'horizon temporel de planification. L'approche BCS proposée pour résoudre le problème de l'UC est illustrée dans l'algorithme 4.3.

##### Algorithme 4.3. La recherche coucou codée en binaire- réel (BCS) pour l'UCP

###### Début

Recherche globale

Générer une population initiale de  $(N \times T)$  solution réelle pour  $P_{i,t}$  et  $(N \times T)$  solution binaire pour  $u_{i,t}$  via l'équation (3.14) et (3.15); les algorithmes de réparation: (réserve tournante, temps minimal d'allumage et d'extinction, désengagement des unités excédentaires et l'équilibre de puissance des unités);

Évaluer la fonction objectif  $F(UC_i^{(t)})$  via (2.1); calculer la meilleure solution  $UC^{(best)}$

**Tant que** ( $t < \text{iter\_max}$ )

**Pour**  $i=1:(N \times T)$

Trouver une nouvelle solution  $UC_i^{(new)}$  via Lévy flights (3.13); appliquer BCS via (3.14) et (3.15)

Gestion des contraintes par les algorithmes de réparation; évaluer  $F(UC_i^{(new)})$

**Si**  $F(UC_i^{(new)}) < F(UC_i^{(t)})$

$UC_i^{(t+1)} = UC_i^{(new)}$

**Fin si**

**Fin pour**

Recherche locale

**Pour**  $i=1:(N \times T)$

Trouver une nouvelle solution  $UC_i^{(pa)}$  aléatoirement avec une probabilité  $P_a$ ; appliquer BCS via (3.14) et (3.15)

Gestion des contraintes par les algorithmes de réparation; évaluer  $F(UC_i^{(pa)})$

**Si**  $F(UC_i^{(pa)}) < F(UC_i^{(t)})$

$UC_i^{(t+1)} = UC_i^{(pa)}$

**Fin si**

**End for**

Classez et mettez à jour  $UC^{(best)}$

**Fin tant que**

**Fin**

#### 4.5 Troisième approche: l'algorithme hybride de la recherche coucou et la recherche tabou "hybrid Cuckoo Search-Tabu Search algorithm" (CS-TS)

La troisième approche est une hybridation de la technique de la recherche coucou (CS) et la recherche tabou (TS) que l'on appelle (CS-TS). Cette méthode se distingue par son

mécanisme d'exploration globale efficace qui est assuré par le CS, et un mécanisme de recherche locale qui est assuré par le TS. Ce choix est justifié par le fait que parmi les méthodes d'optimisation citées précédemment, le CS est la seule approche qui implémente séparément un mécanisme de recherche globale efficace. Autrement dit, ce mécanisme permet la meilleure exploration de l'espace de recherche. De plus, pour une meilleure exploitation de l'espace de recherche, c'est-à-dire la recherche locale, l'algorithme TS a prouvé sa supériorité. L'approche CS-TR proposée pour résoudre le problème de l'UC est illustrée par l'algorithme 4.4.

**Algorithme 4.4. L'algorithme hybride (CS-TS) pour l'UCP**

**Début**

Recherche globale: l'algorithme CS

Générer une population initiale de  $(N \times T)$  solution réelle pour  $P_{i,t}$  et  $(N \times T)$  solution binaire pour  $u_{i,t}$  via l'équation (3.14) et (3.15); les algorithmes de réparation: (réserve tournante, temps minimal d'allumage et d'extinction, désengagement des unités excédentaires et l'équilibre de puissance des unités);  
Évaluer la fonction objectif  $F(UC_i^{(t)})$  via (2.1); calculer la meilleure solution  $UC^{(best)}$

**Tant que**( $t < \text{iter\_max}$ )

**Pour**  $i=1:(N \times T)$

    Trouver une nouvelle solution  $UC_i^{(new)}$  via Lévy flights (3.13); appliquer BCS via (3.14) et (3.15)

    Gestion des contraintes par les algorithmes de réparation; évaluer  $F(UC_i^{(new)})$

**Si**  $F(UC_i^{(new)}) < F(UC_i^{(t)})$

$UC_i^{(t+1)} = UC_i^{(new)}$

**Fin si**

**Fin pour**

Recherche locale : l'algorithme TS

Initialiser  $TL = \emptyset$ ;  $UC^{(best)} = UC_i^{(t+1)}$

**Tant que** (la condition d'arrêt n'est pas vérifiée)

**Pour**  $i=1:(N \times T)$

    Générer  $UC_i^{(nb)}$  solution voisine de  $UC^{(best)}$

    Gestion des contraintes par les algorithmes de réparation; évaluer  $F(UC_i^{(nb)})$

**Si**  $F(UC_i^{(nb)}) < F(UC_i^{(t+1)})$

$UC_i^{(t+1)} = UC_i^{(nb)}$

**Fin si**

**Fin pour**

    Mettre à jour  $TL$

**Fin tant que**

  Mettre à jour  $UC^{(best)}$

**Fin tant que**

**Fin**

## 4.6 Application des algorithmes proposés pour résoudre le problème de l'UC

Dans le but de tester et évaluer les performances des algorithmes proposés pour résoudre le problème de l'UC, nous avons effectué des applications en simulation au système standard IEEE de différentes tailles allant de 10 à 100 unités. L'objectif de simulation consiste en la minimisation du coût de production d'électricité pour répondre à la demande prévue en trouvant la bonne stratégie de l'état Marche/Arrêt des unités de production pendant chaque intervalle de temps durant la période de planification, tout en vérifiant toutes les contraintes des unités et du système, à savoir les temps minimal d'allumage/d'extinction, les limites de taux de rampe, les limites maximal et minimal de production de puissance, la réserve tournante et la contrainte d'équilibre de puissance du système.

### 4.6.1 Résultat de simulation d'un système à 10 unités

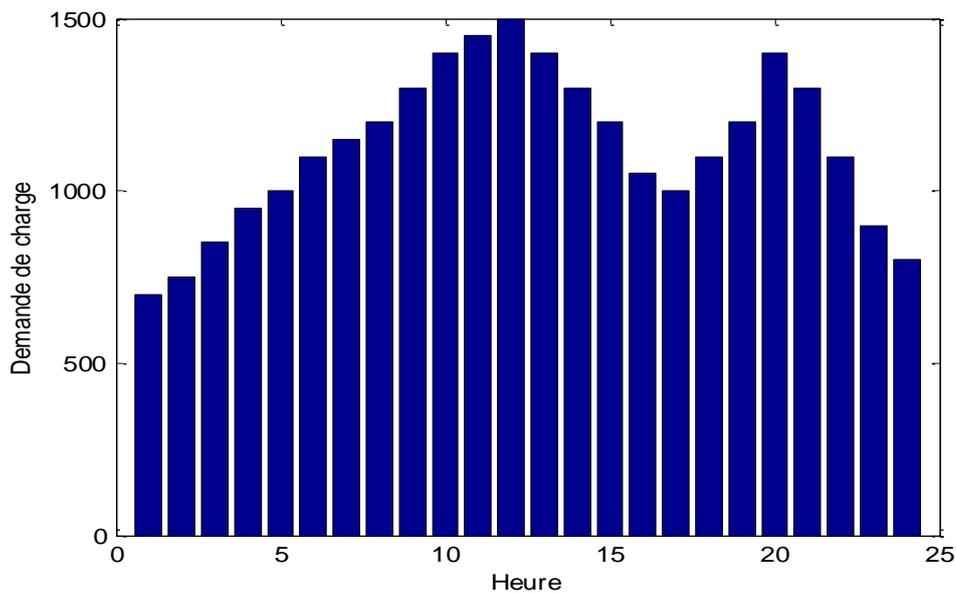
Les algorithmes proposés (PSO-ACO BCS et CS-TS) sont appliqués sur un système à 10 unités pour un horizon de planification de 24 heures. Les données du système de base des 10 unités sont recueillies à partir de [Datta, 2013] et ils sont présentés dans le tableau 4.1. La demande de charge est présenté dans le tableau 4.2 et la figure 4.2. La réserve tournante requise est fixée à 10% de la demande de charge totale.

**Tableau. 4.1:** Les propriétés du système de base des 10 unités

Unité	$P_i^{max}$ (MW)	$P_i^{min}$ (MW)	$a_i$ (\$/h)	$b_i$ (\$/MW.h)	$c_i$ (\$/MW <sup>2</sup> .h)	$d_i$ (\$)	$e_i$ (\$)	$f_i$ (h)	$\Gamma_i^{up}$ (h)	$\Gamma_i^{down}$ (h)	$\sigma_i$ (h)
1	455	150	1000	16.19	0.00048	4500	9000	5	8	8	8
2	455	150	970	17.26	0.00031	5000	10000	5	8	8	8
3	130	20	700	16.60	0.00200	550	1100	4	5	5	-5
4	130	20	680	16.50	0.00211	560	1120	4	5	5	-5
5	162	25	450	19.70	0.00398	900	1800	4	6	6	-6
6	80	20	370	22.26	0.00712	170	340	2	3	3	-3
7	85	25	480	27.74	0.00079	260	520	2	3	3	-3
8	55	10	660	25.92	0.00413	30	60	0	1	1	-1
9	55	10	665	27.27	0.00222	30	60	0	1	1	-1
10	55	10	670	27.79	0.00173	30	60	0	1	1	-1

**Tableau. 4.2 :** La demande de charge  $D_t$  des 10 unités sur un horizon temporel de 24 h

Heur	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Demande (MW)	700	750	850	950	1000	1100	1150	1200	1300	1400	1450	1500
Heur	13	14	15	16	18	19	20	21	22	23	24	25
Demande (MW)	1400	1300	1200	1050	1000	1100	1200	1400	1300	1100	900	800

**Figure. 4.2.** La Demande de charge  $D_t$  pendant 24 heures

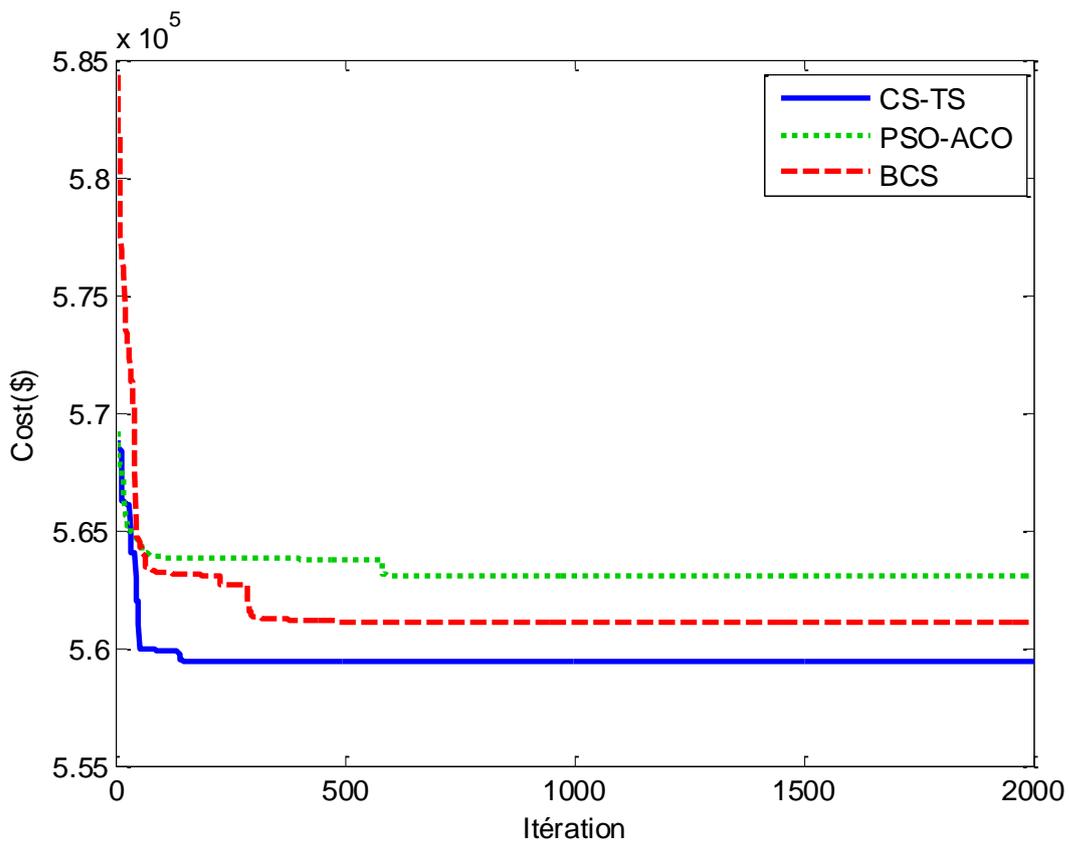
La minimisation du coût de production en utilisant les algorithmes proposés nécessite un bon choix des paramètres spécifiques de chaque algorithme, pour cela plusieurs tests et essais ont été effectués sur chaque algorithme pour comparer la convergence et la solution des méthodes proposées. Les paramètres spécifiques de chaque algorithme proposé sont donnés par le Tableau 4.3.

**Tableau. 4.3** : Valeurs spécifiques des algorithmes proposés

Paramètre	PSO-ACO	BCS	CS-TS
Nombre d'itérations (iter_max)	2000	2000	2000
Taille de la population	25	40	40
$P_a$	/	0.25	/
$c_1, c_2, w$	2, 2, 0.2	/	/
$\rho$	0.5	/	/

Les résultats obtenus sont représentés comme suit. La figure 4.3, présente l'évolution de la fonction objective en fonction des itérations avec les trois approches proposées (PSO-ACO, BCS et CS-TS). On remarque que la convergence de l'algorithme PSO-ACO est obtenue à 592<sup>ème</sup> itération pour une valeur minimale de 5.6309E+05\$, pour le BCS la convergence est obtenue à la 374<sup>ème</sup> itération pour une valeur minimale de 5.6128E+05\$, et pour l'algorithme CS-TS, la convergence est obtenue à la 140<sup>ème</sup> itération pour une valeur minimale de 5.5943E+05\$.

La programmation optimale de l'engagement des unités de production sur la journée étudiée est donnée par le Tableau. 4.4 pour le PSO-ACO, le Tableau. 4.5 pour le BCS et le Tableau. 4.6 pour le CS-TS. On constate que les trois approches donnent de bons résultats avec la supériorité de l'algorithme CS-TS.



**Figure. 4.3** Evolution de la fonction coût en fonction des itérations avec les trois approches (PSO-ACO, BCS et CS-TS) pour le système à 10 unités

#### 4.6.2 Application des algorithmes proposés à des systèmes à grande échelle

Dans le but d'évaluer et valider les performances des algorithmes proposés nous avons appliqués ces derniers sur des systèmes à grande échelle à 20, 40, 60, 80 et 100 unités dans lesquelles le système à 10 unités et les données de la demande de charge sont dupliqués en conséquence. Le tableau. 4.7 montre les résultats de simulation obtenus.

**Tableau. 4.4 :** La meilleure solution trouvée avec un système à 10 unités de l'algorithme (PSO-ACO)

Heur	Puissance générée par les unités (MW)										Coût de Carburant (\$)	Coût de démarrage (\$)
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10		
1	455	245	0	0	0	0	0	0	0	0	13683,129	0
2	455	295	0	0	0	0	0	0	0	0	14554,499	0
3	455	369.994	0	0	25	0	0	0	0	0	16809,461	900
4	455	455	0	0	40	0	0	0	0	0	18597,667	0
5	455	455	0	65	25	0	0	0	0	0	20059,702	560
6	455	455	35	130	25	0	0	0	0	0	22442,396	1100
7	455	455	85	130	25	0	0	0	0	0	23284,396	0
8	455	455	130	130	30	0	0	0	0	0	24150,340	0
9	455	455	130	130	85	20	25	0	0	0	27251,056	860
10	455	455	130	130	162	33	25	10	0	0	30057,550	60
11	455	455	130	130	162	73	25	10	10	0	31916,061	60
12	455	455	130	130	162	80	58	10	10	10	33945,163	60
13	455	455	130	130	162	43	25	0	0	0	29365,948	0
14	455	455	130	130	85	20	25	0	0	0	27251,056	0
15	455	455	130	130	30	0	0	0	0	0	24150,340	0
16	455	366.758	89.512	113.729	25	0	0	0	0	0	21538,512	0
17	455	369.693	103.851	46.455	25	0	0	0	0	0	20700,653	0
18	455	455	35	130	25	0	0	0	0	0	22442,395	0
19	455	455	130	130	30	0	0	0	0	0	24150,340	0
20	455	455	130	130	162	33	25	10	0	0	30057,550	490
21	455	455	130	130	85	20	25	0	0	0	27251,056	0
22	455	455	0	0	145	20	25	0	0	0	22735,521	0
23	455	455	0	0	0	0	0	0	0	0	17177,909	0
24	455	345	0	0	0	0	0	0	0	0	15427,419	0
<b>Totale</b>											5.5900e+05	4090
<b>Coût totale (\$)</b>											5.6309e+05	

**Tableau. 4.5 :** La meilleure solution trouvée avec un système à 10 unités de l'algorithme (BCS)

Heure	Puissance générée par les unités (MW)										Coût de Carburant (\$)	Coût de démarrage (\$)
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10		
1	455	245	0	0	0	0	0	0	0	0	13683.129	0
2	455	295	0	0	0	0	0	0	0	0	14554.499	0
3	455	370	0	0	25	0	0	0	0	0	16809.448	900
4	455	455	0	0	40	0	0	0	0	0	18597.667	0
5	455	448.168	0	71.831	25	0	0	0	0	0	20054.569	560
6	455	360.572	129.427	130	25	0	0	0	0	0	22387.253	1100
7	455	455	85	130	25	0	0	0	0	0	23284.396	0
8	455	455	130	130	30	0	0	0	0	0	24150.340	0
9	455	455	130	130	85	20	25	0	0	0	27251.056	860
10	455	455	130	130	162	33	25	10	0	0	30057.550	60
11	455	455	130	130	162	73	25	10	10	0	31916.061	60
12	455	455	130	130	162	80	58	10	10	10	33945.163	60
13	455	455	130	130	162	43	25	0	0	0	29365.948	0
14	455	455	130	130	85	20	25	0	0	0	27251.056	0
15	455	455	130	130	30	0	0	0	0	0	24150.340	0
16	455	356.164	0	115	25	0	0	0	0	0	20903.692	0
17	455	404.3742	0	115.625	25	0	0	0	0	0	20027.033	0
18	455	455	0	130	60	0	0	0	0	0	21860.286	0
19	455	455	0	130	160	0	0	0	0	0	23917.846	0
20	455	455	0	130	162	80	85	33	0	0	30519.643	490
21	455	455	0	130	162	73	25	0	0	0	27166.726	0
22	455	455	0	0	145	20	25	0	0	0	22735.521	0
23	455	455	0	0	0	0	0	0	0	0	17177.909	0
24	455	345	0	0	0	0	0	0	0	0	15427.419	0
<b>Totale</b>											5.5719e+05	4090
<b>Coût totale(\$)</b>											5.6128e+05	

**Tableau. 4.6 :** La meilleure solution trouvée avec un système à 10 unités par l'algorithme CS-TS

Heure	Puissance générée par les unités (MW)										Coût de Carburant (\$)	Coût de démarrage (\$)
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10		
1	455	245	0	0	0	0	0	0	0	0	13683.129	0
2	455	295	0	0	0	0	0	0	0	0	14554.499	0
3	455	370	0	0	25	0	0	0	0	0	16809.448	900
4	455	445	0	0	25	0	25	0	0	0	19296,891	520
5	455	455	0	40	25	0	25	0	0	0	20815,657	560
6	455	455	0	127.025	37.974	0	25	0	0	0	22541,096	0
7	455	455	85	130	25	0	0	0	0	0	23284,396	1100
8	455	455	118.254	130	41.745	0	0	0	0	0	24184,274	0
9	455	455	130	130	110	20	0	0	0	0	26588,964	340
10	455	455	130	130	162	58	0	10	0	0	29456,254	60
11	455	455	130	130	162	80	0	14.126	23.873	0	31392,256	60
12	455	455	130	130	162	80	0	55	23	10	33387,528	60
13	455	455	130	130	162	68	0	0	0	0	28768,212	0
14	455	455	130	130	110	20	0	0	0	0	26588,964	0
15	455	455	130	130	30	0	0	0	0	0	24150,340	0
16	455	455	0	115	25	0	0	0	0	0	20903,692	0
17	455	455	0	65	25	0	0	0	0	0	20059,702	0
18	455	455	0	130	60	0	0	0	0	0	21860,286	0
19	455	455	0	130	160	0	0	0	0	0	23917,846	0
20	455	455	0	130	162	80	85	33	0	0	30519,643	490
21	455	455	0	130	162	65.477	32.5 22	0	0	0	27200,873	0
22	455	455	0	0	127.159	37.840	25	0	0	0	22769,214	0
23	455	445	0	0	0	0	0	0	0	0	17177,909	0
24	455	345	0	0	0	0	0	0	0	0	15427,419	0
<b>Totale</b>											5.5534e+05	4090
<b>Coût totale(\$)</b>											5.5943e+05	

**Tableau. 4.7** : Comparaison des résultats obtenus par les algorithmes proposés avec des systèmes de 10 à 100 unités.

Méthode	Coût totale (\$)					
	10 unités	20 unités	40 unités	60 unités	80 unités	100 unités
<b>PSO-ACO</b>	563090	1135274	2264153	3378108	4496303	5635036
<b>BCS</b>	561280	1120680	2238602	3354526	4476022	5617230
<b>CS-TS</b>	559428	1111338	2218907	3343320	4462725	5600344

Le tableau. 4.7 montre clairement la supériorité de l'algorithme CS-TS par rapport aux autres techniques proposés avec les différentes tailles des systèmes de 10 à 100 unités.

#### 4.6.3 Etude comparative

Dans cette section nous avons comparés les résultats obtenus avec les approches proposées, avec des approches antérieures proposées dans la littérature à savoir ; ICGA [Damousis et al, 2004], LR [Kazarlis et al, 1996], SFL [Ebrahimi et al, 2011], EP [Juste et al, 1999], MRCGA [Sun et al, 2006], IPSO [Zhao et al, 2006], ICA [Hadji et Vahidi, 2012], BGSA [Yuan et al, 2014] et EPSO [Yuan et al, 2011]. Les résultats de la comparaison sont illustrés dans le Tableau. 4.8.

Les résultats de la simulation du Tableau. 4.8 montrent l'efficacité des approches proposés qui donnent des meilleurs résultats avec tous les systèmes étudiés. L'algorithme CS-TS offre la solution la plus économique du problème de l'UC par rapport à toutes les autres méthodes existantes dans la littérature.

De plus, et d'après l'analyse des résultats obtenus avec notre algorithme CS-TS, on constate qu'avec le système à 10 unités, on économise 4109 \$ par jours. Pareils pour les systèmes à 20, 40, 60, 80 et 100 unités, pendant 24 heures on économise respectivement 11923 \$, 25865 \$, 20930 \$, 25017 \$ et 7494 \$.

**Tableau. 4.8 :** Comparaison entre le CS-TS et d'autres algorithmes avec des systèmes de 10 à 100 unités.

Méthode	Coût totale (\$)						Le taux d'amélioration du système à 10 unités
	10 unités	20 unités	40 unités	60 unités	80 unités	100 unités	
ICGA	566404	1127244	2254123	3378108	4498943	5630836	/
LR	565825	1130660	2258503	3394066	4526022	5657277	0.10 %
EP	564551	1125494	2249093	3371611	4498479	5623885	0.32%
MRCGA	564244	1125035	2246622	3367366	4489964	5610031	0.38%
IPSO	563954	1125279	2248163	3370979	4495032	5619284	0.43%
ICA	563938	1124274	2247078	3371722	4497919	5617913	0.44%
BGSA	563937	1123996	2246445	3364665	4488039	5607838	0.44%
EPSO	563537	1123773	2244772	3364250	4487742	5608055	0.50%
PSO-ACO proposé	563090	1135274	2264153	3378108	4496303	5635036	0.58%
BCS proposé	561280	1120680	2238602	3354526	4476022	5617230	0.90%
CS-ST proposé	559428	1111338	2218907	3343320	4462725	5600344	1.24%

#### 4.7 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons proposé trois approches d'optimisation intelligente pour résoudre le problème de l'UC. Dans la première approche hybride PSO-ACO, l'algorithme ACO qui est de nature combinatoire s'occupe de la planification Marche/Arrêt des unités pour chaque pas de temps et l'algorithme PSO qui est de nature continue s'occupe de la distribution de la charge sur les unités. Dans la deuxième approche BCS, les deux versions binaire et réelle de l'algorithme de la recherche coucou sont hybridées pour le même but. Dans la troisième approche CS-TS, l'algorithme de la recherche coucou qui implémente le concept du vol de Levy très puissant dans l'exploration de l'espace de recherche va s'occuper de la recherche globale et l'algorithme de recherche tabou va s'occuper de de la recherche locale où il a prouvé son succès.

Les résultats de simulation ont montré la supériorité des approches proposées par rapport aux méthodes existantes dans la littérature.

Dans le chapitre suivant, les approches proposées seront appliqués pour résoudre le problème de l'UC-V2G avec la minimisation des émissions polluantes.

## **CHAPITRE 5**

---

### **Application des méthodes d'optimisation intelligente au problème UC avec V2G pour la minimisation du coût et de l'émission**

---

#### **Sommaire**

---

<b>5.1 Introduction .....</b>	<b>86</b>
<b>5.2 Le Véhicule au réseau (Vehicle to Grid "V2G") .....</b>	<b>86</b>
<b>5.3 Formulation du problème de l'UC-V2G .....</b>	<b>87</b>
<b>5.4 Application des algorithmes proposés pour résoudre le problème de l'UC-V2G .....</b>	<b>89</b>
<b>5.5 Résultat de simulation d'un système à 10 unités.....</b>	<b>90</b>
<b>5.6 Conclusion .....</b>	<b>96</b>

---

## 5.1 Introduction

Dans ce chapitre nous allons appliquer les méthodes d'optimisation intelligente à la résolution du problème UC combiné avec l'émission polluante avec la considération d'une flotte de véhicules connectés au réseau (V2G) comme source d'énergie supplémentaire.

Les véhicules V2G sont considérés comme une centrale électrique capable d'absorber les excès d'énergie propre produite quand la demande est faible et de la restituer au réseau quand la demande est importante. Ainsi, l'intérêt du V2G est double ; il peut substituer aux petites centrales connues par leurs coûts élevés et peut diminuer le taux d'émission polluante.

Le problème UC-V2G doit répondre à la demande de charge prévisionnelle calculée à l'avance, aux limitations des parkings, à l'état de la charge des véhicules connectés au réseau, aux besoins de la réserve tournante pour minimiser le coût total et les émissions de gaz polluants.

## 5.2 Véhicule au réseau (Vehicle to Grid "V2G")

Le V2G est une technologie qui permet à un véhicule électrique de réinjecter l'énergie de sa batterie pour alimenter le réseau. Un V2G peut être représenté comme étant une charge ou une source d'énergie distribuée. Avec sa connexion bidirectionnelle au réseau, chaque V2G peut être en mode de recharge ou décharge [Pang et al, 2012 ; White et Zhang, 2011]. Le stockage de l'énergie dans les batteries des V2G est préférable lorsque le prix et la demande d'électricité sont faibles ou quand il existe un excès d'électricité provenant des sources d'énergie renouvelables. Lorsque le prix et la demande d'électricité deviennent élevés ou lorsqu'il n'y a pas assez de production d'énergie renouvelable, l'électricité sera récupérée à partir des batteries pour être consommée ou renvoyée au réseau.

La forme de stockage la plus simple offerte par le V2G est d'abord le pilotage de la charge, qui consiste à inciter à charger les batteries pendant les heures creuses grâce à un signal tarifaire. Les batteries se chargeraient pendant les creux de consommation, dans les meilleures conditions écologiques et économiques, absorbant ainsi une partie de la production des énergies renouvelables, et réinjecteraient de l'énergie dans le réseau pendant les pics de consommation, évitant ainsi de démarrer des centrales thermiques au charbon ou au gaz, très coûteuses et émettrices de CO<sub>2</sub>. La majorité de la littérature traite le V2G comme un concept important dans la réduction du pic de la demande d'énergie. Le stockage de l'énergie dans la batterie du V2G présente plusieurs avantages tels que l'augmentation de l'utilisation des énergies renouvelable (énergie verte) et l'amélioration de la fiabilité du système électrique

[Alamri et Alamri, 2009 ; Saber et Venayagamoorthy, 2010]. La technologie V2G décrit donc un système dans lequel les V2G inactifs peuvent fournir de l'énergie au réseau électrique [Terki et Boubertakh, 2019b].

### 5.3 Formulation du problème UC–V2G

Le problème d'optimisation de l'UC–V2G est un problème d'optimisation combinatoire plus complexe que le problème de l'UC de base, car le nombre de variable dans le problème UC –V2G est plus élevé. En fait le nombre de combinaisons d'unités de production et de véhicules connectés au réseau augmente de manière exponentielle, car le nombre de véhicules connectés est beaucoup plus élevé que les unités du système existant. En outre, chaque unité a des caractéristiques de coût et d'émission différentes qui dépendent de la quantité d'énergie produite, du type de carburant, de la taille de l'unité, de la technologie, ... etc.

Dans le problème de l'UC–V2G, le défi principal est de planifier de petites unités coûteuses pour minimiser les coûts et les émissions, et pour améliorer la réserve et la fiabilité du système. Les véhicules de la technologie V2G seront considérés comme une charge pour réduire la dépendance vis-à-vis des petites unités coûteuses.

#### 5.3.1 Fonction objectif de l'UC–V2G avec minimisation d'émission polluante

Le coût de fonctionnement de l'unité qui comprend les coûts du carburant  $C_{it}(P_{it})$  des unités de productions et les coûts de démarrage des unités engagées  $ST_{it}$  qui est présenté dans l'équation (2.1). L'émission  $EC_{it}(P_{it})$  est exprimée en fonction quadratique dans (2.10).

L'optimisation des coûts et des émissions avec la planification correcte des unités de production et des V2G va réduire le coût et l'émissions du gaz polluant, bien que les véhicules puissent remplacer certains petits générateurs coûteux [Chau et Chan, 2007; Zhang et al, 2008]. La fonction objective des coûts et des émissions est donnée par l'équation (5.1) [Saber et Venayagamoorthy, 2010].

$$F = w_c \times (\text{Coût du carburant} + \text{Coût de démarrage}) + w_e \times \text{Emission}$$

$$F = \sum_{i=1}^N \sum_{t=1}^H \left[ w_c \left( C_{it}(P_{it}) + ST_{it}(1 - u_i(t - 1)) \right) + w_e (\psi_i EC_{it}(P_{it})) \right] u_i(t) \quad (5.1)$$

$w_c$  et  $w_e$  : sont des facteurs de pondération qui sont égaux à 1 ou 0 lorsque le coût ou les émissions sont inclus ou non dans la fonction objective.

$\psi_i$  : est le facteur de pénalité d'émission de l'unité  $i$ .

$$\psi_i = \frac{c_i(P_i^{max})}{EC_i(P_i^{max})} = \frac{a_i + b_i P_i^{max} + c_i P_i^{max^2}}{\alpha_i + \beta_i P_i^{max} + \gamma_i P_i^{max^2}} \quad (5.2)$$

### 5.3.2 Contraintes du problème de l'UC-V2G

Certaines contraintes doivent être prises en compte lors de l'optimisation du problème de l'UC-V2G comme les contraintes du système les contraintes des unités ainsi que les contraintes des V2G.

#### 5.3.2.1 Contraintes du Système

Les contraintes du système sont :

##### a) La contrainte d'équilibre des puissances (Power balance constraint)

La puissance totale produite par les véhicules connectés au réseau et toutes les unités engagées à chaque heure doit être égale à la demande de charge à l'heure  $t$ :

$$\sum_{i=1}^N P_{i,t} u_{i,t} + P_v N_{V2G,t} = D_t \quad t = 1, \dots, T \quad (5.3)$$

$D_t$  : Puissance demandée par la charge à l'instant  $t$ .

$N_{V2G,t}$  : Nombre des V2G connectés au réseau.

##### b) La contrainte de la réserve tournante (Spinning Reserve Constraints)

Pour assurer un fonctionnement fiable, l'unité de production totale et la capacité des véhicules connectés au réseau doivent être supérieures ou égales à la demande de charge et à la réserve tournante spécifiée.

$$\sum_{i=1}^N P_i^{max} u_{i,t} + P_v^{max} N_{V2G,t} \geq D_t + R_t \quad t = 1, \dots, T \quad (5.4)$$

Avec :

$P_v^{max}$  : Puissance maximale du véhicule.

$R_t$  : Réserve tournante du système à l'heure  $t$

#### 5.3.2.2 Contraintes des unités

Il s'agit des contraintes sont (2.6) et (2.7).

#### 5.3.2.3 Contraintes des V2G

Ces contraintes sont:

##### a) Équilibre des véhicules en grille en V2G (Gridable vehicle balance in V2G)

Seuls les véhicules (enregistrés / prévus) connectés au réseau sont pris en compte pour la planification optimale dans l'UC-V2G. Tous les véhicules déchargent sur le réseau pendant une période de planification prédéfinie (24 heures). La contrainte est formulée comme suit:

$$\sum_{t=1}^T N_{V2G,t} = N_{V2G}^{max} \quad (5.5)$$

Où  $N_{V2G}^{max}$  est le nombre maximum de véhicules dans le système.

**b) Limites de stationnement des véhicules (Vehicle parking limits)**

Chaque parking a une limite d'espace pour les véhicules de stationnement. La contrainte est donnée par :

$$N_{V2G,t} \leq N_{V2G,t}^{max} \quad (5.6)$$

**c) Fréquence de charge/décharge (Charging-discharging frequency)**

La fréquence de charge / décharge quotidienne est supposée égale à 1 par jour. Chaque véhicule doit avoir un niveau d'état de charge de départ ( $Soc$ ) approprié. La charge et l'efficacité de l'onduleur ( $Effi$ ) doivent être prises en compte.

**d) État de charge ( $Soc$ )**

Chaque véhicule doit avoir un niveau de charge de départ désiré appelé ( $Soc$ ).

**e) Efficacité ( $Effi$ )**

L'efficacité de la charge et de l'onduleur ( $Effi$ ) doivent être prise en compte.

**f) Puissance des véhicules**

La demande de charge est répartie entre les unités de production et le nombre sélectionné des véhicules pouvant être connectés au réseau. C'est la partie la plus intensive en calcul du problème de l'UC-V2G. La capacité moyenne de la batterie ( $P_v$ ) de chaque véhicule est constante et la puissance des véhicules est :

$$P_{V2G} = N_{V2G}(t) \times P_v \times Effi \times Soc \quad (5.7)$$

#### 5.4 Application des algorithmes proposés pour résoudre le problème de l'UC-V2G

Après avoir bien défini le problème de l'UC-V2G, les algorithmes proposés (PSO-ACO, BCS et CS-TR) dans le 4<sup>ème</sup> chapitre sont appliqués pour résoudre ce problème. La gestion des contraintes de l'UC est présentée dans le 4<sup>ème</sup> chapitre. Pour la gestion des contraintes des V2G, une distribution aléatoire est appliquée pour satisfaire les équations (5.5) et (5.6).

Afin de tester et de prouver la performance des approches proposées pour la résolution du problème de l'UC-V2G. Nous avons effectué des applications en simulation au système standard IEEE de 10 unités d'engagements, avec 50000 véhicules électrique connecté au réseau pour un horizon de planification de 24 heures. L'objectif de simulation consiste en la minimisation du coût et des émissions des unités de productions pour répondre à la demande prévue avec une planification intelligente de l'état ON / OFF des unités de production et du nombre des véhicules connecté au réseau pendant chaque intervalle de la période d'ordonnancement, tout en garantissant les contraintes opérationnelles de l'unité, du système et des V2G.

### 5.5 Résultat de simulation d'un système à 10 unités

Les algorithmes proposés (PSO-ACO, BCS et CS-TR) ont été successivement appliqués sur le système de base à 10 unités avec 50000 véhicules connectés au réseau pour un horizon de planification de 24 heures. La demande de charge et les caractéristiques unitaires du système à 10 unités sont collectées à partir de [Datta, 2013] et mentionné dans le chapitre 4. Dans tous les cas, la réserve tournante requise est fixée à 10% de la demande de charge totale. Les paramètres de chaque algorithme proposé sont donnés par le tableau 5.1 et les coefficients d'émission sont dessinés sur le tableau 5.2.

**Tableau. 5.1** : Valeurs spécifiques des algorithmes proposés

Paramètre	PSO-ACO	BCS	CS-TS
Nombre d'itérations (iter_max)	2000	2000	2000
Taille de la population	60	80	80
$P_a$	/	0.25	/
$c_1, c_2, w$	2, 2, 0.2	/	/
$\rho$	0.5	/	/
$N_{V2G}^{max}$	50.000	50.000	50.000
$P_v$	15 kwh	15 kwh	15 kwh
$Eff_i$	85%	85%	85%
$Soc$	50%	50%	50%

La capacité maximale de la batterie de véhicule est 25 kwh, la capacité minimale est 10 kwh et la capacité moyenne de la batterie ( $P_v$ ) de chaque de véhicule est constante est égala à 15 kwh. La demande de charge est répartie entre les unités de production et les véhicules connectés au réseau. La capacité maximale du parking à l'heure  $t$  et de 10 % du total des véhicules. Le coût et les émissions sont pris en compte dans la fonction fitness, (c'est-à-dire  $w_c = 1$  et  $w_e = 1$  ).

**Tableau. 5.2 :** Coefficients d'émission des unités

Unité	$\alpha_i(\text{ton h}^{-1})$	$\beta_i(\text{ton h}^{-1})$	$\gamma_i(\text{ton h}^{-1})$
U <sub>1</sub>	103.3908	-2.4444	0.0312
U <sub>2</sub>	103.3908	-2.4444	0.0312
U <sub>3</sub>	300.3910	-4.0695	0.0509
U <sub>4</sub>	300.3910	-4.0695	0.0509
U <sub>5</sub>	320.0006	-3.8132	0.0344
U <sub>6</sub>	320.0006	-3.8132	0.0344
U <sub>7</sub>	330.0056	-3.9023	0.0465
U <sub>8</sub>	330.0056	-3.9023	0.0465
U <sub>9</sub>	350.0056	-3.9524	0.0465
U <sub>10</sub>	360.0012	-3.9864	0.0470

La programmation optimale de l'UC-V2G sur la journée étudiée avec et sans véhicules avec l'algorithme CS-TS est représentés sur les tableaux 5.3 et 5.4 respectivement.

**Tableau. 5.3 :** Emission et réserve des 10 unités de production sans V2G de l'algorithme (CS-TS)

Heur	Puissance générée par les unités (MW)										Emission (ton)	Capacité-Max (MW)	Demand (MW)	Reserve (MW)
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10				
1	455	245	0	0	0	0	0	0	0	0	6827.66	910	700.0	210
2	455	295	0	0	0	0	0	0	0	0	7547.84	910	750.0	160
3	455	289.10	0	105.90	0	0	0	0	0	0	7895.01	1040	850.0	190
4	455	314.83	0	64.59	90.7	0	25	0	0	0	8644.95	1287	950.0	337
5	455	285.90	0	81.93	107.28	0	69.67	0	0	0	7935.47	1287	1000.0	287
6	455	398.07	0	105.20	93.30	0	48.41	0	0	0	10474.1	1287	1100.0	187
7	455	385.46	114.22	125.73	69.58	0	0	0	0	0	10561.5	1332	1150.0	182
8	455	455	77.14	130	82.86	0	0	0	0	0	12061.8	1332	1200.0	132
9	455	420.82	130	130	115.42	48.75	0	0	0	0	11867.4	1412	1300.0	112
10	455	455	130	130	108.90	79.91	0	41.17	0	0	12959.7	1467	1400.0	67
11	455	455	130	130	162	77.93	0	30.06	10	0	13570.5	1522	1450.0	72
12	455	455	130	130	162	80	0	55	23	10	13824.7	1577	1500.0	77
13	455	455	130	130	146.21	44.83	0	38.95	0	0	13128.4	1467	1400.0	67
14	455	455	79.05	130	146.68	34.25	0	0	0	0	12559.6	1412	1300.0	112
15	455	395.37	87.38	130	132.24	0	0	0	0	0	10846.8	1332	1200.0	132
16	455	396.86	0	107.70	90.44	0	0	0	0	0	10206.8	1202	1050.0	152
17	455	345.60	0	62.55	136.83	0	0	0	0	0	9122.9	1202	1000.0	202
18	455	405.65	0	130	109.34	0	0	0	0	0	10642.2	1202	1100.0	102
19	455	455	0	130	160	0	0	0	0	0	12122.8	1202	1200.0	2
20	455	455	0	130	162	80	85	33	0	0	12958.6	1422	1400.0	22
21	455	455	0	130	126.08	61.76	72.14	0	0	0	12424.6	1367	1300.0	67
22	455	402.65	0	0	128.18	76.87	37.29	0	0	0	10503.7	1237	1100.0	137
23	455	445	0	0	0	0	0	0	0	0	10644.3	910	900.0	10
24	455	345	0	0	0	0	0	0	0	0	8424.0	910	800.0	110
<b>Totale</b>											<b>2.7762e+05</b>	<b>30228</b>		<b>3128</b>
<b>Coût = Coût du carburant + Coût de démarrage</b>											<b>5.6464e+05</b>			

**Tableau. 5.4 :** Emission et réserve des 10 unités de production avec V2G de l'algorithme (CS-TS)

Heur	Puissance générée par les unités (MW)										Nombre de véhicule	$P_{V2G}$ (MW)	Emission (ton)	Max . Capacity (MW)	Demand (MW)	Reserv e (MW)	
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10							
1	455	222.7	0	0	0	0	0	0	0	0	3494	22.27	6557.0	954.5	700.0	254.5	
2	455	290.60	0	0	0	0	0	0	0	0	671	4.27	7099.7	918.5	750.0	168.5	
3	455	366.0	0	0	0	0	0	0	0	0	4541	28.94	8839.5	967.9	850.0	117.8	
4	455	356.9	0	123.3	0	0	0	0	0	0	2305	14.96	9229,8	1069.3	950.0	119.3	
5	455	345.20	0	81.1	113.4	0	0	0	0	0	810	5.16	8961.2	1212.3	1000.0	212.3	
6	455	332.9	65.5	104.9	127.1	0	0	0	0	0	2256	14.38	9276.3	1360.7	1100.0	260.7	
7	455	316.6	123.5	109.4	125.3	0	0	0	0	0	3141	20.02	9132.0	1372.0	1150.0	222.0	
8	455	455	85.8	130	70.9	0	0	0	0	0	495	3.15	12081.2	1338.3	1200.0	138,3	
9	455	455	126.2	127	40.1	76.4	0	0	0	0	3147	20.06	12556.1	1452.1	1300.0	152.1	
10	455	455	103.3	103.4	126.5	70.5	47.8	23.6	0	0	2272	14.48	12872.6	1580.9	1400.0	180.9	
11	455	401.4	130	130	102.0	75.0	60.1	31.3	39.27	0	1198	7.63	12581.4	1622.2	1450.0	172.2	
12	455	455	130	130	140.9	72.7	41.6	34.9	0	10	4650	29.64	13668.4	1666.2	1500.0	166.2	
13	455	455	130	130	83.4	79.6	30.7	35.6	0	0	76	0.48	13143.7	1552.9	1400.0	152.9	
14	455	455	116.65	125.3	142.9	0	0	0	0	0	792	5.04	12486.9	1342.0	1300.0	42.0	
15	455	426.9	119.2	81.3	117.3	0	0	0	0	0	38	0.24	11387.2	1332.4	1200.0	132.4	
16	455	362.8	96.4	107.6	0	0	0	0	0	0	4404	28.07	9607.7	1226.1	1050.0	176.1	
17	455	397.0	93.8	45.9	0	0	0	0	0	0	1266	8.07	10090.6	1186.1	1000.0	186.1	
18	455	455	69.9	95.9	0	0	0	0	0	0	3782	24.11	11544.0	1218.2	1100.0	118.2	
19	455	455	113.7	130	0	32.3	0	0	0	0	2185	13.92	12260.7	1277.8	1200.0	77.8	
20	455	455	130	130	0	80	83.9	54.0	0	0	1873	11.94	12984.1	1413.8	1400.0	13.8	
21	455	455	116.1	130	0	67.0	65.03	0	0	0	1850	11.79	12538,6	1358.5	1300.0	58.5	
22	455	404.4	56.5	121	0	0	42.84	0	0	0	3161	20.15	10704.2	1295.3	1100.0	195.3	
23	455	385.20	0	102.8	0	0	52.7	0	0	0	644	4.01	7787.3	1133.2	900.0	233.2	
24	455	268.70	0	0	0	0	70.1	0	0	0	949	6.04	7082.3	1007.0	800.0	207.1	
<b>Totale</b>													<b>2.5447e+05</b>	<b>30860</b>		<b>3759.5</b>	
<b>Coût = Coût du carburant + Coût de démarrage</b>													<b>5.6029e+05</b>				

**Tableau. 5.5 :** Les meilleures solutions trouvées avec et sans V2G d'un système à 10 unités de l'algorithme (CS\_TS)

	Sans V2G	Avec V2G
<b>Coût(\$)=Coût(C) +Coût(S)</b>	5.6464e+05	5.6029e+05
<b>Emission (ton)</b>	2.5776e+05	2.5447e+05
<b>Capacité (MW)</b>	30228	30860
<b>Reserve(MW)</b>	3128	3759.5

Le tableau 5.5 montre la valeur minimale du coût de production, l'émission, la capacité maximale et la réserve des 10 unités obtenus par la méthode CS-TS avec et sans V2G.

Le coût minimal de fonctionnement sans V2G est de 564 642,56 \$ dont il comprend le coût de productions (coût du carburant et coût de démarrage des unités engagées) et les émissions sont de 257 756.09 tonnes. En revanche avec les V2G le coût minimal et les émissions sont réduits. Le V2G économise (564 642,56 \$ - 560 288,14 \$= 4354,42 \$), et réduit (257 756.09 tonnes - 254 473.61 tonnes= 3282,48 tonnes) par jour dans un système à 10 unités. Cependant, la capacité maximale du système et la réserve sont toujours plus élevées lorsque la technologie V2G est considérée dans le problème d'engagement des unités de production.

Le tableau. 5.6 montre les solutions optimales trouvées avec les algorithmes proposés (PSO-ACO, BCS et CS-TS).

**Tableau. 5.6 :** Les solutions optimales trouvées avec les algorithmes proposés d'un système de 10 unités pour 50.000 véhicules connectés au réseau

	Sans V2G		Avec V2G	
	<b>Coût(\$)=Coût(C)+Coût(S)</b>	<b>Emission (ton)</b>	<b>Coût(\$)=Coût(C)+Coût(S)</b>	<b>Emission (ton)</b>
<b>PSO-ACO</b>	5.6834e+05	2.9432e+05	5.6585e+05	2.7117e+05
<b>BCS</b>	5.6649e+05	2.8765e+05	5.6214e+05	2.6486e+05
<b>CS-TS</b>	5.6464e+05	2.5776e+05	5.6029e+05	2.5447e+05

D'après le tableau. 5.6 les émissions et les coûts d'exploitation sont réduits lorsque les V2G sont pris en compte dans le système. L'algorithme BCS permet d'obtenir de bons résultats

mais avec l'algorithme PSO-ACO, le coût de production et les émissions sont plus élevés que celles trouvées avec la méthode BCS et CS-TS. On constate que l'approche CS-TS donne de meilleurs résultats pour l'optimisation à la fois des coûts et des émissions de l'UC-V2G.

Le tableau 5.7 montre la puissance de sortie des unités de production et des V2G pendant la période de programmation avec et sans V2G. (L'effet du V2G = la puissance avec V2G - la puissance sans V2G) de chaque unité.

**Tableau. 5.7 :** Puissance des unités pendant 24 heures pour 50.000 véhicules connectés au réseau avec CS\_TS

	U <sub>1</sub>	U <sub>2</sub>	U <sub>3</sub>	U <sub>4</sub>	U <sub>5</sub>	U <sub>6</sub>	U <sub>7</sub>	U <sub>8</sub>	U <sub>9</sub>	U <sub>10</sub>	V2G
Avec V2G(MW)	10920.0	9427.3	1807.1	2239.4	1190.3	553.75	495.25	179.75	39.27	10.0	318.75
Sans V2G (MW)	10920.0	9637.4	1007.8	2213.6	2330.0	584.32	337.52	198.20	33	10.0	0.0
Effet V2G (MW)	0.0	-210.10	799.30	25.80	-1139.7	-30.57	157.73	-18.45	6.27	0.0	0.0

U<sub>1</sub> et U<sub>10</sub> produisent les mêmes puissances avec et sans V2G, mais U<sub>1</sub> est l'unité la moins chère car elle génère toujours une puissance maximale, cependant, U<sub>10</sub> est l'unité la plus chère car elle génère une puissance minimale chaque fois qu'elle est engagée.

U<sub>2</sub>, U<sub>5</sub>, U<sub>6</sub> et U<sub>8</sub> génèrent moins d'énergie (valeur négative de l'effet du V2G) qui indique que l'unité est relativement chère (coûteuses) ou plus polluante dans le système. U<sub>3</sub>, U<sub>4</sub>, U<sub>7</sub> et U<sub>9</sub> génèrent plus de puissance (valeur positive de l'effet du V2G) lorsque les V2G sont considérés dans le système, car la méthode CS\_TS proposée fait un équilibre entre le coût et l'émission, et elle satisfait toutes les contraintes du système. On peut constater que la puissance de sortie de certaines unités de production diminue lorsque le V2G est appliqué. Cela démontre que le V2G peut maintenir le fonctionnement du système et arrêter certaines petites unités de production coûteuses.

## 5.6 Conclusion

Dans ce chapitre, les approches d'optimisation intelligente proposées (PSO-ACO, BCS et CS-TS) sont appliquées pour la résolution du problème de l'UC-V2G avec la minimisation du coût et des émissions polluante. Le concept V2G peut être comme une petite centrale électrique portable qui est principalement chargé à partir du réseau en heures creuses et se décharge sur le réseau aux heures de pointe. Dans le problème UC-V2G, les véhicules V2G d'un côté peuvent substitués aux petites unités connues par leurs coût élevé et ainsi diminuer la facture de production, et d'autre coté ils peuvent réduire l'émission de polluants en les chargent exclusivement via des sources d'énergies à énergies renouvelables. Les résultats de simulation montrent l'efficacité des approches proposées. D'après les résultats obtenus, il est clair que l'UC avec la bonne planification des V2G réduit les coûts d'exploitation et les émissions.

---

## Conclusion générale

La résolution du problème d'engagement des unités de production de l'énergie électrique (Unit Commitment Problem, UCP) est l'un des plus grands défis du secteur de l'énergie. Il s'agit d'un problème d'optimisation qui consiste à minimiser le coût de la production de l'énergie électrique tout en satisfaisant la demande, la réserve tournante et plusieurs contraintes techniques et opérationnelles, par la recherche de la meilleure politique Marche/Arrêt des unités de production sur l'horizon de planification. Plusieurs approches ont été proposées dans la littérature pour résoudre ce problème. Parmi elles, les méthodes d'optimisation intelligente attirent le plus d'intérêt ces dernières années. Cette attraction revient essentiellement à leurs mécanismes de recherche parallèle qui offre le meilleur moyen pour trouver l'optimum global.

Le travail présenté dans cette thèse s'inscrit dans ce contexte. En effet, le succès prometteur des méthodes d'optimisation intelligente nous a incités à explorer le champ de ses méthodes dans le but de trouver les approches les plus adaptées pour la résolution du problème de l'UC et éventuellement hybrider les uns avec les autres pour combiner leurs avantages et aboutir au meilleur résultat possible.

Le premier chapitre est en majorité consacré au processus de production et de distribution de l'énergie électrique où les différents types d'unités de production ainsi que leurs caractéristiques sont présentées. On constate que plus de deux tiers de de la production provient de la transformation des combustibles fossiles, le reste provient des centrales nucléaires et centrales à énergies renouvelables. Nous avons mis le point sur les avantages et les inconvénients de chaque type d'unité, notamment les centrales thermiques sont bon marché mais trop polluante et les centrales à énergie renouvelables fournissent une électricité propre mais de façon discontinue. Nous avons ensuite montré les différentes fluctuations que peut subir la demande de charge des consommateurs. A la fin du chapitre, nous avons introduit en bref le concept des réseaux intelligents (Smart grid) et la technologie V2G et nous avons donné la stratégie globale de gestion des centrales électrique en fonction de la demande.

Dans le deuxième chapitre, la formulation du problème UCP est présentée avec différentes versions. Les différentes fonctions objectives sont données ainsi que les contraintes du problème. L'UCP se divise en deux sous-problèmes corrélés; le premier appartient à la classe des problèmes de programmation non linéaire à nombres entiers mixtes. Il consiste à déterminer la meilleure politique d'état Marche/Arrêt des unités de production sur un horizon

de planification. Le second, appartient à la classe des problèmes d'optimisation de la programmation quadratique, consiste à trouver le dispatching optimal pour répondre à la demande de charge prévue parmi les unités engagées pendant la période d'ordonnancement.

Le troisième chapitre est une étude bibliographique sur des différentes méthodes d'optimisation intelligente. Cet étude nous a permis de souligner les points forts et les points faibles de chaque méthode standard.

Dans le quatrième chapitre, nous avons proposé trois approches d'optimisation intelligente pour le problème de l'UC. La première approche est un algorithme hybride PSO-ACO (Particle Swarm Optimization-Ant Colony Optimization). L'ACO est une méthode d'optimisation puissante bien adaptée aux problèmes d'optimisation combinatoire, l'algorithme est appliqué pour déterminer la meilleure politique des états Marche/Arrêt des unités dans l'horizon temporel de planification. En outre, l'algorithme PSO continu par nature est utilisé pour déterminer la puissance générée par les unités engagées (variables réelles) pour satisfaire la demande et la réserve tournante. La deuxième approche est basée sur l'algorithme de recherche Coucou (Cuckoo Search CS). Dans cette approche, d'un côté la version binaire de l'algorithme CS est utilisée pour déterminer le statut Marche/Arrêt des unités dans l'horizon temporel de planification. De l'autre côté, la version réelle de l'algorithme CS est utilisée pour déterminer la puissance générée par les unités engagées. La troisième approche est un algorithme hybride CS-TS (Cuckoo Search -Tabu Search). Le choix de cette approche est justifié d'une part par le fait que le CS implémente séparément un outil de recherche globale efficace, le vol de Levy, qui permet la meilleure exploration de l'espace de recherche. Et d'autre part, la recherche locale qui permet une meilleure exploitation de l'espace de recherche est assurée par le TS dont la recherche locale est son domaine privilégié. Les trois méthodes proposées sont appliquées avec succès au problème de l'UC. A la fin du chapitre une étude comparative montre la supériorité de la méthode CS-TS.

Dans le cinquième chapitre, les approches proposées sont étendues au cas des réseaux incluant des véhicules électriques connectés au réseau (Vehicle-to-Grid, V2G) avec la prise en compte dans la fonction objective la minimisation de l'émission polluante. Dans ce cas la complexité du problème de l'UC est augmentée par le fait de l'explosion du nombre d'unités et du fait que la fonction coût est multi-objective. Dans le problème UC-V2G, les véhicules V2G d'un côté peuvent être substitués aux petites unités connues par leur coût élevé et ainsi diminuer la facture de production, et d'autre côté ils peuvent réduire l'émission de polluants

en les chargeant exclusivement via des sources d'énergies propre. Les résultats de simulation montrent l'efficacité des approches proposées.

Comme perspectives nous proposons :

- Appliquer les algorithmes proposés pour résoudre d'autres problèmes d'optimisation complexes des systèmes électriques telle que la structure d'énergie ainsi que le problème de gestion de production électrique et le problème de répartition des flux de puissance dans le réseau de transport.
- Développer d'autres méthodes d'optimisation intelligente puissante pour résoudre d'autres problèmes d'optimisation dans des différents domaines.
- Trouver d'autres ressources d'énergie renouvelable pour résoudre le problème d'émission polluante telle que les batteries rechargeables.

---

## Bibliographie

- [Abido, 2006] M.A. Abido. Multi-objective evolutionary algorithms for electric power dispatch problem. *IEEE Trans. Evol. Comput.* Vol.10, N°3, pp. 315–329, 2006.
- [Abookazemi et al, 2009] K.Abookazemi, M.W. Mustaf, H.Ahmad. Structured Genetic Algorithm Technique for Unit Commitment Problem. *Int. J.of Recent Trends in Engineering and Technology*, Vol.1, N° 3, Nov 2009.
- [Abou Chacra, 2005] F. Abou Chacra . Valorisation et optimisation du stockage d'énergie dans un réseau d'énergie électrique. Thèse de Doctorat en Génie Electrique, U-Paris XI, Orsay, 2005.
- [Aguet et Morf, 2013] M. Aguet. J. J Morf. *Energie Electrique* volume IIX. Ecole polytechnique fédérale de Lausanne. 2013.
- [Aikelin et Cayzer, 2002] U. Aikelin, S. Cayzer. The Danger Theory and Its Application to Artificial Immune Systems. In *Proceedings of the 1st International Conference on Artificial Immune Systems*, pp. 141–148, 2002.
- [Akhdiyatul et Erick, 2017] N. Akhdiyatul , R. Erick. Cuckoo Search Algorithm for Environmental/Economic Dispatch Problem. *IOSR-JEEE*, Vol, 12, pp. 59-63, 2017.
- [Alamri et Alamri, 2009] B. R. Alamri, A. R. Alamri. Technical Review of Energy Storage Technologies When Integrated With Intermittent Renewable Energy. *Proc, Sustainable Power Generation and Supply*, pp. 1-5, April 2009.
- [Andrés et al, 2018] I. Andrés, G. Akemi, S. Patricia. Cuckoo Search Algorithm with Lévy Flights for Global-Support Parametric Surface Approximation in Reverse Engineering', *MDPI*, March, Vol.10, N°58, pp.1-25, 2018.
- [Archana, 2015] N.Archana. Unit Commitment and Economic Load Dispatch Using Hybrid Genetic - Particle Swarm Optimization Algorithm. *Int. Journal of Applied Research*, Vol.1, N°6, pp.109-113, 2015.
- [Bard, 1988] J.F. Bard. Short-term scheduling of thermal electric generators using Lagrangian Relaxation. *Operation Research*, Vol.36, N°5, pp.756–766, 1988.
- [Basu, 2008] M. Basu. Dynamic economic emission dispatch using non dominated sorting genetic algorithm-II. *Electrical Power and Energy Systems*, Vol.30, pp.140-149, 2008.
- [Basu, 2010] M. Basu. Economic environmental dispatch of hydrothermal power system. *Electrical Power and Energy Systems*, Vol. 32, pp.711–720, 2010.

- [Bencherif et Chabouni, 2011] W. C Bencherif, O. Chabouni. Etudes de refroidissement de l'alternateur de la centrale de Jijel. Université de Bjaia. 2011.
- [Bendiab et al, 2003] E. Bendiab, S. Meshoul, M. Batouche. An AIS for Multi-Modality Image Alignment. Second International Conference on Artificial Immune systems. ICARIS2003, Edinburgh, UK, ISSN: 0302-9743, Springer-Verlag Berlin Heidelberg. pp. 13-21, 2003.
- [Bendotti et al. 2019] P. Bendotti, P. Fouilhoux, C. Rottner. On the complexity of the Unit Commitment Problem. *Annals of Operations Research*, pp. 1-2, 2019.
- [Besson, 2008] A. Besson. Présentation cours 1ere STI GEL: Le Fonctionnement Des Centrales Nucleaires. 2008.
- [Bonabeau et al, 1999] E. Bonabeau, M. Dorigo, G. Theraulaz. *Swarm intelligence: from natural to artificial systems*. Oxford University Press, Inc., New York, NY, USA, pp. 25–38, 1999.
- [Bosse, 2016] N. Bosse. *Les Réseaux Électriques Intelligents: Vers De Nouveaux Besoins En Compétences Et En Formation*. Centre de recherche en économie de Grenoble (CREG), centre associé au Céreq de Grenoble, 2016.
- [Bouri, 2007] S. Bouri. *Optimisation de la production et de la structure d'énergie électrique par les colonies de fourmis*. These de Doctorat Université de Jilali Liabès sidi belabess, 2007.
- [Brown et al 2007] C. Brown, L. S. Liebovitch, R. Glendon. Lévy flights in DobeJu/'hoansi foraging patterns. *Human Ecol.* Vol. 35, pp 129-138, 2007.
- [Bullnheimer et al, 1999] B. Bullnheimer, R. Hartl, C. Strauss. An Improved Ant system Algorithm for the Vehicle Routing Problem. *Annals of Operations Research*, Vol. 89, pp. 319–328, 1999.
- [Chan et Tiwari, 2007] F. T. S. Chan, M. K. Tiwari. *Swarm Intelligence: Focus on Ant and Particle Swarm Optimization*. ISBN 978-3-902613-09-7. Itech Education and Publishing, Vienna, Austria. pp. 532, December, 2007.
- [Chandrasekaran et Simon, 2012] K. Chandrasekaran, P.S. Simon. Multi-objective unit commitment problem using Cuckoo search Lagrangian method. *International Journal of Engineering, Science and Technology*, 4(2), 89-105. doi:10.4314/ijest.v4i2.7.
- [Chandrasekaran et Sishaj, 2012] K. Chandrasekaran, P.S. Sishaj. Multi-objective unit commitment problem using Cuckoo search Lagrangian method. *ijest, International Journal of Engineering, Science and Technology*, Vol.4, N°2, pp. 89-105, 2012.

- [Chareyron et al, 2021] D. Chareyron, H. Horsin-Molinaro, B. Multon. Conception et chiffre de l'énergie : Le transport de l'électricité. Culture science physique, 2021.
- [Charlotte, 2019] Charlotte. Quel est l'impact environnemental des énergies renouvelables? Electricité verte.2021. <https://www.quiestvert.fr>.
- [Chau et Chan, 2007] M. S. W. Chan, K.T. Chau. A switched-capacitor boost-multilevel inverter using partial charging. IEEE Transactions on Circuit and Systems II – Express Briefs, Vol. 54, N°12, pp. 1145-1149, 2007.
- [Chitra et Ravichandran, 2014a] J.Chitra, C.S. Ravichandran. Cuckoo and Levy Flights Algorithm Applied to Unit-Commitment Problem. IJAREEIE, International Journal of Advanced Research in Electrical, Electronics and Instrumentation Engineering. Vol.3, N°12, pp. 13670-13677, December 2014.
- [Chitra et Ravichandran, 2014b] J. Chitra, C.S. Ravichandran, Performance Comparison of Integer Coded Cuckoo and Levy Flights Algorithm Applied to Unit-Commitment Problem. JATIT, Journal of Theoretical and Applied Information Technology, Vol. 66, N°3, pp. 876-883, 2014.
- [Clerc et al, 2002] M. Clerc, J. Kennedy. The particle swarm - explosion, stability, and convergence in a multidimensional complex space. IEEE Transactions on Evolutionary Computation, Vol. 6 pp. 58–73, 2002.
- [Clerc et Kennedy, 2002] M. Clerc, and J. Kennedy. The Particle Swarm: Explosion, Stability, and Convergence in a Multi-Dimensional Complex Space. In Proceedings of the IEEE Transactions on Evolutionary Computation, Vol. 6, pp 58-73, 2002.
- [Colorni et al, 1992] A. Colorni, M. Dorigo, V. Maniezzo. Distributed Optimization by Ant Colonies. Proceedings of the 1st European Conference on Artificial Life. Elsevier Publishing. pp 134-142. 1992.
- [Combe, 2019] M. Combe. Les émissions mondiales de CO2 ont encore augmenté en 2019. Techniques de l'ingénieur. 2019. <https://www.techniques-ingenieur.fr>
- [Cooren et al, 2008] Y. Cooren, A. Nakib, P. Siarry. Image Thresholding using TRIBES, a parameter-free Particle Swarm Optimization Algorithm. Springer, Proceedings of the International Conference on Learning and Intelligent Optimization, pp 81-94. 2008.
- [Damousis et al, 2004] I.G. Damousis, A.G. Bakirtzis, P.S. Dokopoulos. Solution to the unit commitment problem using integer-coded genetic algorithm. IEEE Trans. Power Syst, Vol.19, N°2, pp.1165–1172. doi:10.1109/TPWRS.2003.821625.

- [Dang et Li, 2007] C. Dang and M. Li. A floating-point genetic algorithm for solving the unit commitment problem. *European Journal Operational Research*, Vol. 181, N°4, pp. 1370-1395, 2007.
- [Darwin, 1859] C. Darwin. *The origin of species by means of natural selection*. Mentor Reprint, New York, 1859.
- [Dasgupta et Gonzalez, 2002] D. Dasgupta, F. Gonzalez. An Immunity-Based Technique to Characterize Intrusions in Computer Networks. *IEEE Trans. Evol. Comput.* Vol. 6, N° 3, pp. 281-291, 2002.
- [Datta, 2013]. D.Datta. Unit Commitment Problem with Ramp Rate Constraint Using a Binary-Real-Coded Genetic Algorithm. *Applied Soft Computing*, 13, pp. 3873-3883. doi:10.1016/j.asoc.2013.05.002.
- [De Castro et Von Zuben, 2002] L. N. De Castro, F. J. Von Zuben. Learning and optimization using the clonal selection principle. *IEEE Trans. Evolutionary Computation*, Vol, 6, N°3, pp. 239–251, 2002.
- [Deneubourg et al, 1990] J.L. Deneubourg, S.Aron, S. Goss, J. M. Pasteels. The self-organizing exploratory pattern of the argentine ant. *Journal of Insect Behavior*, Vol. 3 N° 2, pp. 159– 168, 1990.
- [Dorigo, 1992] M. Dorigo. *Optimization, Learning and Natural Algorithms*. PhD thesis, Politecnico di Milano, Italy, 1992.
- [Dorigo et al, 1991] M. Dorigo, V. Maniezzo, A. Coloni. Positive feedback as a search strategy. Technical Report 91-016, Dipartimento di Elettronica, Politecnico di Milano, Milan, Italy, 1991.
- [Dorigo et Blum, 2005] M. Dorigo, C. Blum. Ant colony optimization theory: A survey. *Theoretical Computer Science*, ISSN 03043975243–278, November 2005.
- [Dorigo et Maniezzo, 1996] M. Dorigo, V. Maniezzo, A. Coloni. Ant System: optimization by a colony of cooperating agents. *IEEE Transactions on Man. Cyber, Part B*. Vol. 26, N°1, pp.29-41, 1996.
- [Draidi, 2010] A. Draidi. Répartition économique de l'énergie électrique utilisant les Techniques d'intelligence artificielle. Mémoire de Magistère, Université Mentouri-Constantine, 2010.
- [Dudek, 2013] G.Dudek. Genetic algorithm with binary representation of generating unit start-up and shut-down times for the unit commitment problem. *Expert Systems with Applications*, Vol. 40, pp.6080–6086. doi:10.1016/j.eswa.2013.05.010.

- [Dupas, 2004] R. Dupas. Amélioration de performance des systèmes de production: apport des algorithmes évolutionnistes aux problèmes d'ordonnancement cycliques et flexibles. Thèse. Université d'Artois. 2004.
- [Ebrahimi et al, 2011] J., Ebrahimi, S.H. Hosseinian, G.B.Gharehpetian. Unit Commitment Problem Solution Using shuffled Frog Leaping Algorithm. *IEEE Trans on Power Systems*, , Vol.2, N°6, pp. 573-581, 2011.
- [Fan et al, 2012] W. Fan, Y. Liao, J.B. Lee, Y.K. Kim. Evaluation of Two Lagrangian Dual Optimization Algorithms for Large-Scale Unit Commitment Problems. *Journal of Electrical Engineering & Technology*, Vol.7, N°1, pp.17–22, 2012.
- [Frag et al, 2015] M.A. Farag, E M.A. I-Shorbagy, I.M. El-Desoky, A. A. El-Sawy, A. A. Mousa. Binary-Real Coded Genetic Algorithm Based k-Means Clustering for Unit Commitment Problem. *Applied Mathematics*, Vol.6, pp.1873-1890, doi:10.4236/am.2015.611165.
- [Fateh Amir, 2012] M .Fateh Amir. Etude du fonctionnement des centres de production dans un système démarché libre de l'énergie électrique. Thèse de magister université de Batna, 2012.
- [Feng et al, 2018] Y. Feng, J. Zhou, L. Mo. A Gradient-Based Cuckoo Search Algorithm for a Reservoir-Generation Scheduling Problem. *MDPI*, Vol.11, N°36, pp. 1-21, 2018.
- [Fogel et al, 1966] L.J. Fogel, A.J. Owens, M.J. Walsh. *Artificial Intelligence through Simulated Evolution*. John Wiley & Sons, Inc., New York, 1966.
- [Forrest et al, 1994] S.Forrest, A. S. Perelson, L. Allen, R. Cherukuri. Self-nonsel discrimination in a computer. In *Proceedings of the Symposium on Research in Security and Privacy*, pp. 202–212, 1994.
- [Frangioni et al, 2008] A. Frangioni, C. Gentile, F. Lacalandra. Solving unit commitment problems with general ramp constraints. *Electrical Power and Energy Systems*, Vol.30, N°5, pp.316–326, 2008.
- [Gambardella et al, 1999] L. Gambardella, E. Taillard, M. Dorigo. Ant Colonies for the QAP. *Journal of the Operational Research Society*, Vol.50, pp.167–176.1999.
- [Glover, 1986] F. Glover. Future paths for integer programming and links to artificial intelligence. *Computers and Operations Research*. Vol. 13, N° 5, pp 533-549, 1986.
- [Glover et Laguna, 1997] F. Glover, M. Laguna. *Tabu Search*. Kluwer Academic Publishers, Boston, 1997.

- [Govardhan, 2016] M. Govardhan. Solution to Unit Commitment with Priority List Approach. International Journal of Advanced Research in Electrical, Electronics and Instrumentation Engineering (IJAREEIE), Vol.3, N°6, pp. 5114-5121, 2016.
- [Goldberg, 1989] D.E. Goldberg. Genetic Algorithms in Search, Optimization and Machine Learning, ISBN: 0201157675, Addison-Wesley, 1989.
- [Greensmith et al, 2005] J. Greensmith, U. Aickelin, S. Cayzer. Introducing Den-dritic Cells as a Novel Immune-Inspired Algorithm for Anomaly Detection. In Artificial Immune Systems, LNCS, Springer, pp. 153–167. 200.
- [Hadji et Vahidi, 2012] M.M. Hadji and B. Vahidi. A Solution to the Unit Commitment Problem Using Imperialistic Competition Algorithm . IEEE Transactions on Power Systems, 27(1):117–124, 2012.
- [Hadjsaid et Sabonnadiere, 2018] N. HADJSAÏD, J-C, SABONNADIÈRE. Des réseaux électriques aux « Smart grids ». 073, 2018.
- [Harrabi, 2014] I. Harrabi. Analyse de performance des algorithmes de contrôle du G2V/V2G des véhicules électriques dans les réseaux électriques intelligents. Thèse, Université du Québec, Institut National de la Recherche Scientifique, Énergie, Matériaux et Télécommunications, 2014.
- [Heppner et Grenander, 1990] F. Heppner, U. Grenander. A stochastic nonlinear model for coordinated bird flocks. In: S Krasner (eds) The ubiquity of chaos. AAAS Publications, Washington, DC, 1990.
- [Holland, 1975] J.H. Holland. Genetic Algorithms and the optimal allocation of trials. SIAM Journal of Computing. Vol. 2, N° 2, pp. 88-105, 1975.
- [Hunt et Cooke, 1996] J. E. Hunt, D. E. Cooke. Learning Using an Artificial Immune System. Journal of Network and Computer Applications. vol.19, N° 2, pp. 189-212, 1996.
- [Intissar et al, 2018] K. Intissar, L. Taoufik, M.Faouzi. Cuckoo Search Approach for Parameter Identification of an Activated Sludge Process. Computational Intelligence and Neuroscience, pp. 1-9. 2018
- [Inventaire, 2013] Quinzième inventaire. La production d'énergie d'origine renouvelable en Algérie: détails par région et par pays. 2013. <http://www.energies-renouvelables.org>.
- [Jeong et al, 2009a] Y.W. Jeong, J.B. Park, J.R. Shin, K.Y. Lee. A thermal unit commitment approach using an improved quantum evolutionary algorithm. Electric Power Components and Systems, Vol.37, N°7, pp.770–786, 2009.

- [Jeong et al, 2009b] Y.W. Jeong, W.N. Lee, H.H. Kim, J.B. Park, J.R. Shin, (2009). Thermal Unit Commitment Using Binary Differential Evolution. *Journal of Electrical Engineering & Technology*, Vol.4, N°3, pp. 323-329, 2009.
- [Jerne, 1973] N. K. Jerne. Towards a network theory of the immune system. *Annals of Immunology*, 125C(1-2), ISSN 0300-4910.1973pp. 373–389,1973.
- [Jiang et al 2016] M. Jiang, D. Jiang, H.Song. A Cuckoo Search-Support Vector Machine Model for Predicting Dynamic Measurement Errors of Sensors. *IEEE Access*, , Vol.4, pp. 5030-5037, Septembre 2016.
- [Jomaux, 2015] J. Jomaux. Le secteur électrique est-il adapté aux défis à venir ? Proposition de réforme. ETES9CE. Université Catholique de Louvain – UCLouvain 2015. DOI: 10.13140/RG.2.1.3837.4886.
- [Juste et al, 1999] K.A. Juste, H.Kita, E.Tanaka, J.Hasegawa. An Evolutionary Programming Solution to the Unit Commitment Problem. *IEEE Transactions on Power Systems*, Vol.14, N°4, pp.1452-1459, 1999.
- [Kamboj, 2015] V.K. Kamboj. A novel hybrid PSO–GWO approach for unit commitment problem. *Neural Comput & Applic*, doi:10.1007/s00521-015-1962-4.
- [Karaboga, 2005] D. Karaboga. An idea based on honey bee swarm for numerical optimization, cahier de recherché. Technical Report TR06, Erciyes University, Engineering Faculty, Computer Engineering Department, 2005.
- [Karaboga et Basturk, 2008] D. Karaboga, B. Basturk. On the Performance of Artificial Bee Colony (ABC) algorithm. *Applied Soft Computing*. Vol. 8, N°1, pp. 687–697, 2008.
- [Kazarlis et al., 1996] S. A.Kazarlis, A. G.Bakirtzis, V. Petridis. A genetic algorithm solution to the unit commitment problem. *IEEE Trans. on Power Systems*, Vol. 11, N°1, pp. 83-92, 1996.
- [Kempton et al, 2005] W.Kempton, J.Tomic, S. Letendre, A. Brooks, T.Lipman. Vehicle-to-grid power: battery, hybrid and fuel cell vehicles as resources for distributed electric power in California. Davis, CA. Institute of Transportation Studies, Report #IUCD-ITS-RR 01-03, 2005.
- [Kennedy et Eberhart, 1995] J. Kennedy, R. C. Eberhart. Particle swarm optimization. *Proceedings of the. IEEE International Conference Neural Networks*. Vol. 4, pp. 1942-1948, 1995.
- [Kirkpatrick et al, 1983] S. Kirkpatrick, C. D. Gelatt, M. P. Vecchi. Optimization by simulated annealing. *Journal of Science*. Vol. 220, N° 4598, pp. 671-680, 1983.

- [Koza, 1992] J. R. Koza. Genetic Programming: On the Programming of Computers by Means of Natural Selection (Complex Adaptive Systems). The MIT Press, 1 edition, 1992.
- [Kumar et Singh, 2017] S. Kumar, H. D. Singh. Optimization of Unit Commitment Problem Using Classical Soft Computing Technique (PSO). Int. Research Journal of Engineering and Technology (IRJET), Vol.4, N°11, pp. 814-820, 2017
- [Labeled, 2013] I. Labeled. Dispatching Economique Dans un Système De Puissance Electrique Par L'intelligence Artificielle. Thèse de magistère, Université Constantine1, 2013.
- [Lau et al, 2009] T.W. Lau, C.Y. Chung, K.P. Wong, T.S. Chung, S.L. Ho. Quantum-Inspired Evolutionary Algorithm Approach for Unit Commitment. IEEE Transactions on Power Systems, Vol.24, N°3, pp.1503–1512, 2009.
- [Layeb et al, 2007] A. Layeb, A. Deneche. Multiple Sequence Alignment by Immune Artificial System. In: IEEE/ACS International Conference on Computer Systems and Applications (AICCSA 2007), Jordan, ISBN: 1-4244-1031-2, pp. 336-342., 2007.
- [L'EIA, 2019] L'EIA américaine. Energy Information Administration. 2019 <https://www.connaissancedesenergies.org>
- [Liu et al, 2018a] L.Liu, X.Liu, W.N.ang, P.Zou. Modified Cuckoo Search Algorithm with Variational Parameters and Logistic Map. Algorithms MDPI, Vol. 11, N°30, pp.1-11, doi:10.3390/a11030030.
- [Liu et al, 2018b] S.Liu, X. Guo, M.Zhou, L.Qi. An Improved Binary Cuckoo Search Algorithm for Solving Unit Commitment Problem—Methodological Description. IEEE Access, pp.1-10.
- [Lutton, 2004] E. Lutton. Darwinisme artificiel. INRIA - Rocquencourt - Equipe Complex-Projet Fractales, 2004.
- [Manoj et Kranthi, 2012] K.Manoj, T.Kranthi,. Optimization Of Combined Combined Economic and Emission Dispatch Problem. Journal of Electrical and Electronics Engineering. Vol. 2 N° 6, pp. 37-43, 2012.
- [Mazouz et Manseur, 2013] A. Mazouz et H. Manseur. Etude des dispositifs de protection mis en œuvre dans la centrale tg d'amizour de bejaia. Mémoire de Master, Université Abderrahmane Mira-Bejaia, 2013.
- [Meshoul et al, 2005] S. Meshoul, A. Deneche, M. Batouche. Combining an artificial immune system with a clustering method for effective pattern recognition. International conference on machine intelligence. Tozeur-Tunisia. pp. 782-787, 2005.

- [Michalewicz, 1994] Z. Michalewicz. Genetic algorithms + data structures = evolution programs. (2nd, extended ed.). Springer-Verlag New York, Inc., New York, NY, USA, ISBN 3-540-58090-5, 1994.
- [Muckstadt et Koenig, 1977] J.A. Muckstadt, S.A. Koenig. An application of Lagrangian relaxation to scheduling in power-generation systems. *Operations Research*, Vol.25, N°3, pp.387–403, 1977.
- [Nabonne, 2004] A. Nabonne. Algorithmes évolutionnaires et problèmes inverses. chapitre, 2004.
- [Operateur] Operateur du système électrique Algérien. <http://www.ose.dz>.
- [Pang et al, 1981] C.K. Pang,, G.B. Sheble, F.Albuyeh. Evaluation of dynamic programming based methods and multiple area representation for thermal unit commitment. *IEEE Trans. Power App. Syst, PAS-100*, Vol.3, pp.1212–1218, 1981.
- [Pang et al, 2012] C. Pang, P. Dutta, M. Kezunovic. BEVs/PHEVs as Dispersed Energy Storage for V2B Uses in the Smart Grid. *IEEE Trans. Smart Gri*, Vol. 3, N°1, pp. 473-48, 2012.
- [Park et al, 2014] H.G. Park, J.K.Lyu, Y.C.Kang, J. K.Park. Unit Commitment Considering Interruptible Load for Power System Operation with Wind Power. *Energies*, Vol.7, pp. 4281-4299. doi:10.3390/en7074281.
- [Patra et al, 2009] S. Patra, S.K. Goswami, B. Goswami. Fuzzy and simulated annealing based dynamic programming for the unit commitment problem. *Expert Systems with Applications*, Vol. 36, N°3, pp.5081-5086, 2009.
- [Pavlyukevich, 2007] I. Pavlyukevich. Lévy flights, non-local search and simulated annealing. *J. Computational Physics*. Vol. 226, N° 2, pp. 1830-1844, 2007.
- [Pourjamal et Ravadanegh, 2013] Y.Pourjamal, S.N.Ravadanegh. HSA Based Solution to the UC Proble. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, Vol.46, pp.211-220. doi:10.1016/j.ijepes.2012.10.042.
- [Raihani, 2015] H. Raihani. Adaptation de l’algorithme des colonies d’abeilles pour l’optimisation et le dimensionnement des circuits intégrés analogiques. Université Sidi Mohamed Ben Abdellah, Maroc, 2015.
- [Rechenberg, 1965] I. Rechenberg. Cybernetic solution path of an experimental problem. Technical report, Royal Air Force Establishment, 1965.
- [Rechenberg, 1973] I. Rechenberg. Evolutionsstrategie :optimierung technischer systeme nach prinzipien der biologischen evolution. Frommann-Holzboog, Stuttgart, 1973.

- [Reeves, 1983] WT. Reeves. Particle systems - a technique for modeling a class of fuzzy objects. ACM Trans Graphics. Vol. 2, N° 2, pp. 91-108, 1983.
- [Reynolds, 1987] C.W. Reynolds. Flocks, herds, and schools: a distributed behavioral model. Computer Graphics. (Proc SIGGRAPH '87). Vol. 21, N° 4, pp. 25-34, 1987.
- [Reynolds et Frye, 2007] A. M. Reynolds, M. A. Frye. Free-flight odor tracking in *Drosophila* is consistent with an optimal intermittent scale-free search. PLoS One, 2, e354. 2007.
- [Rodrigues et al, 2013] D. Rodrigues, L.A.M. Pereira, T.N.S. Almeida, J.P. Papa, A.N. Souza, C.C.O. Ramos, X.S. Yang. BCS: A Binary Cuckoo Search algorithm for feature selection. IEEE International Symposium on Circuits and Systems ISCAS, pp. 465-468, 2013
- [Rong et al, 2008] A. Rong, H. Hakonen, R. Lahdelma. A variant of the dynamic programming algorithm for unit commitment of combined heat and power systems. European Journal Operational Research, pp.741–755, 2008.
- [RTE, 2003] Gestionnaire du Réseau de Transport d'Electricité, France (RTE) « Mémoires de la sûreté du système électrique » - <http://www.rte-france.com>, 2003
- [Saber et Venayagamoorthy, 2009] A.Y. Saber, G.k. Venayagamoorthy. Unit Commitment with Vehicle-to-Grid using Particle Swarm Optimization. IEEE Bucharest Power Tech Conference Romania, 2009.
- [Saber et Venayagamoorthy, 2010] A.Y. Saber. G.K. Venayagamoorthy. Intelligent unit commitment with vehicle-to-grid A cost-emission optimization. Journal of Power Sources, pp. 898–911, 2010.
- [Saguan, 2007] M. SAGUAN. L'analyse économique des architectures de marché électrique application au mark et design du temps réel. Thèse de doctorat, université Paris Sud, 2007.
- [Sarjiya et al, 2015] A.B.Sarjiya, A.Sudiarso. Unit Commitment Solution Using Genetic Algorithm Based on Priority List Approach. JATIT. Journal of Theoretical and Applied Information Technology, Vol.72, N°3, pp. 394-403, 2015.
- [Sen et Kothari, 1998] S. Sen, D.P. Kothari. Optimal thermal generating unit commitment: a review. Electrical Power and Energy Systems, Vol.20, pp.443–451, 1998.
- [Sharma et al, 2015] S. Sharma, S. Mehta, T. Verma. Weight Pattern Based Cuckoo Search for Unit Commitment Problem. International Journal of Research in Advent Technology, Vol. 3, N°5, pp.102-110, 2015.
- [Sheble, 1990] G. B. Sheble. Solution of the Unit Commitment Problem by the Method of Unit Periods. IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 5 N° 1, pp. 257-60, 1990.
- [Shlesinger, 2006] M. F. Shlesinger. Search research. Nature. Vol. 443, pp. 281-282, 2006.

- [Shlesinger et al, 1995] M. F. Shlesinger, G. M. Zaslavsky, U. Frisch. (eds) Lévy Flights and Related Topics in Physics. Springer, Berlin, 1995.
- [Simopoulos et al, 2006] D.N. Simopoulos, S.D. Kavatza, C.D. Vournas. Reliability constrained unit commitment using simulated annealing. IEEE Trans. Power Syst, Vol.21, N°4, pp.1699–1706, 2006.
- [Simopoulos et Kavatza, 2005] D. Simopoulos, S. Kavatza. Consideration of ramp-rate constraints in unit commitment using simulated annealing: IEEE Russia, Power Tech, pp.1-7, 2005.
- [Sivaraj et al, 2014] N.Sivaraj , M.Ramya , G.Dineshkumar. Intelligent Unit Commitment with Vehicle to Grid for Cost and Emission Reduction. International Journal of Research in Advent Technology. E-ISSN: 2321-963. Vol.2, N°12, December 2014.
- [Snyder et al, 1987] W.L. Snyder, H.D.Powell, J.C. Rayburn. Dynamic programming approach to unit commitment. IEEE Trans. Power Syst, Vol.2, N°2, PP. 339–347, 1987.
- [Steiner, 2001] F. Steiner. L'industrie de L'électricité : Réglementation, Structure du Marché et Performances. Revue économique de l'OCDE. N°32, pp. 159-201, 2001.
- [Sun et al, 2006] L. Sun, Y. Zhang, C. Jiang. A matrix real-coded genetic algorithm to the unit commitment problem. Electric Power Systems Research, Vol.7, N°6, pp.,16–728, 2006.
- [Svetlana et al, 2018] A. Svetlana, S. Jussi, P. Olli. Cuckoo search for wind farm optimization with auxiliary Infrastructure. Wiley, pp. 1-21, 2018.
- [Svoboda et al, 1996] A. J. Svoboda, C. Tseng, C. Li, R. B. Johnson. Short-Term Resource Scheduling with Ramp Constraints. submitted to the IEEE PES 1996 Winter meeting.
- [Swarup et Yamashiro, 2002] K.S. Swarup, S.Yamashiro. Unit commitment solution methodology using genetic algorithm. IEEE Trans. Power Syst, Vol. 17, N°1, pp. 87–91, 2002.
- [Taranjit et Harvinder, 2014] S. Taranjit, S.J. Harvinder. Design of Low Pass Digital FIR Filter Using Cuckoo Search Algorithm. journal of Engineering Research and Applications, Vol.4, pp.72-77, 2014.
- [Tebani, 2020] H. Tebani. Production de l'Energie Electrique. Polycopié de Cours, Université Hassiba Benbouali Chlef, 2020
- [Terki et al, 2016] A.Terki, H. Boubertakh, N. Mansouri. Synchronization of chaotic systems using genetic and particle swarms algorithms:A comparative study, the 8th international Conference on Modelling, Identification and Control, November 2016, Algiers,Algeria.

- [Terki et Boubertakh, 2018] A.Terki, H. Boubertakh. A New Approach for Solving the Unit Commitment Problem by Hybrid PSO-ACO. the 6th international Conference on Control Engineering & Information Technology CEIT'18, October 2018, Istanbul, Turkey.
- [Terki et Boubertakh, 2019a] A.Terki, H. Boubertakh. Application of a Binary-Real Coded Cuckoo Search Algorithm for Solving Unit Commitment Problem. International Conference on Advanced Electrical Engineering ICAEE'19, November 2019, Algiers. Algeria
- [Terki et Boubertakh, 2019b] A.Terki, H. Boubertakh. Cuckoo Search Algorithm for Solving Unit-Commitment with Vehicle-to-Grid". The 4th International Conference on Electrical Engineering and Control Applications. ICEECA'19, December 2019. Constantine. Algeria.
- [Terki et Boubertakh, 2021] A.Terki, H. Boubertakh. A New Hybrid Binary-Real Coded Cuckoo Search and Tabu Search Algorithm for Solving the Unit-Commitment Problem. International Journal of Energy Optimization and Engineering (IJEOE). Vol. 10, N° 2, 2021.
- [Valenzuela et Smith, 2002] J. Valenzuela, A.E. Smith. A seeded memetic algorithm for large unit commitment problems. Journal of Heuristics, Vol. 8, N°2, pp.173-195, 2002.
- [Vallé et Yıldızoğlu, 2001] T.Vallé et M.Yıldızoğlu. Présentation des algorithmes génétiques et de leurs applications en économie. Université de Nantes et Université Montesquieu Bordeaux IV. 2001.
- [Vasant et al, 2019] P.Vasant, J.A. Marmolejo, I. Litvinchev, R.R. Aguilar. Nature-inspired meta-heuristics approaches for charging plug-in hybrid electric vehicle. Wireless Netw, 2019. <https://doi.org/10.1007/s11276-019-01993-w>.
- [Vasant et al, 2020] P.Vasant, I. Zelinka, G.Weber. Intelligent Computing & Optimization. Proceedings of the 2nd International Conference on Intelligent Computing and Optimization 2019 (ICO 2019). Advances in Intelligent Systems and Computing,1072, Springer. 2020. doi:10.1007/978-3-030-33585-4.
- [Venkatesh et al, 2003] P. Venkatesh, R. Gnanadass, N.P. Padhy. Comparison and Application of Evolutionary Programming Techniques to Combined Economic Emission Dispatch with Line Flow Constraints. IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 18, N°2, pp. 688-697, 2003.
- [Viswanathana et al, 2000] G.M. Viswanathana, V. Afanasyev, S. V. Buldyrev, S. Havlin, M.G.E. da Luz, E.P. Raposo, H. Eugene Stanley. Lévy flights in random searches. PhysicaA. Vol. 282, N° 1-2, pp. 1-12, 2000.
- [Viswanathana et al, 2002] G. M. Viswanathan, F. Bartumeus, S. V. Buldyrev, J. Catalan, U. L. Fulco, S. Havlin, M.G.E. da Luz, M. L. Lyra, E.P. Raposo, H. E. Stanley. Lévy flight random searches in biological phenomena. Physica A. Vol. 314, pp. 208-213, 2002.

- [Wang et Shahidehpour, 1993] C.Wang, S.M. Shahidehpour. Effects of ramp-rate limits on unit commitment and economic dispatch. *IEEE Transactions on Power Systems*, Vol. 8, N°3, pp.1341-1350, Aug 1993.
- [White et Zhang, 2011] C. D. White, K. M. Zhang. Using Vehicle-To-Grid Technology for Frequency Regulation and Peak-Load Reduction. *Journal of Power Sources*, Vol.196, N°8, pp. 3972-3980, April 2011.
- [Wood, 1984] A. J. Wood, B. F. Wollenberg. *Power Generation, Operation, and Control*. New York: Wiley, 1984.
- [Wu et al, 2012] D.Wu , K.T. Chau , C. Liu, G.Shuang. Genetic Algorithm Based Cost-emission Optimization of Unit Commitment Integrating with Gridable Vehicles. *journal of Asian Electric Vehicles*, Vol.10, N°1, 2012.
- [Xing et Wu, 2002]. W.Xing, F.F. Wu. Genetic Algorithm Based Unit Commitment with Energy Contracts. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, Vol.24, pp. 329-336, 2002.
- [Yang et al, 2004] J-j. Yang, J-z. Zhou, .J. YU. A Hybrid Intelligent Genetic Algorithm For Large- Scale Unit Commitment. *Power System Technology*, Vol. 28, N° 19, pp. 47-50, 2004.
- [Yang et Deb, 2009] X-S. Yang, S. Deb. Cuckoo search via Lévy flights. *World Congress on Nature & Biologically Inspired Computing (NaBIC 2009)*. pp. 210-214, 2009.
- [Yang et Deb, 2010] X-S. Yang, S. Deb. Engineering optimisation by cuckoo search. *Int. J. Mathematical Modelling and Numerical Optimisation*.Vol. 1, N° 4, pp. 330-343, 2010.
- [Youb, 2020] L. Youb. *Production de l'énergie électrique*. Faculté de Technologie, LMD\_ST. Université–Batna-2, 2020.
- [Yuan et al, 2009] X. Yuan, A. Su, H. Nie. Application of Enhanced Discrete Differential Evolution Approach to Unit Commitment Problem. *Energy Conversion & Management*, Vol. 50, pp. 2449-245, 2009.
- [Yuan et al, 2011] X. Yuan, A. Su, H. Nie. Unit commitment problem using enhanced particle swarm optimization algorithm', *Soft Comput*, Vol.15, pp.139–148, 2011.
- [Yuan et al, 2014] X.Yuan, B. Ji, S.Zhang, H.Tian, Y.Hou. Anew approach for unit commitment problem via binary gravitational search algorithm. *Applied Soft Computing*, pp.249-260. doi:10.1016/j.asoc.2014.05.029.
- [Zand et al, 2016] A. Zand, M. Bigdeli,D. Azizian. A Modified Ant Colony Algorithm For Solving The Unit Commitment Problem. *Advanced Energy: An International Journal*, Vol.3, pp. 15-27. doi:10.5121/aeij.2016.3302.

- [Zhang et al, 2008] X. Zhang, K.T. Chau, C.C. Chan. Overview of thermoelectric generation for hybrid vehicles, *Journal of Asian Electric Vehicles*, Vol. 6, N° 2, pp.1119-1124, 2008.
- [Zhao et al, 2006] B. Zhao, C.X. Guo, B.R. Bai, Y.J. Cao. An improved particle swarm optimization algorithm for unit commitment. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, Vol. 28, N°7, pp.482–490, 2006.
- [Zhao et al. 2018] B. Zhao, H. F. Qiu, R.W, Qin, X. S, Zhang, W. Gu, C. S. Wang. Robust Optimal Dispatch of AC/DC Hybrid Microgrids Considering Generation and Load Uncertainties and Energy Storage Loss. *IEEE Transactions on Power Systems*, Vol. 33, N°6, pp. 5945-57, 2018.
- [Zhao et Wang, 2017] J.S. Liu, Y. Wang. Cuckoo search algorithm with interactive learning for economic dispatch', 2017 36th Chinese Control Conference (CCC), pp. 2904-2909, 2017.
- [Zhu, 2009] J. Zhu. Optimization of Power System Operation. John Wiley and Sons, New Jersey, 2009.
- [Zouglami et Daghboudj, 2011] A. Zouglami, S. Daghboudj. Etude numérique du vrillage des aubes d'une turbine à vapeur axiale. Mémoire Master, Université Larbi Tébessi, 2011.