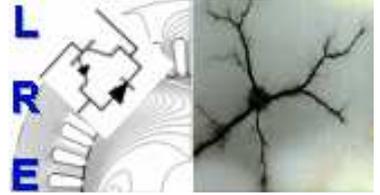




Ecole Nationale Polytechnique  
Département d'Electrotechnique  
Laboratoire de Recherche en Electrotechnique



## Mémoire de Master en Electrotechnique

Présenté par :  
**SMARA Anis**

# Application des métaheuristiques de l'intelligence en essaim au diagnostic de l'huile de transformateurs.

Directeur(s) du mémoire :

Pr. Ahmed BOUBAKEUR

**ENP 2012**

# Table des matières

Introduction Générale.....	1
Références bibliographiques.....	3
Chapitre 1 : Généralités sur les huiles diélectriques pour les transformateurs de puissance	
1.1 Généralités .....	5
1.2. Catégories des huiles diélectriques :.....	5
1.3. L'huile minérale isolante :.....	5
1.4. Propriétés des huiles minérales isolantes :.....	6
1.4.1. Les propriétés électriques :.....	6
1.4.1.1. Rigidité diélectrique :.....	6
1.4.1.2. La permittivité diélectrique ou constante diélectrique.....	6
1.4.1.3 .Le facteur de dissipation diélectrique ( $\text{tg } \delta$ ) : .....	6
1.4.2. Les propriétés physiques:.....	7
1.4.2.1. La viscosité :.....	7
1.4.2.2. Point d'éclair et point de feu :.....	7
1.4.2.3. Aspect et indice couleur :.....	7
1.4.3. Les propriétés chimiques :.....	8
1.4.3.1. L'acidité totale :.....	8
1.4.3.2. L'oxydation :.....	8
1.4.3.3. La teneur en eau :.....	8
1.5. Altération des huiles en service :.....	9
1.6. L'importance de l'huile pour la maintenance et le diagnostic :.....	9
1.7. Traitement :.....	11
1.8. Références bibliographiques :.....	12

Chapitre 2 : Application de l'algorithme ACO au diagnostic de l'huile de transformateurs.

Introduction.....13

2.1. Formulation du problème de diagnostic par l'ACO.....14

2.2 Organigramme explicatif des différentes étapes de l'optimisation  
par colonies de fourmis .....15

2.3. Résultats de l'ACO sur un ensemble d'échantillons :.....16

3.4. Discussion :.....19

2.5. L'Algorithme RWS « the roulette wheel selection »:.....19

2.6. Résultats de L'ACO amélioré par le RWS :.....19

2.7. Interprétation et amélioration :.....22

2.8 Conclusion :.....27

Références :.....27

Chapitre 4 : Application de l'algorithme BCO au diagnostic de

l'huile de transformateurs.....28

3.1. Description de l'algorithme :.....29

3.2. Formulation du problème de diagnostic de l'huile de transformateurs  
par le BCO :.....30

3.3 Organigramme explicatif des différentes étapes de l'optimisation  
par le BCO :.....31

3.4. Les résultats de diagnostic:.....32

3.5. Comparons les résultats obtenus à ceux de l'ACO : .....33

3.6. Conclusion.....	33
Références:.....	33
Chapitre 5 : Diagnostic par l’algorithme hybride.....	34
4.1. La combinaison des algorithmes ACO et BCO :.....	35
4.2. L’algorithme hybride ACO/BCO :.....	35
4.3. Organigramme explicatif de l’algorithme hybride :.....	36
4.4. Résultats :.....	37
4.5. La notion de la solution exacte :.....	39
4.6. L’ajustement des paramètres de l’ACO et du système hybride:.....	40
4.7. Comparaison :.....	40
4.8. Conclusion :.....	41
Références :.....	41
Conclusion générale.....	42
Annexes .....	43

---

# INTRODUCTION GENERALE

---

La demande croissante en électricité impose aux entreprises de production, de transport et de distribution de l'énergie électrique un service permanent, surtout en ce qui concerne les infrastructures stratégiques comme les postes. Une interruption de l'alimentation peut leur causer des dégâts irrémédiables. Les interruptions électriques sont généralement causées par la détérioration des équipements électriques, en particulier les transformateurs. [1]

Les transformateurs électriques jouent un rôle majeur dans la distribution et la transmission de l'électricité. Ils subissent régulièrement des défaillances techniques et peuvent exploser. Quand de telles avaries se produisent, la vie des personnes est mise en danger et les conséquences financières pour les sociétés d'électricité sont considérables. Ces accidents sont favorisés par l'accroissement régulier de la consommation. [1]

En effet, durant ces dernières années, la production de l'énergie électrique augmente considérablement dans le monde. En février 2012, la consommation de l'électricité en Algérie a atteint un record historique en hiver de 8712 MW, conséquence du grand froid qui s'est étendu sur le pays depuis le début du mois de février. [2]

Cette évolution représente pour les anciens transformateurs de puissance une surcharge, d'autant plus que l'âge de la plupart dépasse les 20 ans [3]. Ceci provoque leur dégradation. Les pertes engendrées par les avaries des transformateurs mettent l'accent sur la nécessité de trouver des méthodes préventives permettant de les réduire sans causer l'arrêt inutile des installations. Ces méthodes doivent être assez efficaces pour permettre d'agir avant que l'accident ne survienne.

L'huile minérale constitue le liquide le plus communément employé dans les transformateurs de puissance, d'une part pour ses propriétés physico-chimiques et d'autre part pour son faible coût. La surveillance de l'état de l'huile de transformateur en service est un moyen de prévention efficace. Elle peut renseigner sur l'état intérieur de la partie active. [3]

Pour assurer ses rôles, l'huile diélectrique doit être conforme aux recommandations des normes. Des diagnostics fiables de l'huile s'imposent. L'application de tels diagnostics exige beaucoup d'expérience. Pour permettre à des ingénieurs inexpérimentés de s'approcher de la qualité de diagnostic des experts, de nombreuses études ont été entreprises pour développer des systèmes intelligents d'aide à la décision. Le recours à de tels systèmes peut présenter des avantages, notamment le temps de réponse. [4]

L'optimisation par des métaheuristiques inspirées de l'intelligence en essaim constitue une technique prometteuse dans le domaine du diagnostic et de la surveillance des systèmes industriels [5]. Leur usage récemment entrepris a procuré des résultats acceptables et leur réussite largement constatée dans d'autres domaines, notamment le biomédical et les

télécommunications [5], nous a incité à les appliquer au problème de diagnostic de l'huile de transformateurs de puissance. La combinaison de quelques techniques permet de réunir leurs avantages et de pallier leurs inconvénients, on parle alors des algorithmes hybrides.

Le travail, réalisé dans le cadre de ce projet de fin d'études, consiste à l'application de deux algorithmes issus de l'intelligence en essaim, ACO et BCO (Ant Colony Optimisation et Bee Colony Optimisation) au problème d'optimisation que constitue le diagnostic de l'huile de transformateurs. Une comparaison, à travers l'étude des paramètres de ces algorithmes, permet d'élucider les avantages et les inconvénients de chaque technique. Nous proposons alors, une structure hybride permettant d'offrir un meilleur diagnostic. [6]

Ce mémoire est réparti en cinq chapitres :

Le premier chapitre expose des généralités sur les huiles diélectriques pour transformateurs de puissance. L'huile minérale isolante comme la BORAK 22 utilisée par la SONELGAZ est mise en exergue. On présente aussi des notions fondamentales de maintenance et de diagnostic de telles huiles, surtout les méthodes de détermination de leurs propriétés physico-chimique selon les normes CEI recommandées. [4]

Le second chapitre est consacré à une présentation du domaine de l'intelligence en essaim et les grands principes du comportement collectif ainsi que de brèves notions sur les problèmes d'optimisation dits difficiles. Les concepts de l'optimisation par colonie de fourmis et par colonie d'abeilles seront développés en partant de l'inspiration biologique au modèle mathématique.

Le troisième chapitre et le quatrième chapitre consistent à une application de l'algorithme de colonie de fourmis ACO et de l'algorithme d'optimisation par colonie d'abeilles BCO au diagnostic de l'huile de transformateur ; l'adaptation et les résultats de programmation y seront décrits.

Dans le cinquième chapitre, nous proposons une méthode hybride des deux approches précédentes tout en analysant ses performances et effectuant une étude comparative des différents algorithmes adoptés au diagnostic, qui résume l'influence des paramètres algorithmiques sur ces systèmes.

Nous concluons ce mémoire par un récapitulatif des techniques étudiées, une évaluation des résultats obtenus ainsi que les perspectives envisagées.

### **Références bibliographiques:**

[1] **N. Rolland, P. Magnier**, " Explosions et Incendies de Transformateurs", Méthode d'Evaluation des Coûts, Paris, France, 2002, pp. 7-15.

[2] **M. Ait-Mekideche**, "Record historique de la consommation électrique en hiver", Bulletin des Energies Renouvelables N° 22, Publication du CDER, Algérie, 2012, pp.30-31.

[3] **C. Perrier**, "Étude des huiles et des mélanges à base d'huile minérale pour transformateurs de puissance – recherche d'un mélange optimal", Thèse de Doctorat, École Centrale de Lyon, France, Avril 2005, pp. 1.5

[4] **N.Aouchar, C.Bekhaled**, "Application des systèmes hybrides neuro-flous au diagnostic des huiles de transformateur", Projet de Fin d'Études, Département Génie électrique, Ecole Nationale Polytechnique, Alger, 2005, pp. 45-50.

[5] **E. BONABEAU, G. THÉRAULAZ**, "L'intelligence en essaim", Pour La Science, N° 271, Paris, France, Mai 2000, pp. 66-70.

[6] **L.P. Wong, M.Y. Low, C.S. Chong**, "Bee Colony Optimization with Local Search for Traveling Salesman Problem", Singapore Institute of Manufacturing Technology, Singapore, 2010, pp 1-7.

---

# **Chapitre 1**

---

## **Généralités sur les huiles diélectriques pour les transformateurs de puissance**

---

# Chapitre I

---

## **1.1. Généralités :**

Les huiles isolantes sont utilisées en électrotechnique comme imprégnant d'isolations solides ou comme produits de remplissage de matériels électriques très divers: transformateurs (de puissance, de distribution, de traction, de four, de mesure...), réactances, condensateurs, câbles, traversées, disjoncteurs, changeurs de prise...etc.

Leur rôle principal est d'éliminer l'air et les autres gaz de façon à améliorer la tenue diélectrique de l'isolation solide, sachant que la rigidité diélectrique des liquides est nettement supérieure à celle des gaz.

Les isolants diélectriques sont indispensables dans tous les équipements électriques. Leur performance doit s'accroître en fonction de la contrainte électrique à laquelle ils sont soumis. Leur rigidité diélectrique doit être d'autant plus élevée que la tension appliquée l'est. Les diélectriques utilisés en haute tension appartiennent aux trois grandes catégories suivantes :

- les isolants gazeux : l'air, certains gaz électronégatifs (SF<sub>6</sub>, N<sub>2</sub> ... etc.) ;
- les isolants liquides : la grande gamme des huiles diélectriques : minérales ... etc.
- les isolants solides : les matériaux synthétiques (PVC), le papier ... etc.

La perte de la rigidité d'un isolant électrique se traduit par son claquage. Pour l'éviter, il faut assurer un bon suivi de la performance de ces isolants. Les normes indiquent les procédures à suivre ainsi que les caractéristiques tolérées pour chaque type d'isolant. [1.1]

## **1.2. Catégories des huiles diélectriques :**

D'une manière globale, et d'après une classification selon l'origine, il existe trois types de liquides isolants :

- Les **huiles minérales** sont des produits « naturels » obtenus directement par raffinage de bruts pétroliers.
- Les **huiles végétales** sont également des produits « naturels ». Leur composition est plus simple (quelques dizaines de produits).
- Les **liquides de synthèse** ont, au contraire, une composition simple, bien définie. Leurs propriétés sont donc constantes. [1.2]

## **1.3. L'huile minérale isolante :**

90 à 95 % du marché des liquides isolants est couvert par les **huiles minérales** (marché mondial 1 000 000 t/an). Cette prépondérance s'explique par le faible coût de ces produits, obtenus directement à partir des bruts pétroliers. [1.2]

# Chapitre I

---

## **1.4. Propriétés des huiles minérales isolantes :**

Les huiles isolantes pour transformateurs, quelque soit leur type, doivent toujours répondre à plusieurs critères électriques, physico-chimiques et thermique, qui constituent l'ensemble de leurs propriétés, afin d'assurer leur deux principales fonctions qui sont l'isolation électrique et le transfert de chaleur.

A ce titre, les propriétés d'une huile isolante peuvent être :

- Les propriétés électriques;
- Les propriétés physiques ;
- Les propriétés chimiques. [1.3]

### **1.4.1. Les propriétés électriques :**

#### **1.4.1.1. Rigidité diélectrique :**

La rigidité diélectrique d'une huile est la valeur maximale du champ électrique moyen que l'on peut lui appliquer sans décharge disruptive. [1.4]

Dans l'industrie, elle est maximisée conventionnellement par la tension efficace nécessaire pour provoquer, dans des conditions normalisées, le claquage d'un volume de liquide compris entre deux électrodes dont la forme, la distance et la nature font l'objet d'une norme (la CEI 156). Ce paramètre est connu sous le nom de tension de claquage.

La norme CEI 296 recommande, pour les huiles traitées, une tension de claquage qui soit supérieur à 50 kV. [1.4]

#### **1.4.1.2. La permittivité diélectrique ou constante diélectrique :**

C'est une caractéristique électrique liée à la formation du liquide, elle dépend essentiellement de sa structure chimique. Pour une huile diélectrique, elle résulte des phénomènes de polarisation électronique et atomique. [1.5]

Elle est définie comme étant le rapport de la capacité ( $C$ ) d'une cellule remplie de liquide et la capacité ( $C_v$ ) de la même cellule ayant le vide comme diélectrique:

$$\epsilon_r = \frac{C}{C_v}$$

Une bonne huile minérale possède une constante électrique comprise entre 2 et 2.2 [1.5]

#### **1.4.1.3. Le facteur de dissipation diélectrique ( $\text{tg } \delta$ ) :**

Sous tension alternative sinusoïdale de fréquence  $f$  et de pulsation  $\omega = 2\pi f$ , les pertes par conduction sont caractérisées par la **tangente de l'angle de perte**  $\delta$ , ou **facteur de dissipation** (le déphasage entre courant et tension étant :  $\pi/2 - \delta$ ) tel que :

# Chapitre I

---

$$\tan \delta = \sigma / (\varepsilon \varepsilon_0 \omega) = 1 / (\varepsilon \varepsilon_0 \rho \omega)$$

Elle permet d'apprécier la pureté d'une huile et dépend de la température et de la fréquence de la tension appliquée. D'après la norme CEI 296, une huile neuve possède un facteur de dissipation au plus égale à 0.005. [1.4]

## **1.4.2. Les propriétés physiques:**

### **1.4.2.1. La viscosité :**

Elle traduit les forces qu'opposent les molécules d'huile à une force tendant à les déplacer. En d'autres termes, elle mesure les frottements dus aux mouvements internes entre les molécules du fluide. Il existe deux types de viscosité : la viscosité dynamique (en poise) qui visualise l'aspect microscopique et la viscosité cinématique (en centi stockes : cst) qui est la plus importante car elle traduit l'aspect macroscopique.

La viscosité, et sa variation avec la température, sont des paramètres de première importance pour le transfert thermique. En effet, plus le liquide est visqueux, plus il est difficile de le faire circuler dans l'appareil pour refroidir les parties actives chaudes. [1.6]

La norme CEI 296 définit une bonne viscosité cinématique comme étant inférieure à 11 Cst (à 40°C). Cst : viscosité en centistokes. [1.6]

### **1.4.2.2. Point d'éclair et point de feu :**

Le chauffage progressif d'un liquide provoque le dégagement de vapeurs suivant sa courbe de tension de vapeur, qu'il s'agisse d'un corps pur ou d'un mélange. Dès que la concentration de ces vapeurs dans l'atmosphère surmontant le liquide devient suffisante pour former un mélange inflammable, elles brûlent à l'approche d'une flamme. La température correspondante est appelée le point d'éclair du liquide.

En poursuivant le chauffage, l'expérience montre qu'une combustion permanente s'établit en présence d'une flamme à partir d'une certaine température qui correspond au point de feu du liquide. Les liquides ininflammables n'ont pas de point de feu. [1.6]

### **1.4.2.3. Aspect et indice couleur :**

L'aspect est un test visuel de l'huile qui permet de détecter la présence des corps en suspension (poussière, humidité) et d'évaluer la couleur et la viscosité. Un bon état visuel de l'huile, signifie un aspect limpide.

La couleur est une propriété intrinsèque de l'huile neuve, elle a une relation avec les hydrocarbures qui constituent l'huile. Elle permet d'apprécier la qualité des huiles neuves et constitue un moyen efficace pour surveiller l'acidité des huiles en service. Elle renseigne également sur le vieillissement de l'huile.

# Chapitre I

---

Une huile neuve possède un indice de couleur inférieur à 0.5. Pour une huile régénérée, la norme ASTM D 1500, tolère un indice de couleur inférieur à 2. [1.6]

## **1.4.3. Les propriétés chimiques :**

### **1.4.3.1. L'acidité totale :**

L'acidité représente les dérivés acides formés au cours du vieillissement de l'huile. Sa détermination procure le moyen le plus direct pour apprécier et suivre l'altération de l'huile. Elle est exprimée par la mesure de l'indice d'acidité qui est le nombre de mg de KOH normale nécessaires pour neutraliser un gramme d'huile. [1.6]

L'acidité d'une huile neuve est très faible en service. Elle est de l'ordre de 0.02 à 0.03 mg de KOH/g d'huile en service [1.7]. Aux premiers stades d'oxydation, elle augmente pour atteindre, après un certain temps de service, une valeur où elle reste constante.

### **1.4.3.2. L'oxydation :**

C'est un ensemble de réactions chimiques lentes au sein du liquide qui sont dues à une température de service élevée. Dans ces conditions de température, le fer et le cuivre jouent un rôle de catalyseurs favorisant ainsi le processus d'oxydation de l'huile. Ces réactions en chaîne donnent naissance à des produits acides et à des produits de décomposition dissous dans l'huile (alcools, aldéhydes et acides). Leur propriété polaire a pour conséquence directe l'augmentation des pertes diélectriques et de l'acidité de l'huile. L'oxydation des huiles engendre également un accroissement de la viscosité et défavorise donc l'évacuation de la chaleur. Elle conduit également à la décomposition du papier isolant des enroulements et par conséquent à la formation de boues. [1.7]

### **1.4.3.3. La teneur en eau :**

L'eau est un puissant catalyseur qui favorise l'altération de l'huile. Elle influe sensiblement sur ses autres caractéristiques. C'est un polluant indésirable qu'il faut éliminer. La norme CEI 296 tolère une teneur en eau maximale de 30 p.p.m (partie par million d'unité). [1.8]

Cependant, quelque soient les précautions prises, de l'eau réussit toujours à s'infiltrer à travers l'appareillage. Pour minimiser ces infiltrations, la plupart des transformateurs sont munis de tamis moléculaires (Silica Gel). Un diélectrique très chargé en humidité peut assurer un fonctionnement électrique (même s'il est mauvais) tant que sa température assure une solubilité suffisante car ce qui constitue un danger réel pour l'huile c'est la présence d'eau sous sa forme liquide [1.9]

# Chapitre I

---

## **1.5. Altération des huiles en service :**

En service, l'huile quelque soit sa qualité et sa stabilité, qu'elle soit inhibée ou non, finit par s'oxyder et s'altérer. Le maintien de l'huile altérée en exploitation peut constituer un danger potentiel. L'altération de l'huile se traduit par l'oxydation de cette dernière et par une augmentation accentuée de son acidité.

### **Facteurs favorisant l'altération de l'huile minérale isolante :**

Les contaminants d'une huile minérale isolante usagée peuvent se diviser en trois grandes classes. [1.14]

#### ✓ **Produits volatils :**

Les produits volatils les plus communs des huiles en service sont :

- a. L'eau :
- b. L'air :
- c. Gaz dissous :

#### ✓ **Produits insolubles dans l'huile minérale isolante,**

#### ✓ **Produits solubles dans l'huile minérale isolante. [1.10]**

## **1.6. L'importance de l'huile pour la maintenance et le diagnostic :**

Les propriétés de l'huile d'un transformateur permettent de définir un [plan de maintenance](#) adapté à l'état de santé de l'appareil. En effet, la composition chimique de l'huile évolue avec le temps et le vieillissement de l'appareil notamment de sa partie active.

Une petite quantité d'huile prélevée puis analysée en laboratoire permet d'avoir à moindre frais une bonne vision:

- Des propriétés isolantes de l'huile
- De la présence d'humidité dans les papiers
- Du vieillissement de la partie active
- De la présence d'éventuels défauts électriques ou thermique à l'intérieur du transformateur

Le diagnostic permet de déterminer l'état interne du transformateur et de reconnaître la cause de ses défaillances, La décision du maintien du transformateur en exploitation est prise suivant les recommandations des normes (Tableau ci-après), les connaissances préalablement acquises et l'expérience : [1.4]

Propriété	Norme
Indice de couleur	$\leq 2$
Pertes diélectriques	$< 0,9$
Indice d'acidité [mg KOH/g]	$< 0,1$
Viscosité cinématique [CST]	$\geq 12,5$
Rigidité diélectrique [kV/cm]	$\geq 50$
Teneur en eau [ppm]	$< 40$

**Tableau 1.1:** Les normes recommandées par la CEI pour les huiles des transformateurs ayant une tension comprise entre 72kV et 170kV [1.4].

Les méthodes de diagnostic sont nombreuses. Pour la détermination des avaries des transformateurs, il existe deux approches.

La première est basée sur l'analyse des gaz dissous dans l'huile. Elle est efficace pour la prévention des accidents car elle renseigne sur l'état de dégradation de l'huile et celui de l'appareil qui la contient. Elle comporte trois phases successives : l'échantillonnage de l'huile, l'extraction des gaz et ensuite leur analyse. Pour l'interprétation des analyses de gaz dissous, il existe plusieurs méthodes d'interprétations: la méthode CEI 60599, la méthode de Deneubourg, le triangle de DUVAL, la méthode de ROGERS, la méthode de quotient et la méthode du spectre de gaz.

Il est possible de déterminer l'état interne d'une huile à partir des résultats obtenus des six tests normalisés (norme CEI 60 296) cités dans le tableau I.5. [1.4]

A partir de leurs valeurs, l'huile est classée en une des quatre catégories suivantes :

## **1- Les huiles neuves :**

Leurs caractéristiques sont les suivantes :

- permittivité 2,1 – 2,5 à 90°C.
- résistivité 20 – 200 GΩm à 90°C.
- rigidité diélectrique 30 - 50 kV/cm.
- facteur de dissipation 0,001-0,005 à 90°C.

## **2- Les huiles faiblement polluées :**

Elles se caractérisent par de bonnes valeurs physico-chimiques et une tension de claquage faible. Elles nécessitent un traitement physique (filtrage et séchage).

# Chapitre I

---

## **3- Huiles moyennement contaminées :**

Ces huiles nécessitent un traitement chimique (régénération) suivi d'un traitement physique, elles ont les caractéristiques suivantes :

- indice de couleur 2-4 ;
- indice d'acidité 0,03-0,04 g KOH/g ;
- facteur de dissipation 0,005-0,05. [1.4]

## **4- Les huiles en dégradation avancée :**

Leurs caractéristiques sont très éloignées des valeurs recommandées par les normes. Leur récupération est possible mais elle serait plus coûteuse que leur remplacement. [1.6]. Une décision du type de traitement est prise selon les catégories ci-dessus, comme suit :

→ garder l'huile, la filtrer, la régénérer ou la jeter.

## **1.7. Traitement :**

Le traitement des huiles isolantes permet l'élimination, par voie physique exclusivement, des particules solides de l'huile et de diminution de la teneur en eau à un niveau acceptable.

Les moyens physiques utilisés pour éliminer l'eau et les particules solides de l'huile consistent en plusieurs types de filtration, de centrifugation et de procédés de séchage sous vide. Si le traitement sous vide n'est pas employé, il est conseillé de limiter la température à 60°C. Si le vide est appliqué, des températures plus élevées peuvent être avantageuses. [1.6]

Le traitement de l'huile neuve ou peu vieillie comporte l'élimination des constituants suivants:

- ✓ Impuretés solides.
- ✓ Eau libre ou dissoute.
- ✓ Air dissous.

La filtration, le dégazage et le séchage des huiles isolantes permettent d'augmenter notablement la rigidité diélectrique et d'améliorer le facteur de pertes  $\tan \delta$ . Ce dernier n'est amélioré que dans la mesure où il dépend de la teneur en eau.

Le séchage et le dégazage de l'huile réduisent aussi la teneur en eau du papier. [1.10]

# Chapitre I

---

## **1.8. Références bibliographiques :**

[1.1] **N. Berger**, "Liquides isolants en électrotechnique, présentation générale", Technique de l'ingénieur D 2 470, Service Sécurité ATOFINA, centre de recherche Rhône-Alpes, 2002, pp. 1-19.

[1.2] **N. Berger**, "Liquides isolants en électrotechnique, Caractéristiques des produits", Techniques de l'Ingénieur D 2 471, France, Mai 2002, pp. 1-25.

[1.3] **C. Perrier**, "Étude des huiles et des mélanges à base d'huile minérale pour transformateurs de puissance – recherche d'un mélange optimal", Thèse de Doctorat, École Centrale de Lyon, France, Avril 2005, pp. 27-85.

[1.4] **N.Aouchar, C.Bekhaled**, "Application des systèmes hybrides neuro-flous au diagnostic des huiles de transformateur", Projet de Fin d'Études, Département Génie électrique, Ecole Nationale Polytechnique, Alger, 2005, pp. 45-50.

[1.5] **A. Nacer**, "Caractérisation des matériaux diélectriques application à l'huile minérale de transformateurs", thèse de doctorat d'état, USTHB, Alger, 2009, pp. 5-35.

[1.6] **F.Boumahra, I.Omrani**, "Etude de l'effet d'une barrière isolante sur la charge apparente de préclaquage dans les intervalles d'huile de transformateur sous tension alternative", Projet de Fin d'Études, Département Génie électrique, Ecole Nationale Polytechnique, Alger, 2010, pp. 3-18.

[1.7] **B.Moula**, "Comportement de l'huile de transformateur « Borak 22 » sous tension alternative 50 Hz", Mémoire de Magister, Ecole Nationale Polytechnique, Alger, Mai 2007, pp. 5-37.

[1.8] **Norme CEI 60 296**, "Spécification des huiles minérales isolantes neuves pour transformateur et appareillage de connexion" deuxième édition, 1982, pp. 1-42.

[1.9] **P. J. Vuarchex**, "Caractéristiques des diélectriques liquides", Technique de l'ingénieur, Traité K 714, Janvier 1988, pp. 3

[1.10] **D. Hamitouche**, "Analyse des huiles isolantes", GAMM3, ABB, 1996, pp. 39-70.

---

## **Chapitre 2**

---

# **Application de l'algorithme ACO au diagnostic de l'huile de transformateurs**

---

### **Introduction:**

L'Algorithme de colonies de fourmis (ACO) est destiné à résoudre des problèmes combinatoires, comme le problème de trouver le trajet le plus court du voyageur de commerce (TSP). [3.1]

Notre travail consiste à reformuler le problème de diagnostic des huiles de transformateur afin de pouvoir bénéficier de l'algorithme ACO. A première vue, le problème à notre disposition n'est pas un problème combinatoire, la difficulté qui se pose est de le rendre ainsi.

### **2.1. Formulation du problème de diagnostic de l'huile de transformateurs par l'ACO :**

Dans cet algorithme les fourmis vont faire des tours constitués d'un certain nombre de pas et comparer selon une fonction de performance pour donner comme solution, le tour dont les échantillons qui le constitue sont les plus similaires à l'échantillon à diagnostiquer, et afin de rendre la solution plus lisible, on calcule « des pourcentage de similitude », si les éléments constituant le tour appartiennent tous à la classe garder, la solution serait 100% garder, et si ce nombre est de moitié la solution sera 50%, et alors la lois de calcul des pourcentage et donnée comme suit :

$$P_i = \frac{\text{nombre d'élément de classe } i}{\text{nombre d'éléments total d'un tour}} \quad (2.1)$$

$i=1, 2, 3, 4$

Classe 1= la table dont la décision est garder.

Classe 2= la table dont la décision est filtrer.

Classe 3= la table dont la décision est régénérer.

Classe 4= la table dont la décision est jeter.

Les fourmis vont faire la comparaison selon les résultats des tests physico-chimiques, plusieurs fonctions de comparaison peuvent être envisagées, mais on adopte la plus simple:

$$F(E, E_b) = \frac{1}{6} [ \sum_{i=1}^6 |(C_E(i) - C_B(i))| ] \quad (2.2)$$

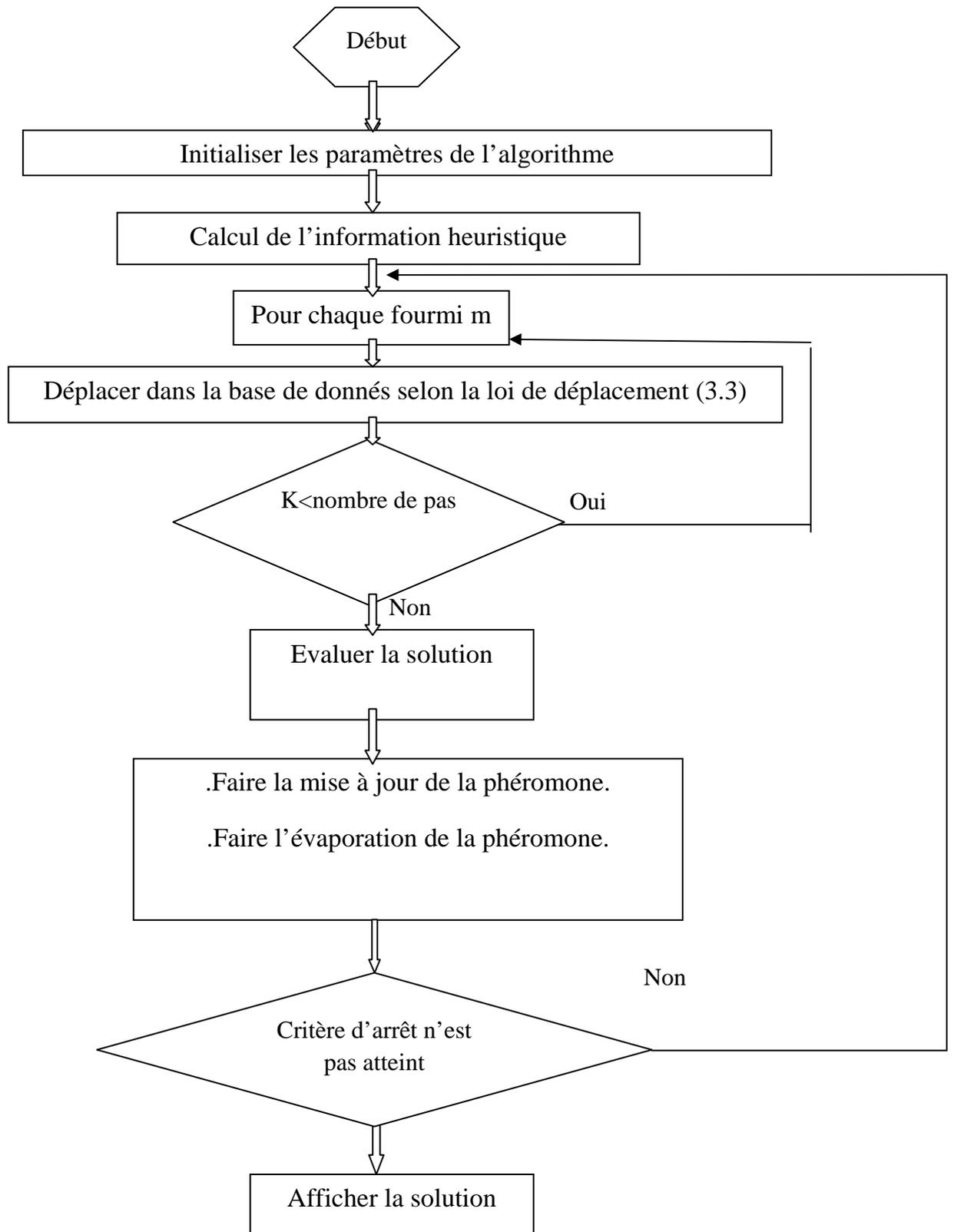
Avec  $C_E$  : les six caractéristiques de l'huile à tester.

$C_B$  : les caractéristiques de l'échantillon pris par les fourmis à partir de la base de données.

Dans notre algorithme cette fonction sera utilisée comme information heuristique, et pour calculer la quantité de phéromone à déposer sur le tour.

## Chapitre 2

### 2.2 Organigramme explicatif des différentes étapes de l'optimisation par colonies de fourmis



## Chapitre 2

### 2.3. Résultats de l'ACO sur un ensemble d'échantillons :

L'application de notre algorithme sur quelques échantillons évalués par des experts (4 échantillons), a donné les résultats présentés aux figures 2.1, 2.2, 2.3 et 2.4

Ces graphes représentent la décision, optimisée par les fourmis en pourcentage, en fonction du nombre d'itérations.

Echantillon N°	1	2	3	4
L'indice de couleur	0,7	2,3	4	4.5
La viscosité à 40°C (Cts)	10,23	10.87	10.23	11.19
L'indice d'acidité (mgKOH/g)	0.012	0.091	0.06	0.42
La rigidité diélectrique (kV/cm)	57	22	32	30
Le facteur de dissipation	0.072	0,019	0.063	0.55
La teneur en eau (p.p.m)	16	40	26	42

**Table 2.1** : Les 4 échantillons analysés par les experts

Les experts exigent les décisions suivantes :

**Echantillon 1** : l'huile est à garder car tous ces paramètres répondent aux exigences de la norme.

**Echantillon 2** : l'huile est à régénérer.

**Echantillon 3** : mis à part de la rigidité diélectrique et la teneur en eau, la mesure des autres paramètres est acceptable. Cette huile nécessite un filtrage pour améliorer sa rigidité.

**Echantillon 4** : toutes les caractéristiques de cette huile sont détériorées, son traitement n'est pas intéressant. Elle est à jeter.

## Chapitre 2

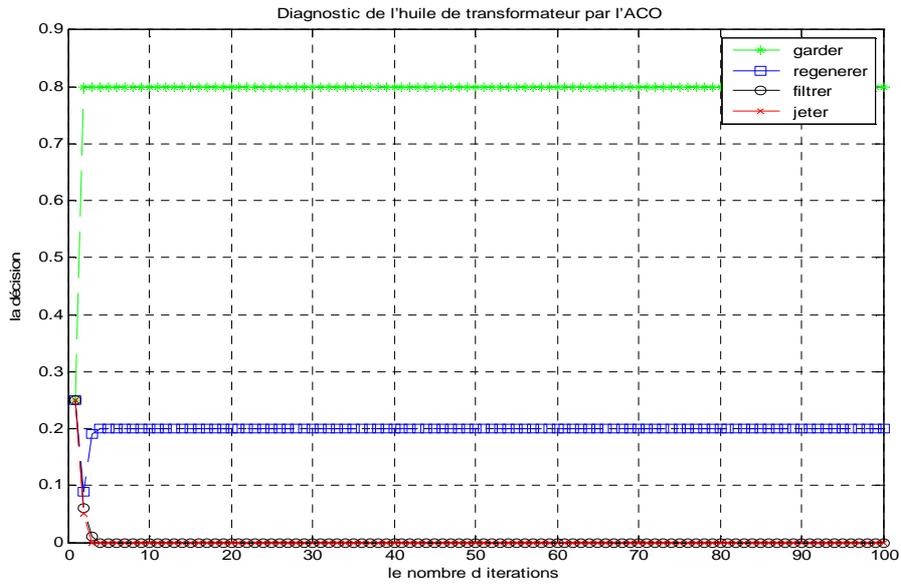


Figure 2.1 : La décision pour l'échantillon n°1

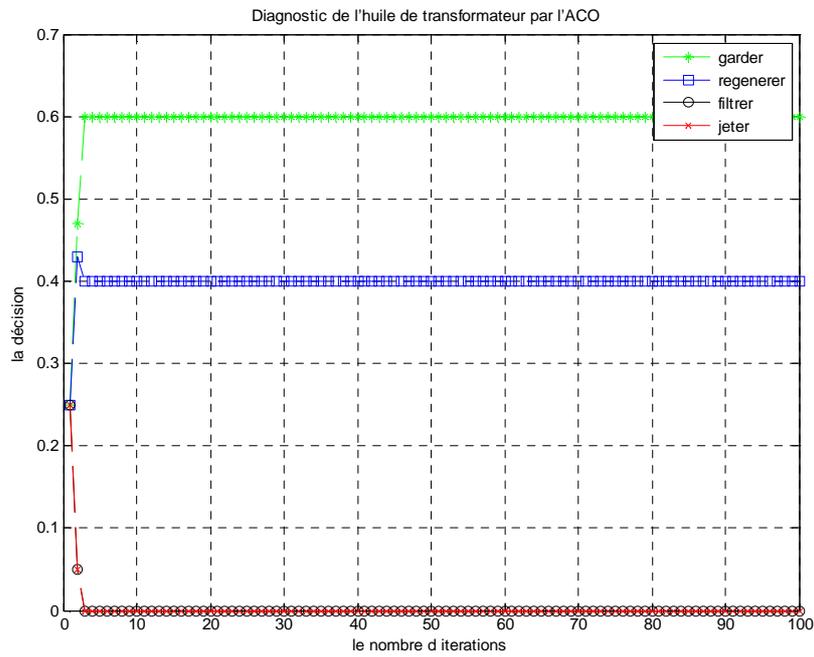


Figure 2.2 : La décision pour l'échantillon n° 2.

## Chapitre 2

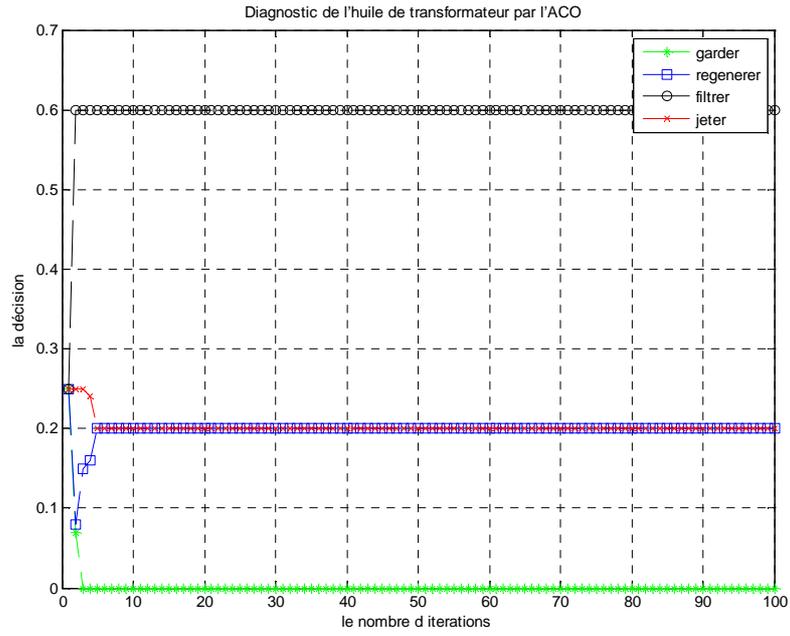


Figure 2.3 : La décision pour l'échantillon n°3.

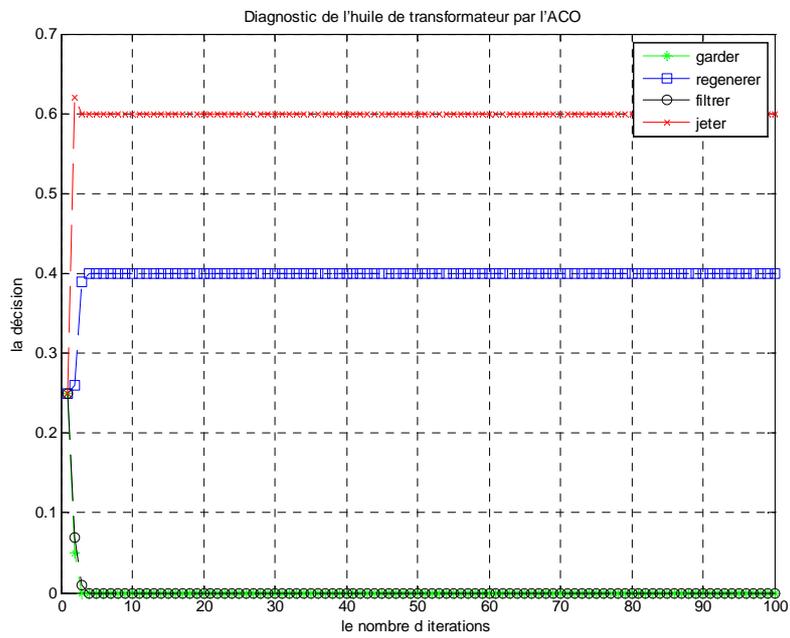


Figure 2.4 : La décision pour l'échantillon n°4.

### **3.4. Discussion :**

On remarque que pour les échantillons « 1 », « 3 » et « 4 », la solution est bonne, mais dans l'échantillon « 2 », la décision donnée par l'ACO qui est Garder ne s'accorde pas avec la décision des experts qui est Régénérer.

On remarque aussi que les fourmis convergent vers la solution dans un très petit laps de temps, cela n'est pas un bon signe mais il exprime le problème majeur de cet algorithme, car les fourmis ne visitent que les premiers points, qui accumulent encore de la phéromone et piègent les fourmis dans une boucle.

Pour éliminer ce problème et améliorer notre algorithme, on introduit un algorithme de sélection qui s'appelle « the roulette wheel selection », qu'on détaillera dans le paragraphe ci-après.

### **2.5. L'Algorithme RWS « the roulette wheel selection »:**

#### **Description :**

L'origine de cet algorithme est un jeu de hasard surtout connu dans les casinos. La roulette est un jeu très proche du jeu de la boule (appelée également petite roulette), qui se joue avec un plateau cylindrique fixe comprenant 9 numéros (de 1 à 9). [3.3]

Un algorithme de sélection a été inspiré de ce jeu, c'est un algorithme conçu d'une manière à ce que l'élément du hasard soit présent mais aussi que les meilleurs éléments auront la plus grande chance d'être choisis. [3.4]

Dans notre travail on a un nombre de « E » échantillons de la base de données, dont on attribue à chacun la probabilité en fonction de sa qualité, en appliquant l'algorithme au vecteur de probabilité de taille « E », la sortie sera l'index de l'échantillon qui est choisi par la fourmi.

### **2.6. Résultats de L'ACO amélioré par le RWS :**

On applique l'ACO sur les mêmes échantillons qu'on a utilisés dans la première partie afin de voir la différence.

## Chapitre 2

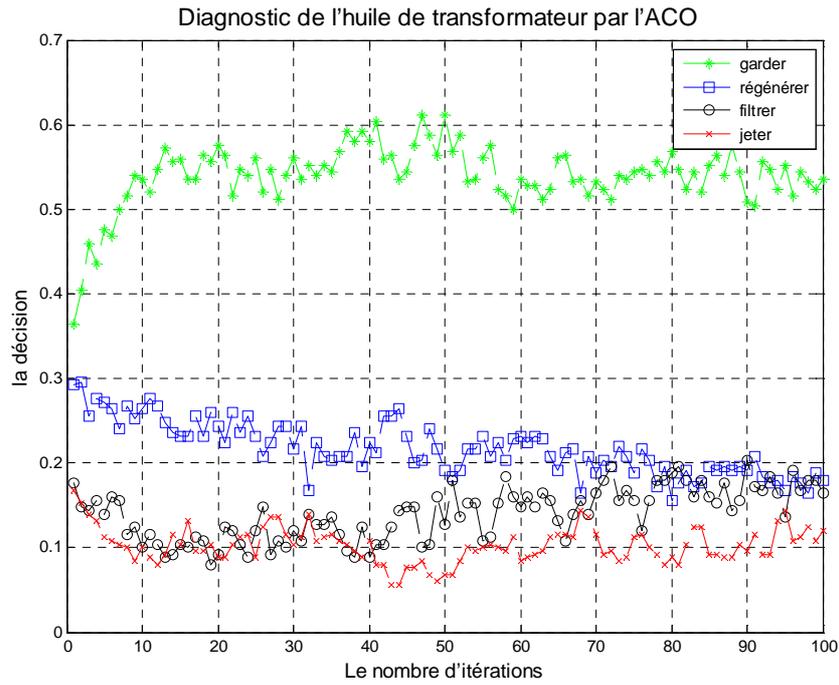


Figure 2.5: Diagnostic de l'échantillon n°1 par ACO (en utilisant le RWS)

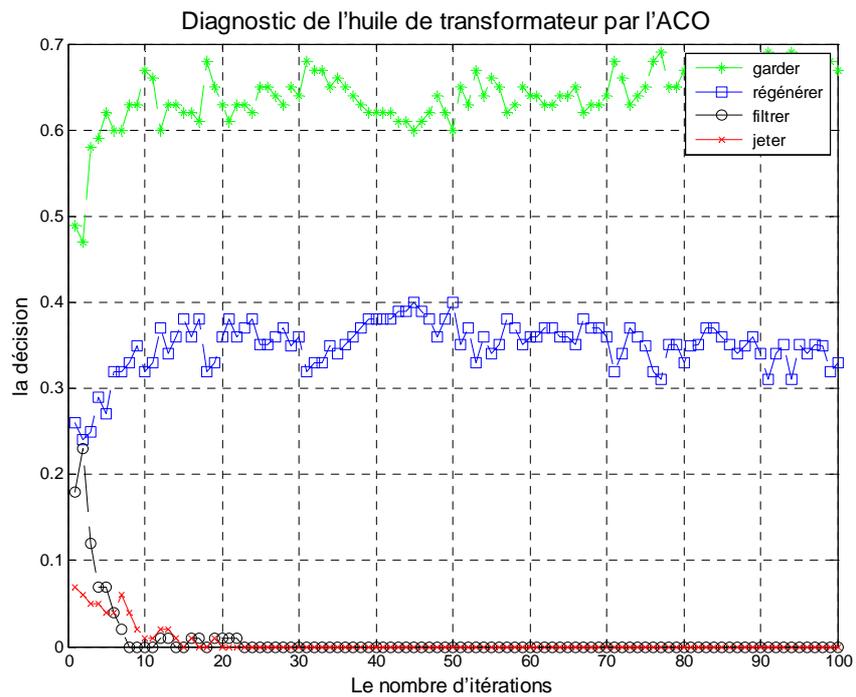
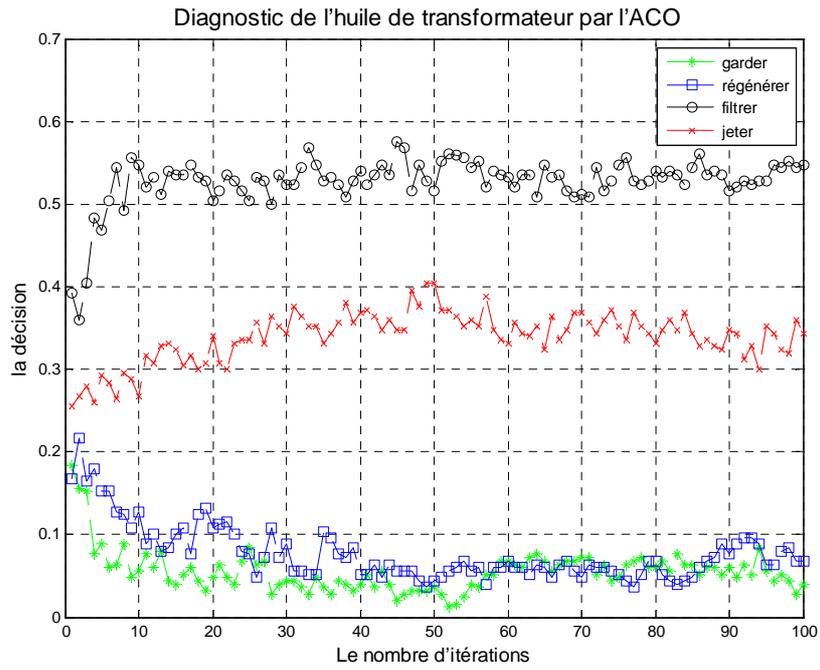
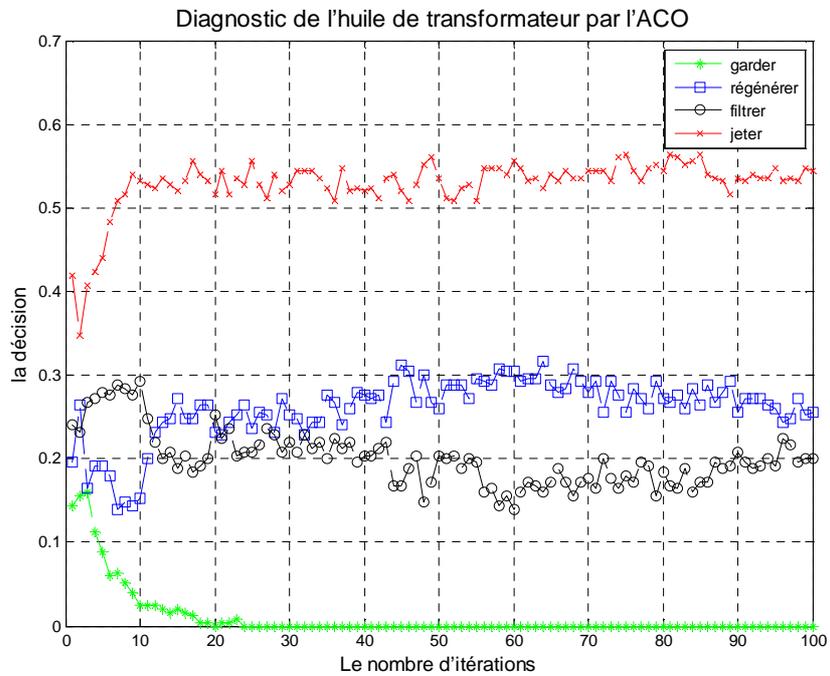


Figure 2.6: Diagnostic de l'échantillon n°2 par ACO (en utilisant le RWS)



**Figure 2.7:** Diagnostic de l'échantillon n°3 par ACO (en utilisant le RWS).



**Figure 2.8 :** Diagnostic de l'échantillon n°4 par ACO (en utilisant le RWS)

### Constatation :

L'application de l'algorithme de sélection « RWS » aide les fourmis à éviter d'entrer dans une boucle comme on l'a constaté avant cette amélioration.

On remarque aussi que toutes les décisions ont été conformes aux décisions des experts sauf la décision sur l'échantillon « 3 » qui est régénérer ; mais l'ACO a donné garder comme solution.

### **2.7. Interprétation et amélioration :**

Le problème demeure dans la base de données, en fait, la régénération est un procédé qui élimine, à l'aide de produits chimiques et d'adsorbants, les agents contaminants acides et colloïdaux et les produits de dégradation de l'huile, ce qui fait que la propriété qui a une influence majeure sur la décision régénérer est l'acidité de l'huile, si non cette huile est probablement à garder.

Or, notre fonction de comparaison tient compte de l'information donnée par la valeur de l'acidité qui est d'un sixième par rapport aux informations données par les autres propriétés, ce qui néglige l'information que donne cette propriété et induit en erreur.

Pour remédier à ce problème, il faut valoriser cette information cruciale dans ce cas de figure, pour qu'elle puisse contribuer d'une manière correcte dans notre algorithme.

- ✓ Premièrement, on calcule une valeur moyenne « moy » de l'acidité, d'après la base de données donnant la décision « garder »,
- ✓ on compare la valeur de l'acidité de l'échantillon à tester, avec la valeur moyenne « moy », et on note la valeur de comparaison par « Cm1 ».
- ✓ pour chaque échantillon « i » de la base de données dont la décision est « régénérer », on compare la valeur de l'acidité de ce dernier avec celle de l'échantillon à tester, et on note la valeur de comparaison par « Cm2(i) »
- ✓ après on calcule la proportion « Pr » entre ces deux grandeurs. Pour un échantillon « i » de la base régénérer on aura :

$$Pr(i) = \frac{Cm2(i)}{Cm1} \quad (2.3)$$

Si cette proportion est, par exemple égale à « k », alors notre échantillon est « k » fois plus proche à la décision régénérer qu'à garder, alors la valeur de la fonction de comparaison de ce dernier est « k » fois la moyenne des valeurs de la fonction de comparaison des échantillons de la base de données dont la décision est garder, qu'on note « Fmoy ».

$$Fmoy = \frac{1}{g} \sum_{j=1}^{j=g} F(E, E_j) \quad (2.4)$$

## Chapitre 2

---

Où « g » représente le nombre d'échantillons de la table garder, et «  $F(E, E_j)$  » représente la valeur de la fonction de comparaison calculée entre l'échantillon « j » de la table garder et l'échantillon à tester.

La valeur de la fonction de comparaison de l'échantillon « i » qui appartient à la table régénérer sera :

$$F'(E, E_i) = \text{Pr}(i) * F_{moy} \quad (2.5)$$

Mais dans ce cas, c'est l'acidité qui décide la valeur de la fonction de comparaison attribué à l'échantillon « i » ; alors que les autres valeurs des testes physico-chimiques ont aussi leurs mots à dire,

Dans le cas où notre échantillon est proche de ceux de la table garder, on essaye de voir son acidité pour voir si il est à régénérer.

Si notre échantillon est proche de ceux dont la décision est « garder », il faut voir encore l'acidité pour savoir si il est à régénérer ou à garder.

Pour cela on calcule un échantillon qui représente la valeur moyenne de tous les échantillons de la table garder, qu'on note « EG », on calcule la valeur de la fonction de comparaison de cet échantillon, on la note  $F(E, EG)$ , et on l'introduit dans l'équation (2.4) d'une manière à tenir compte davantage de l'acidité, la relation 3.10 devient :

$$F'(E, E_i) = \text{Pr}(i) * F_{moy} * \frac{F(E, E_i)}{F(E, EG)} \quad (2.6)$$

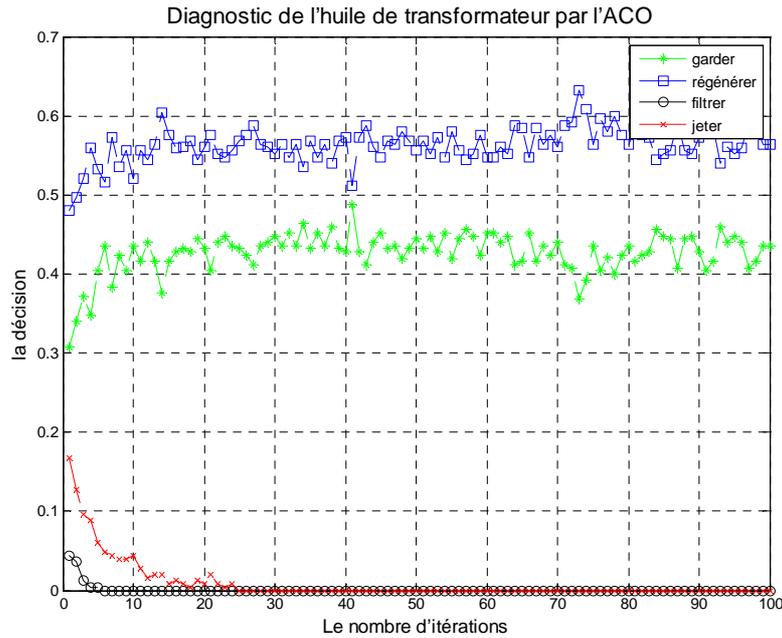
Où « F » représente la fonction de comparaison avant l'amélioration.

« F' » représente la fonction de comparaison après l'amélioration.

Si notre échantillon est proche de la décision garder, le rapport «  $\frac{F(E, E_i)}{F(E, EG)}$  » serait proche de « 1 » et l'acidité décide s'il est à « garder » ou à « régénérer », et si ce n'est pas le cas le rapport contribue à la valeur de la fonction de comparaison puisqu'il représente l'information donnée par toutes les valeurs des tests physico-chimiques et non pas juste l'acidité, car F' est calculé selon la fonction de comparaison avant l'amélioration.

Le résultat après cette amélioration est présenté pour l'échantillon « E2 » de la table «2.1 » à la figure 2.12 :

## Chapitre 2



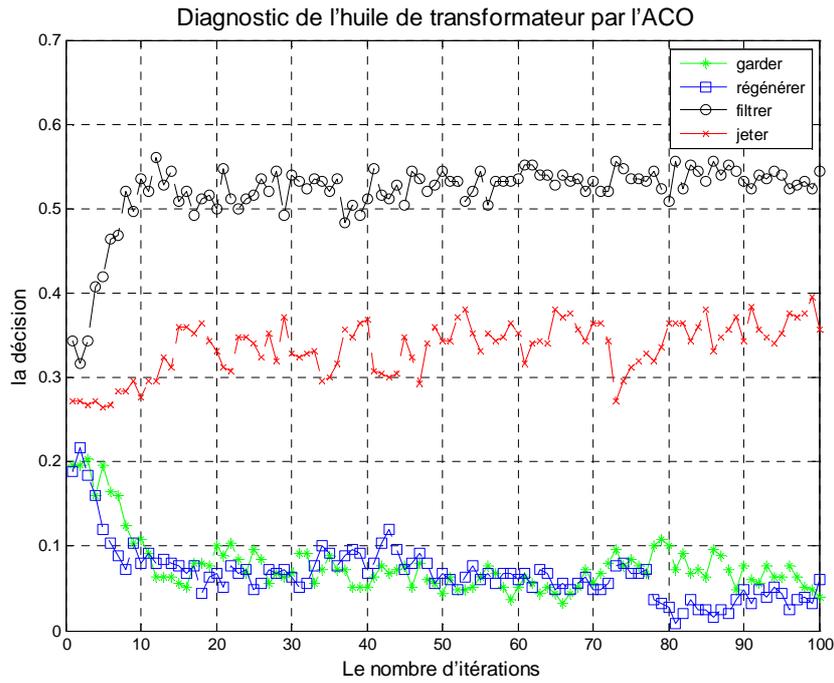
**Figure 2.9 :** Diagnostic de l'échantillon E2 après amélioration.

On remarque que le résultat est maintenant conforme avec celui des experts.

La décision « Filtrer » dépend surtout des valeurs de la rigidité diélectrique, de la teneur en eau et du facteur de pertes «  $\text{tg } \delta$  », car ce dernier sera amélioré dans la mesure où il dépend de la teneur en eau.

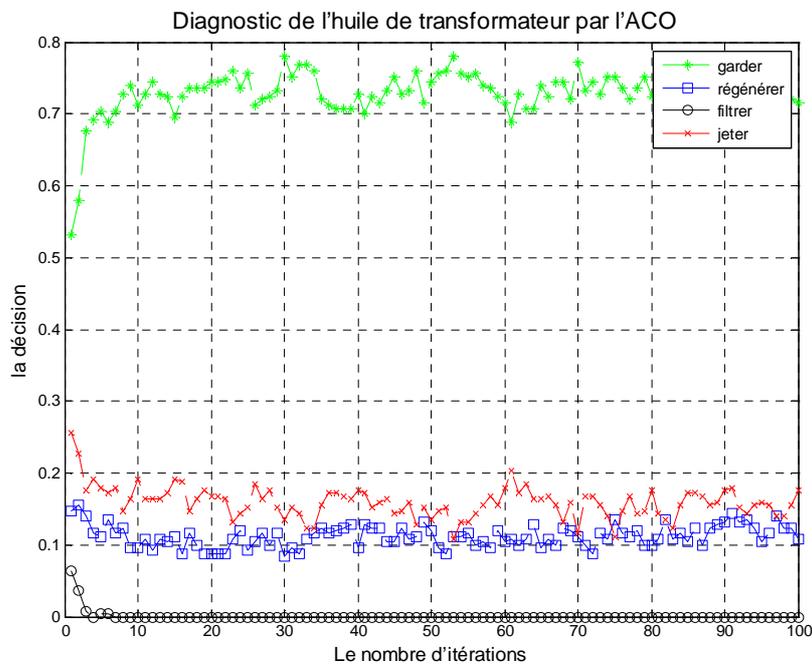
Le même procédé est appliqué pour tenir correctement compte des informations données par les valeurs de ces propriétés dans le calcul de la fonction de comparaison.

## Chapitre 2

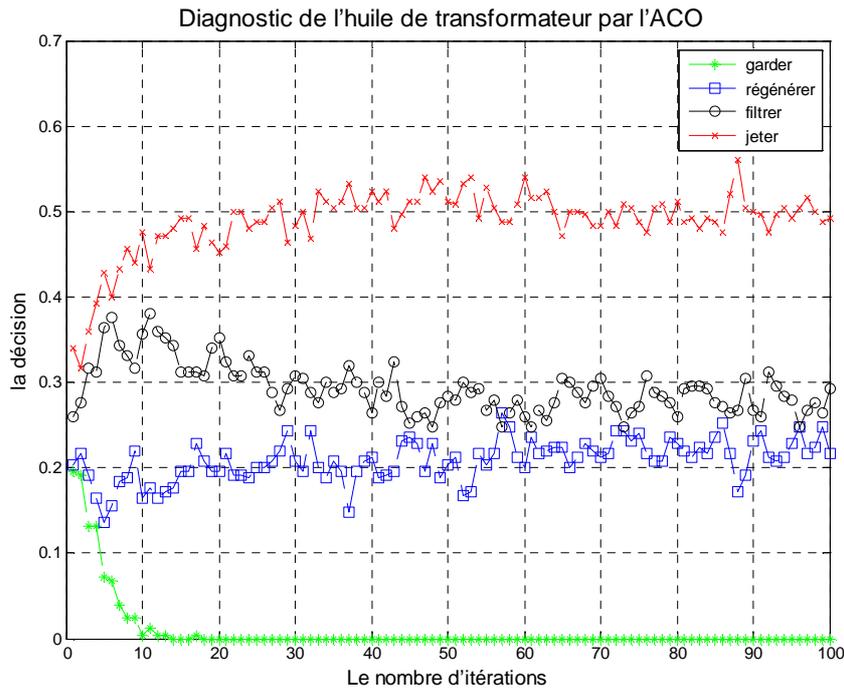


**Figure 2.10 :** Diagnostic de l'échantillon E3 après amélioration.

Les résultats du diagnostic des échantillons « E1 » et « E4 » de la table « 3.1 » après l'amélioration décrites ci-dessus sont présentés aux figures 3.14 et 3.15 :



**Figure 2.11 :** Diagnostic de l'échantillon E1 après amélioration.



**Figure 2.12:** Diagnostic de l'échantillon E4 après amélioration.

Les décisions sur les échantillons « E1 » et « E4 » respectivement « garder » et « jeter » ont été aussi améliorés.

### Interprétation :

**Le diagnostic de l'échantillon « E1 »** avant l'amélioration de la fonction de comparaison, a donné une décision « garder » entre « 50% et 60% », régénérer et filtrer convergent vers « 20% » et jeter converge vers « 10% ».

Après l'amélioration de la fonction de comparaison le résultat indique une décision « garder » entre « 60% » et « 70% », les décisions « régénérer » et « jeter » convergent vers « 20% » et filter converge vers « 0% ».

On remarque que la décision est beaucoup plus amélioré, les valeurs des tests physico-chimiques sont en générale bonnes, ce qui est traduit par notre algorithme par un grand pourcentage de la décision « garder » avant et après l'amélioration, mais la rigidité diélectrique , la teneur en eau et le facteur de dissipation sont bons, si bien que l'ACO affiche avant l'amélioration « 20% » filtrer, et après l'amélioration cette décision devient « 0% », ce qui est plus précis.

### L'échantillon « E4 » :

Le résultat avant l'amélioration de la fonction de comparaison a été entre « 50% et 60% » pour une décision jeter, « 15% à 20% » filtrer et entre « 25% et 30% » régénérer, les valeurs des tests physico-chimiques sont mauvaises et la décision régénérer tient majoritairement compte de l'acidité, or , la décision filtrer et la meilleur pour augmenter la qualité de l'huile ; mais le

## Chapitre 2

---

pourcentage de cette dernière est inférieur à celle de régénérer. Après l'amélioration de la fonction de comparaison on remarque que la solution est devenue « 50% » jeter, « 25% à 30% » filtrer et « 20% à 25% » régénérer, ce qui est plus correct, car cette huile est à jeter.

### **L'échantillon « E3 » :**

Voyant les valeurs de la rigidité, de la teneur en eau et du facteur de dissipation, cette huile nécessite un filtrage, ce qui est traduit par la solution donnée par notre algorithme après amélioration, qui est « 50% à 60% » filtrer, « 30% à 40% » jeter, et entre « 10% et 20% » garder et régénérer.

### **L'échantillon « E 2 » :**

Après l'amélioration, la solution est devenue conforme à celle des experts, les valeurs des tests physico-chimiques sont bonnes sauf pour l'acidité, cette huile nécessite une régénération, ce qui est traduit par notre algorithme dans les pourcentages suivants : « 50% à 60% » à régénérer, environ « 40% » à garder, « 0% » à filtrer et « 0% » à jeter.

Cette amélioration de la fonction de comparaison (appelée également fonction de performances) sera appliquée pour les autres algorithmes BCO et l'hybride adoptés au diagnostic dans les deux derniers chapitres.

## **2.8 Conclusion :**

L'algorithme ACO a montré son aptitude de trouver la bonne décision, l'étude de l'influence de ses paramètres sur la convergence et sur le temps d'exécution peut s'avérer très importante pour son amélioration.

Vue la stratégie de recherche utilisée par cet algorithme on peut dire qu'il fait une recherche dans l'ensemble des solutions globales, ce qui permettra de le comparer avec l'algorithme BCO pour le diagnostic, présenté dans le chapitre 4. Cela permettra d'avoir une idée sur l'hybridation des deux approches.

## **Références :**

[3.1] **N. Monmarché**, "algorithme de fourmis artificielles-application à la classification et à l'optimisation", Thèse de Doctorat, Université François Rabelais Tours, France, Décembre 2000, pp. 5-45.

[3.2] **W. Tfaili**, "Conception d'un algorithme de colonie de fourmis pour l'optimisation continue dynamique", Thèse de Doctorat, Université Paris 12, Val de Marne, 2007, pp. 6-11.

[3.3] **X. Yu, M. Gen** "Introduction to Evolutionary Algorithms", Edit. Springer 2010, pp. 11-31.

---

## **Chapitre 3**

---

# **Application de l'algorithme BCO au diagnostic de l'huile de transformateurs**

---

## Chapitre 3

---

Afin de bien comprendre l'approche du problème pour qu'il puisse être résolu par le BCO, on propose de trouver les  $p$  points centrés sur un point bien défini, tel que le trajet formé par ces points soit le plus court.

### **3.1. Description de l'algorithme :**

On suppose qu'on travaille dans un espace métrique et qu'on dispose d'un certain nombre de points, le problème consiste à trouver pour n'importe quel point «  $m$  » appartenant à cette espace, les  $p$  points les plus centrés sur ce dernier, dont le trajet qu'ils forment est le plus court. [4.1]

Dans ce problème, on utilise l'algorithme décrit auparavant, chaque abeille va générer une solution partielle de «  $m$  » composants.

Elle fait le choix des points selon la fonction de performance qui est dans ce cas l'inverse de la distance entre le point donné et les autres  $p$  points à trouver.

Dans le premier pas, chaque abeille choisit «  $m$  » points à visiter selon « the roulette Wheel » ou ce qu'on appelle la sélection par le jeu de hasard. Les points dont la fonction de performances est la plus élevée auront des probabilités plus grandes d'être choisis.

Après la construction de toutes les solutions partielles, les abeilles retournent à la ruche pour évaluer leurs solutions et communiquer l'information concernant la qualité de la solution aux autres abeilles. La fonction de d'évaluation sera l'inverse de la distance du trajet formé par ces «  $m$  » points.

Selon la qualité des solutions, les abeilles décident soit de rester loyales à leurs solutions ou de les abandonner, ce choix se fait aussi par l'application de « the roulette Wheel » sur les probabilités qu'une abeille reste loyale à sa solution.

Les abeilles se divisent en 2 groupes : les abeilles libres, et les abeilles recruteuses, et aussi par l'application de « the roulette wheel » sur les probabilités qu'une abeille recruteuse peut être choisie, chaque abeille libre suit une abeille recruteuse, donc elles auront la même solution partielle, ainsi le premier pas est terminé.

Dans le 2<sup>ème</sup> pas une abeille libre ne continue pas de suivre une abeille recruteuse ; mais elle fera les prochains «  $m$  » points toute seule afin de construire une autre solution partielle.

Après le 2<sup>ème</sup> pas les solutions partielles sont formées de «  $2*m$  » composants, Alor l'algorithme continue «  $n$  » fois jusqu'à l'obtention de la solution complète formée de «  $p$  » composants.

Soit ( $n*m=p$ ).

Chaque abeille aura une solution complète mais ; selon cette algorithme toutes les abeilles auront presque la même solution optimisée.

## Chapitre 3

---

### **3.2. Formulation du problème de diagnostic de l'huile de transformateurs par le BCO :**

On peut reformuler le problème de diagnostic de l'huile de transformateur de telle façon à être similaire au programme décrit auparavant.

Pour chaque échantillon d'huile, on a les valeurs des tests physico-chimiques. On peut les considérer comme étant des coordonnées, et les distances entre les échantillons vont être les valeurs de la fonction de performance décrite dans l'algorithme de l'ACO.

$$F(E, E_b) = \frac{1}{6} [ \sum_{i=1}^6 |(C_E(i) - C_B(i))| ] \quad (4.1)$$

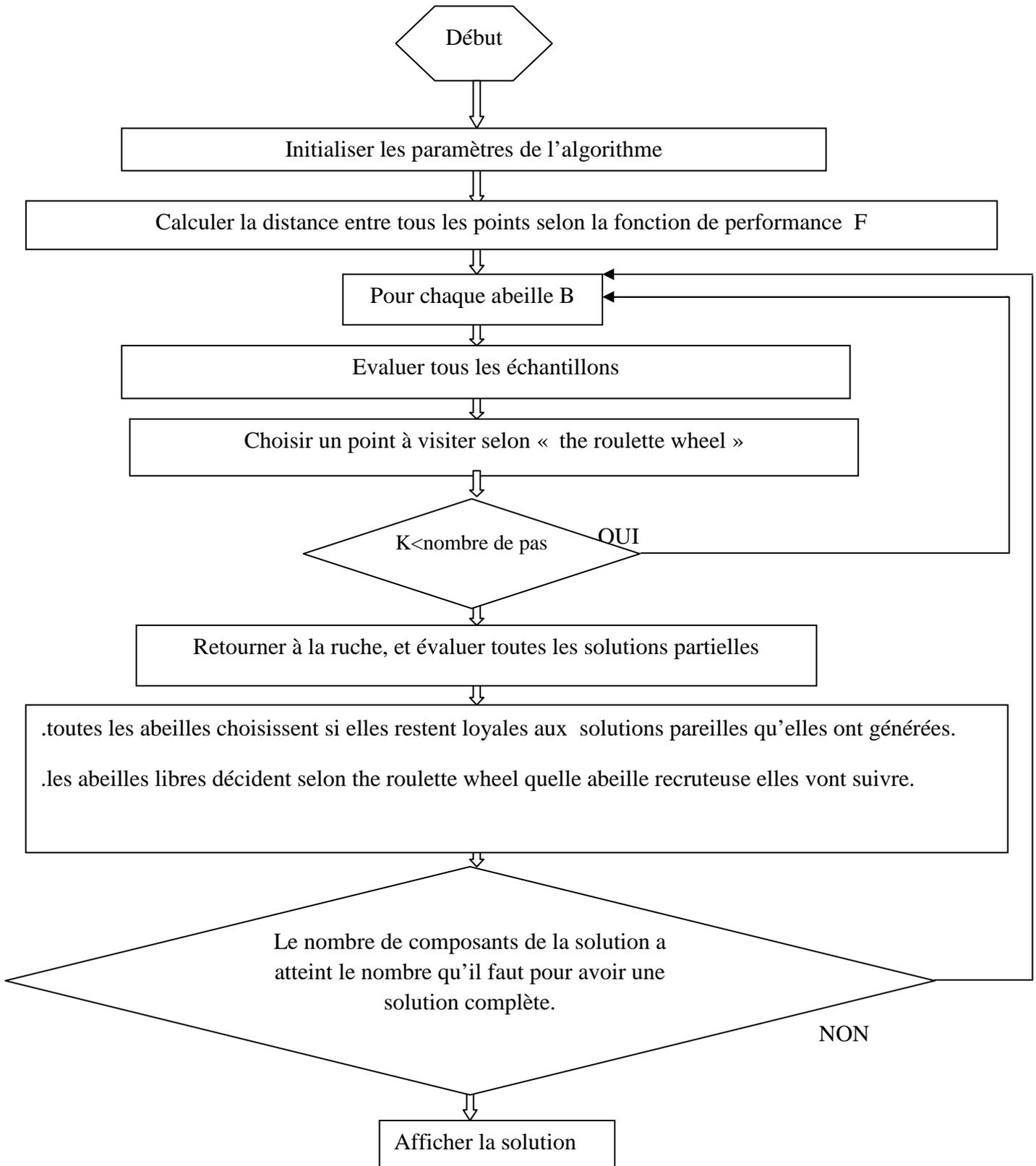
Avec:

$C_E$  : les six caractéristiques de l'huile à tester.

$C_B$  : les caractéristiques de l'échantillon pris par les fourmis de la base de données.

## Chapitre 3

### 3.3 Organigramme explicatif des différentes étapes de l'optimisation par le BCO :

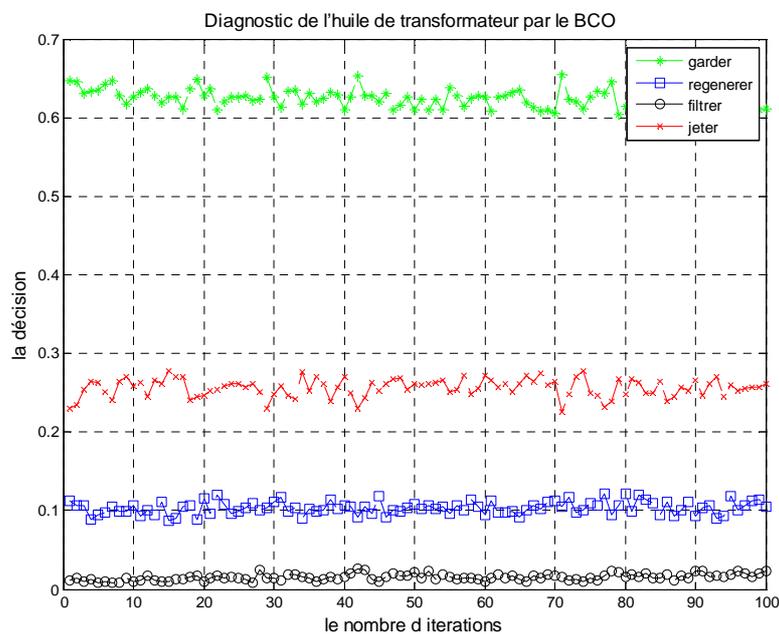


## Chapitre 3

### 3.4. Les résultats de diagnostic:

Dans cet algorithme, il y a une évolution de la solution partielle en fonction du nombre de pas, ce qui n'est pas nécessaire à afficher, par le fait qu'on n'a besoin que de la solution complète ; mais vu qu'il y ait une sélection plus au moins aléatoire, il y aura une variation des pourcentages des solutions d'une exécution à une autre. En exécutant le programme plusieurs fois on peut voir le taux de variation, et le plus important s'il y aurait un changement de décision durant l'exécution.

On applique l'algorithme sur l'échantillon « E1 » de table 2.1, le résultat est représenté à la figure 3.1:



**Figure 3.1 :** Résultat du diagnostic de l'échantillon 1 par BCO.

Les résultats du diagnostic des quatre échantillons de la table 3.1, par BCO, sont présentés dans la table 3.1

	<b>garder</b>	<b>régénérer</b>	<b>filtrer</b>	<b>jeter</b>
<b>E1</b>	62.14%	10.61%	01.33%	25.92%
<b>E2</b>	31.21%	56.90%	00.57%	11.32
<b>E3</b>	15.32%	15.33%	39.93%	29.42%
<b>E4</b>	09.86%	17.58%	32.49%	40.07%

**Table 3.1 :** Diagnostic des quatre échantillons par BCO

## Chapitre 3

---

On a appliqué le BCO sur les mêmes échantillons qu'on a introduits dans le système ACO, on remarque que les résultats obtenus sont conformes avec ceux des experts et la même interprétation décrite pour l'ACO est adoptée pour le BCO.

### **3.5. Comparons les résultats obtenus à ceux de l'ACO :**

Le diagnostic par l'ACO s'avère plus précis, quoiqu'il ne présente pas un comportement complexe comme celui de BCO, mais il utilise l'accumulation de la phéromone durant plusieurs itérations.

L'avantage de BCO est qu'il arrive à la solution durant une seule itération en utilisant un comportement relativement complexe de communication et d'évaluation, ce qui lui procure l'avantage d'un temps d'exécution réduit par rapport à l'ACO.

### **3.6. Conclusion**

L'algorithme BCO utilise une différente stratégie de recherche par rapport à l'ACO, on peut dire qu'il effectue une recherche dans l'ensemble des solutions partielles. Notons que cette stratégie le rend plus rapide que l'ACO mais augmente la marge de l'erreur par rapport à la solution exacte.

### **Références:**

[4.1] **D. Teodorovic, M. Selmic**, "Bee Colony Optimization: The Applications Survey", Faculty of Transport and Traffic Engineering, University of Belgrade, 2011, pp 1-8.

[4.2] **M. Farooq**, "Bee-Inspired Protocol Engineering From Nature to Networks", Edit. Springer Verlag, Heidelberg, Berlin, 2009, pp 147-184.

---

## **Chapitre 4**

---

# **Diagnostic par l'algorithme hybride**

---

## Chapitre 4

---

### **4.1. La combinaison des algorithmes ACO et BCO :**

Dans les deux chapitres précédents, on a développé deux algorithmes, l'algorithme de colonie de fourmis (ACO) et celui de la colonie d'abeilles (BCO).

On a fait en sorte que la formulation du problème du diagnostic de l'huile de transformateur soit la même pour les deux algorithmes afin de pouvoir comparer les résultats de ces derniers, ou encore mieux, les hybrider.

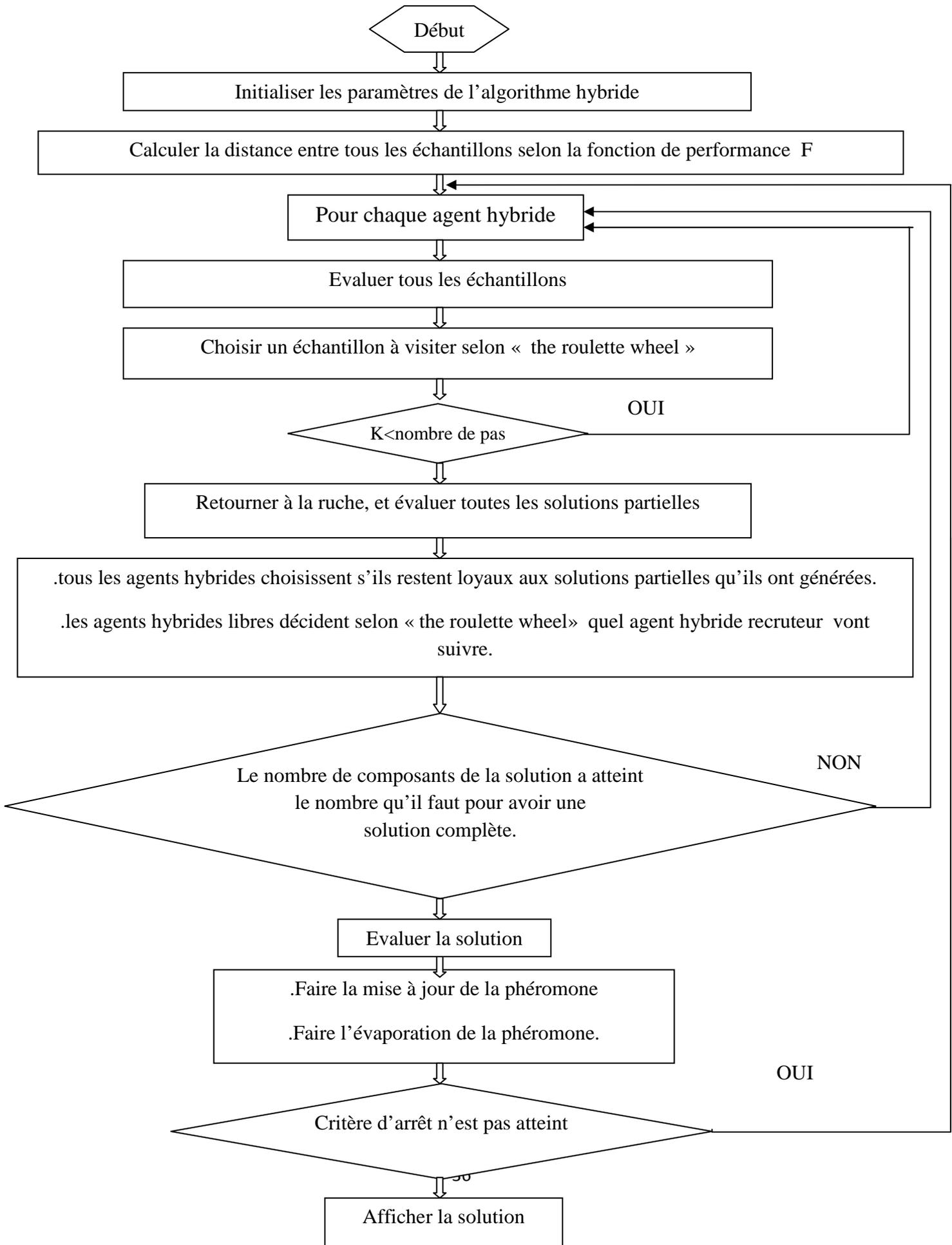
### **4.2. L'algorithme hybride ACO/BCO :**

Après cette analyse, on remarque que chaque algorithme utilise une différente stratégie de recherche, et les deux méthodes ont donné des résultats à discuter.

L'algorithme hybride doit bénéficier des avantages de ces deux algorithmes, en attribuant à l'agent artificiel les performances des fourmis et des abeilles simultanément.

## Chapitre 4

### 4.3. Organigramme explicatif de l'algorithme hybride :

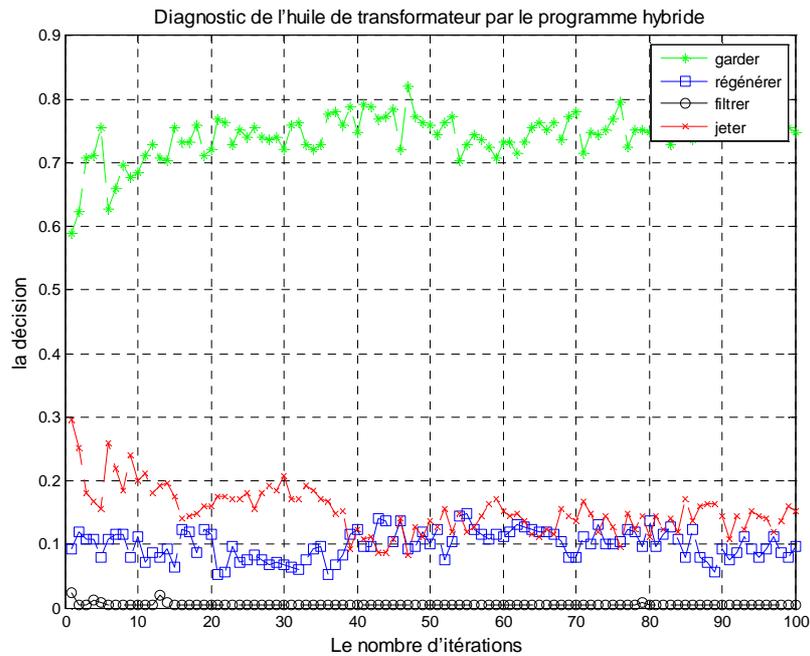


## Chapitre 4

### 4.4. Résultats :

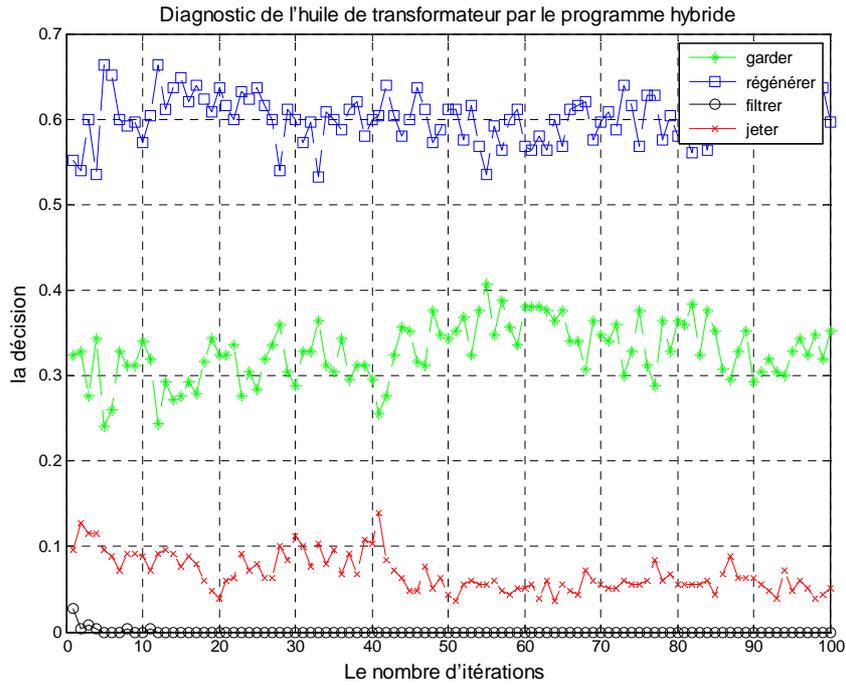
Après avoir décrit l'algorithme hybride, on le teste avec les mêmes échantillons qu'on a utilisés dans l'ACO et le BCO afin de pouvoir les comparer.

Les résultats sont affichés dans les graphes suivants :

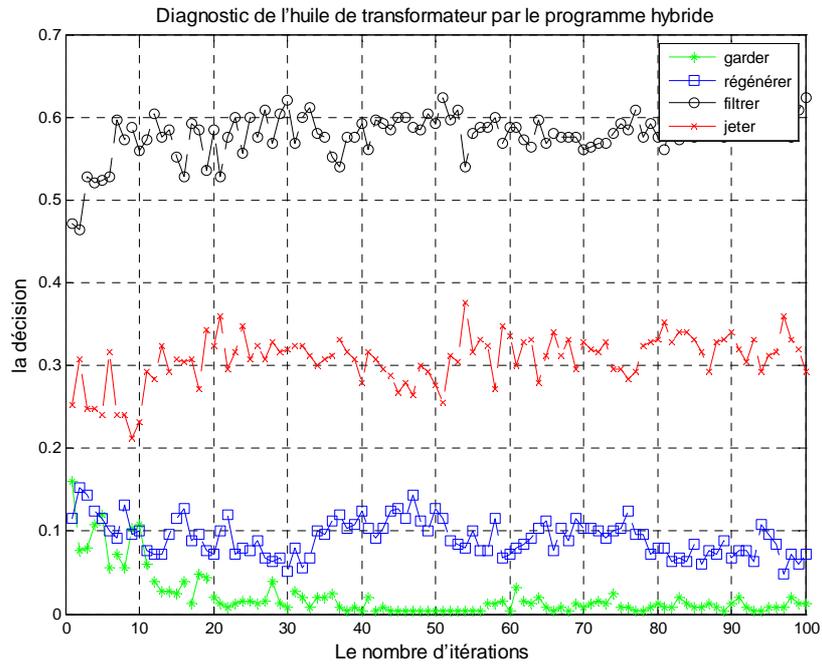


**Figure 4.1 :** Diagnostic de l'échantillon 1 par le système hybride.

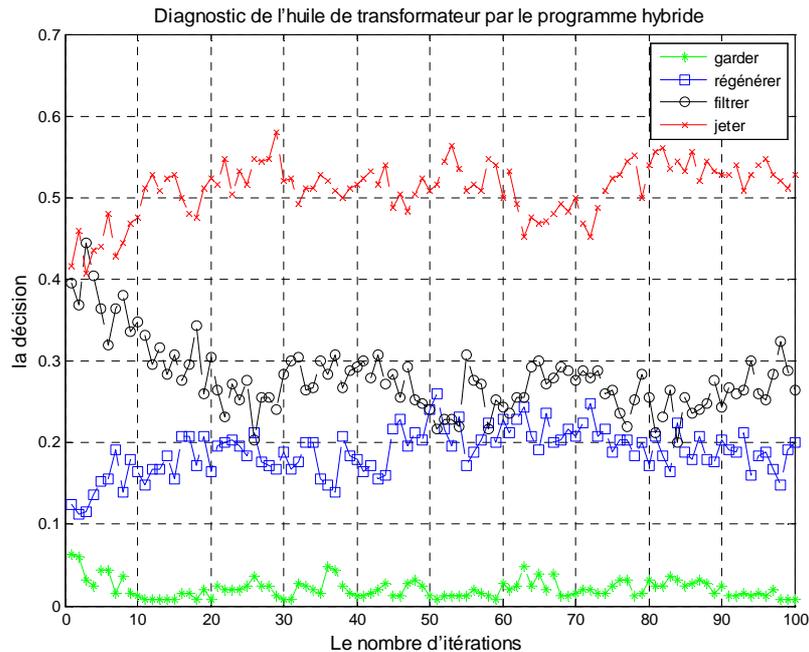
## Chapitre 4



**Figure 4.2 :** Diagnostic de l'échantillon 2 par le système hybride.



**Figure 4.3 :** Diagnostic de l'échantillon 3 par le système hybride.



**Figure 4.4 :** Diagnostic de l'échantillon 4 par le système hybride.

L'algorithme hybride procure des résultats conformes à ceux des experts. Néanmoins, une comparaison objective avec les deux algorithmes ACO et BCO, on définit ce qu'on appelle la « solution exacte » afin de déterminer l'erreur du diagnostic par rapport à cette solution.

### **4.5. La notion de la solution exacte :**

Les notions de convergence et de précision ont un sens relativement trivial, si on ne dispose pas d'une solution dite exacte. [5.1]

Dans cette formulation donc, il y a un tour qui aura le maximum de la fonction de performance, et la décision donnée par ce tour représente la solution exacte qui sera utilisée pour calculer la précision et le temps de convergence.

Cette solution est calculée en énumérant toutes les combinaisons sans répétitions, tirées d'un ensemble de nombres naturels qui représentent les indices des échantillons dans la base de données. Par exemple si on dispose d'une base de données de 5 échantillons et on veut faire des tours de 3 éléments, le nombre des tours possible à faire est 10, on calcule pour chaque tour la valeur de la fonction de performance et celle qui a la plus grande valeur représente la solution exacte.

- **Mais pourquoi on n'utilise pas directement les intervalles donnés par la CEI ?**
- **Ou encore, si on utilise les algorithmes intelligents, pourquoi on ne fait pas en sorte d'effectuer tous les tours possibles, ensuite on choisit le meilleur tour?**

## Chapitre 4

La réponse est que la base de données embrasse plusieurs valeurs des intervalles de CEI, et aussi dispose d'un autre paramètre qui est la décision des experts, par conséquent, l'énumération et le traitement de tous les tours demande énormément de temps pour l'exécution ; c'est un problème dit « difficile ».

De ce fait, les algorithmes de l'intelligence en essaim adoptés optimiseront la décision dans un temps largement réduit, et avec une commodité d'utilisation.

### **4.6. L'ajustement des paramètres de l'ACO et du système hybride:**

#### **L'ajustement de alfa et de bêta :**

On utilise l'échantillon « E2 » de la table «3.1» pour déterminer les valeurs optimales, de « alpha » qui influe sur la phéromone et de « bêta » qui influe sur l'heuristique de recherche, qu'il faut prendre afin d'avoir une meilleure précision.

Pour cela, il faut d'abord calculer la solution exacte afin de déterminer l'erreur.

L'algorithme qui calcule la solution exacte appliqué à l'échantillon « E2 » nous a donné les résultats suivants :

La décision	garder	régénérer	filtrer	jeter
Le pourcentage	20%	80%	0%	0%

On fait varier « alpha » et « bêta » et le taux d'évaporation et on calcule l'erreur, et on choisit les paramètres qui donnent une meilleure précision.

### **4.7. Comparaison :**

On ajuste les paramètres de « alpha » et de « beta » et du taux d'évaporation pour l'ACO et pour l'algorithme hybride afin qu'ils nous donnent une solution à une erreur minimale.

En utilisant la fonction « tic, toc » de la bibliothèque MATLAB, pour calculer le temps d'exécution mis par les trois algorithmes, L'ACO, le BCO et l'algorithme hybride.

On applique ces algorithmes sur l'échantillon « E1 » de la table 3.1 tout en calculant l'erreur, et le temps d'exécution pris par chaque algorithme.

Les résultats sont présentés dans le tableau suivant :

Algorithme	L'erreur	Le temps d'exécution (s)
L'ACO	0.0840	11.0776
Le BCO	0.2300	0.5689
L'hybride	0.0532	10.3346

## Chapitre 4

---

On remarque que le temps d'exécution mis par le BCO est le plus court, mais l'erreur commise est grande par rapport à l'ACO et à L'hybride.

On remarque aussi que l'hybride a l'erreur la plus petite, et son temps d'exécution est inférieur à celui de l'ACO.

### **4.8. Conclusion :**

- L'ACO est plus précis que le BCO.
- Le BCO est l'algorithme le plus rapide.
- L'algorithme hybride est le plus précis. Il est plus rapide que l'ACO ce qui le rend le plus performant.

### **Références :**

[5.1] **B. Shuang, J. Chen, Z. Li**, "PS-ACO Hybrid Algorithm: Study on hybrid PS-ACO algorithm", Edit. Springer Science+Business Media, LLC, May 2009, pp 1-20

---

## CONCLUSION GENERALE

---

Un bon diagnostic des huiles de transformateurs est primordial, pour assurer la sécurité des biens et des personnes et la continuité de service. Il ne peut être fait que par des personnes compétentes. Le recours aux systèmes intelligents permet de capitaliser les connaissances et l'expérience humaine.

Dans ce travail, on a élaboré des heuristiques d'adaptation des algorithmes d'optimisation par colonie de fourmis, par colonie d'abeilles et un système hybride des deux approches, pour une application réelle dans le domaine de l'ingénierie, qui est le diagnostic de l'huile de transformateurs. Ces algorithmes ont donné des résultats satisfaisants, néanmoins le nombre d'échantillons d'huile est relativement réduit, ce qui empêche de pousser plus loin les performances du diagnostic par les systèmes adoptés.

Les algorithmes adoptés dépendent de plusieurs paramètres et un choix judicieux de ces derniers influent considérablement sur les facteurs de fiabilité du diagnostic, en l'occurrence : la précision et la convergence vers des décisions idéales prises par des experts, appelée autrement les solutions exactes.

Le choix de ces paramètres se fait d'une manière expérimentale via plusieurs tests. Les valeurs de ces paramètres doivent assurer une grande précision dans un minimum de temps de convergence.

L'algorithme hybride a une meilleure convergence par rapport aux algorithmes ACO et BCO.

Si on fixe des valeurs optimales des paramètres pour tous les algorithmes, on constate que le BCO est le plus rapide, car le BCO utilise juste une itération. Et l'algorithme hybride est le plus précis.

La difficulté des algorithmes adoptés réside dans l'étape d'initialisation, mais leur stratégie de recherche offre un large ensemble de solutions.

Il serait intéressant de voir l'effet de l'utilisation des autres algorithmes d'apprentissage qu'ils soient supervisés ou non. Les algorithmes de l'intelligence en essaim peuvent être hybridés avec d'autres approches telles que les méthodes algorithmiques dites exactes, pour remédier au problème d'initialisation en particulier.

Et il serait également plus intéressant d'appliquer les deux algorithmes ACO et BCO sur d'autres problèmes dans le domaine de la haute tension afin de consolider leurs performances.

## ANNEXES

### Base de données utilisée par les systèmes adoptés au diagnostic :

La base de données utilisée est obtenue à partir de tests physico-chimiques de l'huile faits au sein de l'unité de traitement des huiles de la société de réparation des transformateurs électriques du centre " Transfo-Centre unité de Blida" appliqués aux transformateurs de puissance dont la tension maximale de réseau est limité entre 72.5 kV et 170 kV. [1.17]

### Table de prise de décisions pour l'action Garder :

Echantillon n°	Indice de couleur	Viscosité	Acidité	Rigidité	Facteur de dissipation	Teneur en eau
1	0,5	9,84	0,01	62	0,06	6
2	0,5	11,28	0,01	58	0,007	17
3	1	8,137	0,02	59	0,02	11
4	1	10	0,046	56	0,015	30
5	1	10,87	0,02	59	0,02	11
6	1	11,69	0,02	58	0,025	8
7	1	12	0,04	60	0,04	33
8	1	12,54	0,046	56	0,015	31
9	1,5	8,65	0,01	67	0,006	6
10	1,5	9,77	0,01	67	0,063	7
11	1,5	10,09	0,01	60	0,025	12
12	2	10,58	0,02	68	0,016	8
13	2	10,59	0,01	66	0,016	9
14	2	10,98	0,04	51	0,017	8
15	2	11,07	0,02	55	0,038	9
16	2	11,69	0,01	54	0,07	12
17	2	11,01	0,02	68	0,016	8
18	2	11,41	0,02	59	0,019	10
19	2	12,3	0,072	52	0,02	32
20	2	12,3	0,072	58	0,02	33
21	2	12,5	0,02	56	0,02	32
22	2,5	10,13	0,02	60	0,032	12,5
23	2,5	10,45	0,04	58	0,019	11
24	2,5	10,67	0,06	51	0,064	14
25	2,5	11,09	0,44	69	0,03	7
26	2,5	11,65	0,01	60	0,02	13
27	2,5	11,69	0,05	55	0,036	25
28	2,5	11,8	0,04	58	0,03	17
29	3	9,84	0,04	63	0,042	9
30	3	9,87	0,03	57	0,024	9
31	3	10,21	0,02	52	0,047	12
32	3	10,67	0,03	70	0,047	10
33	3	10,76	0,04	60	0,042	29
34	3	10,98	0,06	54	0,047	12
35	3	11,01	0,02	63	0,018	9

36	3	11,59	0,08	55	0,049	28
37	3,5	9,98	0,03	59	0,038	14
38	3,5	11,89	0,04	53	0,053	23
39	4	9,33	0,03	68	0,042	19

40	4	9,33	0,08	63	0,083	12
41	4	9,98	0,05	59	0,036	14
42	4	10,67	0,05	69	0,049	19
43	4	10,87	0,05	61	0,031	13
44	4	11,79	0,04	69	0,032	11
45	5	10,23	0,04	64	0,04	10
46	5	11,79	0,05	70	0,016	11
47	6	9,52	0,08	55	0,043	21

**Table de prise de décisions pour l'action Régénérer :**

Echantillon n°	Indice de couleur	Viscosité	Acidité	Rigidité	Facteur de dissipation	Teneur en eau
1	1,9	11,75	0,03	27	0,024	41,9
2	2	12	0,092	48	0,022	37
3	3	11	0,106	50	0,025	35
4	3,5	10,98	0,09	68	0,042	16
5	3,5	10,49	0,13	60	0,061	17
6	3,5	10,94	0,1	61	0,053	14
7	3,5	9,67	0,09	52	0,054	10
8	3,5	11,87	0,09	57	0,045	19
9	3,5	10,02	0,09	57	0,045	19
10	3,5	10,14	0,1	56	0,073	15
11	3,5	11,52	0,06	59	0,105	22
12	4	11,22	0,09	59	0,065	23
13	4	11,36	0,13	65	0,078	19
14	4	11	0,4	30	0,5	40
15	4	12	0,3	30	0,6	41
16	4	10	0,3	30	0,6	42
17	5	10,12	0,14	11	0,005	74
18	5	11,19	0,22	54	0,067	17
19	5,5	9,8	0,16	50	0,086	18
20	6,5	12,024	0,04	22	0,01245	31,5

**Table de prise de décisions pour l'action Filtrer :**

Echantillon n°	Indice de couleur	Viscosité	Acidité	Rigidité	Facteur de dissipation	Teneur en eau
1	0,5	9,06	0,02	15	0,0026	36,6
2	0,7	8,96	0,02	22	0,015	59,5
3	1	11,62	0,01	43	0,034	18
4	1,5	10,12	0,02	46	0,052	19
5	1,5	10,98	0,02	46	0,052	19
6	2	10,21	0,03	48	0,035	8
7	2	10,35	0,02	48	0,033	21
8	2	10,86	0,09	24	0,019	42
9	2	11,45	0,11	50	0,025	35
10	2,5	11,13	0,13	46	0,061	29
11	3	10	0,08	47	0,02	35
12	3	10,15	0,04	30	0,042	29
13	3	11	0,1	42	0,1	37
14	3,5	10,81	0,06	45	0,032	24
15	4	10,23	0,06	32	0,063	26
16	4	10,98	0,08	48	0,056	25
17	4	11	0,09	42	0,082	37
18	4	11,51	0,03	66	0,049	20
19	4,5	11,23	0,14	54	0,028	29
20	4,5	11,43	0,08	10	0,066	43

**Table de prise de décisions pour l'action Jeter :**

Exemple n°	Indice de couleur	Viscosité	Acidité	Rigidité	Facteur de dissipation	Teneur en eau
1	4	10,53	0,21	53	0,106	27
2	4,5	10,68	0,17	51	0,097	18
3	4,5	11,55	0,13	28	0,078	46
4	5,4	10,64	0,4	38	0,1207	35,1

الملخص:

إن صيانة المحولات الكهربائية تسمح بضمان استمرارية تشغيلها. تشخيص الزيت العازل للمحولات يشكل طريقة ناجحة لتوقع الأعطاب و تجنبها.

هذا العمل يتمثل في تبني طريقتين من الطرق المساعدة على الكشف بذكاء الأسراب : خوارزمية البحث عن الحل الأمثل لمستعمرة النمل و خوارزمية البحث عن الحل الأمثل لمستعمرة النحل في تشخيص الزيت العازل للمحولات. ويقترح طريقة للتهجين بين الطريقتين.

مقارنة الخوارزميات الثلاثة يدل على أن الخوارزمية الالهجينة تقود إلى نتائج أفضل.

**كلمات البحث:** التشخيص زيت المحولات، الطرق المساعدة على الكشف, ذكاء الأسراب، خوارزمية البحث عن الحل الأمثل لمستعمرة النمل ، خوارزمية البحث عن الحل الأمثل لمستعمرة النحل ، الخوارزمية الالهجينة.

**Résumé :**

La maintenance des transformateurs permet d'assurer la continuité de leur fonctionnement. Le diagnostic de l'huile isolante constitue une méthode efficace de prévenir les dysfonctionnements et de les éviter.

Ce travail consiste à l'adaptation deux métaheuristiques de l'intelligence en essaim : algorithme d'optimisation par colonie de fourmis et algorithme d'optimisation par colonie d'abeilles au diagnostic de l'huile de transformateurs. Une méthode d'hybridation des deux approches est proposée.

La comparaison des trois algorithmes montre que l'algorithme hybride conduit à des meilleurs résultats.

**Mots clés :** Diagnostic de l'huile de transformateurs, métaheuristiques, intelligence en essaim, optimisation par colonie de fourmis, optimisation par colonie d'abeilles, algorithme hybride.

**Abstract:**

The monitoring of transformers ensures the continuity of their operation. The diagnosis of the insulating oil is an effective method of preventing malfunctions and avoids them.

This work involves the adaptation of two swarm intelligence metaheuristics: ant colony optimization and bee colony optimization in the diagnosis of transformer oil. A method of hybridization of the two approaches is proposed.

The comparison of the three algorithms shows that the hybrid algorithm yields better results.

**Keywords:** Transformer oil diagnosis, metaheuristics, swarm intelligence, ant colony optimization, bee colony optimization, hybrid algorithm.