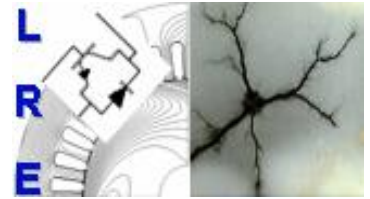


République Algérienne Démocratique et Populaire  
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique



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



## Mémoire de Master en Electrotechnique

Présenté par :  
**BOUKTIT Mhana**

Intitulé

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

Directeur du mémoire :

BOUBAKEUR Ahmed

Professeur

ENP

**ENP 2012**

---

Laboratoire de Recherche en Electrotechnique (LRE) - Ecole Nationale Polytechnique (ENP)

10, Avenue des Frères Oudek, Hassen Badi, BP. 182, 16200 El Harrach, Alger, Algérie

[www.lre.enp.edu.dz](http://www.lre.enp.edu.dz) [www.enp.edu.dz](http://www.enp.edu.dz)

الملخص:

إن صيانة المحولات الكهربائية تسمح بضمان استمرارية تشغيلها. تشخيص الزيت العازل للمحولات يشكل طريقة ناجعة لتوقع الأعطاب و تجنبها.  
هذا البحث يتمثل في تبني طريقتين من الطرق المساعدة على الكشف بذكاء الأسراب : خوارزمية البحث عن الحل الأمثل بمستعمرة النمل و خوارزمية البحث عن الحل الأمثل بمستعمرة النحل في تشخيص الزيت العازل للمحولات. ويقترح التهجين بين الطريقتين.  
مقارنة الخوارزميات الثلاثة يدل على أن الخوارزمية الهجينة تقود إلى نتائج أفضل.  
**الكلمات المفتاحية:** التشخيص زيت المحولات، الطرق المساعدة على الكشف, ذكاء الأسراب، خوارزمية البحث عن الحل الأمثل لمستعمرة النمل ، خوارزمية البحث عن الحل الأمثل لمستعمرة النحل ، الخوارزمية الهجينة.

### 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.

---

**Table des matières**

---

Introduction Générale.....	1
Références.....	2
<b>Chapitre 1 : Diagnostic des huiles de transformateurs</b>	
1.1. Généralités.....	3
1.2. Catégories des huiles diélectriques .....	3
1.3. Huiles minérales isolantes.....	3
1.4. Propriétés des huiles minérales.....	4
1.4.1. Propriétés électriques.....	4
1.4.1.1 Rigidité diélectrique.....	4
1.4.1.2. La permittivité diélectrique ou constante diélectrique.....	4
1.4.1.3. Le facteur de dissipation diélectrique ( $\text{tg } \delta$ ).....	4
1.4.2. Les propriétés physiques.....	5
1.4.2.1. La viscosité.....	5
1.4.2.2. Point d'éclair et point de feu.....	5
1.4.2.3. Aspect et indice couleur.....	5
1.4.3. Les propriétés chimiques.....	6
1.4.3.1. L'acidité totale.....	6
1.4.3.2. L'oxydation.....	6
1.4.3.3. La teneur en eau.....	6
1.5. Altération des huiles en service.....	6
1.6. Diagnostic et maintenance de l'huile minérale.....	7
1.7. Traitement.....	9
Conclusion.....	9
Références.....	10

**Chapitre 2 : Diagnostic par les systèmes ACO et BCO**

2.1. Introduction.....	11
2.2. Approche générale pour la résolution du problème de diagnostic.....	11

2.3. Formulation du problème de diagnostic par l'ACO.....	11
2.3.1. Les caractéristiques de l'algorithme.....	14
2.3.2. L'Algorithme de sélection RWS.....	16
2.3.3. Résultats de l'ACO amélioré par RWS.....	16
2.3.4. Interprétation et amélioration.....	19
2.4. Formulation du problème de diagnostic par le BCO.....	22
2.4.1. Les paramètres de l'algorithme.....	25
2.4.2. Diagnostic par le BCO.....	26
2.5. Comparaison entre BCO et ACO.....	27
Conclusion.....	27
Références.....	27

### **Chapitre 3 : Diagnostic par l'algorithme hybride**

3.1. Description de la stratégie de l'algorithme.....	29
3.2. Paramètres de l'algorithme hybride.....	32
3.3. Résultats.....	32
3.4. Etude des paramètres de l'algorithme hybride.....	33
3.5. Comparaison entre les trois algorithmes.....	36
Conclusion.....	37
Références.....	37
Conclusion Générale.....	38
Annexes.....	39

---

## **Introduction Générale**

---

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. [1]

Cette évolution représente pour les anciens transformateurs de puissance une surcharge, d'autant plus que l'âge de la plupart dépasse les 20 ans [2]. 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. Néanmoins, 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 donné des résultats acceptables. Ceci nous a incités 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, l'algorithme d'optimisation par colonie de fourmis ACO et l'algorithme d'optimisation par colonie d'abeilles BCO, 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. [5]

**Références bibliographiques:**

[1] **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.

[2] **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

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

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

[5] **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**

## **Diagnostic des huiles de transformateurs**

## **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 (SF6, N2 ... 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]



## **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 [1.8]

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

Tout diélectrique soumis à une tension continue ou alternative est toujours le siège de pertes électrique qui se traduisent par un échauffement plus au moins important.

Le facteur de dissipation diélectrique ( $\text{tg } \delta$ ) d'un matériau isolant est la tangente de l'angle complémentaire du déphasage entre la tension appliquée et ce courant de fuite (l'angle de perte).

Il 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. [1.8]

#### **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. [1.8]

##### **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. L'indice de couleur renseigne sur le vieillissement de l'huile.

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 [1.8]. 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]

### **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. Diagnostic et maintenance de l'huile minérale:**

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 [1.8].

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 DOERMENBERG, 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 testes normalisés (norme CEI 60 296) cités dans le tableau I.5. [1.8]

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).

### **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. [1.8]

#### **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]

#### **Conclusion :**

L'huile minérale (avec de nombreuses variantes dans sa composition) possède de remarquables propriétés ; elle demeure donc le liquide le mieux adapté et le plus utilisé dans les isolations haute tension, en particulier dans les transformateurs de puissance.

Dans ce premier chapitre on a exposé des généralités sur les huiles diélectriques pour transformateur de puissance notamment les propriétés de l'huile minérale isolante comme la BORAK 22 utilisée par la SONELGAZ et manipulée au cours de notre stage au sein du Laboratoire Essais et Contrôle de la Société Algérienne de Gestion du réseau de Transport de l'Electricité (GRTE) à Hamma.

**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'Etudes, 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'Etudes, 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**

# **Diagnostic par les systèmes ACO et BCO**



## **2.1. 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). [2.1]

L'algorithme de colonie d'abeilles (BCO) consiste à créer un système multi-agents (colonie d'abeilles artificielles) capable de résoudre efficacement les problèmes d'optimisation combinatoire dits difficiles. Les abeilles artificielles explorent à travers l'espace de recherche, des solutions réalisables. [2.5]

## **2.2. Approche générale pour la résolution du problème de diagnostic :**

Formellement; un problème d'optimisation combinatoire est un triplet  $(S, f, \Omega)$ , où  $S$  est l'ensemble des solutions candidates (possibles),  $f$  est une fonction objectif qui associe une valeur à chaque solution «  $s$  » appartenant à l'ensemble  $S$ , et  $\Omega$  est l'ensemble de contraintes. L'ensemble de solution «  $\hat{S} \subseteq S$  » qui satisfait les contraintes «  $\Omega$  » s'appelle l'ensemble des solutions faisables ou réalisables (feasible solutions).

Le but est de trouver la solution réalisable optimale «  $s \in \hat{S}$  ». Pour un problème de minimisation ça consiste à trouver la solution «  $\hat{s}$  » telle que «  $f(\hat{s}) < f(s)$  » pour tous «  $s \in \hat{S}$  », pour un problème de maximisation ça consiste à trouver la solution «  $\hat{s}$  » telle que «  $f(\hat{s}) > f(s)$  » pour tous «  $s \in \hat{S}$  ».

Notre travail consiste à reformuler le problème de diagnostic des huiles de transformateur afin de pouvoir bénéficier des algorithmes ACO et BCO. [2.2]

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

On dispose d'une base de données constituée d'un certain nombre d'échantillons dont on connaît la décision à partir des résultats provenant des tests physico-chimiques déjà effectués, les échantillons de cette base de données sont regroupés, selon leurs décisions, en quatre classes (garder, filtrer, régénérer, jeter), le problème est de déterminer la décision pour un échantillon quelconque en se basant sur cette base de données et en se servant de l'ACO.

L'idée principale est que les fourmis artificielles fassent une comparaison de l'échantillon en question avec les échantillons de la base de données selon une certaine fonction de performance (comparaison), et prendre la décision associée à l'échantillon le plus similaire.

L'idée décrite ci-dessus est générale, et dans ce qui suit on décrira un algorithme plus détaillé.

Dans cet algorithme les fourmis font des tours constitués d'un certain nombre de pas et comparent selon une fonction de performance pour donner comme solution, le tour dont les échantillons qui le constituent sont les plus similaires à l'échantillon à diagnostiquer. Afin de

rendre la solution plus lisible, on calcule « des pourcentages 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 le calcul des pourcentages est donné par :

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

$i=1, 2, 3, 4$

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.

### **Le pseudo code de l'algorithme :**

---

#### **Algorithme 3.1 : ACO pour le diagnostic de l'huile de transformateur**

---

##### **Début**

**Initialiser** les traces de phéromone et les paramètres de l'algorithme ;

**Calcul** de l'information heuristique ;

**Tant que** le critère d'arrêt n'est pas atteint, faire :

**Pour** chaque fourmi  $m, m=1, \dots, \dots$ , nombre de fourmis ;

**Pour**  $k=1, \dots, \dots$ , nombre de pas ;

**Déplacer** dans la base de données selon la loi de déplacement

**Fin pour**

**Evaluer** la solution (le tour effectué)

Faire la mise à jour de la phéromone

Faire l'évaporation de la phéromone.

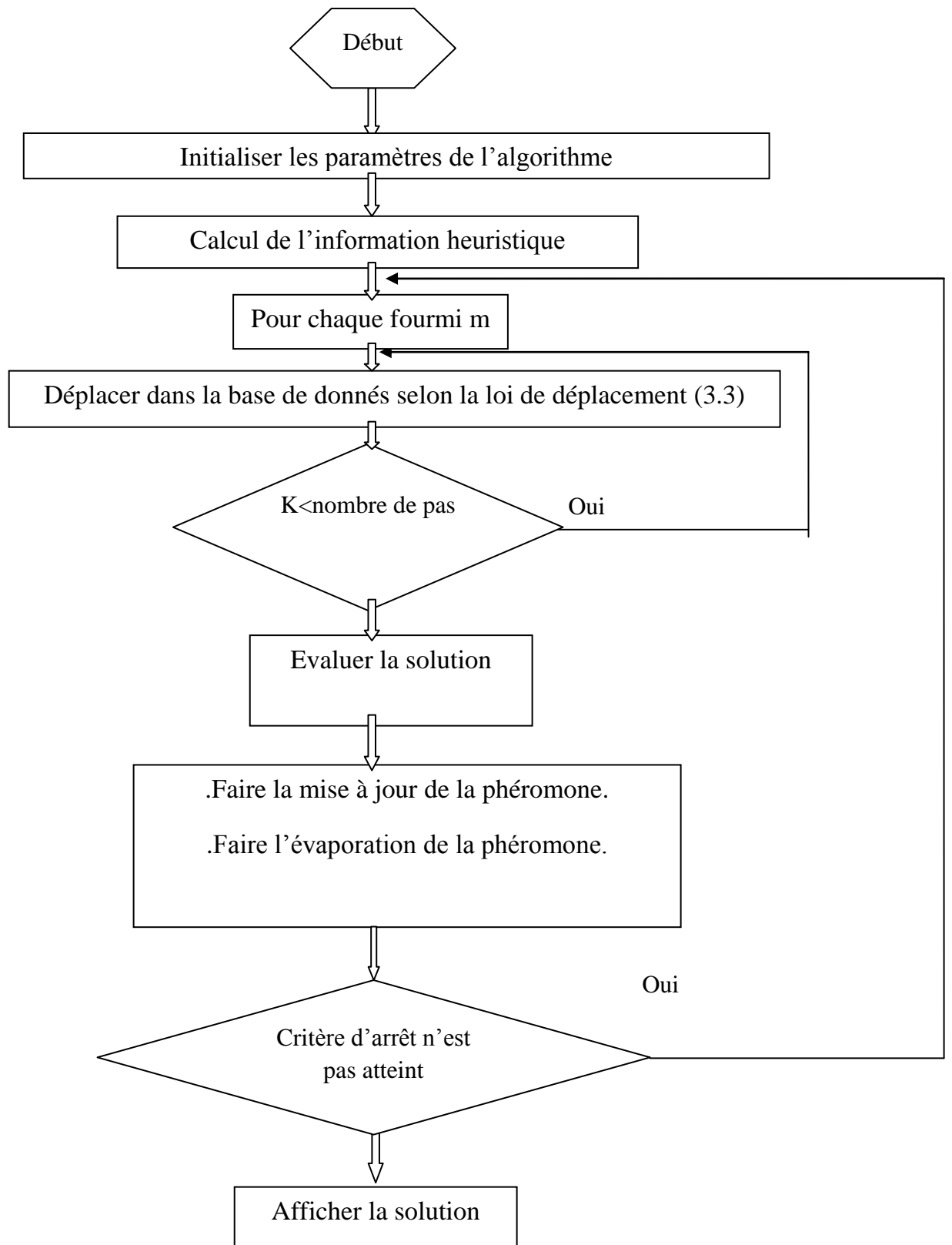
**Fin pour**

**Fin tant que**

**Afficher** la solution en fonction du nombre d'itérations

**Fin.**

---

**Organigramme explicatif des différentes étapes de l'optimisation par colonies de fourmis :**

### 2.3.1. Les caractéristiques de l'algorithme :

Dans cette partie on va définir les différents paramètres et fonctions qui constituent notre algorithme selon le problème à résoudre.

#### **Le nombre de pas effectués :**

Le nombre de pas que les fourmis vont effectuer dépend d'une part de la base de données, et d'autre part de son impact sur la précision et sur le temps de convergence vers la solution optimale.

Nombre de pas $\leq$ min (nombre d'éléments constituant chaque classe)
--

Si le nombre de pas est supérieur à cette limite les résultats seront éronés.

#### **La fonction de comparaison ou fonction objectif:**

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 pour calculer information heuristique et la quantité de phéromone à déposer sur le tour.

#### **La loi de déplacement des fourmis :**

Durant la construction d'un tour par une fourmi, celle-ci se déplace d'un échantillon à un autre selon une loi de déplacement définie par une probabilité et obéissant à une contrainte prédéfinie.

$$P_{ij}^k(t) = \begin{cases} \frac{\tau_j(t)^\alpha \eta_{ij}^\beta}{\sum_{l \notin J_i^k} \tau_j(t)^\alpha \eta_{il}^\beta}, & \text{si } j \notin J_i^k \\ 0 & \text{si } j \in J_i^k \end{cases} \quad (2.3)$$

$J_i^k$  : L'ensemble des échantillons déjà visités, et « t » et le temps.

La contrainte exige une probabilité nulle pour les échantillons déjà visités, les paramètres  $\alpha$ ,  $\beta$  indiquent la stratégie de construction de la solution utilisée par la colonie de fourmis, si ( $\alpha = 0$ ) cela veut dire que les fourmis vont utiliser seulement l'information heuristique, et si ( $\beta = 0$ ) cela veut dire que les fourmis ne vont communiquer que via la phéromone.

**L'information heuristique :**

L'information heuristique est l'envie d'aller d'un échantillon  $i$  vers un échantillon  $j$ , elle est définie comme on a dit précédemment en fonction de la fonction de comparaison  $F$ .

L'information heuristique est définie comme étant l'inverse de  $F$  appliqué entre l'échantillon  $i$  et l'échantillon  $j$  telle que:

Si entre deux échantillons quelconques de la base de données les valeurs des tests physico-chimiques sont relativement loin l'une de l'autre, l'heuristique sera relativement grande ce qui conduit à une diminution de la probabilité d'aller de l'échantillon «  $i$  » vers l'échantillon «  $j$  », et inversement, si ces valeurs sont proches l'heuristique augmente en favorisant le déplacement de l'échantillon «  $i$  » vers l'échantillon «  $j$  ».

Afin de rendre l'effet de cette information plus correcte. On introduit ce qu'on appelle le poids de l'échantillon à visiter dans les calculs.

Le poids d'un échantillon est l'inverse de «  $F$  » appliqué entre l'échantillon «  $j$  » à visiter et l'échantillon qu'on veut tester, si pour un échantillon de la base de données, cette valeur est grande cela veut dire que les deux échantillons sont proche.

$$\eta_{ij} = \frac{1}{F(E_i, E_j) * F(E, E_j)} \quad (2.4)$$

**La phéromone :**

La phéromone est le paramètre principal qui détermine la performance de notre algorithme, la quantité de phéromone déposée par les fourmis peut être constante, ou en fonction de la qualité de la solution. [2.4]

Durant le déplacement d'une fourmi sur la base de données pour construire une solution, à chaque fois qu'elle fait un pas, elle compare l'échantillon à tester avec l'échantillon visité selon  $F$  déjà définie, quand la fourmi termine le tour elle associe à chaque pas du tour la même quantité de phéromone définie pour un tour effectué comme étant l'inverse de la somme des  $F_i$  pour tous ces  $n$ -pas :

$$\Delta\tau(\text{tours}) = \frac{1}{\sum_{i=1}^{tr} F(E, E_i)} \quad (2.5)$$

$$\tau_j(t + 1) = \tau_j(t) + \Delta\tau(\text{tour}) \quad (2.6)$$

$E$  : l'échantillon à tester.

$E_i$  : les échantillons ( $i$ ) qui forment le tour.

$tr$  : le nombre d'échantillons qui constituent un tour.

$\tau_j$  : la phéromone de l'échantillon ( $j$ ).

Quand une fourmi termine un tour, elle commence le suivant à partir de l'échantillon où elle s'est arrêtée.

**L'évaporation de la phéromone :**

Quand une fourmi termine un tour elle dépose de la phéromone, et juste après, l'évaporation se fait avant le prochain tour selon la fonction suivante :

$$\tau_j(t + 1) = \tau_j(t) * (1 - \rho) \quad (2.7)$$

$\tau_j$  : La phéromone de l'échantillon « j ».

$\rho$  est un nombre réel appartenant à l'intervalle [0,1] exprimant le taux d'évaporation.

**2.3.2. L'Algorithme de sélection RWS:**

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. [2.3]

Cet algorithme sera utilisé sur un vecteur « V » de dimension « N » tel que V(i) représente le poids attribué à l'index « i ».

Le résultat sera l'index du poids choisi, donc d'une façon générale cet algorithme peut être utilisé pour n'importe quel problème de sélection aléatoire. Dans notre travail on a un nombre de « E » échantillons de la base de données, dont on attribue à chacun la probabilité calculée à

partir de la loi de déplacement des fourmis expliquée précédemment, en appliquant l'algorithme au vecteur de probabilité de taille « E », la sortie sera l'index de l'échantillon qui va être choisi par la fourmi.

**2.3.3. Résultats de l'ACO amélioré par le RWS:**

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.

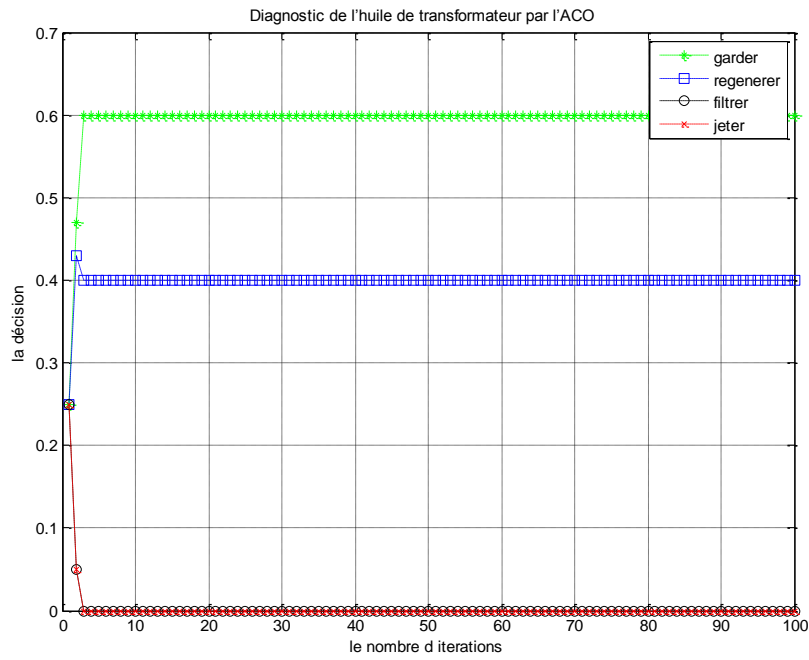


Figure 2.1: La décision pour l'échantillon n° 2 avant l'introduction de RWS.

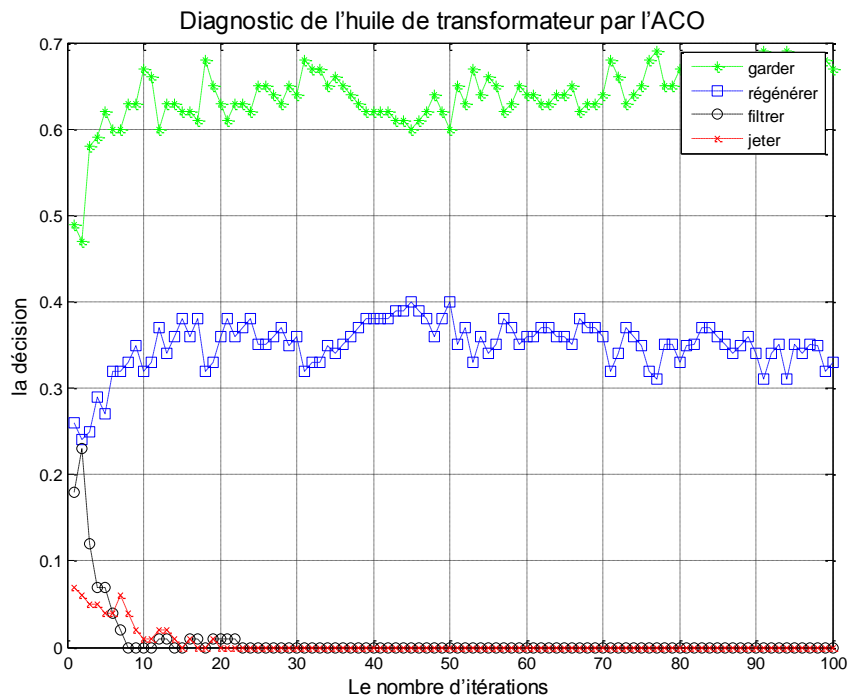


Figure 2.2: Diagnostic de l'échantillon n°2 par ACO amélioré par RWS.



**Constatation :**

Avant l'introduction de RWS, 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.

L'application de l'algorithme de sélection « RWS » aide les fourmis à éviter d'entrer dans une boucle et donc d'éliminer le problème de convergence précoce de l'algorithme ACO.

Les graphes de décision commencent à converger vers la bonne solution à partir de la dixième itération.

On remarque aussi que toutes les décisions ont été conformes aux décisions des experts sauf la décision sur l'échantillon (2) qui est régénérer. L'ACO a donné garder comme solution concernant cet échantillon.

**2.3.4. 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.

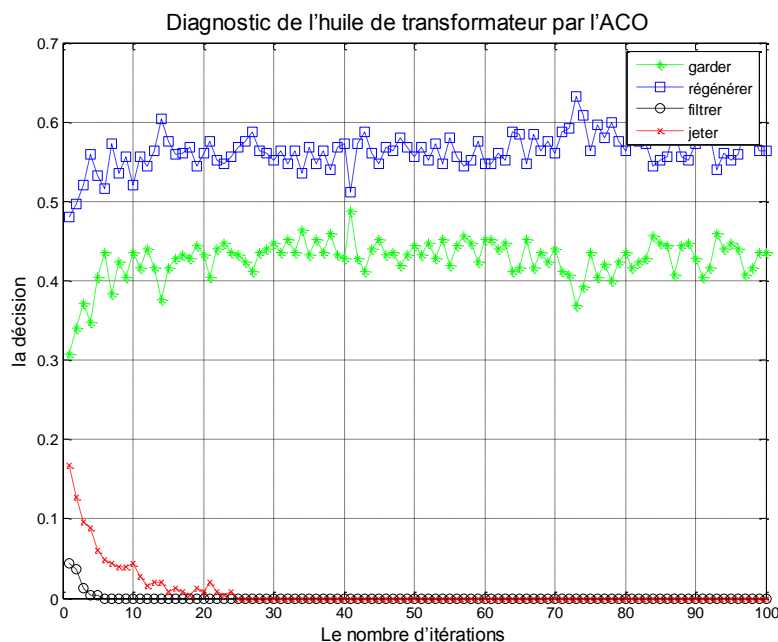
- ✓ Premièrement, on calcule une valeur moyenne « moy » de l'acidité, d'après la base de données donnant la décision « garder »,
- ✓ on compare la valeur de l'acidité de l'échantillon à tester, avec la valeur moyenne « moy », et on note la valeur de comparaison par « Cm1 ».
- ✓ pour chaque échantillon « 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 :

$$F'(E, E_i) = Pr(i) * F_{moy} * \frac{F(E, E_i)}{F(E, EG)} \quad (2.8)$$

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

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

Le résultat après cette amélioration est présenté pour l'échantillon « E2 » de la table «2.1 » à la figure 2.3 :



**Figure 2.3 :** 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.

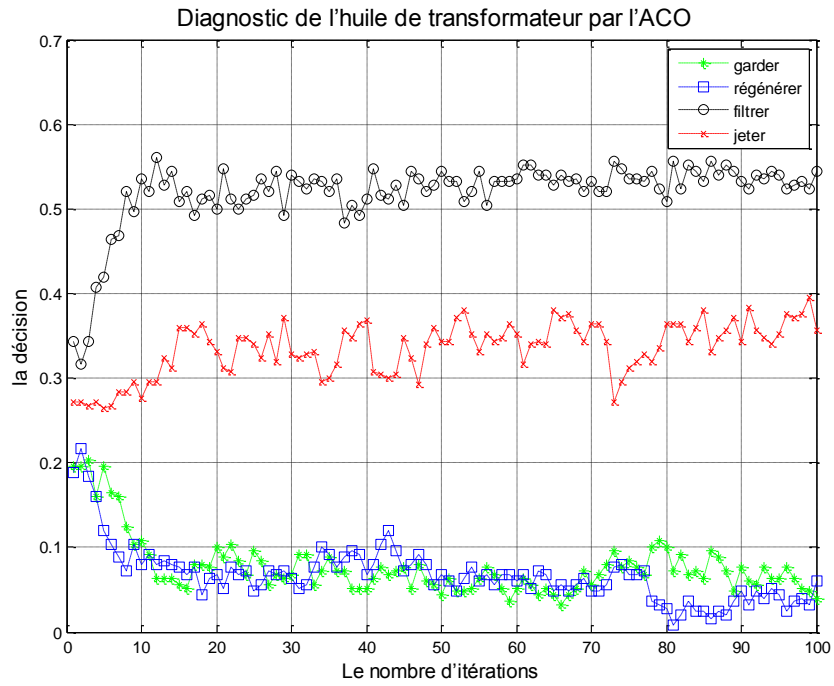


Figure 2.4 : Diagnostic de l'échantillon E3 après amélioration.

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

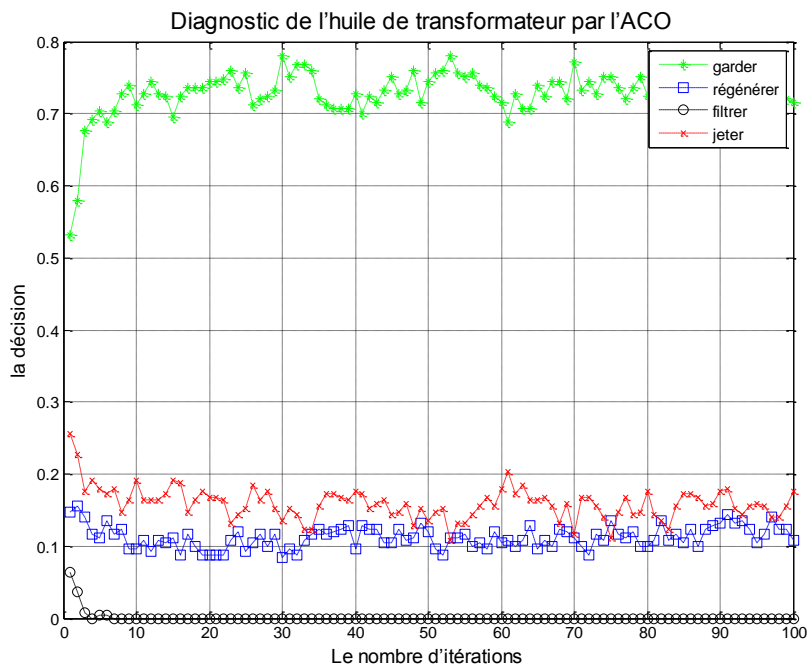
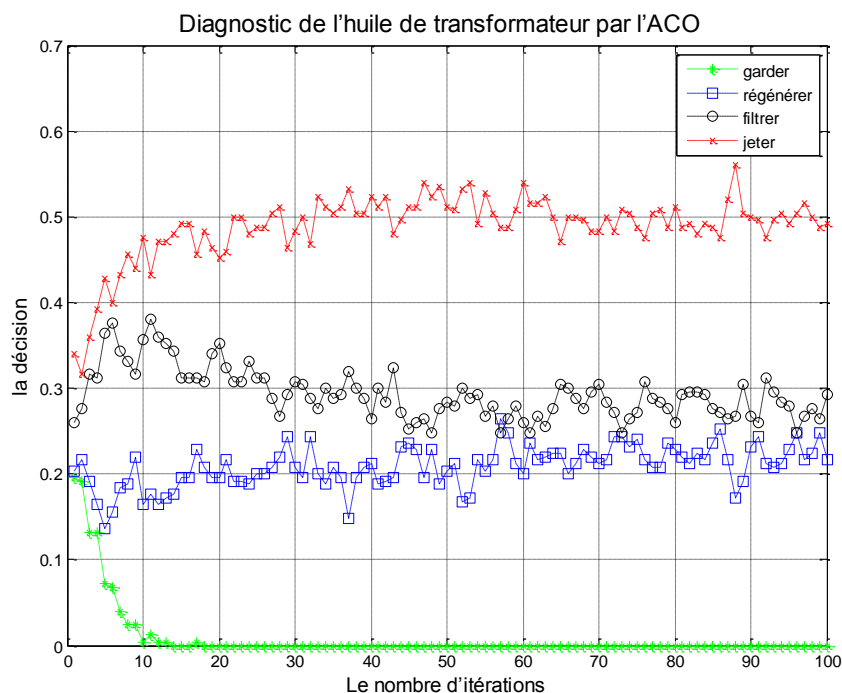


Figure 2.5 : Diagnostic de l'échantillon E1 après amélioration.



**Figure 2.6:** Diagnostic de l'échantillon E4 après amélioration.

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

**2.4. 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.

$$F(E, E_b) = \frac{1}{6} [ \sum_{i=1}^6 |C_E(i) - C_B(i)| ] \quad (2.9)$$

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.

**Le pseudo code de l'algorithme :**

---

**Algorithme 4.1** : BCO appliqué au diagnostic.

---

**Tant que**  $N < P$ 

\*Pour chaque abeille

**Tant que**  $k < m$ 

-Evaluer tous les points (échantillons)

-Choisir un point à visiter selon « the roulette wheel »

 $K = k + 1$ **Fin de Tant que**

\*Evaluer toutes les solutions partielles

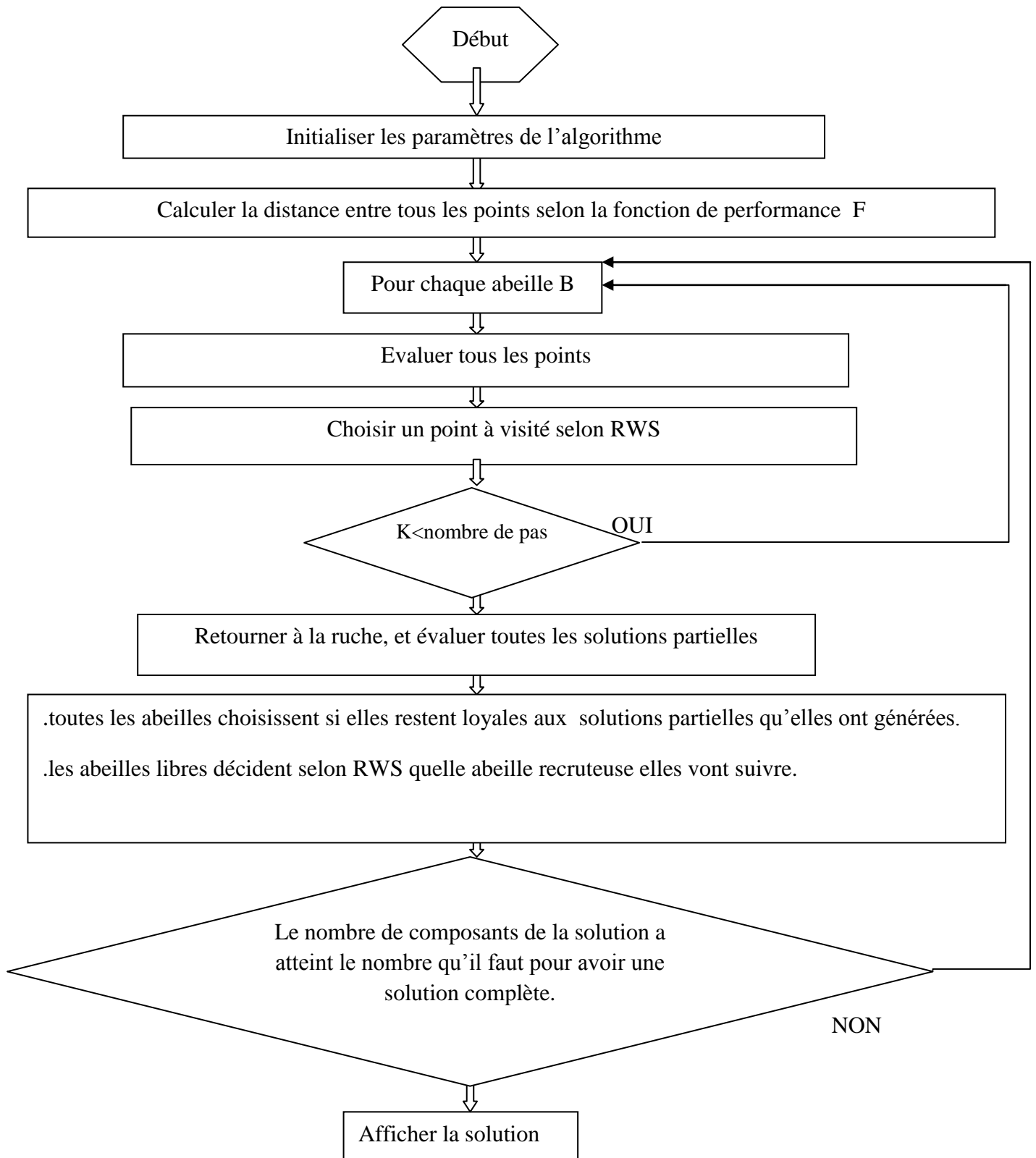
\* Chaque abeille décide selon « the roulette wheel » d'abandonner sa solution ou de la garder

\*Chaque abeille libre choisit selon « the roulette wheel » une abeille recruteuse pour la suivre

\* $N = N + m$ **Fin de Tant que****Affiche la solution**

---

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



### 2.4.1. Les paramètres de l'algorithme :

#### Le nombre de pas à faire pour construire une solution partielle :

Il y a une relation entre le nombre d'itérations «N » pour former une solution complète et le nombre de pas « K » à faire durant chaque construction d'une solution partielle.

Si le nombre de composants de la solution partielle est «P », alors on aura cette relation :

$$P=N*K \dots \dots \dots (2.10)$$

#### La probabilité qu'une abeille reste loyale à sa solution :

Sachant qu'à chaque itération, les abeilles retournent à la ruche pour évaluer leurs solutions, les résultats de l'évaluation seront enregistrés dans un vecteur appelé « évaluation », de taille égale au nombre des abeilles.

Alors à une itération « i » la probabilité qu'une abeille b reste loyale à sa solution partielle est donnée par la relation suivante :

$$P_b^i = e^{-\frac{\max(\text{evaluation } i) - \text{evaluation } (b)}{i}} \dots \dots \dots (2.11)$$

On voit bien que si l'abeille b a la valeur maximale de la fonction de performance, la probabilité qu'elle reste loyale à sa solution sera égale à :

$$P_b^i = e^0 = 1$$

La probabilité qu'une abeille reste loyale à sa solution est proportionnelle à la valeur de la fonction de performance.

A cette itération, on aura une probabilité attribuée à chaque abeille.

En appliquant « the roulette wheel selection » à ce vecteur, on détermine les abeilles qui gardent leurs solutions.

#### La probabilité qu'une abeille recruteuse peut être choisie :

Après la détermination des abeilles libres, on forme un autre vecteur d'évaluation « évaluation' » extrait du vecteur « évaluation » tel que tous les éléments attribués déjà aux abeilles libres seront supprimés.

A une itération i, la probabilité qu'une solution partielle b peut être choisie par une abeille libre est donnée comme suite :

$$P_b^i = \frac{\text{evaluation } (i)}{\text{somme } (\text{evaluation } )} \dots \dots \dots (2.12)$$

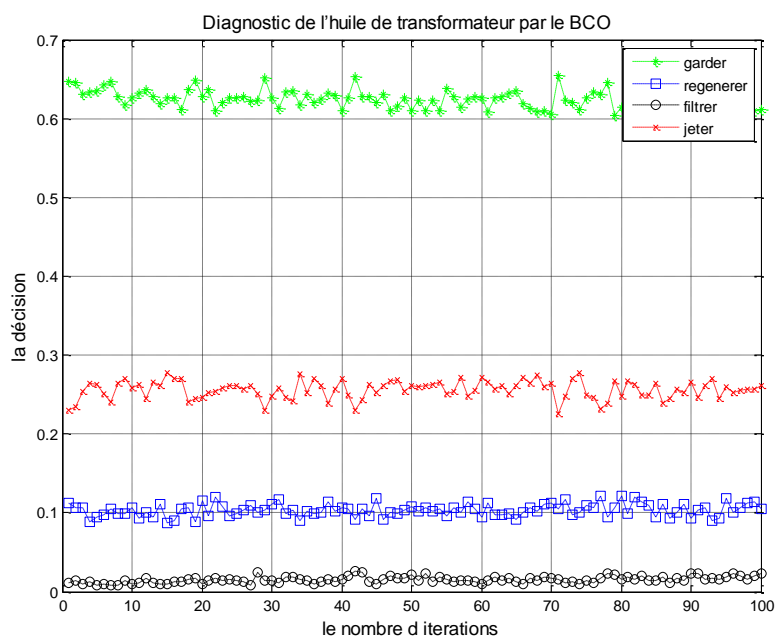
Le vecteur « évaluation' » est construit afin de comparer juste entre les abeilles loyales à leurs solutions, comme on peut le voir ; l'abeille qui a la plus grande valeur de fonction d'évaluation va avoir la plus grande probabilité.

Pour déterminer si une abeille libre choisit une abeille recruteuse on applique « the roulette wheel selection » sur le vecteur P' calculé par l'équation « 4 », et leurs solutions partielles seront les mêmes avant de commencer le prochain pas.

#### 2.4.2. Diagnostic par le BCO:

Dans cet algorithme, il y a une évolution de la solution partielle en fonction du nombre d'itérations, 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 les mêmes échantillons qu'on a utilisé pour entrainer l'ACO. Le résultat pour l'échantillon 1 est présentés à la figure 2. :



**Figure 2.7 :** Résultat du diagnostic de l'échantillon1 par BCO.

Les résultats du diagnostic des quatre échantillons de la table 3.1, par BCO, sont présentés dans la table 4.2



	garder	régénérer	filtrer	jeter
<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 2.2 :** Diagnostic des quatre échantillons par BCO

### **2.5. Comparaison entre BCO et 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 [2.6], ce qui lui procure l'avantage d'un temps d'exécution réduit par rapport à l'ACO.

### **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.

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 [2.7]. Notons que cette stratégie le rend plus rapide que l'ACO mais augmente la marge de l'erreur

### **Références :**

[2.1] **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.

[2.2] **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.

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

[2.4] **H. Boubertakh**, "contribution à l'optimisation par algorithmes évolutionnaires des contrôleurs flous", Thèse de Doctorat, Ecole Nationale Polytechnique, Alger, 2009, pp. 38-51.

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

[2.6] **D. Karaboga**, **B. Basturk**, "Artificial bee colony optimization algorithm for solving constrained optimization problems", Volume 4529, Edit. Springer, Berlin. 2007, pp. 789-798

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

# **Chapitre 3**

## **Diagnostic par l'algorithme hybride**

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

L'idée de l'algorithme hybride est de faire une recherche dans l'espace des solutions partielles et complètes à la fois, les agents artificiels de l'algorithme hybride se comportent dans la première itération comme des abeilles, ils cherchent dans l'espace des solutions partielles en faisant, à chaque étape, un certain nombre de pas, revenir à la ruche, évaluer les solutions et faire les prochains pas selon les informations communiquées entre eux jusqu'à construire des solutions complètes, à cette étape le programme des abeilles est terminé, et le résultat est affiché, mais dans le programme hybride les agents effectuent une évaluation des solutions complètes et déposent de la phéromone.

Dans la prochaine itération, les agents artificiels hybrides ne choisiront pas les points à visiter juste selon la fonction de performance définie dans le l'algorithme des abeilles, mais ils vont aussi utiliser la phéromone comme paramètre de décision, la mise à jour de la phéromone son évaporation de va limiter la recherche dans l'espace des solutions sous optimales, ce qui donne une meilleur solution.

#### **Pseudo-code de l'algorithme :**

Le pseudo-code de cet algorithme hybride peut se formuler comme suit :

---

#### **Algorithme 5.1 : ACO-BCO Hybride.**

---

#### **Initialiser les paramètres de l'algorithme**

**Tant que le critère d'arrêt n'est pas atteint faire :**

**Tant que  $N < P$**

\*Pour chaque agent hybride

**Tant que  $k < m$**

-Evaluer tous les points

-Choisir un point à visiter selon «the roulette wheel »

$K = k + 1$

**Fin de Tant que**

\*Evaluer toutes les solutions partielles

\* Chaque agent hybride décide selon « the roulette wheel » d'abandonner sa solution ou de la garder ;

\*Chaque agent hybride libre choisit selon « the roulette wheel » une abeille recruteuse pour la suivre ;

\* $N = N + m$

**Fin de Tant que**

\*Evaluer la solution complète trouvée

\*Faire la mise à jour de la phéromone

\*Faire l'évaporation de la phéromone

**Fin de tant que**

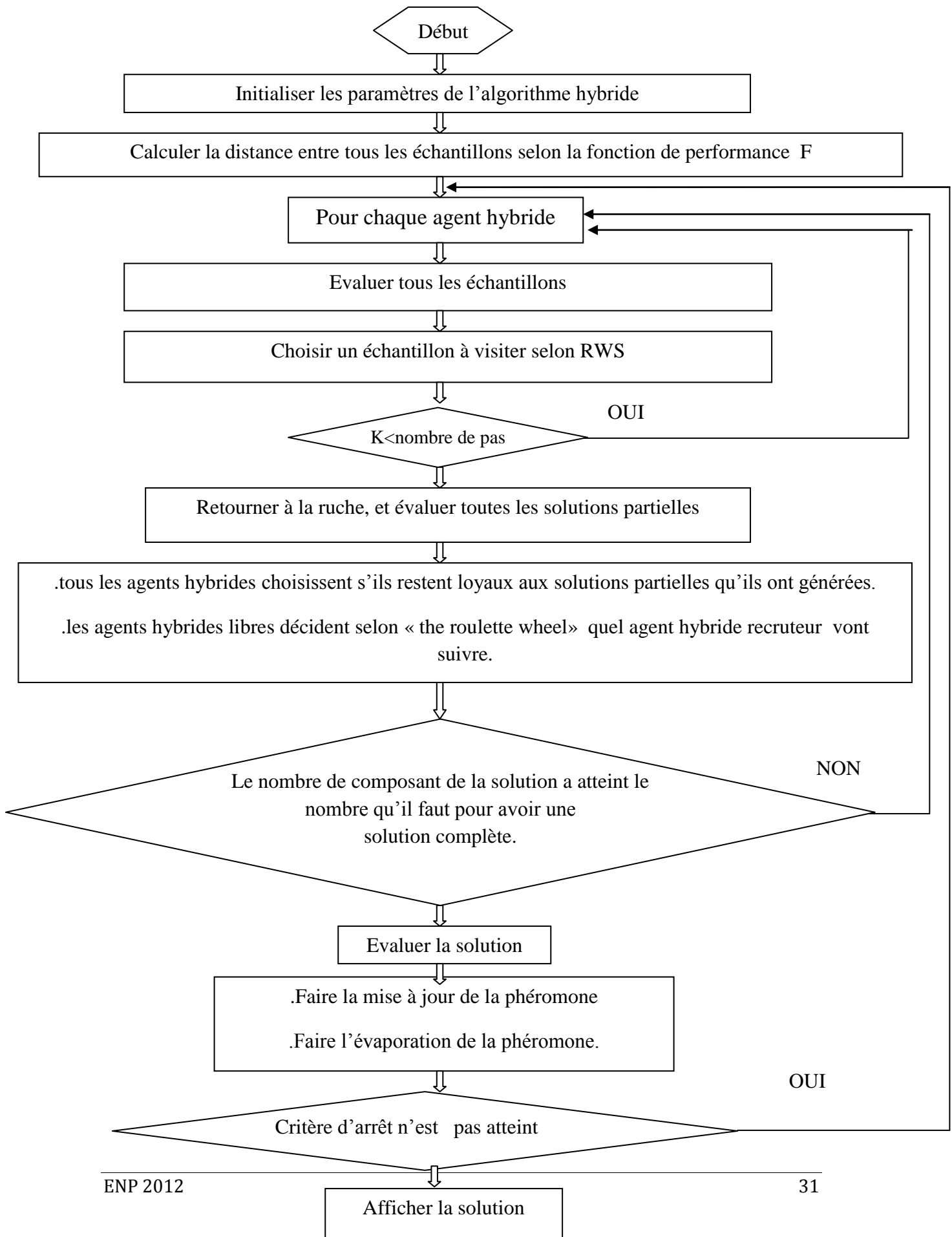
**Affiche la solution ;**

\*Le nombre de composants à choisir pour chaque solution partielle est m ;

\*Le nombre d'itérations pour construire une solution complète est  $N=P/m$

---

**Organigramme explicatif de l'algorithme hybride :**



### 3.2. Paramètres de l'algorithme hybride :

#### Le choix des échantillons à visiter :

Dans l'algorithme hybride, on essaye d'optimiser le processus de choix des échantillons à visiter en introduisant la phéromone comme un paramètre essentiel dans l'évaluation des points, en donnant des valeurs de la fonction de performance plus grande aux points qui ont été des composants des meilleurs solutions afin d'augmenter leurs probabilités d'être choisis. [5.1]

On peut directement exploiter la formule utilisée par les fourmis.

$$P_{ij}^k(t) = \begin{cases} \frac{\tau_j(t)^\alpha \eta_{ij}^\beta}{\sum_{l \notin J_i^k} \tau_l(t)^\alpha \eta_{il}^\beta}, & \text{si } j \notin J_i^k \\ 0 & \text{si } j \in J_i^k \end{cases} \quad (5.1)$$

#### L'influence des paramètres $\alpha$ et $\beta$ :

Comme dans l'algorithme ACO, le choix de ces paramètres définit quelle information doit être la plus utilisée par les agents hybrides :

- ✓ si  $\alpha=0$  ; la phéromone est éliminée et l'algorithme devient pareil au BCO,
- ✓ si  $\beta=0$  ; les agents hybrides vont juste utiliser la phéromone comme information.

En faisant varier le rapport entre ces deux paramètres, on peut choisir quelle information aura l'effet prépondérant.

#### La probabilité qu'un agent hybride reste loyal à sa solution :

Dans l'algorithme BCO, les abeilles évaluent leurs solutions et enregistrent les résultats dans un vecteur appelé « évaluation », en suite elles utilisent la formule (5.2) pour calculer la probabilité qu'une abeille reste loyal à sa solution :

$$P_b^l = e^{-\frac{\max(\text{evaluation}) - \text{evaluation}(b)}{l}} \quad (5.2)$$

Dans l'algorithme hybride, les agents s'assurent de bénéficier de la phéromone, en l'introduisant dans la formule de façon à favoriser les meilleurs solutions.

### 3.3. Résultats

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

Les résultats sont présentés aux figures 3.1, 3.2, 3.3 et 3.4

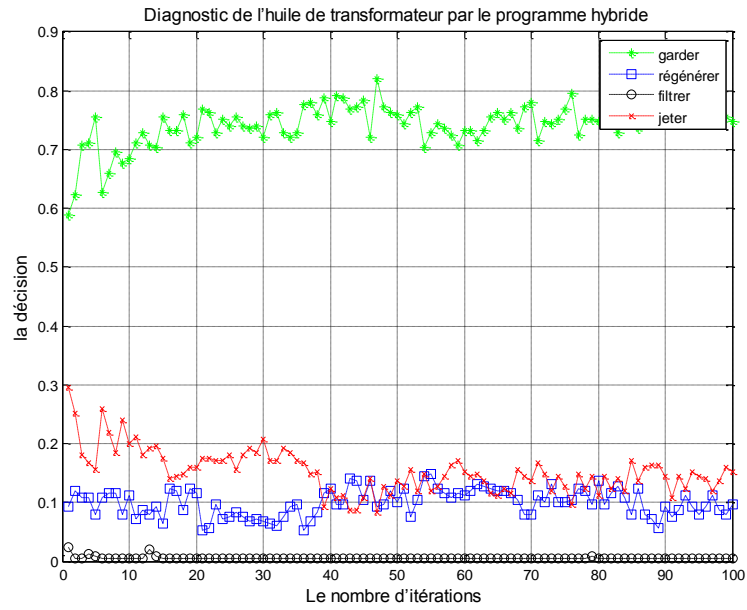


Figure 3.1 : Diagnostic de l'échantillon 1 par le système hybride.

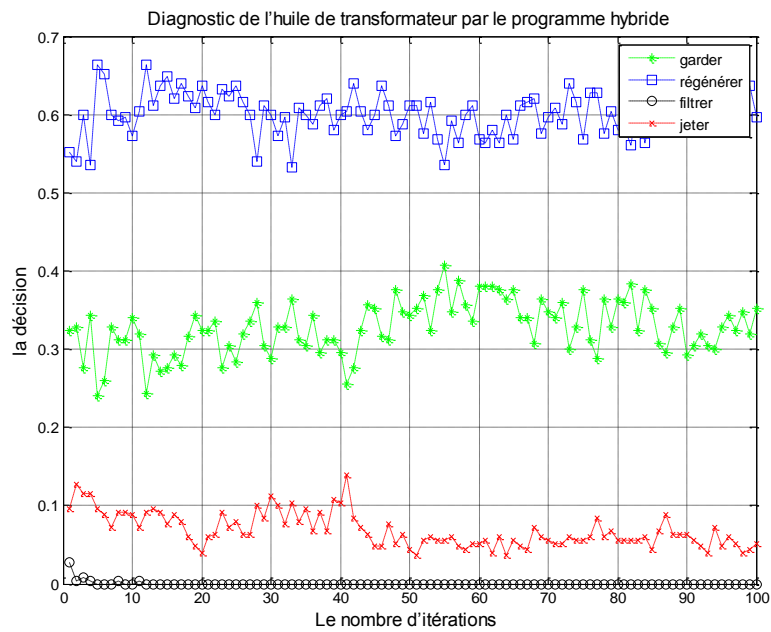


Figure 3.2 : Diagnostic de l'échantillon 2 par le système hybride.



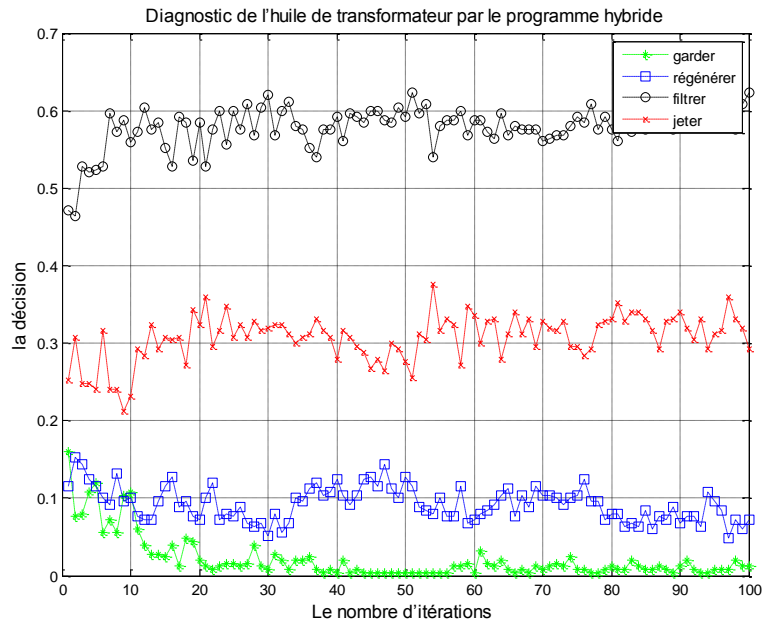


Figure 3.3 : Diagnostic de l'échantillon 3 par le système hybride.

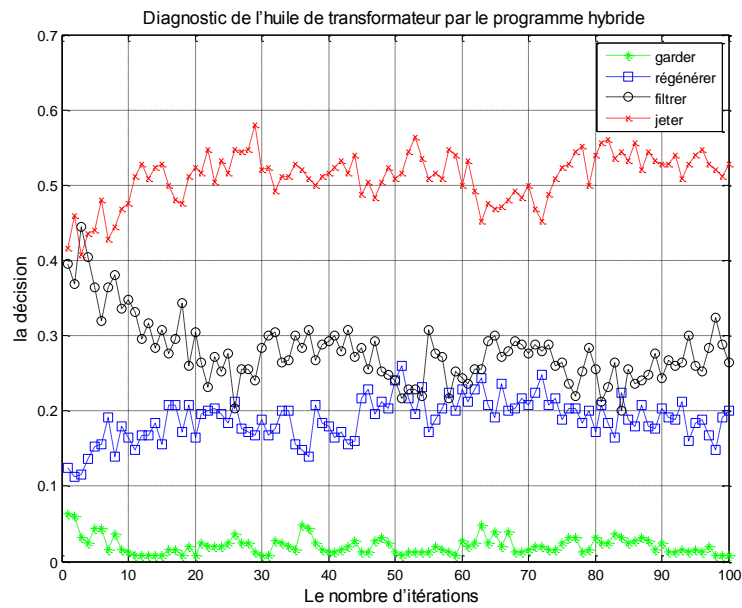


Figure 3.4 : Diagnostic de l'échantillon 4 par le système hybride.

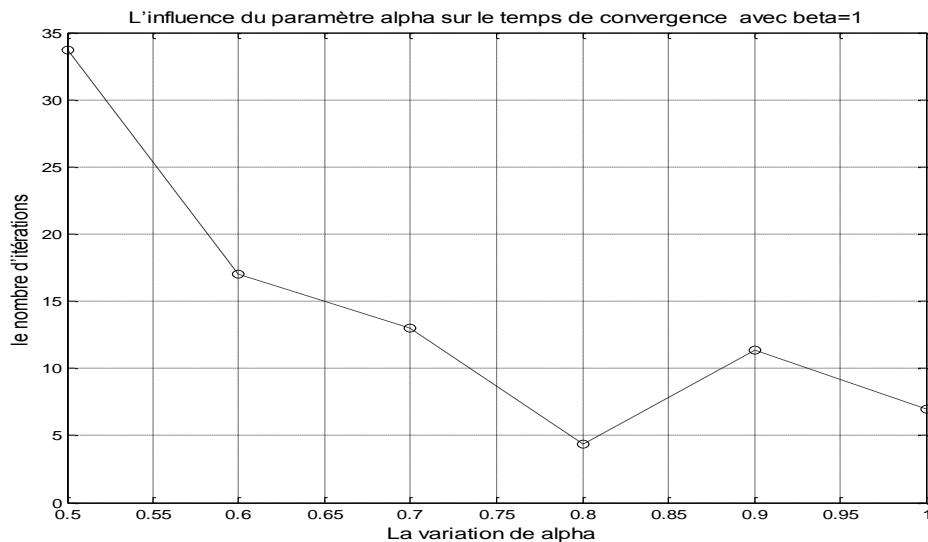
**3.4. Etude des paramètres de l'algorithme hybride :**

L'algorithme hybride utilise des caractéristiques de l'ACO et du BCO simultanément, ce qui le rend dépendant de plusieurs paramètres.

### Le temps de convergence en fonction des paramètres $\alpha$ et $\beta$

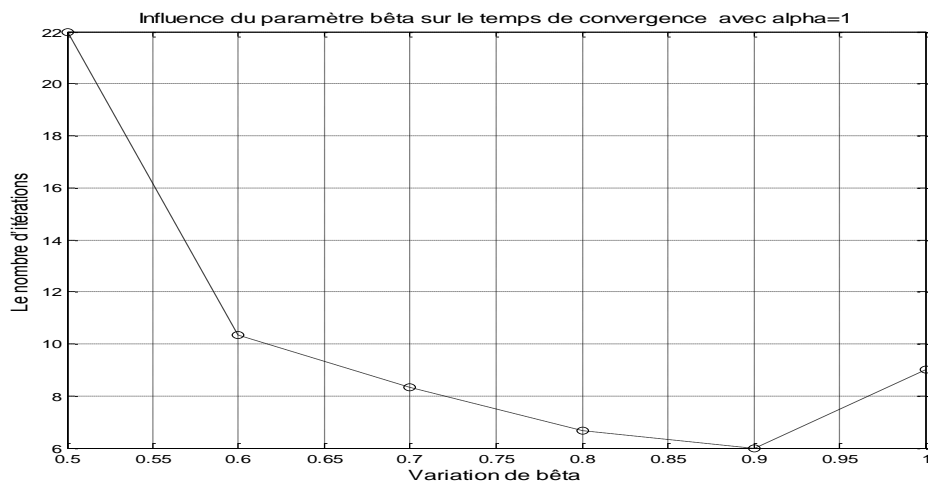
On fixe un des deux paramètres à « 1 » et on fait varier l'autre dans un intervalle où la précision est relativement grande afin de pouvoir choisir ces paramètres selon deux critères, la précision et le temps nécessaire pour aboutir à la convergence.

Le résultat est donné dans le graphe 3.5, avec «  $\beta = 1$  » et «  $\alpha$  » varie dans l'intervalle [0.5, 2] :



**Figure 3.5:** Influence de  $\alpha$  sur le temps de convergence.

Pour «  $\alpha=1$  » et «  $\beta$  » variable dans l'intervalle [0.5, 2] les résultats sont donnés comme suit :



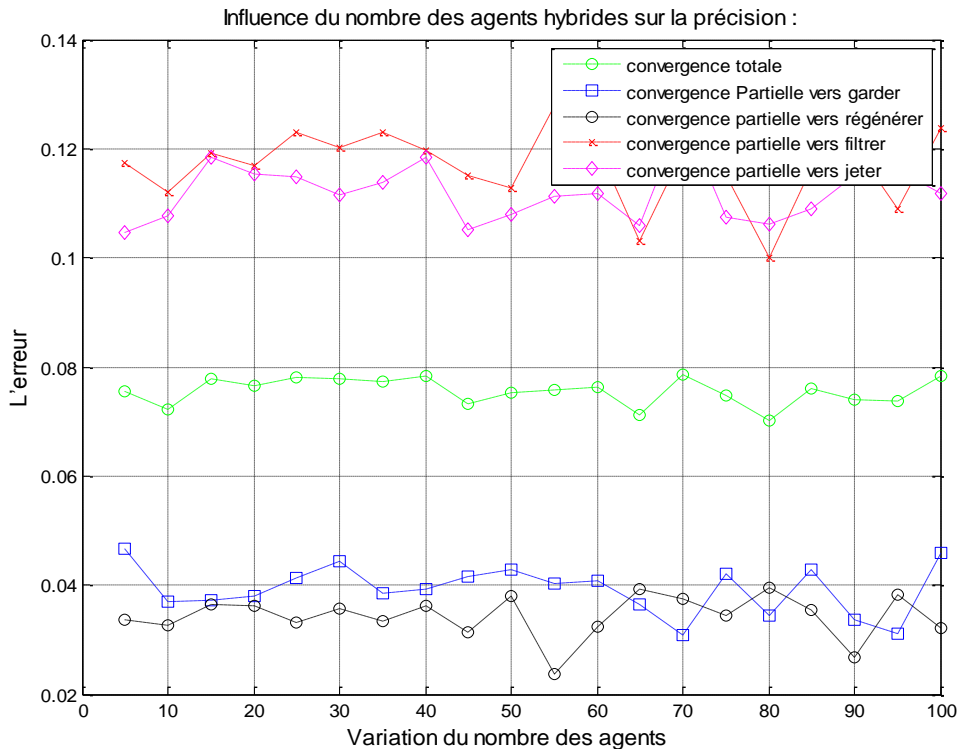
**Figure 3.6 :** Influence de  $\beta$  sur le temps de convergence.

Dans les deux cas on remarque que le temps de convergence diminue.

On propose « 1 » comme valeurs optimales de  $\alpha$  et  $\beta$ .

**L'influence du nombre des agents hybrides sur la précision :**

On fixe tous les paramètres et on fait varier le nombre d'agents hybrides, le résultat est affiché dans le graphe suivant :



**Figure 3.7 :** Variation de la précision du diagnostic en fonction du nombre des agents hybrides.

On remarque que la précision sur la décision : jeter et la décision globale sont améliorées. L'ondulation a diminué lors de l'augmentation du nombre des agents hybride, cela rend la solution plus claire.

**3.5. Comparaison entre les trois algorithmes:**

L'algorithme hybride réalise 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.

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 pas 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 la table suivante :

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

**Table 3.1 :** Comparaison entre les trois algorithmes

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.

### **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.

La comparaison avec les deux premiers systèmes, permet d'apprécier les performances de l'approche hybride.

### **Références :**

[3.1] **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 Générale**

---

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 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