



UNIVERSITE KASDI MERBAH OUARGLA

**Faculté des Hydrocarbures énergies renouvelables et sciences
de la terre et de l'univers**



Département Forage et Mécanique des chantiers pétroliers

Mémoire de fin d'études

Pour l'obtention de diplôme de MASTER

Option : mécanique des chantiers pétroliers

Présenté par :

HEDDANE Ammar

NANI Abdelmoumen

**Optimisation de la planification de la maintenance
préventive d'un parc de compresseurs .**

Jury :

Mr : ziari

président

الإهداء / Dedicace

بسم الله الرحمن الرحيم

إلى كل طالب علم آمن بأن المعرفة ليست غايةً شخصية فحسب،
...بل رسالةً للنهوض بالأمم وبناء المستقبل

إلى كل المهتمين بعالم الصيانة الصناعية،
وإلى كل الساعين لربط الهندسة الحديثة بتقنيات الذكاء الاصطناعي،
أهدي هذا العمل المتواضع، راجياً من الله تعالى أن يكون لبننةً نافعةً في سبيل تطوير البحث العلمي
والتقني.

كما أهديه إلى شباب الجزائر،
وإلى أبناء العالم الإسلامي كافة،
إيماناً بأن النهضة الحقيقية تبدأ بالعلم، والعمل، والإبداع،
وأن مستقبل أمتنا لا يُبنى إلا بالعقول الطموحة والإرادة الصادقة

أسأل الله عز وجل أن يجعل هذا العمل خالصاً لوجهه الكريم،
وأن ينفع به كل باحث وطالب علم،
وأن يكتب لنا جميعاً التوفيق والسداد في خدمة أوطاننا وأمتنا

Au nom d'Allah, le Tout Miséricordieux, le Très Miséricordieux.

Je dédie ce modeste travail à tous les étudiants et chercheurs passionnés par le domaine de la maintenance industrielle et des technologies d'intelligence artificielle.

À ceux qui considèrent la science non seulement comme un moyen de réussite personnelle, mais également comme un outil de développement, de progrès et de renaissance pour nos sociétés.

J'adresse également cette dédicace à la jeunesse algérienne ainsi qu'à l'ensemble des jeunes du monde musulman, avec l'espoir sincère que la connaissance, l'innovation et la maîtrise technologique puissent contribuer à bâtir un avenir meilleur pour nos nations.

Puisse Allah accorder à ce travail une utilité bénéfique, et permettre qu'il constitue, même modestement, une contribution positive au domaine scientifique et industriel.

Qu'Allah nous guide tous vers le savoir utile, le travail sincère et la réussite au service de nos peuples et de notre communauté.

شكر وعرفان Remerciements

الحمد لله الذي بنعمته تتم الصالحات، والذي وفقنا وأعاننا على إتمام هذا العمل، فله سبحانه وتعالى الحمد أولاً وآخرًا على ما أنعم به من توفيق وتيسير وصبر.

نتقدم بخالص الشكر إلى الأستاذ المشرف زيارى، على إشرافه العلمي كما نتوجه بالشكر والتقدير إلى جامعة قاصدي مرباح وإلى طاقم كلية المحروقات والطاقات المتجددة، على ما وفرته من تكوين علمي وإطار أكاديمي ساعدنا على إتمام هذا المسار الجامعي وفي هذا المقام نشكر المهندسين الذين ساعدوا بتوفير المعلومات اللازمة من أجل نجاح البحث وهما :

● خويلد الراشدي

● عمر بلحاج

على حسن الاستقبال، وتقديم التوجيهات والمعلومات التقنية التي ساعدت في إنجاز هذه الدراسة.

كما نتقدم بالشكر إلى جميع أفراد فريق الصيانة الذين ساهموا، بشكل مباشر أو غير مباشر، في توفير المعطيات والملاحظات المتعلقة بجانب الدراسة التطبيقية.

ولا يفوتنا أن نتوجه بعميق الامتنان إلى والدينا الكريمين، عرفانًا بما قدماه من دعم ودعاء وتشجيع طوال مسيرتنا الدراسية.

كما نشكر أصدقائنا وزملائنا، وكل من ساهم من قريب أو بعيد في مساعدتنا ودعمنا لإتمام هذا العمل.

نسأل الله تعالى أن يجعل هذا العمل نافعًا ومفيدًا، وأن يوفقنا جميعًا لما فيه الخير .
والصالح للبلاد والعباد .

Avant toute chose, nous remercions Allah le Tout-Puissant pour nous avoir accordé la force, la patience et la persévérance nécessaires afin de mener ce travail à son terme.

Nous adressons nos sincères remerciements à notre encadreur, Monsieur Ziari, pour son suivi, ses orientations et ses conseils qui ont contribué à la réalisation de ce mémoire dans de bonnes conditions académiques.

Nous exprimons également notre profonde gratitude à Université Kasdi Merbah Ouargla, ainsi qu'à la Faculté des Hydrocarbures et des Énergies Renouvelables, pour la qualité de la formation et de l'encadrement pédagogique reçus tout au long de notre parcours universitaire.

Nos remerciements s'adressent aussi à Sonatrach pour l'opportunité offerte dans le cadre de cette étude appliquée, et plus particulièrement aux ingénieurs :

- Khouiled Rachdi**
- Omar Belhadj**

pour leur disponibilité, leurs conseils techniques et les informations précieuses fournies durant la réalisation de cette étude.

Nous remercions également l'ensemble de l'équipe de maintenance pour leur collaboration et leur aide tout au long de la phase pratique du travail.

Nous adressons enfin notre profonde reconnaissance à nos parents, à nos amis, à nos collègues, ainsi qu'à toutes les personnes ayant contribué, de près ou de loin, à l'aboutissement de ce mémoire.

Qu'Allah accorde à chacun réussite, santé et prospérité, et fasse de ce travail une contribution utile au domaine scientifique et industriel.

الملخص:

تتناول هذه الدراسة تحسين الصيانة الوقائية لمجموعة من الضواغط الطردية في شركة سوناطراك، في موقع CIS HMD، ضمن قطاع الغاز الطبيعي والصناعة الميكانيكية. وتركز الدراسة بشكل أساسي على المشكلات المرتبطة بالتوزيع غير السليم لفرق الصيانة، فضلاً عن التأخيرات التي تحدث في تنفيذ العمليات المجدولة.

الهدف الرئيسي من هذا البحث هو تحسين تخطيط عمليات الصيانة لضمان استغلال أفضل للموارد البشرية والمادية مع مراعاة القيود التشغيلية. لتحقيق هذا الهدف، تم اعتماد خوارزمية جينية كطريقة للتحسين. أخذت نمذجة المشكلة في الاعتبار عدة قيود، لا سيما تحديد عدد موظفي الصيانة بثمانية عمال، وعدم تداخل المهام، والالتزام بمواعيد الصيانة، فضلاً عن توفر المعدات.

أُجريت الدراسة، التي هي من النوع شبه الواقعي، باستخدام أدوات Python و Excel ومخططات جانت لتصوير وتنظيم التدخلات. تُظهر النتائج التي تم الحصول عليها تحسناً ملحوظاً في جدولة عمليات الصيانة، مما يسمح باستخدام أفضل للموارد البشرية دون إثقال كاهل الفرق ودون تأخير عمليات الصيانة.

الكلمات المفتاحية: الصيانة الوقائية، الخوارزمية الجينية، التحسين، الضواغط الطردية، التخطيط، مخططات غانت.

Résumé

Le présent travail porte sur l'optimisation de la maintenance préventive d'un parc de compresseurs centrifuges au sein de Sonatrach, au niveau du site CIS HMD, dans le secteur du gaz naturel et de l'industrie mécanique. L'étude s'intéresse principalement aux problèmes liés à la mauvaise répartition des équipes de maintenance ainsi qu'aux retards enregistrés dans l'exécution des opérations programmées.

L'objectif principal de cette recherche est d'optimiser la planification des interventions de maintenance afin d'assurer une meilleure exploitation des ressources humaines et matérielles tout en respectant les contraintes opérationnelles. Pour atteindre cet objectif, un algorithme génétique a été adopté comme méthode d'optimisation. La modélisation du problème a pris en considération plusieurs contraintes, notamment la limitation du nombre d'agents de maintenance à huit travailleurs, l'absence de chevauchement des tâches, le respect des délais de maintenance ainsi que la disponibilité des équipements.

L'étude, de type semi-réelle, a été réalisée à l'aide des outils Python, Excel et des diagrammes de Gantt pour la visualisation et l'organisation des interventions. Les résultats obtenus montrent une amélioration significative de l'ordonnancement des opérations de maintenance, permettant une meilleure utilisation des ressources humaines sans surcharge des équipes et sans retard des opérations de maintenance.

Mots-clés : Maintenance préventive, algorithme génétique, optimisation, compresseurs centrifuges, planification, diagramme de Gantt.

Abstract

This study focuses on optimising the preventive maintenance of a fleet of centrifugal compressors at Sonatrach's CIS HMD site, within the natural gas and mechanical engineering sector. The study primarily addresses issues relating to the inefficient allocation of maintenance teams and delays in the execution of scheduled operations.

The main objective of this research is to optimise the planning of maintenance interventions in order to ensure better utilisation of human and material resources whilst respecting operational constraints. To achieve this objective, a genetic algorithm was adopted as the optimisation method. The modelling of the problem took several constraints into account, notably the limitation of the number of maintenance staff to eight workers, the absence of task overlap, adherence to maintenance deadlines, and the availability of equipment.

The semi-real-world study was carried out using Python, Excel and Gantt charts for the visualisation and organisation of maintenance operations. The results obtained show a significant improvement in the scheduling of maintenance operations, enabling better utilisation of human resources without overburdening teams or delaying maintenance operations.

Keywords: Preventive maintenance, genetic algorithm, optimisation, centrifugal compressors, planning, Gantt chart.

شكر وعرفان	Remerciements	3
الملخص:		5
Résumé		6
Abstract		7
Introduction générale		12
Problématique de la recherche		13
Objectifs de l'étude		13
Méthodologie de travail		14
Structure du mémoire		14
Études antérieures		14
Chapitre 1 : Étude et maintenance des compresseurs		16
1.1 Introduction		17
1.2 Généralités sur les compresseurs		17
1.2.1 Définition d'un compresseur		17
1.2.2 Domaines d'utilisation		18
1.2.3 Classification des compresseurs		18
a) Selon le principe de fonctionnement		18
b) Selon le niveau de pression		19
1.3 Principe de fonctionnement des compresseurs		20
1.3.1 Cycle de compression		20
1.3.2 Paramètres de fonctionnement		21
1.3.3 Performance et efficacité		21
1.4 Composants principaux d'un compresseur		22
1.5 Défaillances des compresseurs		22
1.5.1 Types de pannes		22
1.5.2 Causes des défaillances		23
1.5.3 Conséquences		23
1.6 Maintenance des compresseurs		24
1.6.1 Définition de la maintenance		24
1.6.2 Types de maintenance		24
a) Maintenance préventive		24
b) Maintenance prédictive		24
1.6.3 Types et niveaux des interventions de maintenance des compresseurs		26
1.6.4 Différence entre maintenance préventive et corrective		27
1.7 Planification de la maintenance préventive		29
1.7.1 Objectifs		29
1.7.2 Méthodes de planification		29
1.7.3 Contraintes		30
1.8 Indicateurs de performance de la maintenance		30
1.9 Limites des méthodes classiques de planification		31
1.10 Conclusion		32
Références		33
Chapitre 2: Algorithme génétique pour optimiser la planification maintenance préventive		34

2.1 Introduction	35
2.1.1 Problématique de la planification de la maintenance préventive	35
2.1.2 Limites des méthodes classiques d'optimisation	35
2.1.3 Intérêt des métaheuristiques	35
2.1.4 Choix de l'algorithme génétique	35
2.2 Généralités sur les algorithmes génétiques	36
2.2.1 Définition d'un algorithme génétique	36
2.2.2 Historique et inspiration biologique	36
2.2.3 Principe de fonctionnement général	37
2.2.4 Domaine d'application des algorithmes génétiques	37
2.2.5 Avantages et inconvénients	37
2.3 Concepts de base des algorithmes génétiques	38
2.3.1 Individu	38
2.3.2 Population	38
2.3.3 Chromosome	38
2.3.4 Gène	38
2.3.5 Fonction fitness	39
2.3.6 Générations	39
2.3.7 Critère d'arrêt	39
2.4.1 Sélection	40
Méthode Roulette Wheel (sélection proportionnelle)	40
Tournament Selection	40
Rank Selection	40
2.4.2 Croisement (Crossover)	40
Croisement à un point	40
Croisement à deux points	41
Croisement uniforme	41
2.4.3 Mutation	42
Mutation binaire	42
Mutation par permutation	42
Mutation aléatoire	43
2.5 Paramètres de l'algorithme génétique	43
2.5.1 Taille de la population	43
2.5.2 Probabilité de croisement	44
2.5.3 Probabilité de mutation	44
2.5.4 Nombre de générations	44
2.5.5 Critère de convergence	44
2.6 Modélisation du problème d'optimisation	45
2.6.1 Description du système de maintenance	45
2.6.2 Hypothèses de travail	45
2.6.3 Variables de décision	46
2.6.4 Contraintes du problème	46
Contraintes de disponibilité	46
Contraintes de ressources de maintenance	46

Contraintes de temps d'arrêt	46
2.6.5 Fonction objectif	46
Minimisation du coût	46
Maximisation de la disponibilité	47
Minimisation du downtime	47
2.7 Codage du problème pour l'algorithme génétique	47
2.7.1 Représentation du chromosome	47
2.7.2 Codage des opérations de maintenance	48
2.7.3 Génération de la population initiale	48
2.7.4 Évaluation de la fonction fitness	48
2.8 Étapes de l'algorithme génétique proposé	49
2.8.1 Initialisation	49
2.8.2 Évaluation	49
2.8.3 Sélection	49
2.8.4 Croisement	50
2.8.5 Mutation	50
2.8.6 Remplacement	50
2.8.7 Condition d'arrêt	50
2.9 Organigramme de l'algorithme génétique	51
Flowchart de l'algorithme génétique	51
Remarque	52
2.10 Conclusion	53
Références bibliographiques	54
Chapitre 3 : Étude de cas – Optimisation de la planification de la maintenance des stations de compression de gaz	55
3.1 Introduction	56
3.2 Description du système étudié	57
3.2.1 Architecture globale	57
3.2.2 Fonctionnement du processus de compression	58
3.2.3 Conditions de fonctionnement	59
3.3 Données de maintenance	60
3.3.1 Table des paramètres	60
3.3.2 Interprétation des paramètres	60
3.3.3 Planning actuel	61
3.3.4 Problèmes observés	61
3.4 Formulation mathématique du problème	62
3.4.1 Présentation du problème	62
3.4.2 Définition des données et paramètres	62
3.4.3 Génération des interventions périodiques	63
3.4.4 Définition de la charge humaine	63
3.5 Contraintes & Fonctions	63
3.5.1 Contrainte de ressources humaines	63
3.5.2 Contrainte de périodicité	64
3.5.3 Pénalisation des dépassements	64

3.5.4 Fonction objectif	64
3.5.5 Fonction de fitness	64
3.5.6 Variables de décision	65
3.5.7 Représentation du chromosom	65
3.6 Application de l'algorithme génétique	65
3.6.1 Codage de la solution	65
3.6.2 Paramètres de l'algorithme	65
3.6.3 Opérateurs génétiques utilisés	66
3.6.4 Processus d'exécution	66
3.7 Résultats et analyse	67
3.7.1 Convergence	67
3.9 Interprétation des résultats	70
3.10 Conclusion	70

List Of Images

- [Figure 1. Classification des compresseurs](#)
- [Figure 2. Plages de fonctionnement des différents types de compresseurs](#)
- [Figure 3. Principe de fonctionnement de compresseur](#)
- [Figure 4. La relation de coût entre maintenance préventive et corrective](#)
- [Figure 5. Croisement à un Seul point](#)
- [Figure 6. Croisement à deux points](#)
- [Figure 7. Mutation](#)
- [Figure 8. Mutation par permutation](#)
- [Figure 10. Le parc étudiée : une image tirée de Google Maps](#)
- [Figure 11. Le turbocompresseur : photo prise depuis la salle de contrôle](#)
- [Figure 12. La courbe de Convergence](#)
- [Figure 13. La stabilisation de Fonction de fitness](#)
- [Figure 14. le tableau Gantt Chart](#)

List Of Tables

- [Table 1. Les cinq niveaux de la maintenance \(Nome AFNOR X 60 011\)](#)
- [Table 2. Les donnes pour chaque équipement i](#)
- [Table 3. Les paramètres pour chaque équipement i](#)
- [Table 4. tableau d'intervention](#)
- [Table 5. Comparaison avant et après l'utilisation de l'AG](#)

Introduction générale

Introduction

La maintenance industrielle occupe aujourd'hui une place stratégique dans les systèmes de production modernes. Elle ne se limite plus uniquement à la réparation des équipements en panne, mais constitue un facteur essentiel pour garantir la continuité de la production, améliorer la fiabilité des installations et réduire les coûts liés aux arrêts imprévus. Dans un contexte industriel marqué par une forte concurrence et des exigences élevées en matière de performance, les entreprises cherchent constamment à optimiser leurs opérations de maintenance afin d'assurer une meilleure disponibilité des équipements [1], [2].

Dans les stations de compression de gaz naturel, les compresseurs centrifuges représentent des équipements critiques et indispensables au bon fonctionnement du processus industriel. Ces machines assurent le transport et la compression du gaz naturel dans des conditions de sécurité et de performance élevées. Par conséquent, toute défaillance ou interruption de leur fonctionnement peut entraîner des pertes économiques importantes, des perturbations de la production ainsi qu'une diminution de la qualité du service industriel [3].

Cependant, les méthodes classiques de planification de la maintenance présentent plusieurs limites, notamment en ce qui concerne la gestion des ressources humaines, l'organisation des tâches, la coordination des interventions et le respect des délais de maintenance. Ces difficultés deviennent encore plus importantes dans les environnements industriels complexes où plusieurs opérations doivent être réalisées simultanément avec des contraintes techniques et organisationnelles variées [4].

Avec l'évolution de l'Industrie 4.0 et le développement des technologies numériques, l'intelligence artificielle apparaît aujourd'hui comme une solution innovante permettant d'améliorer les performances des systèmes industriels. Grâce à ses capacités d'analyse et d'optimisation, elle offre des outils efficaces pour résoudre les problèmes complexes liés à la planification et à la gestion des opérations de maintenance [5].

Parmi les techniques d'intelligence artificielle les plus utilisées dans les problèmes d'optimisation, les algorithmes génétiques occupent une place importante. Inspirés des mécanismes de l'évolution naturelle, ces algorithmes permettent de rechercher des solutions optimales dans des environnements complexes comportant plusieurs contraintes. Ils sont particulièrement adaptés aux problèmes de planification et de gestion des ressources dans le domaine industriel [6].

Dans ce contexte, ce travail vise à optimiser la planification de la maintenance préventive des compresseurs centrifuges d'une station de compression de gaz naturel

à l'aide des algorithmes génétiques. L'objectif principal est d'améliorer l'organisation des opérations de maintenance, d'optimiser l'utilisation des ressources disponibles et d'augmenter la disponibilité des équipements afin de contribuer à une meilleure performance industrielle.

Problématique de la recherche

La planification de la maintenance préventive dans les stations de compression de gaz naturel constitue un défi important en raison de la complexité des opérations de maintenance, de la multiplicité des contraintes techniques et organisationnelles ainsi que de la limitation des ressources humaines disponibles. Les méthodes traditionnelles de planification présentent souvent plusieurs insuffisances telles que le chevauchement des tâches, le retard des interventions, la mauvaise répartition des équipes de maintenance et la faible exploitation des données industrielles.

Dans ce contexte, la problématique principale de cette étude consiste à déterminer comment optimiser la planification de la maintenance préventive d'un parc de compresseurs centrifuges afin d'améliorer l'organisation des interventions, réduire les conflits de planification et assurer une meilleure disponibilité des équipements industriels à l'aide des techniques d'intelligence artificielle, notamment les algorithmes génétiques.

Objectifs de l'étude

Cette étude a pour objectif principal d'optimiser la planification de la maintenance préventive d'un parc de compresseurs centrifuges dans une station de compression de gaz naturel en utilisant une approche basée sur les algorithmes génétiques.

Les objectifs spécifiques de ce travail sont les suivants :

- Étudier les contraintes liées à la planification des opérations de maintenance.
- Réduire les retards et les conflits entre les différentes tâches de maintenance.
- Améliorer l'utilisation des ressources humaines et techniques disponibles.
- Mettre en évidence l'apport de l'intelligence artificielle dans le domaine de la maintenance industrielle dans le cadre de l'Industrie 4.0.

Méthodologie de travail

Afin d'atteindre les objectifs fixés, cette étude repose sur une démarche méthodologique structurée comprenant plusieurs étapes principales :

- Analyse du fonctionnement d'un parc de compresseurs centrifuges dans une station de compression de gaz naturel.
- Collecte et analyse des données relatives aux opérations de maintenance et aux contraintes d'exploitation.
- Modélisation du problème de planification sous forme d'un problème d'optimisation.
- Développement d'une approche basée sur les algorithmes génétiques afin de générer un planning optimisé.
- Analyse et interprétation des résultats obtenus à travers une comparaison entre le planning existant et le planning optimisé.

Structure du mémoire

Le présent mémoire est organisé en trois chapitres principaux :

- Le premier chapitre présente les notions générales sur la maintenance industrielle, les différents types de maintenance ainsi que l'importance de la maintenance préventive dans les systèmes industriels.
- Le deuxième chapitre est consacré aux concepts de l'intelligence artificielle, aux méthodes d'optimisation et aux algorithmes génétiques utilisés dans les problèmes de planification industrielle.
- Le troisième chapitre porte sur l'étude de cas relative à l'optimisation de la planification de la maintenance préventive d'un parc de compresseurs centrifuges à l'aide des algorithmes génétiques, ainsi que l'analyse des résultats obtenus.

Études antérieures

- Plusieurs travaux de recherche se sont intéressés à l'optimisation de la maintenance préventive à l'aide des algorithmes génétiques. Dans ce contexte, HADIBI Abdelhak (2016), dans un mémoire de master intitulé *« Optimisation de la maintenance préventive par algorithme génétique »* réalisé à l'Université Mohamed Cherif Messaadia de Souk-Ahras, a proposé une approche basée sur les algorithmes génétiques afin de réduire les coûts de maintenance préventive.

- De même, KETTACHE Hamza (2013/2014), dans son mémoire de master intitulé *« Optimisation des coûts de la maintenance préventive par algorithme génétique »* soutenu à l'Université Badji Mokhtar Annaba, a étudié l'optimisation des coûts de maintenance tout en prenant en considération les contraintes de disponibilité des équipements. Les résultats obtenus ont montré l'efficacité des algorithmes génétiques dans la réduction des coûts de maintenance.
- Par ailleurs, Ayadi Ines, Bouillaut Laurent, Aknin Patrice et Siarry Patrick (2010), dans leur article scientifique intitulé *« Optimisation par algorithme génétique de la maintenance préventive dans un contexte de modélisation par modèles graphiques probabilistes »*, publié sur la plateforme scientifique [HAL Science](https://hal.science), ont proposé une approche basée sur les réseaux bayésiens dynamiques et les algorithmes génétiques afin d'évaluer et d'optimiser les politiques de maintenance préventive.

Références utilisées

- [1] Mobley, R. K. (2002). An Introduction to Predictive Maintenance. Butterworth-Heinemann.
- [2] Jardine, A. K. S., Lin, D., & Banjevic, D. (2006). "A review on machinery diagnostics and prognostics implementing condition-based maintenance." Mechanical Systems and Signal Processing, 20(7), 1483–1510.
- [3] Boyce, M. P. (2011). Gas Turbine Engineering Handbook. Elsevier.
- [4] Wang, L. (2002). Maintenance Scheduling in Manufacturing Systems. Springer.
- [5] Jardine, A. K. S., Lin, D., & Banjevic, D. (2006). "A review on machinery diagnostics and prognostics implementing condition-based maintenance." Mechanical Systems and Signal Processing, 20(7), 1483–1510.
- [6] Goldberg, D. E. (1989). Genetic Algorithms in Search, Optimization, and Machine Learning. Addison-Wesley.

Chapitre 1 : Étude et maintenance des compresseurs

1.1 Introduction

Les compresseurs occupent une place essentielle dans les systèmes industriels, notamment dans les secteurs pétrolier et gazier. Leur fonction principale consiste à augmenter la pression des gaz afin de permettre leur transport, leur stockage ou leur utilisation dans différents procédés industriels.

En raison de leur importance dans la continuité des processus, toute défaillance d'un compresseur peut entraîner des arrêts de production, des pertes économiques et des risques pour la sécurité. La maintenance constitue ainsi un élément essentiel pour assurer la fiabilité, la disponibilité et la performance de ces équipements.

Dans ce contexte, ce chapitre présente les principales notions relatives aux compresseurs, leur principe de fonctionnement, leurs composants et leurs modes de défaillance, ainsi que les différentes stratégies de maintenance. Une attention particulière est accordée à la maintenance préventive et à sa planification, qui constituent la base de l'optimisation étudiée dans les chapitres suivants.

1.2 Généralités sur les compresseurs

1.2.1 Définition d'un compresseur : Un compresseur est une machine mécanique destinée à augmenter la pression d'un gaz en réduisant son volume ou en augmentant son énergie cinétique, ensuite convertie en énergie de pression. Il aspire le gaz à basse pression et le refoule à une pression plus élevée afin de permettre son transport, son stockage ou son utilisation dans différents procédés industriels.

1.2.2 Domaines d'utilisation : Les compresseurs sont utilisés dans de nombreux secteurs industriels. Ils sont notamment employés pour fournir de l'air comprimé dans l'industrie générale, pour le transport, le traitement et l'injection du gaz dans l'industrie pétrolière et gazière, ainsi que dans les systèmes de réfrigération et de climatisation.

1.2.3 Classification des compresseurs : Les compresseurs sont principalement classés selon leur principe de fonctionnement en deux grandes catégories :

- **Compresseurs volumétriques :** ils compriment le gaz en emprisonnant un volume déterminé puis en réduisant progressivement son espace. Ils comprennent notamment les compresseurs à piston et à vis.
- **Compresseurs dynamiques :** ils augmentent la pression du gaz en lui communiquant une énergie cinétique à l'aide d'un élément tournant, puis en convertissant cette énergie en pression. Ils comprennent principalement les compresseurs centrifuges et axiaux.

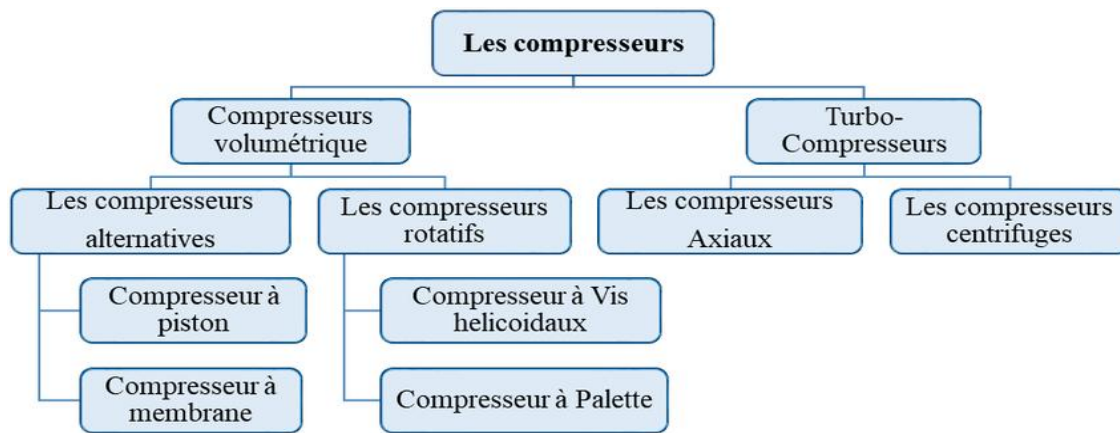


Figure 1. Classification des compresseurs

Ils peuvent également être distingués selon leur niveau de pression : basse, moyenne et haute pression, en fonction des exigences de l'application industrielle.

Compressor Selection

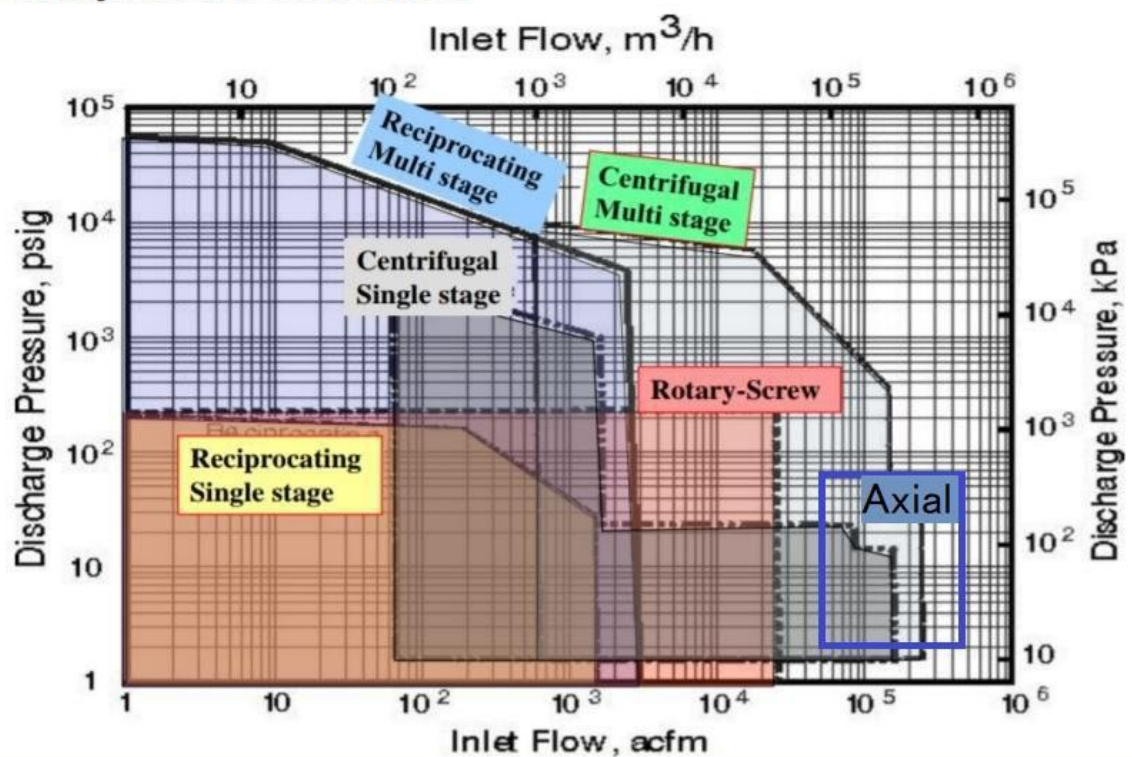


Figure 2. Plages de fonctionnement des différents types de compresseurs
(Compressor Selection Chart)

1.3 Principe de fonctionnement des compresseurs

1.3.1 Cycle de compression

Le fonctionnement d'un compresseur repose principalement sur trois étapes :

- **Aspiration** : le gaz entre dans le compresseur à basse pression.
- **Compression** : le gaz est comprimé, ce qui entraîne une augmentation de sa pression et généralement de sa température.
- **Refoulement** : le gaz comprimé est évacué vers le circuit d'utilisation à une pression plus élevée.

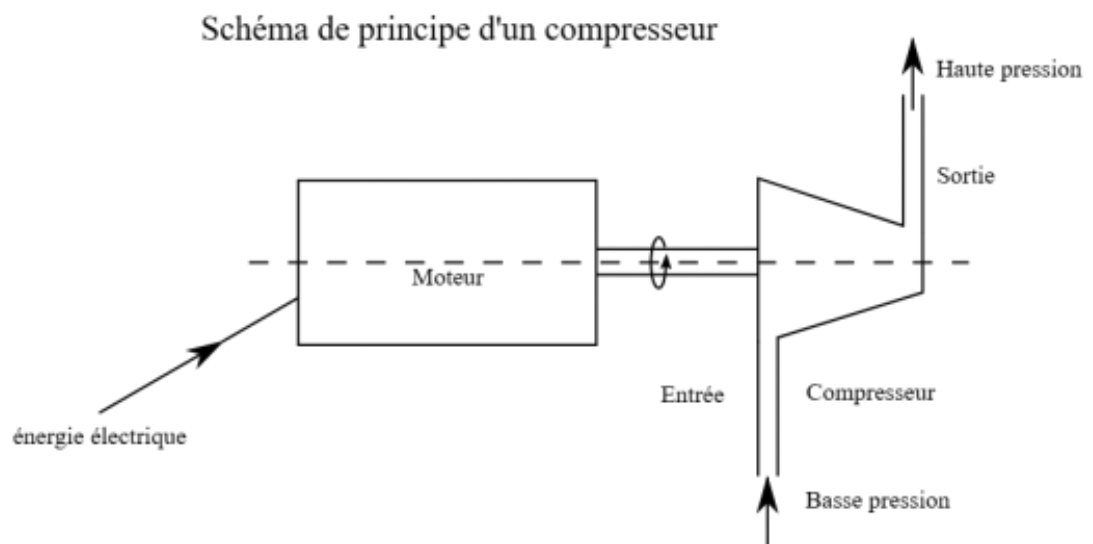


Figure 3. Principe de fonctionnement de compresseur

1.3.2 Paramètres de fonctionnement

Les principaux paramètres caractérisant le fonctionnement d'un compresseur sont la **pression**, la **température**, le **débit** et le **rendement**. Leur surveillance permet de contrôler les conditions de fonctionnement et d'évaluer les performances de l'équipement.

1.3.3 Performance et efficacité

La performance d'un compresseur dépend notamment de son rendement volumétrique et des différentes pertes énergétiques. Ces pertes peuvent être liées aux frottements mécaniques, aux fuites internes, aux pertes thermiques et aux pertes de charge. La maîtrise de ces paramètres contribue à améliorer l'efficacité, réduire la consommation énergétique et renforcer la fiabilité du compresseur.

1.4 Composants principaux d'un compresseur

Un compresseur est constitué de plusieurs composants essentiels assurant son fonctionnement, ses performances et sa fiabilité :

- **Moteur** : fournit la puissance nécessaire pour entraîner le système de compression.
- **Système de compression** : assure l'aspiration, la compression et le refoulement du gaz à l'aide d'éléments adaptés au type de compresseur.
- **Système de refroidissement** : évacue la chaleur produite lors de la compression afin d'éviter la surchauffe.
- **Système de lubrification** : réduit les frottements et l'usure des pièces mobiles et contribue à leur protection.
- **Filtres** : retiennent les impuretés et protègent les composants internes du compresseur.

Le bon fonctionnement de ces différents composants est essentiel pour garantir la fiabilité, la sécurité et l'efficacité du compresseur.

1.5 Défaillances des compresseurs

Les compresseurs peuvent être affectés par différentes défaillances susceptibles de réduire leurs performances, provoquer des arrêts de production et augmenter les coûts de maintenance. Ces défaillances peuvent être classées selon leur nature, leurs causes et leurs conséquences.

1.5.1 Types de pannes

Les principales défaillances des compresseurs sont :

- **Pannes mécaniques** : elles concernent les éléments en mouvement tels que les roulements, les pistons, les vis ou les engrenages, généralement en raison de l'usure ou de défauts d'assemblage.
- **Pannes électriques** : elles affectent principalement le moteur et les systèmes de commande et peuvent entraîner l'arrêt du compresseur.
- **Pannes thermiques** : elles résultent principalement d'une élévation excessive de la température et peuvent endommager les joints, l'huile et les composants métalliques.

1.5.2 Causes des défaillances

Les principales causes des défaillances sont :

- **Usure** : dégradation progressive des composants due à leur fonctionnement prolongé.

- **Mauvaise lubrification** : augmentation des frottements et accélération de l'usure en raison d'un manque ou d'une mauvaise qualité du lubrifiant.
- **Surcharge** : contraintes excessives résultant d'un fonctionnement au-delà des capacités nominales.
- **Conditions environnementales** : température élevée, poussière et humidité pouvant accélérer la dégradation des composants.

1.5.3 Conséquences

Les défaillances peuvent entraîner :

- **Arrêt de production** : interruption du fonctionnement de l'installation.
- **Coûts élevés** : dépenses liées aux réparations, au remplacement des pièces et aux pertes de production.
- **Baisse du rendement** : augmentation de la consommation énergétique et diminution des performances du compresseur.

La compréhension des types et des causes de défaillances constitue ainsi une base essentielle pour mettre en place une stratégie de maintenance efficace et améliorer la fiabilité des compresseurs.

1.6 Maintenance des compresseurs

La maintenance regroupe l'ensemble des actions techniques, administratives et organisationnelles visant à maintenir ou à rétablir un équipement dans un état de fonctionnement optimal. Elle a pour objectifs principaux d'assurer la disponibilité, la fiabilité et la sécurité des installations tout en maîtrisant les coûts.

1.6.1 Définition de la maintenance

La maintenance vise à préserver ou à rétablir les performances d'un compresseur afin d'assurer son fonctionnement fiable et sécurisé. Elle peut être réalisée selon différentes stratégies, notamment corrective, préventive et prédictive.

1.6.2 Types de maintenance

a) Maintenance préventive : La maintenance préventive est réalisée avant l'apparition d'une défaillance, selon une stratégie définie.

Maintenance systématique : les interventions sont effectuées à intervalles réguliers, en fonction du temps ou des heures de fonctionnement, indépendamment de l'état réel de l'équipement.

Maintenance conditionnelle : les interventions sont déclenchées selon l'état du compresseur, à partir de la surveillance de paramètres tels que la pression, la température ou les vibrations.

Elle permet notamment de réduire les risques de panne et d'améliorer la fiabilité, mais nécessite une planification et des interventions régulières.

b) Maintenance prédictive : La maintenance prédictive repose sur la surveillance et l'analyse des données de fonctionnement afin de détecter les signes précurseurs d'une défaillance. Elle peut notamment s'appuyer sur l'analyse des vibrations, le suivi de la température, l'analyse de l'huile et la détection des anomalies.

Cette approche permet d'optimiser le moment des interventions, de réduire les arrêts imprévus et d'améliorer la durée de vie des équipements.

c) Maintenance corrective : La maintenance corrective intervient après l'apparition d'une défaillance afin de réparer ou de remplacer les composants défectueux et de rétablir le fonctionnement du compresseur. Elle permet d'intervenir uniquement lorsqu'une panne survient, mais peut entraîner des arrêts imprévus et des coûts importants.

1.6.3 Types et niveaux des interventions de maintenance des compresseurs

Les interventions de maintenance des compresseurs varient selon la nature de l'opération, sa complexité et les compétences nécessaires. Elles peuvent aller des contrôles et réglages simples jusqu'aux travaux importants de réparation ou de révision.

Selon la norme AFNOR X 60-011, les interventions sont réparties en cinq niveaux :

Table 1. Les cinq niveaux de la maintenance (Norme AFNOR X 60 011)

Niveaux	Types de travaux	Personnel d'intervention	Moyens
1er niveau	régages simples prévus par le constructeur au moyen d'organes accessibles sans aucun & montage d'équipement, ou échange d'éléments accessibles en toute sécurité.	Pilote ou conducteur du système	outillage léger défini dans les instructions d'utilisation.
2ème niveau	dépannage par échange standard d'éléments prévus à cet effet, ou d'opérations mineures de maintenance préventive (rondes)	technicien habilité	outillage léger défini dans les instructions d'utilisation et pièces de rechanges disponibles sans délai.

3ème niveau	identification et diagnostic de pannes, réparation par échange de composants fonctionnels, réparations mécaniques mineures	technicien spécialisé	outillage prévu et appareils de mesure, banc d'essai, contrôle.
4ème niveau	travaux importants de maintenance corrective ou préventive	équipe encadrée par un technicien spécialisé	outillage général et spécialisé, matériels d'essais, de contrôle...
5ème niveau	travaux de rénovation, de reconstruction ou réparation importantes confiées à un atelier central	équipe complète et polyvalente	moyens proches de la fabrication

Cette classification permet d'organiser efficacement les opérations de maintenance, d'optimiser l'utilisation des ressources humaines et d'améliorer la gestion des interventions dans les installations industrielles.

1.6.4 Différence entre maintenance préventive et corrective

Comprendre la distinction entre la maintenance préventive et corrective est essentiel pour gérer efficacement la maintenance des équipements. Ces deux approches présentent des caractéristiques distinctives qui influencent considérablement l'efficacité opérationnelle et les coûts pour l'entreprise.

La maintenance corrective, souvent appelée maintenance réactive, intervient lorsque qu'une panne s'est déjà produite. Ce type d'intervention est nécessaire pour rétablir le fonctionnement d'une machine ou d'un composant après sa défaillance. La nature de la maintenance corrective implique que l'intervention se fait en réponse à un problème déjà survenu, causant souvent des interruptions non planifiées dans la production et des pertes économiques potentielles dues aux temps d'arrêt.

En revanche, la maintenance préventive se concentre sur l'anticipation et la prévention des pannes avant qu'elles ne se produisent. Cette approche proactive prévoit des interventions régulières, telles que des inspections et des maintenances périodiques, visant à maintenir les équipements dans des conditions optimales. L'objectif principal est de réduire le risque de pannes imprévues, de minimiser les temps d'arrêt et d'améliorer la longévité des équipements.

Un bon équilibre entre la maintenance préventive et corrective présente des avantages à court et à long terme en adoptant des pratiques plus proactives.

Les avantages de l'utilisation de la maintenance préventive par rapport à la maintenance corrective incluent :

Coûts inférieurs

- Amélioration des biens et des équipements (moins de pannes)
- Planification anticipée de la maintenance préventive selon un calendrier contrôlable
- Les techniciens passent moins de temps lorsqu'il ne s'agit pas d'une situation d'urgence (corrective)
- Prévision des pièces de rechange nécessaires plutôt que de se retrouver potentiellement sans ou en avoir besoin soudainement. [Maintenance Préventive : Exemples Pratiques Et Définition](#)

COÛTS DE MAINTENANCE

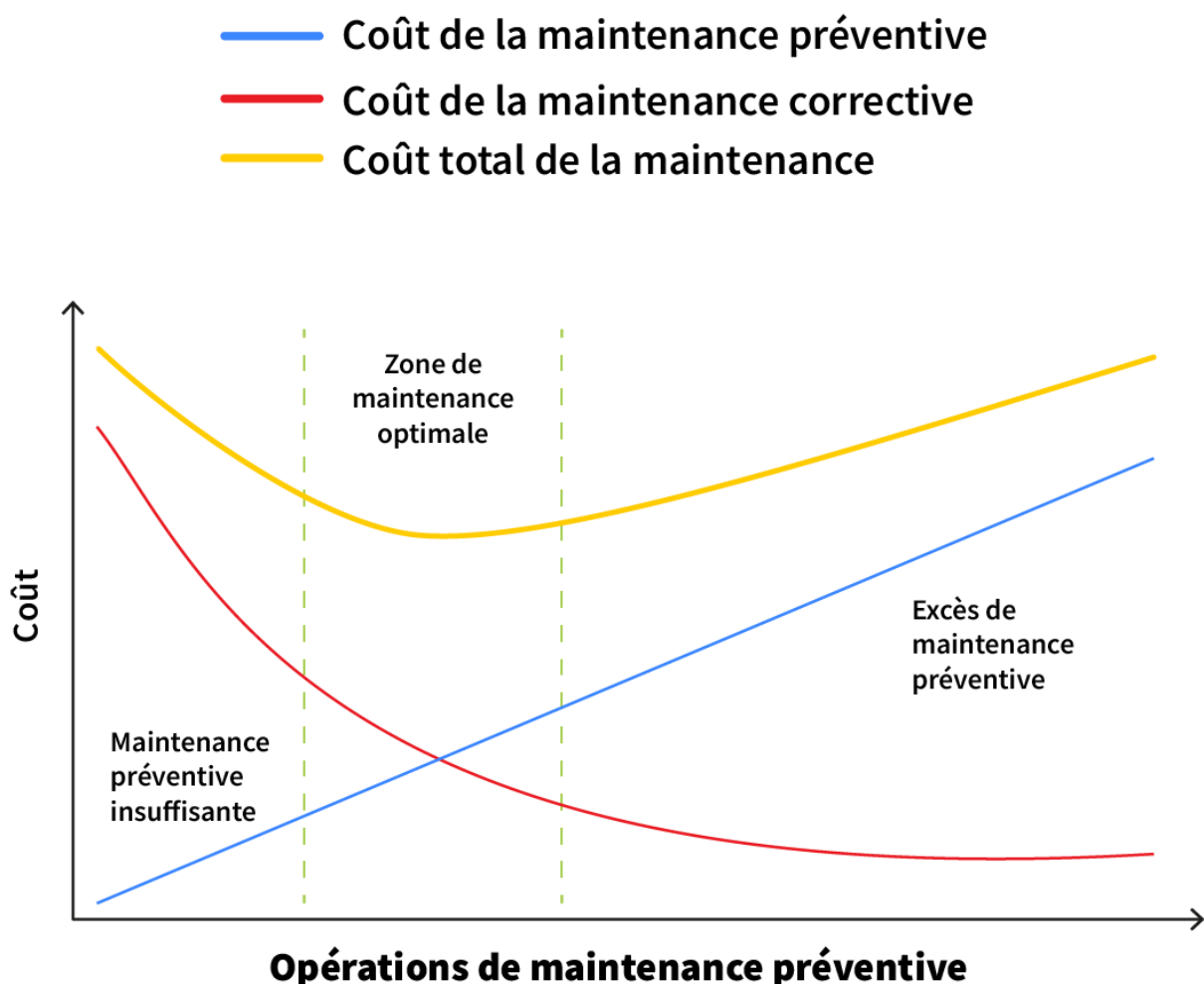


Figure 4. La relation de coût entre maintenance préventive et corrective

La combinaison de ces différentes stratégies de maintenance permet d'assurer un fonctionnement fiable et efficace des compresseurs dans les environnements industriels.

1.7 Planification de la maintenance préventive

1.7.1 Objectifs

La planification de la maintenance préventive vise à organiser les interventions de manière optimale afin d'améliorer les performances des compresseurs et de garantir la continuité de service. Ses principaux objectifs sont :

- **Réduire les pannes** : En anticipant les défaillances, il est possible de limiter les arrêts imprévus.
- **Améliorer la fiabilité** : Une maintenance régulière permet d'assurer un fonctionnement stable et sécurisé des équipements.
- **Réduire les coûts** : La prévention des pannes diminue les coûts liés aux réparations d'urgence, aux pertes de production et à la consommation excessive d'énergie.

1.7.2 Méthodes de planification

Plusieurs approches peuvent être utilisées pour planifier la maintenance préventive :

- **Planification à calendrier fixe** : Les interventions sont programmées à des intervalles réguliers (jours, semaines, mois), indépendamment de l'utilisation réelle du compresseur.
- **Planification basée sur l'utilisation** : Les opérations de maintenance sont déclenchées en fonction du temps de fonctionnement (heures de service, cycles d'utilisation).
- **Planification basée sur l'état** : Cette méthode repose sur la surveillance des paramètres de fonctionnement (vibrations, température, pression). Les interventions sont réalisées lorsque des anomalies ou des seuils critiques sont détectés.

1.7.3 Contraintes

La mise en place d'une planification efficace doit tenir compte de plusieurs contraintes :

- **Disponibilité des ressources** : Cela inclut le personnel qualifié, les pièces de rechange et les équipements nécessaires à la maintenance.
- **Coût** : Il est important d'équilibrer le coût des opérations de maintenance avec les bénéfices obtenus en termes de fiabilité et de performance.
- **Temps d'arrêt** : Les interventions doivent être planifiées de manière à minimiser l'impact sur la production et à éviter des interruptions prolongées.

Une planification bien structurée constitue une étape clé pour optimiser la maintenance préventive, et elle représente une base essentielle pour l'application des méthodes d'optimisation, notamment les algorithmes génétiques, abordés dans les chapitres suivants.

1.8 Indicateurs de performance de la maintenance

L'évaluation de l'efficacité de la maintenance des compresseurs repose sur plusieurs indicateurs clés de performance (KPI). Ces indicateurs permettent de mesurer la fiabilité, la disponibilité et la maintenabilité des équipements.

- **MTBF (Mean Time Between Failures)** : Le MTBF représente le **temps moyen entre deux pannes successives**. Il est utilisé pour évaluer la fiabilité d'un équipement.
Un MTBF élevé indique que le compresseur fonctionne longtemps sans défaillance.
- **MTTR (Mean Time To Repair)** : Le MTTR correspond au **temps moyen nécessaire pour réparer un équipement après une panne**.
Un MTTR faible signifie que les interventions de maintenance sont rapides et efficaces.
- **Disponibilité** : La disponibilité mesure la **capacité d'un équipement à être opérationnel lorsqu'il est requis**. Elle dépend à la fois du MTBF et du MTTR.
Une disponibilité élevée est essentielle pour assurer la continuité de la production.
- **Fiabilité** : La fiabilité exprime la **probabilité qu'un compresseur fonctionne sans panne pendant une période donnée**. Elle est directement liée à la qualité de la maintenance et aux conditions d'exploitation.

Ces indicateurs sont essentiels pour analyser les performances du système de maintenance et identifier les axes d'amélioration. Ils jouent également un rôle clé dans l'optimisation de la planification de la maintenance, notamment lors de l'utilisation de méthodes avancées comme les algorithmes génétiques.

1.9 Limites des méthodes classiques de planification

Malgré leur utilisation répandue dans l'industrie, les méthodes classiques de planification de la maintenance préventive présentent plusieurs limites, notamment dans les environnements complexes comme les parcs de compresseurs.

- **Manque de flexibilité** : Les approches traditionnelles, basées sur des calendriers fixes ou des intervalles prédéfinis, ne prennent pas en compte

les variations réelles des conditions de fonctionnement. Elles s'adaptent difficilement aux changements imprévus tels que les pannes, les variations de charge ou les contraintes opérationnelles.

- **Difficulté à gérer un grand nombre d'équipements** : Lorsque le nombre de compresseurs augmente, la planification devient plus complexe. La coordination des interventions, la gestion des ressources et la prise en compte des priorités deviennent difficiles à optimiser avec des méthodes simples.
- **Absence d'optimalité** : Les méthodes classiques ne garantissent pas une solution optimale. Elles reposent souvent sur des règles empiriques ou des approximations, ce qui peut conduire à des plannings non optimisés en termes de coûts, de disponibilité ou de performance.

Ces limites montrent la nécessité d'adopter des approches plus avancées et intelligentes capables de traiter des problèmes complexes d'optimisation. Dans ce contexte, les méthodes d'optimisation, notamment les algorithmes génétiques, offrent des solutions efficaces pour améliorer la planification de la maintenance préventive. Cela constitue la transition vers le chapitre suivant, consacré à l'optimisation par algorithmes génétiques.

1.10 Conclusion

Ce chapitre a permis de présenter les notions fondamentales liées aux compresseurs ainsi qu'à leur maintenance dans un contexte industriel.

Tout d'abord, nous avons défini le compresseur et décrit son principe de fonctionnement, ses domaines d'utilisation ainsi que ses différentes classifications. Cette étude a mis en évidence l'importance stratégique de ces équipements dans des secteurs essentiels tels que l'industrie, le pétrole et le gaz, ainsi que la réfrigération.

Ensuite, nous avons abordé les principes de maintenance, en mettant l'accent sur la maintenance préventive et ses différentes formes. Cette approche joue un rôle crucial dans la réduction des pannes, l'amélioration de la fiabilité et l'optimisation des coûts d'exploitation.

Enfin, nous avons souligné les principales limites des méthodes classiques de planification, notamment leur manque de flexibilité, leur difficulté à gérer des systèmes complexes et l'absence d'optimalité dans les solutions obtenues.

Face à ces limitations, il devient nécessaire de recourir à des méthodes plus avancées et intelligentes pour optimiser la planification de la maintenance. Parmi ces approches, les **algorithmes génétiques** représentent une solution efficace pour résoudre les problèmes complexes d'optimisation, améliorer la qualité des plannings et atteindre de meilleures performances globales du système de maintenance.

Références

- [1] Bloch, H. P., & Geitner, F. K. (2012). Machinery Failure Analysis and Troubleshooting. Elsevier.
- [2] Boyce, M. P. (2011). Gas Turbine Engineering Handbook. Elsevier.
- [3] Çengel, Y. A., & Boles, M. A. (2015). Thermodynamics: An Engineering Approach. McGraw-Hill.
- [4] Stosic, N., Smith, I. K., & Kovacevic, A. (2005). Screw Compressors: Mathematical Modelling and Performance Calculation. Springer.
- [5] Wang, L. (2002). Maintenance Scheduling in Manufacturing Systems. Springer.
- [6] Mobley, R. K. (2002). An Introduction to Predictive Maintenance. Butterworth-Heinemann.
- [7] Jardine, A. K. S., Lin, D., & Banjevic, D. (2006). A review on machinery diagnostics and prognostics implementing condition-based maintenance. Mechanical Systems and Signal Processing.
- [8] ISO 13306 (2017). Maintenance terminology.
- [9] ISO 55000 (2014). Asset management.
- [10] Smith, R. (2011). Maintenance Engineering Handbook.

Chapitre 2: Algorithme génétique pour optimiser la planification maintenance préventive

2.1 Introduction

La planification de la maintenance préventive constitue un problème d'optimisation complexe, notamment dans les systèmes industriels soumis à plusieurs contraintes opérationnelles. La prise en compte simultanée des ressources disponibles, des contraintes d'exploitation et des exigences de maintenance rend nécessaire l'utilisation de méthodes adaptées à ce type de problème.

2.1.1 Problématique de la planification de la maintenance préventive

La maintenance préventive vise à réduire le risque de défaillance et à assurer la disponibilité des équipements. Cependant, la planification des interventions doit tenir compte de plusieurs facteurs, notamment la disponibilité des ressources humaines, les contraintes de production, les durées d'intervention et les exigences liées au fonctionnement des équipements. Cette combinaison de contraintes rend la recherche d'un planning efficace particulièrement difficile dans les systèmes industriels complexes [9], [10].

2.1.2 Limites des méthodes classiques d'optimisation

Les méthodes classiques d'optimisation, telles que la programmation linéaire ou dynamique, peuvent être efficaces pour certains problèmes bien structurés. Toutefois, leur utilisation devient plus difficile lorsque le problème comporte un grand nombre de variables, de contraintes et de combinaisons possibles. Dans ce contexte, la complexité du problème de planification peut limiter leur efficacité et leur flexibilité [6], [7].

2.1.3 Intérêt des métaheuristiques

Les métaheuristiques constituent une alternative pour traiter les problèmes d'optimisation complexes. Elles permettent d'explorer efficacement de vastes espaces de recherche et de rechercher des solutions de bonne qualité sans nécessiter une modélisation mathématique trop restrictive. Parmi les principales métaheuristiques figurent les algorithmes génétiques, les colonies de fourmis et le recuit simulé [6], [7].

2.1.4 Choix de l'algorithme génétique

Parmi ces approches, l'algorithme génétique (AG) a été retenu dans le cadre de cette étude en raison de sa flexibilité et de sa capacité à traiter des problèmes d'optimisation combinatoire soumis à plusieurs contraintes. Il repose sur l'évolution d'une population de solutions à travers les opérateurs de sélection, de croisement et de mutation [2], [3].

Cette approche est particulièrement adaptée à la planification de la maintenance, où les différentes interventions peuvent être représentées sous forme de solutions candidates et évaluées selon plusieurs critères liés aux ressources et aux contraintes opérationnelles [11], [14]. Ainsi, l'algorithme génétique constitue la méthode d'optimisation adoptée dans ce travail pour rechercher une organisation améliorée des interventions de maintenance préventive.

2.2 Généralités sur les algorithmes génétiques

Les algorithmes génétiques (AG) sont des méthodes d'optimisation appartenant à la famille des métaheuristiques évolutionnaires. Inspirés des mécanismes de la sélection naturelle et de la génétique, ils sont adaptés à la résolution de problèmes complexes comportant un espace de recherche important et plusieurs contraintes [2], [3].

2.2.1 Définition d'un algorithme génétique : Un algorithme génétique est une méthode de recherche et d'optimisation fondée sur l'évolution d'une population de solutions candidates, appelées individus. Chaque individu représente une solution potentielle du problème et est évalué à l'aide d'une fonction de fitness. L'amélioration des solutions est réalisée au moyen des opérateurs de sélection, de croisement et de mutation [2].

Contrairement aux méthodes déterministes, les algorithmes génétiques utilisent des mécanismes probabilistes permettant d'explorer différentes régions de l'espace de recherche et de réduire le risque de convergence prématurée vers une solution locale [3].

2.2.2 Historique et inspiration biologique : Les algorithmes génétiques trouvent principalement leur origine dans les travaux de John Holland dans les années 1970. Leur principe s'inspire de la théorie de l'évolution et de la sélection naturelle, selon laquelle les individus les mieux adaptés ont davantage de chances de se reproduire.

Dans les AG, cette analogie est transposée sous forme de concepts informatiques tels que les individus, les chromosomes, les gènes, la sélection, le croisement et la mutation. Ces mécanismes permettent de faire évoluer progressivement une population de solutions vers des solutions de meilleure qualité [1], [2].

2.2.3 Principe de fonctionnement général : Le fonctionnement d'un algorithme génétique repose sur un processus itératif. Une population initiale de solutions est d'abord générée, puis chaque individu est évalué à l'aide de la fonction de fitness. Les individus les plus performants sont ensuite sélectionnés pour participer à la génération de nouvelles solutions à travers le croisement et la mutation.

Ce processus est répété au cours des générations jusqu'à atteindre un critère d'arrêt prédéfini, tel qu'un nombre maximal de générations ou l'absence d'amélioration significative de la solution [2], [5].

2.2.4 Domaine d'application des algorithmes génétiques : Grâce à leur flexibilité, les algorithmes génétiques sont utilisés dans différents domaines de l'optimisation, notamment la recherche opérationnelle, la conception industrielle, la planification et l'ordonnancement, les réseaux ainsi que la maintenance industrielle.

Dans le domaine de la maintenance, ils peuvent notamment être utilisés pour optimiser l'organisation temporelle des interventions et améliorer l'utilisation des ressources disponibles [11], [14].

2.2.5 Avantages et inconvénients : Les principaux avantages des algorithmes génétiques résident dans leur capacité à explorer de vastes espaces de recherche, leur flexibilité face aux problèmes complexes et non linéaires, ainsi que leur aptitude à prendre en compte plusieurs contraintes ou objectifs [3], [6].

Cependant, leur performance dépend du choix du codage et des paramètres de l'algorithme. Ils peuvent également nécessiter un temps de calcul important et ne garantissent pas nécessairement l'obtention de l'optimum global [3], [6].

Malgré ces limites, les algorithmes génétiques constituent une approche pertinente pour les problèmes d'optimisation complexes, notamment lorsque les méthodes classiques deviennent difficiles à appliquer.

2.3 Concepts de base des algorithmes génétiques

Les algorithmes génétiques reposent sur plusieurs concepts fondamentaux permettant de représenter, d'évaluer et de faire évoluer les solutions d'un problème d'optimisation. Ces notions constituent la base nécessaire pour adapter l'algorithme au problème de planification de la maintenance préventive [2], [3].

2.3.1 Individu : Un individu représente une solution candidate au problème d'optimisation. Dans le contexte de la maintenance préventive, il peut correspondre à un planning donné des interventions pour l'ensemble des équipements étudiés. Sa qualité est déterminée à partir de la fonction de fitness [2].

2.3.2 Population : La population correspond à un ensemble d'individus considérés simultanément par l'algorithme génétique. Elle constitue l'ensemble des solutions explorées à une génération donnée. Le maintien d'une diversité suffisante au sein de la population favorise l'exploration de l'espace de recherche et limite le risque de convergence prématurée [3].

2.3.3 Chromosome : Le chromosome constitue la représentation codée d'un individu. Il regroupe les informations nécessaires pour représenter une solution et peut utiliser différents types de codage, notamment binaire, entier ou réel. Le choix du codage dépend de la nature du problème et influence directement la représentation et l'évolution des solutions [2], [11].

Dans le cadre de la planification de la maintenance, le chromosome peut représenter les informations relatives à l'organisation temporelle des différentes interventions. La représentation adoptée pour le problème étudié sera précisée dans la section consacrée au codage.

2.3.4 Gène : Le gène constitue l'unité élémentaire d'un chromosome. Il représente une variable ou une caractéristique particulière de la solution. Dans un problème de planification de maintenance, un gène peut notamment correspondre à une information relative à une intervention ou à son positionnement dans le planning [2].

2.3.5 Fonction fitness : La fonction de fitness, également appelée fonction d'évaluation, permet de mesurer la qualité de chaque individu par rapport aux objectifs et aux contraintes du problème. Elle constitue le mécanisme permettant de comparer les différentes solutions et d'orienter l'évolution de la population.

Selon la formulation du problème, une meilleure solution peut correspondre à une valeur de fitness plus élevée ou plus faible. Dans le domaine de la maintenance, cette fonction peut notamment prendre en compte des éléments tels que les coûts, la disponibilité des équipements, les temps d'arrêt ou l'utilisation des ressources [11], [14].

2.3.6 Générations : Une génération correspond à une itération complète de l'algorithme génétique. Au cours de chaque génération, les individus sont évalués puis sélectionnés afin de produire de nouvelles solutions par croisement et mutation. La répétition de ce processus permet d'améliorer progressivement la qualité des solutions [2], [3].

2.3.7 Critère d'arrêt : Le critère d'arrêt détermine le moment où l'algorithme génétique cesse son processus d'évolution. Il peut être défini à partir d'un nombre maximal de générations, de la stabilisation de la

fonction de fitness, de l'atteinte d'un niveau de performance donné ou de l'absence d'amélioration significative pendant plusieurs générations [5].

Le choix de ce critère permet d'établir un compromis entre la qualité de la solution recherchée et le temps de calcul. Dans l'application développée dans ce travail, le critère retenu sera précisé avec les paramètres de l'algorithme..

2.4 Opérateurs génétiques

Les opérateurs génétiques constituent les mécanismes fondamentaux permettant de faire évoluer une population de solutions au cours des générations. Ils assurent un équilibre entre l'exploitation des solutions les plus performantes et l'exploration de nouvelles solutions. Les trois opérateurs principaux sont la sélection, le croisement et la mutation [2], [5].

2.4.1 Sélection : La sélection consiste à choisir, parmi les individus de la population, ceux qui participeront à la reproduction. Elle favorise les solutions présentant les meilleures valeurs de fitness tout en permettant de conserver une certaine diversité au sein de la population.

Plusieurs méthodes peuvent être utilisées, notamment la sélection par roulette (Roulette Wheel), la sélection par tournoi et la sélection par rang. Le choix de la méthode dépend notamment de la nature du problème et du niveau de pression de sélection recherché [2], [3], [5].

Sélection par roulette : la probabilité de sélection d'un individu dépend de sa performance. Les individus les plus performants ont ainsi une probabilité plus élevée d'être sélectionnés.

Sélection par tournoi : plusieurs individus sont choisis aléatoirement et le meilleur d'entre eux est sélectionné pour la reproduction. Cette méthode est simple et permet de contrôler la pression de sélection.

Sélection par rang : les individus sont classés selon leur fitness, puis la probabilité de sélection est déterminée à partir de leur rang plutôt que de leur valeur absolue de fitness.

2.4.2 Croisement (Crossover) : Le croisement est un opérateur qui combine les caractéristiques de deux individus parents afin de produire de nouveaux descendants. Il permet ainsi d'explorer de nouvelles solutions à partir des caractéristiques de solutions existantes [2], [11].

Parmi les principales méthodes figurent le croisement à un point, le croisement à deux points et le croisement uniforme. Dans le croisement à un point, un seul point de coupure est choisi et les segments des deux parents sont échangés. Le croisement à deux points utilise deux points de coupure et échange le segment situé entre eux. Le croisement uniforme traite chaque gène indépendamment selon une probabilité définie.

Le choix du type de croisement dépend du codage utilisé et de la structure du problème étudié.

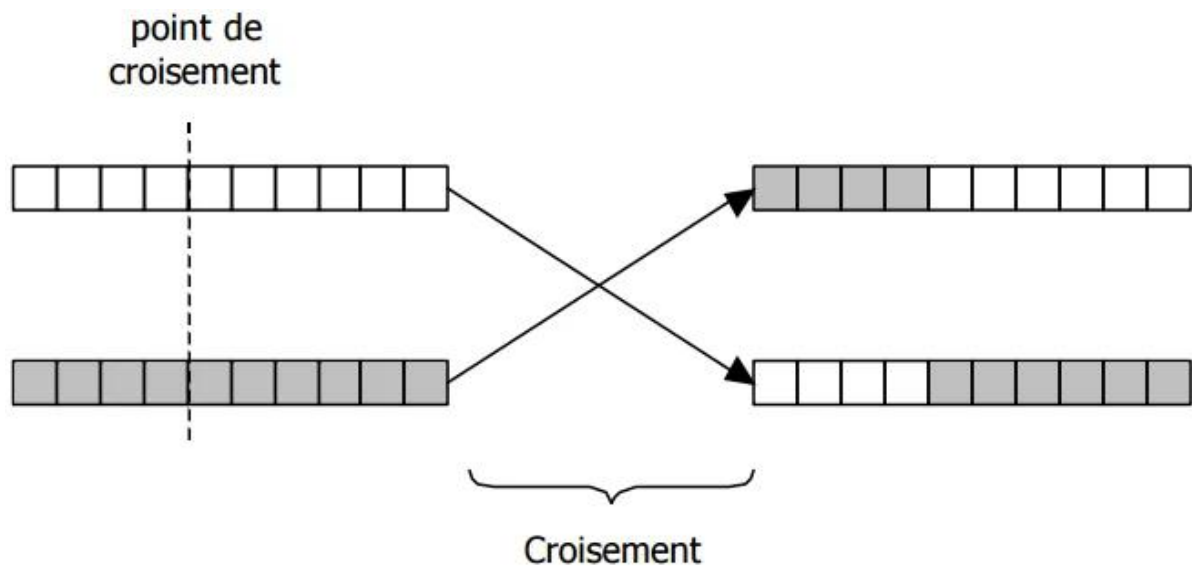


Figure 5. Croisement à un Seul point

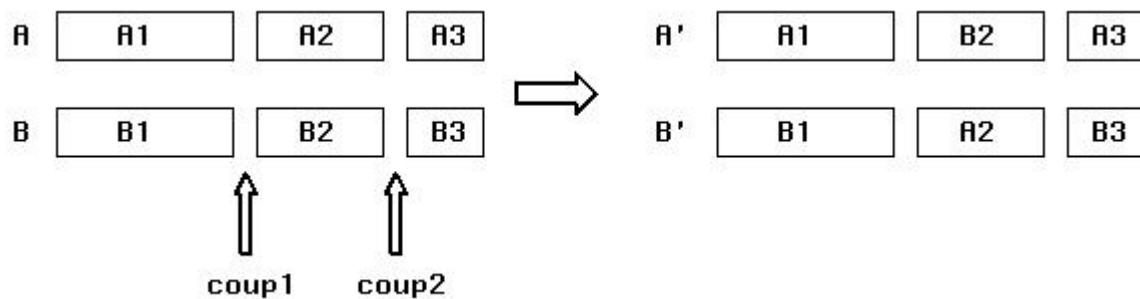


Figure 6. Croisement à deux points

2.4.3 Mutation

La mutation consiste à modifier aléatoirement certaines informations du chromosome afin de maintenir la diversité de la population et de réduire le risque de convergence prématurée vers une solution sous-optimale [2], [3].

Selon le type de codage, plusieurs formes de mutation peuvent être utilisées, notamment la mutation binaire, la mutation par permutation et la mutation aléatoire.

Dans le cas d'un codage réel ou entier, la mutation aléatoire consiste à remplacer la valeur d'un gène par une nouvelle valeur générée dans son domaine de définition. Cette forme de mutation est celle retenue dans la présente étude.

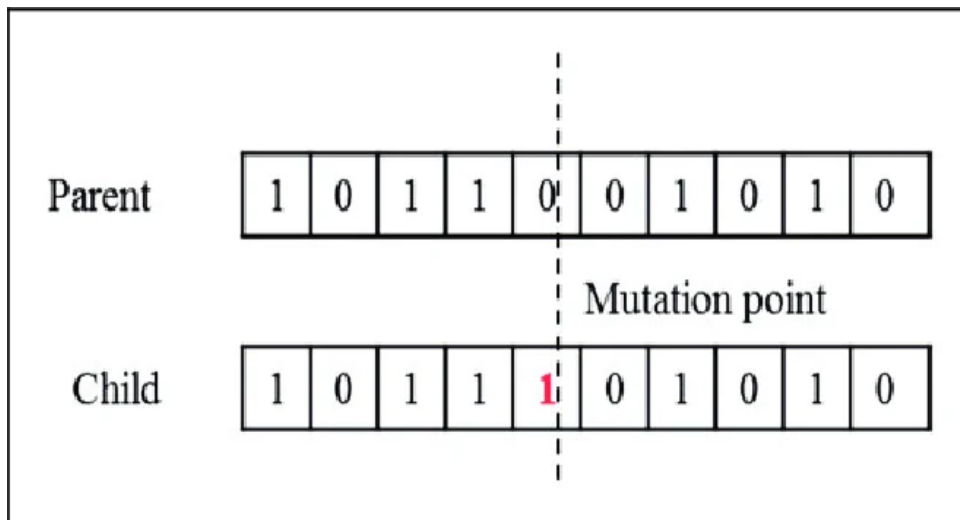


Figure 7. Mutation

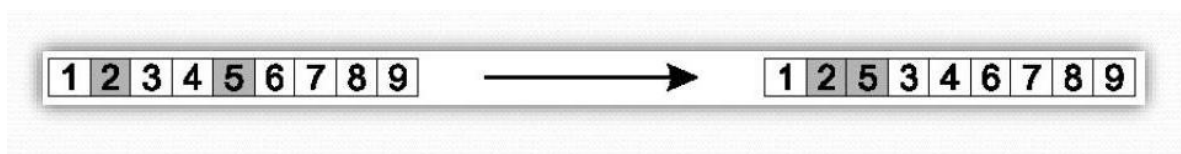


Figure 8. Mutation par permutation

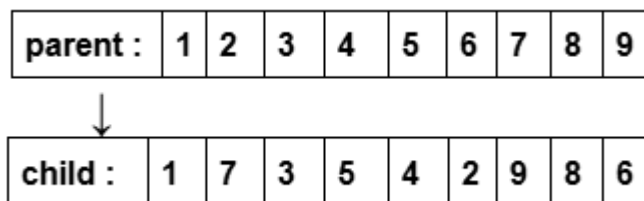


Figure 9.

En résumé, la sélection favorise les solutions performantes, tandis que le croisement et la mutation permettent de générer et d'explorer de nouvelles solutions. La combinaison de ces opérateurs permet ainsi de faire évoluer progressivement la population vers des solutions de meilleure qualité [5], [6].

2.5 Paramètres de l'algorithme génétique

Les performances d'un algorithme génétique dépendent en partie du choix de ses principaux paramètres. Ceux-ci influencent notamment la diversité de la population, l'intensité de l'exploration de l'espace de recherche et la vitesse de convergence. Les paramètres les plus importants sont la taille de la population, les probabilités de croisement et de mutation, ainsi que le nombre maximal de générations [2], [3].

2.5.1 Taille de la population

La taille de la population correspond au nombre d'individus considérés à chaque génération. Une population suffisamment importante permet de représenter une plus grande diversité de solutions et favorise l'exploration de l'espace de recherche. Toutefois, une population trop importante peut augmenter le temps de calcul.

Le choix de cette taille doit donc établir un compromis entre la diversité des solutions et le coût computationnel [2], [5].

2.5.2 Probabilité de croisement

La probabilité de croisement P_c représente la probabilité avec laquelle deux individus sélectionnés sont soumis à l'opérateur de croisement. Une valeur élevée favorise la combinaison des caractéristiques des solutions existantes et contribue ainsi à l'exploration de nouvelles solutions.

Une valeur trop faible peut cependant limiter la diversité générée par le croisement. Le choix de P_c dépend donc de la nature du problème et du codage utilisé [3], [5].

2.5.3 Probabilité de mutation

La probabilité de mutation P_m détermine la fréquence à laquelle les gènes d'un chromosome peuvent être modifiés. La mutation permet de maintenir la diversité de la population et d'explorer des régions de l'espace de recherche qui pourraient ne pas être atteintes par le croisement seul.

Une probabilité trop faible peut favoriser une convergence prématurée, tandis qu'une valeur trop élevée peut perturber excessivement les solutions déjà obtenues [2], [3].

2.5.4 Nombre de générations

Le nombre de générations correspond au nombre maximal d'itérations du processus évolutif. À chaque génération, les individus sont évalués puis de nouvelles solutions sont produites à partir des opérateurs génétiques.

L'augmentation du nombre de générations peut permettre d'améliorer la qualité des solutions, mais elle entraîne également une augmentation du temps de calcul. Il convient donc de choisir une valeur permettant d'obtenir un compromis satisfaisant entre qualité de la solution et coût computationnel [5].

2.5.5 Critère de convergence et d'arrêt

Le critère d'arrêt permet de déterminer quand l'algorithme doit terminer son processus d'évolution. Il peut être défini par l'atteinte d'un nombre maximal de générations ou par la stabilisation de la fitness lorsque l'amélioration des solutions devient négligeable.

L'utilisation d'un critère d'arrêt adapté permet d'éviter des calculs inutiles tout en conservant une solution de qualité acceptable.

2.6 Modélisation du problème d'optimisation

La modélisation constitue une étape essentielle dans l'application d'un algorithme génétique à un problème de planification de maintenance préventive. Elle consiste à traduire le système réel sous une forme structurée permettant de définir les variables de décision, les contraintes et les objectifs à optimiser [9], [10].

2.6.1 Description du système de maintenance : Le problème étudié concerne la planification des interventions de maintenance préventive d'un parc de compresseurs industriels. Chaque équipement possède des caractéristiques propres, notamment une durée de fonctionnement, une criticité et une périodicité de maintenance.

L'objectif général est de déterminer une organisation des interventions permettant d'assurer la disponibilité des équipements tout en limitant les coûts et les conséquences des arrêts de maintenance. Les décisions doivent ainsi être considérées de manière globale afin de tenir compte des interactions entre les différents équipements et des ressources disponibles [8], [9].

2.6.2 Hypothèses de travail : Afin de simplifier la modélisation tout en conservant une représentation cohérente du système, les hypothèses suivantes sont retenues :

- les équipements et leurs caractéristiques sont connus ;
- les interventions sont planifiées sur un horizon temporel défini ;
- les ressources de maintenance sont limitées et connues ;
- la maintenance préventive contribue à réduire le risque de défaillance.

Ces hypothèses permettent de limiter la complexité du modèle et de rendre le problème exploitable par l'algorithme génétique [10], [12].

2.6.3 Variables de décision : Les variables de décision représentent les éléments sur lesquels l'algorithme doit agir afin de construire le planning optimal. Elles peuvent notamment concerner :

- le moment de réalisation de chaque intervention ;
- l'ordre des interventions ;
- l'affectation des ressources de maintenance.

Ces variables constituent les éléments à représenter dans le chromosome afin de permettre leur manipulation par l'algorithme génétique [11], [14].

2.6.4 Contraintes du problème : Le planning de maintenance doit respecter plusieurs contraintes afin de garantir la faisabilité des solutions.

Contraintes de disponibilité : les interventions doivent être organisées de manière à limiter l'indisponibilité des équipements et à préserver autant que possible la continuité du fonctionnement.

Contraintes de ressources : les équipes et les moyens de maintenance étant limités, le nombre d'interventions pouvant être réalisées simultanément doit respecter les ressources disponibles.

Contraintes de temps d'arrêt : chaque intervention peut entraîner une indisponibilité temporaire de l'équipement concerné. La planification doit donc limiter l'impact global des arrêts sur l'exploitation.

Ces contraintes contribuent à la nature combinatoire du problème et justifient l'utilisation d'une approche métaheuristique telle que l'algorithme génétique [9], [10].

2.6.5 Fonction objectif : La fonction objectif permet d'évaluer la qualité des solutions en fonction des objectifs recherchés. Dans le contexte de la maintenance préventive, plusieurs critères peuvent être considérés, notamment :

- la minimisation des coûts de maintenance et des coûts associés aux arrêts ;
- la maximisation de la disponibilité des équipements ;
- la minimisation du temps d'arrêt global.

Selon la formulation retenue, ces objectifs peuvent être combinés au sein d'une fonction objectif ou d'une fonction de fitness pondérée, ou être traités comme des objectifs distincts dans une approche multi-objectifs [11], [14].

Ainsi, la modélisation permet de transformer le problème industriel de planification de la maintenance en une structure exploitable par l'algorithme génétique, en définissant clairement les décisions, les contraintes et les critères d'évaluation.

2.7 Codage du problème pour l'algorithme génétique

Le codage constitue une étape essentielle dans l'application d'un algorithme génétique, car il définit la manière dont une solution du problème réel est représentée sous forme de chromosome. Un codage adapté facilite l'exploration de l'espace des solutions ainsi que l'application des opérateurs génétiques [2], [11].

Dans le contexte de la planification de la maintenance préventive, le codage doit permettre de représenter les décisions relatives aux interventions, notamment leur position temporelle et, selon la formulation retenue, leur ordre ou leur affectation.

\

2.7.1 Représentation du chromosome : Le chromosome représente une solution complète du problème d'optimisation. Il peut être représenté sous forme d'un vecteur dont les gènes correspondent aux différentes variables de décision.

Selon la nature du problème, plusieurs types de codage peuvent être utilisés :

- **Codage binaire** : chaque gène prend une valeur 0 ou 1 ;
- **Codage entier** : chaque gène représente une valeur entière, telle qu'un jour ou une période de maintenance ;
- **Codage réel** : chaque gène représente une valeur réelle, notamment pour les problèmes continus ou hybrides.

Pour les problèmes de planification de maintenance, le codage entier ou par permutation peut être adapté lorsque les variables représentent des positions temporelles ou un ordre d'intervention [3], [11].

2.7.2 Codage des opérations de maintenance : Chaque opération de maintenance peut être représentée par un ou plusieurs gènes du chromosome. Selon la formulation du problème, ces informations peuvent notamment correspondre à l'équipement concerné, à la période ou à la date d'intervention et au type d'opération.

Ainsi, le chromosome peut être interprété comme une représentation du planning de maintenance pour l'ensemble des équipements étudiés. Cette représentation doit permettre d'évaluer chaque solution à l'aide de la fonction de fitness tout en tenant compte des contraintes du problème [11], [14].

2.7.3 Génération de la population initiale : La population initiale constitue l'ensemble des solutions utilisées au début du processus d'optimisation. Elle peut être générée aléatoirement afin d'assurer une diversité suffisante des solutions et de favoriser l'exploration de l'espace de recherche.

Dans un contexte industriel, il est également possible d'intégrer des solutions existantes ou des règles heuristiques afin d'obtenir une population initiale plus proche des conditions opérationnelles et, dans certains cas, d'accélérer la convergence [5], [6].

2.7.4 Évaluation de la fonction fitness : Chaque individu de la population est évalué à l'aide d'une fonction de fitness permettant de mesurer la qualité de la solution représentée par son chromosome.

Dans le contexte de la maintenance préventive, cette évaluation peut prendre en considération différents critères tels que le coût des interventions, la disponibilité des

équipements et le temps d'arrêt (downtime). La fitness permet ainsi de comparer les différentes solutions et d'orienter l'évolution de la population vers des plannings de meilleure qualité [11], [14].

Selon la formulation du problème, plusieurs objectifs peuvent être combinés dans une fonction d'évaluation unique, notamment au moyen de pondérations adaptées aux priorités du système étudié.

2.8 Étapes de l'algorithme génétique proposé

Après avoir présenté les concepts fondamentaux, les opérateurs, les paramètres et le codage du problème, cette section décrit la succession des étapes de l'algorithme génétique adopté pour résoudre le problème de planification de la maintenance préventive. Le processus repose sur une évolution itérative d'une population de solutions jusqu'à satisfaire un critère d'arrêt [2], [5].

2.8.1 Initialisation: L'algorithme débute par la génération d'une population initiale composée d'un ensemble de solutions candidates. Chaque individu représente un planning de maintenance codé sous forme de chromosome. La population peut être générée aléatoirement tout en respectant, lorsque cela est nécessaire, les limites et contraintes définies pour les variables de décision [3], [6].

2.8.2 Évaluation: Chaque individu est ensuite évalué à l'aide de la fonction de fitness. Cette évaluation permet de mesurer la qualité de chaque planning en fonction des objectifs et des contraintes du problème, notamment l'utilisation des ressources, les retards et les conflits entre interventions [11], [14].

2.8.3 Sélection: Les individus sont classés ou sélectionnés en fonction de leur performance afin de déterminer ceux qui participeront à la génération suivante. Cette étape favorise la conservation des solutions les plus performantes tout en maintenant une diversité suffisante dans la population [2], [5].

2.8.4 Croisement: Les individus sélectionnés sont combinés par l'opérateur de croisement afin de produire de nouveaux descendants. Cette opération permet de recombinaison les caractéristiques de plusieurs solutions et d'explorer de nouvelles régions de l'espace de recherche [3], [11].

2.8.5 Mutation: Une mutation est appliquée à certains individus selon la probabilité définie. Elle introduit de petites modifications dans les chromosomes afin de maintenir la diversité de la population et de réduire le risque de convergence prématurée. Dans cette étude, la mutation aléatoire est retenue conformément au codage adopté [2], [3].

2.8.6 Remplacement: Après la génération des descendants, une nouvelle population est constituée à partir des solutions produites et, selon la stratégie adoptée, des meilleurs individus de la génération précédente. Cette étape permet de poursuivre l'évolution de la population tout en conservant les solutions performantes [5], [6].

2.8.7 Condition d'arrêt: Le processus évolutif est répété jusqu'à satisfaire une condition d'arrêt. Celle-ci peut être définie par l'atteinte d'un nombre maximal de générations ou par la stabilisation de la fonction de fitness lorsque l'amélioration devient négligeable [2], [6].

Ainsi, l'algorithme suit une succession d'étapes allant de l'initialisation et de l'évaluation des solutions jusqu'à leur sélection, leur recombinaison, leur mutation et leur remplacement. Cette procédure permet d'améliorer progressivement les solutions de planification tout en respectant les contraintes du problème étudié.

2.9 Organigramme de l'algorithme génétique

L'organigramme suivant représente de manière schématique les principales étapes de l'algorithme génétique proposé. Il permet de visualiser l'enchaînement du processus d'optimisation, depuis la génération de la population initiale jusqu'au critère d'arrêt [2], [5].

Le processus commence par l'initialisation et l'évaluation de la population. Les individus sont ensuite sélectionnés et soumis aux opérateurs de croisement et de mutation afin de générer de nouvelles solutions. Après leur évaluation, une nouvelle population est constituée et le processus est répété jusqu'à satisfaction du critère d'arrêt.

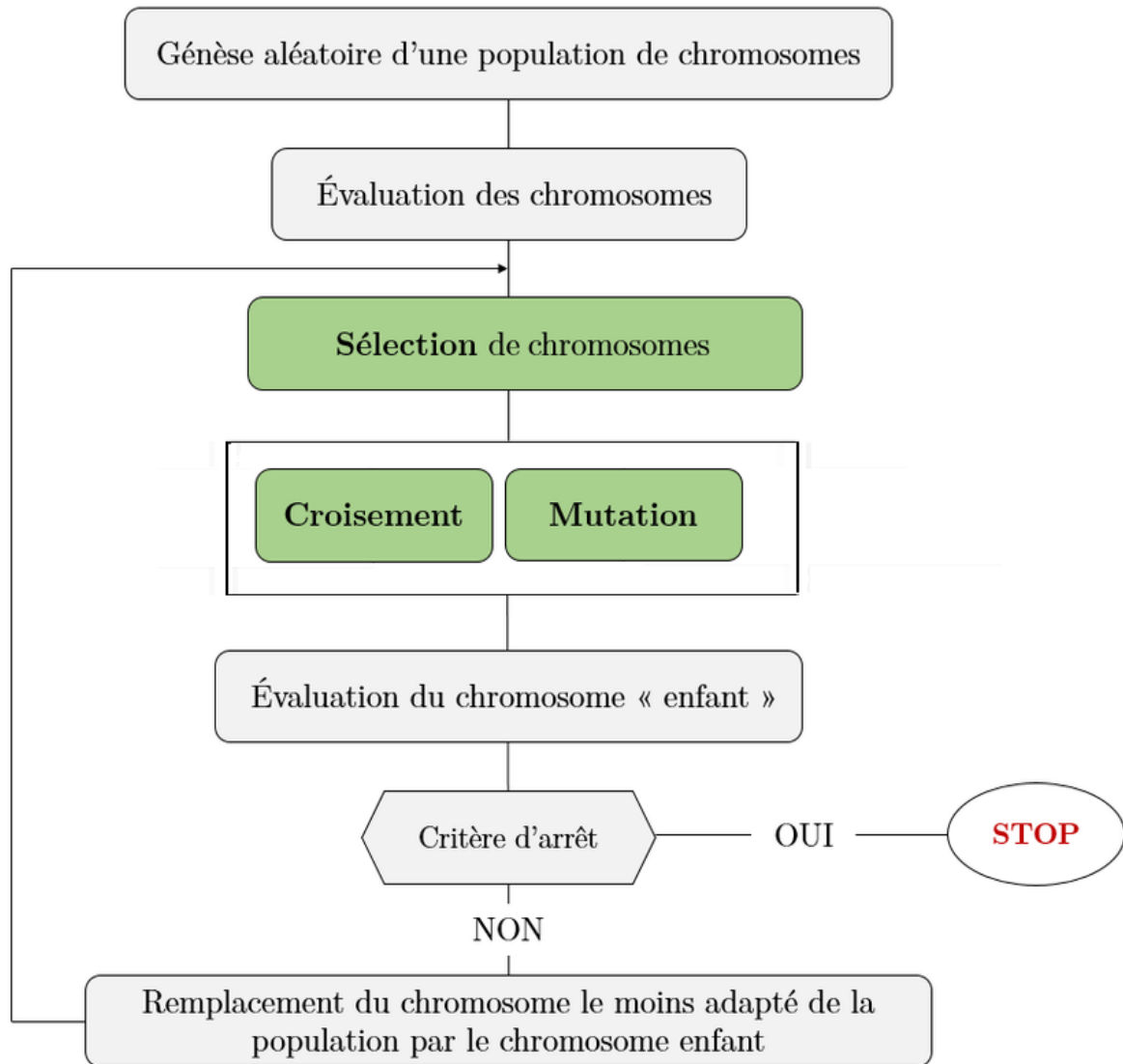


Figure 9. Flowchart de l'algorithme génétique

Ainsi, l'organigramme met en évidence le caractère itératif de l'algorithme génétique et la succession des opérations permettant d'améliorer progressivement les solutions de planification de la maintenance préventive [2], [3].

2.10 Conclusion

Ce chapitre a présenté les fondements théoriques des algorithmes génétiques et leur intérêt pour l'optimisation de la planification de la maintenance préventive. La complexité de ce problème, liée notamment aux contraintes de disponibilité des équipements, de ressources et de temps d'arrêt, justifie le recours à des méthodes d'optimisation adaptées [8], [9].

Les principaux concepts des algorithmes génétiques, leurs opérateurs, leurs paramètres ainsi que les principes de modélisation et de codage ont été présentés. Cette démarche permet de transformer le problème de planification en un ensemble de solutions candidates pouvant être évaluées et améliorées progressivement par le processus évolutif [2], [3], [5].

Ainsi, le cadre théorique et méthodologique établi dans ce chapitre constitue la base de l'application de l'algorithme génétique au problème étudié. Le chapitre suivant sera consacré à l'étude de cas, à la formulation du problème de planification du parc de compresseurs et à l'analyse des résultats obtenus à partir de l'approche proposée [11], [14].

Références bibliographiques

- [1] Holland, J. H. (1975). *Adaptation in Natural and Artificial Systems*. University of Michigan Press.
- [2] Goldberg, D. E. (1989). *Genetic Algorithms in Search, Optimization and Machine Learning*. Addison-Wesley.
- [3] Mitchell, M. (1998). *An Introduction to Genetic Algorithms*. MIT Press.
- [4] Deb, K. (2001). *Multi-Objective Optimization Using Evolutionary Algorithms*. Wiley.
- [5] Haupt, R. L., & Haupt, S. E. (2004). *Practical Genetic Algorithms*. Wiley.
- [6] Talbi, E. G. (2009). *Metaheuristics: From Design to Implementation*. Wiley.
- [7] Blum, C., & Roli, A. (2003). Metaheuristics in combinatorial optimization: Overview and conceptual comparison. *ACM Computing Surveys*, 35(3), 268–308.
- [8] Jardine, A. K. S., Lin, D., & Banjevic, D. (2006). A review on machinery diagnostics and prognostics. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 20(7), 1483–1510.
- [9] Wang, H. (2002). A survey of maintenance policies of deteriorating systems. *European Journal of Operational Research*, 139(3), 469–489.
- [10] Dekker, R. (1996). Applications of maintenance optimization models: A review and analysis. *Reliability Engineering & System Safety*, 51(3), 229–240.
- [11] Gen, M., & Cheng, R. (1997). *Genetic Algorithms and Engineering Optimization*. Wiley.
- [12] Kuo, W., & Prasad, V. (2000). An annotated overview of system-reliability optimization. *IEEE Transactions on Reliability*.
- [13] Marseguerra, M., & Zio, E. (2000). Basics of genetic algorithms optimization for RAMS applications. *Reliability Engineering & System Safety*.
- [14] Al-Douri, Y. et al. (2016). Optimization of maintenance scheduling using genetic algorithms. *Applied Mathematics & Information Sciences*.

Chapitre 3 : Étude de cas – Optimisation de la planification de la maintenance des stations de compression de gaz

3.1 Introduction

Ce chapitre est consacré à l'étude de cas portant sur l'optimisation de la planification de la maintenance préventive d'un parc de compresseurs centrifuges au niveau du Centre Industriel Sud (CIS) de Hassi Messaoud. L'étude porte sur l'organisation des interventions de maintenance et sur les contraintes liées à la disponibilité des ressources humaines et des équipements.

L'objectif est d'appliquer l'algorithme génétique présenté dans le chapitre précédent afin d'améliorer la répartition temporelle des interventions, de limiter les chevauchements des tâches et d'optimiser l'utilisation des ressources disponibles. Le chapitre présente d'abord le système étudié et ses conditions de fonctionnement, puis les données de maintenance, la formulation du problème, l'application de l'algorithme et enfin l'analyse des résultats obtenus.

3.2 Description du système étudié

3.2.1 Architecture globale : Le système étudié est constitué d'un parc de compresseurs centrifuges installé au niveau du Centre Industriel Sud (CIS) de Hassi Messaoud. L'étude porte principalement sur la partie moderne du parc, mise en service à partir de 2003, composée de quatre stations équipées de compresseurs centrifuges entraînés par des turbines à gaz de type PGT25.

Les unités assurent la compression du gaz naturel à haute pression, avec une pression d'entrée d'environ 28 bar et une pression pouvant atteindre environ 400 bar en sortie selon les besoins du procédé. L'installation comprend également plusieurs systèmes auxiliaires nécessaires au fonctionnement et à la protection des équipements, notamment les systèmes anti-surge, les séparateurs et les systèmes de refroidissement.

Cette configuration constitue le système de référence pour l'étude de la planification des interventions de maintenance préventive présentée dans les sections suivantes.

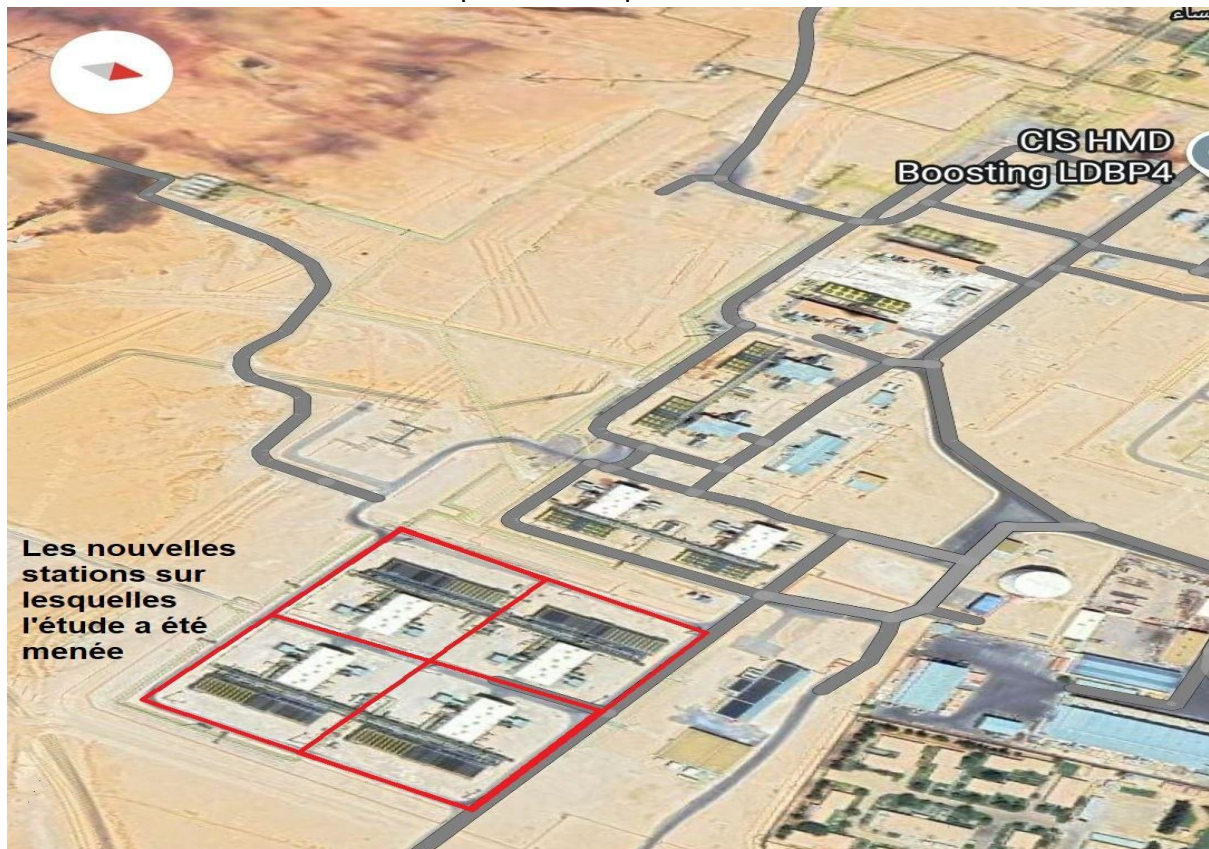


Figure 10. Le parc étudiée : une image tirée de Google Maps

3.2.2 Fonctionnement du processus de compression

Le processus de compression du gaz naturel est réalisé en plusieurs étages successifs. Le gaz est progressivement comprimé selon le schéma suivant :

Premier étage : de 28 à environ 56 bar ;

Deuxième étage : de 56 à environ 100 bar ;

Troisième étage : de 100 à environ 200 bar ;

Quatrième étage : jusqu'à environ 400 bar.

Entre les différents étages, le gaz passe par des systèmes de refroidissement intermédiaire afin de limiter l'élévation de température et de maintenir des conditions de fonctionnement appropriées. Les unités disposent également de systèmes auxiliaires, notamment les systèmes anti-surge, les séparateurs et les échangeurs thermiques, qui contribuent à la protection et au bon fonctionnement des équipements.

Cette configuration implique le fonctionnement coordonné de plusieurs équipements et systèmes auxiliaires, ce qui doit être pris en considération lors de l'organisation des interventions de maintenance.

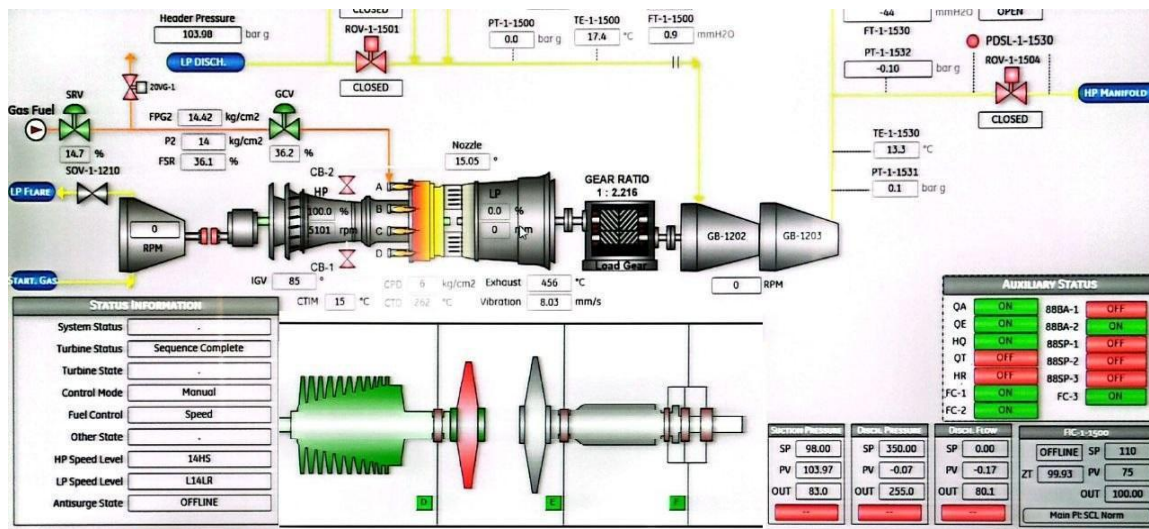


Figure 11. Le turbocompresseur : photo prise depuis la salle de contrôle

3.2.3 Conditions de fonctionnement : Les compresseurs étudiés fonctionnent en continu, 24 heures sur 24, dans des conditions caractéristiques de l'environnement saharien. Les installations sont soumises à des températures ambiantes élevées, pouvant atteindre environ 55 °C, ainsi qu'à une forte présence de sable et de poussière.

Ces conditions peuvent favoriser l'encrassement des filtres, réduire l'efficacité des échangeurs thermiques et accélérer la sollicitation de certains composants mécaniques et systèmes de lubrification. Elles rendent ainsi le suivi et la planification des opérations de maintenance particulièrement importants.

La maintenance repose notamment sur les heures de fonctionnement et sur l'état des équipements obtenu à partir des données de surveillance. Les interventions sont organisées en fonction des conditions opérationnelles et de la disponibilité des ressources humaines. Dans le cadre de l'étude, environ cinq techniciens sont affectés en moyenne à la maintenance des quatre stations étudiées, ce qui constitue une contrainte importante pour la planification des interventions.

3.3 Données de maintenance

La présente étude s'est appuyée sur un planning de maintenance préventive reconstitué à partir de l'expertise métier et des pratiques couramment appliquées sur le terrain, faute de disposer d'un historique complet et détaillé des opérations de maintenance programmées. Les données utilisées doivent donc être considérées comme représentatives plutôt qu'exactement descriptives de la réalité opérationnelle. Néanmoins, elles offrent un cadre pertinent pour analyser le comportement de l'algorithme génétique et évaluer son potentiel d'optimisation.

Les données utilisées sont simulées mais cohérentes avec les pratiques industrielles. Elles concernent 23 éléments critiques du système pour chaque station.

3.3.1 Table des paramètres

Table 2. Les données pour chaque équipement i

i	Element	Period (h)	Duration (h)	Workers
1	Contrôle et Inspection SC1	6000	15	5
2	Revision Partiale SC1	8000	20	5
3	Revision General SC1	10000	25	5
...			...	
92	Filters HP SC4	10000	3	3

3.3.2 Interprétation des paramètres

- **Period (h)** : période entre deux maintenances
- **Duration (h)** : durée d'intervention
- **Workers** : nombre d'ouvriers requis

3.3.3 Planning actuel

Le planning actuel de maintenance est principalement centré sur les grandes interventions programmées liées aux inspections majeures et aux opérations de révision des turbines. Ces opérations font généralement l'objet d'une organisation relativement rigoureuse en raison de leur impact direct sur la disponibilité des installations et sur la production.

En revanche, certaines opérations de maintenance préventive de moindre importance peuvent être retardées, reportées ou regroupées avec d'autres interventions selon les contraintes opérationnelles et les disponibilités des équipes techniques.

Dans la configuration actuelle, plusieurs interventions peuvent parfois être programmées simultanément sur différentes unités, ce qui engendre :

- un chevauchement des tâches ;
- une surcharge des équipes de maintenance ;
- des difficultés de coordination ;
- des retards dans l'exécution des opérations.

Cette situation devient particulièrement critique lorsque les besoins en main-d'œuvre dépassent les capacités disponibles des équipes techniques. Dans le cadre de cette étude, la limite maximale des ressources humaines mobilisables simultanément est fixée à huit techniciens.

L'objectif principal de l'optimisation proposée consiste donc à améliorer l'organisation temporelle des interventions afin :

- d'éviter les conflits de planification ;
- de limiter les surcharges des équipes ;
- de respecter les délais des opérations de maintenance ;
- d'améliorer la disponibilité globale des unités de compression.

3.3.4 Problèmes observés : Malgré l'existence d'un système structuré de maintenance et d'outils de surveillance des équipements, plusieurs difficultés organisationnelles continuent d'affecter l'efficacité globale des opérations de maintenance préventive.

Les principaux problèmes observés concernent essentiellement :

- le chevauchement des interventions techniques ;
- la mauvaise répartition des ressources humaines ;
- les reports fréquents des opérations préventives secondaires ;
- les contraintes liées à la disponibilité des équipements.

Ces difficultés peuvent entraîner :

- des retards dans l'exécution des interventions ;
- une augmentation des charges de travail ;
- une baisse de disponibilité des équipements ;
- une augmentation indirecte des coûts grâce aux systèmes de surveillance conditionnelle et aux inspections périodiques. Cependant, l'absence d'une optimisation efficace du planning de maintenance peut conduire à une utilisation non optimale des ressources disponibles et à une diminution progressive des performances opérationnelles de maintenance.

Les arrêts non planifiés restent relativement limités

3.4 Formulation mathématique du problème

3.4.1 Présentation du problème : Dans le cadre de la maintenance préventive industrielle, un ensemble d'équipements doit subir des interventions périodiques durant un horizon temporel donné. Chaque opération de maintenance nécessite :

- une périodicité fixe,

- une durée d'intervention,
- un nombre déterminé d'agents de maintenance.

L'objectif principal est d'établir une planification optimale des interventions de maintenance préventive en utilisant un Algorithme Génétique (AG), tout en respectant les contraintes de disponibilité des ressources humaines.

Le problème consiste donc à répartir les interventions sur l'horizon de planification de manière à éviter toute surcharge du personnel de maintenance

3.4.2 Définition des données et paramètres

Soit : $E = \{1, 2, \dots, n\}$

l'ensemble des équipements industriels.

Pour chaque équipement $i \in E$, on définit :

Table 3. Les paramètres pour chaque équipement i

Paramètre	Description
P_i	Périodicité de maintenance de l'équipement i (heures)
D_i	Durée d'intervention de maintenance
W_i	Nombre d'ouvriers nécessaires
O_i	Décalage initial (Offset)

L'horizon total de planification est défini par : $H=10000$

Le nombre total d'interventions associées à l'équipement i est : $N_i = \lfloor H/P_i \rfloor$

3.4.3 Génération des interventions périodiques

Les dates des interventions sont générées selon :

$$T_{i,k} = O_i + k \times P_i$$

avec :

$$k = 0, 1, 2, \dots, N_i$$

où :

- $T_{i,k}$ représente la date de début de la $k^{\text{ème}}$ intervention de l'équipement i .

3.4.4 Définition de la charge humaine

À chaque instant t , la charge humaine totale est donnée par :

$$R(t) = \sum_{i=1}^n \sum_{k=0}^{N_i} W_i \cdot x_{i,k}(t)$$

où :

$$x_{i,k}(t) = \{1 \text{ si l'intervention est active à l'instant } t \text{ 0 sinon}$$

Une intervention est considérée active si :

$$T_{i,k} \leq t < T_{i,k} + D_i$$

3.5 Contraintes & Fonctions

3.5.1 Contrainte de ressources humaines

Le nombre total d'ouvriers mobilisés simultanément ne doit jamais dépasser la capacité maximale disponible :

$$R(t) \leq 5$$

pour tout :

$$t \in [0, H]$$

3.5.2 Contrainte de périodicité

Les opérations de maintenance doivent respecter strictement leur périodicité.

Le retard et l'anticipation étant interdits, on impose :

$$T_{i,k+1} - T_{i,k} = P_i$$

3.5.3 Pénalisation des dépassements

Dans le cas où la charge humaine dépasse la limite autorisée, une pénalité est appliquée.

La surcharge à l'instant t est définie par :

$$Overload(t) = \max(0, R(t) - 5)$$

La pénalité totale devient :

$$Penalty = \sum_{t=0}^H Overload(t)$$

3.5.4 Fonction objectif

L'objectif du problème consiste à minimiser les surcharges humaines sur l'ensemble de l'horizon de planification.

La fonction objectif est donc :

$$\min F$$

avec :

$$F = \sum_{t=0}^H \max(0, R(t) - 5)$$

3.5.5 Fonction de fitness

Dans l'Algorithme Génétique, la fonction de fitness évalue la qualité de chaque solution.

Comme l'objectif est une minimisation, la fitness peut être définie par :

$$Fitness = \frac{1}{1 + F}$$

Ainsi :

- plus la surcharge est faible,
- plus la fitness est élevée.

La solution optimale correspond à : $F = 1$

3.5.6 Variables de décision

Les variables de décision du problème sont les offsets initiaux : O_i pour chaque équipement i .

Ces variables déterminent la position temporelle des interventions périodiques.

3.5.7 Représentation du chromosome

Chaque chromosome représente un ensemble d'offsets :

$$Chromosome = [O_1, O_2, \dots, O_n]$$

Exemple :

$$[120, 45, 300, 78, \dots]$$

où :

- Chaque gène correspond au décalage initial d'un équipement.

3.6 Application de l'algorithme génétique

3.6.1 Codage de la solution

Dans cette étude, chaque solution potentielle est représentée sous forme d'un chromosome contenant les dates planifiées des différentes opérations de maintenance ainsi que l'organisation des interventions sur les unités de compression.

Chaque gène représente une tâche de maintenance associée à :

- l'élément ;
- une date d'intervention ;
- une durée estimée ;
- un besoin en ressources humaines.

3.6.2 Paramètres de l'algorithme

L'algorithme génétique développé utilise plusieurs paramètres permettant d'assurer une exploration efficace de l'espace des solutions. Les principaux paramètres utilisés sont :

- la taille de la population ;
- le taux de mutation ;
- le taux de croisement ;
- le nombre maximal d'itérations.

Les valeurs exactes de ces paramètres ont été ajustées expérimentalement afin d'obtenir un compromis satisfaisant entre qualité des solutions et temps de calcul.

3.6.3 Opérateurs génétiques utilisés

L'algorithme génétique repose principalement sur trois opérateurs fondamentaux :

- **Sélection** : utilisée pour choisir les meilleures solutions selon leur aptitude ;
- **Croisement** : permettant de combiner deux solutions afin de produire de nouveaux plannings ;
- **Mutation** : introduisant des modifications aléatoires afin de diversifier la recherche et éviter les minima locaux.

Ces opérateurs permettent une amélioration progressive des solutions au cours des générations successives.

3.6.4 Processus d'exécution

Le processus général d'exécution de l'algorithme génétique se déroule selon les étapes suivantes :

1. génération aléatoire d'une population initiale ;
2. évaluation de chaque solution par la fonction objectif ;
3. sélection des meilleures solutions ;
4. application des opérateurs de croisement et de mutation ;
5. génération d'une nouvelle population ;
6. répétition du processus jusqu'au critère d'arrêt défini.

Les résultats obtenus sont ensuite analysés à l'aide des diagrammes de Gantt et des indicateurs de performance afin de comparer le planning optimisé avec le planning initial de maintenance.

3.7 Résultats et analyse

3.7.1 Convergence

La courbe de fitness montre :

- une amélioration rapide au début
- Nous constatons que la rapidité avec laquelle les résultats sont obtenus varie d'une expérience à l'autre, ce qui s'explique par le caractère aléatoire de l'algorithme, ainsi que par le coefficient de mutation, la sélection et d'autres facteurs.
- une stabilisation après ~ 30 ~ 40 générations

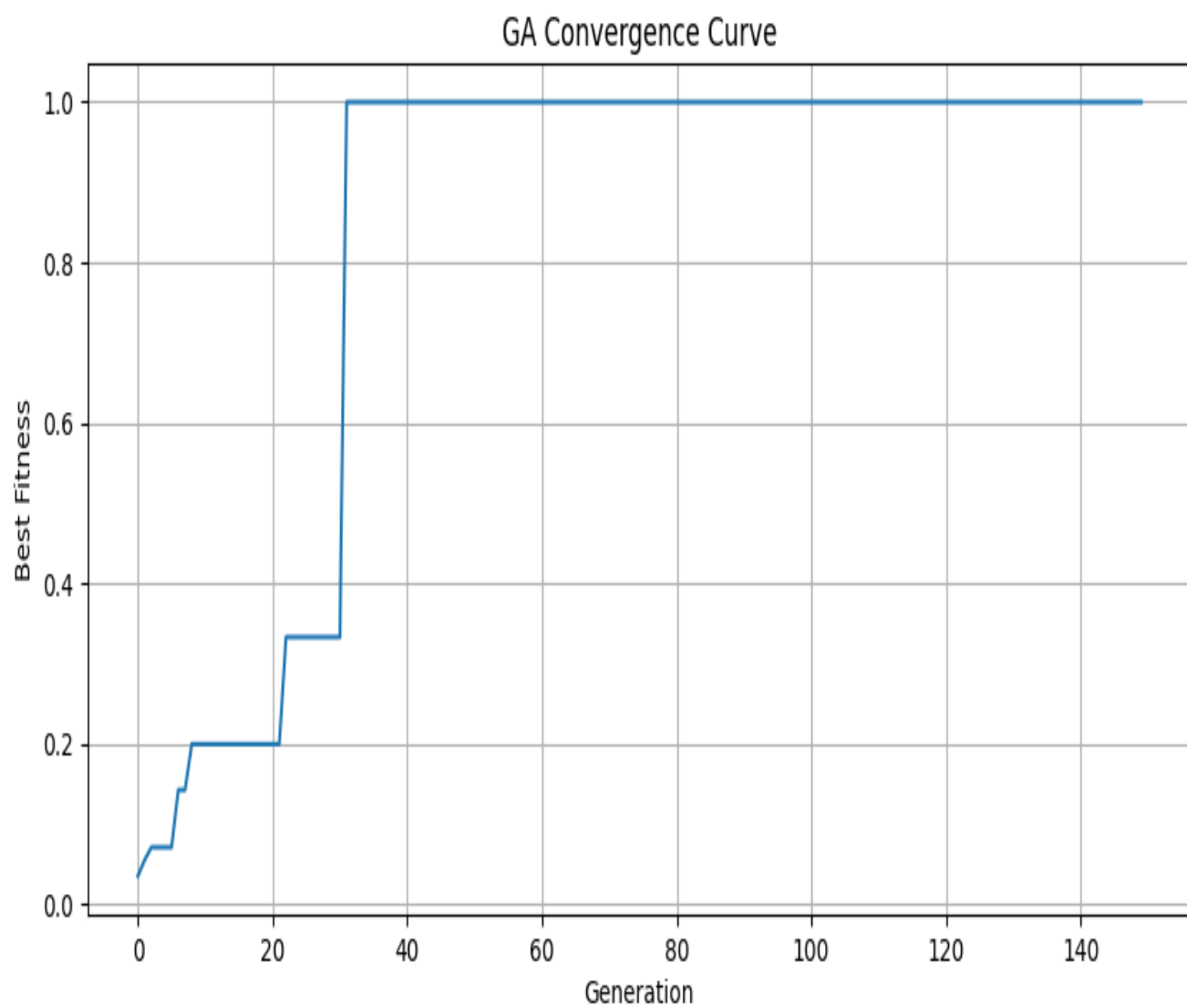


Figure 12. La courbe de Convergence

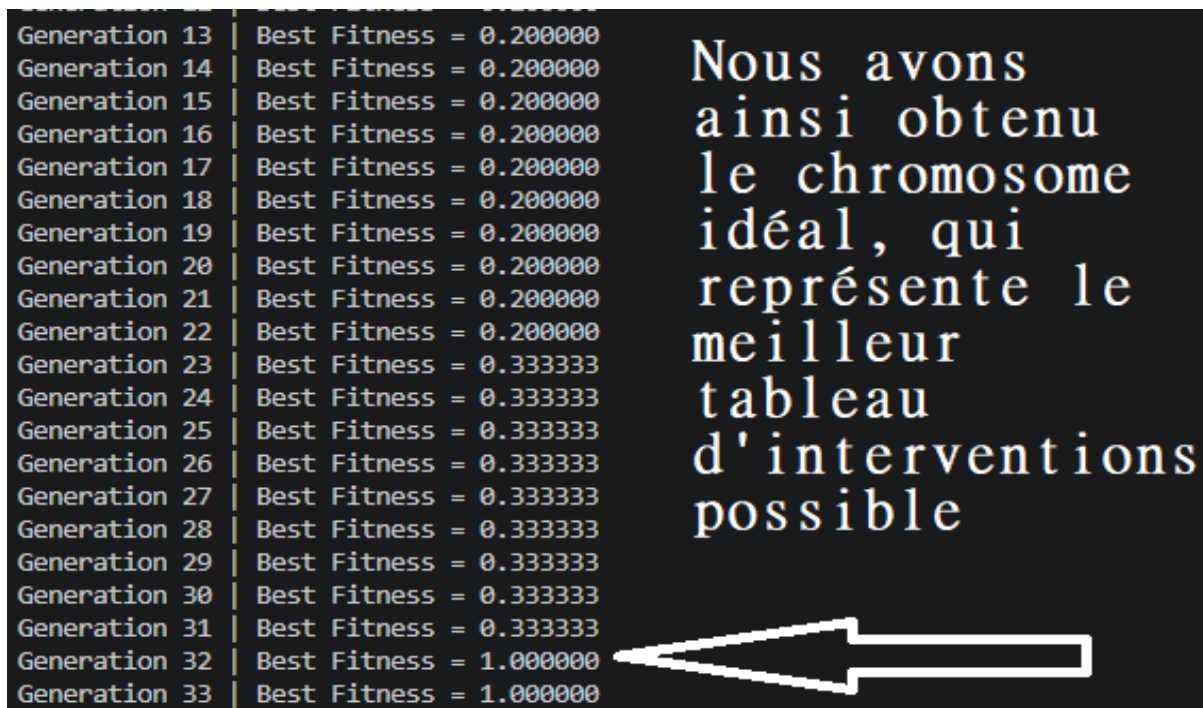


Figure 13. La stabilisation de Fonction de fitness

3.7.2 Planning optimal

- Nous avons veillé à résoudre le problème de l'encombrement des plannings d'entretien préventif, et les résultats montrent que l'algorithme a parfaitement réussi à résoudre ce problème, comme en témoignent clairement les tableaux Gantt Chart, reconnus et adoptés dans le monde de la maintenance
- Malgré les résultats satisfaisants qui apparaissent dans les tableaux Gantt Chart, ces derniers ne sont pas pratiques dans le cadre d'une planification à long terme, car D_i/P_i est très proche de 0 et les résultats ne s'affichent donc pas de manière pratique
- C'est pourquoi nous avons décidé, à l'aide d'un programme Python, d'afficher les résultats sous la forme d'une liste classée par ordre chronologique, comprenant : l'élément / la date de début de l'intervention / la date de fin de l'intervention / le nombre de travailleurs requis .
- Afin que cette liste soit pratique pour la gestion des équipes d'intervention et de maintenance, le programme a généré la liste sous forme de tableau au format xlsx

Preventive Maintenance Schedule

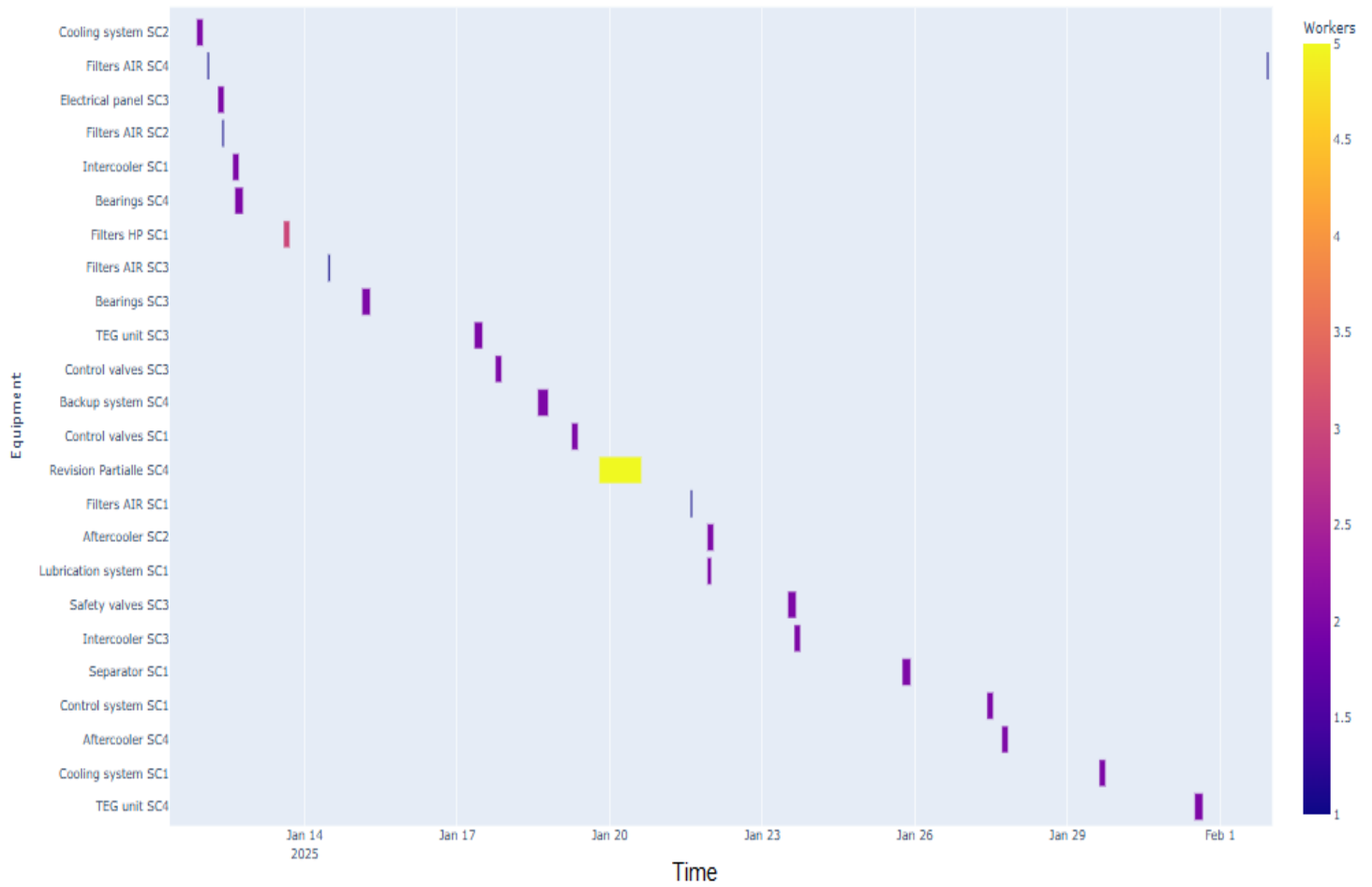


Figure 14. le tableau Gantt Chart

Table 4. tableau d'intervention

Element	Start	Finish	Workers
Intercooler SC3	58	61	2
Anti-surge system SC2	68	71	2
Intercooler SC4	108	111	2
Filters AIR SC2	137	138	1
Filters AIR SC3	163	164	1

.....			
Intercooler SC2	47951	47954	2
Filters AIR SC3	47956	47957	1

3.8 Comparaison avec méthode classique

Table 5. Comparaison avant et après l'utilisation de l'AG

Méthode	l'encombrement	Retard
Classique	élevé	élevé
Algorithme génétique	faible	très faible

3.9 Interprétation des résultats

Les résultats obtenus montrent que l'application de l'algorithme génétique permet une amélioration significative de la planification de la maintenance.

Les principaux constats sont les suivants :

- Une **réduction claire des chevauchements d'interventions**, ce qui limite les conflits de ressources humaines
- Une **meilleure gestion de la contrainte des 8 techniciens**, évitant les périodes de surcharge
- Une **réduction des retards de maintenance préventive**, grâce à une meilleure organisation temporelle
- Une **amélioration globale de la disponibilité des unités de compression**

Ainsi, l'algorithme génétique démontre sa capacité à produire des solutions viables respectant les contraintes industrielles tout en améliorant la qualité de la planification.

3.10 Conclusion

- Ce chapitre a été consacré à l'étude de cas relative à l'optimisation de la planification de la maintenance préventive d'un parc de compresseurs centrifuges. Dans un premier temps, les caractéristiques du parc ainsi que les données nécessaires à la

modélisation du problème ont été présentées. En raison de l'indisponibilité d'un historique complet et exploitable des interventions, les données utilisées dans cette étude ont été reconstituées de manière cohérente avec les pratiques de maintenance et les contraintes du contexte industriel étudié.

- Ensuite, le problème de planification a été formulé en tenant compte des principales contraintes liées aux interventions de maintenance, notamment la disponibilité des ressources humaines, la durée des opérations et la nécessité d'éviter les chevauchements susceptibles de dépasser la capacité disponible. Un algorithme génétique a ensuite été appliqué afin de rechercher une organisation optimisée des interventions sur l'horizon de planification considéré.
- Les résultats obtenus montrent que l'approche proposée permet d'améliorer la répartition des interventions et de mieux exploiter les ressources disponibles, tout en respectant les contraintes définies dans le modèle. La comparaison avec le planning initial met ainsi en évidence l'intérêt de l'utilisation des algorithmes génétiques pour traiter un problème de planification comportant plusieurs contraintes.
- Enfin, il convient de préciser que, dans une application industrielle réelle, la planification de la maintenance préventive ne doit pas être considérée comme une simple génération de dates à partir de périodicités fixes. La programmation d'une intervention doit tenir compte de l'état initial réel de chaque équipement ou composant, de son historique de maintenance et de son temps de fonctionnement depuis la dernière intervention. Ainsi, le remplacement d'un élément tel que l'huile, un roulement ou une pièce d'usure ne peut être programmé de manière arbitraire, mais doit être établi à partir des informations disponibles sur son état et ses conditions de fonctionnement.
- De plus, l'échéance théorique d'une opération de maintenance préventive peut, selon la nature de l'intervention et les conditions d'exploitation, être associée à une fenêtre d'intervention permettant une certaine flexibilité dans la planification. Par exemple, lorsqu'un remplacement d'huile est prévu à 10 000 heures de fonctionnement, l'intervention peut, si les conditions techniques le permettent, être légèrement différée afin de tenir compte des contraintes d'exploitation et de disponibilité des ressources, sans dépasser une limite maximale admissible, fixée par exemple à 11 000 heures. Cette flexibilité permet ainsi d'adapter le planning aux conditions réelles du système tout en maintenant les exigences de sécurité, de fiabilité et de maintenance.